

62

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

**Miehittämättömän trakto-
rin käytön lyhytaikaiset
vaikutukset savimaan
rakenteeseen**

Laura Alakukku, Erkki Aura, Ari Pöyhönen ja Mikko Sampo

Miehittämättömän traktorin käytön lyhytaikaiset vaikutukset savimaan rakenteeseen

**Short-term effects of unmanned
tractor traffic on clay soil structure**

Maatalouden tutkimuskeskus

ISBN 951-729-552-9

ISSN 1238-9935

Copyright

Maatalouden tutkimuskeskus
Laura Alakukku, Erkki Aura,
Ari Pöyhönen 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.

Alakukku, L.^{1,2)}, Aura, E.¹⁾, Pöyhönen, A.¹⁾ & Sampo, M.³⁾ 1999. Miehittämättömän traktorin käytön lyhytaikaiset vaikutukset savimaan rakenteeseen. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisu- ja Sarja A 62. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 44 p. + 9 app. ISSN 1238-9935, ISBN 951-729-552-9.

¹⁾ Maatalouden tutkimuskeskus, Kasvintuotannon tutkimus, Peltokasvit ja maaperä, 31600 Jokioinen, laura.alakukku@mtt.fi, erkki.aura@mtt.fi

²⁾ Helsingin yliopisto, Maa- ja kotitalousteknologian laitos, PL 27, 00014 Helsingin yliopisto

³⁾ Modulaire Oy, 14201 Turenki

Tiivistelmä

Avainsanat: maan rakenne, muokkauskerros, pohjamaa, peltoliikenne, typpisato

Käyttämällä nykyaikaista paikannus-, automaatio- ja säätötekniikka Modulaire Oy on rakentanut miehittämättömän, kevyen traktorin. Maatalouden tutkimuskeskuksessa tutkittiin Modulaire-tekniikan käytön vaikutuksia maahan ja viljojen satoon kahdessa kenttäkokeessa vuosina 1995–1997.

Kenttäkokeet olivat aitosavimaalla. Toisessa kokeessa viljeltiin pelkästään kevätviljoja ja toisessa myös syysvehnää. Kevyttä traktoria verrattiin keskikokoiseen nelivetotraktoriin kynnettäessä (0,2 m) ja sänkimuokattaessa (0,10–0,15 m). Kevyen traktorin paino oli 2,5 Mg ja sitä käytettiin muokkauksissa ja kylvössä. Traktorissa oli kumitelat (pituus 2000 mm ja leveys 320 mm) ja sen laskennallinen pintapaine kovalla alustalla oli 30 kPa. Verrannetraktori painoi 4–5,35 Mg traktorista ja rengasvarustuksesta riippuen. Sen rengaspaine oli työstä riippuen 80–150 kPa ja laskennallinen pintapaine kovalla alustalla 50–90 kPa.

Kevyen traktorin käyttö vähensi savimaan tiivistymistä 0–0,20 m:n syvyydessä sekä kynnettäessä että sänkimuokattaessa. Kiinnostava yksityiskohta tuloksissa oli se, että mekaaninen vastus oli syysänkimuo-

katuissa kevyen traktorin ruuduissa yleensä pienempi 0,07–0,14 m:ssä kuin kynnetyissä keskikokoisen traktorin ruuduissa. Viljojen siemensatoon kevyen traktorin käyttö ei vaikuttanut merkittävästi. Vuosien 1996 ja 1997 keskiarvona viljojen sato oli kynnetyissä koejäsenessä kevyttä traktoria käytettäessä keskimäärin 4820 kg ha⁻¹ ja keskikokoisella traktorilla muokatuissa ja kylvetyissä koejäsenissä 4700 kg ha⁻¹. Vastaavat sadot olivat syysänkimuokatuissa koejäsenissä 4690 (kevyt) ja 4730 (keskikokoinen) kg ha⁻¹. Satotulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska kevyttä traktoria käytettäessä toukutyöt eivät onnistuneet niin hyvin kuin keskikokoisella tavanomaisella traktorilla.

Kevyt Modulaire-tekniikka on mielenkiintoinen vaihtoehto vähentää maan tiivistymishaittoja tulevaisuudessa. Kevyt viljelYTEKNIikka vaatii kuitenkin sekä traktorin että työkonien edelleen kehittämistä. Samoin sen vaikutusta pohjamaan rakenteeseen, lierojen toimintaan, viljojen satoon, typen hyväksikäyttöön ja maan hydrologisiin ominaisuuksiin voidaan tarkastella vasta pidemmän koejakson jälkeen.

Alakukku, L.^{1,2)}, Aura, E.¹⁾, Pöyhönen, A.¹⁾ & Sampo, M.³⁾ 1999. Short-term effects of unmanned tractor traffic on clay soil structure. Publications of Agricultural Research Centre of Finland. Serie A 62. Jokioinen: Agricultural Research Centre of Finland. 44 p. + 9 app. ISSN 1238-9935, ISBN 951-729-552-9.

¹⁾ Agricultural Research Centre of Finland, Plant Production Research, Crops and Soil, FIN-31600 Jokioinen, Finland, laura.alakukku@mtt.fi, erkki.aura@mtt.fi

²⁾ University of Helsinki, Department of Agricultural Engineering and Household Technology, P.O. Box 27, FIN-00014 Helsinki University, Finland

³⁾ Modulaire Oy, FIN-14201 Turenki, Finland

Abstract

Key words: soil structure, field traffic, topsoil, subsoil, nitrogen yield

Modulaire Ltd. has developed a light, unmanned tractor for agricultural applications. The effects of field operations carried out by a light, unmanned tractor on soil macroporosity and small grain cereal growth were investigated in field experiments on clay soil at the Agricultural Research Centre of Finland (MTT) in 1995–1997.

The light tractor weighed 2.5 Mg, was equipped with rubber tracks 2000 mm long and 320 mm wide, and had an average ground contact stress on a rigid surface of 30 kPa. It was used in tillage and sowing, operations with a high risk of compaction in Finland. The effects of the light tractor are compared with those of a medium-size tractor (4–5.35 Mg, tyre inflation pressure 80–150 kPa, average ground contact stress 50–90 kPa) used in conventional (ploughing to 0.2 m) and conservation (stubble cultivation to 0.10–0.15 m) tillage systems. Two field experiments were established: spring cereals were grown in one and winter wheat in the other.

In both tillage systems the light tractor traffic compacted the 0–0.20 m layer less than the conventional tractor traffic. The K_{sat} in this layer was clearly lower in plots where the conventional tractor was used than in those where the light tractor was

used. Likewise, the macroporosity (>300 and >30 μm) was significantly less in the conventional tractor plots. Even though the plough layer of the light tractor plots was less compacted than that of the conventional tractor plots, there was no significant reduction in yield. In 1996 and 1997 (four yield years), the average grain yield in plots ploughed using the light tractor was 4820 kg and in those ploughed using the medium-size tractor 4700 kg ha⁻¹. In those years the nitrogen yields were 76 (light) and 73 (medium-size) kg ha⁻¹. In stubble cultivated plots the grain yields were 4690 (light) and 4730 (medium-size) kg ha⁻¹ and the nitrogen yields 72 and 71 kg ha⁻¹, respectively. In each year, we had problems in seedbed preparation and sowing operations when using the light tractor. These problems probably affected the yields.

The light, unmanned tractor seems to be an interesting option for avoiding soil compaction due to tractor traffic. The light tractor and its implements must, however, be improved to ensure high working quality in field operations. Likewise, further years of experimentation are needed for a proper evaluation of the effects of the light tractor on subsoil compaction, soil hydrology and crop growth.

Alkusanat

Vuonna 1995 Maatalouden tutkimuskeskuksessa käynnistyi tutkimus, jossa selvitettiin kenttäkokeissa, miten keskikokoisen traktorin korvaaminen kevyellä, miehittämättömällä traktorilla vaikuttaa savimaan rakenteeseen kynnettäessä ja siirryttäessä kyntämättä viljelyyn. Kevyttä traktoria käytettiin muokkauksessa ja kylvössä. Täs-

sä julkaisussa raportoidaan tulokset vuosilta 1995–1997. Kenttäkokeet jatkuvat vuoden 2000 asti.

Tutkimus tehtiin yhteistyössä Modulair Oy:n kanssa. Maa- ja metsätalousministeriö rahoitti tukimusta. Kiitämme kaikkia tutkimuksen toteutukseen ja rahoitukseen osallistuneita.

Jokioisissa heinäkuussa 1999

Laura Alakukku

Erkki Aura

Ari Pöyhönen

Mikko Sampo

Sisällys

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1 Johdanto	7
1.1 Maan tiivistyminen peltoviljelyssä	7
1.2 Perusmuokkauskerrosta syvempi tiivistymä	7
1.3 Tekniset ratkaisut maan tiivistymisen ehkäisemiseksi	10
1.3.1 Rengasvarustus ja telat	10
1.3.1.1 Yksittäisen koneen rengaskoon suurentaminen	10
1.3.1.2 Koneketju matalapainerenkailla	11
1.3.1.3 Renkaiden korvaaminen teloilla	11
1.3.1.4 Pinta- ja rengaspainesuosituksia	12
1.3.2 Vinssiviljely	12
1.3.3 Kiinteät ajourat	13
1.3.3.1 Traktorin raidevälin vakiointi	13
1.3.3.2 Koneenkantajat	14
1.4 Tutkimuksen tavoitteet	15
2 Aineisto ja menetelmät	16
2.1 Koekenttä	16
2.2 Kenttäkokeet	17
2.3 Olosuhteet koejakson aikana	20
2.4 Mittaukset ja määritykset	20
2.4.1 Mittaukset maasta	20
2.4.2 Satomittaukset	22
2.5 Aineiston tilastollinen käsittely	22
3 Tulokset ja niiden tarkastelu	22
3.1 Maan fysikaaliset ominaisuudet	23
3.1.1 Mekaaninen vastus	23
3.1.2 Makrohuokosto	25
3.1.3 Kyllästetyn maan vedenjohtavuus (K_{sat})	27
3.1.4 Lierokanavat	28
3.2 Maan kosteus kasvukauden aikana	32
3.3 Satotulokset	34
3.4 Yleinen tulosten tarkastelu	38
3.4.1 Kyntämättä viljelyyn siirtyminen	38
3.4.2 Peltoliikenteen keventäminen	39
3.4.3 Traktorin keventämisen vaikutus viljelysystemiin	40
3.5 Johtopäätökset	40
Kirjallisuus	41

1 Johdanto

Oldeman et al. (1991) arvioivat maailmanlaajuisesti ihmisen toiminnan haitallisia vaikutuksia maahan. Maan fysikaalisen tilan huononemisesta 82 % (68,3 10⁶ ha) on seurausta maan tiivistymisestä (Oldeman et al. 1991). Se on 3,5 % maa-alasta, jonka tila on maapallolla huonontunut ihmisten toiminnan seurauksena. Tiivistymisongelmat eivät ole jakautuneet maanosittain tasaisesti. Euroopassa tiivistymisen seurauksena huonontunutta maa-alaa on prosentuaalisesti eniten (16,6 % huonontuneesta alasta, Oldeman et al. 1991). Pinta-alallisesti eniten maan tilaa huonontavat vesi- ja tuulieroosio, joiden osuus on 56 ja 28 % vaurioituneesta kokonaisalasta (Oldeman et al. 1991).

Eri tekijöiden välisten riippuvuuksien vuoksi Oldemanin et al. (1991) kokoamasta tilastosta on usein vaikea päätellä, mikä on alkuperäinen syy maan tilan huononemiseen ja mikä on seurausta tilan huonontumisesta. Esimerkiksi maan tiivistyminen voi aiheuttaa eroosiota. Lisäksi Carterin (1994) mukaan peltoliikenteen aiheuttama maan tiivistyminen vaikeuttaa merkittävästi kevenettyyn maan muokkaukseen siirtymistä, joka yleismaailmallisesti tarkasteltuna olisi eräs keino kontrolloida eroosiota.

1.1 Maan tiivistyminen peltoviljelyssä

Nykypäivän pitkälle koneellistetussa peltoviljelyssä maan tiivistymisestä on tullut merkittävä ongelma. Håkanssonin (1994) mukaan peltomaan haitallinen tiivistyminen on useimmissa tapauksissa seurausta siitä, että pellolla ajetaan raskailla koneilla huonoissa olosuhteissa. Tiivistyminen on seurausta paitsi tehokkaampien ja painavampien koneiden käytöstä peltotöissä myös kasvinviljelyn muuttumisesta aikaisempaa intensiivisemmäksi ja yksipuolisemmäksi.

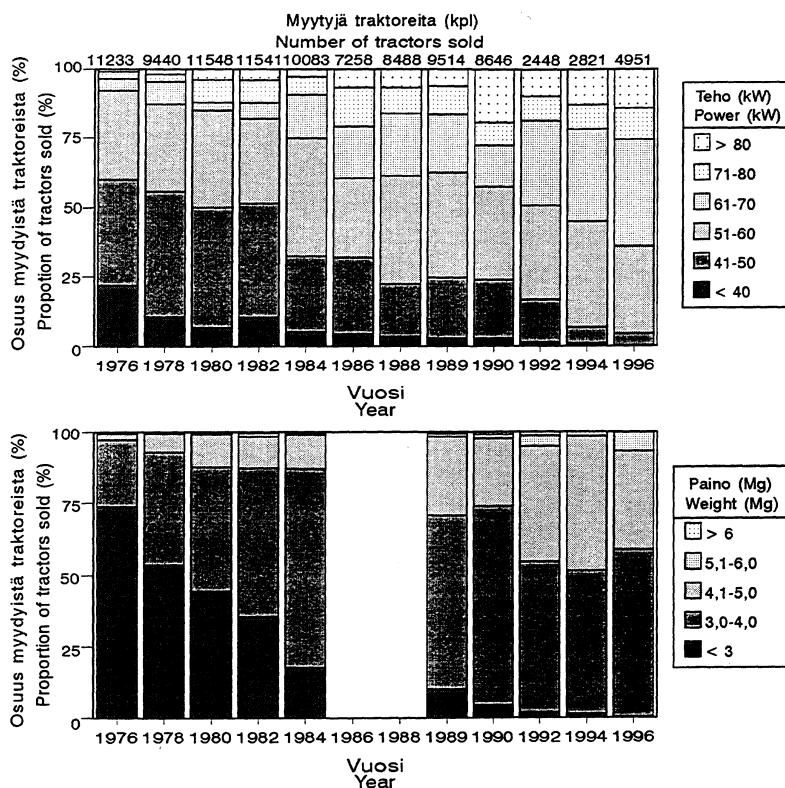
Maan ominaisuudet, käytetyt koneet ja viljelyn toteutus (mm. ojitus, peltoajon ajoitus, ajokertojen määrä, viljelykierto) vaikuttavat siihen, miten peltoliikenne tiivistää maata. Tiivistymisriski on suuri, kun maa on kosteaa ja pellolla ajetaan painavilla koneilla pintapaineen ollessa kohtalainen. Suomalaisilla tiloilla kriittisiä työvaiheita ovat muokkaus ja sadonkorjuu sekä lietelannan levitys aikaisin keväällä. Soane et al. (1981a,b), Håkansson et al. (1988) sekä Horn & Lebert (1994) ovat tarkastelleet monipuolisesti eri tekijöiden vaikutusta maan tiivistymiseen.

Tiivistyminen pienentää makrohuokoston (halkaisija > 30 μm = 0,03 mm) tilavuusosuutta maassa sekä heikentää huokosten jatkuvuutta. Makrohuokoston muutokset vaikuttavat lähes kaikkiin maan fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin prosesseihin ja ominaisuuksiin. Tiivistyminen heikentää mm. maan vedenläpäisykykyä. Tämä puolestaan lisää pintaveden virtausta, mikä aiheuttaa eroosiota ja ravinteiden huuhtoutumista vesistöön. Maan tiivistyminen lisää myös maan muokkaamistarvetta. Lisäksi tiivistyminen aiheuttaa usein satotappioita ja haittaa kasvien typenottoa. Tiivistymisen vaikutuksia maahan, kasvien kasvuun ja ympäristöhaittoihin ovat tarkastelleet laajasti mm. Soane & Ouwkerk (1994) ja Håkansson et al. (1988).

1.2 Perusmuokkauskerrosta syvempi tiivistymä

Viime vuosikymmenien aikana maataloustöissä on lisätty työsaavutusta hankkimalla entistä tehokkaampia ja painavampia traktoreita (Kuva 1). Suuntaus on sama kaikissa teollistuneissa maissa. Esimerkiksi Saksassa vuonna 1976 rekisteröidyistä uusista traktoreista 33 % oli teholtaan yli 44 kW, mutta vuonna 1992 vastaava luku oli 77 % (Renius 1994).

Koneiden painon jatkuva kasvu lisää taanomaisten perusmuokkauskerroksen alapuolelle ulottuvan tiivistymisen riskiä. Koneiden koon kasvaessa maan tiivistymistä



Kuva 1. Vuosittain myydyt uudet traktorit teho- ja painoluokittain vuosina 1976–1996. Osuudet on laskettu Maatalouden tutkimuskeskuksen Maatalousteknologian (VAKOLA) vuosittain keräämistä tilastoista.

Figure 1. Proportion of new tractors sold in Finland in 1976–1996 by power and weight class. Calculated from the statistics on annually sold tractors compiled by the Institute of Agricultural Engineering of the MTT.

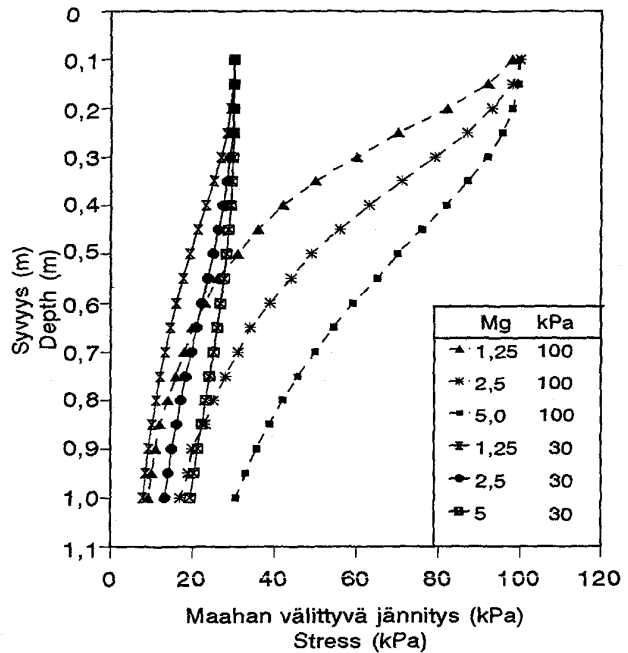
on ehkäisty pitämällä keskimääräinen pintapaine entisellään tai pienentämällä sitä. Pintapaine vaikuttaakin merkittävästi kyn-
tökerroksen ja ylempään pohjamaan tiivistymiseen (Söhne 1958, Lebert et al. 1989, Danfors 1994, Olsen 1994). Se, kuinka syvälle maa tiivistyy, riippuu kuitenkin akselipainosta. Kun pintapaine pidetään ennallaan suurentamalla rengasvarustusta akselipainon kasvaessa, tietty jännitys kulkeutuu maassa syvemmälle (Kuva 2, Söhne 1958, Hadas 1994) ja se vaikuttaa suurempaan maatilavuuteen kuin ennen akselipainon lisäämistä. Kun akselipaino pysyy ennallaan ja pintapainetta pienennetään, koneen maahan aiheuttama jännitys pienenee profiilin

yläosassa, mutta ei enää syvällä (Lebert et al. 1989, Danfors 1994).

Taulukossa 1 on havainnollistettu, kuinka suurelle kontaktialalle kuormitus jakaantuu tietyllä keskimääräisellä pintapaineella. Olsenin (1994) laskelmien mukaan keskimääräisen pintapaineen ja kontaktialan ollessa sama jännityksen lieveneminen maassa alkaa suorakaiteen muotoisen kontaktialan alla hieman lähempänä maan pintaa kuin ympyrän muotoisen alan alla. Kontaktialan muotojen välinen ero jännityksen lievenemisessä tasoittuu kuitenkin syvällä maassa (Olsen 1994). Taulukossa 1 on oletettu, että kuormitus on sama koko kontaktialalla. Käytännössä pintapaine jakautuu

Kuva 2. Laskennallinen vertikaalinen normaalijännitys syvyyden funktiona ympyränmuotoisen tasaisesti kuormitetun kontaktialan keskustan alla. Mg = alalle kohdistuva kuormitus, Mg; kPa = keskimääräinen pintapaine, kPa; keskittymiskerroin = 5. Kontaktialat on esitetty Taulukossa 1.

Figure 2. Calculated vertical normal stress as a function of depth beneath the centre of a circular and uniformly loaded ground contact area. Mg = load on area, Mg; kPa = ground contact stress, kPa. Concentration factor = 5. Contact areas shown in Table 1.



kuitenkin epätasaisesti kontaktialalla. Esimerkiksi kovahkolla alustalla ajettaessa pintapaine voi olla renkaan ripojen alla kaksi, jopa neljä kertaa suurempi kuin keskimääräinen pintapaine (Smith 1985, Burt et al. 1992).

Kun maa on kosteaa, jo suhteellisen kevyt kuormitus voi tiivistää sen kyntökerrosta syvemältä. Aura (1983) kuormitti savimaita ennen toukokuuta traktorilla, jonka

taka-akselipaino oli 3 Mg ja rengaspaine 140 kPa. Eniten maa tiivistyi 0,10–0,25 m:n syvyydessä. Vain erittäin märkä maa tiivistyi 0,35–0,40 metriin asti (Aura 1983). Maatalouden tutkimuskeskuksessa (MTT) tehdyissä kenttäkokeissa todettiin, kostea savimaa tiivistyi 0,35 m:n syvyyteen, kun pellolla ajettiin 5 Mg:n akselipainolla rengaspaineen ollessa 150 kPa (Alakukku & Elonen 1994).

Taulukko 1. Kontaktiala, jota Kuvassa 2 käytettiin keskimääräistä pintapainetta laskettaessa sekä kaksi esimerkkiä suorakaiteen muotoisen alan leveydestä ja korkeudesta.

Table 1. Ground contact areas used in Figure 2. The radius of a circular contact area and two examples of the width and length of a rectangular area.

	Pintapaine 100 kPa Ground contact stress 100 kPa			Pintapaine 30 kPa Ground contact stress 30 kPa		
	1,25 Mg	2,5 Mg	5 Mg	1,25 Mg	2,5 Mg	5 Mg
Kontaktiala (m ²)						
Ground contact area (m ²)	0,123	0,245	0,491	0,409	0,818	1,635
Ympyrän muotoisen alan säde (m) Radius of circular contact area (m)	0,20	0,28	0,39	0,36	0,51	0,72
Leveys 0,42 (m) x pituus (m) Width 0.42 (m) x length (m)	0,29	0,58	1,17	0,97	1,95	3,89
Leveys 0,84 (m) x pituus (m) Width 0.84 (m) x length (m)	0,15	0,29	0,58	0,48	0,97	1,92

Vastaavasti 16 Mg:n teliakselipaino (700 kPa) tiivistä savimaan puoleen metriin saakka (Alakukku 1997). Ruotsalaisissa tutkimuksissa maa tiivistyi yli 8 Mg:n akselipainoilla puoleen metriin asti (Danfors 1994). Ruotsalaisten suositusten mukaan kostealla savimaalla ajettessa maksimipaino yhdellä akselilla on 6 Mg ja teliakselilla 8 Mg, vaikka rengaspaine on 50 kPa (Danfors 1994).

Muokkauskerroksessa kyntö ja luonnonprosessit kuohkeuttavat maata. Kyntökerroksesta voimakaskin tiivistymä häviää 3–5 vuodessa (Alakukku 1997). Kun tiivistymä ulottuu normaalin kyntökerroksen alapuolelle, se haittaa todennäköisesti pitkään pellon viljeltävyyttä ja kasvien kasvua. MTT:n koekentillä kyntökerroksen alapuolinen tiivistymä säilyi savimaassa mitattavana koko yhdeksän vuoden koejakson ajan (Alakukku 1997). Tuona aikana tiivistymä pienensi yksivuotisten kasvien (pääasiassa kevätiljoja) siemensatoa keskimäärin 3 % ja niiden typpisatoa 8 % (Alakukku 1997). Karkeissa maissa, joissa luonnonprosessit eivät ole yhtä voimakkaita kuin hienojakoisissa maissa, kyntökerroksen alapuolinen tiivistymä voi olla pysyvä.

1.3 Tekniset ratkaisut maan tiivistymisen ehkäisemiseksi

Maan tiivistymistä on yritetty lieventää ja kontrolloida mm. muuttamalla koneiden rengastusta sekä poistamalla peltoliikenne viljeltävältä alalta. Vinssiviljelyssä traktori on korvattu vinssillä, jolla työkoneet vedetään pellon yli. Kiinteiden ajourien menetelmässä peltoliikenne on keskitetty samoille kiinteille väylille.

Kenttäkokeissa, joissa koko viljelysysteemi on muutettu vähemmän maata kuormittavaksi, on verranteena yleensä käytetty koneita, jotka ovat selvästi kevyempiä kuin nykyisin käytettävät suurimmat koneet. Lisäksi niissä on harvoin mitattu systeemin muutoksen vaikutusta pohjamaan ominaisuuksiin. Kenttäkokeet ovat olleet monesti myös suhteellisen lyhytaikaisia (4–5 vuot-

ta). Maan mukautuminen uuteen systeemiin vie kuitenkin aikaa useita vuosia. Lyhyiden kenttäkokeiden aikana ei ehditä selvittää, miten systeemi toimii maanhoidollisesti ja kasvintuotannollisesti pitkällä aikavälillä vaihtelevissa olosuhteissa. Soane ja Ball (1998) totesivat, että pitkäaikaiset kenttäkokeet ovat ainut tapa mitata muokkauksen kumulatiivisia eli kertautuvia vaikutuksia, jotka eivät tule esille kahden kolmen vuoden koejaksojen aikana. Soanen ja Ballin johtopäätös pätee myös peltoliikennekokeissa.

