



MTTK

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS

Tiedote 24 / 87

LIISA PIETOLA

Maanviljelyskemian ja -fysiikan osasto

Maan mekaaninen vastus kasvutekijänä

**JOKIOINEN 1987
ISSN 0359-7652**

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUS
TIEDOTE 24/87

LIISA PIETOLA

Maan mekaaninen vastus kasvutekijänä

Maanviljelyskemian ja -fysiikan osasto
31600 JOKIOINEN
(916) 881 11

ISSN 0359-7652

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
ESIPUHE	1
TIIIVISTELMÄ	2
I JOHDANTO	4
II KIRJALLISUUSOSA	6
1 Mekaaninen vastus maan fysikaalisena ominaisuutena	6
1.1 Mekaanisen vastuksen teoreettinen tausta	6
1.2 Mekaanisen vastuksen mittausmenetelmät	8
2 Mekaaniseen vastukseen vaikuttavat tekijät	11
2.1 Tilavuuspaino	11
2.2 Maalaji	12
2.3 Maan rakenne	14
2.4 Vesipitoisuus	15
3 Mekaanisen vastuksen vaikutus juuren kasvuun	17
3.1 Juuren normaali rakenne ja kehitys	17
3.2 Vaikutus juuren pituuskasvuun	21
3.3 Vaikutus juuren morfologiaan	24
3.4 Hormonien vaikutus juuren morfologisiin muutoksiin	28
4 Mekaanisen vastuksen vaikutus orastumiseen ja sadonmuodostukseen	30
4.1 Vaikutus orastumiseen	30
4.2 Vaikutus sadonmuodostukseen	32
III KOKEELLINEN OSA	35
1 Aineisto ja menetelmät	35
1.1 Koekenttä	35
1.2 Koejärjestelyt	36
1.3 Kenttäkokeen perustaminen	38
1.4 Kasvukauden sääolot	40
1.5 Viljelytoimenpiteet ja kasvustohavainnot	41
1.6 Mittausmenetelmät	43
1.6.1 Oraslaskenta	43
1.6.2 Kartiokärkinen penetrometri	43
1.6.3 Tasakärkinen taskupenetrometri	45
1.6.4 Juuritutkimukset	47
1.6.5 Sadonkorjuu	49
1.6.6 Huokosjakauman määrittäminen	49
1.7 Aineiston tilastollinen käsittely	50

2	Tulokset	52
2.1	Tiivistyskäsittelyjen vaikutus mekaaniseen vastukseen	52
2.2	Tiivistyskäsittelyn vaikutus maan huokosjakaumaan	53
2.3	Juuritutkimukset	55
2.3.1	Tiivistyskäsittelyn vaikutus juuren kasvutapaan	55
2.3.2	Tiivistyskäsittelyn vaikutus juuren kasvuympäristöön	56
2.3.3	Mekaanisen vastuksen ja muiden maan fysikaalisten ominaisuuksien väliset riippuvuudet	61
2.3.4	Juuren kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välinen riippuvuus	62
2.3.5	Mekaanisen vastuksen aiheuttamat morfologiset muutokset juurissa	64
2.4	Tiivistyskäsittelyjen vaikutus orastuvuuteen ja satoon	71
3	Tulosten tarkastelu	75
3.1	Tiivistyskäsittelyjen vaikutus maan mekaaniseen vastukseen ja huokosjakaumaan	75
3.2	Tiivistyskäsittelyn vaikutus juuren kasvuympäristöön ja kasvutapaan	76
3.3	Mekaanisen vastuksen ja muiden maan fysikaalisten ominaisuuksien väliset riippuvuudet	78
3.4	Juuren kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välinen riippuvuus	79
3.5	Mekaanisen vastuksen aiheuttamat morfologiset muutokset juurissa	81
3.6	Tiivistyskäsittelyjen vaikutus orastuvuuteen ja sadonmuodostukseen	82
	KIRJALLISUUSLUETTELO	84
	LIITTEET	95

ESIPUHE

Tämä tutkimus on toteutettu Maatalouden tutkimuskeskuksessa maanviljelyskemian ja -fysiikan osastolla vuosina 1985 - 1987. Yksivuotisen kenttäkokeen aineisto on käytetty alunperin pro gradu -tutkielmaani varten, joka on hyväksytty Helsingin yliopistossa opinnäytetyöksi toukokuussa 1986. Tämä pro gradu -työ julkaistaan tässä muutamain korjauksin.

Esitän parhaimmat kiitokseni kokeen suunnitteluavusta professori Paavo Eloselle, ohjauksesta professori Antti Jaakkolalle ja arvokkaista huomautuksista tutkielman tarkastuksen yhteydessä professori Reijo Heinospelä.

Erityisesti haluaisin kiittää juuritutkimuksissa saamastani avusta tutkija Jyrki Pitkästä, mestari Risto Seppälää ja fysiikan yo Lauri Säisää. Lämpimät kiitokseni myös mestari Risto Tannille ja mestari Tuomo Nissille sekä muille kokeeni parissa työskenneille Maanviljelyskemian ja -fysiikan osaston sekä Maan tutkimusosaston työntekijöille. Julkaisun puhtaaksikirjoituksesta on vastannut ohjelmoija Rauha Kallio, ja siitä hänelle parhaat kiitokseni.

Lisäksi minua ovat avustaneet sokerijuurikkaanviljelyyn liittyvissä kysymyksissä agr. Matti Erjala Sokerijuurikkaan tutkimuskeskuksesta ja agr. Jukka Mettala Salon sokeritehtaalta. Maisinviljelyyn liittyvää apua olen saanut Mr. Günter Brüninghausilta. Myös heille kaikille lämpimät kiitokseni.

Jokioisilla joulukuussa 1987

Liisa Pietola

TIIVISTELMÄ

Maan mekaanisen vastuksen vaikutusta sokerijuurikkaan ja maissin juuren kasvuun tutkittiin Jokioisissa hiuesavimaalla. Tutkimusta varten perustettiin kesällä 1985 kenttäkoe, jossa osa koeruuduista tiivistettiin traktorin renkailla kylvömuokkauksen yhteydessä. Maa oli jo luontaisesti niin tiivistä, että kuivahtaneen saven lisätiivistäminen neljästi 3000 kg:n akselikuormitusta ja 120 kPa:n pintapainetta käyttäen lisäsi maan mekaanista vastusta vain 450 kPa 15-25 cm syvyydessä. Tiivistyskäsittelyt eivät siten aiheuttaneet huomattavia muutoksia maissin ja sokerijuurikkaan juurien kasvuympäristöön eikä kasvutapaan. Tämä heijastui myös kolmantena koekasvina olleen vehnän orastuvuuteen sekä kaikkien koekasvien sadonmuodostukseen: tiivistyskäsittelyt eivät johtaneet sanottaviin eroihin.

Mekaaninen vastus väheni maan kosteuspitoisuuden kasvaessa. Tilavuuspainon lisääntyminen johti taas mekaanisen vastuksen kohoamiseen. Mekaanista vastusta voitiin kuitenkin selittää näillä maan fysikaalisilla ominaisuuksilla suhteellisen vähän, mitä osittain selittää mittaustelmien puutteellisuus sekä halkeamaverkosto juurikanavineen ja onkaloineen.

Tiiviin heterogeenisen savimaan juuritutkimukset osoittivat, että sokerijuurikkaan juuri pystyy erittäin hyvin seuraamaan pienimmän mekaanisen vastuksen kohtia ja ohuen 0,5 mm:n juurenkärkensä avulla löytämään pienetkin maan halkeamat. Maissin juuri oli halkaisijaltaan 1 mm ja taipui keskimäärin 45° enemmän pystysuorasta kuin sokerijuurikas. Maissi ei siten pystynyt kasvamaan sokerijuurikkaan tavoin lähes suoraan alaspäin halkeamia ja kanavia pitkin.

Juuren taipumisella ja mekaanisella vastuksella oli selvä riippuvuus. Mitä suurempi oli mekaanisen vastuksen ero juuren kasvaessa maakerroksesta toiseen, sen suurempi oli myös kasvusuunnan välinen ero, eli juuren taipuminen tai suoristuminen. Taipumisen lisäksi juuri paksuuntui ja haaroitui, kun mekaaninen vastus kasvoi. Haaroittumista tapahtui joko juuren paksuuntumisen yhteydessä, jos juurta ympäröivässä maassa oli juuren haaroille kasvutilaa, tai juuren löydettyä suuremman raon tai onkalon. Tällöin juuri ikäänkuin purki puristuksessa olleen kasvupaineensa täyttämällä koko onkalon joskus hyvin paksuilla ja haurailta juurenharoilla.

Tutkimus osoitti, että juurilla on kyky löytää pienimmän mekaanisen vastuksen kasvureitti. Jatkuvat suuret huokoset, halkeamat ja lieronreiät pienensivät tiiviin mutta heterogeenisen maan mekaanisen vastuksen haitallisuutta. Tiivistämättömän maan ollessa tiivis ei voitu selvittää, olisiko kuohkea maa antanut suurempia satoja muuten samoissa olosuhteissa. Vastaava koe pitäisi siten perustaa suhteellisen kuohkealle maalle, jossa tiivistämätön maa edustaisi mekaanisen vastuksen optimitasoa.

I JOHDANTO

Maa tarvitsee kohtuullista tiivistämistä tuottaakseen korkeimman mahdollisen sadon (AFFLECK ym. 1976, HÅKANSSON 1986). Tiivistymät, kovat kokkareet ja kuorettumat aiheuttavat kuitenkin mekaanista vastusta, mikä johtaa kasvinosien rajoittuneeseen kasvuun (BOWEN 1981).

Mekaaninen vastus on tilavuuspainon, maalajin, maan rakenteen ja maan vesipitoisuuden funktio. Nämä tekijät vaikuttavat vesi- ja ravinnetalouteen sekä maan ilmaan ja siten myös juuriston kasvuun (ANDERSEN 1985). Esimerkiksi tiivistyneessä ja kuivassa maassa matalan juuriston aiheuttaja on ensisijaisesti mekaaninen vastus, kun märissä olosuhteissa syynä on hapen puute (FERGEDAL 1971).

Mekaanista vastusta on siten vaikea eristää muista kasvutekijöistä. Laboratoriokokeissa olosuhteet voidaan vakioda, ja mekaanisen vastuksen vaikutusta juuren kasvuun onkin tutkittu paljon keinotekoisissa olosuhteissa (ABDALLA ym. 1969, GREACEN ja OH 1972, RUSSELL ja GOSS 1974, GOSS 1977, CHAUDHARY ja AGGARWAL 1984). Sen sijaan pellolla mekaanisen vastuksen vaikutuksia juuren kasvuun ja morfologiaan on tutkittu suhteellisen vähän.

Juuren luonnollisessa kasvuympäristössä on usein halkeamia, onkaloita, lieronreikiä ja muita juurille sopivia kasvureittejä. Koska juuren kärjellä on tietty liikkumisamplitudi, juuri voi löytää pienimmän mekaanisen vastuksen reitit (ERIKSSON ym. 1974). Vaikka maassa olisi tiiviitä kovia kerroksia, juuren kasvu ei siten välttämättä häiriinny maan sisältäessä halkeamia (McCOWAN ym. 1983). Tyrehtynyttä juuren pituuskasvua juuri pystyy taas korvaamaan haaroittumalla onkaloissa (VOORHEES ym. 1975). Jos juuristo voi tyydyttää veden- ja ravinteidentarpeensa, eikä kasvustoa koettele hapenpuute, tiivistymät eivät vaikuta sadonmuodostukseen (BOWEN 1981).

Tämän kokeen tarkoituksena oli eri tasoisilla tiivistyskäsitteilyillä saada syntymään maahan tiivistymiä, joiden mekaaninen vastus vaihtelisi. Juuritutkimusten yhteydessä otettujen maanäytteiden avulla pyrittiin selvittämään mekaanisen vastuksen ja maan vesipitoisuuden sekä tilavuuspainon välisiä riippuvuuksia. Lisäksi keskeisenä tavoitteena oli selvittää juuren kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välistä riippuvuutta. Tarkoitus oli myös selvittää, olivatko laboratoriossa tehdyt havainnot mekaanisen vastuksen vaikutuksista juuren morfologiaan samansuuntaisia pelto-olosuhteissa. Lisäksi satotulosten avulla yritettiin tutkia tiivistymien vaikutusta sadonmuodostukseen.

II KIRJALLISUUSOSA

1 Mekaaninen vastus maan fysikaalisena ominaisuutena

1.1 Mekaanisen vastuksen teoreettinen tausta

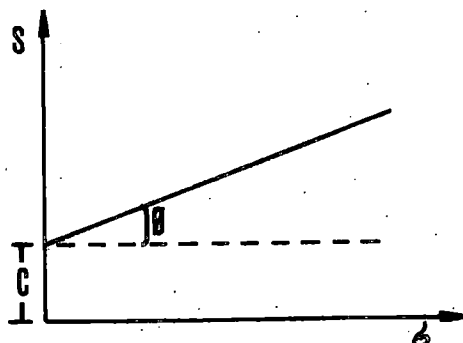
Mekaaninen vastus aiheutuu maahiukkasten välisistä koheesiovoimista ja kitkasta. Mekaniikassa tällaista vastusvoimaa kutsutaan leikkauslujuudeksi, joka kuvaa kriittistä voimaa tiettyä pinta-alaa kohti (SALLBERG 1965). Jos juuri pystyy kehittämään tätä kriittistä painetta suuremman paineen, mekaaninen vastus ei pysty ehkäisemään juuren pituuskasvua. Juuren kasvu saattaa kuitenkin hidastua, ja juuren morfologiassa voi tapahtua muutoksia (luku 3).

Leikkauslujuutta eli tietyn maa-alan rikkomiseen tarvittavaa voimaa voidaan kuvata Mohr-Coulombin empiirisellä yhtälöllä

$$S = c + \sigma \tan \phi, \quad (1.)$$

jossa c kuvaa koheesiovoimia, σ kohtisuoraan vaikuttavaa painetta ja $\tan \phi$ sisäisen kitkan kerrointa (MARSHALL ja HOLMES 1979, McKYES 1985). Koheesiovoimat ovat siten riippumattomia kohtisuoraan vaikuttavasta paineesta. Kitkavoimiin tämä paine kuitenkin vaikuttaa (kuva 1).

Koheesio voi vaihdella suuresti eri maalajeilla. Hiekassa se voi olla mitätön, kun taas savi on tyypillinen koheesio-maalaji. Vedellä kyllästetyssä savimaassa saattavat taas kitkavoimat olla olemattomia hiekan ollessa tyypillinen kitkamaalaji (MARSHALL ja HOLMES 1979).



Kuva 1. Leikkauslujuus S , joka koostuu koheesiosta c , kohtisuoraan vaikuttavasta paineesta σ sekä sisäisen kitkan kulmasta ϕ (MARSHALL ja HOLMES 1979, McKYES 1985).

Ajatellen juureen kohdistuvaa mekaanista vastusta koheesivoimat voivat ABDALLAN ym. (1969) mukaan vaikuttaa merkittävästi juuren kasvuun. Juuren kasvaessa maassa, jossa ei ole juurille sopivankokoisia huokosia, juuri joutuu laajentamaan huokosta ja siten tiivistämään maata. Tiivistäminen vaatii tiettyä painetta p , joka riippuu maan kimmokertoimesta E sekä suhteellisesta muodonmuutoksesta ϵ , eli

$$p = \epsilon E \quad (2.)$$

Suhteellinen muodonmuutos ϵ kuvaa tiivistymän Δl ja alkuperäisen maan aseman l_0 suhdetta $\Delta l/l_0$, missä Δl on l_0 :n ja tiivistyneen maan aseman l erotus (SAARINEVA 1979). Mitä suurempi on koheesio, sitä suurempi on kimmokerroin ja sen suurempi paine tarvitaan tiivistämään maata Δl :n verran (ABDALLA 1969).

Myös halkeamien laajentamiseen tarvitaan koheesivoimien rikkomista. Tämä eroaa edellisestä tiivistämisestä siinä, että halkeamaverkoston laajentaminen edellyttää uusien pintojen luomista. Griffithin teorian mukaan tarvittava paine p on tällöin suoraan verrannollinen kimmokertoimeen E ja materiaalin pintaenergiaan γ sekä kääntäen verrannollinen halkeaman pituuteen L :

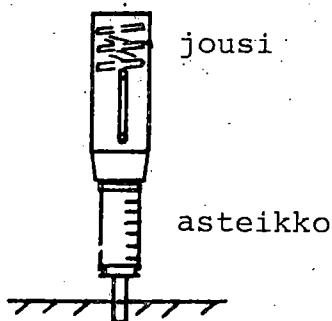
$$p = \sqrt{\frac{E \gamma}{L}} \quad (3.)$$

(MARSHALL ja HOLMES 1979).

Juuren tai kehittyvän sirkkataimen täytyy kehittää painetta voittaakseen myös kitkan aiheuttaman mekaanisen vastuksen. Juuren kärjen kohtaama kitka ei kuitenkaan ole niin suuri kuin maan sisäinen kitka, sillä juurella on tätä kitkaa heikentävänä ominaisuutena mm. liman erityis. ABDALLAn ym. (1969) mukaan juuren meristeemisolukoon vaikuttavat kitkavoimat eivät voi olla erityisen suuria. Hiekassa, jossa koheesiovoimat eivät vaikuta, suurimman mekaanisen vastuksen juurelle aiheuttaa juuren raivaamien hiekkarakeiden välinen kitka. Tämä kitka on yleensä alhainen, ja koheesiovoimat voivat siten olla suuria verrattuna kitkavoimiin.

1.2 Mekaanisen vastuksen mittausmenetelmät

Mekaanista vastusta voidaan mitata penetrometrillä, jonka kärki painetaan maahan, ja mekaanista vastusta kuvaa kärjen painamiseen tarvittava voima (kuva 2). Mitattu mekaaninen vastus koostuu maan leikkauslujuudesta, tiivistymisestä kärjen edellä sekä maan ja metallin välisestä kitkasta (MARSHALL ja HOLMES 1979).



Kuva 2. Piirros tasakärkisestä ns. taskukokoisesta penetrometristä (McKYES 1985).

Penetrometrejä on monenlaisia, ja niiden geometria, käyttönopeus, kitka ja läpäisyvyvyys vaikuttavat mitattuun maan vastukseen (WHITELEY ym. 1981). Normaalivastus kuvaakin paremmin maan vastusta kuin kokonaisvastus σ_p , joka saadaan mitatun voiman F ja penetrometrin kärjen pinta-alan A osamääränä,

$$\sigma_p = F / A \quad (4.)$$

Normaalivastusta σ_n laskettaessa otetaan huomioon maan ja metallin välinen kitkakerroin $\tan \phi'$ sekä kartiomuotoisen penetrometrikärjen kulma α (GREACEN ym. 1969, VOORHEES ym. 1975, WHITELEY ja DEXTER 1981 a):

$$\sigma_p = \sigma_n (1 + \tan \phi' \cot \alpha) \quad (5.)$$

Normaalivastus käsittää n. 20-80 % kokonaisvastuksesta riippuen penetrometrin geometriasta (VOORHEES ym. 1975).

Koska tutkimuksissa käytetään lukuisia erilaisia penetrometrejä, tutkimustulosten vertailussa on vaikeuksia. Penetrometrin todettiin tiivistävän maata mittaushetkellä. Lisäksi maan rakenne saattaa vaikeuttaa mittauksia, sillä ohuellakaan penetrometrikärjellä ei voida jäljittää kaikkia maan halkeamia ja rakoja, joita kuitenkin juuret käyttävät kasvureitteinään. Penetrometrimenetelmät soveltuvatkin WHITELEYn ym. (1981) mukaan parhaiten maahan, jossa struktuurilla ei ole merkitystä. McKYES (1985) luokitteli mittauslaitteita, ja totesi pienen tasakärkisen penetrometrin sopivan ainoastaan maahan, jossa vain koheesivoimat vallitsevat. Yksinkertaista suhdetta penetrometrivastuksen ja leikkauslujuuden välillä ei siis voi olla (WHITELEY ja DEXTER 1981 a).

Maan lujuutta on maaperätutkimuksissa pyritty arvioimaan myös ns. murtumisen moduulilla (modulus of rupture) (RICHARDS 1953, LEMOS ja LUTZ 1957, GERARD ym. 1962). Murtumisen moduuli S saadaan yhtälöstä

$$S = 3 F L / 2 b d^2 \quad (6.)$$

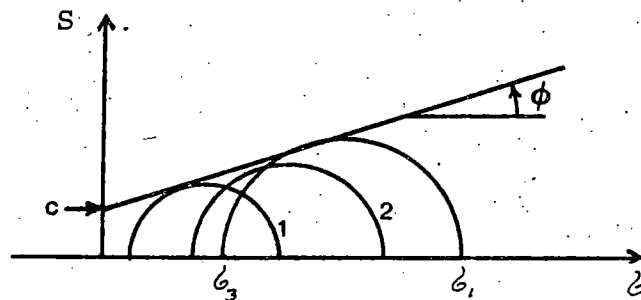
missä b on maalevyn leveys, d korkeus ja L kahden tukipisteen välinen etäisyys. Voima F tarvitaan rikkomaan tämä maalevy tukipisteiden välistä.

PAYNE ja FOUNTAINE (1952) käyttivät hyväkseen vääntömomenttia M määrittäessään leikkausvastusta S yhtälöstä

$$S = \frac{3 M}{2 \pi r^3}, \quad (7.)$$

jossa r on väännettävän maasylinterin säde. Vääntömomenttiin perustuvia mittaamenetelmiä on monenlaisia, ja niitä käytetään penetrometrien tapaan pelto-olosuhteissa (McKYES 1985). Pelto-olosuhteissa tehdyt kokeet eivät voi kuitenkaan korvata laboratorio-olosuhteissa suoritettuja testejä, esimerkiksi ns. kolmiakselitestiä, joka MARSHALLin JA HOLMESin (1979) mukaan on luotettavin menetelmä mittaamaan maan leikkauslujuutta. Tässä menetelmässä maanäyte on sylinterinmallinen, ja näytettä puristetaan maasylinteriin päältä alaspäin pituussuuntaan kohdistuvalla paineella. Säteensuuntainen maasylinteriä ympäröivä paine säädetään veden- tai ilmanpaineella vakioksi, ja merkitään σ_3 . Paineetta σ_1 kuvaa se pituussuuntaan kohdistuva paine, jossa maasylinteri murtuu. Paineiden σ_1 ja σ_3 avulla piirretään Mohrin puoliympyrä (kuva 3). Ensimmäisen testin jälkeen tehdään toinen testi, jossa σ_3 muutetaan, jolloin myös σ_1 muuttuu. Useiden testien avulla saadaan monta Mohrin puoliympyrää. Niiden tangenteista piirretään suora, joka kuvaa maan murtumiseen tarvittavaa painetta eli maan mekaanista vastusta. Suoran avulla voidaan myös määrittää mekaanisen vastuksen parametrit, koheesio ja kitka.