1.3.1 Rengasvarustus ja telat

Rengaskoon suurentaminen on todennäköisesti yleisin tapa yrittää kontrolloida peltoliikenteen aiheuttamaa tiivistymistä. Rengaskoon suurentaminen kuorman ja ajonopeuden pysyessä samana antaa mahdollisuuden pienentää rengaspainetta. Esimerkiksi paripyörän kantavuus on 1,7-kertainen yhden pyörän kantavuuteen verrattuna. Kun rengaspainetta pienennetään, maan ja renkaan välinen kontaktiala yleensä kasvaa. Samalla myös keskimääräinen pintapaine pienenee, jos kuorma pysyy samana tai suurenee suhteessa vähemmän kuin kontaktiala.

1.3.1.1 Yksittäisen koneen rengaskoon suurentaminen

Rengaspaineen pienentämisen on todettu vähentävän kyntökerroksen tiivistymistä (mm. Koger et al. 1985, Douglas et al. 1992a). Danforsin (1994) mukaan rengaspaineen pienentäminen 150 kPa:sta 50 kPa:iin suurentamalla rengaskokoa lievensi maan tiivistymistä 0,30–0,40 m:n syvyydessä, muttei enää sitä syvemmällä. Danforsin tulokset tukevat aiemmin esitettyä teoriaa pintapaineen vaikutuksesta pohjamaan tiivistymiseen.

Lieventäessään kyntökerroksen tiivistymistä rengaskoon suurentaminen on samalla myös pienentänyt peltoliikenteen aiheut-

tamia satotappioita. Elonen (1980) raportoi, että kevätevehnäsato oli savimailla neljän vuoden keskiarvona 3 % suurempi, kun toukokuussa käytettiin paripyörällistä traktoria yhden pyörän sijasta. Arvidsson & Håkansson (1994) ajoivat traktori-perävau-nu-yhdistelmällä savimaalla ennen syyskyntöä. Kuormitus oli 350 Mg km ha⁻¹. Kun perävauunun renkaiden paine oli 500 kPa, kevätilviljojen sato oli neljän vuoden keskiarvona viisi prosenttiyksikköä pienempi kuin rengaspaineen ollessa 200 kPa (Arvidsson & Håkansson 1994).

1.3.1.2 Koneketju matalapainerenkailla

Edellä esitetyissä tutkimuksissa selvitettiin yksittäisen koneen rengastuksen suurentamisen vaikutusta maan tiivistymiseen. On myös tutkimuksia, joissa kaikkien peltoviljelyssä käytettyjen koneiden rengaspainetta on laskettu rengastusta muuttamalla. Douglas et al. (1992b) tekivät kenttäkokeen, jossa viljeltiin rairuohoa savisella hieuemaalla. He vertasivat samaa koneistusta kahdella eri rengasvarustuksella: tavanomainen (rengaspaine 160–480 kPa, keskimääräinen pintapaine 102–172 kPa) ja leveä (30–200 kPa ja 30–127 kPa). Koneiden akselipaino oli 0,60–2,70 Mg. Neljän koevuoden jälkeen maan mekaaninen vastus oli 0,40 metriin asti selvästi pienempi leveitä renkaita käytettäessä kuin tavanomaisilla renkailla ajettaessa. Rairuohon sato ja typenotto olivat suuremmat leveitä renkaita käytettäessä kuin tavanomaisilla renkailla ajettaessa (Douglas et al. 1992b). Vermeulen & Klooster (1992) puolestaan raportoivat, että neljän vuoden keskiarvona sokerijuurikkaan, sipulin ja perunan sato oli 5 % suurempi, kun koneissa käytettiin matalaa rengaspainetta (40–80 kPa). Verranneruudussa koneissa käytettiin tavanomaista rengaspainetta (80–240 kPa). Kenttäkoe tehtiin hietaisella hieuemaalla.

Rengaspaineen pienentäminen ei aina vaikuta kasvien satoon. Vermeulenin & Kloosterin (1992) tutkimuksessa rengaspaineen pienentäminen ei vaikuttanut mer-

kittävästi syysvehnän satoon. Chamen et al. (1990) viljelivät nelivuotisessa kenttäkokeessa savimaalla (59 g 100 g⁻¹ savesta) syysvehnää. He tekivät peltotyöt koneilla, joiden rengaspaine oli joko matala (<50 kPa, leveät renkaat) tai tavanomainen (100–250 kPa). Rengaspaineen pienentäminen ei vaikuttanut hehtaarisatoon. Maan mekaaninen vastus oli kuitenkin suurempi 0–0,25 m:ssä ruuduissa, joissa käytettiin tavanomaista rengaspainetta. Chamen et al. (1990) totesivat, että leveitä renkaita käytettäessä (pieni rengaspaine) peltomaa saavutti nopeammin tietyn tasapainotiiveyden kuin kapeita renkaita käytettäessä (tavanomainen paine), koska leveät renkaat tiivistivät kerralla suuremman alan. Tasapainotiiveys oli kuitenkin pienempi leveitä renkaita käytettäessä kuin tavanomaisilla renkailla ajettaessa. Dickson & Ritchie (1996a) pitivät todennäköisenä, että marginaalinen satoero kevennytyssä peltoliikenteessä (leveät renkaat, ajajäljet peittivät 70 % alasta) verrattuna tavalliseen peltoliikenteeseen (peitto 30 %) johtui tiivistetyn alan kosta eroa ja viljelykasvin herkkyydestä maan tiivistyneisyydelle. He viljelivät kokeissaan syysohraa ja nurmea.

1.3.1.3 Renkaiden korvaaminen teloilla

Teloja on käytetty peltoviljelyssä pitkään. Koneiden koon jatkuva kasvu on kuitenkin lisännyt kiinnostusta telojen käyttöön. Kun koneessa on telat, kokonaispaino jakautuu yleensä suurelle alalle. Tästä syystä yhdistelmä, jossa on pieni keskimääräinen pintapaine ja painava kone on teknisesti helpompi toteuttaa telakoneena kuin pyöräkoneena (Taulukko 1). Kiinnostusta telojen käyttöön lisää myös kumitelojen kehittäminen ja tulo markkinoille. Terästelan korvaaminen kumitelalla poistaa monta aikaisemmin telojen käyttöä rajoittanutta tekijää. Kumitelat ovat mm. keveämpiä ja hiljaisempia kuin terästelat. Kumitelat sopivat myös tieajoon terästeloja paremmin. Telojen käyttöä maataloudessa on tarkastellut laajasti mm. Erbach (1994).

Pyörän korvaaminen telalla pienensi yleensä keskimääräistä pintapainetta. Basford et al. (1988) ja Rusanov (1991) totesivat telakoneen tiivistäneen maata vähemmän kuin vastaava pyörillä varustettu kone. Pyörän korvaaminen telalla ei kuitenkaan aina lieventänyt maan tiivistymistä. Brown et al. (1992) vertasivat kumitelatraktorin (keskimääräinen pintapaine 40 kPa) ja pyörätraktorin (pintapaine 125 kPa) aiheuttamaa maan tiivistymistä. Heidän mukaansa molemmat traktorit tiivistivät maata yhtä paljon 0,13 metriä syvemmällä. Wolf & Hadas (1984) totesivat, että maan tilavuuspaino oli lähes yhtä suuri ajettaessa samanaikaisella tela- ja pyörätraktorilla, vaikka telatraktorin keskimääräinen pintapaine oli 40 kPa ja pyörätraktorin 160 kPa.

Telan ja pyörän kuormitustapa on erilainen, mikä voi pienentää pintapaine-eron perusteella oletettavaa tiivistymisen lieventymistä. Wolfin & Hadasin (1984) mukaan telatraktori tiivisti maata voimakkaammin kuin samanaikainen pyörätraktori, kun samassa ajourassa ajettiin useita kertoja. He ollettivat, että tämä johtui pitkästä kuormitusajasta telan alla ja telan kautta maahan välittyneestä värinästä (vibraus). Wong & Prestow-Thomas (1984) totesivat, että pyörän korvaaminen telalla ei vähentänyt maan tiivistymistä niin paljoa kuin keskimääräisen pintapaineen pienentämisen perusteella oletettiin. Tämä johtui siitä, että telan kautta maahan välittyi voimakas värinä, telan alla kuormitusaika oli pitkä ja pintapaineen jakauma kontaktialalla oli epätasainen. Ajon aikana tela kulki vinossa maan pintaan nähden, jolloin telan takaosassa pintapaine oli suurempi kuin sen etuosassa (Wong & Prestow-Thomas 1984). Lisäksi pintapaine oli telaston pyörien välissä selvästi pienempi kuin telapyörien alla (Wong 1986). Pyörien lisääminen ei tasoittanut pintapaineen jakaumaa: painehiiput pyörien alla olivat vain aikaisempaa tiheimmässä.

1.3.1.4 Pinta- ja rengaspainesuosituksia

Maan tiivistämisen ehkäisemiseksi on annettu suosituksia keskimääräisen pintapaineen sekä rengaspaineen ylärajaksi. Yhteistä niille on, että maan ollessa kosteaa pinta- ja rengaspaineen yläraja on selvästi alhaisempi kuin maan ollessa kuivaa. Vermeulen et al. (1988) mukaan maan ollessa kosteaa pintapaine ei saisi ylittää 50 kPa ja kuivissa oloissa raja on 100 kPa. Rusanov (1994) jakoi kivennäismaat savimaihin ja niitä karkeampiin maihin. Hän esitti kummallekin ryhmälle pintapaineen ylärajan viidessä eri kosteusluokassa. Maan kosteuden ollessa yli 90 % kenttäkapasiteetista pintapaineen yläraja savimailla oli 80 ja karkeilla mailla 95 kPa keväällä. Kun maan kosteus oli alle 50 % kenttäkapasiteetista, keväällä savimaiden suositus oli 180 ja karkeiden maiden 215 kPa (Rusanov 1994). Carpenter & Fausey (1983) totesivat laskelmiensa perusteella, että suurta rengaskuormaa käytettäessä pintapaine ei saa olla suurempi kuin jännitys, joka pohjamaahan saa kohdistua. Siitä, kuinka suuri jännitys pohjamaahan saa välittyä, ei ole tällä hetkellä kuitenkaan riittävästi tietoa.

Lukuina keskimääräisen pintapaineen ja rengaspaineen ylärajasuositukset ovat lähellä toisiaan. Dwyer (1983) sekä Perdok & Tijink (1990) suosittelivat, ettei rengaspaine saisi ylittää keväällä kosteissa oloissa 50 kPa. Maan ollessa kuivaa rengaspaineen ylärajasuositus oli: 100 kPa (Dwyer 1983) ja 250 kPa (Perdok & Tijink 1990).

1.3.2 Vinssiviljely

Olsen (1986) raportoi ruotsalaisesta tutkimuksesta, jossa jäykkää savimaata viljeltiin 20 vuoden ajan vetämällä työkonet vinssillä yli ruutujen. Maan savespitoisuus oli 64 g 100 g⁻¹ 0–0,20 m:n syvyydessä ja 83 g 100 g⁻¹ 0,20–0,40 m:ssä. Vinssiviljelyruuduissa maan makrohuokostilavuus oli kyntökerroksessa 0,20 m³ m⁻³. Verranneruuduissa, joissa peltotyöt tehtiin normaalisti traktorin vetämällä työkonella, ko. huokostilavuus

oli $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Vinssiviljelyssä viljasato oli keskimäärin 26 % suurempi kuin traktorilla ajettaessa (ei paripyöriä, paino n. 3 Mg, rengaspaine 120 kPa). Kun traktorissa oli paripyörät (70 kPa), vinssiviljelyssä viljasato oli keskimäärin 20 % suurempi.

1.3.3 Kiinteät ajourat

Peltoliikenne voidaan keskittää myös kasvukauden aikaisille tai täysin kiinteille ajourille. Kasvukauden aikaiset ajourat merkitään uudelleen vuosittain. Kiinteät ajourat ovat kasvukaudesta toiseen samat. Koneenkantajaa käytettäessä ajourat on yleensä erikseen rakennettu, koska niiden tulee kestää koneenkantajan raskas paino. Peltoliikenteen keskittämisellä tietyille ajourille tavoitellaan sekä hyvää kasvualustaa kasveille että hyvää vetoalustaa renkaille.

1.3.3.1 Traktorin raidevälin vakiointi

Peltoliikenteen keskittäminen traktorin raidevälin levyisille ajourille on vähentänyt vetovastusta muokkauksessa ja vaikuttanut myös muihin maan ominaisuuksiin. Lamers et al. (1986) siirsivät peltoliikenteen kolmen metrin välein olleille urille. Tavalliseen peltoliikenteeseen verrattuna energian tarve hiuemaiden perusmuokkauksessa oli 50 % pienempi käytettäessä kiinteiden ajourien menetelmää. Myös Dicksonin & Ritchien (1996b) tutkimuksessa kiinteiden ajourien käyttö vähensi vetovoiman tarvetta 74 % ja tehontarvetta n. 50 % huonosti läpäisevän savimaan muokkauksessa. Viisivuotisessa kokeessa oli verranteena tavanomaisen peltoliikenteen kuormittama maa. Koneiden rengaspaine oli 100–250 kPa tai 30–220 kPa ja akselipaino alle 5 Mg.

Ajouraviljelyn satorulokset ovat olleet hyvin vaihtelevia. Lamersin et al. (1986) mukaan siirtyminen tavanomaisesta peltoliikenteestä kiinteille ajourille lisäsi perunan ja sokerijuurikkaan satoa 0–10 %. Dicksonin & Ritchien (1996a) kenttäkokeissa sama sato saatiin ajouria käytettäessä

20–30 % (syysohra, kevätohra ja rypsi) pienemmällä typpilannoituksella kuin tavanomaisesti pellolla ajettaessa. Lisäksi kiinteiden ajourien käyttö mahdollisti viljojen ja öljykasvien kylvön aikaistamisen viidellä päivällä. Vermeulen & Klooster (1992) tekivät nelivuotisessa kenttäkokeessa hietaisella hiuemaalla peltotyöt kiinteitä ajouria (raideväli 2 m), tavanomaisia renkaita (rengaspaine 80–240 kPa) ja leveitä renkaita (rengaspaine 40–80 kPa) käyttäen. Heidän mukaansa sokerijuurikkaan, sipulin ja perunan sadot olivat tavanomaisia renkaita käytettäessä 9 % ja leveitä renkaita käytettäessä 4 % pienempi kuin ilman peltoliikennettä viljeltäessä. Syysvehnäsadoissa ei koejäsenten välillä ollut eroja. Chamen et al. (1990) totesivat nelivuotisessa kokeessa jäykällä savimaalla, että syysvehnän sato oli kiinteitä ajouria (2,4 m) käytettäessä pienempi kuin perinteisesti peltoliikennöidyssä koejäsenessä. Todennäköinen syy sateroon oli heidän mukaansa se, että kasvusto kärsi magnaaniin puutteesta kasvaessaan ajourien välissä löyhässä maassa. Maan mekaaninen vastus 0–0,25 m:ssä oli keskimäärin 35 % pienempi ajourien välissä kuin peltoliikennöidyissä ruuduissa (Chamen et al. 1990).

Viljellössään raiheinää säilörehuksi nelivuotisessa kokeessa savisella hiuemaalla Douglas et al. (1992a) keskittivät peltoliikenteen 2,8 m:n välein olleille ajourille. Tavanomaisesti peltoliikennöidyissä ruuduissa koneiden rengaspaine oli 160–480 kPa (keskimääräinen pintapaine 102–172 kPa) ja kevyesti peltoliikennöidyissä 30–200 kPa (30–127 kPa). Säilörehusato oli keskimäärin 15–16 % suurempi kevyesti liikennöitäessä ja ajouraviljelyssä kuin tavanomaisesti peltoliikennöidyssä koejäsenessä. Ajouraviljelyssä kasvusto otti tyypeä neljän vuoden keskiarvona 34 % ja kevyesti kuormitettaessa 26 % enemmän kuin tavanomaisesti pellolla ajettaessa. Lisäksi tavanomaisen peltoliikenteen jälkeen maa kuivui keväällä 0–0,20 m:n syvyydessä selvästi hitaammin kuin kahdessa muussa koejäsenessä (Douglas et al. 1992b).

Kiinteiden ajourien merkitystä on tutkittu myös muokkauksen keventämisen yhteydessä. Dickson & Campbell (1990) vertasivat kiinteitä ajouria (2,8 m raideväli traktorissa) peltoliikenteeseen, jossa koneiden rengaspaine oli 30–330 kPa ja akselipaino alle 3 Mg. Nelivuotinen vertailu tehtiin hiuesavimaalla sekä kynnettäessä (0,25 m) että suorakylvettäessä. Peltoliikenne tai sen puuttuminen ei vaikuttanut 0–0,24 metrissä maan mekaaniseen vastukseen kynnettäessä. Suorakylvettäessä mekaaninen vastus oli kuitenkin ajourien välissä pienempi kuin tavanomaisesti kuormitetuissa ruuduissa. Kynnetyissä maassa oli ajourien välissä selvästi vähemmän kasveille käyttökelpoista vettä ($\Psi_m = -6 - -100$ kPa) 0,01–0,06 ja 0,075–0,125 m:n kerroksissa kuin suorakylvetyssä koejäsenessä. Dickson & Campbell (1990) totesivat kiinteiden ajourien sopivan hyvin suorakylvöön.

Sommer & Zach (1992) vertasivat kiinteitä ajouria (2,5 m) tavanomaisesti peltoliikennöityyn (traktorin taka-akselipaino 4,10 Mg ja rengaspaine 100–200 kPa) koejäseneseen hietamaalla. Heidän kokeessaan maa kynnettiin (0,20–0,22 m) tai pelkästään kylvömuokattiin (0,08–0,10 m). Viljelykierto oli sokerijuurikas-syysvehnä-syysohra-aluskasvi. Muokkaustavasta riippumatta maan huokostilavuus 0,12–0,17 m:n ja 0,25–0,30 m:n syvyydessä oli kuuden koevuoden jälkeen ajouria käytettäessä suurempi kuin verranteessa. Sokerijuurikkaan sato oli ajouraviljelyssä kynnettäessä 7 % ja pelkästään kylvömuokattaessa 6 % suurempi kuin verranteessa. Syysvehnäsato oli puolestaan ajouria käytettäessä 6 % (kyntö) ja 3 % (kylvömuokkaus) pienempi kuin verranteessa (Sommer & Zach 1992).

1.3.3.2 Koneenkantajat

Yhdysvalloissa ja Britanniassa on kehitetty 6–12 m leveitä koneenkantajia (gantry). Chamen et al. (1994) sekä Laguë et al. (1997) ovat esittäneet koneen teknisen kuvauksen. Kun peltotyöt tehtiin koneenkantajalla, maa murustui hyvin ja oli löyhää

kynnettäessä (Chamen et al. 1992). Koneenkantajan käyttö pienensi 50–70 % energian tarvetta savimaan muokkauksessa tavanomaiseen viljelyyn verrattuna (rengaspaineet 100–250 kPa) (Chamen et al. 1994). Maan rakenne oli muokkauskerroksessa silmävaraisestikin arvioituna parempi koneenkantajaruuduissa verrattuna normaalisti peltoliikennöityyn koejäseneseen. Viljojen satotulokset olivat kuitenkin hyvin vaihtelevia. Joissakin tapauksissa esimerkiksi kynnöksestä muokattu kylvöalusta oli kiinteitä ajouria käytettäessä liian löyhä, mikä haittasi kasvuston kehitystä (Chamen et al. 1992).

Chamen & Longstaff (1995) mittasivat perusteellisesti savimaan (savesta 60 g 100 g⁻¹) fysikaalisia ominaisuuksia kahdeksan vuoden gantry-viljelyn jälkeen. Verranteessa peltotyöt tehtiin 75 kW:n nelivetotraktorilla. Maan mekaaninen vastus oli 0,15–0,45 metrissä merkitsevästi pienempi koneenkantajaruuduissa (keskimäärin 1,24 MPa) kuin tavanomaisesti peltoliikennöidyissä ruuduissa (1,51 MPa). Sekä kynnetyissä (0,20 m) että sänkimuokatussa (0,125 m) maassa oli koneenkantajaa käytettäessä 0,10, 0,15 ja 0,30 metrissä enemmän suuria huokosia (30 mm). Ero kuormitusten välillä oli kynnetyissä koejäsenessä pienempi kuin sänkimuokattaessa. Chamen & Longstaff (1995) mittasivat myös yhden kuukauden (huhtikuu) ajan maan kosteutta 0,10, 0,15 ja 0,30 m:n syvyydessä. Kokeessa viljeltiin tuolloin syysvehnää. Maa oli peltoliikennöidyissä ruuduissa selvästi kosteampaa kuin koneenkantajaruuduissa koko mittausjakson ajan. Koneenkantajaa käytettäessä kosteusero muokkaustapojen välillä oli pieni. Kun pellolla ajettiin traktorilla, sänkimuokattu maa oli kynnettyä kosteampi koko mittausjakson ajan. Koevuonna syysvehnän sato oli 25 % suurempi koneenkantajaa käytettäessä kuin tavanomaisesti peltoliikennöitäessä (Chamen & Longstaff 1995)

Teknisten mahdollisuuksien ja hyvien viljelyllisten näkökohtien ohella on otettava huomioon myös systeemin kustannukset. Chamen & Audsley (1993) vertasivat neljän

eri kiinteiden ajourien systeemin ja tavanomaisen systeemin taloudellisuutta. Koneenkantajan käyttö vähensi muokkaukustaluuksia. Sen investointikustannukset olivat kuitenkin suuret. Britanniassa minimitalakoko oli Chamenin & Audsleyn (1993) laskelmien mukaan 500 ha, jotta kuuden metrin koneenkantaja olisi kannattava viljeltäessä viljoja, papua ja rapsia.

1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Maataloustöiden tehostuessa koneiden paino ja peltotöiden intensiteetti ovat kasvaneet viime vuosikymmeninä merkittävästi. Raskaiden koneiden ja voimakkaan muokkauksen on todettu huonontavan maan rakennetta. Lisäksi koneiden painon kasvun myötä tavanomaista muokkaukserrosta syvemmän, yleensä pitkäaikaisen, tiivistymän riski on suuri. Maan tiivistyminen on myös maailmanlaajuisesti merkittävä kevennettyyn muokkaukseen siirtymisen este. Nykyteknikkaa käytettäessä useimmat maalajit joudutaan muokkaamaan mekaanisesti syvältä raskaiden koneiden käytön aiheuttaman tiivistymän kuohkeuttamiseksi.

Teknisiä ratkaisuja koneiden aiheuttaman maan tiivistymisen ehkäisemiseksi tutkitaan monissa tutkimuslaitoksissa vilkkaasti. Raskaan peltoliikenteen haittavaikutuksia yritetään lieventää mm. suurentamalla renkaiden kokoa (pari-, kolmipyörät, matalaprofiilirenkaat) ja siirtämällä peltoliikenne kiinteille ajourille. Näiden tutkimusten perusteella tiedetään, että keventämällä maahan nykyisin kohdistuvaa rasitusta voidaan vähentää energian kulutusta muokkauksessa ja lisätä kasvien satoa. Miten maahan kohdistuvan rasituksen keventäminen vaikuttaa pohjamaan rakenteeseen tai kone-maa-kasvi -systeemin toimintaan, on kuitenkin tutkittu vähän.

Rengasratkaisut eivät poista pohjamaan tiivistymisriskiä, koska syvien kerrosten tiivistyminen riippuu rengaskuormasta. Kiin-

teitä ajouria käytettäessä koneet ovat yleensä kömpelöitä ja vaativat suuren viljelyalan. Käyttämällä nykyaikaista paikannus-, automaatio- ja säätöteknikkaa Modulaire Oy on rakentanut miehittämättömän, kevyen traktorin (Nieminen et al. 1994). Miehittämättömyyden myötä sama henkilö voi tehdä peltotöitä 2–3 kevyellä koneella yhtä aikaa. Kun peltotyöt tehdään kevyellä koneella, pohjamaan tiivistymisriski on pienempi kuin painavaa konetta käytettäessä.

Raportoitavassa tutkimuksessa verrattiin kahdessa savimaan kenttäkokeessa kevyttä, miehittämätöntä traktoria (paino 2,5 Mg, telat 2000/320/500 mm) keskikokoiseen nelivetotraktoriin (n. 5,0 Mg, rengaspaine 80–150 kPa). Kolmevuotisissa kenttäkokeissa traktoreita käytettiin muokkauksissa ja kylvössä. Traktoreita verrattiin sekä syyskynnettäessä että syysänkimuokattaessa. Erillisissä kenttäkokeissa mitattiin traktoreista maahan välittyvää jännitystä. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää:

- miten peltoliikenteen keventäminen vaikuttaa savimaan makrohuokostoon
- miten maa-kasvi -systeemi toimii kylvettäessä viljelyssä, kun peltoliikenne on kevyt
- kuinka suuri pystysuora normaali jännitys kevyestä traktorista välittyy maahan.

Tutkimuksessa mitattiin monipuolisesti maan ominaisuudet puolen metrin syvyyteen asti. Kasvukauden aikana mitattiin maan kosteutta. Lisäksi määritettiin kasvien siemensato ja sen mukana korjattu typpisato. Maahan kohdistuvan jännityksen mittaamiseksi suunniteltiin ja rakennettiin mittaustuloste. Jännitysmittausten yhteydessä määritettiin myös peltoajon vaikutus maan makrohuokostoon. Raportissa käsitellään kolmevuotisissa kenttäkokeissa saadut mittaustulokset. Maahan kohdistuvan jännityksen mittaukset raportoidaan erikseen (Pöyhönen et al. 1999).

Taulukko 2. Koekenttien orgaanisen hiilen pitoisuus ja kivennäisaineen hiukkaskokojakauma.
Table 2. Organic carbon content and texture of clay soils.

Koe- kenttä <i>Field</i>	Syvyys (m) <i>Depth</i> (m)	Orgaaninen hiili (g 100 g ⁻¹) <i>Organic carbon</i> (g 100 g ⁻¹)	Hiukkaskokojakauma (g 100 g ⁻¹) <i>Particle size distribution (g 100 g⁻¹)</i>				Maalaji 0-1,0 m <i>Texture</i> 0-1,0 m
			< 2 saves clay	2-20 hiesu silt	20-200 hieta fine sand	200-2000 mm hieikka sand	
Kevät- vilja <i>Spring cereal</i>	0 - 0,10	3,6	75	10	9	6	Aitosavi <i>Clay</i>
	0,10 - 0,20	3,2	73	12	8	7	
	0,20 - 0,30	3,0	74	10	8	8	
	0,30 - 0,50	1,2	83	8	6	3	
	0,50 - 1,00	0,4	90	5	4	1	
Syys- vilja <i>Winter cereal</i>	0 - 0,10	4,0	61	18	14	7	Aitosavi <i>Clay</i>
	0,10 - 0,20	3,1	59	20	14	7	
	0,20 - 0,30	2,6	61	19	14	6	
	0,30 - 0,50	0,8	70	15	12	3	
	0,50 - 1,00	0,4	80	7	10	3	

Taulukko 3. Koekenttien maan pH (maa-vesi -suspensio) ja helpoliukaisen fosforin sekä vaihtuvan kalsiumin, kaliumin ja magnesiumin pitoisuudet (ammoniumasetattiutto, pH 4,65, Vuorinen & Mäkitie 1955).

Table 3. Soil pH (water suspension) and nutritional status of experiment fields. The nutrients extractable in acid ammonium acetate (pH 4.65) were analysed by the method of Vuorinen & Mäkitie (1955).

Koekenttä <i>Field</i>	Syvyys (m) <i>Depth (m)</i>	pH _{vesi} pH _{water}	Ravinnepitoisuus (mg dm ⁻³) <i>Extractable nutrients (mg dm⁻³)</i>			
			Ca	K	Mg	P
Kevätvilja <i>Spring Cereal</i>	0 - 0,10	6,2	2780	449	843	13
	0,10 - 0,20	6,2	2812	387	865	9
	0,20 - 0,30	6,2	2723	377	900	8
	0,30 - 0,50	6,2	2438	352	1399	1
	0,50 - 1,00	6,7	2277	335	1801	1
Syysvilja <i>Winter Cereal</i>	0 - 0,10	5,9	2280	502	536	18
	0,10 - 0,20	6,0	2355	406	538	12
	0,20 - 0,30	5,9	2166	347	630	9
	0,30 - 0,50	6,2	2305	293	1263	2
	0,50 - 1,00	6,5	2259	294	1717	1

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Koekenttä

Tutkimuksen kaksi kenttäkoetta perustettiin Maatalouden tutkimuskeskukseen, Jo-

kioisiin aitosavimaalle (Taulukko 2) vuonna 1995. Toisella kentällä viljeltiin kevätiljoja (kevätiljakenttä) ja toisella syysvehnää ja kevätiljaa (syysviljakenttä). Kenttien pH, helpoliukaisen fosforin sekä vaihtuvan kalsiumin, kaliumin ja magnesiumin pitoisuudet olivat viljavuusluokaltaan vähintään tyydyttäviä (Taulukko 3). Lohkon salaojitus oli uusittu vuonna 1987.

Taulukko 4. Muokkauksessa ja kylvössä käytetyn keskikokoisen traktorin (v. 1995–1996 Valmet 755-4WD, v. 1997 Valmet 705-4) ja kevyen Modulaire-traktorin tekniset tiedot.

Table 4. Technical specifications of a medium-size (in 1995–96 Valmet 755-4WD, in 1997 Valmet 705-4) and a light Modulaire tractor used in tillage and sowing operations.

	Keskikokoinen traktori <i>Medium-size tractor</i>		Modulaire- traktori <i>tractor</i>
	1995-96	1997	
Moottorin teho (kW) <i>Engine power (kW)</i>	66	66	43
Kokonaispaino (Mg) <i>Weight (Mg)</i>	5,3-5,35 ¹⁾	4,0-4,5 ²⁾	2,5
Taka-akselipaino (Mg) <i>Rear axle load (Mg)</i>	2,7-3,2 ¹⁾	2,3-2,8 ²⁾	
Eturenkaat <i>Front tyres</i>	14.9R24 ³⁾	380/70R24 ³⁾	
Takarenkaat, Tela <i>Rear tyres, Track</i>	16.9R38 ³⁾	480/70R34 ³⁾	2000/320/500 ⁴⁾
Rengaspaine (kPa) <i>Tyre inflation pressure (kPa)</i>	80-100 ¹⁾	90-150 kPa ²⁾	
Keskimääräinen pintapaine (kPa) ⁵⁾ <i>Average ground contact stress (kPa)⁵⁾</i>	70-90 ¹⁾	50-80 kPa ²⁾	30

¹⁾ Paripyörät: paino 5,35 Mg; taka-akselipaino 3,2 Mg; rengaspaine 80 kPa. Pintapaine: paripyörien eturenkaissa 80 ja takarenkaissa 70 kPa, yksittäisasennuksena 90 kPa eturengas ja 70 kPa takarengas

²⁾ Paripyörät: paino 4,5 Mg; taka-akselipaino 2,8 Mg; rengaspaine 90 kPa. Pintapaine paripyörillä 50 kPa ja yksittäisasennuksessa eturenkaissa 80 kPa ja takarenkaissa 70 kPa

³⁾ Paripyörät kultivoitaessa, jyrittäessä ja kylvettäessä

⁴⁾ Kumitela, pituus/leveys/korkeus (mm)

⁵⁾ Rengaskuorma jaettuna maan ja pyörän välisellä kontaktialalla kovalla alustalla

¹⁾ *Dual tyres: weight 5.35 Mg; rear axle load 3.2 Mg; inflation pressure 80 kPa. Contact stress 80 and 70 kPa for front and rear dual tyres, respectively, 90 kPa single front, and 70 single rear tyres*

²⁾ *Dual tyres: weight 4.5 Mg; rear axle load 2.8 Mg; inflation pressure 90 kPa. Contact stress 50 kPa for dual tyres and 80 kPa single front and 70 kPa single rear tyres*

³⁾ *Dual tyres in cultivation, rotary harrowing and sowing*

⁴⁾ *Rubber track length/width/height (mm)*

⁵⁾ *Wheel load divided by ground contact area between tyre/track and rigid surface*

Viitenä tutkimusta edeltäneenä vuonna koelohkolla viljeltiin kevätiljaa (1990–92) ja säilörehunurmea (1994). Vuonna 1993 alue oli viherkesantona. Lohkoa viljeltiin tavanomaisin menetelmin ja konein. Pelto-
töissä käytettyjen koneiden suurin akseli-
paino oli 5,0 Mg ja rengaspaine 400 kPa.

2.2 Kenttäkokeet

Kenttäkokeet olivat ensimmäisenasteen osaruutukokeita. Kerranteita oli neljä. Osaruudun koko (leveys x pituus) oli kevätiljakokeessa 15 x 50 m ja syysviljakokeessa 10 x 25 m. Pääruututekijä oli syysmuokkaus: (P)

kyntö 0,20–0,25 m:iin ja (C) sänkimuokkaus kultivaattorilla 0,10–0,15 m:iin. Osaruututekijä oli muokkauksessa ja kylvössä käytetty traktori: (S) vetokone oli keskikokoinen ja (M) vetokone oli kevyt Modulaire-traktori. Traktori ei vaikuttanut perusmuokkaussyvyyteen syksyn 1996 mittaus-
ten mukaan. Keskikokoisella traktorilla kynnettäessä työsyvyys oli keskimäärin 0,22 m ja kevyellä traktorilla kynnettäessä 0,21 m. Kultivointisyvyys oli keskimäärin 0,11 m traktorista riippumatta. Olkea ei korjattu pois, vaan leikkuupuimurin silppurin silppuama olki jätettiin pellolle.

Koejäseninä olleiden traktoreiden tekniset tiedot esitetään Taulukossa 4 ja niiden

Taulukko 5. Peltotöissä käytettyjen työkoneneiden työleveydet.
Table 5. Working widths used in field operations.

Työvaihe <i>Operation</i>	Työleveys (m) <i>Working width (m)</i>	
	Keskikokoinen traktori <i>Medium-size tractor</i>	Modulaire-tractori <i>Modulaire tractor</i>
Kyntö <i>Ploughing</i>	1,2 ¹⁾	0,7
Sänkimuokkaus <i>Stubble cultivation</i>	2,2	2,2
Tasojyrsintä <i>Rotary harrowing</i>	3-2,5	2
Kylvölannoitus <i>Combined drilling</i>	2,5	2
Rikkakasvitorjunta ²⁾ <i>Herbicide spraying²⁾</i>	12	12
Syysvehnän pintalannoitus ³⁾ <i>Surface fertilizing³⁾ for winter wheat</i>	12	12
Leikkuupuinti ⁴⁾ <i>Harvesting⁴⁾</i>	2,1/2,25	2,1/2,25
Jyräys vuonna 1997 ⁵⁾ <i>Rolling in 1997⁵⁾</i>	3	- ⁵⁾

¹⁾ Paluuaura

²⁾ Traktori: Ford 5000; paino 2,52 Mg; rengaspaine 120 kPa

³⁾ Traktori: Valmet 8400 4WD; paino 5,7 Mg; paripyörät, rengaspaine 50 kPa

⁴⁾ Leikkuupuimuri: Sampo 25 (2,25 m); paino 3,5 Mg; rengaspaine 140 kPa

MF 8 (2,1 m); paino 2,7 Mg; rengaspaine 140 kPa

⁵⁾ Traktori: Valmet 602 T4; paino 2,94 Mg; rengaspaine 100 kPa

Kevyen traktorin kylvölannoittimessa oli jyräpyörästö, minkä vuoksi ei jyrätty.

¹⁾ *Reversible plough*

²⁾ *Tractor: Ford 5000; weight 2.52 Mg; tyre inflation pressure 120 kPa*

³⁾ *Tractor: Valmet 8400 4WD; weight 5.7 Mg; dual tyres, tyre inflation pressure 50 kPa*

⁴⁾ *Harvester: Sampo 25 (2.25 m); weight 3.5 Mg; tyre inflation pressure 140 kPa*

MF 8 (2.1 m); weight 2.7 Mg; tyre inflation pressure 140 kPa

⁵⁾ *Tractor: Valmet 602 T4; weight 2.94 Mg; tyre inflation pressure 100 kPa*

The combined drill used with the light tractor was equipped with rolling wheels and no separate rolling was made.

kanssa käytettyjen työkoneneiden työleveydet Taulukossa 5. Työkoneet mitoitettiin mahdollisuuksien mukaan traktorin tehon mukaan. Kultivoinnissa työleveys olisi voinut olla kokeessa käytettyä suurempi keskikokoisen traktorin ruuduissa. Vaihtoehtona olleen leveän kultivaattorin työjälki poikkesi kuitenkin kevyen traktorin ruuduissa käytetyn kultivaattorin jäljestä siinä määrin, että molemmissa koejäsenissä päätettiin käyttää samaa kultivaattoria.

Keskikokoisen traktorin rengaspaine säädettiin niin pieneksi kuin rengaskuorman perusteella oli mahdollista. Rengaspai-

neen pienentämistä helpotti se, että kyntöä lukuunottamatta traktorissa käytettiin paripyöriä sekä etu- että taka-akselilla. Taulukossa 4 esitetty renkaan ja maan välinen kontaktiala määritettiin Smithin & Dicksonin (1990) kuvaamalla tavalla. Keskimääräinen pintapaine laskettiin jakamalla rengaskuorma kontaktialalla. Kontaktialan määrittäminen oli karkea. Keskimääräiset pintapaineet olivat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia.

Peltotyöt tehtiin samaan aikaan kuin alueella yleensä ja kaikissa koejäsenissä samana päivänä. Vuonna 1995 kevään mär-

Taulukko 6. Peltoliikenteen vuosittain aiheuttama kuormitus koejäsenittäin. Su-
luissa kylvömuokkauksen ja kylvön osuus peltoliikenteestä.

Table 6. Intensity of annual field traffic. Proportion of seedbed preparation and
sowing in parentheses.

	Vuositainen peltoliikenne (Mg km ha ⁻¹) <i>Annual field traffic (Mg km ha⁻¹)</i>			
	Kyntö <i>Ploughed</i>		Sänkimuokkaus <i>Stubble cultivated</i>	
	Modulaire	Keskikokoinen <i>Medium-size</i>	Modulaire	Keskikokoinen <i>Medium-size</i>
Kevätvilja <i>Spring cereal</i>				
1995-1996	95 (35)	145 (70)	70 (35)	120 (70)
1997	95 (35)	125 (50)	70 (35)	100 (50)
Syysvilja <i>Winter cereal</i>				
1995-96	100 (35)	110 (30)	75 (35)	105 (30)

kyys haittasi kokeen perustamista, eikä syyssänkimuokattuja ruutuja pystytty kylvämään. Tavoitteena oli kylvömuokata ja kylvää ruudut yhdellä ajokerralla (jyrsinkylvö). Keveyen traktorin teho ei kuitenkaan riittänyt jyrsettäessä (2 m työleveys) ja kylvöalusta oli liian karkea yhden jyrshintäkeran jälkeen. Keveyen traktorin ruudut jyrsettiin kerran ennen jyrsinkylvöä. Vuosina 1995–96 keskikokoisen traktorin ruuduissa maa jyrsettiin (työleveys 3 m) keväällä kahdesti ennen kylvölannoitusta. Keväällä 1997 ruudut jyrsettiin kertaalleen (3 m), minkä jälkeen ne jyrsinkylvettiin (2,5 m). Syksyllä 1995 jouduttiin syysviljakentällä keveyen traktorin ruudut jyrsimään ja kylvölannoittamaan erikseen teknisten vaikeuksien vuoksi. Keskikokoisen traktorin ruudut jyrsinkylvettiin. Muokattaessa myöhemmän ajokerran ajojäljet ajettiin edellisen ajokerran ajojälkien väliin, jotta kuormitus jakaantui mahdollisimman tasaisesti ruudulle.

Työleveyden ja ajokertojen perusteella laskettiin peltoliikenteen vuosittain aiheuttama kuormitus (Mg km ha⁻¹) eri traktorei-

ta käytettäessä (Taulukko 6). Traktorin painoon lisättiin työkoneneen paino laskettaessa Mg. Laskelmissa on mukana myös rikkakasviruiskutuksen, puinnin ja lannoitteen pintalevityksen (syysvehnä) kuormitus, joka oli kaikilla koejäsenillä sama. Edellä mainituissa työvaiheissa käytettiin suhteellisen kevyitä koneita (Taulukko 5). Niiden peltoliikenteestä aiheutunut kuormitus oli pieni verrattuna muokkauksen ja kylvön kuormitukseen.

Kevätviljakokeessa viljeltiin vuonna 1995 ohraa (*Hordeum vulgare*, Artturi) ja kahtena seuraavana vuonna kauraa (*Avena sativa*, Yty). Syysviljakokeessa viljeltiin vuonna 1995 syysvehnää (*Triticum aestivum*, Aura) ja seuraavana vuonna ohraa (Artturi). Kylvötiheys oli kaikilla viljoilla 500 itävää siementä m⁻². Kasvikohtaiset lannoitemäärät on esitetty Taulukossa 7. Traktoreiden tekniikasta johtuen traktorikoejäsenet kylvettiin eri kylvölannoittimilla. Kiertokokeiden perusteella siemenmäärän vaihtelu koneiden välillä oli 0–3 % (0–5 kg ha⁻¹). Lannoitemäärissä ero oli 1–4 % (2–11 kg ha⁻¹).

Taulukko 7. Viljojen lannoistus koekentittäin ja vuosittain.**Table 7.** Annual fertilization of crops in spring and winter cereal experiments.

	Kevätviljakenttä <i>Spring cereal experiment</i>			Syysviljakenttä <i>Winter cereal experiment</i>		
	Ohra -95 <i>Barley -95</i>	Kaura -96 <i>Oats -96</i>	Kaura -97 <i>Oats -97</i>	Syysvehnä -95 <i>Winter wheat -95</i>	Syysvehnä -96 <i>Winter wheat -96</i>	Ohra -97 <i>Barley -97</i>
Lannoite (kg ha ⁻¹) <i>Fertilizer (kg ha⁻¹)</i>	400	500	500	200	300	400
NPK	25-4-4	20-4-8	20-4-7	18-5-10	27-0-0	20-4-7

2.3 Olosuhteet koejakson aikana

Liitteessä 1 on esitetty sademäärä ja keskilämpötila kuukausittain kasvukauden aikana sekä tehoisan lämpötilan summa (Σ (vuorokauden keskilämpötila- 5 °C)) kylvöpäivästä puintipäivään. Koevuodet olivat touko-kesä-heinäkuun sademäärän suhteen poikkeuksellisia. Ko. kuukausien yhteenlaskettu sademäärä oli 69–99 mm (43–61 %) suurempi kuin keskimäärin. Vuosi 1996 oli selvästi viileämpi kesä-heinäkuussa kuin kahtena muuna vuonna tai keskimäärin (Liite 1).

Koekenttien ojaston toimivuutta seurattiin mittaamalla pohjaveden korkeutta (Liite 2). Lisäksi mitattiin roudan syvyys talven aikana (Liite 2). Mittaukset tehtiin molemmissa kenttäkokeissa varsinaisen koalueen reuna-alueelta kaikkiaan neljästä kohtaa. Pohjaveden korkeus määritettiin pohjavesiputkien avulla (Aura 1990). Roudan syvyys mitattiin metyleenisiniputkien värimuutoksesta (Soveri & Varjo 1977).

Lohkon ojitus toimi hyvin. Kun maa oli sulanut keväällä, pohjaveden pinta laski olleen kevätkylvöjen aikaan metrissä tai syvemmällä (Liite 2). Kasvukauden aikana runsaat sateet nostivat sen väliaikaisesti lähemmäksi maan pintaa. Maa routaantui molemmilla kentillä vähintään 0,4 m:n syvyyteen molempina mittaustalvina. Talvella 1996–97 maa alkoi sulaa pinnasta ensimmäisen kerran maaliskuussa (Liite 2), minkä jälkeen se jäättyi uudelleen ja routa ulottui syvemmälle kuin alkutalvella.

2.4 Mittaukset ja määrittelyt

2.4.1 Mittaukset maasta

Taulukossa 8 on esitetty koekentittäin maasta tehdyt mittaukset koejakson aikana. Maan mekaaninen vastus mitattiin keväällä kylvön jälkeen. Maan kosteus oli kaikkina vuosina mittaussyvyyydessä kuivan pinnan (0–0,07 m) alapuolella lähellä kenttäkapasiteettia. Maan mekaaninen vastus mitattiin kartiopenetrometrillä. Se mittasi kartion maahan painamiseen tarvittun voiman 3,5 cm:n välein 0,52 m:n syvyydestä (Anderson et al. 1980). Kartion halkaisija oli 12,8 mm ja se painettiin maahan noin 0,03 m s⁻¹ nopeudella. Mekaaninen vastus (MPa) saatiin kertomalla mitattu voima kartion alan huomioivalla kertoimella 0,0762 (Findlay, Irvine ltd. 1987). Ruudun molemmista päistä mitattiin 10 pistoa kahden metrin matkalta. Ruudun keskimääräinen mekaaninen vastus eri syvyyksissä oli mittausten mediaani (n=20).

Kentiltä otettiin vuosittain häiriintymättömiä maanäytteitä laboratoriomäärittelyä varten. Näytteet otettiin PVC-putkeen (halkaisija 0,15 m, pituus 0,55 m) Pöyhösen et al. (1997a) kuvaamalla traktorisovitteisella kairalla maan ollessa kosteaa. Näytteitä otettiin kaksi jokaisesta ruudusta jokaisena näytteenottokertana. Laboratoriossa näytteet katkaistiin kolmeksi kerrosnäytteeksi: perusmuokkauskerros (0–0,20 m), perusmuokkauskerros alapuolinen kerros (0,20–0,35 m) ja pohjamaakerros (0,35–0,55 m). Jotta maan rakenne oli näytteen pinnassa häiriintymätön ja huoko-

Taulukko 8. Kenttäkokeista koejakson aikana tehdyt mittaukset ja määriykset.
Table 8. Soil and crop properties determined during the experimental period.

	Vuosittain tehdyt mittaukset Annual measurements					
	Kevätviljakoe Spring cereal experiment			Syysviljakoe Winter cereal experiment		
	1995	1996	1997	1995	1996	1997
Maan mekaaninen vastus <i>Soil penetration resistance</i>		x	x			x
Makrohuokosto <i>Macroporosity</i>	x	x	x		x	
Kyllästetyn maan vedenjohtavuus <i>Saturated hydraulic conductivity</i>	x	x	x		x	
Lierokanavat > 2 mm <i>Cylindrical pores > 2 mm</i>	x	x	x		x	
Maan kosteus kasvukauden aikana <i>Soil moisture content during growing season</i>	x	x	x	x ¹⁾	x	x
Siemensato <i>Grain yield</i>	x	x	x		x	x
Puintikosteus <i>Grain moisture content at harvest</i>	x	x	x		x	x
Typpisato <i>Nitrogen yield</i>	x	x	x		x	x

¹⁾Syksyllä kylvön jälkeen.

¹⁾In autumn after sowing.

set avoimia, leikkauspinnasta poistettiin tahtaantunut maa veistä ja pölynimuria käyttäen. Näytteiden pinnasta laskettiin halkaisijaltaan yli 2 mm:n sylinterin muotoisten huokosten lukumäärä ja määritettiin niiden kokonaisala näytteen pinta-alasta.

Katkaistuista näytteistä määritettiin kyllästetyn maan vedenjohtavuus (constant head method) ja makrohuokosto (alipainemenetelmällä, huokosten halkaisija >300–400 µm, veden potentiaali -1 – -0,7 kPa) Auran (1990) selostamalla tavalla. Tämän jälkeen näytteet pantiin keramiikkalevyille ja määritettiin maan makrohuokosto (halkaisija >30 µm) -10 kPa:n potentiaalissa Auran (1990, 1995) kuvaamalla tavalla.

Maan kosteus mitattiin kasvukauden aikana 1–2 kertaa viikossa. Maan kosteus tilavuusyksikköä kohti mitattiin 0–0,30 m:n syvyydestä TDR-menetelmällä (Topp et al. 1980) TRASE-system I:ä käyttäen (Soil moisture Equipment Corp.). Menetelmä

perustui siihen, että maassa kulkevan sähkömagneettisen pulssin etenemisnopeuden perusteella määritettiin maan näennäinen dielektrisyysluku. Maan kosteus voitiin laskea dielektrisyysluvun perusteella.

Maan kosteuden muutoksia 0,20 m:n syvyydessä määritettiin kipsiblokeilla (Soil moisture Equipment Corporation 1989). Kipsiblokeissa kahden verkkomaisen metallielektrodin välinen vastus kasvoi, kun niitä ympäröivän kipsin vesipitoisuus pieneni maan kuivuessa. Kipsiblokit oli kalibroitu mittaamaan kasveille käyttökelpoisen veden määrää maassa prosentteina. Kenttäkapasiteetissa (veden potentiaali - 10 kPa) mittarin lukema oli 95 % ja lakastumisrajalla (1,5 MPa) alle 5 %. Maan kosteus mitattiin molemmilla menetelmillä ruudun kummastakin päästä. Kosteus mitattiin kasvukauden aikana aina samasta kohtaa. Sekä TDR-puikot että kipsiblokit asennettiin maahan kylvön jälkeen ja otettiin siitä pois vasta ennen puintia.

Syysviljakentällä seurattiin syysvehnää viljeltäessä irtoveden korkeutta pinnasta puolen metrin syvyyteen syksyllä 1995 sekä keväällä ja alkukesällä 1996. Mittausta varten jokaiseen ruutuun asennettiin 0,50 m pitkä pohjavesiputki.

2.4.2 Satomittaukset

Sadosta tehdyt määritykset koekentittäin ja koevuosittain on esitetty Taulukossa 8. Kevätiljakokeessa koeruudusta puitiin neljä 2,1 x 15 m:n kaistaa (kokonaisala 130 m²). Syysviljakokeessa puitiin kaksi 2,1 x 16 m:n kaistaa (kokonaisala 70 m²). Sadon kuiva-ainepitoisuus määritettiin kuivaamalla 40 g:n näyte 105 °C:ssa. Siemensadon pintikosteus laskettiin kuiva-ainemäärityksen perusteella. Ruutusato (kosteus 15 g 100 g⁻¹) ja sen pintikosteus laskettiin osatujen keskiarvona. Siemensadon kuiva-aineen typpipitoisuus määritettiin NIR-menetelmällä (McGuire 1986). Typpisato laskettiin siemensadon (kuiva-ainesato) ja typpipitoisuuden perusteella.