Erilaisia maan leikkauslujuuden määritysmenetelmiä kuvasi tarkemmin SALLBERG (1965) ja McKYES (1985). Ajatellen kuitenkin mekaanista vastusta kasvutekijänä ja siten juuren lähiympäristöä, ohutkärkinen penetrometri lienee käyttökelpoisiin. Juureen kohdistuvaa mekaanista vastusta on kuitenkin penetrometrilläkin vaikea mitata, eikä sitä voidakaan tarkasti jäljitellä.



Kuva 3. Mohrin ympyröistä piirretty suora, joka kuvaa maan murtumiseen tarvittavaa painetta eli maan aiheuttamaa mekaanista vastusta, S = leikkauslujuus, ϕ = sisäisen kitkan kulma, c = koheesio, σ_1 = maahan pituussuuntaan kohdistuva paine, σ_3 = maahan poikkisuuntaan kohdistuva paine (McKYES 1985).

Penetrometrit antavat säännönmukaisesti liian suuria arvoja verrattuna juureen kohdistuvaan paineeseen (ANDERSEN 1985). Olennainen syy tähän on juuren kyky taipua ja kasvaa aina siihen suuntaan, missä mekaaninen vastus on heikoin (ERIKSSON ym. 1974). Juuren liman erityis ja ilmeisesti myös kartiomuoto vähentävät juuren kohtaamaa vastusta (BARLEY ym. 1965). Myös juuren säteensuuntaiset voimat ja juuren hunnun takaisen solukon kyky paksuuntua helpottavat juuren kärjen tunkeutumista maahan (ABDALLA ym. 1969). Lisäksi nestekuljetus juuren kärjen sisälle ja ulkopuolelle voi muuttaa maan mekaanisia ominaisuuksia. Siten juuren veden otto voi aiheuttaa maan kutistumista ja halkeilua (ERIKSSON ym. 1974).

2 Mekaaniseen vastukseen vaikuttavat tekijät

2.1 Tilavuuspaino

Mekaaniseen vastukseen vaikuttavat maan tilavuuspaino, maan lajitekoostumus, maan rakenne ja vesipitoisuus (ERIKSSON 1982). Juuren laajuuskasvu tiiviissä maassa on vaikeaa, koska

maahiukkaset ovat niin lähellä toisiaan, että juurien täytyy työntää ne syrjään voidakseen kasvaa maassa (GILL 1961). Maan tilavuuspainoa on siten käytetty mittana arvioitaessa maan mekaanista vastusta, joka STIBBEN ja TERPSTRAN (1981) mukaan kasvaa eksponentiaalisesti tilavuuspainon kasvaessa.

Tilavuuspaino ei anna kuitenkaan yhtä hyvää kuvaa juureen kohdistuvasta mekaanisesta vastuksesta kuin penetrometrillä mitattu leikkausvastus (TAYLOR ja GARDNER 1963). Kriittinen tilavuuspaino, jossa juuren kasvu tyrehtyy, riippuu maan lajitekoostumuksesta (LUTZ 1952, HEMSATH ja MATZURAK 1974). Juuren kasvu loppuukin ERIKSSONIN ym. (1974) mukaan tilavuuspainon noustessa 1,3 - 1,8 kg/dm³ maalajista riippuen. Siten juuret voivat läpäistä paljon helpommin hiekan, jolla on suuri tilavuuspaino kuin sitä kevyemmän saven, eikä tilavuuspaino siis sellaisenaan kuvaa mekaanista vastusta (PHILLIPS ja KIRKHAM 1962).

Maan rakenne vaikuttaa suuresti maan tilavuuspainoon. EHLERSIN ym. (1983) kokessa tilavuuspaino ei vastannut maan mekaanista vastusta, ja syyksi he arvelivat maan huokokset ja halkeamat. Lisäksi maan suuri tilavuuspainon vaihtelu saattoi selittää, miksi tilavuuspaino kuvasi niin huonosti mekaanista vastusta.

2.2 Maalaji

HEMSATHIN ja MATZURAKIN (1974) tulosten mukaan savespitoisuuden noustessa 7,5 %:sta 30 %:iin juurien kasvu laskee, mutta savespitoisuuden nousu yhdestä 7,5 %:iin parantaa juurien kasvua. Tämä parempi kasvu todettiin johtuvan hiekan kitkan vähentymisestä saven vaikutuksesta. Savespitoisuuden noustessa yli 7,5 %:n savi-hiekka -seoksen sidosvoimat lisääntyivät kuitenkin niin, että juuren kasvu heikkeni.

Maan lajitekoostumuksen vaikutus mekaaniseen vastukseen ilmenee siis sekä kitkan että koheesivoimien kautta. Kitka voi lisätä maan leikkauslujuutta hiekkamaassa, kun taas savimaassa vallitsevat lujat koheesivoimat saveshiukkasten välillä (luku 1.1).

Myös NASH ja BALIGAR (1974) totesivat hiekkamaissa saveksen voitelevan ja hiekkajyviä ryhmittelevän vaikutuksen, joka johtaa mekaanisen vastuksen pienentymiseen.

Maalaji vaikuttaa maan rakenteen kehitykseen ja säätelee myös siten mekaanista vastusta: Maan kutistuminen ja halkeilu riippuvat viime kädessä maan hiukkaskoostumuksesta sekä myös savestyyppistä ja orgaanisen aineksen pitoisuudesta (McCOWAN ym. 1983). Edullista mururakennetta ei voi kehittyä hiekkamaille, joilla on alhainen humus- tai hiesu-saves -pitoisuus (HIDDING ja VAN DEN BERG 1960). Lisäksi savimaissa on yleensä jatkuvia huokosia. Runsaasti savesta sisältävissä maissa koheesio ei näin estä juuren kasvua (MADSEN 1978).

Maalaji vaikuttaa niin ikään tiivistymisalttiuteen. ERIKSONIN (1982) mukaan maa, jossa savesta on alle 25 %, ei tiivisty niin helposti kuin savimaa, vaikka maassa olisi paljon suuriakin huokosia. Kitkavoimat vähentävät tiivistymisalttiutta. Siten karkea hiekka tiivistyy edelleen paljon vähemmän kuin hieno hiekka (WARNAAS ja EAVIS 1972). Lisäksi orgaaninen aines stabiloi maan rakennetta, jolloin maan tiivistymisalttius pienenee (BERTILSSON 1969).

Vaikkei yksinkertaista suhdetta maan lajitekoostumuksen ja mekaanisen vastuksen välille ole aina löydettykään (BYRD ja CASSEL 1980, STITT ym. 1982), maan lajitekoostumus on kuitenkin merkittävä mekaaniseen vastukseen vaikuttava tekijä. Samoin maan orgaaninen aines vaikuttaa maan rakenteen välityksellä mekaaniseen vastukseen.

2.3 Maan rakenne

Viljelykasvien juuret kasvavat mieluiten avoimessa huokossysteemissä, ja pyrkivät tiivistämään maata vasta suurien huokosten puuttuessa (ERIKSSON 1982). Maan huokoisuudella ja siten maan rakenteella onkin tärkeä merkitys paitsi vesitaloudessa ja ilmatilavuudessa, myös juurien läpäistessä maata (MILTHORPE ja MOORBY 1981).

Maassa, jossa on muruinen rakenne, huokokset suuria ja maa helposti liikuteltavaa, mekaanisen vastuksen ei voida olettaa rajoittavan juuriston kasvua (HIDDING ja VAN DEN BERG 1960). Tiivistyneet kerrokset huonorakenteisessa maassa ehkäisevät juurien kasvua (MAERTENS 1964, SCHUURMAN ja DE BOER 1974), ja struktuurin stabiilisuus on tärkeä tekijä juurien kehityksessä (WIERSUM 1957, NASH ja BALIGAR 1974).

Edullisen stabiilin huokossysteemin ja haitallisten tiiviiden kerrosten lisäksi myös halkeamat ovat osa maan rakennetta, jolla on suuri merkitys mekaaniselle vastukselle. McCOWANin ym. (1983) tutkimukset osoittavat, että vaikka maassa olisi selvä tiivis kerrostuma, juurien läpäisyn ei välttämättä tarvitse kärsiä, jos tiivistymässä on halkeamia. Jo pieni tiivistymän kuivuminen ja maan kutistuminen saattavat auttaa juuria läpäisemään tiivistymän.

Juuret pyrkivät kasvamaan halkeamissa, juurien ja matojen kanavissa sekä kovien kokkareiden välisissä tiloissa (HURD 1968, CHAMPION ja BARLEY 1969, DREW 1979), ja ne myös kehittyvät näissä tiloissa nopeammin kuin murujen tai kokkareiden sisällä (WHITELEY ja DEXTER 1983). RUSSELLin ja SHONEN (1972) mukaan huokosten jatkuvuus onkin mekaanisen vastuksen kannalta tärkeämpää kuin kokonaishuokostilavuus.

2.4 Vesipitoisuus

Maan kosteustila vaikuttaa maan tilavuuspainon, maalajin ja maan rakenteen lisäksi maan mekaaniseen vastukseen. Esimerkiksi savimaan kuivuminen ja maan kovettuminen saattaa kokonaan estää juurien tunkeutumisen pohjamaahan (POHJANHEIMO ja HEINONEN 1960). Maan vesipitoisuuden noustessa maan mekaaninen vastus taas laskee, ja juuret voivat kehittyä syvälle (TAYLOR ja GARDNER 1963, TACKETT ja PEARSON 1964, TAYLOR ja BURNETT 1964, EAVIS 1972, VOORHEES ym. 1975, CASSEL ja NELSON 1979, STITT ym. 1982).

CAMPin ja GILLin (1969) mukaan kosteuden vaikutusta vastukseen voidaan selittää kutistumattomilla mailla koheesion ja sisäisen kitkan avulla. Kosteuden lisääntyessä sekä koheesio c että sisäisen kitkan kerroin $\tan \phi$ vähenevät lineaarisesti.

Vesipitoisuuden vaikutusta kitkaan voidaan tarkastella seuraavien mekaniikan yhtälöiden avulla: Karkeilla hiekoilla huokosten vedenpaine vähentää kiinteiden hiukkasten kontaktipintoja ja siten kitkan aiheuttamaa vastusta (McKYES 1985). Maanpintaan kohtisuoraan vaikuttavaan paineeseen ϕ tulee siten liittyyä vedenpaineen p vaikutus, jolloin saadaan ns. efektiivisen paineen käsite ϕ' (ref. MARSHALL ja HOLMES 1979).

$$\phi' = \phi - p \quad (8.)$$

Kun maan vesipotentiali laskee, huokosten vedenpaine p pienenee ja siten ϕ' kasvaa. BISHOP ja BLIGHT (1963) kehittivät yhtälöön empirisen kertoimen λ , jonka arvo riippuu maalajista ollen yksi vedellä kyllästetyssä maassa ja nolla eri vesipitoisuuksissa eri maalajeilla. Siten efektiivinen paine voidaan ilmaista yhtälöllä

$$\phi' = \phi - \lambda p \quad (9.)$$

ja maan leikkauslujuus S Mohr-Coulombin yhtälöstä (1.)

$$S = c' + b' \tan \phi = c' + (b - \lambda p) \tan \phi, \quad (10.)$$

jossa c' kuvaa veden vaikutuksen alaista koheesiota (MARSHALL ja HOLMES 1979). Yhtälöstä (10.) nähdään, kuinka maan kostuessa kitka vähenee, kun huokosten negatiivisen vedenpaineen p itseisarvo pienenee.

Hienoilla hiesu- ja savimailla tilanne on monimutkainen, sillä hiukkasten pieni massa, hiukkaspintojen sähköiset varaukset ja maanesteen ionit vaikuttavat kaikki yhdessä hiukkasten välisiin voimiin ja maan mekaanisiin ominaisuuksiin (McKYES 1985). Siten selvää eroa koheesion ja kitkan välillä ei voida tehdä maassa, jossa saveshiukkasia ja domeeneja ympäröi adsorptiovesi (MARSHALL ja HOLMES 1979). GERARD (1965) osoittikin, että maan vesipitoisuus, kuivumisolosuhteet, maan lajitekoostumus ja vaihtuvien kationien määrä ja laatu sekä kaikkien näiden tekijöiden keskinäiset vuorovaikutukset vaikuttavat maan vastuksen ja kosteuden välisiin suhteisiin.

Kuivumusupeudella on siten myös vaikutusta mekaaniseen vastukseen (GERARD 1962 ym., GERARD 1965). Hidas kuivuminen aiheuttaa maahiukkasten tiiviimmän järjestäytymisen ja siten suuremman vastuksen kuin nopea kuivuminen. Koheesio riippuukin ennen kaikkea hiukkasten välisistä kontaktipinnoista tietyllä alalla (ref. CAMP ja GILL 1969).

Myös HEMSATHin ja MAZURAKin (1974) kokeessa vastus kasvoi maan kuivuessa tilavuuspainon pysyessä vakiona. Niissä tapauksissa, joissa läpäisyvastus laski maan kuivuessa, tulos saattoi heidän mukaansa johtua maan heikoista adheesio- ja koheesivoimista, jolloin penetrometrin kärki aiheutti pieniä halkeamia mittaushetkellä. Mekaaninen vastus saattaakin laskea maan kuivumisen myötä maan kutistumisen ja halkeilun seurauksena, jolloin juuret kasvavat näihin avoimiin tiloihin (McCOWAN ym. 1983).

3. Mekaanisen vastuksen vaikutus juuren kasvuun

3.1 Juuren normaali rakenne ja kehitys

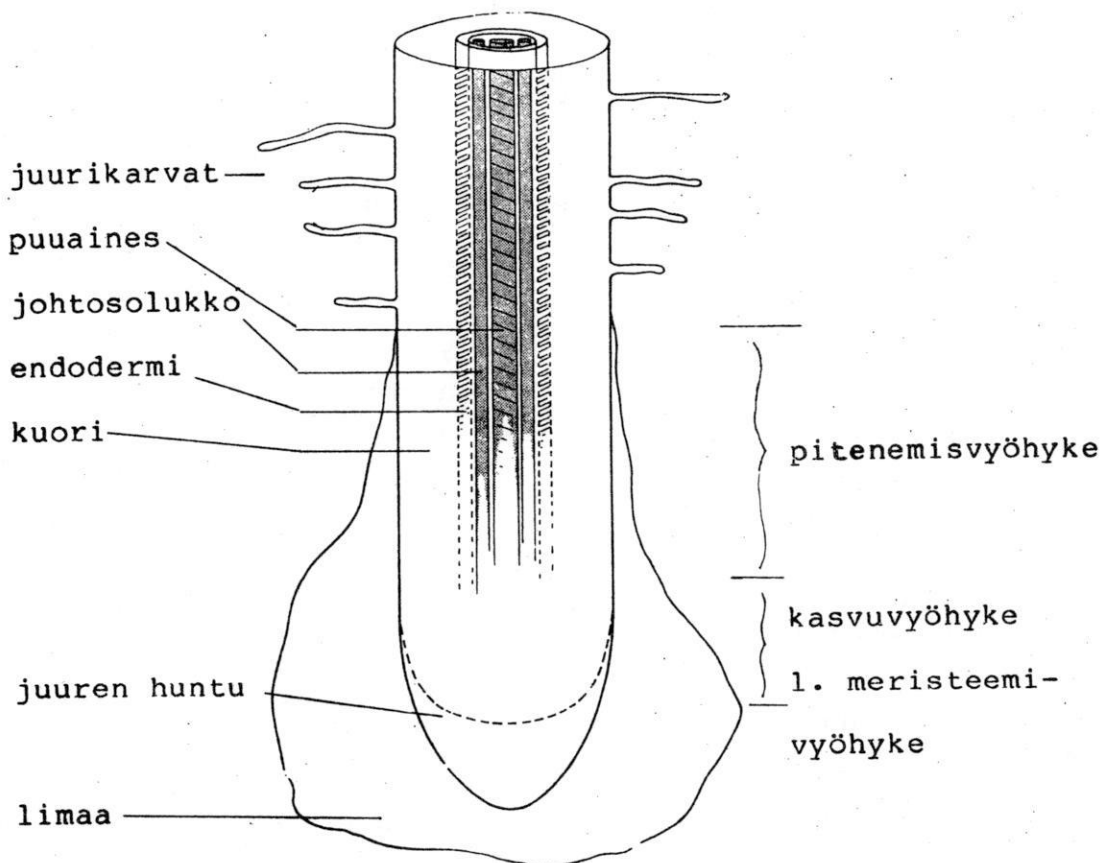
Juuriston tehtävänä on kiinnittää kasvi maahan, absorboida ja kuljettaa vettä ja ravinteita sekä syntetisoida kasvuhormoneja ja muita orgaanisia yhdisteitä. Juuren metabolia on kuitenkin herkkä ympäristötekijöille, joista yksi on mekaaninen vastus (DREW ja GOSS 1973). Jotta vastuksen vaikutusta juuren kasvuun voitaisiin verrata normaaliin juuren kehitykseen, juuren rakennetta ja kehitystä tarkastellaan aluksi suotuisissa olosuhteissa.

Juuren pituuskasvu tapahtuu kärjessä, jossa on juuren kasvuvyöhyke, apikaalinen meristeemi (kuva 4). Aivan juuren kärjessä on ns. juurihuntu, joka ympäröi kärkeä. Apikaalinen meristeemi voidaan edelleen jakaa kahteen osaa; siinä voidaan erottaa alempana varsinainen kasvuvyöhyke ja ylempänä solujen pitenemisvyöhyke. Juuren kaikki solukot, epidermi, kuori ja johtosolukko erilaistuvat meristeemisolukosta (LEHTONEN 1980).

Juuren huntu suojaa hentoja meristeemisoluja juuren kärjen työntyessä maaperään. Lisäksi hunnun solujen limautuminen edistää juuren tunkeutumista maahan (PYYKKÖ 1980, LEHTONEN 1980). Limaa erittyy myös erilaistumisvyöhykkeessä sekä juurikarvoissa (RUSSELL 1977). Kolmas juurihunnun tehtävä on aistia painovoima, jos juuri on geotrooppisesti suuntautunut. JUNIPER ym. (1966) osoittivat, että poistamalla juurihuntu juuren piteneminen jatkuu, mutta reagointi painovoimaan häviää.

Mekanismi, jolla painovoima havaitaan juurihunnussa, on tuntematon, mutta sen ajatellaan olevan jotenkin yhteydessä tärkkelysjyvästen liikkeeseen hunnun soluissa. Jos juuren asento muuttuu sille ominaisesta asennosta toiseksi, siirtyy tärkkelys pian sen jälkeen solun alaosaan. Arvellaan,

että se tällöin ärsyttää plasmalemmaa tai solun muita membraaneja, minkä johdosta juuren kärki nopeasti taipuu geotrooppisesti alkuperäiseen asentoonsa (PYYKKÖ 1980). Viestin välitys hunnusta reagoivaan pitenemisvyöhykkeeseen on JUNIPERin (1980) mukaan kuitenkin tuntematon. Auksiinia ei enää pidetä välittäjänä, koska ei voida osoittaa, että indolyli-3-etikkahappo (IAA) liikkuu hunnusta kohti juurta.

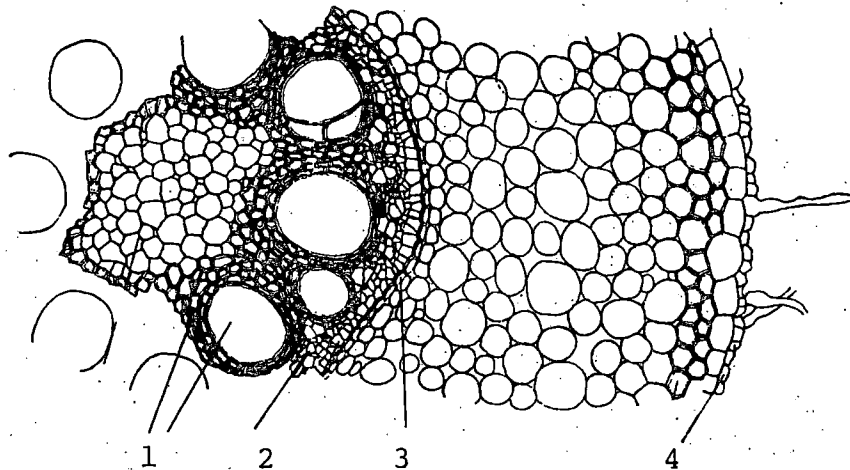


Kuva 4. Kaavakuva juuren kärkiosista (RUSSELL 1977).

Yleensä 0,5 cm:n päässä juuren kärjestä voidaan jo havaita erilaistuneita solukoita (kuva 5): puuaines, johtosolukko, endodermi sekä juuren uloin solukko eli epidermi (RUSSELL 1977).

Juurikarvat kehittyvät epidermistä, joka on yleensä lyhytikäinen ja irtoaa juurikarvoineen. Juurikarvoja syntyy jatkuvasti kasvuvyöhykkeen läheisyyteen vanhimpien kuollessa kauimpina juuren kärjestä (LEHTONEN 1980). Epidermin tilalle

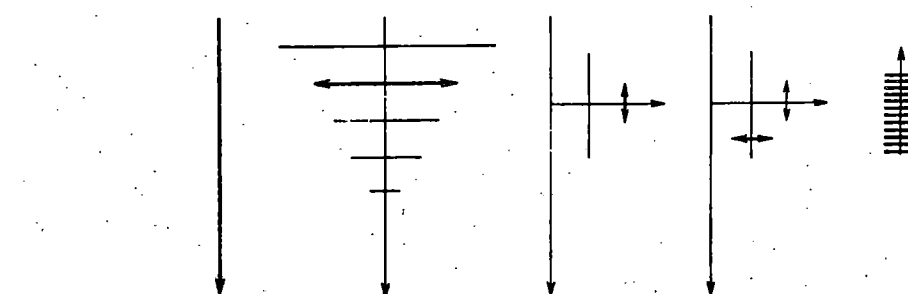
uudeksi rajoitussolukoksi erilaistuu kuoren uloin tai uloimmat solukerrokset (PYYKKÖ 1980).



Kuva 5. Poikkileikkaus juuresta: 1 = puuaines, 2 = johtosolukko, 3 = endodermi, 4 = epidermi (BRACEGIRDLE ja MILES 1983).