2.5 Aineiston tilastollinen käsittely

Kenttäkokeet olivat osaruutukokeita: pääruututekijä oli syysmuokkaus ja osaruututekijä muokkauksessa ja kylvössä käytetty traktori. Aineisto analysoitiin pääosin varianssianalyysillä split-plot -mallia käyttäen (Steel & Torrie 1980). Vuonna 1995 aineiston analysoinnissa käytettiin lohkoittain satunnaistetun kokeen mallia (Steel & Torrie 1980). Kun varianssianalyysin merkitsevyystaso alitti 0,05 ($P < 0,05$), keskiarvojen väliset parivertailut tehtiin Tukeyn HSD-testillä 5 %:n riskitasolla (Steel & Torrie 1980). Mikäli koejäsenten välillä oli yhdysvaikutus, parittaiset vertailuarvot laskettiin kummankin syysmuokkauksenkäsittelyn osalta erikseen. Kyllästetyn maan vedenjohtavuusaineistoa analysoitaessa käytettiin logaritimuunnosta ($\log(K_{\text{sat}} + 1)$, Steel & Torrie 1980).

Tulokset analysoitiin erikseen vuosittain. Tilastollista analyysiä ei tehty, kun keskiarvojen välinen ero ei ollut merkittävä (mittaukset maasta 0,35 m syvemmällä) ja tekniset vaikeudet vaikuttivat tuloksiin (satomittaukset, maan kosteus kasvukauden aikana). Tulosten analysoinnissa käytettiin SAS-ohjelmiston MIXED-proseduuria (SAS 1992).

3 Tulokset ja niiden tarkastelu

Kevyen traktorin laskennallinen pintapaine oli pienempi (30 kPa, telakuorma 1,25 Mg) kuin keskikokoisen paripyörillä varustetun traktorin (50–70 kPa, rengaskuorma taka-akselilla 1,4–1,6 Mg). Keskikokoisen traktorin ajourat peittivät kuitenkin leveämmän alan kuin kevyen traktorin ajourat. Traktoreiden rengas/telakuorma oli lähes sama, mutta niiden kuormitustapa oli erilainen. Keskikokoisella traktorilla ajettaessa maata kuormitti kaksi peräkkäistä, lähes yhtäsuurta kuormitusta: samassa urassa kulkeneiden etu- ja takapyörien kuormitus. Pitkän telan alla yhtäjaksoinen kuormitusaika tiettyssä pisteessä oli pidempi kuin leveän renkaan alla. Traktoreiden kokonaiskuormitusaika, joka saatiin laskemalla keskikokoisen traktorin etu- ja takapyörien vaikutusaika yhteen, oli kuitenkin lähes sama (Pöyhönen et al. 1999).

Kuormitukseen vaikuttaa peltoajossa paitsi pintapaine ja akselipaino myös ajokertojen määrä. Työvaiheittain ajokerrat pyrittiin pitämään samana kylvömuokkauksessa ja kylvössä eri traktoreilla ajettaessa. Koska kevyen traktorin työkonet olivat yleensä kapeampia (Taulukko 5) kuin keskikokoisen traktorin, ajokilometrejä tuli kevyellä traktorilla pinta-alayksikköä kohti enemmän. Jotta työlevyden ja koneen painon yhteisvaikutus voitiin huomioida, laskettiin peltoliikenteen aiheuttama kuormitus Mg km ha⁻¹. Kun muokkauksessa ja kylvössä käytettiin kevyttä traktoria, kuormi-

Taulukko 9. Savimaan mekaaninen vastus (n=4) koekentittäin vuosina 1996 ja 1997. P = kynnetty (0,20–0,23 m), C = sänkimuokattu (0,10–0,15 m), S = keskikokoinen traktori muokkauksessa ja kylvössä, M = kevyt traktori em. työvaiheissa.

Table 9. Clay soil penetration resistance (n=4) in 1996 and 1997. P = ploughed (0.20–0.23 m), C = stubble cultivated (0.10–0.15 m), S = conventional tractor used in tillage and sowing, M = light tractor.

Syvyys (m) Depth (m)	Maan mekaaninen vastus (MPa) Soil penetration resistance (MPa)									
	Kyntö Ploughed		Kultivointi Cultivated		Muokkaus Tillage		Traktori Tractor		P-arvo P-value	
	S	M	S	M	P	C	S	M	Muokkaus Tillage	Traktori Tractor
Kevätviljakenttä keväällä 1996 Spring cereal field in spring 1996										
0,07 - 0,14	0,61	0,35	0,60	0,51	0,48	0,55	0,60	0,43	NS	0,004
0,14 - 0,21	0,69	0,53	1,16	1,07	0,61	1,12	0,92	0,80	0,001	0,03
0,21 - 0,35	0,88	1,00	1,32	1,34	0,94	1,33	1,10	1,17	0,006	NS
0,35 - 0,52	1,63	1,67	1,80	1,73	1,65	1,77	1,72	1,70	NS	NS
Kevätviljakenttä keväällä 1997 Spring cereal field in spring 1997										
0,07 - 0,14	1,21	0,83	1,13	0,79	1,02	0,96	1,17	0,81	NS	0,003
0,14 - 0,21	0,91	0,78	1,44	1,16	0,84	1,30	1,17	0,97	0,002	0,001
0,21 - 0,35	1,25	1,22	1,86	1,69	1,23	1,77	1,55	1,45	0,002	NS
0,35 - 0,52	1,96	1,91	2,01	2,00	1,93	2,00	1,98	1,95	NS	NS
Syysviljakenttä keväällä 1997 Winter cereal field in spring 1997										
0,07 - 0,14	0,83	0,49	0,71	0,51	0,71	0,72	0,87	0,61	NS	0,0001
0,14 - 0,21	0,72	0,59	1,04	0,90	0,66	1,10	0,99	0,88	0,009	0,04
0,21 - 0,35	1,20	1,10	1,74	1,63	1,35	1,79	1,56	1,47	0,001	NS
0,35 - 0,52	1,82	2,00	1,98	1,96	1,88	1,95	1,89	1,96	NS	NS

NS, ero ei ollut tilastollisesti merkitsevä.

NS, not significant.

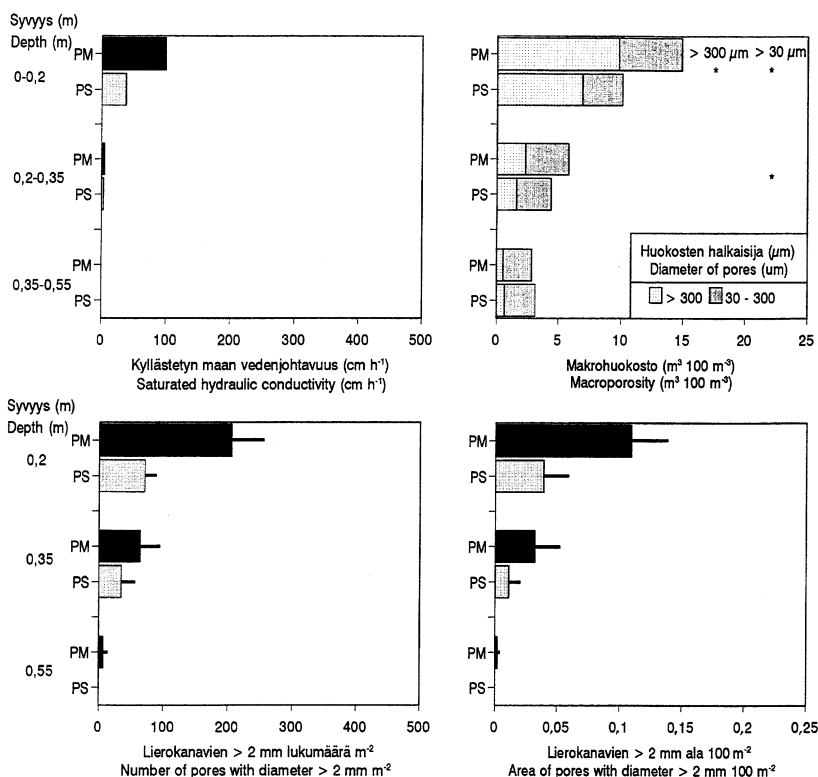
tus oli kevätiljaa viljeltäessä kynnössä 24–34 % ja sänkimuokkauksessa 33–42 % pienempi kuin keskikokoista traktoria käytettäessä. Syysviljaa viljeltäessä vastaavat luvut olivat 9 ja 28 % (absoluuttiset luvut on esitetty Taulukossa 6). Peltoliikenteen kuormitus ruuduilla vastasi kuormitusta peltolohkon keskiosassa. Päisteissä ja muilla kääntöalueilla kuormitus oli suurempi käännösten vaatiman päällekkäinajon vuoksi.

3.1 Maan fysikaaliset ominaisuudet

3.1.1 Mekaaninen vastus

Taulukossa 9 ja Liitteessä 3 esitetään maan mekaaninen vastus vuosina 1996 ja 1997. Mekaaninen vastus mitattiin pian kylvön jälkeen, jolloin maa oli kuivan kylvömuokauskerroksen (0–0,07 m) alla lähellä kenttäkapasiteettia (kappale 3.2). Erot maan kosteudessa eivät vaikuttaneet koejäsenten välisiin eroihin.

Mittaustulosten hajonta oli pieni. Variatiokerroin (CV) oli keskimäärin 12 % (1–41 %). CV oli samaa suuruusluokkaa kuin muissa samoissa oloissa kivennäismailla tehdyissä mittauksissa (Alakukku 1997). Hajonta oli suurin 0–0,14 m:n syvyydessä.



Kuva 3. Makrohuokosto (halkaisija >300 μm ja >30 μm), kyllästyneen maan vedenjohtavuus sekä lierokanavien (>2 mm) lukumäärä ja pinta-ala pinta-ala yksikköä kohden (pylvään sivulle lisätty keskiarvon keskivirhe, n=4) kevätiljakentällä syksyllä 1995. Koejäsenten lyhenteet kuten Taulukossa 9. * = tilastollisesti merkitsevä ero P < 0,05, (*) P < 0,10. Numeeriset arvot esitetään Liitteissä 4–6.

Figure 3. Macroporosity (diameter >300 μm ja >30 μm), saturated hydraulic conductivity and number and cross sectional area of cylindrical pores (>2 mm, earthworm burrows) in spring cereal field in autumn 1995. Treatments as in Table 9. * = difference between means statistically significant P < 0.05, (*) P < 0.10. The horizontal line immediately beside the bar indicates one standard error of mean (n=4). Numerical values in Appendices 4–6.

Sitä syvemmällä variaatiokerroin oli yleensä alle 15 %.

Kyntämättömän maan mekaaninen vastus oli suurempi kuin kynnetyssä 0,14–0,35 m:n syvyydessä (Taulukko 9, Liite 3). Myös Pitkänen (1988) sekä Børresen & Njøs (1993) totesivat kynnetyssä kivennäismaan mekaanisen vastuksen olleen pienempi kyntökerroksen alaosassa kuin syväankimuoikatun (työsyvyys 0,1–0,15 m) maan. Heidän kokeissaan mekaaninen vastus tosin mitattiin 6–13 vuoden koejakson jälkeen.

Ero mekaanisessa vastuksessa johtui eri perusmuokkaussyvyydestä. Kyntö (työsyvyys 0,2 m) kuohkeutti maan syvemmälle kuin syväankimuoikkaus (0,10–0,15 m).

Maan mekaaninen vastus oli 0,07–0,21 m:n syvyydessä pienempi kevyen traktorin ruuduissa kuin keskikokoisen traktorin ruuduissa (Taulukko 9, Liite 3). Myös erillisissä mittauksissa, joissa vastus mitattiin kummankin traktorin ajourien kohdalta viiden ajokerran jälkeen, mekaaninen vastus oli 0,07–0,14 m:ssä selvästi pienempi

kevyen traktorin urien kohdalla kuin keskikokoisen traktorin urissa (Pöyhönen et al. 1997b, 1999). Erillisten mittausten mukaan molemmat traktorit tiivistivät maata, sillä mekaaninen vastus oli kevyen traktorin ajourien kohdalla suurempi kuin ennen ajoa. Tiivistymä oli voimakkain hieman ajourien alapuolella (0,14 m:ssä, Liite 3), mikä tuki aikaisempia mittauksia (Aura 1983, Elonen et al. 1995). Kiinnostavaa tuloksissa oli se, että mekaaninen vastus oli syysänkimuokatuissa kevyen traktorin ruuduissa yleensä pienempi 0,07–0,14 m:ssä kuin kynnetyissä keskikokoisen traktorin ruuduissa (Taulukko 9, Liite 3).

3.1.2 Makrohuokosto

Kuvissa 3 ja 4 sekä Liitteissä 4 ja 5 esitetään tulokset maan makrohuokostomäärityksistä vuosina 1995–1997. Makrohuokosto oli suurin ylimmässä mittauserroksessa ja pieneni selvästi syvemmällä (Kuvat 3 ja 4). Sama on todettu aikaisemmissa mittauksissa savimailla (Aura 1990, Turtola & Paajanen 1995, Alakukku 1997). Makrohuokosto ($>30 \mu\text{m}$) oli 0–0,20 metrissä yleensä suurempi kuin $10 \text{ m}^3 100 \text{ m}^{-3}$ (Kuva 4, Liite 5), mikä Auran (1983) mukaan oli kriittinen raja kasvien kasvun kannalta.

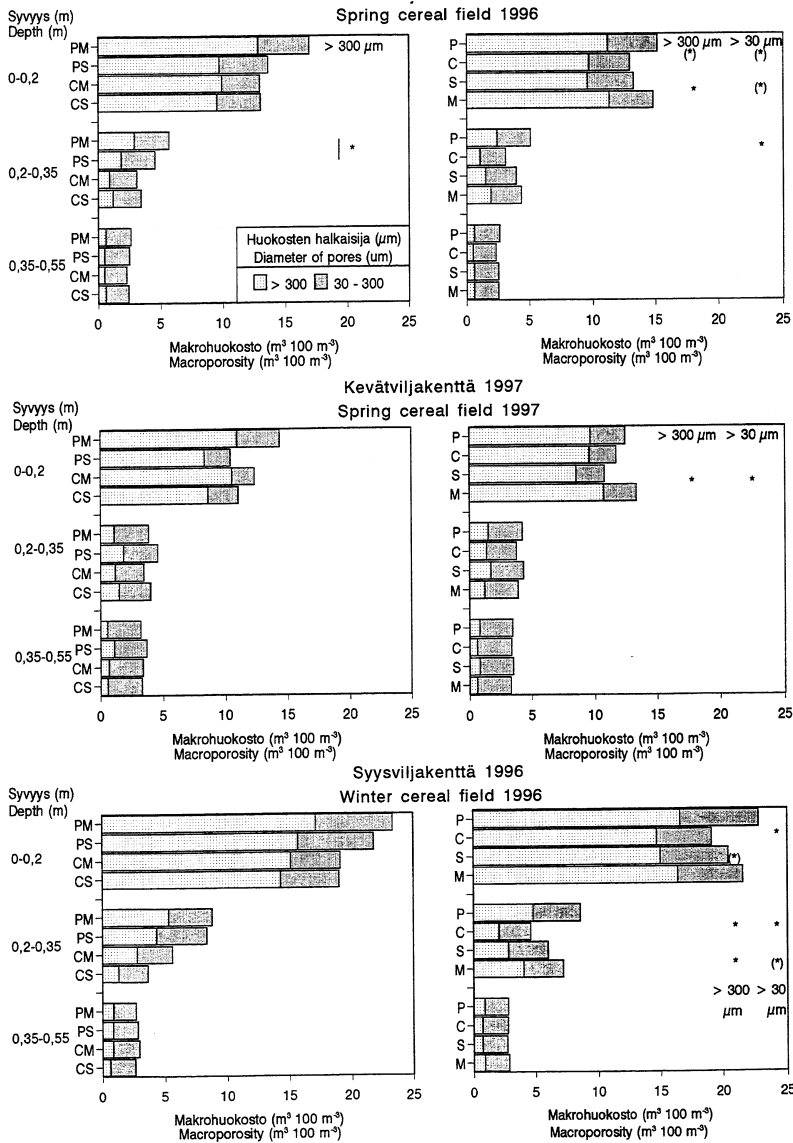
Kevätviljakentän makrohuokosto ($>300 \mu\text{m}$) oli samaa suuruusluokkaa kuin Auran (1990) tutkimuksessa jäykällä savimailla. Syysviljakentällä se oli 0,20–0,35 m:n syvyydessä suurempi kuin Auran tutkimuksessa keskimäärin. Pohjamaassa ($>0,35 \text{ m}$) suurin makrohuokosto oli pienempi kuin Alakukun (1996) mittauksissa hyväarakenteisessa aitosavimaassa (savesta $66 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$). Turtolan & Paajasen (1995) tutkimuksessa aitosavimaan, jonka ojitus toimi huonosti, suurin makrohuokosto oli selvästi pienempi kuin tässä tutkimuksessa. Syytä kevät- ja syysviljakentän väliseen eroon makrohuokostossa 0–0,35 m:ssä ei voitu näiden tulosten perusteella päätellä.

Mittaustulosten hajonta oli suurehko ($20 \% < CV < 70 \%$), mikä oli yleistä tämän

tyyppisissä mittauksissa (Jury et al. 1991). Variaatiokerroin (makrohuokosto $>300 \mu\text{m}$) oli 0–0,20 m:ssä keskimäärin 23 % (6–114 %) ja syvemmällä 41 % (4–124 %). CV oli hieman pienempi kuin Alakukun (1997) esittämät kertoimet kivennäismaille (keskimäärin 55 %), mutta vaihteluväli oli pintakerroksen alapuolella hieman suurempi kuin hänen mittauksissaan (5–115 %). Halkaisijaltaan $>30 \mu\text{m}$:n makrohuokoston mittauksessa CV oli 0–0,20 m:ssä keskimäärin 14 % (4–20 %) ja syvemmällä 20 % (5–41 %). Myös Alakukun (1997) mukaan hajonta oli pienempi halkaisijaltaan $>30 \mu\text{m}$ makrohuokoston mittaustuloksissa kuin $>300 \mu\text{m}$ makrohuokoston tuloksissa.

Vuonna 1996 kynnetyissä maassa makrohuokosto oli 0–0,20 ja 0,20–0,35 m:ssä suurempi (>300 ja $30 \mu\text{m}$) kuin sänkimuokatussa maassa (Kuva 4, Liitteet 4 ja 5). Tämä tuki Alakukun (1998) hienesavimaan suurimman makrohuokoston ($>300 \mu\text{m}$) tuloksia 0–0,20 m:ssä viiden koevuoden jälkeen. Tiirin (1991) mukaan kynnetyn (0,2 m) hienesavimaan makrohuokosto (>300 ja $30 \mu\text{m}$) oli 0–0,20 ja 0,20–0,38 m:ssä suurempi kuin pelkästään kylvömuokatun maan kuuden koevuoden jälkeen.

Peltoliikenne tiivisti suurinta makrohuokostoa ($>300 \mu\text{m}$) 0–0,20 m:n syvyydessä (Kuvat 3 ja 4, Liitteet 4 ja 5), mikä tuki aiempien peltoliikennetutkimusten tuloksia hienojakoisilla kivennäismaille. Auran (1983) mukaan peltoliikenne (traktorin paino 3 Mg, rengaspaine 140 kPa) tiivisti savimaan kyntöeroksessa eniten suurinta makrohuokostoa (potentiaali -1 kPa). Alakukun (1997) mukaan hienesaven raskas kuormittaminen (21 Mg teliakselipaino, rengaspaine 800 kPa) pienensi eniten kaikkein suurinta makrohuokostoa ($>430 \mu\text{m}$) kyntöeroksessa. Comia et al. (1994) vertasivat tavanomaisen kylvömuokkauksen (3 äestystä, kylvö) ja jyrskilyvön (muokkaus ja kylvö yhdellä ajokerralla) vaikutusta savimaiden (savesta $31\text{--}49 \text{ g } 100 \text{ g}^{-1}$) makrohuokostoon. Kahdeksan koevuoden jälkeen jyrskilyvetyissä ruuduissa makrohuokosto



Kuva 4. Savimaan makrohuokosto (halkaisija >400 μm 0,20–0,35 m:ssä, muuten >300 μm ja halkaisija > 30 μm) koekentittäin ja koevuosittain. Kevätviljaketä näyttöet otettiin syksyllä 1996 ja 1997 ja syysviljaketältä keväällä 1996. Koejäsenten lyhenteet kuten Taulukossa 9. * = tilastollisesti merkitsevä ero $P < 0,05$, (*) $P < 0,10$. Numeriset arvot esitetään Liitteissä 4 ja 5.

Figure 4. Soil macroporosity (diameter >300 μm in layers 0–0.20 m and 0.35–0.53 m, >400 μm in layer 0.20–0.35 m and macroporosity >30 μm) in spring and winter cereal fields. Soil samples were collected from spring cereal field in autumn 1996 and 1997, and from winter cereal field in spring 1996. Treatments as in Table 9. * = difference between means statistically significant $P < 0.05$, (*) $P < 0.10$. Numerical values in Appendices 4 and 5.

(> 100 μm) oli keskimäärin suurempi kuin verranneruuduissa 0,13–0,25 m:ssä sekä syyskynnetyssä (0,25 m) että sänkimuokatussa (0,13 m) maassa. Ero ei ollut kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä (Comia et al. 1994).

Kynnetyssä maassa traktorikoejäsenten välinen ero makrohuokostossa oli yleensä suurempi kuin sänkimuokatussa maassa (Kuva 4, Liitteet 4 ja 5). Chamen & Longstaff (1995) mittasivat savimaan (savesta 60 g 100 g⁻¹) makrohuokostoa 0,10, 0,15 ja 0,30 m:n syvyydessä seitsemän koevuoden jälkeen. Heidän mukaansa sekä kynnetyssä (0,2 m) että sänkimuokatussa (0,125 m) koejäsenessä oli enemmän suuria makrohuokosia peltoliikennöimättömässä (käytetty koneenkantajaa) maassa kuin tavanomaisesti viljelyssä maassa. Chamenin & Longstaffin (1995) kokeessa peltoliikennekoejäsenten välinen ero oli pienempi kynnetyssä maassa kuin sänkimuokatussa maassa. Tulosten ristiriitaa ei voida varmasti päätellä käytettävissä olevan aineiston perusteella. Eräs syy voi kuitenkin olla se, että raportoitavassa kokeessa peltoliikenteen todennäköinen kumuloituva vaikutus sänkimuokauskoejäsenessä ei ollut mitattavissa vielä kolmen koevuoden aikana.

3.1.3 Kyllästetyn maan vedenjohtavuus (K_{sat})

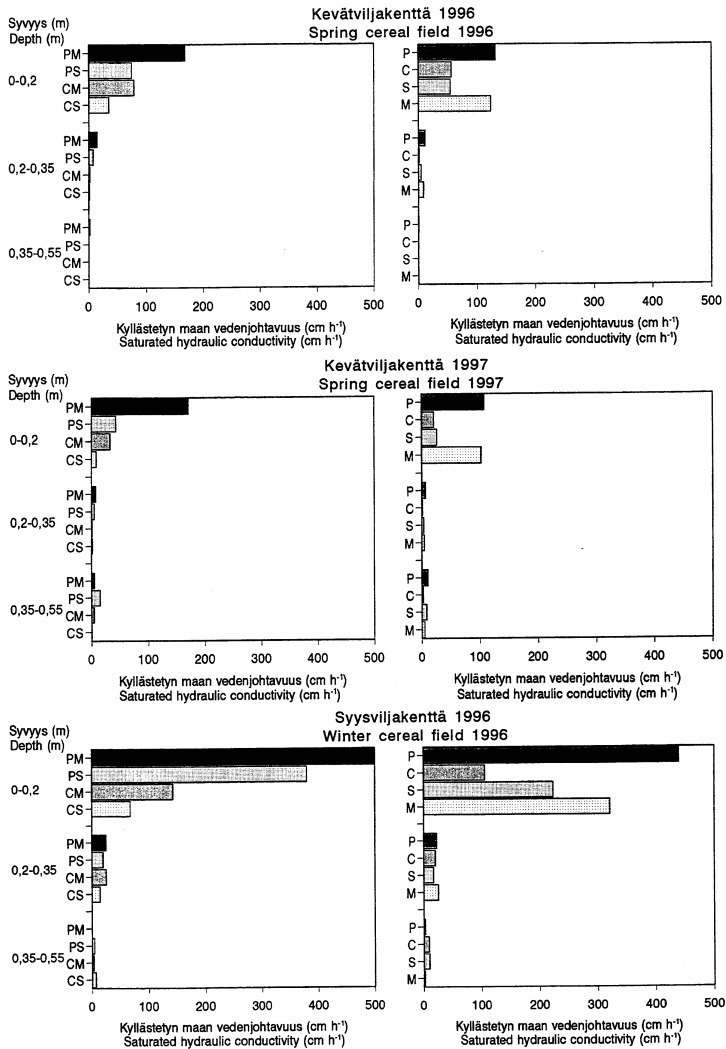
Kyllästetyn maan vedenjohtavuus oli suurin 0–0,20 m:n syvyydessä ja pieneni nopeasti syvemmällä (Kuvat 3 ja 5, Liite 6), mikä oli luonteenomaista jäykille savimaille (Aura 1990). Ylimmän kerroksen K_{sat} oli samaa suuruusluokkaa kuin jäykissä savimaissa Auran (1990) samalla mittausmenetelmällä tekemissä määrittelyissä. Pohjamaan K_{sat} oli samaa suuruusluokkaa tai suurempi kuin Auran (1990) mittauksissa, mutta yleensä pienempi kuin Alakukun (1997) mittauksissa luontaisesti hyväraakenteisessa pohjamaassa (savesta 53–66 g 100 g⁻¹). Turtolan & Paajasen (1995) tutkimuksessa jäykän savimaan, jossa ojitus toimi huonosti ja lierotoiminta ei ollut vilkasta,

K_{sat} oli 0,20–0,60 m:n syvyydessä keskimäärin selvästi pienempi kuin näissä kentäkokeissa. Osasyynä siihen, että syysviljakokeessa K_{sat} oli suurempi kuin kevätiljakokeessa, oli todennäköisesti se, että kevätiljakentän maassa oli vähemmän lierokanavia kaikissa mittaussyvyyksissä kuin syysviljakentällä (Kuva 6).

Mittaustulosten hajonta oli suuri. Variatiokerroin (CV) oli 0–0,20 m:n syvyydessä keskimäärin 80 % (30–152 %) ja 0,20 m:ä syvemmällä 120 % (7–197 %). CV oli samaa suuruusluokkaa kuin muissa tutkimuksissa, joissa kivennäismaiden K_{sat} mitattiin samalla mittausmenetelmällä kuin tässäkin tutkimuksessa (Pitkänen & Nuutinen 1995, Alakukku 1997). Etenkin 0,20 m:ä syvemmällä hajontaa aiheutti todennäköisesti lierokanavien epätasainen jakautuminen näytteiden kesken. Yksittäinen jatkuva lierokanava voi vaikuttaa merkittävästi kyllästetyn maan vedenjohtavuuteen (Bouma 1991).

Kynnetyn maan K_{sat} oli suurempi 0–0,20 m:n syvyydessä kuin syysänkimuokatussa (Kuva 5, Taulukko 10), mikä tuki Alakukun (1998) tuloksia hiesavimaalla viiden vuoden syysänkimuokkauksen jälkeen. Myös Pitkäsen & Nuutisen (1995) tutkimuksessa K_{sat} oli keskimäärin suurempi kynnetyssä kuin sänkimuokatussa hiesavimaassa 0–0,20 m:ssä 10 koevuoden jälkeen. Ruotsalaisessa tutkimuksessa perusmuokkaus (kyntö 0,25 m, sänkimuokkaus 0,13 m) ei kuitenkaan vaikuttanut savimaiden (savesta 31–49 g 100 g⁻¹) kyllästetyn maan vedenjohtavuuteen 0,13–0,25 m:n syvyydessä kahdeksan koevuoden jälkeen (Comia et al. 1994).

Molemmassa syysmuokauskoejäsenissä K_{sat} oli kevyen traktorin ruuduissa 0–0,20 m:n syvyydessä suurempi kuin keskikokoisen traktorin ruuduissa (Kuvat 3 ja 5, Liite 6). Traktorikoejäsenten välinen ero ei ollut kuitenkaan aina tilastollisesti merkitsevä (Taulukko 10). Kyllästetyn maan vedenjohtavuus pienenee nopeasti jatkuvien makrohuokosten määrän vähetessä. Tulokset viittasivatkin siihen, että peltoliikenne



Kuva 5. Kyllästetyn maan vedenjohtavuuden aritmeettiset keskiarvot ($n=4$) koe-kentittäin. Kevätviljakentältä näytteet otettiin syksyllä 1996 ja 1997 ja syysvilja-kentältä keväällä 1996. Lyhenteet kuten Taulukossa 9. Aineiston tilastollisen tes-tauksen tulokset Taulukossa 10. Numeeriset arvot Liitteessä 6.

Figure 5. Arithmetic means of saturated hydraulic conductivity ($n=4$) of clay soils. Soil samples were collected from spring cereal field in autumn 1996 and 1997, and from winter cereal field in spring 1996. Treatments as in Table 9. For statisti-cal analysis, see Table 10. Numerical values in Appendix 6.

sekä pienensi makrohuokostoa että heikensi sen jatkuvuutta.

3.1.4 Lierokanavat

Kuvissa 3 ja 6 esitetään halkaisijaltaan yli 2 mm:n huokosten lukumäärä sekä Kuvissa 3

Taulukko 10. Tilastolliset testit kyllästetyn maan vedenjohtavuus tuloksista ($\log(K_{\text{sat}}+1)$, $n=4$) koekentittäin ja koevuosittain. Keskimääräinen K_{sat} on esitetty Kuvissa 3 ja 5 ja Liitteessä 6. Lyhenneet kuten Taulukossa 9.

Table 10. Statistical analyses of saturated hydraulic conductivity ($\log(K_{\text{sat}}+1)$, $n=4$) data from clay soils in 1995–1997. Average K_{sat} shown in Figures 3 and 5 and Appendix 6. Treatments as described in Table 9.

Syvyys (m) Depth (m)	Kyllästetyn maan vedenjohtavuus ($\log(K_{\text{sat}}+1)$, cm h^{-1}) Saturated hydraulic conductivity ($\log(K_{\text{sat}}+1)$, cm h^{-1})									
	Kyntö <i>Ploughed</i>		Kultivointi <i>Cultivated</i>		Muokkaus <i>Tillage</i>		Traktori <i>Tractor</i>		P-arvo <i>P-value</i>	
	S	M	S	M	P	C	S	M	Muokkaus <i>Tillage</i>	Traktor <i>Tractor</i>
	Kevätviljakenttä syksyllä 1995 <i>Spring cereal field in autumn 1995</i>									
0 - 0,20	3,3	4,6								(0,08)
0,20 - 0,35	1,06	1,1								NS
	Kevätviljakenttä syksyllä 1996 <i>Spring cereal field, in autumn 1996</i>									
0 - 0,20	4,0	5,1	3,1	3,5	4,5	3,3	3,6	4,3	(0,10)	NS
0,20 - 0,35	1,6	2,5	0,7	0,7	2,0	0,7	1,2	1,6	(0,08)	NS
	Kevätviljakenttä syksyllä 1997 <i>Spring cereal field in autumn 1997</i>									
0 - 0,20	3,3	4,8	2,2	3,3	4,0	2,7	2,7	4,1	(0,08)	0,003
0,20 - 0,35	0,9	1,7	0,8	0,6	1,3	0,7	0,9	1,1	NS	NS
	Syysviljakenttä keväällä 1996 <i>Winter wheat field in spring 1996</i>									
0 - 0,20	5,9	6,1	4,0	4,3	6,0	4,2	5,0	5,2	0,05	NS
0,20 - 0,35	3,1	3,1	2,4	2,3	3,1	2,3	2,7	2,7	NS	NS

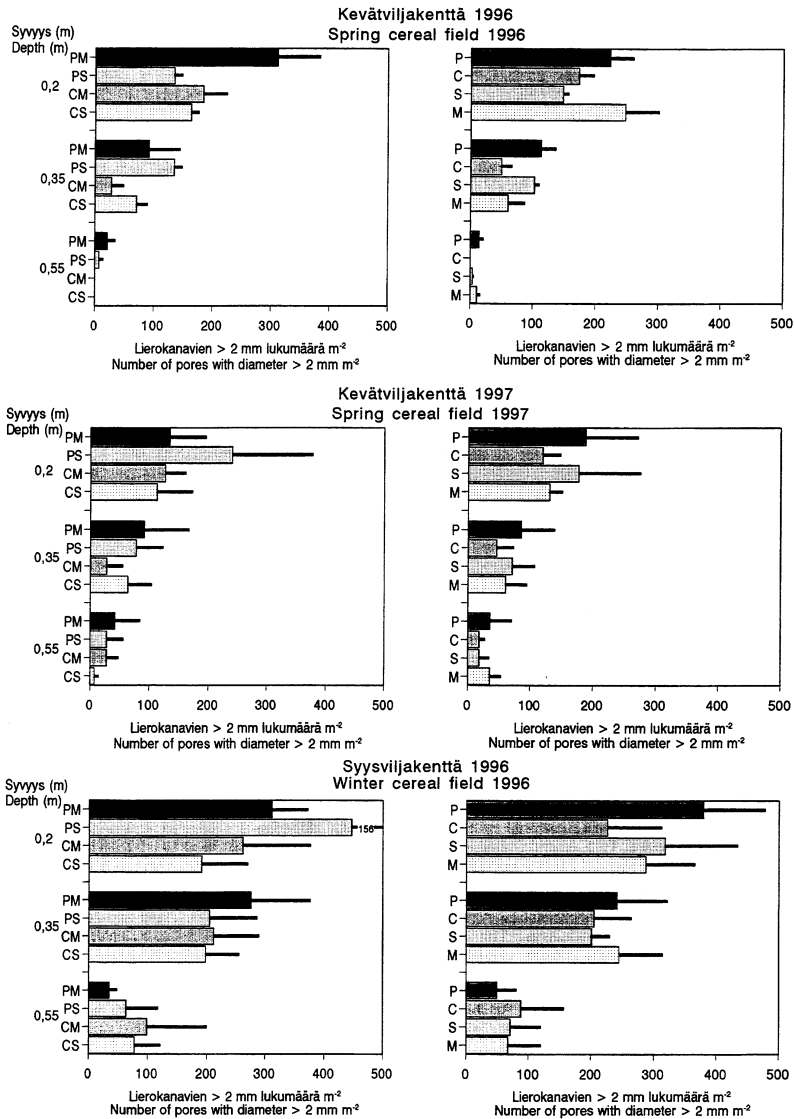
NS, ei tilastollisesti merkitsevää eroa.
NS, not significant.

ja 7 niiden alan suhteellinen osuus kokonaisalasta. Lierokanavien lukumäärä oli 0,20 m:ä syvemmällä pienempi kuin Pitkäsén & Nuutisen (1995) sekä Alakukun (1997) määrityksissä hiuesavimaassa, mutta suurempi kuin Pitkäsén (1993) kokeessa aito-savimaassa. Lierokanavien ala oli selvästi pienempi kaikissa mittaussyvyyksissä kuin Alakukun (1998) määrityksissä hiuesavimaassa (savesta 42–59 g 100 g⁻¹).

Lierokanavien tilavuusosuutta maatalavuudesta voidaan arvioida siten, että oletetaan kaikkien näytteen pohjassa olleiden lierokanavien ulottuvan näytteen pintaan. Tällöin lierokanavien osuus kokonaisalasta olisi sama kuin lierokanavien tilavuusosuus näytteen kokonaistilavuudesta. Tarkasteltavissa kokeissa lierokanavien (>2 mm) osuus oli molemmissa kenttäkokeissa yleen-

sä pienempi kuin 0,15 m³ 100 m⁻³ (Kuvat 3 ja 7). Kevätviljakentän pohjamaassa 0,35 m:ä syvemmällä ja syysviljakentällä 0,55 m:n syvyydessä lierokanavien ala oli pienempi kuin Alakukun (1996) määrityksissä luontaisesti hyvärakenteisessa pohjamaassa (savesta 53–66 g 100 g⁻¹). Lierokanavat muodostivat pienen osan suurimmista makrohuokosista (>300 µm, Kuvat 3 ja 4). Tästä huolimatta jatkuvat lierokanavat voivat parantaa merkittävästi kyllästetyn massiivisen pohjamaan vedenjohtavuutta (Schrader et al. 1995). Lisäksi vähäinenkin määrä lierokanavia voi selvästi edesauttaa juuriston syvyyskasvua (Jakobsen & Dexter 1988), nopeuttaa maan ilmanvaihtoa sekä veden imeytymistä maahan (Ehlers 1975).

Lierokanavamäärityksissä hajonta oli suuri. Variaatiokerroin oli kanavien luku-

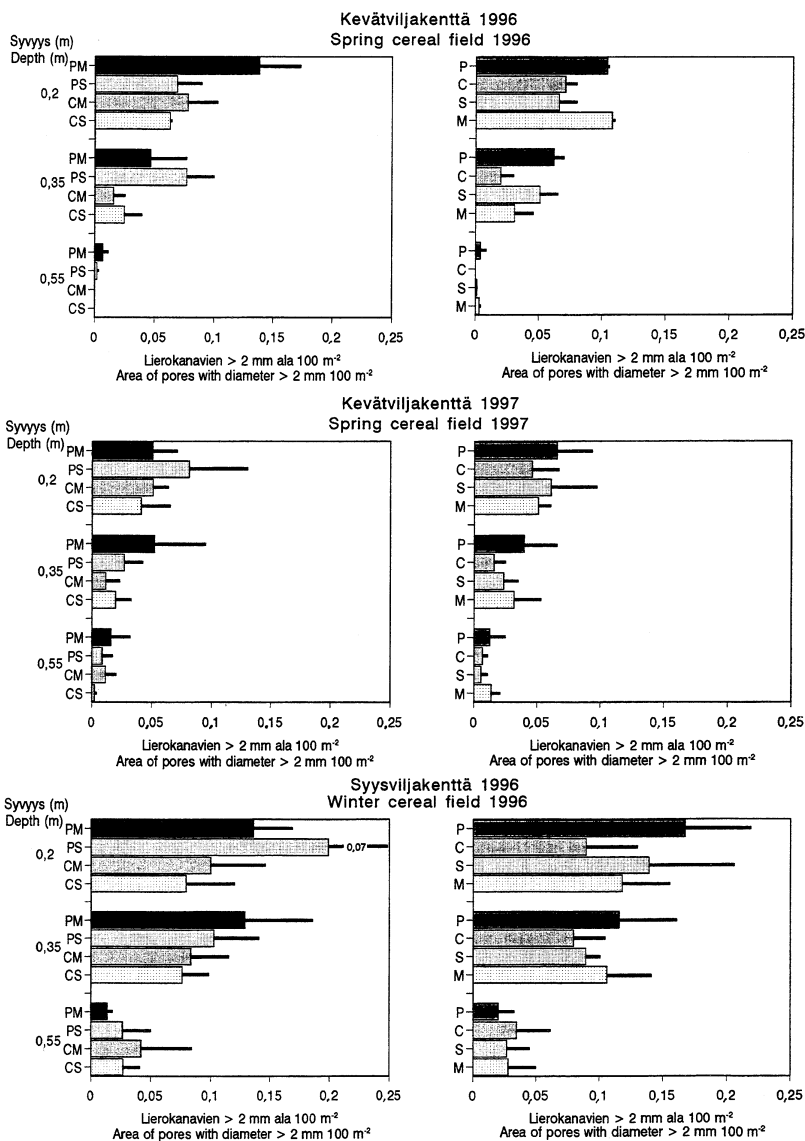


Kuva 6. Lierokanavien (>2 mm) lukumäärä pinta-alyksikköä kohden (+ keskiarvon keskiarvo) savimaassa koekentittäin (n=4). Näytteet otettiin kevätiljacentältä syksyllä 1996 ja 1997 ja syysviljacentältä keväällä 1996. Lyhenteet kuten Taulukossa 9.

Figure 6. Number of cylindrical pores (+ one SE) with diameter >2 mm (classified as earthworm burrows) in clay soils (n=4). Soil samples were collected from spring cereal field in autumn 1996 and 1997, and from winter cereal field in spring 1996. Treatments as in Table 9.

määrää laskettaessa 0,20 metrissä keskimäärin 72 % (20–170 %) ja syvemmillä 112 % (0–208 %). Vastaavat luvut lierokanavien alaa laskettaessa olivat 67 % (10–

122%) ja 118 % (0–200 %). Molemmissa määrityksissä CV oli suurempi kuin Alakukun (1997) raportoimissa kivennäismaiden määrityksissä. Eräs syy mittauksen suuren



Kuva 7. Lierokanavien (>2 mm) ala pinta-alayksikköä kohden (+ keskiarvon keskiarvo) savimaassa koekentittäin (n=4). Näytteet otettiin kevätiljacentältä syksyllä 1996 ja 1997 ja syysviljacentältä keväällä 1996. Lyhenteet kuten Taulukossa 9.

Figure 7. Cross-sectional area of cylindrical pores (+ one SE) with diameter > 2 mm in clay soils (n=4). Soil samples were collected from spring cereal field in autumn 1996 and 1997, and from winter cereal field in spring 1996. Treatments as in Table 9.

hajontaan voi olla se, että lierojen esiintymisen kentän eri osissa vaihteli. Lierojen esiintymistiheyttä kentän eri osissa ei koejakson aikana määritetty. Nuutisen et al. (1998)

mukaan lierojen esiintyminen lohkon sisällä voi kuitenkin vaihdella merkittävästi lyhyelläkin välimatkalla.

Keskimäärin lierokanavien lukumäärä (Kuva 6) ja ala (Kuva 7) oli 0,20 metrissä pienempi syyssänkimuokatussa kuin kynnetyssä koejäsenessä. Tiirin (1991) määrittelyksissä kuudentena koevuonna kynnetyssä hiesavimaassa oli 0,20 metrin syvyydessä keskimäärin vähemmän lierokanavia kuin pelkästään kylvömuokatussa koejäsenessä. Pitkäsen (1993) mukaan lierokanavien (2 mm) lukumäärä oli kivennäismaissa vastaavassa syvyydessä keskimäärin joko sama tai suurempi sänkimuokatussa maassa kuin kynnetyssä maassa kymmenentenä koevuonna. Hiesavimaassa lierokanavia oli 15 koevuoden jälkeen 0,20 m:n syvyydessä kynnetyssä (0,23 m) koejäsenessä 380 kpl m⁻² ja syyssänkimuokatussa (0,05–0,10 m) koejäsenessä 509 kpl m⁻² (Pitkänen & Nuutinen 1998).

3.2 Maan kosteus kasvukauden aikana

Kuvissa 8 ja 9 esitetään maan kosteus kasvukauden aikana 0–0,30 cm:n syvyydessä. Liitteissä 7 ja 8 esitetään muiden maan vesitalouteen liittyvien mittausten tulokset. Koejäsenten vaikutuksia maan vesitalouteen tarkasteltaessa on otettava huomioon se, että on kyse viljelysysteemin muutoksen jälkeisestä siirtymävaiheesta. Lisäksi traktorkoejäsenten vaikutusta kasvin vesitalouteen ei voitu luotettavasti tarkastella, koska kasvien kehitykseen vaikutti koejäsenten ohella mm. kylvön onnistuminen (ks. sätulokset kappaleessa 3.3).

Maan kosteus mitattiin TDR-menetelmällä 0–0,30 metrissä. Mittaustulosten hajonta oli pieni. Variaatiokerroin (CV) oli keskimäärin 9 % (1–28 %). Se oli samaa suuruusluokkaa kuin maan mekaanisen vastuksen mittauksissa (keskimäärin 12 %), mutta selvästi pienempi kuin muiden tutkimuksissa maasta tehtyjen mittausten CV (keskimäärin 23–120 %).

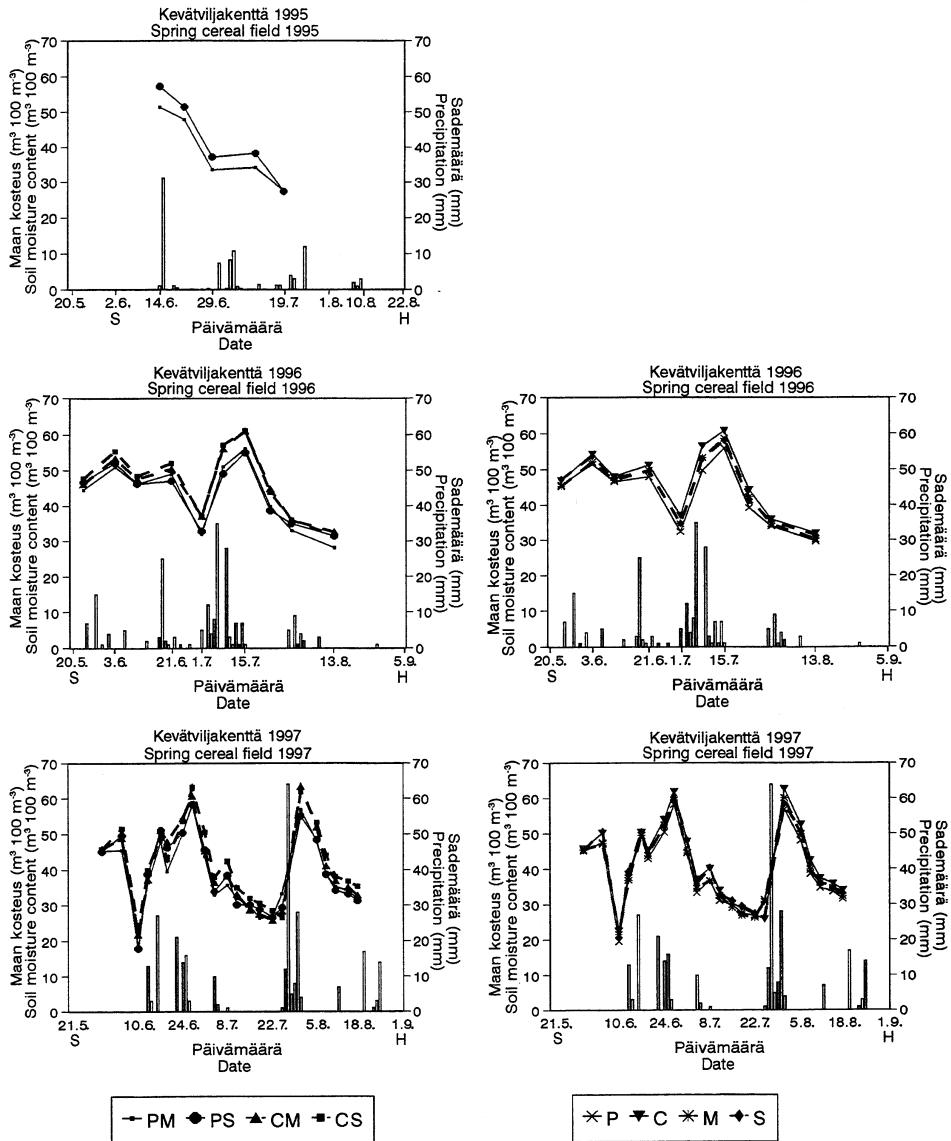
Kaikkina koevuosina satoi touko-kesä-heinäkuussa 69–99 mm (43–61 %) enemmän kuin keskimäärin (Liite 1). Vuosina 1995 ja 1996 maan kosteus oli kylvöstä ju-

hannukseen asti lähellä kenttäkapasiteettia 0–0,30 m:n syvyydessä kevätiljakentällä (Kuva 8, Liite 7). Syysvilja kuivatti maata alkukesästä 1996 (Kuvat 8 ja 9). Vuonna 1997 pintamaa (n. 0–0,1 m) kuivui ilma-kuivaksi alkukesästä sekä kevä- että syysviljakentällä, mutta ennen juhannusta alkaneet sateet kostuttivat sen uudelleen (Kuvat 8 ja 9).

Maan märkyys haittaa usein Suomen oloissa syysviljojen alkukehitystä ja sitä kautta talvehtimistä. Syksyllä 1995 sademäärä oli syys- ja lokakuussa 111 mm (Liite 1), mikä oli hieman vähemmän kuin keskimäärin (122 mm). Maa oli 0–0,30 m:n syvyydessä selvästi kenttäkapasiteettia kuivempaa syyskuussa (Kuva 8). Lokakuussa sateet kostuttivat maata, mutta vapaan veden pinta pysyi kyntökerrosta (0,2 m) syvemmällä koko syksyn (Liite 8).

Kyntämätön maa oli 0–0,30 m:n syvyydessä yleensä kosteampaa kuin kynnetty maa (Kuvat 8 ja 9). Koejäsenten välinen ero maan kosteudessa säilyi kasvukauden ajan suhteellisen muuttumattomana. Laskettaessa keskiarvo kesän mittausjakson ajalta kyntämätön koejäsen oli 1,3–6,4 prosenttiyksikköä kosteampaa kuin kynnetty. Tiiri (1991) mittasi hiesavimaan (savesta kyntökerroksessa 48 g 100 g⁻¹) kosteutta kasvukauden aikana seitsemäntenä koevuonna. Hänen mukaansa kynnetty maa kuivui alkukesästä 0,20 m:n syvyydessä selvästi nopeammin kuin pelkästään kylvömuokattu maa. Myös 0,40 m:n syvyydessä kylvömuokattu maa pysyi kasvukauden aikana pidempään kosteana kuin kynnetty maa (Tiiri 1991).

Lukuunottamatta kevätiljakenttää vuonna 1997 maa oli ensimmäisellä mittauskerralla kylvön jälkeen kevyen traktorin ruuduissa keskimäärin 1,9–4,2 prosenttiyksikköä kuivempaa kuin keskikokoisen traktorin ruuduissa (Kuvat 8 ja 9). Chamen & Longstaff (1995) mittasivat savimaan kosteutta 0,10, 0,15 ja 0,30 m:n syvyyksissä seitsemäntenä koevuonna ilman peltoliikennettä viljellyissä ja tavanomaisesti pelto-
liikennöidyissä koejäsenissä. Kosteutta mitattiin kuukauden ajan keväällä (huhtikuu).