Varhaisessa kehitysvaiheessa juuri on sylinterimäinen, haaraton muodostuma. Myöhemmin muodostuvien sivuhaarojen synty tapahtuu sisäsyntyisesti (LEHTONEN 1980). Haarat syntyvät pääjuureen yleensä heti karvavyöhykkeen yläpuolelle (RUSSELL 1977). Pääjuuret kasvavat yleensä pääasiassa alaspäin, kun sivuhaarat kasvavat ensin vaakasuoraan ennen kuin kääntyvät alaspäin (MILTHORPE ja MOORBY 1981). Selvän pääjuuren omaavilla kasveilla alemmat ja nuoremmat haarat ovat yhä lyhyempiä ja kasvavat yhä jyrkemmin alaspäin. Yksisirkkaisten juuristossa lisäjuuret sen sijaan leviävät aluksi maanpinnan tuntumassa joka suuntaan ja kasvavat sitten samanarvoisina alaspäin (LEHTONEN 1980). Viljakasvin juuriston kokoa voidaan tarkastella kuvasta 6. Pääjuuren säde on 0,5 cm, eli juuret mahtuvat kasvamaan vain hyvin suurissa yli 1000 μm :n huokosissa.

Kaksisirkkaisilla tapahtuu sekundääristä paksuuskasvua, jossa jälsisolukko synnyttää ulospäin sekundääristä nilaa ja sisäänpäin sekundääristä puuta. Yksisirkkaisilla juuren paksuuskasvu on sen sijaan hyvin harvinaista (PYYKKÖ 1980).



Juuren järjestysnumero	pääjuuri	1.haara	2.haara	3.haara	juurikarva
-säde (mm)	0,5	0,2	0,1	0,05	0,01
-haarojen lkm/cm juurta	-	2	1	0,5	1000
-juuren pituus	1	5	2	0,5	1000
cm/cm ³ maata					

Kuva 6. Viljakasvin juuriston osat ja koko pintamaassa (BARLEY 1970).

Juuri kasvaa pituutta, kun meristeemivyöhykkeessä muodostunut uusi solu pitenee ja työntää juuren kärkeä maan läpi (TAYLOR ym. 1972). Juuren pituuskasvussa ovat tärkeitä solun turgoripaine, soluseinän vastus sekä ympäröivän maan vastus. Kaikkiin näihin tekijöihin vaikuttavat pitenemisvyöhykettä ja juuren kärkeä ympäröivän maan fysikaaliset ominaisuudet.

Tavallisten viljakasvien juuristo syvenee 2-3 cm päivässä tehokkaimmalla kehitysvaiheella, joka loppuu tähkimiseen. Savimaissa, joissa on hyvä rakenne, juuristo voi siten kasvaa 1-2 m:n syvyyteen (WIKLERT 1961). DURRANT ym. (1973) to-

tesivat sokerijuurikkaan juuren kasvavan yli 120 cm:n pituiseksi. Myös osa perunan juurista saattoi ylittää yli metrin syvyyden.

3.2 Vaikutus juuren pituuskasvuun

Kun kasvava juuristo kohtaa maassa huokosia, joiden läpimitta on pienempi kuin juuren läpimitta, pituuskasvu on mahdollista vain, jos juuri voi pienentää sädettään tai suurentaa huokosta. WIERSUM (1957) sekä RUSSELL ja GOSS (1974) todistivat kuitenkin, ettei juuri pysty pienentämään sädettään. Toisaalta maan tiivistyessä ja kuivuessa maahiukkaset vastustavat yhä voimakkaammin juurta raivaamasta kasvutilaa ja suurentamista huokosia (CANNELL ja DREW 1973). Kun pitenevän juuren aiheuttama kasvupaine ei pysty enää ylittämään maan aiheuttamaa vastusta, juuren pituuskasvu estyy.

Juuren kasvupaineeksi kutsutaan painetta, joka kasvilla on käytettävissä maan mekaanisen vastuksen voittamiseksi (RUSSELL 1977). Tätä painetta kuvaa seuraavassa yhtälössä S_c , joka muodostuu solun sisäisestä paineesta S_i sekä soluseinän vastuksesta W (HESS 1975):

$$S_c = S_i - W \quad (11.)$$

Solun sisäisellä paineella tarkoitetaan osmoosin synnyttämää turgorpainetta. BARLEYn (1962) sekä GREACENin ja OHin (1972) mukaan juuri kasvaa maassa pituutta, jos tämä solun sisäinen paine S_i on suurempi kuin soluseinän paineen W ja maan mekaanisen vastuksen S summa, eli

$$S_i > W + S \quad (12.)$$

Jo Pfeffer vuonna 1893 (ref. GILL ja BOLT 1955) totesi, että juuren kasvupaine voi nousta joko soluseinän vastuksen heikennyttyä tai solun osmoottisen potentiaalin lisääntyttyä. Joskus solun pitenemiseen voikin liittyä osmoottisen potentiaalın säätelyä, mutta usein kasvu tapahtuu soluseinän vastuk-

sen heikentyessä. Tällöin soluseinä muuttuu plastiseksi, mikä johtaa veden kulkeutumiseen soluvakuoliin ja siten solun laajenemiseen. Soluseinä muuttuu tämän jälkeen jälleen jäykäksi (HESS 1975).

Mekaaninen vastus hidastuttaa solun pituuskasvua (GILL ja MILLER 1956, BARLEY 1962, ABDALLA ym. 1969, GREACEN ja OH 1972, DREW ja GOSS 1974, DREW 1979). BARLEYn (1962) mukaan hidastumista tapahtuu, koska soluseinän vastuksen laskemiseen kuluu aikaa. GREACEN ja OH (1972) totesivat, että soluseinän vastuksen heikentyessä kasvunopeus laskee lineaarisesti. Esimerkiksi herneellä pienin mahdollinen soluseinän vastus oli 340 kPa. Tämän alemmaksi kasvi ei enää voinut säädellä soluseinän vastustaan, jotta kasvu olisi jatkunut edes hitaana.

BARLEY (1962) esitti yhtälöitä mekaanisen vastuksen vaikutuksesta solun laajuuskasvuun osmoottisten voimien perusteella. Hän osoitti, että solun lopullinen koko laskee ulkopuolisen paineen kasvaessa. Empiiriset tutkimukset osoittavat kuitenkin, ettei solukoko välttämättä pienene, vaan solun muoto muuttuu tai solu jopa kasvaa (luku 3.3).

Juuren kasvuun kriittisesti vaikuttavia paineita on tutkittu runsaasti laboratorio-olosuhteissa, joissa muut kasvutekijät voidaan pitää vakioina (GILL ja MILLER 1956, BARLEY 1962, ABDALLA ym. 1969, EAVIS ym. 1969, TAYLOR ja RATLIFF 1969, RUSSELL ja GOSS 1974, GOSS 1977, CHAUDHARY ja AGGARWAL 1984).

Pfeffer (ref. GILL ja BOLT 1955) tutki ensimmäisenä juurien kehittämää kasvupaineita laitteella, jossa juuren kasvuvoima työnsi kipsiharkkoa alaspäin tai sivulle, mikä aiheutti kalibroidun jousen jännittymisen. GILL ja BOLT (1955) saivat tällä menetelmällä juuren kehittämäksi suurimmaksi aksiaaliseksi paineeksi 750 kPa ja radiaaliseksi paineeksi 550 kPa.

TAYLOR ja RATLIFF (1969) muuttivat Pfefferin menetelmää, ja käyttivät kasvualustana maata, jonka mekaanisen vastuksen he

mittasivat etukäteen. Heidän mukaansa maapähkinä voi kehittää 1300 kPa:in paineen ja puuvilla 940 kPa:in kasvupaineen. EAVIS ym. (1969) totesivat kuitenkin, että kummassakin menetelmässä juurella oli mahdollisuus paksuuntua, ja siten heidän kohteessaan juuren kärkeä lähellä sijaitseva juuren osa ehkäistiin paksuuntumasta. Puuvilla kehitti nyt 1100 kPa:in paineen ja herne 1200 kPa:in paineen. Alhainen maan happipitoisuus vähensi olennaisesti kasvupainetta. Myös GILL ja MILLER (1956) osoittivat selvästi hapen merkityksen.

Vaikka juuret pystyisivätkin voittamaan 1000 kPa:in paineen, niin kasvunopeus on tällöin jo äärimmäisen hidasta. Tärkeää olisikin tuntea se paine, jossa juuren kasvunopeus merkittävästi laskee.

RUSSELL ja GOSS (1974) tutkivat ohran reagointia ympäristön paineeseen. Kasvualustana heillä oli lasikuulia. Juurien kohtaama paine laajenevissa huokosissa lasikuulien välissä mitattiin hydrostaattisena paineena, jota lisättiin systeemiin. Juurien kasvu laski n. 50 % paineen ollessa 20 kPa ja 80 % 50 kPa:issa. Myös maissin, sokerijuurikkaan ja vehnän reagointia tutkittiin. Maissin pituuskasvu laski 31 % 25 kPa:issa, kun vastaava luku ohralla oli 57 %. Sokerijuurikas ja vehnä olivat maissia herkemmiä ja ohraa kestävämpiä mekaaniselle vastukselle.

Muut tutkijat saivat samansuuntaisia tuloksia (GILL ja MILLER 1956, ABDALLA ym. 1969, BARLEY 1962, GOSS 1977). Heillä tutkimusmenetelmän periaatteena oli myös lasikuulia sisältävä kasvualusta, johon lisättiin painetta systeemin ulkopuolelta. Tosin BARLEY (1962) yritti vähentää lasikuulien sisäisen kitkan vaikutusta juuriin kasvattamalla juuria huokoisen levyn pintaa pitkin. Juuren ja levyn välisen kitkan mittaaminen oli kuitenkin hankalaa BARLEYn (1962) kokeessa, ja CHAUDHARY ja AGGARWAL (1984) kehittivätkin uuden menetelmän, jossa kitka ei voi väärentää tuloksia. He kasvattivat 1 cm:n pituisia vehnän juuria 48 tuntia RICHARDSin (1948) painekammiossa, jonka ilmanpaine säädettiin ennen juurien siirtämistä.

tä paineen alaisiksi. Juuren kasvu pysyi melkein häiriintymättömänä 200 kPa:iin asti. Kasvu laski hyvin merkittävästi 1000 kPa:issa. Luvut ovat korkeampia kuin aikaisempien tutkimustulosten, mikä johtunee kitkan eliminoitumisesta.

Siten juuren kasvun voidaan olettaa tyrehtyvän lähellä suurinta mahdollista turgorpainetta eli 1000 kPa. Eri kasvien välillä on todettu olevan suhteellisen vähän vaihtelua. Paljon pienemmät paineet kuin solun turgorpaine voivat kuitenkin aiheuttaa jo merkittävää juuren kasvun estymistä (LACHNO ym. 1982). Hormoneilla lienee siten osuutta mekaanisen vastuksen aiheuttamassa kasvun heikkenemisessä (luku 3.4). DREW (1979) totesikin, että kasvin kärsiessä kuivuudesta turgorpaine solussa laskee, ja siksi sisäinen paine saattaa käydä heikoksi. Muussa tapauksessa juuren herkkyyttä mekaaniselle vastukselle voidaan selittää joko osmoottisten voimien tai apikaalisen meristeemin kasvun säätelyn perusteella. Kysymys selitysten paremmuudesta jää kuitenkin avoimeksi. Juuren iällä ei ole merkitystä mekaanisen vastuksen vaikuttaessa pituuskasvuun (GOSS 1977).

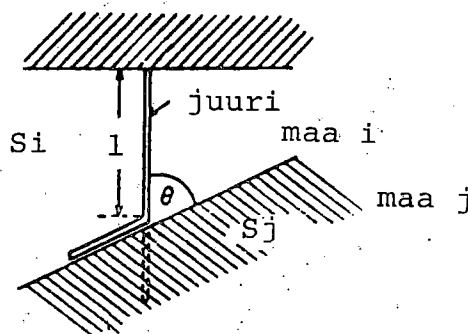
3.3 Vaikutus juuren morfologiaan

Juuret pyrkivät kasvamaan alaspäin, mikä on seurausta juurihunnun toiminnasta (luku 3.1). Juurella on kuitenkin kyky taipua ja välttää kovia kohtia maassa (DEXTER ja HEWITT 1978). Heterogeenisessä maassa juuret voivatkin olla mutkaisia ja haaroittuneita, ja niissä saattaa olla runsaasti juurikarvoja (CALLOT ym. 1982).

DEXTER ja HEWITT (1978) tutkivat juurien taipumista ja totesivat taipumisen riippuvan maan mekaanisista vastuksista S_i ja S_j , sekä kulmasta e (kuva 7).

Yleisesti, jos $S_j < S_i$, kaikki juuret läpäisevät maan. Jos $S_j > S_i$, juuri taipuu sitä herkemmin, mitä pienempi on kulma e . Mikäli juuren suurin mahdollinen kasvupaine on pienempi

kuin S_j , taipumista tapahtuu aina. Juuren taipumiseen vaadittava jännitys on suoraan verrannollinen juuren kimmokertoimeen, joka WHITELEYn ja DEXTERin (1981 b) mukaan riippuu merkittävästi ympäristötekijöistä. Esimerkiksi maan vesipotentiaali ja ravinteet vaikuttavat kimmokertoimeen ja siten juuren elastisiin ominaisuuksiin. Tämä tuntuukin luonnolliselta, sillä juuren vesipotentiaalin ollessa korkea, solun sisäinen paine ja siten kasvupaine ovat suuria, eikä juuri tällöin taipune helposti (luku 3.2).

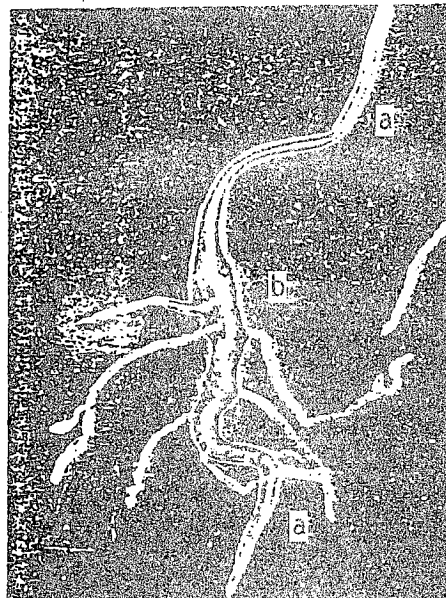


Kuva 7. Piirros juuren taipumisesta, kun juuri kasvaa mekaanisesta vastuksesta S_i vastukseen S_j juuren ja maan j välisen kulman ollessa θ (DEXTER ja HEWITT 1978).

Juuren taipumiseen vaadittava jännitys on suoraan verrannollinen myös juuren säteeseen, sekä kääntäen verrannollinen huokosen pituuteen l , kun oletetaan, että $S_i = 0$ (kuva 7). WHITELEY ym. (1982) selvittivät, että huokoskoon ollessa alle 3 mm, taipumiseen tarvittava jännitys lisääntyy nopeasti huokoskoon pienentyessä. Tarvittava jännitys voi kasvaa suuremmaksi kuin suurin kasvupaine, jolloin kasvu estyy joka suuntaan.

WHITELEY ym. (1981) totesivat myös, että juuren taipumiseen liittyy juuren paksuuntuminen. Mekaaniseen vastukseen liittyvä juuren säteen kasvu onkin yleisesti tunnettu (ABDALLA

ym. 1969, PRIHAR ym. 1971, WARNAAS ja EAVIS 1972, EAVIS 1972, RUSSELL ja GOSS 1974, BALIGAR ym. 1975, TAYLOR 1981, SUBOTIĆ ja STANAČEV 1982). ABDALLA ym. (1969) selvittivät paksuuntumisen merkitystä todeten juuren kasvukyvyn nousevan säteen laajenemisen seurauksena. Mekaanisen vastuksen noustessa juuri paksuuntui ja pituuskasvu jatkui, joskin hidastuneena. Kun vastus jälleen laski, juuren säde kaventui normaaliksi (kuva 8). Paksuuntuminen tapahtui juuren kärjen takana, ja juuri muodostui siten kiilaksi, mikä vähensi juuren kärjen kohtaamaa painetta. WHITELEYn ja DEXTERin (1981 a) mukaan kartiokärkinen 2 mm:n penetrometri antaa suhteellisesti noin 50 % pienemmän arvon maan mekaanisesta vastuksesta kuin 1 mm:n kärki. Vielä ei kuitenkaan tiedetä, ilmeneekö tämä vaikutus juurien läpäistessä maata ja paksuuntuessa.



Kuva 8. Ohran juuren paksuuntuminen, kun painetta lisätään lasikuulia sisältävässä kasvualustassa: a) paine $p = 0$ kPa, b) $p = 350$ kPa (ABDALLA ym. 1969).

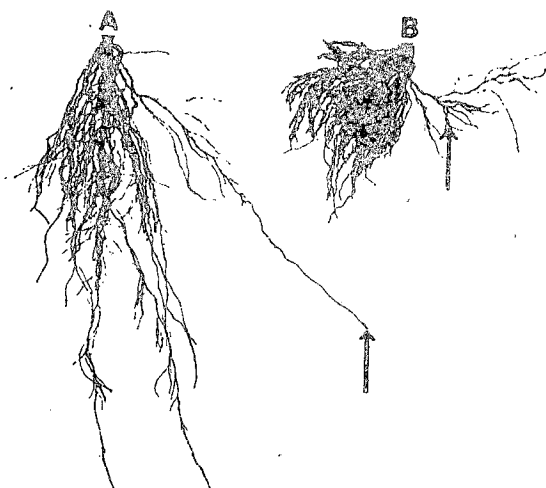
Paksuuntumista tapahtui ABDALLAn ym. (1969) kokeessa jo 350 kPa:in mekaanisessa vastuksessa, mikä on suhteellisen pieni paine verrattuna juuren kasvun tyrehtymiseen 1000 kPa:in paineessa viimeisimpien tutkimusten perusteella. Koe tehtiin lasikuulia sisältävässä kasvualustassa, ja ehkä kuulien sisäisen kitkan vaikutus pienensi todellista kriittistä rajaa juuren paksuuntumiselle.

TROUSE ja HUMBERT (1961) osoittivat sokeriruohon juurien liitistyvän mekaanisen vastuksen alaisina.

Vaikka BARLEY (1962) väitti juuren solukoon pienenevän mekaanisen vastuksen kasvaessa, niin myöhemmin tehtyjen tutkimusten perusteella ei solukoko pienene, vaan esimerkiksi puuvillan juuren solujen pituuskasvun estyessä niiden leveys kasvaa (ref. BALIGAR ym. 1975). Solun muoto muuttuu siten soikeaksi (PRIHAR ym. 1971, BALIGAR ym. 1975). Samalla tukisolukon osuus kasvaa juuressa (TACKETT ja PEARSON 1964, PRIHAR ym. 1971). Myös suurin osa epidermisoluista murtuu ja johtojänteet soikenevat (BALIGAR ym. 1975) sekä juurihuntu lyhenee (JUNIPER 1980). WILSON ym. (1977) tutkivat ohran juuren anatomiaa, ja totesivat, että juuren paksuneminen oli suuresti normaalia paksun kuoren seurausta. Juuren poikkileikkauksessa solujen lukumäärä ja uloimpien solujen säde kasvoivat, kun sisimmät kuoren solut pienenivät.

Mekaaninen vastus voi siis saada aikaan lyhyen, mutkaisen ja paksun juuren. Lisäksi merkkinä liian suuresta maan vastuksesta on juuriston runsas haaroittuminen (kuva 9). Primäärisen juuren pituuskasvun tyrehtyminen korvautuu runsaalla lyhentyneen juuren haaroittumisella (BROUWER 1966, DREW ja GOSS 1974, VOORHEES ym. 1975). Haarot ovat tällöin lähellä toisiaan, ja niiden pituus voi lisääntyä suuresti, mikäli maassa on sopivan kokoisia huokosia (RUSSELL ja GOSS 1974, GOSS 1977, DREW 1979). Sato ei siten välttämättä alene, jos juuren haaroilla on mahdollisuus kehittyä ja korvata estynyt pituuskasvu.

Myös juurikarvojen lukumäärä kasvaa vastuksen lisääntyessä (CALLOT ym. 1982). Tiiviissä maassa pitkiä juurikarvoja saattaa löytyä hyvin läheltä juuren kärkeä ja ne lisäävät juuren haarojen ohella absorboivaa pinta-alaa (RUSSELL 1977). CHAMPION ja BARLEY (1969) kuvasivat herneen juurikarvojen kykyä kasvaa tiiviissäkin savessa.



Kuva 9. Mekaanisen vastuksen aiheuttamaa normaalisti kehittyntä juuristoa (A) matalampi ja tiheämpi juuristo (B) (RUSSELL ja GOSS 1974).

3.4 Hormonien vaikutus juuren morfologisiin muutoksiin

GOSSin ja RUSSELLin (1980) mukaan useat havainnot kertovat hormonien vaikutuksesta mekaanisen vastuksen aiheuttamassa kasvun ehkäisyssä: Etyleeni ja auksiini saavat aikaan varren solukoissa samanlaista solujen lyhentymistä ja levenemistä kuin mitä juuren soluissa tapahtuu vastuksen vaikutuksesta (ref. LACHNO ym. 1982). Vastuksen laskettua juuri ei heti saavuta entistä, normaalia kasvuvauhtiaan, mikä selittyisi myös hormonien vaikutuksella. Lisäksi paine aiheuttaa juuren kasvuun ehkäisyä, jos se kohdistuu juuren huntuun, mutta paineen kohdistuessa hunnuttomaan meristeemiin kasvu jatkuu. GOSS ja RUSSELL (1980) otaksuivat, että huntu näin ollen saattaisi tuottaa hormoneja laajenemisvyöhykkeeseen.

LACHNO ym. (1982) tutkivat abskissihapon (ABA:n) ja indolyli-3-etikkahapon (IAA:n) pitoisuuksia mekaanisessa vastuksessa kasvaneissa juurissa. ABA inhiboi harvoja poikkeuksia lukuunottamatta kaikkien kasvinosien kasvua (HORGAN 1980). IAA on luonnon auksiini ja indusoi juurien muodostumista ja vaikuttaa välittömästi tai välillisesti kaikkien sivu- ja

jälkijuurien syntymiseen (ELLIOT 1980). Lisäksi IAA:n epäillään vaikuttavan soluseinän jäykkyyden säätelyssä (HESS 1975).

Tutkimuksissaan LACHNO ym. (1982) eivät todenneet ABA:n määrän lisääntymistä juuressa mekaanisen vastuksen vaikutuksesta. He pitivätkin hyvin epätodennäköisenä tämän hormonin osallistumista morfologisiin muutoksiin juuressa. ABA:n mahdollisesta vaikutuksesta on kuitenkin epäilyjä, vaikkei selvää osoitusta olekaan pystytty antamaan (KUNDU ja AUDUS 1974, RIVIER ja PILET 1981).

IAA:n määrä sen sijaan nousi yli kolminkertaiseksi LACHNON ym. (1982) kokeessa. Tutkimus oli sikäli puutteellinen, etteivät he tutkineet IAA:n määriä eri osissa juurta. FELDMAN (1980) kuitenkin osoitti, että IAA:n biosynteesi voi tapahtua eristetyissä maissin juurien kärjissä. Samoin juuren kasvun ehkäisy eksogeneettisten aukiinien vaikutuksesta on todistettu useissa tutkimuksissa (TORREY 1956, 1976, ÅBERG 1957). Siten nopea kasvun ehkäisy GOSSin ja RUSSELLin (1980) kokeessa voisi olla juuren hunnussa kiihtyneen IAA-synteesin tulosta. Kuitenkaan IAA:n liikkumista hunnusta juureen ei ole todistettu (JUNIPER 1980). IAA:n merkitys pituuskasvun estymisessä mekaanisen vastuksen vaikutuksesta ei ole siten vielä selvä. Sen sijaan LACHNON ym. (1982) mukaan juuren runsas haaroittuminen on melko varmasti IAA:n indusoima.

Etyleenin tiedetään vaikuttavan pituuskasvua estävästi ja haarautumista stimuloivasti (CROSSETT ja CAMPBELL 1975). Juuren haarojen pituuskasvu estyy samoin kuin pääjuurien. Etyleeniä esiintyy maassa anaerobisissa olosuhteissa (SMITH ja RESTALL 1971), mutta myös mekaaninen vastus voi aiheuttaa endogeenisen etyleenin muodostumisen juuriin (KAYS ym. 1974). LACHNON ym. (1982) mukaan on vielä epäselvää, tuottaako juuri mekaanisen vastuksen alaisena suoraan etyleeniä, vai aiheuttaako IAA etyleenin muodostumisen.

WILKINS ym. (1976) tutkivat 3,5-diiido-4-hydroksibentsonihapon (DIHB:n) vaikutusta tiiviin maan juurien kasvuun. Hei-

dän mukaansa DIHB ehkäisisi juurien kasvun heikkenemistä, koska kemikaali vähentää etyleenin aikaansaamaa kasvun heikkenemistä (LARQUE-SAAVEDRA ym. 1975). Myös SAINI (1979) tutki DIHB:n ja gibberelliinihapon (GA_3 :n) vaikutuksia. Hän totesi näiden aineiden edistävän juurien kasvua tiiviissä maassa. Hänen mukaansa tiivistyneessä maassa hapen puute saattaa aiheuttaa gibberelliinin endogeenisen muodostumisen ehkäisyä, ja siksi eksogeeninen lisäys parantaisi kasvua.

Myös sytokiniinien merkitystä juuren morfologisissa muutoksissa on yritetty selvittää. GOODWIN ja MORRIS (1979) sekä WIGHTMAN ym. (1980) totesivat, että erilaiset eksogeeniset sytokiniinit inhiboivat haarautumista. Siten myös nämä kasvu-hormonit saattavat vaikuttaa juuren morfologiaan. Hormonien vaikutusmekanismit ovat kuitenkin monimutkaisia, ja lisää tutkimuksia kaivattaisiin hormonien merkityksestä tiivistyneen maan juuriston morfologiaan.

4 Mekaanisen vastuksen vaikutus orastumiseen ja sadonmuodostukseen

4.1 Vaikutus orastumiseen

Mekaaninen vastus voi kuorettuneessa maassa häiritä kehittyviä sirkkataimia niin, etteivät ne pääse valoon yhteyttämään ennen vararavinnon loppumista. Sirkkataimien on myös vaikea työntyä kovia ja suuria kokkareita sisältävän maakerroksen läpi. Tosin kaksisirkkaiset taimet, joilla on apikaalinen kasvupiste, pystyvät kasvamaan fototrooppisesti ja mutkitellen löytämään reitin maanpinnan läpi. Sen sijaan heinäkasvien koleoptiili lakkaa kasvamasta kohdatessaan hajasäteitä ja kehittyvä oras ei pysty ohjaamaan kärkiään kohti valoa kasvupisteen sijaitessa tyvässä. Viljakasvien orastuminen on siten vaikeampaa karkeassa kylvöalustassa kuin esimerkiksi rapsin (HEINONEN 1982).

Orastumiseen vaikuttaa myös juurien kehitys. Vaikka juuri pystyisikin läpäisemään kostean ja tiiviin kerroksen sekä käyttämään maan ravinne- ja kosteusvarastoja, tiivistymän kuivuminen voi TAYLORin (1976) mukaan aiheuttaa vaikeuksia. Maan kuivuessa tiivistymässä elävä juuri ei voi kehittyä normaalin paksuiseksi eikä siten kuljettaa tehokkaasti vettä kehittyvälle oraalle, mikä saattaa aiheuttaa oraan kuoleman.

GOSS (1977) tutki samalla menetelmällä sekä ohran juuren että kehittyvän oraan reagointia mekaaniseen vastukseen. Koleoptiilin ja ensimmäisen lehden pituuskasvu laski juuren tavoin eri paineissa. Ohran ensimmäisen lehden kasvu laski noin viidenneksen normaalista, kun painetta oli 50 kPa. Koleoptiilin kasvun ehkäisy ei vaikuttanut samanaikaisesti mekaanisessa vastuksessa kehittyvään juureen. Kasvualustana oli lasikuulia, joiden sisäinen kitka lienee vaikuttanut tuloksiin suurentamalla todellisia koleoptiilin kohtaamia mekaanisia vastuksia, jolloin mitatut kriittiset rajat olivat todellista pienempiä. Painetta ei mitattu penetrometrillä, vaan tietty mekaaninen vastus saatiin aikaan lisäämällä paine systeemin ulkopuolelta.

Myös STIBBE ja TERPSTRA (1981) tutkivat orastumista laboratorio-olosuhteissa. He kasvattivat rehumaisia hiekassa, jonka vastuksen he mittasivat penetrometrillä. Kun hiekan vastusta lisättiin, orastuminen hidastui. Yli 1000 kPa vaikutti merkittävästi orastumiseen. Koska GOSSin (1977) mukaan orastuminen kärsii juuren tavoin mekaanista vastusta lisättäessä, ja 1000 kPa on todettu kriittiseksi rajaksi juuren pituuskasvulle, STIBBE:n ja TERPSTRAN (1981) tulos orastumisen merkittävästä heikkenemisestä 1000 kPa:in paineessa tuntuu olevan oikeaa suuruusluokkaa. Tutkittuaan pelto-olosuhteissa orastumista STIBBE ym. (1980) totesivat 1300-1500 kPa penetrometrillä mitattuna vaikuttavan selvästi rehumaisiin orastumista heikentävästi. Pelto-olosuhteissa maan struktuuri on saattanut vaikuttaa penetrometrilukemia kohottavasti, sillä penetrometri on voinut antaa todellista mekaanista vastusta suurempia arvoja pystymättä jäljittämään huokosia ja halkeamia, joissa orailla oli ehkä mahdollisuus

kehittyä.

Tiivistymien ollessa syvemmällä kuin kylvösyvydessä, orastuminen ei välttämättä kärsi, mikäli juuristolla on mahdollisuus korvata tyrehtynyttä kasvua tiivistymän ulottumattomissa (RUSSELL ja SHONE 1972, DREW ja GOSS 1974). Vaikka juuristo pystyisikin runsaammalla haaroittumisella saavuttamaan tarpeeksi absorboivaa pintaa, niin edellytyksenä oraiden normaalille kehitykselle on kuitenkin veden- ja ravinnetarpeen tyydyttäminen. Maan ollessa liian kovaa juuri ei ehkä voi kiinnittää kehittyvää kasvia tarpeeksi lujasti maahan, jolloin kasvi voi kaatua (GILL 1961).

4.2 Vaikutus sadonmuodostukseen

Mekaanisen vastuksen haitallisia vaikutuksia juurien kehitykseen ja orastumiseen voidaan tutkia vakioiduissa olosuhteissa laboratoriossa. Satokokeet tehdään kuitenkin yleensä pellolla, jossa olosuhteita ei voida vakioida. Mekaanisen vastuksen haitallisia vaikutuksia sadonmuodostukseen ei ole siten yksinkertaista osoittaa.

Mittauksia joudutaan tekemään penetrometreillä, jotka eivät kykene täsmällisesti seuraamaan kulkureittejä halkeamissa ja kanavissa. Lisäksi sadonmuodostus ei välttämättä kärsi, vaikka juuriston kasvu osittain estyy. Mikäli kasvi kuitenkin saa riittävästi vettä ja ravinteita itämisestä fysiologiseen kypsytyteen asti, mekaaninen vastus ei vaikuta satoon (BOWEN 1981).

TROUSE ja HUMBERT (1961) epäilivät, että mekaaninen vastus vahingoittaa juuria niin, että niiden kyky kuljettaa vettä, ravinteita ja ilmaa kärsii. BARLEY ym. (1965) arveli, että juuren kehittyessä paineen alaisena vastuksella olisi vain pieni vaikutus ravinteiden kuljetukseen. GOSS (1977) osoitti kuitenkin radioaktiivisten merkkiaineiden avulla, ettei ra-

vinteiden otto kärsi mekaanisen vastuksen rajoittamassa juuristossa. Koekasvina hänellä oli ohra, jonka juuren pituuskasvu on herkin mekaaniselle vastukselle aiemmin tutkituista viljakasveista (RUSSELL ja GOSS 1974). Hän totesi, että hyvinkin pieni mekaanisen vastuksen ehkäisemä juuristo voi olla riittävä, jos ravinteita ja vettä on tarpeeksi juuriston käytettävissä.

Suotuisissa olosuhteissa kasvava juuriston osa pystyy normaalia tiheämmällä kasvulla korvaamaan rajoittunutta kasvua muualla juuristossa (RUSSELL ja SHONE 1972, CROSSETT ym. 1975, GOSS 1977, RUSSELL 1977). Lisäksi hyvissä olosuhteissa kasvi tuottaa tarpeettomankin suuren juuriston, joka toimii ikään kuin varmuusvarastona (DREW ja GOSS 1973).

Satotason lasku ei siis ole ehdoton seuraus, vaikka juuriston kasvu kärsisikin mekaanisesta vastuksesta. Mekaanisen vastuksen aiheuttama tiheä, mutta matala juuristo ei kuitenkaan voi hyödyntää kasvinravinteita ja maan kosteutta siten kuin laaja ja syvä juuristo. VOORHEES (1976) totesikin, että tiivistymät saattavat estää huonosti liikkuvien fosfori- ja kaliumlannoitteiden hyväksikäyttöä, ja siten laskea satoa. Myös vesi saattaa tulla kasvua rajoittavaksi tekijäksi (HURD 1968, LOWRY ym. 1970, TAYLOR 1976). Lisäksi juurien kontaktipinta maahan voi olla liian vähäinen, koska juuret eivät voi kasvaa tiiviiden maapintojen läpi. Tällöin kasvi ei voi hyödyntää tarpeeksi maan ravinteita ja kosteutta (TAYLOR 1981).

Tutkimusvaikeuksista huolimatta monet tutkijat osoittivat, että sato laskee maan vastuksen kasvaessa. PHILLIPS ja KIRKHAM (1962) totesivat, että maan fysikaalisista tekijöistä mekaaninen vastus oli suurin syy ohrasadon alentumiseen maata tiivistettäessä. TAYLOR ym. (1964) osoittivat, että puuvillan ja durran sato laski 50 %, kun penetrometrillä mitattu vastus nousi 2500 kPa:iin. Vastuksen yhä noustessa sato ei enää laskenut enempää. LOWRY ym. (1970) totesivat, että puuvillan lopullinen korkeus ja sato laskivat, kun maan mekaaninen vastus nousi. He arvelivat, että rajoittunut juuristo kärsi kuivuudesta, mikä oli pääsyy sadonalennukseen.

TAYLORin ym. (1972) mukaan pitkäaikaiset kokeet osoittivat, että vastuksen kasvaessa tiivistymän läpäisseiden juurien osuus laskee, ja seurauksena on usein maanpäällisten osien heikompi kasvu ja sadonalennus. STIBBE ja TERPSTRA (1981) totesivat rehumaisiin sadon ja korkeuden laskevan lineaarisesti vastuksen kasvaessa 500 kPa:ista 1500 kPa:iin. Penetro-metrien antamia lukuja on kuitenkin vaikea verrata niiden erilaisen koon, kitkatekijöiden ja mittaustavan vuoksi (luku 1.2).

AGRAWALin (1976) mukaan tiivistyneet kerrokset laskivat satoa viivästyttämällä kasvun alkuvaiheita ja siten myöhästyttäen kasvua. Toisaalta maan kuivuessa matala juuristo ei saa riittävästi vettä, ja sato voi kuivua ennen kypsymistä ja tuleentua siten ennen aikojaan (POHJANHEIMO ja HEINONEN 1960). Märissä olosuhteissa hapenpuute ja ylimääräinen hiilidioksidi taas lamaannuttavat juuriston toiminnan, ja ääritapauksissa maan tiiviys saattaa aiheuttaa jopa lehtien kellastumisen (ELONEN 1974).

Tiiviissä maassa mekaaninen vastus on siten yhteydessä muihin kasvutekijöihin, vesitalouteen ja maan ilmaan. Lisäksi mekaanisen vastuksen haitat kasvuston kehittymiselle riippuvat kasvin juuristosta. AGRAWALin (1976) mukaan viljakasvit eivät ole niin herkkiä mekaaniselle vastukselle kuin paksun pääjuuren omaavat kasvit. Tämä johtunee siitä, että viljakasveilla on useita ohuita juuria, jotka voivat onnistua läpäisemään suhteellisen pieniä maan halkeamia.

III KOKEELLINEN OSA

1 Aineisto ja menetelmät

1.1 Koekenttä

Yksivuotinen kenttäkoe perustettiin keväällä 1985 Maatalouden tutkimuskeskuksen maanviljelyskemian ja -fysiikan osaston toimesta. Koekenttä oli pinta-alaltaan 0,3 ha ja sijaitti Jokioisissa Ojaisten peltolohkolla.

Koekentän kivennäisaineksen lajitekoostumus ja orgaanisen hiilen määrityksiä varten otettiin Viljavuuspalvelun käyttämällä Oiva-kairalla 12 maanäytettä multakerroksesta ja jankosta. Yhteensä 24 maanäytettä analysoitiin Maatalouden tutkimuskeskuksen maantutkimusosastolla. Kivennäisaineksen lajitekoostumus määritettiin ELOSEN (1971) pipettimenetelmällä ja orgaaninen hiili SIPPOLAN (1982) kuvaamalla kuivapoltolla. Tulokset on esitetty taulukossa 1. Multakerros oli JUUSELAN ja WÄREN (1956) maalajikolmion mukaan hiuesavea (HeS) ja jankko aitosavea lähentelevää hiesusavea (HsS). Multakerroksen orgaanisen aineksen pitoisuus oli 5,0 % käytettäessä orgaanisen hiilen pitoisuudelle kerrointa 1,724 (ALLISON 1969). Siten koekentän multakerros oli multavaa hiuesavea (ANON. 1986).

Taulukko 1. Koekentän kivennäisaineksen lajitekoostumus sekä orgaaninen hiili prosentteina 12 maanäytteen keskiarvoina.

	S	Hs	Ht	Hk	Org.
	<2	2-20	20-200	200-2000 μm	C
MULTAKERROS 0-25 cm	45	31	18	5	2,9
JANKKO 25-40 cm	54	29	15	3	0,9

Keväällä pitkään kestäneen roudan vaikutuksesta kevätsateet eivät läpäisseet maata ja liettivät siten koekentän kynnostä. Kenttä kuivahti roudan sulattua erittäin nopeasti, ja maasta kehittyi erittäin kantava ja vaikeasti muokkautuva. Kevään olosuhteet eivät siten olleet parhaat mahdolliset koekentälle, jolle oli tarkoitus tehdä tiivistyskäsittelyitä ja tutkia maan mekaanista vastusta.

1.2 Koejärjestelyt

Kenttäkoe perustettiin osaruutukokeeksi, jossa pääruutua edusti kasvi ja osaruutua tiivistyskäsittely. Tarkoituksena oli saada osaruutuihin erilaiset mekaanisen vastuksen tasot, joiden vaikutusta eri kasveihin tutkittiin sekä juuritutkimuksin että satotuloksien. Juuritutkimusten yhteydessä mitattiin juurta ympäröivä maan mekaaninen vastus sekä määritettiin maan vesipitoisuus ja tilavuuspaino. Samalla havainnointiin juuren kasvusuuntaa ja morfologiset poikkeavuudet.

Koekenttä muodostui neljästä kerranteesta (kuva 10). Koekasveina olivat sokerijuurikas (A_1), kevätvehnä (A_2) ja rehumaissi (A_3). Sokerijuurikas ja maissi valittiin kokeeseen, koska niiden selvän pääjuuren kasvureittiä oli mahdollista seurata juuritutkimuksissa. Samoin sokerijuurikkaan ja vehnän satotasot olivat keskeisiä tutkimuksen kohteita. Lisäksi vehnän avulla pyrittiin arvioimaan vastuksen vaikutusta orastumiseen. Tiivistyskäsittelyitä edustivat tiivistämätön (B_0), 1 ajokerran tiivistys (B_1), 2 ajokerran tiivistys (B_2) sekä 4 ajokerran tiivistys (B_4).

Osaruudun kokonaispituus oli 15 m ja leveys 3 m, eli pinta-ala oli 45 m². Maissi- ja sokerijuurikasruuduissa varattiin pituudesta 3 m juuritutkimuksiin ja siten satoruudun pituus oli 12 m ja pinta-ala 35 m². Osaruutuja oli yhteensä 48 ja pääruutuja 12 eli yhdessä kerranteessa vastaavasti 12 ja 3.

Juuritutkimuksia tehtiin A_1B_0 -, A_1B_4 -, A_3B_0 - ja A_3B_4 -

K E N T T Ä K A R T T A

		12	3	8	3	12				
I	A ₂	1	B ₀		B ₁	25	A ₃			
		2	B ₄		B ₂	26				
		3	B ₁		B ₀	27				
		4	B ₂		B ₄	28				
	A ₃	5	B ₄		B ₁	29	A ₁			III
		6	B ₀		B ₂	30				
		7	B ₁		B ₀	31				
		8	B ₂		B ₄	32				
	A ₁	9	B ₀		B ₂	33	A ₂			
		10	B ₄		B ₁	34				
		11	B ₂		B ₄	35				
		12	B ₁		B ₀	36				
II	A ₂	13	B ₄	B ₂	37	A ₃				
		14	B ₂	B ₁	38					
		15	B ₀	B ₄	39					
		16	B ₁	B ₀	40					
	A ₃	17	B ₀	B ₄	41	A ₁		IV		
		18	B ₄	B ₀	42					
		19	B ₂	B ₁	43					
		20	B ₁	B ₂	44					
A ₁	21	B ₂	B ₁	45	A ₂					
	22	B ₁	B ₀	46						
	23	B ₄	B ₂	47						
	24	B ₀	B ₄	48						

MEKAANINEN VASTUS KASVUTEKIJÄNÄ

Paikka: Ojaisten pelto, Jokioinen (savimaa)

A = kasvilaji

B = maan tiivistäminen

A₁ = sokerijuurikas

(traktorilla kynnöksellä)

A₂ = kevätvehnäB₀ = tiivistätönA₃ = maissiB₁ = 1 ajokertaaB₂ = 2 ajokertaaB₄ = 4 ajokertaaMittoja (m): koekenttä 38 x 78, koeruutu (brutto) 3 x 15

Kuva 10. Kokeen kenttäkartta.

ruuduista eli 16 osaruudusta. Satotulokset koottiin kaikista 48 osaruudusta.

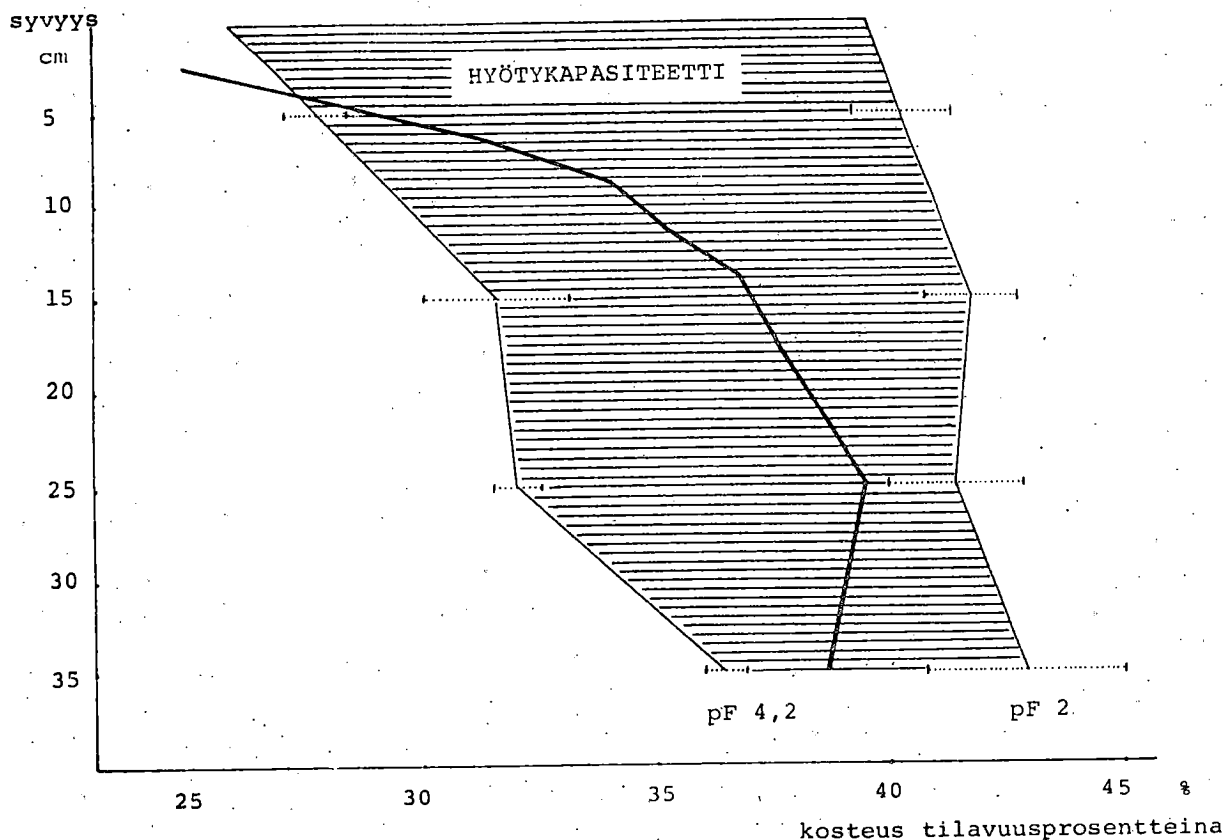
1.3 Kenttäkokeen perustaminen

Kenttäkoe perustettiin toukokuussa 1985. Kokeen paalutuksen jälkeen kynnös tasausäestettiin Potila-tasausäkeellä maan liiallisen kuivumisen estämiseksi. Ennen tiivistyskäsittelyä koekentän B₀-ruuduilta otettiin kosteusnäytteet 12 syvyydestä 0-20 cm:iin 2,5 cm:n välein ja 20-40 cm:iin 5 cm:n välein. Kosteusnäytteet otettiin HEINosen (1960) kuvaamalla kerrosnäytekairalla. Näytteet kuivattiin 105 °C:ssa. Maan pintaosissa kosteus oli lähellä lakastumisrajaa, ja syvemmillä muokauskerroksessa se läheni kenttäkapasiteettia (kuva 11). Kenttä oli ehtinyt siten kuivua melko paljon ennen tiivistyskäsittelyitä, mikä johtui epätavallisen kuivattavista olosuhteista kokeen perustamista edeltävinä päivinä.