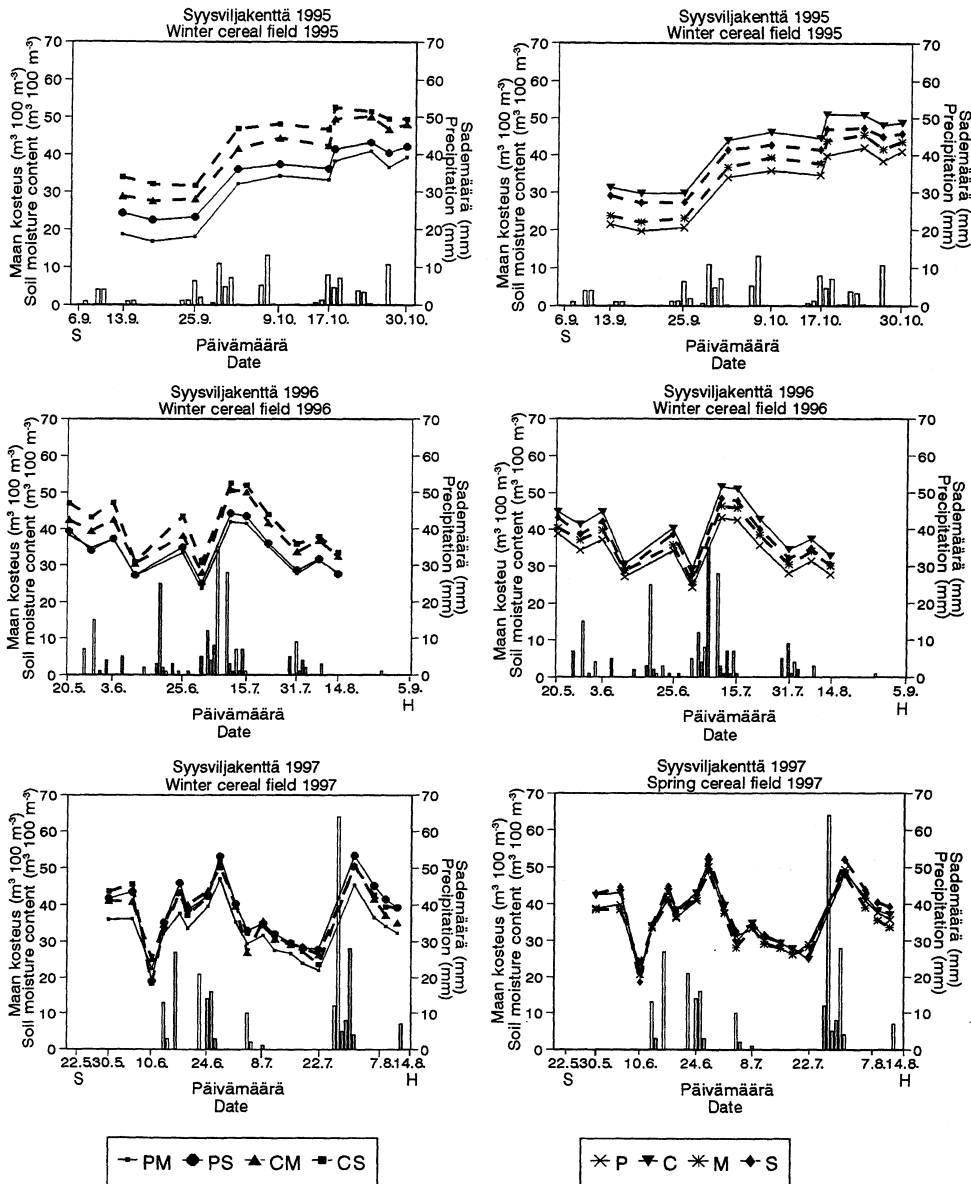


Kuva 8. Maan kosteus 0–0,30 m:n syvyydessä kylvön (S) ja leikkuupuinnin (H) välisenä aikana kevätiljakentällä vuosina 1995–1997. Kuvassa on esitetty myös päivittäinen sademäärä (MTT:n säärekisteri). Lyhenteet kuten Taulukossa 9.

Figure 8. Soil moisture content in 0–0.30 m layer and daily precipitation (MTT's weather data) in spring cereal field during growing seasons in 1995 to 1997. S= date of sowing, H= date of harvesting. Treatments as in Table 9.

Kenttäkokeessa kasvoi tuolloin syysvehnä. Maa oli koko mittausjakson ajan kaikissa mittausvyvyksissä koneenkantajalla viljeltyissä ruuduissa selvästi kuivempaa kuin tavanomaisesti peltoliikennöidyissä ruuduissa

(Chamen & Longstaff 1995). Peltoliikennöidyissä koejäsenessä sänkimuokattu (0,125 m) maa oli mittausjakson ajan kosteampaa kuin kynnetty (0,20 m) maa. Koneenkantajalla viljeltyissä ruuduissa muok-



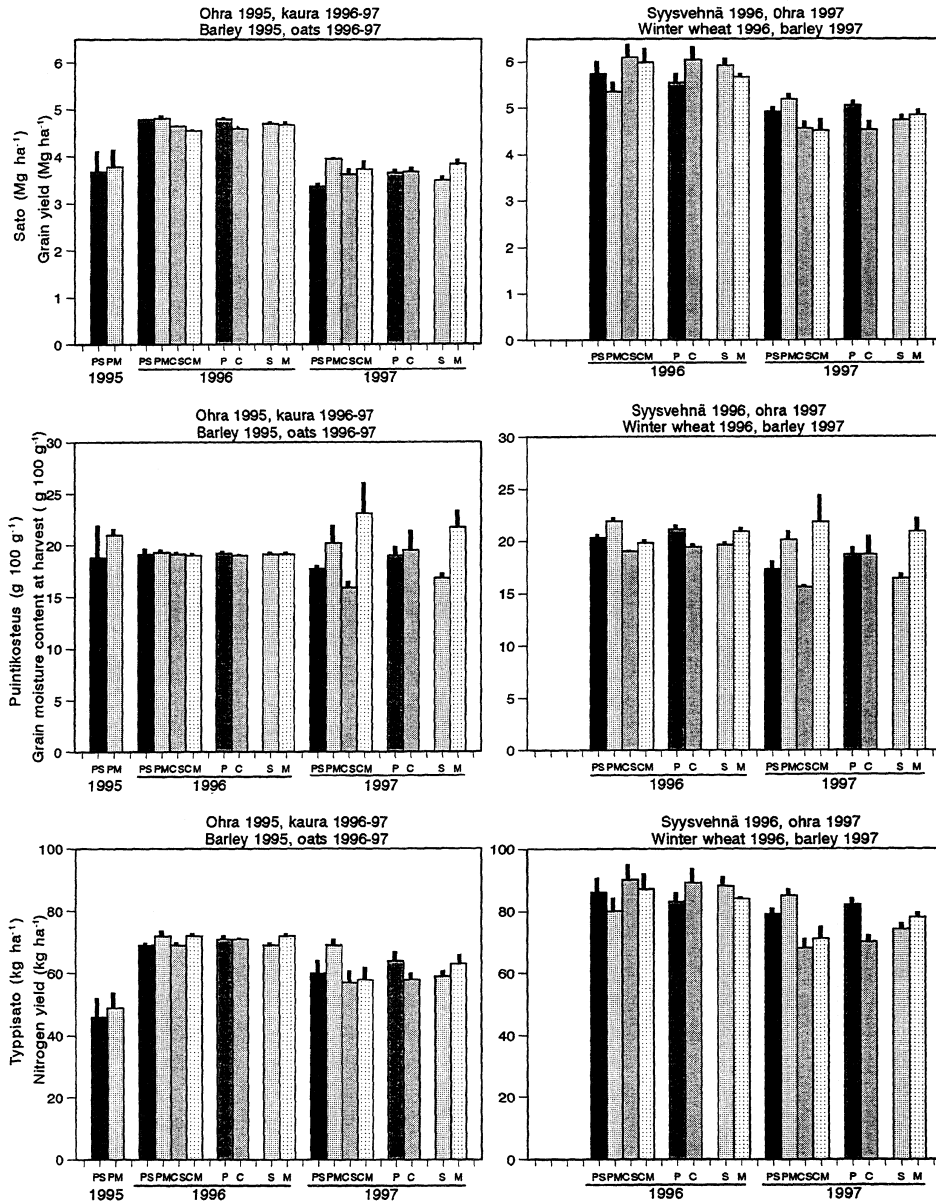
Kuva 9. Maan kosteus 0–0,30 m:n syvyydessä syysvilj kentällä kylvön (S) jälkeen syksyllä 1995 sekä kasvukausina 1996 ja 1997. H = kasvusto puitiin. Kuvassa on esitetty myös päivittäinen sademäärä (MTT:n säärekisteri). Lyhenteet kuten Taulukossa 9.

Figure 9. Soil moisture content in 0–0.30 m layer and daily precipitation (MTT's weather data) in winter cereal field in autumn 1995 and during growing seasons in 1996 and 1997. S= date of sowing, H = date of harvesting. Treatments as in Table 9.

kausten välinen ero oli tavanomaisesti peltoilikkennöityihin ruutuihin verrattuna pieni (Chamen & Longstaff 1995).

3.3 Satotulokset

Kuvassa 10 esitetään hehtaarisato, puintikosteus ja typpisato koekentillä koejäsenit-



Kuva 10. Viljojen hehtaarisato (15 g 100 g⁻¹ kosteudessa), puintikosteus ja siemensadossa (kuiva-aine) korjattu typpisato koejäsenittäin ja koevuosittain kevät- ja syysviljakokeessa. Pylvään yläpuolelle on lisätty keskiarvon keskivirhe (n=4). Koejäsenet kuten Taulukossa 9.

Figure 10. Mean grain yields, grain moisture content at harvest and nitrogen yield in yield (dry matter) of small grain cereals during experimental period. Grain yield is presented at 15 g 100g⁻¹ moisture content. The vertical line immediately above the bar indicates one standard error of mean (n=4). Treatments as in Table 9.

täin ja koevuositain. Numeeriset arvot sekä sadon typpipitoisuus esitetään Liitteessä 9. Koejäsenten välisiä keskiarvojen eroja ei testattu tilastollisesti. Traktoreiden osalta satotuloksia ei voitu luotettavasti vertailla, koska kaikkina koevuosina niihin vaikutti merkittävästi tekniset vaikeudet kevyellä traktorilla kylvettäessä.

Vuonna 1995 kylvölannoittimen vanhaat eivät toimineet kunnolla. Kylvölannoitinta parannettiin talvella 1995–96. Tästä huolimatta kylvölannoituksessa oli edelleen ongelmia. Vuonna 1997 kevyellä traktorilla kylvetyt ruudut orastuivat hitaammin (Taulukko 11) ja epätasaisemmin kuin keskikokoisella traktorilla kylvetyt ruudut. Tämä johtui siitä, että kevyellä traktorilla kylvettäessä osa siemenistä jäi kuivaan kylvömuokkauskerrokseen. Kevyen traktorin ruuduissa kasvusto oli peittävä (Taulukko 11) vasta kesäkuun puolivälin sateiden jälkeen (13.6. 13 mm ja 16.6. 27 mm, Kuva 8). Epätasainen orastuminen heijastui myös pintikosteuteen, joka oli kevyen traktorin ruuduissa suurempi kuin keskikokoisen traktorin ruuduissa (Kuva 10, Liite 9).

Kylvövaikeuksista huolimatta kevätiljojen hehtaarisadot olivat koejakson aikana keskimäärin 4260–4650 kg ja typpisadot 65–75 kg ha⁻¹ (N-lannoitus 80–100 kg ha⁻¹) (Taulukko 12). Sadosta määritettyjen muuttujien hajonta oli pieni. Tämä tuki aikaisempia peltoliikennekokeiden tuloksia (Alakukku 1997). Koejäsenten variaatio-kertoimien (CV) välillä ei ollut merkittäviä eroja vuoden 1997 pintikosteustuloksia lukuunottamatta. Tuolloin epätasaisesti kehittyneiden ruutujen pintikosteuden CV oli selvästi suurempi kuin tasaisesti orastuneiden ruutujen. Hehtaarisatomittauksissa CV oli keskimäärin 8 % (vaihteluväli 1–24 %), pintikosteusmäärittelyissä 8 % (2–26 %), typpipitoisuusmäärittelyissä 3 % (1–12 %) ja typpisatomittauksissa 10 % (2–26 %).

Kun muokkaustyöt tehtiin keskikokoisella traktorilla, muokkausten välinen ke-

vätviljojen siemensatoero oli kaksi prosenttiyksikköä (Taulukko 12). Typpisadossa suhteellinen ero oli keskimäärin hieman suurempi kuin siemensadossa (Taulukko 12). Siemensadon suhteellinen ero muokkaustapojen välillä oli samaa suuruusluokkaa kuin Pitkäsén et al. (1988) tutkimuksessa kolmen ensimmäisen koevuoden aikana keskimäärin. Heidän kenttäkokeissaan kevätiljojen sato oli kolmessa kenttäkokeessa, joissa maan savespitoisuus oli yli 40 g 100 g⁻¹, kynnettäessä keskimäärin 3610 kg ha⁻¹ ja syysänkimuokattaessa 3510 kg ha⁻¹ (97 %). Kahdella koepaikalla kasvukausi oli keskimääräistä sateisempi kahtena vuonna kolmesta (Pitkänen et al. 1988), joten olosuhteetkin olivat vertailukelpoiset raportoitavan tutkimuksen kanssa.

Ruotsalaisissa kenttäkokeissa, joissa maan savespitoisuus oli 42 ja 50 g 100 g⁻¹, viljojen sato oli keskimäärin 2 ja 24 % pienempi sänkimuokatussa (0,10–0,13 m) koejäsenessä kuin kynnetyissä (0,2 m) kolmena ensimmäisenä koevuonna (Rydberg 1986). Koekentällä, jossa satoero oli suuri, ojitus ei toiminut kunnolla, mikä todennäköisesti vaikutti tuloksiin. Børresén (1993) vertasi syyskyntöä (0,25 m) syysäestykseen pyöriväteräisellä äkeellä (0,10 m) hiesusavi- maalla (savesta 45 g 100 g⁻¹). Kolmen ensimmäisen koevuoden keskiarvona viljojen siemensato oli kynnetyissä koejäsenessä 3880 kg ha⁻¹ (92 %) ja äestetyissä koejäsenessä 4000 kg ha⁻¹. Pintikosteuteen perusmuokkaus ei vaikuttanut merkittävästi (Børresén 1993). Sadossa korjattu typpisato kahden ensimmäisen koevuoden keskiarvona oli kynnetyissä koejäsenessä 60 kg ha⁻¹ ja äestetyissä 62 kg ha⁻¹ (Børresén 1993).

Maan kosteuksissa oli koejäsenten välillä selvät erot syksyllä 1995 (Kuva 9). Syysvehnän orastumisessa tai talvehtimisessä ei kuitenkaan havaittu merkittäviä eroja. Kosteuseroista huolimatta maassa oli todennäköisesti riittävästi ilmatilaa kaikissa koejäsenissä (Liite 8).

Taulukko 11. Kaura- ja ohrakasvuston peittävyys kesäkuussa vuonna 1997. Lyhenteet kuten Taulukossa 9.

Table 11. Cover of oats and barley crop in June 1997. Treatments as in Table 9.

Aika Time	Kasvuston peittävyys (% ruudun alasta) Cover of crop (% of plot area)							
	Kyntö Ploughed		Kultivointi Cultivated		Muokkaus Tillage		Traktori Tractor	
	S	M	S	M	P	C	S	M
Kaura, <i>Oats</i>								
6.6.1997	65	65	70	30	65	50	65	45
13.6.1997	90	70	95	50	80	70	90	60
22.6.1997	100	100	100	100	100	100	100	100
Ohra, <i>Barley</i>								
6.6.1997	100	95	95	85	95	90	95	90
13.6.1997	100	95	100	85	95	90	100	90
22.6.1996	100	100	100	100	100	100	100	100

Taulukko 12. Siemen- ja typpisadot keskimäärin (suluissa suhteellinen sato) vuosina 1996 ja 1997. Lyhenteet kuten Taulukossa 9.

Table 12. Mean grain and nitrogen yields (relative yield) in 1996 and 1997. Treatments as in Table 9.

Kyntö Ploughed		Kultivointi Cultivated		Muokkaus Tillage		Traktori Tractor	
S	M	S	M	P	C	S	M
Viljojen siemensato (kg ha ⁻¹ , neljä satoa) <i>Grain yield of cereals (kg ha⁻¹, four yields)</i>							
4700 (100)	4820 (103)	4730 (101)	4690 (100)	4760 (100)	4710 (99)	4710 (100)	4760 (101)
Siemensadossa korjattu typpisato (kg ha ⁻¹ , neljä satoa) <i>Nitrogen yield harvested in grain yield (kg ha⁻¹, four yields)</i>							
73 (100)	76 (104)	71 (97)	72 (99)	75 (100)	72 (96)	72 (100)	74 (103)
Kevätviljojen siemensato (kg ha ⁻¹ , kolme satoa) <i>Grain yield of spring cereals (kg ha⁻¹, three yields)</i>							
4350 (100)	4650 (107)	4270 (98)	4260 (98)	4500 (100)	4260 (95)	4280 (100)	4450 (102)
Siemensadossa korjattu typpisato (kg ha ⁻¹ , kolme satoa) <i>Nitrogen yield harvested in grain yield (kg ha⁻¹, three yields)</i>							
69 (100)	75 (109)	65 (94)	67 (97)	72 (100)	66 (92)	67 (100)	71 (106)

3.4 Yleinen tulosten tarkastelu

Kenttäkokeissa verrattiin kahden teholtaan ja painoltaan erikokoisen traktorin käyttöä muokkauksessa ja kylvössä kynnettäessä ja syysänkimuokattaessa. Kenttäkokeissa oli suuret ruudut, jolloin yhdessä ruudussa voitiin ajaa useita työleveyksiä rinnakkain samalla menetelmällä. Suuri ruutukoko on tämän tyyppisissä tutkimuksissa tärkeä. Tällöin voidaan tarkastella peltoliikenteen keventämisen vaikutusta ja systeemien teknistä toimivuutta lähes käytännön mittakaavassa.

Kahtena ensimmäisenä koevuonna traktorikoejäsenissä oli eri määrä ajokertoja kylvömuokkauksessa ja kylvössä. Ajokertojen määrän lisääntyminen lisäsi yleensä myös kuormituksen peittävyttä ruudulla. Ero ajokertojen määrässä ei kuitenkaan todennäköisesti vaikuttanut merkittävästi tuloksiin. Tätä tuki se, että koejäsenten väliset erot maasta tehdyissä mittauksissa olivat kaikkina koevuosina samansuuntaiset.

Tulosten tarkastelussa ja johtopäätöksissä on huomioitava se, että on kyse viljelysysteemien muutoksen jälkeisen siirtymäkauden tuloksista. Tarkasteltava koejakso kesti kolme vuotta. Se oli todennäköisesti liian lyhyt aika arvioida luotettavasti koejäsenten vaikutusta maan ominaisuuksiin ja kasvien sadontuottoon. Soane & Ball (1998) totesivat, että pitkäaikaiset kenttäkokeet olivat ainut tapa mitata muokkauksen kumulatiivisia vaikutuksia, jotka eivät tule esille kahden kolmen vuoden koejaksojen aikana. He pitivät pitkäaikaisia kokeita erittäin tärkeinä, jotta muokkauksen muuttamisen sato- ja maavaikutuksia voitaisiin luotettavasti tarkastella. Pitkäaikaiskokeet ovat oleellisia myös tutkittaessa peltoliikenteen kumuloituvaa vaikutusta maan rakenteeseen. Campbell et al. (1986) painottivat kumuloituvan peltoliikenteen merkitystä etenkin silloin, kun maan perusmuokkausta oli kevennetty.

Tutkimuksessa mitattiin viljelysysteemien muutoksen vaikutusta maahan ja kasvien sadontuottoon useilla eri menetelmillä. Tähän päädyttiin, koska tavanomaiset

maan tiivistyneisyyden ja sen satovaikutusten mittarit (tilavuuspaino, kokonaishuokoisuus, hehtaarisato) eivät yleensä reagoi maan rakenteen muutoksiin yhtä herkästi kuin maan vedenpidätyskykyä, veden ja kaasujen johtavuutta tai kasvien typenottoa kuvaavat mittarit (Alakukku 1997). Useiden erilaisten ominaisuuksien mittaaminen oli välttämätöntä myös siksi, että voitiin tutkia peltoliikenteen keventämisen vaikutusta maan makrohuokostoon. Tämä oli yksi tutkimuksen keskeisistä tavoitteista.

Maasta tehtyjen mittausten hajonta oli usein suuri. Hajonta ei ollut kuitenkaan poikkeuksellisen suuri verrattuna muihin vastaavanlaisiin mittauksiin (Jury et al. 1991, Pitkänen & Nuutinen 1995, Alakukku 1997). Tutkimuksessa mitattujen suureiden mittausten menetelmästä johtuva tulosten epävarmuus oli yleensä pieni (Alakukku 1997), joten mittaustulosten hajonta kuvasi pääasiassa maan heterogeenisuutta.

3.4.1 Kyntämättä viljelyyn siirtyminen

Pellolla, jolle kokeet perustettiin, oli edellytykset siirtyä kyntämättä viljelyyn. Pellon ojitus toimi hyvin ja sen maan rakenne oli myös melko hyvä. Maan makrohuokosto ja vedenläpäisevyys olivat suuremmat kuin Turtolan & Paajasen (1995) mittauksissa aitosavimaalla, jonka lierotoiminta ei ollut vilkasta ja ojitus ei toiminut kunnolla. Lierokanavien määrä oli suurempi kuin Pitkäsen (1993) kokeessa aitosavimaalla. Mitatut arvot olivat kuitenkin pienemmät kuin Alakukun (1997) koekentillä luontaisesti hyvä-rakenteisella savimaalla.

Perusmuokkauskerros madaltui siirryttäessä kyntämättä viljelyyn, kun kyntö (0,2 m) korvattiin kultivaattorilla tehdyllä sänkimuokkauksella (0,10–0,15 m). Tämä muutti maan ominaisuuksia kyntökerroksen alaosaan vastaavassa syvyydessä. Sama todettiin myös muissa tätä tutkimusta pidempiaikaisissa tutkimuksissa (Pitkänen 1988, Tiiri 1991, Børresen & Njøs 1993, Pitkänen & Nuutinen 1995, Alakukku 1998). Muiden määritysten kuin lierokana-

valaskennan osalta muutokset maan ominaisuuksissa olivat yleensä saman suuntaisia kuin 5–15 vuotta kestäneissä kokeissa. Näiden tulosten mukaan sänkimuokkaus pienensi keskimäärin lierokanavien lukumäärää ja alaa 0,20 metrissä. Tämä ei tukenut aiempien tutkimusten tuloksia (Tiiri 1991, Pitkänen 1993, Pitkänen & Nuutinen 1998). Todennäköisesti kolme koevuotta oli liian lyhyt aika arvioida luotettavasti koejäsenten vaikutusta maan lierokanaviin.

Koejakson jokaisena vuonna yhteenlaskettu sademäärä touko-kesä-heinäkuussa oli selvästi keskimääräistä suurempi. Kynntämätön maa oli 0–0,30 m:n syvyydessä yleensä kasvukauden ajan kosteampaa kuin kynnetty maa. Keskikokoisen traktorin ruuduissa kevätilviljojen hehtaarisato oli keskimäärin kaksi ja siemensadossa korjattu typpisato kuusi prosenttiyksikköä pienempi kuin kynnetyssä koejäsenessä. Satoero oli samaa suuruusluokkaa kuin Pitkäsen et al. (1988) tutkimuksessa savimailla kolmen ensimmäisen koevuoden aikana. Pitkäaikaisten kenttäkokeidensa perusteella Pitkänen (1994) totesi, että sateisena alkukesänä viljojen sato oli monesti huonompi sänkimuokkatussa koejäsenessä kuin kynnetyssä. Ruotsalaisissa kenttäkokeissa, joissa ojitus ei toiminut kunnolla, kynnöstä sänkimuokkaukseen siirtyminen aiheutti selkeästi suurempia satotappioita (Rydberg 1986) kuin tässä kokeessa. Raportoitavassa kokeessa makrohuokosto 0–0,20 metrissä ylitti kasveille kriittisen rajan molemmissa perusmuokkauksojienissä. Tämän perusteella maan ilmanvaihto toimi todennäköisesti märissäkin olosuhteissa vähintään tyydyttävästi.

3.4.2 Peltoliikenteen keventäminen

Perus- ja kylvömuokkaus sekä usein myös sadonkorjuu ovat kriittisiä työvaiheita viljeltäessä viljaa jäykällä savimaalla. Keskikokoisen traktorin käyttö muokkauksissa ja kylvössä tiivisti savimaata 0–0,20 m:n kerroksessa enemmän kuin kevyellä traktorilla ajo sekä kynnetäessä että sänkimuokatta-

essa. Tämä tuki teoreettista tietoa, jonka mukaan pintapaineen pienentäminen lieventää maaprofiilin yläosan tiivistämistä. Myös erillisissä mittauksissa maan mekaaninen vastus oli kyntökerroksessa kevyen traktorin ajourissa pienempi kuin keskikokoisen traktorin urissa (Pöyhönen et al. 1999). Erillisten mittausten mukaan molemmat traktorit tiivistivät maata, kun niillä ajettiin viisi kertaa samassa ajourassa. Chamen et al. (1990) tekivät neljävuotisen kenttäkokeen aitosavimaalla. Myös heidän mukaansa peltoliikenteen keventäminen (koneiden rengaspaineen pienentäminen 100–250 kPa:sta alle 50 kPa:iin) lievensi maan tiivistymistä 0–0,25 m:n syvyydessä. Kevyen traktorin käytön merkitystä jankon ja pohjamaan tiivistyneisyyteen ei voitu näin lyhyen koejakson jälkeen tarkastella.

Vaikka keskikokoinen traktori tiivisti kyntökerrosta kevyttä traktoria enemmän, molemmissa koejäsenissä makrohuokosto ($>30 \mu\text{m}$) oli ko. kerroksessa kuitenkin yleensä suurempi kuin $10 \text{ m}^3 / 100 \text{ m}^3$. Auran (1983) mukaan tämä oli kriittinen raja kasvien kasvun kannalta. Keskikokoisen traktorin tiivistysvaikutusta kyntökerroksessa lievensi paripyörien käyttö muokkauksessa ja kylvössä (Pöyhönen et al. 1999). Paripyörien käyttö mahdollisti rengaspaineen pienentämisen 90 kPa:iin tai sen alle. Keskimääräinen pintapaine oli 80 kPa tai sitä pienempi. Tiivistymistä kontrolloi myös se, että maa kylvömuokattiin jyrsimellä. Näin muokkaukset pystyttiin rajoittamaan kahteen.