Tiivistyskäsittelyt tehtiin Valmet 602 T-4 -traktorilla äestö- ja nostolaitteiden varassa päivää ennen kylvöä. Taka-akselikuoritus oli 3030 kg eli takarengasta kohti 1515 kg. Takarenkaan leveys oli 33 cm ja halkaisija 145 cm. Takarenkaan kontaktipinta-ala saatiin 1290 cm² Innsin ja Kilgourin (ref. SOANE ym. 1980) kaavan

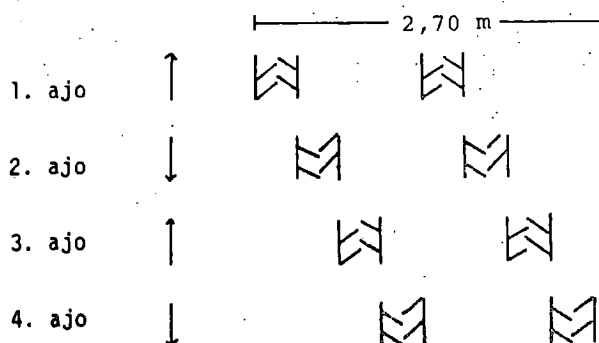
$$S = 0,87 b \times 0,31 c \quad (13.)$$

mukaan, jossa S on renkaan kontaktipinta-ala, b renkaan leveys ja c renkaan halkaisija. Kaava on kehitetty kovalle pinnalle. Koska maa oli jo ehtinyt kuivahtaa melko syvältä ennen tiivistyskäsittelyitä, ja renkaat painuivat erittäin vähän maahan käsittelyjen yhteydessä, voitaneen pintapainetta arvioitaessa käyttää avuksi kyseistä kaavaa. Takarenkaan pintapaine oli siten 120 kPa ja vastaavasti eturenkaan 60 kPa.



Kuva 11. Tiivistyspäivän kosteuskäyrä — 12 maanäytteen keskiarvona syvyyksittäin. Lakastumisraja (pF 4,2) 2 maanäytteen ja kenttäkapasiteetti (pF 2) 8 maanäytteen keskiarvona. Pisteiviivat kuvaavat pF-määritysten keskihajontaa.

Tiivistyskäsittelyssä B₁ traktorilla ajettiin neljästi koe-ruudun yli, jolloin osaruutu tuli kertaalleen tiivistetyksi takarenkaalla 2,70 m:n leveydeltä renkaiden välin ollessa sisäreunasta sisäreunaan 1,05 m (kuva 12).



Kuva 12. Piirros tiivistyskäsittelyn periaatteesta.

Osaruudussa B₂ edellä kuvattu käsittely tehtiin kahdesti. Toisella kerralla aloitettiin toisesta reunasta ja edettiin vastakkaiseen suuntaan. Osaruudut B₄ tiivistettiin neljään kertaan.

Tiivistyksen jälkeen koekenttä äestettiin neljästi S-piikkiäkeellä (Tume) kohtisuoraan koeruutuja vastaan paripyörin varustetulla traktorilla. Maa oli vaikeasti muokkautuvaa ja kylvöalusta jäi vielä karkeahkoksi. Koekenttä lannoitettiin äestyssyvyyteen niin ikään kohtisuoraan koeruutuja vastaan rivilannoittimella (Juko) traktorin ollessa paripyörin varustettuna. Lannoitteena käytettiin booripitoista Y-lannosta 2 (16-7-13, booria 0,12 %) 817 kg hehtaarille.

Kylvötyöt tehtiin heti lannoituksen jälkeen 18. toukokuuta. Sokerijuurikas kylvettiin 5-rivisellä sokerijuurikkaan kylvökoneella (Juko) Hilleshög'in Monohill-siemenellä. Sokerijuurikkaan riviväli oli 45 cm. Kevätvehnä oli Luja-lajiketta ja kylvettiin 2,5 m:n levyisellä kylvölannoittimella (Tume). Maissi kylvettiin käsin 20 cm:n välein rivivälin ollessa 50 cm. Rehumaisiin siemen riitti vain II- ja IV-kerranteille, ja I- ja III-kerranteet kylvettiin seuraavana aamuna sokerimaissilla, joka kuitenkin korjattiin rehuksi. Maissin siemenet toimitti mv. Brüninghaus Salosta. Kylvön jälkeen maissirivit tiivistettiin polkemalla kylvöalustan liiallisen karkeuden vuoksi.

1.4 Kasvukauden sääolot

Kevät 1985 oli normaalia viileämpi, mikä vaikutti kasvien taimettumiseen (luku 1.5). Samoin kesäkuun alkupuolen sademäärä oli melko pieni, mikä myös vaikeutti kasvun alkamista. Kesä- ja heinäkuu olivat normaalia viileämmät ja sademäärät normaalia pienemmät. Syyskuun keskilämpötila ja sademäärä olivat pienemmät kuin pitkän aikajakson keskiarvot. Kokonaisuutena kasvukausi oli tavallista viileämpi, mutta sa-

teisempi. Sateet keskittyivät kuitenkin toukokuun alkuun ja elokuulle (taulukko 2).

Taulukko 2. Kasvukauden keskilämpötilat ($^{\circ}\text{C}$) ja sademäärät (mm) kuukausittain Jokioisissa. Suluissa pitkäaikaiset keskiarvot vuosilta 1931-1960 (ANON. 1985).

	keskilämpötila		sademäärä	
TOUKOKUU	8,6	(8,8)	43	(39)
KESÄKUU	13,2	(13,7)	41	(42)
HEINÄKUU	15,3	(16,2)	55	(70)
ELOKUU	15,5	(14,7)	119	(74)
SYYSKUU	8,9	(9,7)	51	(61)
	\bar{x} 12,3	(12,6)	Σ 309	(286)

1.5 Viljelytoimenpiteet ja kasvustohavainnot

Kevätvehnä orastui 29. toukokuuta, sokerijuurikas taimettui 1. ja maissi 12. kesäkuuta. Varsinkin maissin myöhäinen taimettumisajankohta oli viilleän sään seurausta. Vehnä orastui tasaisesti, mutta sokerijuurikkaan ja maissin taimettuminen oli paikoin epätasaista. Syynä lienevät karkeaksi jäänyt kylvöalusta ja kosteuden puute taimettumisen alkuvaiheessa.

Kenttäkoetta hoidettiin käytäntöä vastaavasti. Sokerijuurikasrivit ruiskutettiin selluloosajohdannaisella Muru-Mikko-maankuoretumisenestoaineella ennen taimettumista. Sokerijuurikkaan tuholaisia torjuttiin yhteensä seitsemän kertaa

Roxionilla 0,8 l/ha (tehoaineena dimetooatti). Muilla kasveilla ei ollut tarvetta tuhoeläintorjuntatoimenpiteisiin.

Rikkakasveja torjuttiin ensimmäiseksi vehnystä Actril-S:llä 2,5 l/ha (tehoaineena ioksiniili). Sokerijuurikkaan rikkakasvit torjuttiin ensimmäisen kerran Betanalilla 3 l/ha (tehoaine fenmedifaami) ja toisen kerran Betanalin 3 l/ha ja Goltixin 3 kg/ha (tehoaineena metamitroni) seoksella. Sokerijuurikas kärsi selvästi jälkimmäisestä rikkakasviruiskutuksesta, sillä ruiskutusilma oli liian lämmin ja aurinkoinen. Maissin rikkakasvit torjuttiin mekaanisesti. Maissi harvennettiin käyttäen taimietäisyytenä 15 cm:ä, ja sokerijuurikas harvennettiin 25 cm:n taimietäisyyteen. Kasvitau-teja ei tarvinnut torjua.

Sokerijuurikkaan kasvusto oli heikko aina heinäkuun puoliväliin saakka juhannuksen jälkeen vallinneen kolmen viikon poutajakson vuoksi. Loppukesästä kasvusto näytti hyvältä. Kolmannessa kerranteessa kasvusto jäi kuitenkin epätasaiseksi, ja syynä lienevät salaojien kohdat, jotka näkyivät kasvustoissa tavallista selvemmin kesällä 1985.

Kevätvehnän kasvusto oli tasainen, eikä käsittelyjen välillä näkynyt eroja. Salaojien kohdat näkyivät kuitenkin myös vehnäkasvustossa, etenkin kolmannessa kerranteessa. Vehnä tuli tähkälle 12. heinäkuuta ja tuleentui tasaisesti. Tosin tähkät olivat eri tasoilla kasvustossa, mikä osoittanee myös vehnän kärsineen kuivuudesta.

Maissikasvusto oli hyvin matalaa aina heinäkuun lopulle asti. Lämpösumma oli ollut hyvin pieni maissille ja kuivuus viivästytti niin ikään kasvua. Lämpimän ja runsassateisen elokuun aikana maissi kasvoi nopeasti ja ehti kukkia ennen kasvukauden loppua. Tähkä jäi kuitenkin tuppeen. Myös maissi kasvoi huonosti kolmannessa kerranteessa.

1.6 Mittausmenetelmät

1.6.1 Oraslaskenta

Oraslaskenta suoritettiin 3. kesäkuuta vehnäkasvustosta. Yhden rivimetrin oraiden lukumäärä laskettiin neljästä eri kohdasta jokaisesta ruudusta. Ruudun neljästä tuloksesta laskettiin keskiarvo edustamaan ruudun oraiden lukumäärää yhdellä metrillä.

1.6.2 Kartiokärkinen penetrometri

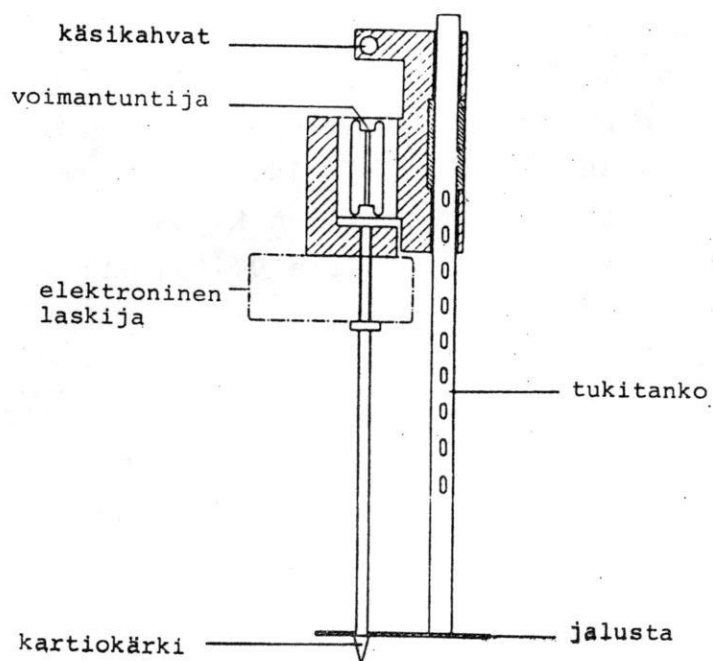
Tiivistyskäsittelyn vaikutusta maan mekaaniseen vastukseen tutkittiin Sokerijuurikkaan tutkimuskeskuksesta lainatulla skotlantilaisella kartiokärkisellä penetrometrillä (ANDERSON ym. 1980). Mittaukset tehtiin 5.-6. kesäkuuta.

Laite oli metrin korkuinen, ja sillä voi mitata mekaanista vastusta 52,5 cm:n syvyyteen asti painamalla käsikahvojen avulla penetrometrin kärkeä yhä syvemmälle maahan tukitangon ja jalustan varassa (kuvat 13 ja 14). Laite rekisteröi vastuksen 3,5 cm:n välein ja tulosti sen kilogrammoina, joka voitiin muuttaa baareiksi kertoimella 0,762, kun kartion halkaisija oli 12,9 mm (ANON. 1979).

Koska maan tiiviystila ei ollut tasainen, hajonta oli suuri ja jokaiseen ruutuun tehtiin kahdeksan pistoa. Kahdeksan luvun mediaani valittiin edustamaan ruudun mekaanista vastusta tietyssä syvyydessä.



Kuva 13. Kartiokärkinen penetrometri mittausvaiheessa.



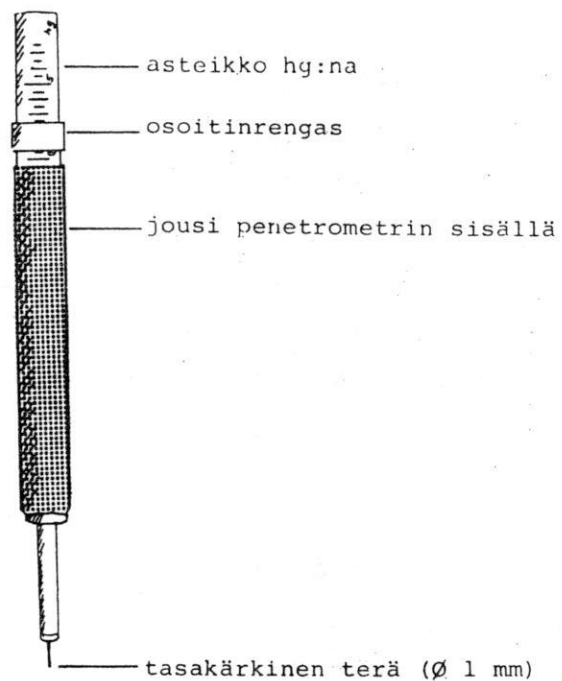
Kuva 14. Piirros kartiokärkisestä penetrometrinä (ANDERSON ym. 1980).

1.6.3 Tasakärkinen taskupenetrometri

Juuritutkimuksissa maan mekaaninen vastus mitattiin ranskalaisilla 14,5 cm pitkällä tasakärkisillä penetrometreillä (kuvat 15 ja 16). Penetrometryyppi oli kehitetty hedelmien laadunmittauksia varten, mutta sitä käytettiin myös maaperätutkimuksissa mm. Ranskassa Avignonin maatalouden tutkimuskeskuksessa maaperätieteen osastolla. Penetrometriä myi M. Cosse: 41 Boulevard de la Vilette, 75010 Paris.

Mittaus tehtiin painamalla penetrometrin kärki maahan, jolloin osoitinrenkas nousi jousen avulla. Penetrometrit antoivat tulokset grammoina, eikä valmistajalla ollut kerrointa lukeman muuttamiseksi paineen yksiköksi. Kokeessa käytettiin kolmea tasakärkistä penetrometrimallia, joista M2 antoi lukemia 750 g:aan, malli M1.1 1000 g:aan ja malli M1.2 2000 g:aan asti. Kuvassa 15 on esitetty malli M2. Muut mallit olivat samankokoisia, ainoastaan jousi oli vahvempi ja mittasi siten suurempia mekaanisia vastuksia kuin malli M2.

Tasakärkinen penetrometri oli tutkimusmenetelmänä puutteellinen mm. siksi, ettei mittauslukemaa voitu muuttaa luotettavasti grammasta paineen yksiköksi. Tasakärkisellä penetrometrillä oli suuri reunavaikutus varsinkin tiiviissä savimaassa, jolle kartiokärkinen taskupenetrometri olisi soveltunut paremmin. Koska reunavaikutus riippuu penetrometrikärjen koosta, muodosta, maan kosteudesta, maalajista sekä mekaanisesta vastuksesta (WHITELEY ja DEXTER 1981 a), efektiivisen halkaisijan määrittäminen tasakärkiselle penetrometrille oli vaikeaa. Siten tutkimuksessa päädyttiin käyttämään grammoja, kun kuvattiin maan mekaanista vastusta juurien kasvuypäristössä.



Kuva 15. Piirros M2-tyyppisestä tasakärkisestä taskupenetrometristä, pituus 14,5 cm.



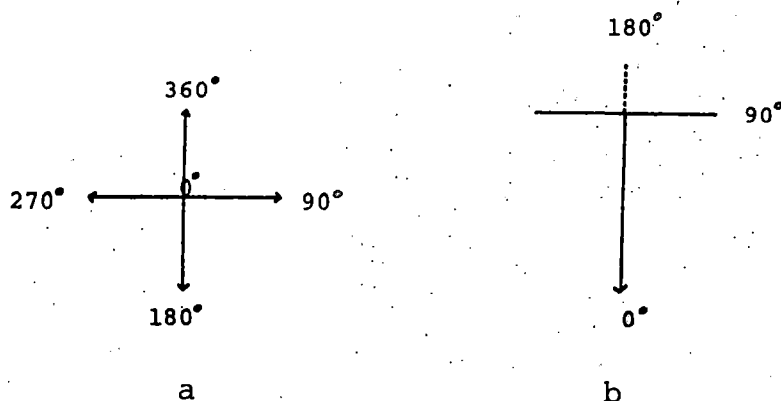
Kuva 16. Tasakärkinen M2-tyyppinen taskupenetrometri mittausvaiheessa sokerijuurikkaan juuritutkimuksessa.

1.6.4 Juuritutkimukset

Juuritutkimuksia tehtiin yhteensä 104, eli 52 sokerijuurikkaasta ja 52 maissista seitsemän viikon aikana (5.6.-17.7.). Joka viikko kaivettiin A_1B_0 -, A_1B_4 -, A_3B_0 - ja A_3B_4 -ruuduista yhteensä 16 juurta, eli 8 juurta kummastakin kasvustosta tiivistämättömistä ja eniten tiivistetyistä ruuduista. Viimeisellä havaintoviikolla juuria kaivettiin kuitenkin vain puolet tästä.

Kaivettavaksi kasviksi pyrittiin valitsemaan edustava kasviyksilö. Ruudun päästä edettiin sisemmälle ruutuun käyttäen ruudun jokaista riviä vuorotellen. Juuren kaivuu aloitettiin kuorimalla maata pois taimen ympäriltä (kuva 16). Siemenen syvyys maanpinnasta mitattiin, ja ensimmäinen penetrometrimittaus tehtiin tasakärkisellä penetrometrillä. Pintamaa oli yleensä kuohkeaa, joten malli M2 riitti mittaamaan mekaanisen vastuksen. Tämän jälkeen pääjuurta seurattiin penetrometrimittauksin, ja juuren kasvusuunta arvioitiin asteina. Tarvittaessa käytettiin myös penetrometrimalleja M1.1 ja M1.2.

Paperille merkittiin maanpinnasta mitatun tietyn syvyyden penetrometrilukema, juuren suunta vaakatasossa (a) asteina sekä juuren poikkeama pystysuunnasta (b) asteina (kuva 17).



Kuva 17. Juuren kasvusuuntaa ilmaisevat asteet: a kuvaa juuren suuntaa vaakatasossa ja b poikkeamaa pystysuunnasta.

Kasvusuuntaa kuvasi merkintä a/b. Merkintä 0/0 tarkoitti suoraan alaspäin kasvavaa juurta, sillä tällöin sekä a että b saivat arvon 0. Merkintä 90/90 tarkoitti kaivajasta oikealle vaakatasossa kasvanutta juurta ja merkintä 270/90 kaivajasta vasemmalle kasvanutta juurta. Asteet pyrittiin merkitsemään kymmenen asteen tarkkuudella, ja suuntia arvioitaessa käytettiin tarvittaessa apuna astelevyä. Juuren kulureitti piirrettiin millimetripaperille maanpinnasta mitattujen syvyyksien (cm) ja kasvusuuntien perusteella.

Kussakin syvyydessä tehtiin useampia penetrometripistoja, joiden keskimääräinen arvo kirjattiin. Maan heterogeenisuus: halkeamat, lieronreiät, oljet ja kivet aiheuttivat usein suuria tulkintavaikeuksia. Mittauksia tehtiin periaatteessa 1 cm:n välein, mutta jos juuri oli kasvanut poikkeavasti, mutkitellut tai paksuuntunut, niin mittauksia tehtiin tiheämmin. Viimeinen penetrometrimittaus tehtiin juuren kärjen kohdalta. Piirroksiin merkittiin myös selvät juuren paksuuden muutokset sekä juuren epätavalliset haaroittumisvyöhykkeet. Kun kokonainen juuri oli saatu irti maasta, niin mahdollisimman läheltä kuoppaa otettiin kahdesta kohtaa kerrosmaanäyttekairalla (HEINONEN 1960) maan kosteus- ja tilavuuspainomäärityksiä varten näytteet 2,5 cm:n välein juuren saavuttamaan syvyyteen asti. Kaikissa tapauksissa näytteet otettiin vähintään 20 cm:n syvyyteen asti. Maanäyttekairalla saatiin siten tietystä syvyydestä kaksi 50 cm³:n maaliieriötä, jotka punnittiin yhdessä ja kuivattiin yön yli 105 °C:ssa. Tilavuuspaino saatiin lasketuksi suoraan 100 cm³:n näytteen kuivapainosta.

Jokainen kaivettu juuri pestiin ja liimattiin imupaperille kasvuasentoonsa piirroksen perusteella. Samalla tarkistettiin vielä morfologiset poikkeavuudet. Juurien annettiin kuivua painon alla.

1.6.5 Sadonkorjuu

Vehnä puitiin 6. syyskuuta 2,25 m:n levyisellä koeruutupuumurilla (Sampo-Rosenlew). Puintipinta-ala oli 33,75 m² ruudun pituuden ollessa 15 cm. Ruudun sadon punnituksen jälkeen otettiin puintikosteuden määrittystä varten 40 g:n näyte. Kuiva-ainepitoisuuden avulla laskettiin puintikosteus prosentteina tuoreesta viljasta. Vehnän satotulokset laskettiin hehtaaria kohden kosteuden ollessa 15 %. Koska kolmas kerranne kasvoi niin huonosti (luku 1.5), sen satotuloksia ei otettu mukaan tilastolliseen käsittelyyn.

Maissi korjattiin 12 m:n pituudelta 1,5 m:n levyisellä nurmenkorjuukoneella (Haldrup) 17. syyskuuta. Maissista korjattiin kolme keskimmäistä riviä. Koska maissin riviväli oli 50 cm, ja kolme riviä oli siten käyttänyt keskimäärin 1,5 m ruudun leveydestä, satoruudun leveydeksi laskettiin koneen leveys. Satoruudun pinta-ala oli siten 18 m². Jokaisesta ruudusta otettiin kuiva-ainemäärittystä varten yhden maissiyksilön näyte, joka kuivattiin 60 °C:ssa. Satotulokset laskettiin hehtaaria kohti kuiva-ainesatona. Kolmas kerranne hylättiin samoin perustein kuin vehnä.

Sokerijuurikas nostettiin käsin 7. lokakuuta. Ennen nostoa laskettiin yli 50 cm:n pituisten aukkojen 50 cm:n ylittävien osien summa jokaisen ruudun korjattavasta 24 rivimetristä. Summa vähennettiin 24 m:stä, ja erotusta käytettiin hehtaarisadon laskemiseen. Rivivälin ollessa 45 cm hehtaarisadon oli siten 22200 rivimetriä. Juurikkaat pestiin ja punnittiin Salon sokeritehtaalla, jossa tehtiin myös laatuanalyysi. Myös sokerijuurikkaan kolmas kerranne hylättiin.

1.6.6 Huokosjakauman määrittäminen

Maan hyötykapasiteetin ja huokosjakauman määrittämistä varten otettiin syksyllä 1.10. sokerijuurikkaan ja maissin B₀- ja B₄-ruuduista

maanäytteet 200 cm³:n lieriöihin. Näytteitä otettiin 40 cm:n syvyyteen asti 10 cm:n välein. Lieriön korkeus oli 5 cm, ja maanäytteet pyrittiin ottamaan 10 cm:n maakerroksen keskel-
tä.

Lieriönäytteiden annettiin kostua märällä alustalla kaksi viikkoa, minkä jälkeen ne siirrettiin hiekka-alustalle si-
ten, että lieriön keskikohta oli 2,5 cm korkeamana vapaa-
ta vedenpintaa, ja imu oli siten 0,25 kPa. Kosteuden tasaan-
nuttua näytteet punnittiin ja siirrettiin 10 cm:n korkeudel-
le 1 kPa:in imuun. Kalifornialaisen Soilmoisture Equipment
-yhtiön valmistamissa painekattiloissa määritettiin pF-pis-
teet -10 kPa, -100 kPa ja -1500 kPa. Lakastumisraja määri-
tettiin leikkaamalla lieriöistä 1 cm:n viipale, minkä an-
nettiin tasapainottua kattilassa. Lakastumisraja määritettiin
vain I-kerranteen B₀- ja B₄-ruuduista. Näytteet kuivat-
ttiin 105 °C:ssa. Maanäytteiden tiheys määritettiin pykno-
metrimenetelmällä (BLAKE 1965). Mittaustulosten perusteella
laskettiin maan hyötykapasiteetti (kuva 11) sekä huokosjakau-
man eroja tiivistyskäsittelyjen välillä. Ekvivalenttinen
huokoskoko tietyssä vesipotentiaalissa laskettiin kapillaari-
voimaan perustuvasta yhtälöstä

$$d = 0,3 / h , \quad (14.)$$

jossa d on kapillaariputken läpimitta eli ekvivalenttinen
huokoskoko (cm) ja h vesipotentiaalın itseisarvo vesipatsaan
korkeutena (cm).

1.7 Aineiston tilastollinen käsittely

Tiivistyskäsittelyjen vaikutusta maan mekaaniseen vastukseen
tutkittiin lohkoittain satunnaistetun mallin varianssianalyy-
sillä. Pienimmät merkitsevät erot laskettiin Tukeyn testillä
95 %:n riskitasolla, ja vain merkitsevät erot Tukeyn arvoi-
neen ilmoitettiin. Laskut suoritettiin SHARP EL-512 -tasku-
laskimella.

Tiivistyskäsittelyjen vaikutusta maan huokosjakaumaan tutkittiin eri syvyyksissä niin ikään lohkoittain satunnaistetun mallin varianssianalyysillä taskulaskimella laskien. Vesipitoisuuksien varianssianalyysi laskettiin Maatalouden tutkimuskeskuksen VAX 11/780 -tietokoneen SPSS^x-ohjelmistolla (ANON. 1983).

Tiivistyskäsittelyjen vaikutusta juuritutkimusten yhteydessä mitattuihin maan fysikaalisiin ominaisuuksiin eri syvyyksissä tutkittiin myös lohkoittain satunnaistetun mallin varianssianalyysillä. Mittaussyvyudet luokiteltiin 5 cm:n kerrosten luokkiin, joissa käsittelyjen välisiä eroja testattiin. Syvemmissä kerroksissa kerranteiden lukumäärää jouduttiin karsimaan, sillä tutkitut juuret eivät olleet kasvaneet yhtä syvälle kerranteessa 2 kuin muissa kerranteissa. Mittaustulokset puuttuivat siten kerranteesta 2. Varianssianalyysit laskettiin tietokoneella ja Tukeyn arvot taskulaskimella. Vain merkitsevät erot Tukeyn arvoineen ilmoitettiin.

Tiivistyskäsittelyn vaikutusta juuren kasvatapaan tutkittiin tietokoneen avulla sekä osaruutukoemallein että satunnaisesti tultujen lohkojen mallilla. Osaruutukoemallin varianssianalyysillä selvitettiin yhdysvaikutuksia ja yksisuuntaisella varianssianalyysillä käsittelyn vaikutusta kasvatapaan erikseen sokerijuurikkaalla ja maissilla. Tukeyn arvot laskettiin taskukoneella ja ilmoitettiin vain merkitsevien erojen yhteydessä.

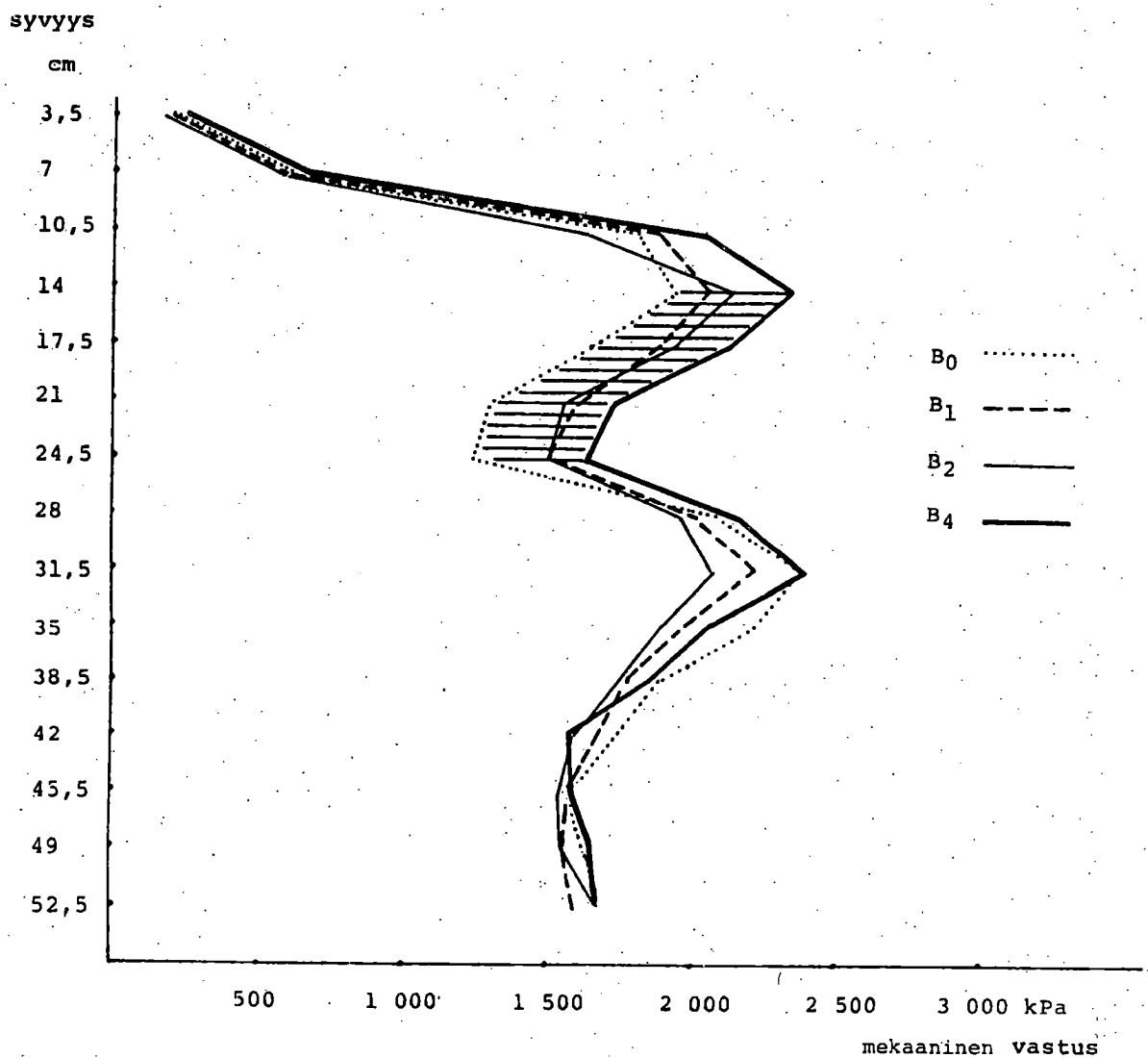
Mekaanisen vastuksen ja muiden maan fysikaalisten ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia sekä juuren kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välisiä riippuvuuksia tutkittiin regressioanalyysillä tietokoneen avulla. Korrelaatiokertoimien merkitsevyys merkittiin tähdillä, joiden lukumäärä kuvasi riskitasoa seuraavasti: * 5 %:n riskitaso, ** 1 %:n riskitaso, *** 0,1 %:n riskitaso.

Oraslaskennan ja satotulosten varianssianalyysit laskettiin taskulaskimella satunnaistettujen lohkojen mallilla. Satotulosten laskennassa varianssianalyysi suoritettiin kullekin pääruudulle erikseen, koska kasveilla oli luontaisesti niin suuret satoerot. Tukeyn arvot laskettiin ja ilmoitettiin kuten edellä.

2 Tulokset

2.1 Tiivistyskäsittelyjen vaikutus maan mekaaniseen vastukseen

Kuvassa 18 ja liitteessä 1 on esitetty mekaaniset vastukset kPa:eina eri tiivistyskäsittelyissä eri syvyyksissä. Tiivistyskäsittely vaikutti maan mekaanista vastusta kohottavasti 14-24,5 cm:n syvyydessä. Eri käsittelyjen merkitsevät erot tässä maakerroksessa on esitetty taulukossa 3.



Kuva 18. Mekaaninen vastus kartiokärkisellä penetrometrillä mitattuna 5.-6.6. eri tiivistyskäsittelyissä eri syvyyksissä, varjostettu alue kuvaa tiivistynyttä maakerrosta.

Taulukko 3. Tiivistyneen maakerroksen mekaanisen vastuksen (kPa) merkitsevät erot eri käsittelyjen välillä eri syvyyksissä.

Syvyys cm	Tykeyn arvo 95 %	B_0-B_1	B_0-B_2	B_0-B_4	B_1-B_4	B_2-B_4
10,5	360	-	-	-	-	400
14	260	-	-	390	280	-
17,5	250	-	290	470	-	-
21	260	290	-	420	-	-
24,5	240	240	260	390	-	-

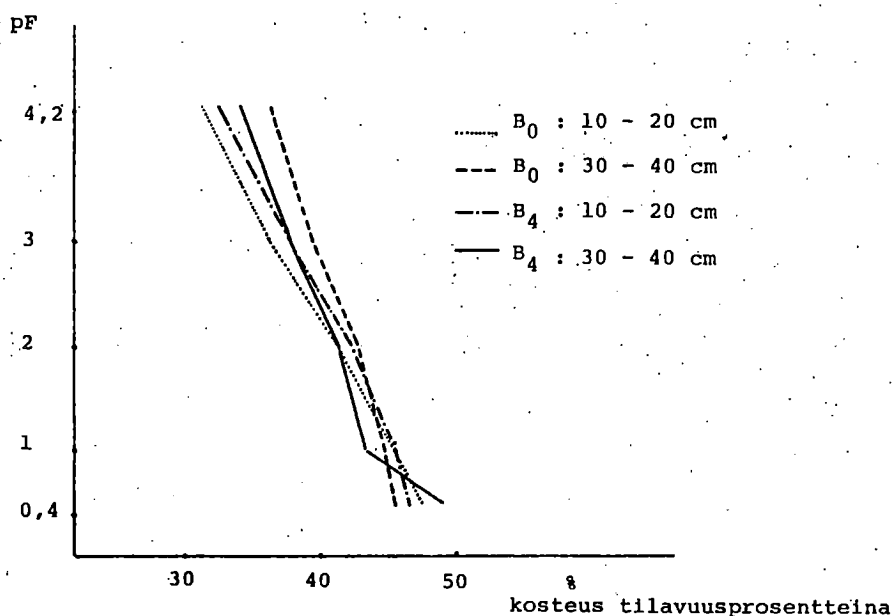
Käsittelyillä B_2 ja B_4 oli merkitsevä ero 10,5 cm:n syvyydessä. Selvä tiivistymä sijaitsi 14-24,5 cm:n syvyydessä, jossa B_0 - ja B_4 -käsittelyjen välillä oli selvästi merkitsevä ero. Käsittely B_1 tiivistä maata 21-24,5 cm:n syvyydessä ja käsittely B_2 hajanaisesti sekä 17,5 cm:ssä että 24,5 cm:ssä. Käsittelyjen B_1 ja B_4 välillä oli 14 cm:ssä merkitsevä ero. Käsittelyjen B_1 ja B_2 välillä ei ollut merkitseviä eroja.

2.2 Tiivistyskäsittelyn vaikutus maan huokosjakaumaan

Neljästi tiivistäminen ei vaikuttanut merkitsevästi huokosjakumaan. Suuria 30 μ m:n huokosia oli enemmän tiivistämättömässä maassa kuin tiivistetyssä hajonnan ollessa kuitenkin varsin suuri (taulukko 4). Kuvassa 19 on esitetty maan pF-käyrät multakerrosta ja jankkoa kuvaavissa kerroksissa, ja vastaava numeroaineisto on liitteessä 2. Vesipitoisuudet eivät poikenneet merkitsevästi missään syvyydessä B_0 - ja B_4 -käsittelyjen välillä.

Taulukko 4. Huokosten osuus maan tilavuudesta (%) B_0 - ja B_4 -ruuduissa kahdeksan näytteen keskiarvona ($\geq 30 \mu\text{m}$:n huokokset) ja kahden näytteen keskiarvona (löpimitaltaan $< 30 \mu\text{m}$:n huokokset) keskihajontoineen ($\bar{x} \pm s$).

Syvyys, cm	$\geq 30 \mu\text{m}$		0,2-30 μm		$\geq 0,2 \mu\text{m}$	
	B_0	B_4	B_0	B_4	B_0	B_4
0-10	16,3 \pm 4,0	15,1 \pm 5,3	10,3 \pm 0,2	11,5 \pm 0,2	27,7 \pm 1,3	28,6 \pm 1,6
10-20	11,9 \pm 4,1	8,8 \pm 4,5	10,8 \pm 2,8	9,5 \pm 1,7	31,6 \pm 3,2	32,7 \pm 2,2
20-30	7,9 \pm 3,0	6,9 \pm 2,9	5,8 \pm 3,3	10,1 \pm 1,5	32,1 \pm 0,9	30,9 \pm 5,1
30-40	7,0 \pm 3,6	6,0 \pm 1,6	7,0 \pm 0,1	6,2 \pm 1,7	36,5 \pm 0,8	34,0 \pm 2,7



Kuva 19. Tiivistyskäsittelyn vaikutusta huokosjakaumaan kuvaavat pF-käyrät 1.10. multakerroksessa (10-20 cm) ja jankossa (30-40 cm) B_0 - ja B_4 -ruuduissa.

2.3 Juuritutkimukset

2.3.1 Tiivistyskäsittelyn vaikutus juuren kasvatapaan

Taulukossa 5 on esitetty juuritutkimusten yhteydessä mitattujen juurien saavuttamat kasvusyvytydet B_0 - ja B_4 -käsittelyissä. Kasvusyvytydet on esitetty erikseen eri havaintoviikkoina, jotta taulukosta kävisi samalla selville juuren kasvuympäristöstä tehtyjen mittausten ajankohta eri syvyyksissä. Multakerroksen alaosista mittauksia voitiin tehdä vasta heinäkuussa, kun juuret olivat ehtineet kasvaa niin syväälle. Penetrometrimittauksiahan tehtiin tarkoin juurien saavuttamiin syvyysiksiin asti. Kosteus- ja tilavuuspainonäytteet otettiin kuitenkin aina vähintään 20 cm:n syvyyteen saakka.

Sokerijuurikas ylitti 25 cm:n syvyyden vasta heinäkuun puolivälissä. Maissin juuret sijaitsivat sen sijaan alle 25 cm:n syvyydessä vielä heinäkuun puolivälissä ja siten mittauksia ei tehty maissiruuduista yli 25 cm:n syvyydestä. Siten jankosta saatiin aineistoa vain sokerijuurikasruuduista.

Sokerijuurikkaan suurin mitattu syvyys oli 43 cm, joka mitattiin B_0 -ruuduissa. Pienin kasvusyvyys oli 5 cm sekä B_0 - että B_4 -ruuduissa kesäkuun alussa. Kaikkina havaintoviikkoina kaivettujen juurien keskimääräinen kasvusyvyys oli sekä B_0 - että B_4 -ruuduissa 15 cm 26 mittaustuloksen keskiarvona. Käsittelyjen välillä ei siis ollut eroa. Maissin suurin kasvusyvyys mitattiin B_4 -ruudusta, ja se oli 24 cm. Pienimmät kasvusyvytydet olivat 5 cm. Käsittelyssä B_0 maissin keskimääräinen kasvusyvyys kaikkina havaintoviikkoina kaivettujen juurien perusteella oli 10 cm 26 mittaustuloksen keskiarvona. Vastaava luku B_4 -käsittelyssä oli 11 cm. Ero ei ollut merkittävä.

Taulukko 5. Juurien saavuttamat syvyydet cm:inä eri havaintoviikkoina B_0 - ja B_4 -käsittelyissä neljän mittauksen keskiarvona keskihajontoineen ($\bar{x} \pm s$).

havaintoviikko	sokerijuurikas		maissi	
	B_0	B_4	B_0	B_4
1. 5.-7.6.	8 ± 3	8 ± 1	8 ± 2	7 ± 2
2. 10.-12.6.	10 ± 3	9 ± 3	10 ± 2	11 ± 1
3. 17.-18.6.	9 ± 1	11 ± 4	9 ± 2	10 ± 1
4. 24.-25.6.	12 ± 2	12 ± 1	9 ± 2	10 ± 1
5. 1.-3.7.	18 ± 3	18 ± 5	10 ± 4	13 ± 1
6. 8.-10.7.	24 ± 13	21 ± 3	12 ± 4	17 ± 5
7. 15.-17.7. (kahden mittauksen keskiarvot)	28 ± 16	34 ± 1	12 ± 6	12 ± 0

Sokerijuurikkaan suurin poikkeama pystysuorasta kasvusta oli 90° sekä B_0 - että B_4 -ruuduissa. Seitsemänä havaintoviikkona mitattujen kasvusuuntien keskiarvo oli B_0 -ruudussa 15° ($n = 379$) ja B_4 -ruudussa 20° ($n = 401$). Sokerijuurikkaan juuri nousi kohti vaakatasoa 5° käsittelyssä B_4 . Ero oli merkitsevä Tukeyn arvon ollessa 4° . Maissi kasvoi kummassakin käsittelyssä jopa ylöspäin suurimman poikkeaman pystysuorasta ollessa 170° . Seitsemänä havaintoviikkona mitattujen kasvusuuntien keskiarvo oli B_0 -ruudussa 67° ($n = 297$) ja B_4 -ruudussa 60° ($n = 384$). Maissin kasvusuunta siten laski 7° Tukeyn arvon ollessa 5° . Kasvukulma riippui merkitsevästi kasvusta, ja tiivistyksellä ja kasvulla oli yhteisvaikutusta.

2.3.2 Tiivistyskäsittelyn vaikutus juuren kasvuympäristöön

Taulukossa 6 on esitetty juuritutkimusten yhteydessä mitattujen maan fysikaalisten ominaisuuksien keskiarvot, keskihajon-

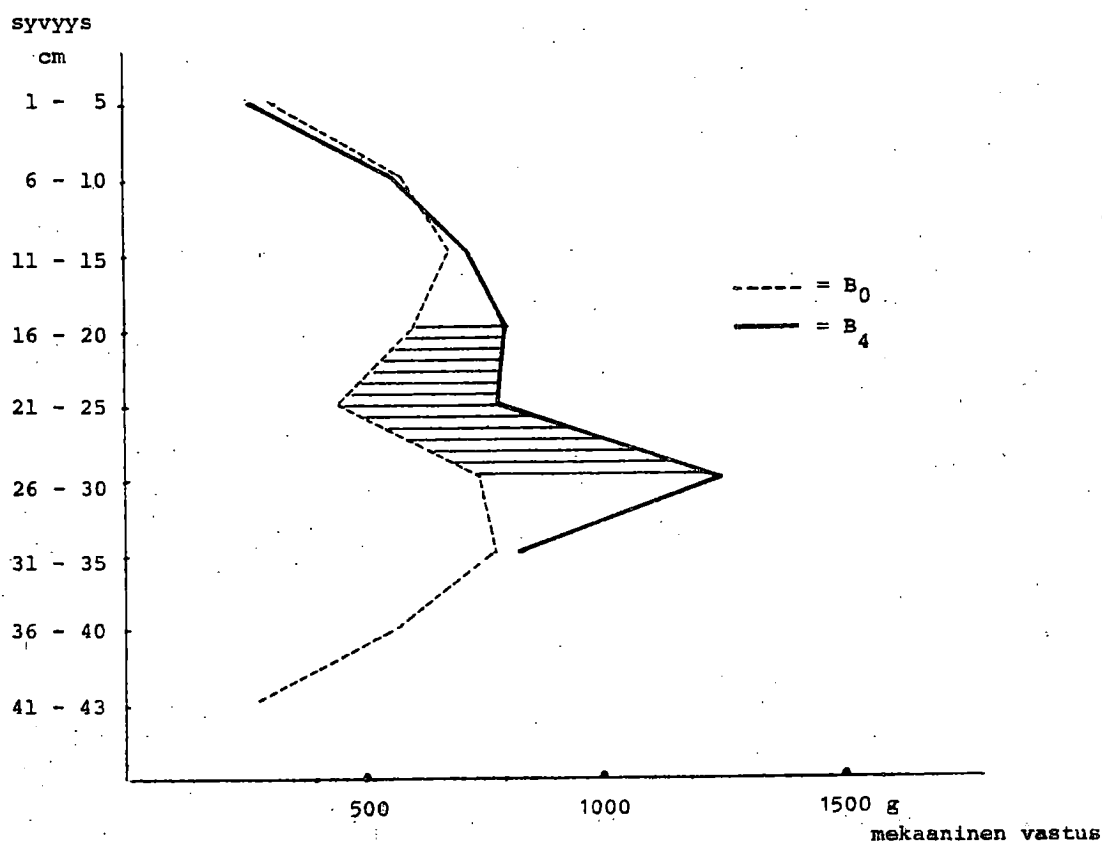
nat, pienimmät ja suurimmat arvot sekä mittausten lukumäärät B_0 - ja B_4 -ruuduissa. Mekaaniset vastukset on mitattu tasakärkiselällä penetrometrillä ja ilmoitettu siten grammoina.