Tiivistymisen välttäminen on tärkeää siirryttäessä kyntämättä viljelyyn, koska tällöin perusmuokkausvyvyys yleensä madaltuu. Näiden tulosten perusteella siirtyminen kynnöstä (0,2 m) syysänkimuokkaukseen (0,10–0,15 m) ei vaikuttanut paljoa maan makrohuokostoon kevätilviljakentällä, kun kyntämättä viljely aloitettiin käyttämällä kevyttä traktoria. Verranteena oli kynnetty keskikokoisen traktorin ruudut. Mielenkiintoinen tulos oli se, että maan mekaaninen vastus oli syysänkimuokatuissa kevyen traktorin ruuduissa yleensä pienempi 0,07–0,14 m:ssä kuin kynnetyissä keski-

kokoisen traktorin ruuduissa. Myös pitkäaikaisissa tutkimuksissa peltoliikenteen kontrollointi lievensi maan tiivistymistä kylvämättä viljelyssä. Comia et al. (1994) totesivat kahdeksan koevuoden jälkeen, että ajokertojen vähentäminen kylvömuokkauksessa neljästä yhteen lievensi maan tiivistymistä 0,13–0,25 m:ssä sekä syyskynnytyssä (0,25 m) että sänkimuokatussa (0,13 m) maassa. Chamenin & Longstaffin (1995) mukaan sekä kynnetyssä (0,2 m) että sänkimuokatussa (0,125 m) koejäsenessä oli enemmän suuria makrohuokosia seitsemän koevuoden jälkeen peltoliikennöimättömässä (käytetty koneenkantajaa) maassa kuin tavanomaisesti viljelyssä maassa.

3.4.3 Traktorin keventämisen vaikutus viljelysysteemiin

Tekniset vaikeudet kylvössä vaikuttivat kevyen traktorin ruuduissa sato- ja maan kosteustuloksiin. Näiden tulosten perusteella sekä kevyttä traktoria että siihen sopivia työkoneita on kehitettävä edelleen. Kokeissa sato puitiin kevyellä puimurilla molemmissa koejäsenissä. Jotta koko viljelysysteemin peltoliikenteen maahan kohdistamaa rasitusta voitaisiin lieventää käytännössä, olisi kehitettävä nykyistä kevyempiä teknologisia ratkaisuja myös sadonkorjuuseen ja lannan levitykseen. Nämä ovat muokkauksen ohella kriittisiä työvaiheita suomalaisissa olosuhteissa (Alakukku 1997).

Kun koneketjun yhtä osaa muutetaan, on otettava huomioon muutoksen vaikutukset ketjun muihin osiin ja koko viljelysysteemiin. Työkoneiden kehityksessä on varauduttava siihen, että peltoliikenteen

keventäminen todennäköisesti muuttaa maan ominaisuuksia pitkällä aikavälillä. Tämä puolestaan muuttaa ilmeisesti koneille asetettuja biologisia ja teknisiä raja-arvoja. Tätä tukevia tuloksia raportoitiin muualla tehdyissä tutkimuksissa. Chamen et al. (1990) ja Douglas et al. (1992b) totesivat peltoliikenteessä käytettyjen koneiden rengaspaineen pienentämisen tavanomaisesta 100–480 kPa:sta 30–200 kPa:iin pienentäneen maan mekaanista vastusta perusmuokkauskerroksessa. Chamenin et al. (1992) kenttäkokeissa maa oli koneenkantajaa käytettäessä selvästi löyhempiä kuin tavanomaisesti peltoliikennöitäessä. Heidän mukaansa maan löyhyys haittasi syysvehnän kasvua. Viljelysysteemiä kehitettäessä kone-maa-kasvi- systeemin toiminnan tunteminen ja tutkiminen onkin tärkeää. Se antaa perusteet suunnitelmalliseen systeemin kehittämiseen.

3.5 Johtopäätökset

Kevyen traktorin käyttö muokkauksessa lievensi selvästi maan tiivistymistä 0–0,20 metrissä kynnettäessä ja sänkimuokattaessa, kun verranneruuduissa käytettiin keskikokoista traktoria. Sitä, miten kevyen traktorin käyttö vaikuttaa jankon ja pohjamaan makrohuokostoon, lierojen toimintaan, viljojen satoon, typen hyväksikäyttöön ja maan hydrologisiin ominaisuuksiin voidaan tarkastella vasta pidemmän koejakson jälkeen.

Kevyen, miehittämättömän traktorin käyttö on mielenkiintoinen vaihtoehto lieventää peltoliikenteen aiheuttamaa tiivistymistä. Traktoria ja siihen sopivia työkoneita on kuitenkin kehitettävä edelleen.

- Alakukku, L.** 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. II. Long-term effects on the properties of fine-textured and organic soils. *Soil & Tillage Research* 37: 223–238.
- 1997. Long-term soil compaction due to high axle load traffic. Agricultural Research Centre of Finland. Institute of Crop and Soil Science. Vammalan kirjapaino. 55 p. Academic dissertation. ISBN 951-729-485-9.
- 1998. Properties of compacted fine-textured soils as affected by crop rotation and reduced tillage. *Soil & Tillage Research* 47: 83–89.
- & **Elonen, P.** 1994. Syksyn kuljetusajon aiheuttama savimaan tiivistyminen. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 17/94. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 30 p.
- Anderson, G., Pidgeon, J.D., Spencer, H.B. & Parks, R.** 1980. A new hand-held recording penetrometer for soil studies. *Journal of Soil Science* 31: 279–296.
- Arvidsson, J. & Håkansson, I.** 1994. Finns packningsskador kvar efter plöjning? Resultat från 21 långliggande fältförsök. Swedish University of Agricultural Science. Reports the Division of Soil Management 85. Uppsala: Swedish University of Agricultural Science. 31 p.
- 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.
- Bashford, L.L., Jones, A.J. & Mielke, L.N.** 1988. Comparison of bulk density beneath a belt track and tire. *Applied Engineering Agriculture* 4: 122–125.
- Bouma, J.** 1991. Influence of soil macroporosity on environmental quality. *Advances in Agronomy* 46: 1–37.
- Brown, H.J., Cruse, R.M., Erbach, D.C. & Melvin, S.W.** 1992. Tractive device effects on soil physical properties. *Soil & Tillage Research* 22: 41–43.
- Burt, E.C., Wood, R.K. & Bailey, A.C.** 1992. Some comparison of average to peak soil-tire contact pressures. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers* 35: 401–404.
- Børresen, T.** 1993. Ploughing and rotary cultivation for cereal production in a long-term experiment on a clay soil in southeastern Norway. 2. Yields and weed infestation. *Soil & Tillage Research* 28: 109–121.
- & **Njøs, A.** 1993. Ploughing and rotary cultivation for cereal production in a long-term experiment on a clay soil in southeastern Norway. 1. Soil properties. *Soil & Tillage Research* 28: 97–108.
- Campbell, D.J., Dickson, J.W., Ball, B.C. & Hunter, R.** 1986. Controlled seedbed traffic after ploughing or direct drilling under winter barley in Scotland, 1980–1984. *Soil & Tillage Research* 8: 3–28.
- Carpenter, T.G. & Fausey, N.R.** 1983. Tire sizing for minimizing subsoil compaction. St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural Engineers. Paper no. 83/1058. 23 p.
- Carter, M.R.** 1994. A review of conservation tillage strategies for humid temperate regions. *Soil & Tillage Research* 31: 289–301.
- Chamen, W.C.T. & Audsley, E.** 1993. A study of the comparative economics of conventional and zero traffic systems for arable crops. *Soil & Tillage Research* 25: 369–390.
- , **Chithey, E.T., Leede, P.R., Goss, M.J. & Howse, K.R.** 1990. The effect of tyre/soil contact pressure and zero traffic on soil and crop responses when growing winter wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research* 47: 1–21.
- , **Dowler, D., Leede, P.R. & Longstaff, D.J.** 1994. Design, operation and performance of a gantry system: experience in arable cropping. *Journal of Agricultural Engineering Research* 59: 45–60.
- & **Longstaff, D.J.** 1995. Traffic and tillage effects on soil conditions and crop growth on a swelling clay soil. *Soil Use Management* 11: 168–176.
- , **Watts, C.W., Leede, P.R. & Longstaff, D.J.** 1992. Assessment of a wide span vehicle (gantry), and soil and cereal crop responses to its use in a zero traffic regime. *Soil & Tillage Research* 24: 359–380.
- Comia, R.A., Stenberg, M., Nelson, P., Rydberg, T. & Håkansson, I.** 1994. Soil and crop responses

to different tillage systems. *Soil & Tillage Research* 29: 335–355.

Danfors, B. 1994. Changes in subsoil porosity caused by heavy vehicles. *Soil & Tillage Research* 29: 135–144.

Dickson, J.W. & Campbell, D.J. 1990. Soil and crop responses to zero- and conventional-traffic systems for winter barley in Scotland, 1982–1986.

– & **Ritchie, R.M.** 1996a. Zero and reduced ground pressure traffic systems in an arable rotation 2. Soil and Crop responses. *Soil & Tillage Research* 38: 89–113.

– & **Ritchie, R.M.** 1996b. Zero and reduced ground pressure traffic systems in an arable rotation 1. Cultivation power requirement. *Soil & Tillage Research* 38: 71–88.

Douglas, J.T., Campbell, D.J. & Crawford, C.E. 1992b. Soil and crop responses to conventional, reduced ground pressure and zero traffic systems for grass silage production. *Soil & Tillage Research* 24: 421–439.

–, **Koppi, A.J. & Moran, C.J.** 1992a. Changes in soil structure induced by wheel traffic and growth of perennial grass. *Soil & Tillage Research* 23: 61–72.

Dwyer, M.J. 1983. Soil dynamics and the problems of traction and compaction. *Agricultural Engineering* 38: 62–68.

Ehlers, W. 1975. Observations on earthworm channels and infiltration on tilled an untilled loess soil. *Soil Science* 119: 242–249.

Elonen, E., Alakukku, L. & Koskinen, P. 1995. Renkaiden vaikutus traktorin vetokykyyn ja maan tiivistymiseen. Maatalouden tutkimuskeskus. VAKOLAn tiedote. 69/95. Vihti: Maatalouden tutkimuskeskus. 28 p.

Elonen, P. 1980. Soil compaction - a severe problem in Finnish agriculture. Swedish University of Agricultural Sciences. Reports the Division of Soil Management 60. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences. p 41–45.

Erbach, D.C. 1994. Benefits of tracked vehicles in crop production. In: Soane, B.D. & Ouwerkerk, C. van. (eds.). *Soil Compaction in Crop Production*. The Netherlands: Elsevier Science B.V. p. 501–520.

Findlay, Irvine Ltd. 1987. Introduction manual bush recording soil penetrometer. Mark I model 1979. Penicuik, Midlothian, Scotland. 53 p.

Hadas, A. 1994. Soil compaction caused by high axle loads - review of concepts and experimental data. *Soil & Tillage Research* 29: 253–276.

Horn, R. & 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. 1994. Soil tillage for crop production and for protection of soil and environmental quality: a Scandinavian viewpoint. *Soil & Tillage Research* 30: 109–124.

–, **Voorhees, W.B. & Riley, H.** 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil & Tillage Research* 11: 239–324.

Jakobsen, B.F. & Dester, A.R. 1988. Influence of biopores on root growth, water uptake and grain yield of wheat (*Triticum aestivum*) based on predictions from a computer model. *Biology and Fertility of Soils* 6: 315–321.

Jury, W.A., Gardner, W.R. & Gardner, W.H. 1991. *Soil physics*. 5th. Ed. New York, USA: John Wiley & Sons. 328 p.

Koger, J.L., Burt, E.C. & Trowse, A.C. 1985. Multiple pass effects of skidder tires on soil compaction. *Transaction of American Society of Agricultural Engineers* 28: 11–16.

Lamers, J.G., Perdok, U.D., Lumkes, L.M. & Klooster, J.J. 1986. Controlled traffic farming systems in the Netherlands. *Soil & Tillage Research* 8: 65–76.

Laguë, C., Roy, P.-M. & Savard, P. 1997. Wide-span implement carrier (WSIC) for cranberry production. *Applied Engineering in Agriculture* 13: 309–317.

Lebert, M., Burger, N. & Horn, R. 1989. Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. NATO Advanced Science Institutes. Series E: Applied Science 172: 73–80.

McGuire, C.F. 1986. Quality evaluation of distillers' dried grain by near-infrared analysis. *Cereal Chemistry* 63: 155–159.

Nieminen, T., Mononen, J. & Sampo, M. 1994. Unmanned tractors for agricultural applications. XII CIGR World Congress and AgEng '94 Conference on Agricultural Engineering, 29.8.-1.9.1994, Milano, Italy. 11 p.

Nuutinen, V., Pitkänen, J., Kuusela, E., Widbom, T. & Lohilahti, H. 1998. Spatial variation of an earthworm community related to soil properties and

yield in grass-clover field. *Applied Soil Ecology* 8: 85–94.

Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. & Sombroek, W.G. 1991. World map of the status of human-induced soil degradation. An explanatory note. ISRIC, Wageningen, Netherlands/UNEP, Nairobi, Kenya. 34 p.

Olsen, H.J. 1986. Soil mechanical behaviour of a heavy clay soil after three long-term compaction treatments. *Soil & Tillage Research* 7: 145–156.

– 1994. Calculation of subsoil stresses. *Soil & Tillage Research* 29: 111–123.

Perdok, U.D. & Tijink, F.G.J. 1990. Developments in IMAG research on mechanization in soil tillage and field traffic. *Soil & Tillage Research* 16: 121–141.

Pitkänen, J. 1988. Aurattoman viljelyn vaikutukset maan fysikaalisiin ominaisuuksiin ja maan viljavuuteen. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 21/88. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. p. 62–162.

– 1993. Effects of tillage and straw management on earthworm burrows in soil. *NJF-Utredning/Rapport* 88: 301–306.

– 1994. A long-term comparison of ploughing and shallow tillage on the yield of spring cereals in Finland. In *Volume II: Proceedings 13th International Conference International Soil Tillage Research Organization, Aalborg, Denmark, July 24–29 1994*. p. 709–715.

–, **Elonen, P., Kangasmäki, T., Köylijärvi, J., Talvitie, H., Virri, K. & Vuorinen, M.** 1988. Aurattoman viljelyn vaikutukset kevätiljojen satoon ja laatuun: kuuden koivuoden tulokset. Maatalouden tutkimuskeskus, Tiedote 21/88. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. p. 1–61.

– & **Nuutinen, V.** 1995. Soil macropores, saturated hydraulic conductivity and earthworm activity on two soils under long-term reduced tillage in southern Finland. *Acta Zoology Fenniae* 196: 251–253.

– & **Nuutinen, V.** 1998. Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. *Applied Soil Ecology* 9: 411–415.

Pöyhönen, A., Alakukku, L., Ahokas, J., Aura, E. & Sampo, M. 1999. Traktorista välittyvän pystysuoran jännityksen mittaus kynnyksessä ja sänkimuokatussa savimaassa. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A. Käsi kirjoitus.

–, **Alakukku, L., Ahokas, J. & Sampo, M.** 1997b. Stresses and compaction caused by a light and a conventional tractor in two tillage systems. Polish Society of Agrotechnical Sciences. *Bibliotheca Fragmenta Agronomica* 2B/97: 543–546. PL ISSN 0860-4088.

–, **Alakukku, L. & Pitkänen, J.** 1997a. Maanäytteenoton koneellistaminen ja työntutkimus. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 22. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 39 p.

Renius, K. Th. 1994. Trends in tractor design with particular reference to Europe. *Journal of Agricultural Engineering Research* 57: 3–22.

Rusanov, V.A. 1991. Effects of wheel and track traffic on the soil and on crop growth and yield. *Soil & Tillage Research* 19: 131–143.

– 1994. USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m. *Soil & Tillage Research* 29: 249–252.

Rydberg, T. 1986. Markfysikaliska och markkemiska effekter av plöjningsfri odling i Sverige. Sveriges lantbrukuniversitet, Rapporter för jordbearbetningsavdelningen 70. Uppsala: Sveriges lantbrukuniversitet. 35 p. ISBN 91-576-2782-7, ISSN 0348-0976.

SAS. 1992. SAS Technical report P-229, SAS/STAT Software: Changes and enhancements, Release 6.07, Cary, NC: SAS Institute Inc. 620 p.

Schrader, S., Joschko, M., Kula, H. & Larink, O. 1995. Earthworm effects on soil structure with emphasis on soil stability and soil water movement. In: Hartge, K.H. & Stewart, B.A. (eds.). *Soil structure – its development and function*. Boca Raton: CRC Press. p. 109–133.

Smith, D.L.O. 1985. Compaction by wheels: a numerical model for agricultural soils. *Journal of Soil Science* 36: 621–632.

– & **Dickson, J.W.** 1990. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research* 46: 13–29.

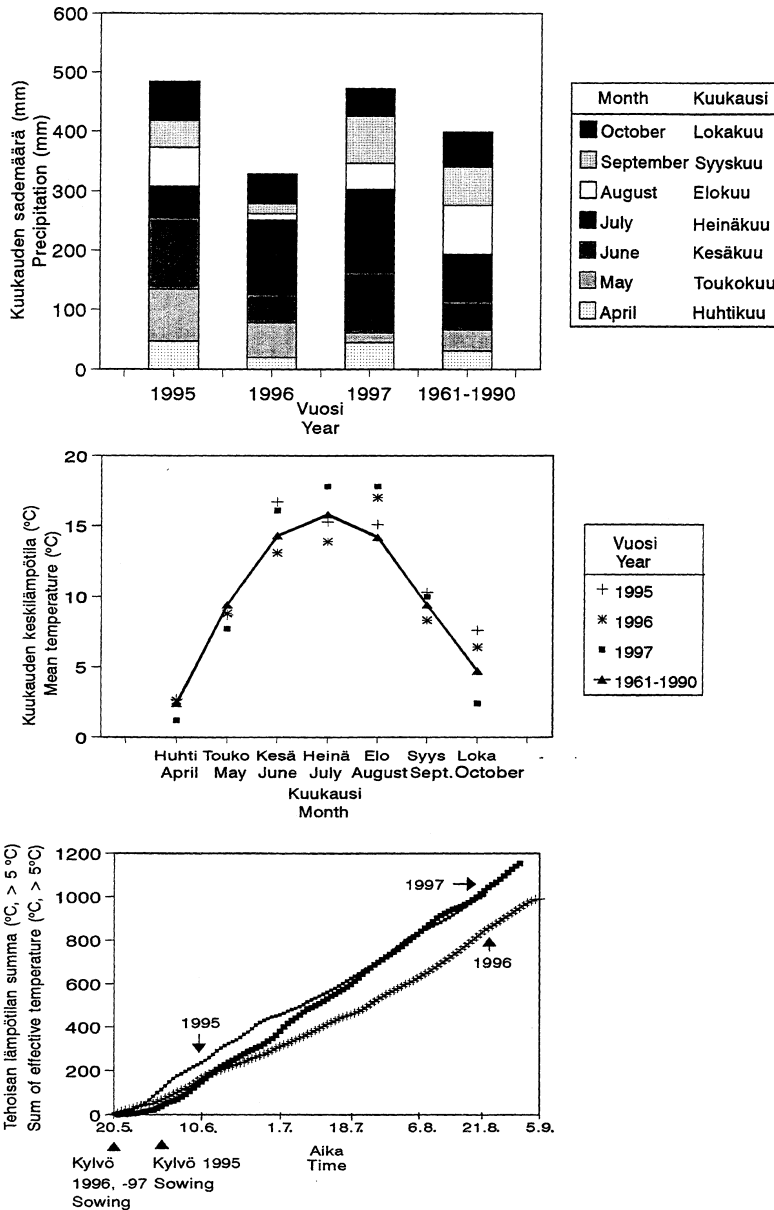
Soane, D.B. & Ball, B.C. 1998. Review of management and conduct of long-term tillage studies with special reference to a 25-yr experiment on barley in Scotland. *Soil & Tillage Research* 45: 17–37.

–, **Blackwell, P.S., Dickson, J.W. & Painter, D.J.** 1981a. Compaction by agricultural vehicles: A review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil & Tillage Research* 1: 207–237.

- , **Blackwell, P.S., Dickson, J.W. & Painter, D.J.** 1981b. Compaction by agricultural vehicles: A review. II. Compaction under tyres and other running gear. *Soil & Tillage Research* 1: 373–400.
- & **Ouwerkerk, C. van.** 1994. Soil compaction in crop production. 1994. Soane, B.D. & Ouwerkerk, C. van. (eds.). The Netherlands: Elsevier Science B.V. 662p.
- Soilmoisture Equipment Corporation. 1989. Operating instructions for the model 5201 soilmoisture blocks. Santa Barbara, USA. 6 p.
- Sommer, C. & Zach, M.** 1992. Managing traffic-induced soil compaction by using conservation tillage. *Soil & Tillage Research* 24: 319–336.
- Soveri, J. & Varjo, M.** 1977. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955–1975. Publications of the water and environment research institute. 20: 1–66.
- Steel, R.G.D. & Torrie, J.H.** 1980. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. 2nd edition. Singapore: McGraw-Hill International Book Company. 633 p.
- Söhne, W.** 1958. Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires. *Agricultural Engineering* 39: 276–281, 290.
- Tiiri, J.** 1991. Muokkauksen vaikutus maan toimintoihin. Maatalouden tutkimuskeskus. Tiedote 11/91. Jokioinen: Maatalouden tutkimuskeskus. 78 p.
- Topp, G.C., Davis, J.L. & Annan, A.P.** 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* 16: 574–582.
- Turtola, E. & Paajanen, A.** 1995. Influence of improved subsurface drainage on phosphorus losses and nitrogen leaching from a heavy clay soil. *Agricultural Water Management* 28: 295–310.
- Vermeulen, G.D., Arts, W.B.M. & Klooster, J.J.** 1988. Perspective of reducing soil compaction by using a low ground pressure farming system; selection of wheel equipment. In: Proceedings 11th International Conference of ISTRO, 11–15th July, Edinburgh, Scotland. 1: 329–334.
- & **Klooster, J.J.** 1992. The potential of a low ground pressure traffic system to reduce soil compaction on a clayey loam soil. *Soil & Tillage Research* 24: 337–358.
- Vuorinen, M. & Mäkitie, O.** 1955. The method of soil testing in use in Finland. *Agrogeological Publication* 63:1–44.
- 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.
- & **Preston-Thomas, J.** 1984. A comparison between a conventional method and an improved method for predicting tracked vehicle performance. In: Proceedings 8th International Conference, International Society for Terrain-Vehicles Systems, 5–11th August, Cambridge University, England. p. 361–380.

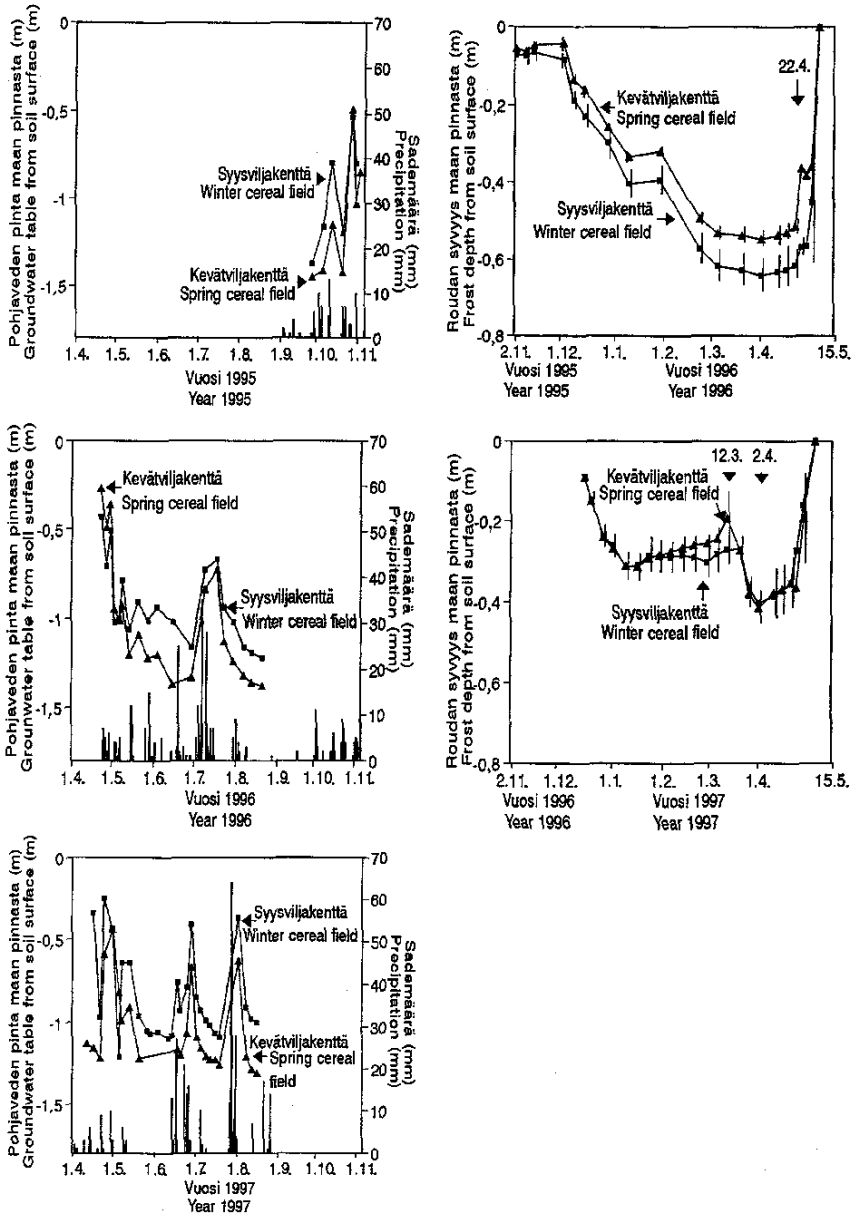
Kuukausittaiset sademäärät ja keskilämpötilat touko-lokakuussa sekä tehoisan lämpötilan summan (Σ (vuorokauden keskilämpötila - 5°C)) kertyminen kylvön ja puinnin välisenä aikana koevuosittain. Sää tiedot koottiin MTT:n säärekisteristä.