Taulukko 6. Juuritutkimusten yhteydessä mitattujen maan fysikaalisten ominaisuuksien keskiarvot, keskihajonnat, pienimmät ja suurimmat arvot sekä mittausten lukumäärät B_0 - ja B_4 -ruuduissa.

B_0	\bar{x}	s	min	max	n
mekaaninen vastus, g	530	460	0	2000	676
kosteus tilavuusprosentteina	33,1	5,3	21,2	52,6	676
kosteus painoprosentteina	28,3	2,9	15,3	41,5	676
tilavuuspaino, g/cm ³	1,17	0,11	0,92	1,54	676
B_4	\bar{x}	s	min	max	n
mekaaninen vastus, g	570	470	0	2000	785
kosteus tilavuusprosentteina	32,5	4,4	22,7	47,0	785
kosteus painoprosentteina	27,8	2,6	21,3	36,8	785
tilavuuspaino, g/cm ³	1,17	0,11	0,82	1,49	785

Kuvassa 20 on esitetty juuren kulkureittien mekaaniset vastukset B_0 - ja B_4 -käsittelyissä. Mittausten ajankohtaa voidaan tarkastella taulukosta 5, sillä mittaukset tehtiin aina juuren saavuttamaan syvyyteen asti. Mekaaninen vastus poikkesi merkittävästi 16-30 cm:n syvyydessä. Ero 16-20 cm:ssä oli 190 g Tukeyn arvon ollessa 190 g. Syvyydessä 21-25 cm

ero oli 340 g Tukeyn arvon ollessa 210 g. Mekaaninen vastus poikkesi käsittelyjen välillä 510 g syvyydessä 26-30 cm, ja Tukeyn arvo tässä maakerroksessa oli 340 g. Numeerisesti mekaaniset vastukset eri syvyyksissä ja eri käsittelyissä on esitetty taulukossa 7.

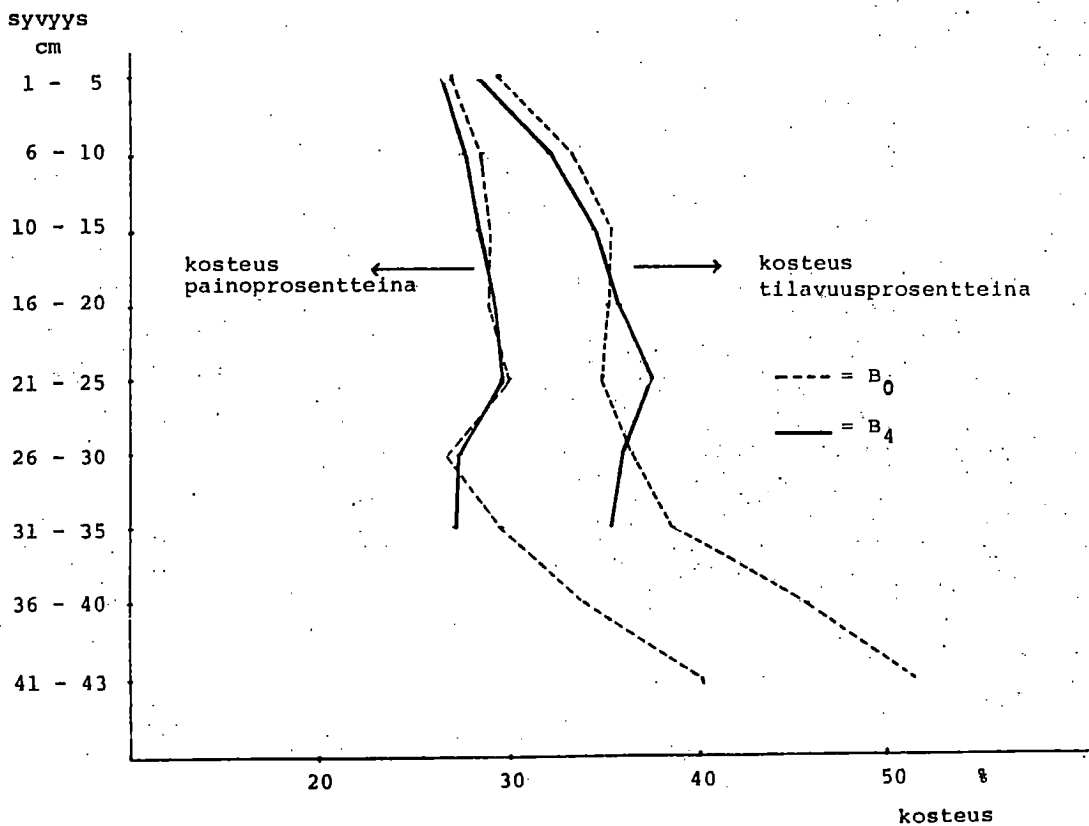


Kuva 20. Mekaaninen vastus tasakärkisellä penetrometrillä mitattuna B₀- ja B₄-käsittelyissä juurien kulkureiteissä, varjostettu alue kuvaa merkitsevästi tiivistynyttä maakerrosta.

Kuvassa 21 on esitetty tiivistyskäsittelyn vaikutus maan kosteustilaan sekä tilavuus- että painoprosentteina. Näytteet otettiin vähintään 20 cm:n syvyyteen saakka jokaisella havaintoviikolla. Heinäkuussa näytteitä otettiin myös jankosta (taulukko 5). Käsittelyjen B₀- ja B₄ välillä oli muutamissa syvyyksissä merkitseviä eroja. Tilavuusprosentteina lasketuna vesipitoisuus erosi käsittelyjen välillä 1-5 cm:ssä 0,9 % Tukeyn arvon ollessa 0,9 %. Syvyydessä 6-10 cm ero oli

Taulukko 7. Mekaaniset vastukset grammoina B_0 - ja B_4 -ruuduissa tasakärkisillä taskupenetrometreillä mitattuina juuritutkimusten yhteydessä tehtyjen pistojen keskiarvoina keskiarvon keskivirheineen.

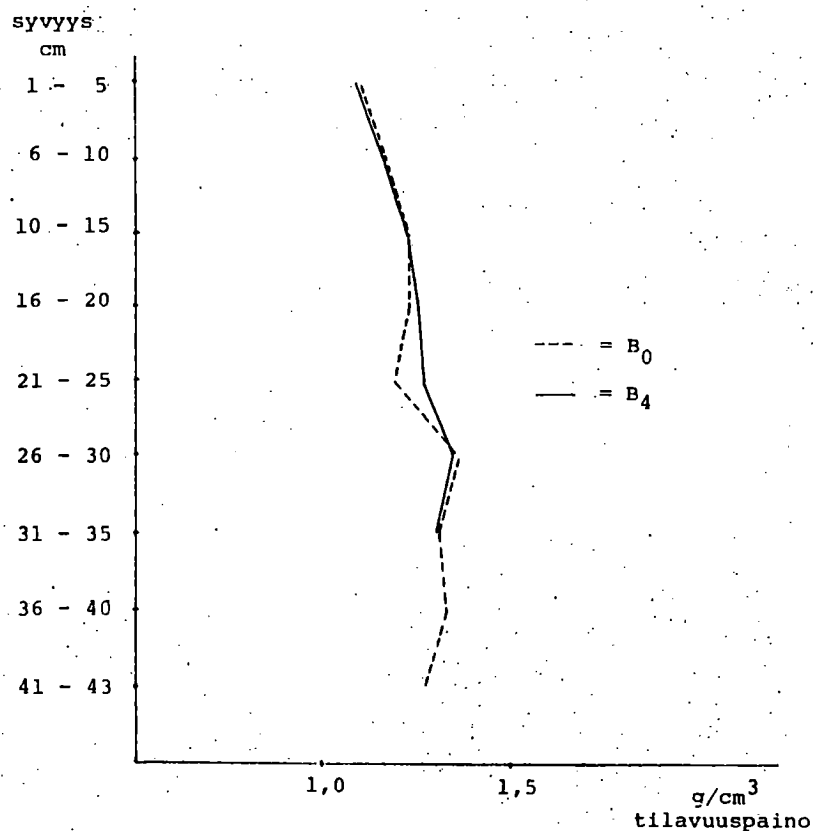
Syvyys cm	B_0	B_4
1 - 5	290 ± 20	260 ± 20
6 - 10	570 ± 30	560 ± 20
11 - 15	680 ± 50	710 ± 50
16 - 20	600 ± 70	790 ± 60
21 - 25	440 ± 150	780 ± 90
26 - 30	740 ± 200	1250 ± 160
31 - 35	770 ± 70	820 ± 200
36 - 40	570 ± 40	
41 - 43	267 ± 20	



Kuva 21. Vesipitoisuus B_0 - ja B_4 -käsittelyissä juurien kasvuympäristössä sekä tilavuus- että painoprosentteina.

1,1% Tukeyn arvon ollessa 0,6 %. Syvyydessä 11-15 cm kosteus oli 0,8 % suurempi B_0 -käsittelyssä kuin tiivistetyssä maassa, ja Tukeyn arvo oli 0,8 %. Tiivistetyssä maassa oli kuitenkin suurempi kosteus 21-25 cm:ssä eron ollessa 2,4 %, kun Tukeyn arvo oli 2 %. Painoprosentteina laskettaessa vesipitoisuuksien välillä oli merkitsevä 0,7 %:n ero 6-10 cm:ssä, kun Tukeyn arvo oli 0,4 %. Samoin 10-15 cm:ssä 0,5 %:n ero oli merkitsevä Tukeyn arvon ollessa 0,4 %. Myös 21-25 cm:n syvyydessä oli pieni 0,1 %:n ero Tukeyn arvon ollessa 0,1 %. Yleisesti kosteus oli vain hieman suurempi B_0 -käsittelyssä verrattuna B_4 -käsittelyyn 15 cm:n syvyyteen asti.

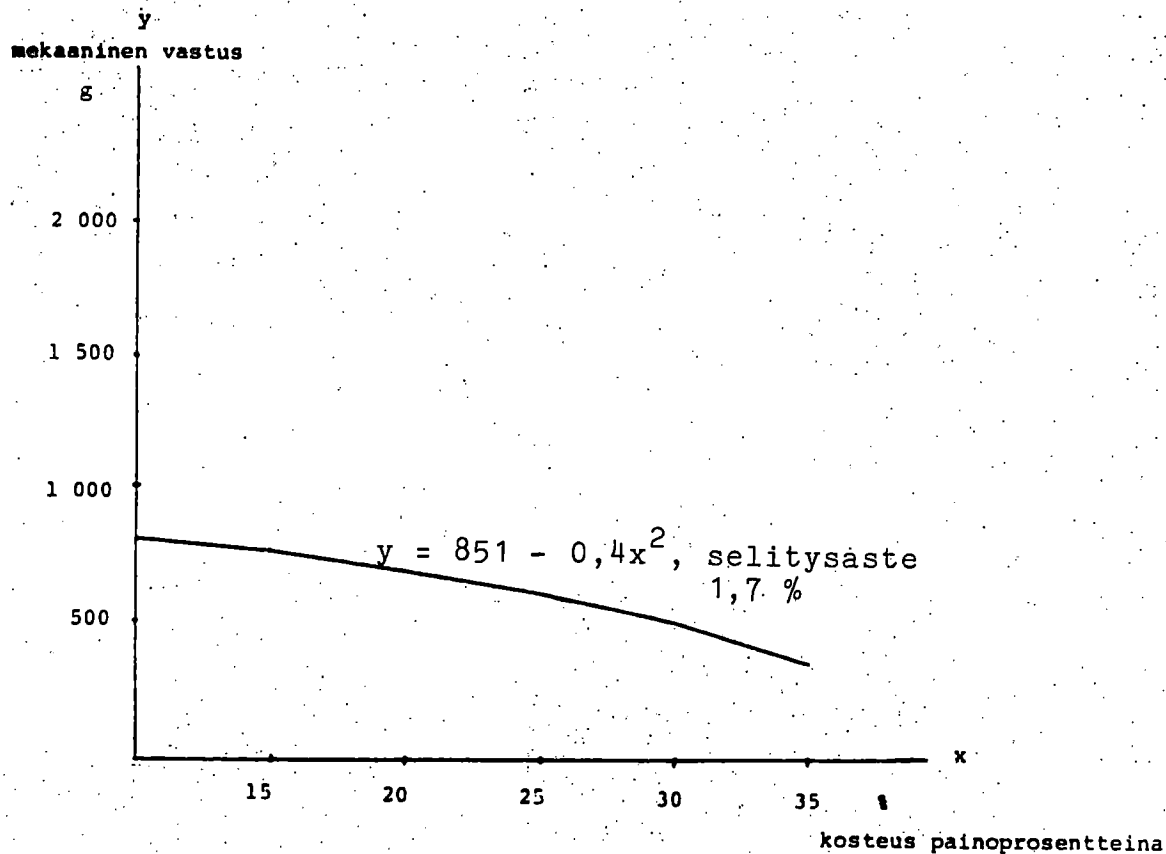
Kuvassa 22 on esitetty tiivistyskäsittelyn vaikutus maan tilavuuspainoon. Käsittelyjen B_0 ja B_4 välillä ei ollut eroa kuin 21-25 cm:ssä. Käsittelyssä B_4 tilavuuspaino oli $0,09 \text{ g/cm}^3$ suurempi kuin B_0 -käsittelyn tilavuuspaino Tukeyn arvon ollessa $0,07 \text{ g/cm}^3$.



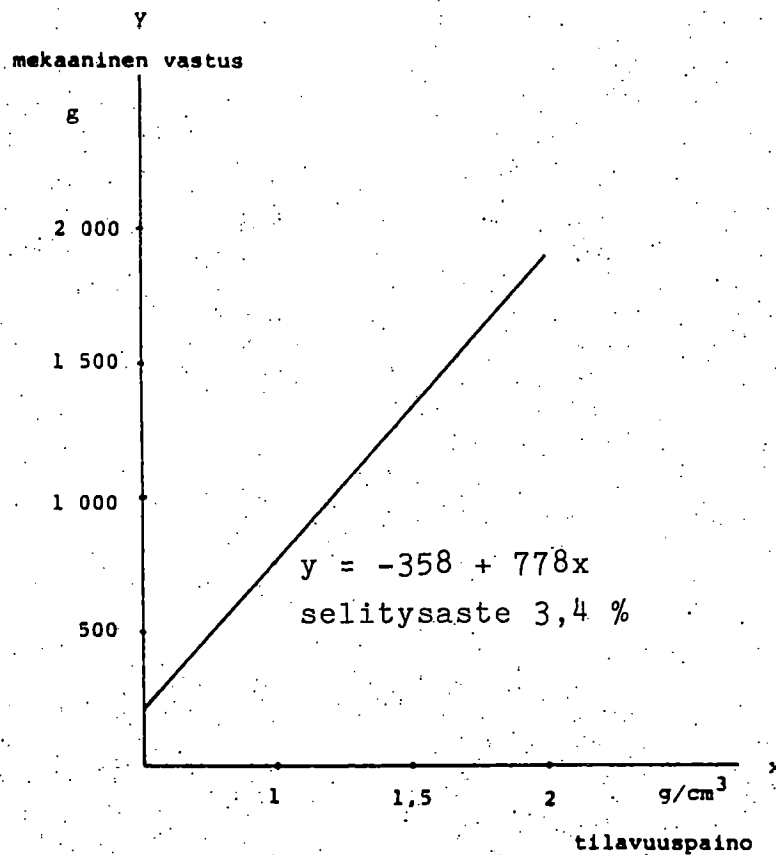
Kuva 22. Tilavuuspaino B_0 - ja B_4 -käsittelyissä juurien kasvuympäristössä.

2.3.3 Mekaanisen vastuksen ja muiden maan fysikaalisten ominaisuuksien väliset riippuvuudet

Juuritutkimusten yhteydessä mitattujen maan fysikaalisten ominaisuuksien mittaustulokset B_0 - ja B_4 -käsittelyistä yhdistettiin, ja näiden välisiä riippuvuuksia tutkittiin yleisesti. Mekaanisen vastuksen ja painoprosentteina ilmaistun vesipitoisuuden välillä todettiin lievä negatiivinen korrelaatio korrelaatiokertoimen ollessa $-0,121^{***}$. Mekaanisen vastuksen ja tilavuusprosentteina ilmaistun vesipitoisuuden välille ei saatu luotettavaa korrelaatiota. Mekaanisen vastuksen ja tilavuuspainon välille saatiin positiivinen korrelaatio, ja korrelaatiokerroin oli $0,184^{***}$. Kuvassa 23 on esitetty regressiokuvaaja mekaanisen vastuksen ja vesipitoisuuden (painoprosentteina) välillä, ja kuvassa 24 on regressiokäyrä mekaanisen vastuksen ja tilavuuspainon välillä.



Kuva 23. Regressiokuvaaja mekaanisen vastuksen ja vesipitoisuuden (painoprosentteina) välillä sekä regressioyhtälö ja selityssaste.



Kuva 24. Regressiokuvaaja mekaanisen vastuksen ja tilavuuspainon välillä, sekä regressioyhtälö ja selitysaste.

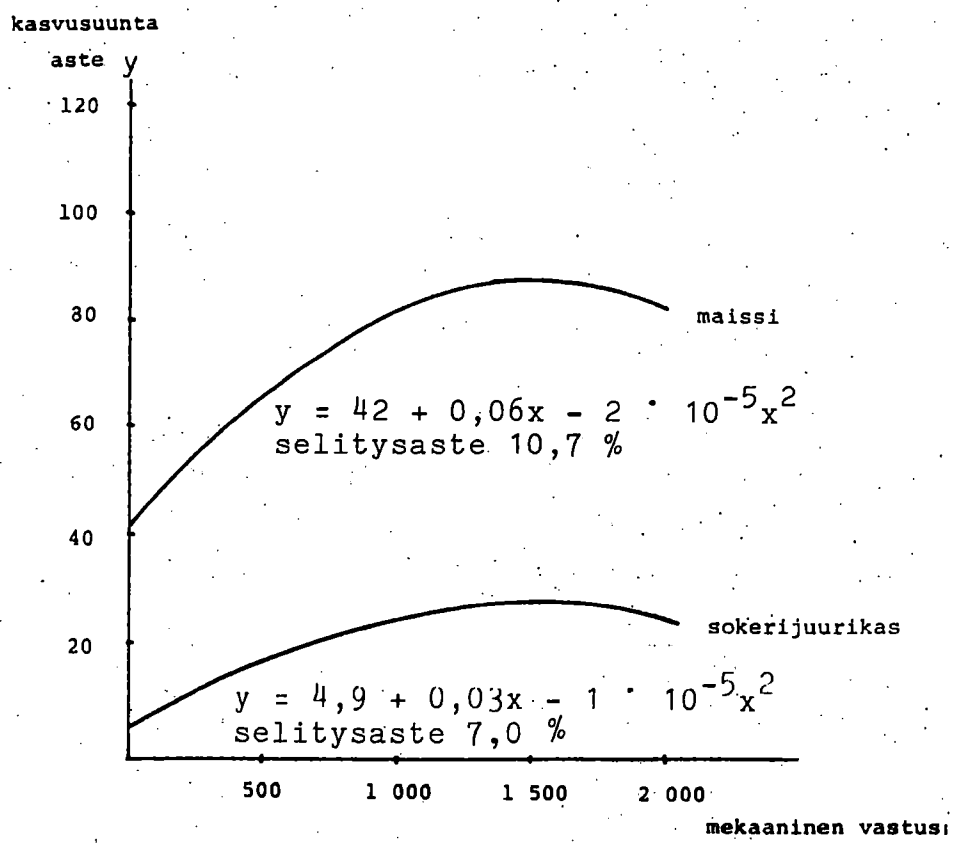
2.3.4 Juuren kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välinen riippuvuus

Juuren kasvusuuntien tulokset 1. poikkeamat pystysuunnasta (kuva 17) B_0 - ja B_4 -käsittelyissä yhdistettiin, ja kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välistä riippuvuutta tutkittiin sokerijuurikkaalla ja maissilla erikseen. Koska kolmas havaintoviikko oli huomattavasti muita havaintoviikkoja kosteampi, riippuvuuksia laskettaessa poistettiin tämä viikko. Taulukossa 8 on esitetty havaintoviikkojen vesipitoisuudet tilavuusprosentteina. Kasvusuunta ja mekaaninen vastus olivat keskenään positiivisesti korreloituneita. Sokerijuurikkaalla korrelaatiokerroin oli 0,251*** ja maissilla 0,297***.

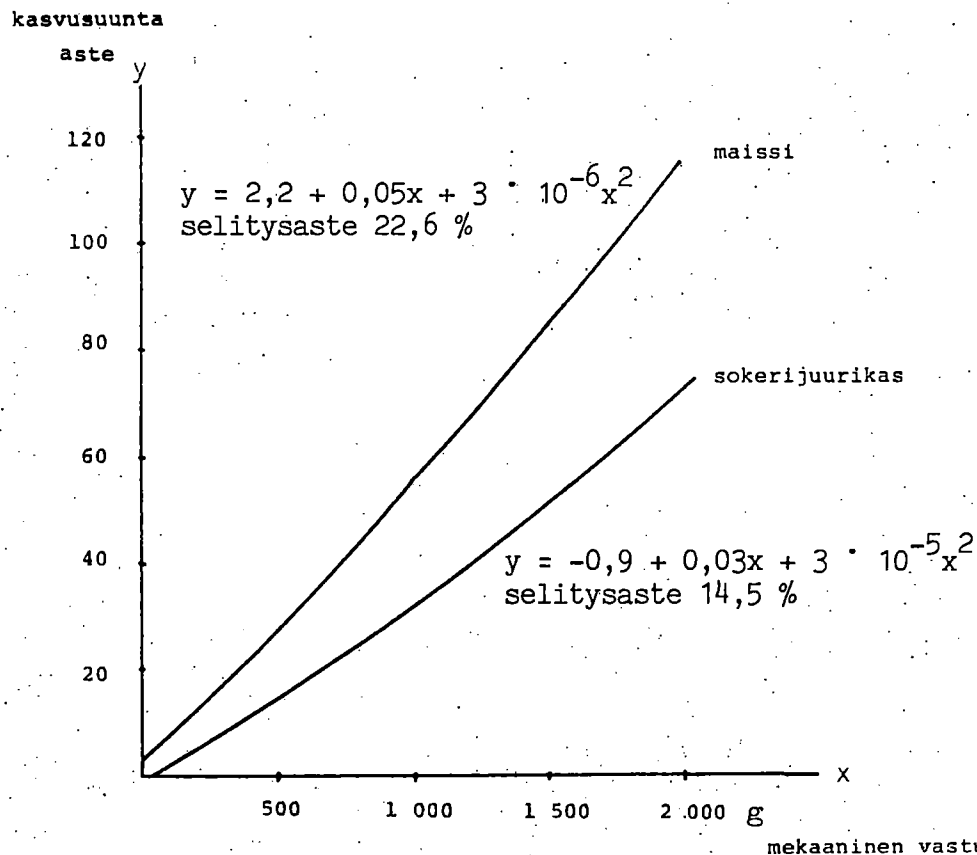
Taulukko 8. Maan vesipitoisuudet tilavuusprosentteina seitsemänä eri havaintoviikkona juuritutkimusten yhteydessä otettujen näytteiden keskiarvoina keskiarvon keskivirheineen.