Precipitation and mean temperature in May - October and the sum of effective temperature (Σ (mean temperature of a day - 5°C)) from sowing day to harvesting day in the experimental period. Weather data from the weather register of MTT.



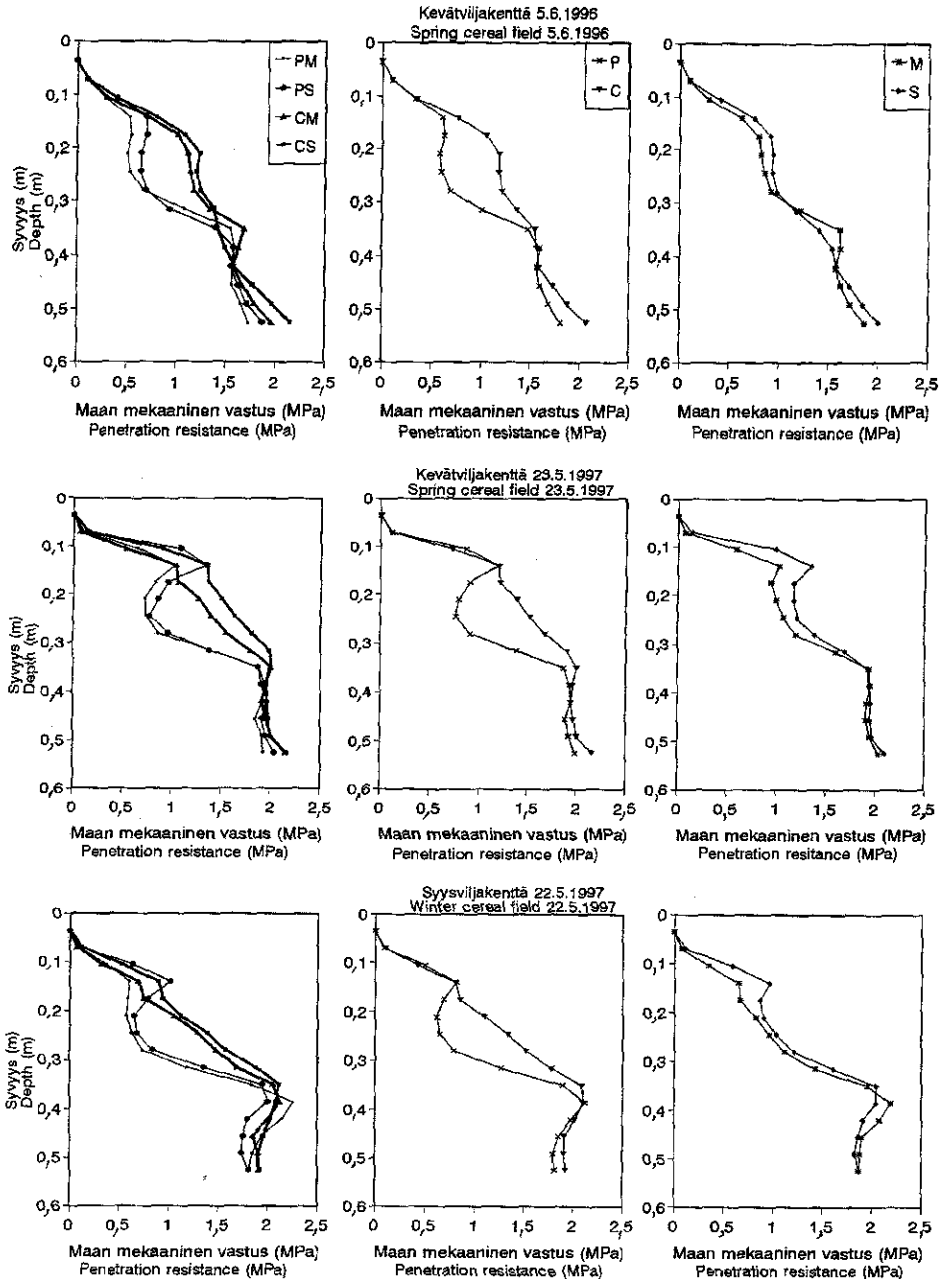
Pohjaveden korkeus ja roudan syvyys koekentittäin koejaksojen aikana. Maa alkoi sulaa pinnasta 22.4.1996 ja 2.4.1997 lähtien. Pintamaa oli sulaa myös 2.3.1997, mutta jäätynyt sen jälkeen vielä uudelleen.

Groundwater table and frost depth in experimental fields in 1995–1997. Soil began to melt on ground surface on 22.4.1996 and 2.4.1997. The top layer of soil was temporarily unfrozen on 2.3.1997 but froze again.



Maan mekaaninen vastus koekentittäin vuosina 1996 ja 1997. P = kynnetty (0,20–0,23 m), C = sänkimuokattu (0,10–0,15 m), S = keskikokoinen traktori muokkauksessa ja kylvössä, M = kevyt traktori em. työvaiheissa.

Soil penetration resistance in 1996 and 1997. P = ploughed (0.20–0.23 m), C = stubble cultivated (0.10–0.15 m), S = conventional tractor used in tillage and sowing, M = light tractor.



LIITE 4
APPENDIX 4

Keskimääräinen maan makrohuokosto (n=4, halkaisija >400 µm 0,20–0,35 m:ssä, muuten >300 µm) koekentittäin ja koevuosittain. P = kynnetty (0,20–0,23 m), C = sänkimuokattu (0,10–0,15 m), S = keskikokoinen traktori muokkauksessa (syylvössä), M = kevyt traktori em. työvaiheissa.

Mean macroporosity (diameter >300 µm in layers 0–0.20 m and 0.35–0.55 m, >400 µm in layer 0.20–0.35 m) in clay soils in 1995–1997. P = ploughed (0.20–0.23 m), C = stubble cultivated (0.10–0.15 m), S = conventional tractor used in tillage and sowing, M = light tractor.

Syvyys (m) Depth (m)	Makrohuokosto (m ³ 100 m ⁻³) Macroporosity (m ³ 100 m ⁻³)								P-arvo P-value	
	Kyntö Ploughed		Kultivointi Cultivated		Muokattu Tillage		Traktori Tractor		Muokkaus Tillage	Traktori Tractor
	S	M	S	M	C	S	M			
Kevätviljakenttä syksyllä 1995 Spring cereal field in autumn 1995										
0 - 0,20	6,9	9,8								
0,20 - 0,35	1,6	2,3								
0,35 - 0,55	0,7	0,5								
Kevätviljakenttä syksyllä 1996 Spring cereal field in autumn 1996										
0 - 0,20	9,7	12,8		9,9	11,2	9,7	9,6			
0,20 - 0,35	1,9 ^a	2,9 ^b		0,9	2,4	1,1				
0,35 - 0,55	0,5	0,6		0,6	0,6	0,6				
Kevätviljakenttä syksyllä 1997 Spring cereal field in autumn 1997										
0 - 0,20	8,3	10,0		8,6	10,5					
0,20 - 0,35	1,5	2,1		1,5	1,7					
0,35 - 0,55	0,6	0,6		0,6	0,6					
Kevätvehnäkenttä keuhonkyläällä 1997 Spring wheat field in winter 1997										
0 - 0,20	15,7									
0,20 - 0,35	4,1									
P-eroinen tila P-value Tillage M										

Keskimääräinen maan makrohuokosto ($n=4$, halkaisija $>30 \mu\text{m}$) koekentittäin ja koevuosittain. Lyhenteet kuten Liitteessä 4.

Mean macroporosity (diameter $>30 \mu\text{m}$, $n=4$) in clay soils in 1995–1997. Treatments as in Appendix 4.

Syvyys (m) Depth (m)	Makrohuokosto ($\text{m}^3 100 \text{m}^{-3}$) Macroporosity ($\text{m}^3 100 \text{m}^{-3}$)									
	Kyntö <i>Ploughed</i>		Kultivointi <i>Cultivated</i>		Muokkaus <i>Tillage</i>		Traktori <i>Tractor</i>		P-arvo <i>P-value</i>	
	S	M	S	M	P	C	S	M	Muokkaus <i>Tillage</i>	Traktori <i>Tractor</i>
Kevätviljakenttä syksyllä 1995 <i>Spring cereal field in autumn 1995</i>										
0 - 0,20	10,1	14,9								0,01
0,20 - 0,35	4,3	5,8								0,04
0,35 - 0,55	3,2	2,8								⁻¹⁾
Kevätviljakenttä syksyllä 1996 <i>Spring cereal field in autumn 1996</i>										
0 - 0,20	13,5	16,9	13,0	12,9	15,2	12,9	13,3	14,9	(0,07)	(0,09)
0,20 - 0,35	4,5	5,6	3,4	3,1	5,1	3,3	4,0	4,4	0,007	NS
0,35 - 0,55	2,5	2,6	2,4	2,3	2,6	2,3	2,5	2,5	⁻¹⁾	⁻¹⁾
Kevätviljakenttä syksyllä 1997 <i>Spring cereal field in autumn 1997</i>										
0 - 0,20	10,4	14,4	11,0	12,3	12,4	11,7	10,7	13,4	NS	0,01
0,20 - 0,35	4,6	3,9	4,0	3,5	4,2	3,8	4,3	3,7	NS	NS
0,35 - 0,55	3,7	3,2	3,3	3,4	3,5	3,4	3,5	3,3	⁻¹⁾	⁻¹⁾
Syysviljakenttä keväällä 1996 <i>Winter wheat field in spring 1996</i>										
0 - 0,20	21,8	23,9	19,1	19,2	22,8	19,1	20,4	21,5	0,02	NS
0,20 - 0,35	8,4	8,8	3,7	5,6	8,6	4,6	6,0	7,2	0,004	(0,06)
0,35 - 0,55	2,9	2,7	2,6	3,0	2,8	2,8	2,7	2,8	⁻¹⁾	⁻¹⁾

NS, ero ei ollut tilastollisesti merkitsevää ($P > 0,10$). NS, not significant ($P > 0,10$)

¹⁾ Tilastollista analyysiä ei tehty

No statistical analysis

LIITE 6
APPENDIX 6

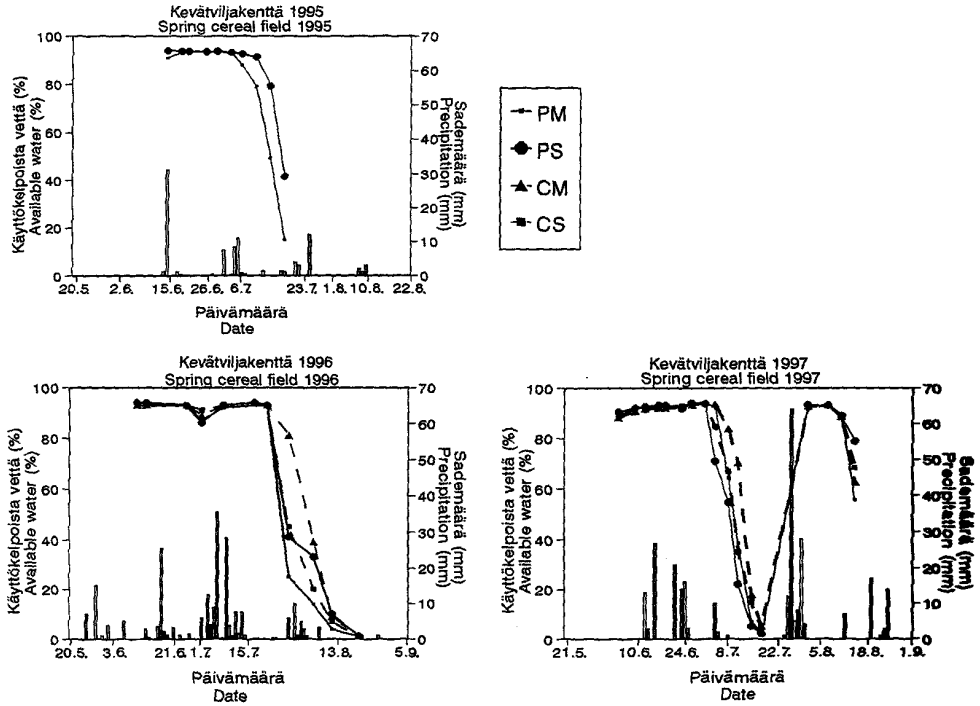
Keskimääräinen kyllästetyn maan vedenjohtavuus (n=4) koe-
kentittäin ja koevuositain. Tilastolliset analyysit Taulukossa 10. Koejäsenten lyhenteet
kuten Liitteessä 4.

*Mean saturated hydraulic conductivity in clay soils in 1995–1997. For statistical analysis, see
Table 10. Treatments as in Appendix 4.*

Syvyys (m) Depth (m)	Kyllästetyn maan vedenjohtavuus (cm h ⁻¹) Saturated hydraulic conductivity (cm h ⁻¹)							
	Kyntö Ploughed		Kultivointi Cultivated		Muokkaus Tillage		Traktori Tractor	
	S	M	S	M	P	C	S	M
Kevätviljakenttä syksyllä 1995 <i>Spring cereal field in autumn 1995</i>								
0 - 0,20	38	99						
0,20 - 0,35	2,9	4,5						
0,35 - 0,55	0,06	0,01						
Kevätviljakenttä syksyllä 1996 <i>Spring cereal field, in autumn 1996</i>								
0 - 0,20	75	168	35	79	121	58	55	123
0,20 - 0,35	7,6	15	1,3	1,7	11	1,5	4,5	8,4
0,35 - 0,55	0,01	1,7	0,02	0,03	0,9	0,02	0,02	0,9
Kevätviljakenttä syksyllä 1997 <i>Spring cereal field in autumn 1997</i>								
0 - 0,20	43	171	8,7	33	107	21	26	102
0,20 - 0,35	4,8	7,6	1,8	0,9	6,2	1,4	3,3	4,3
0,35 - 0,55	15	4,9	0,6	4,4	10	2,5	8,0	4,7
Syyviljakenttä keväällä 1996 <i>Winter wheat field in spring 1996</i>								
0 - 0,20	380	498	68	143	439	106	224	321
0,20 - 0,35	20	25	15	26	22	20	17	25
0,35 - 0,55	4,6	0,4	6,6	3,4	2,5	5,0	5,0	1,9

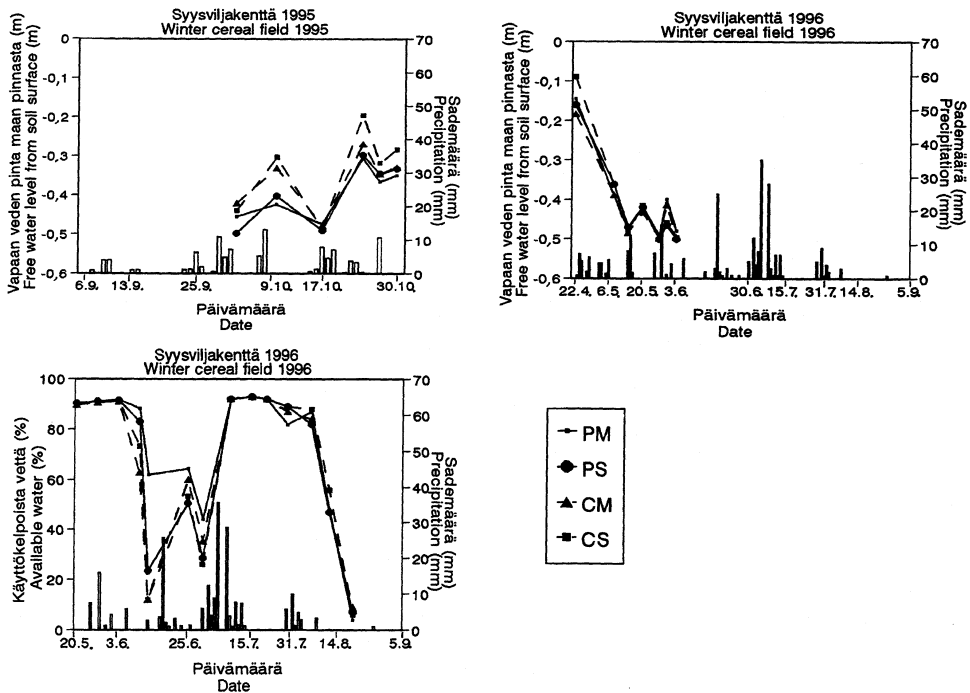
Kasveille käyttökelpoisen veden määrä maassa 0,20 m:n syvyydessä sekä päivittäinen sademäärä (MTT:n säärekisteri) kasvukausien 1995–1997 aikana kevätiljakentällä. Lyhenneet kuten Liitteessä 4.

Plant-available water at 0.20 m depth and daily precipitation (MTT's weather data) in spring cereal field during growing seasons in 1995 to 1997. Treatments as in Appendix 4.



Vapaan veden pinta 0–0,50 m:n syvyydessä olleessa putkessa syksyllä 1995 ja keväällä 1996 sekä kasveille käyttökelpoisen veden määrä 0,20 m:n syvyydessä kasvukautena 1996 syyvisiljakentällä. Kuivissa on myös esitetty päivittäinen sademäärä mittausjakson aikana (MTT:n säärekisteri). Koejäsenten lyhenteet kuten Liitteessä 4.

Soil free water level in a pipe at 0 to 0.50 m depth in winter cereal field in autumn 1995 and in spring 1996, and plant-available water at 0.20 m depth during growing season in 1996. Daily precipitation (MTT's weather data) during the measurement period is shown. Treatments as in Appendix 4.



Viljojen hehtaarisato (MGY), typpisato (MNY), typpipitoisuus (NC) ja puintikosteus (MCH) koekentittäin ja koevuosittain. Hehtaarisato on esitetty 15 g 100 g⁻¹ kosteudessa ja typpisato on laskettu kuiva-ainesadon perusteella. Koejäsenet kuten Liitteessä 4.

Mean grain (MGY) and nitrogen (MNY) yields, grain nitrogen content (NC) and moisture content at harvest (MCH) of spring barley (1995, 1997), oats (1996, 1997) and winter wheat (1996). Grain yield at 15 g 100 g⁻¹ moisture content. Nitrogen yield calculated from the dry matter of the grain yield. Treatments as in Appendix 4.

	Kyntö <i>Ploughed</i>		Kultivointi <i>Cultivated</i>		Muokkaus <i>Tillage</i>		Traktori <i>Tractor</i>	
	S	M	S	M	P	C	S	M
Kevätviljakenttä, ohra vuonna 1995 <i>Spring cereal field, barley in 1995</i>								
MGY (kg ha ⁻¹)	3680	3780						
MNY (kg ha ⁻¹)	46	49						
NC (g 100 g ⁻¹)	1,47	1,50						
MCH (g 100 g ⁻¹)	18,8	21,0						
Kevätviljakenttä, kaura vuonna 1996 <i>Spring cereal field, oats in 1996</i>								
MGY (kg ha ⁻¹)	4780	4800	4640	4550	4790	4590	4700	4670
MNY (kg ha ⁻¹)	69	72	69	72	71	71	69	72
NC (g 100 g ⁻¹)	1,71	1,78	1,76	1,86	1,74	1,81	1,74	1,82
MCH (g 100 g ⁻¹)	19,1	19,3	19,1	19,0	19,2	19,0	19,1	19,1
Kevätviljakenttä, kaura vuonna 1997 <i>Spring cereal field, oats in 1997</i>								
MGY (kg ha ⁻¹)	3360	3950	3620	3730	3650	3670	3490	3840
MNY (kg ha ⁻¹)	60	69	57	58	64	58	59	63
NC (g 100 g ⁻¹)	2,10	2,05	1,86	1,83	2,07	1,84	1,98	1,94
MCH (g 100 g ⁻¹)	17,7	20,2	15,9	23,1	19,0	19,5	16,8	21,7
Syyviljakenttä, syysvehnä vuonna 1996 <i>Winter wheat field, winter wheat in 1996</i>								
MGY (kg ha ⁻¹)	5740	5350	6100	5990	5540	6040	5920	5670
MNY (kg ha ⁻¹)	86	80	90	87	83	89	88	84
NC (g 100 g ⁻¹)	1,77	1,76	1,74	1,71	1,76	1,73	1,75	1,74
MCH (g 100 g ⁻¹)	20,3	21,9	19,0	19,8	21,1	19,4	19,6	20,9
Syysviljakenttä, ohra vuonna 1997 <i>Winter wheat field, barley in 1997</i>								
MGY (kg ha ⁻¹)	4920	5190	4560	4510	5060	4530	4740	4850
MNY (kg ha ⁻¹)	79	85	68	71	82	70	74	78
NC (g 100 g ⁻¹)	1,89	1,92	1,77	1,85	1,90	1,81	1,83	1,88
MCH (g 100 g ⁻¹)	17,3	20,1	15,6	21,8	18,7	18,7	16,4	20,9

		Julkaisun sarja ja numero Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja. Sarja A 62	
		Julkaisuaika (kk ja vuosi) Syyskuu 1999	
Tekijä(t) Laura Alakukku et al.		Tutkimushankkeen nimi	
		Toimeksiantaja(t) Maatalouden tutkimuskeskus	
Nimike Miehittämättömän traktorin käytön lyhytaikaiset vaikutukset savimaan rakenteeseen			
Tiivistelmä <p>Käyttämällä nykyaikaista paikannus-, automaatio- ja säätötekniikka Modulaire Oy on rakentanut miehittämättömän, kevyen traktorin. Maatalouden tutkimuskeskuksessa tutkittiin Modulaire-tekniikan käytön vaikutuksia maahan ja viljojen satoon kahdessa kenttäkokeessa vuosina 1995–1997. Kenttäkokeet olivat aitosavimaalla. Toisessa kokeessa viljeltiin pelkästään kevätviljoja ja toisessa myös syysvehnää. Kevyttä traktoria verrattiin keskikokoiseen nelivetotraktoriin kynnettäessä (0,2 m) ja sänkimuokattaessa (0,10–0,15 m). Kevyen traktorin paino oli 2,5 Mg ja sitä käytettiin muokkauksissa ja kylvössä. Traktorissa oli kumitelat (pituus 2000 mm ja leveys 320 mm) ja sen laskennallinen pintapaine kovalla alustalla oli 30 kPa. Verrannetraktori painoi 4–5,35 Mg traktorista ja rengasvarustuksesta riippuen. Sen rengaspaine oli työstä riippuen 80–150 kPa ja laskennallinen pintapaine kovalla alustalla 50–90 kPa. Kevyen traktorin käyttö vähensi savimaan tiivistymistä 0–0,20 m:n syvyudessa sekä kynnettäessä että sänkimuokattaessa. Kiinnostava yksityiskohta tuloksissa oli se, että mekaaninen vastus oli syyssänsänkimuokatuissa kevyen traktorin ruuduissa yleensä pienempi 0,07–0,14 m:ssä kuin kynnetyissä keskikokoisen traktorin ruuduissa. Viljojen siemensatoon kevyen traktorin käyttö ei vaikuttanut merkitsevästi. Vuosien 1996 ja 1997 keskiarvona viljojen sato oli kynnetyssä koejäsenessä kevyttä traktoria käytettäessä keskimäärin 4820 kg ha⁻¹ ja keskikokoisella traktorilla muokatuissa ja kylvetyissä koejäsenissä 4700 kg ha⁻¹. Vastaavat sadot olivat syyssänsänkimuokatuissa koejäsenissä 4690 (kevyt) ja 4730 (keskikokoinen) kg ha⁻¹. Satotulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska kevyttä traktoria käytettäessä toukutyöt eivät onnistuneet niin hyvin kuin keskikokoisella tavanomaisella traktorilla. Kevyt Modulaire-tekniikka on mielenkiintoinen vaihtoehto vähentää maan tiivistymishaittoja tulevaisuudessa. Kevyt viljelytekniikka vaatii kuitenkin sekä traktorin että työkonoiden edelleen kehittämistä. Samoin sen vaikutusta pohjamaan rakenteeseen, lierojen toimintaan, viljojen satoon, typen hyväksikäyttöön ja maan hydrologisiin ominaisuuksiin voidaan tarkastella vasta pidemmän koejakson jälkeen.</p>			
Avainsanat: maan rakenne, muokkauskerros, pohjamaa, peltoliikenne, typpisato			
Toimintayksikkö Maatalouden tutkimuskeskus, Kasvintuotannon tutkimus, Peltokasvit ja maaperä, 31600 Jokioinen			
ISSN 1238-9935	ISBN 951-729-552-9	<input checked="" type="checkbox"/> Tuloksia voi soveltaa luomuviljelyssä	
Myynti: MTT tietopalveluyksikkö, 31600 JOKIOINEN Puhelin (03) 4188 2327 Telekopio (03) 4188 2339		Sivuja 44 s. + 9 liitettä	Hinta

Jyväskylän yliopistopaino 1999
ISBN 951-729-552-9
ISSN 1238-9935