1	33,4 ± 0,3
2	31,9 ± 0,3
3	38,6 ± 0,4
4	31,1 ± 0,3
5	31,9 ± 0,3
6	32,4 ± 0,3
7	33,1 ± 0,3

Syvyyden suhteen perättäisten kasvusuuntamittausten erotusten ja perättäisten penetrometrimittausten erotusten välillä oli myös erittäin merkitsevä korrelaatio. Sokerijuurikkaalla korrelaatiokerroin oli 0,380*** ja maissilla 0,474***. Kuvassa 25 on esitetty regressiokäyrät kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välillä sokerijuurikkaalla ja maissilla erikseen. Kuvan 26 regressiokäyrät kuvaavat perättäisten mittausten erotusten välistä riippuvuutta.



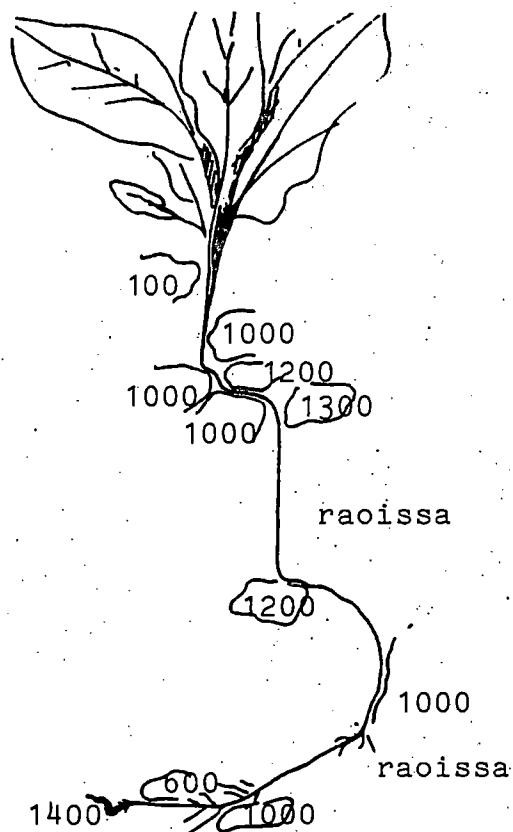
Kuva 25. Kasvusuunnan (poikkeaman pystysuunnasta) ja mekaanisen vastuksen väliset regressiokäyrät sokerijuurikkaalla ja maissilla



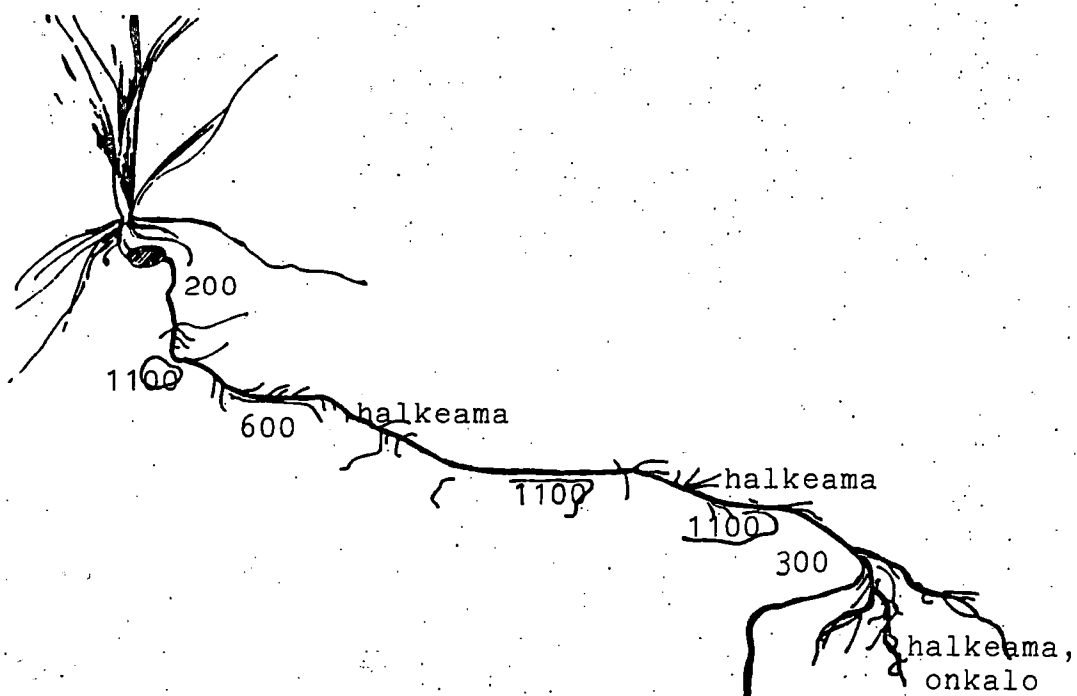
Kuva 26. Perättäisten kasvusuuntien (poikkeamien pystysuunnasta) erotusten ja perättäisten mekaanisten vastusten erotusten väliset regressiokäyrät.

2.3.5 Mekaanisen vastuksen aiheuttamat morfologiset muutokset juurissa

Liiallinen maan mekaaninen vastus johti juurien mutkitteluun, paksuuntumiseen ja haaroittumiseen. Kuvassa 27 on piirros sokerijuurikkaan juuresta, joka kaivettiin 2.7. B₀-ruudusta. Piirros edustaa tyypillistä sokerijuurikkaan juuriprofiilia, joita kaivettiin yhteensä 52 kpl. Juuri taipui kohdatessaan kovia maakokkareita ja pyrki etsimään pienimmän mekaanisen vastuksen reitin halkeamista ja onkaloista. Juuren kärki oli paksuuntunut, mikä osoittaa tiiviin maan olleen liian suuri mekaaninen vastus normaalille kasvulle. Lisäksi juuressa oli haaroja, jotka korvasivat häiriintynyttä kasvua. Kuvassa 28 on esimerkki maissin juuriprofiilista. Juuri kaivettiin, piirrettiin ja kuvattiin painon alla 15.7. B₀-ruudussa kasvaneen maissin kasvun tiivis maa selvästi esti. Onkaloissa juuri haarottui ja korvasi siten aiemmin maan mekaanisen vastuksen ahdistamaa kasvua.



Kuva 27. Piirros 2.7. kaivetusta B_0 -ruudun sokerijuurikkaan juuresta. Lukemat ovat tasakärkisellä penetrometrillä mitattuja suhteellisia mekaanisia vastuksia grammoina.



Kuva 28. Piirros 15.7. kaivetusta B_0 -ruudun maissin juuresta. Lukemat ovat tasakärkisellä penetrometrillä mitattuja suhteellisia mekaanisia vastuksia grammoina.

Lisää juuriprofiileja on esitetty kuvissa 29-31, jotka ovat valokopioita painon alla kuivattujen kasvien valokuvista. Kuvia on täydennetty kenttämuistiinpanojen avulla lisäämällä niihin tasakärkisellä penetrometrillä mitattuja mekaanisia vastuksia grammoina. Viimeisen sivun värikuvaliitteessä on valokuvia elävistä juurista kaivuuvaiheessa (s. 97).

Kuvassa 29/A mekaanisen vastuksen noustessa 1300-1400 g:aan sokerijuurikkaan juuri taipui. Juuri kasvoi pystysuoraan 200 g:n mekaanisessa vastuksessa, mutta 1000 g:n paine aiheutti taas juuren kärjen taipumisen.

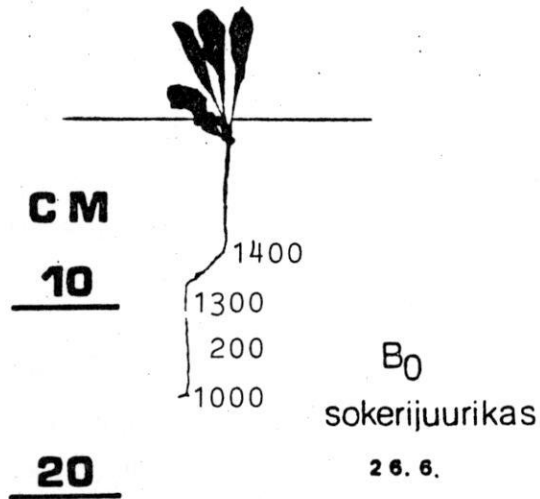
Kuvan 29/B sokerijuurikkaan juuri taipui 1000-1200 g:n mekaanisessa vastuksessa. Nuoli osoittaa paksuuntunutta ja epämuodostunutta juuren kärkeä 1100 g:n paineessa. Kuva 27 esittää samasta kasvista kenttämuistiinpanojen avulla piirrettyä juuren kasvureittiä ja kasvutapaa. Mm. juuren haaroittuminen ei näy kuivatusta juuresta siten kuin muistiinpanot kertoivat.

Kuvan 29/C juuri pystyi kasvamaan pystysuoraan 900 g:n vastuksessa, mutta kuitenkin taipui 300 g:n mekaanisessa vastuksessa kohdatessaan olkimaton (a). Tämä viitanee siihen, että sokerijuurikkaan juuri kasvoi 900 g:n ympäröimässä pienessä halkeamassa, jonka olkimatto tukki syvemmällä. Juuren kärki paksuuntui 1,5-kertaiseksi 500 g:n paineessa, mikä viittaa siihen, että halkeamia tai lieronreikiä ei ollut juuren käytössä tässä syvyydessä.

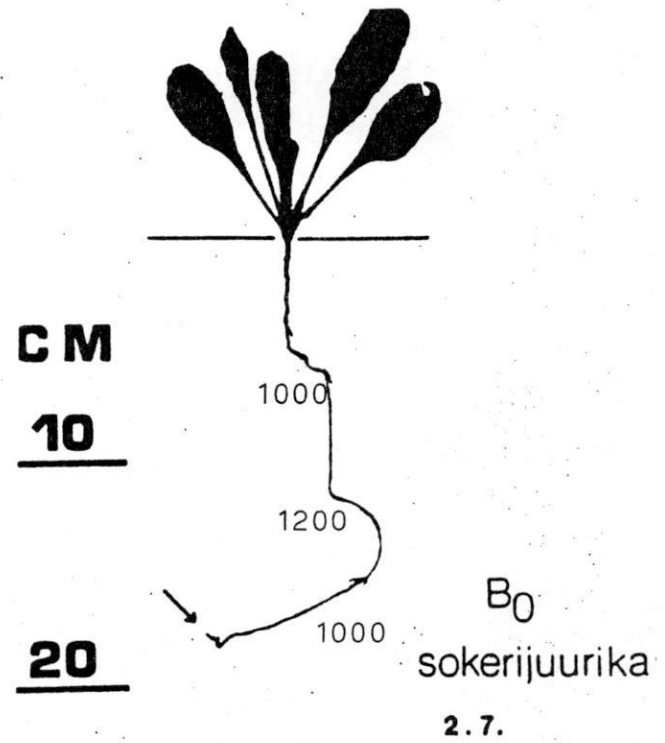
Kuvassa 29/D sokerijuurikkaan juuri kasvoi pystysuoraan, vaikka mekaaninen vastus oli 1400 g. Juuri kuitenkin haarottui runsaasti nuolen osoittamassa onkalossa, mikä osoittanee juuren kärsineen aiemmin mekaanisesta vastuksesta.

Kuvassa 30/A nuolien osoittamissa kokeissa juuri kasvoi halkeamissa. Juuri yritti selvästi hakeutua halkeamiin ja taipui 1000-1300 g:n mekaanisessa vastuksessa.

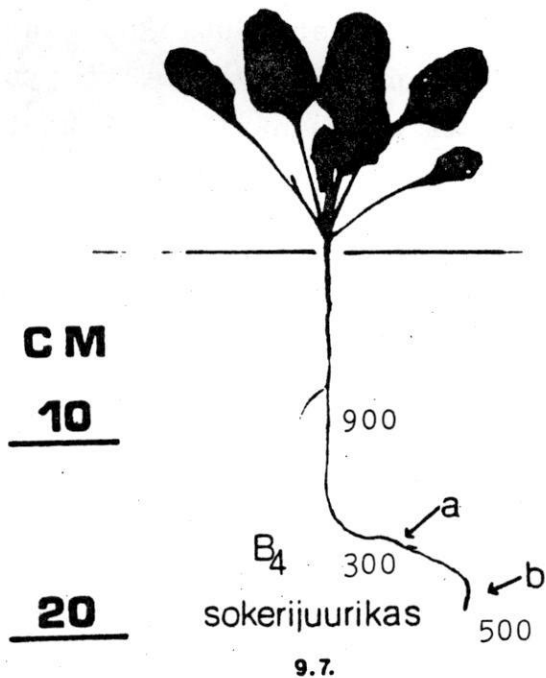
Kuvassa 30/B pisin tässä tutkimuksessa kaivettu juuri kasvoi aivan pystysuoraan 1200 gramman mekaanisessa vastuksessa. Sokerijuurikkaan juuri lienee kuitenkin kärsinyt tästä mekaanisesta vastuksesta, sillä 38 cm:n syvyydessä olevassa halkeamassa juuri haarautui runsaasti muistiinpanojen mukaan.



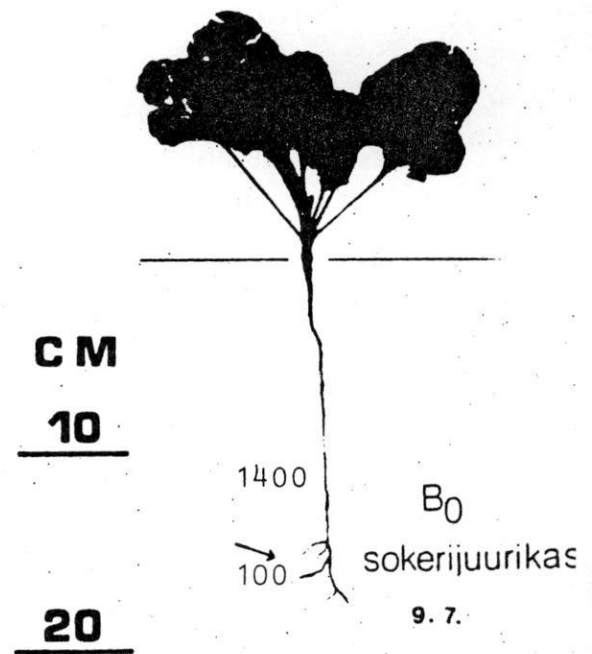
A



B



C



D

Kuva 29. Valokuvajäljennöksiä painon alla kuivatusta juurista. Juuria ympäröivät luvut kuvaavat mekaanista vastusta (g) tasa-kärkisen penetrometrin mittaustuloksena. (Kuvat: Risto Seppälä)

Kuvan 30/C sokerijuurikkaan juuri taipui selvästi kohdatessaan 1500 g:n vastuksen. Kasvaessaan 10 cm:n syvyydessä 100 g:n paineessa juuri haarautui muistiinpanojen mukaan runsaasti korvaten aiemmin häiriintynyttä kasvua. Samoin 800 g:n paineessa juurella oli tilaa haaroittua (a), vaikka selvästi paksu juurenosa olikin puristuksissa. Kohdassa b juuri kasvoi vaakatasossa olevan oljen sisällä ilman haitallisen suurta mekaanista vastusta.

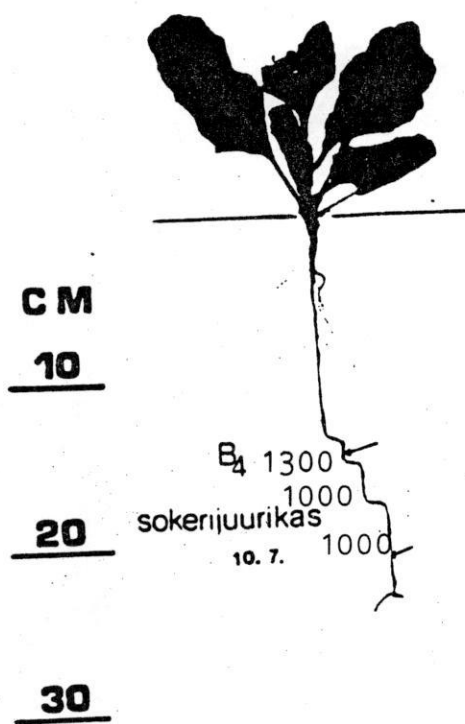
Kuvassa 30/D nuolet osoittavat paksuuntuneita juurenosia maissin juuren kohdatessa 800 g:n mekaanisen vastuksen. Jo 500 g:n paine aiheutti juuren kärjen taipumisen vaakatasoon.

Kuvan 31/A maissin juuri kasvoi vinosti, vaikka mekaaninen vastus ei ollut erityisen suuri. Juuri kasvoi 500 g:n vastuksessa jopa ylöspäin (a) maakokkarettä pitkin, minkä jälkeen juuri haarottui runsaasti (c). Maissin juuri ei siten pystynyt voittamaan 500 g:n mekaanista vastusta, vaan pituuskasvu häiriintyi, ja sitä pyrittiin korvaamaan haaroittumisella. Kohdassa c juuri kasvoi alaspäin halkeamassa.

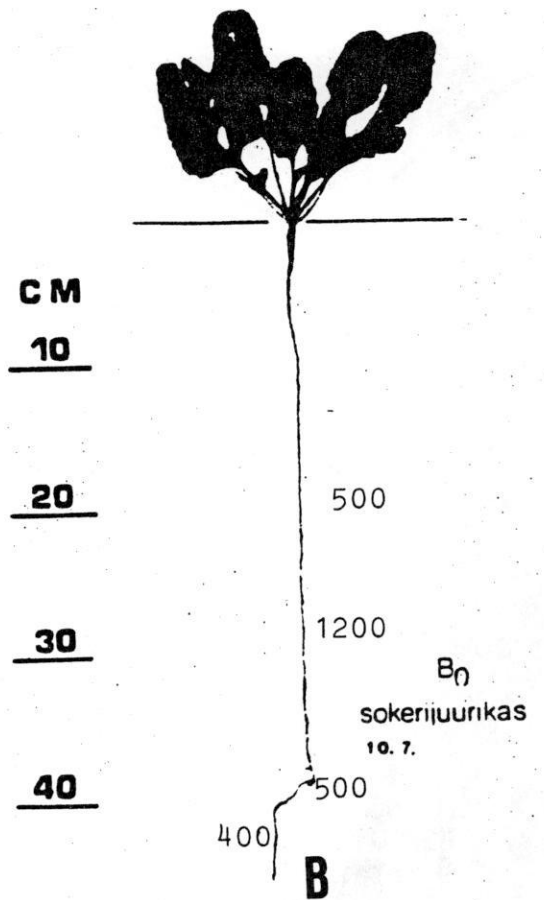
Kuvan 31/B maissin juuri haarottui runsaasti 500-1300 g:n mekaanisessa vastuksessa (a), minkä jälkeen se kasvoi melko pystysuoraan 500 g:n paineessa. Juuren kärki paksuuntui 1,5-2-kertaiseksi normaalista sekä mutkitteli 1300 g:n mekaanisessa vastuksessa (b).

Kuvan 31/C kohdassa a maissin juuri mutkitteli ja yritti kasvaa halkeamiin. Nuolet osoittavat normaalia paksumpia juuren osia, joiden kehitys häiriintyi 1400 g:n mekaanisessa vastuksessa. Kohdassa b juuri kasvoi raossa.

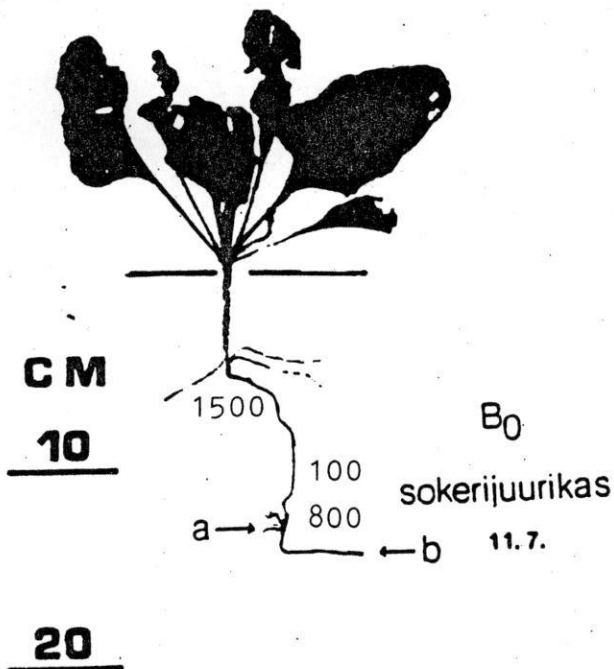
Kuvassa 31/D nuolet kuvaavat onkalossa haaroittunutta maissin juurta, jonka runsaat haarat olivat hauraita ja paksuja, ikään kuin turvonneita. Ennen onkaloon kasvua juuri kärsi 1100 g:n mekaanisesta vastuksesta (vrt. kuva 28).



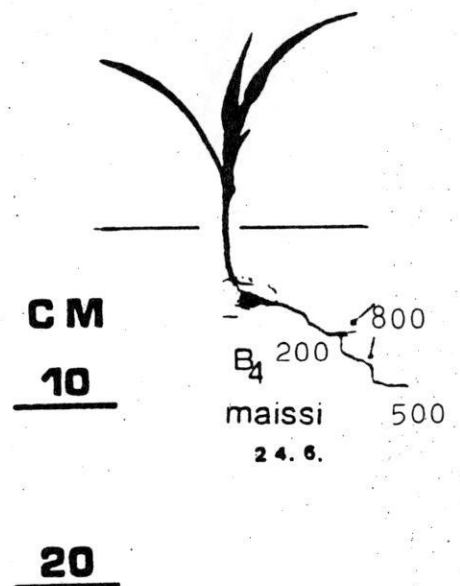
A



B

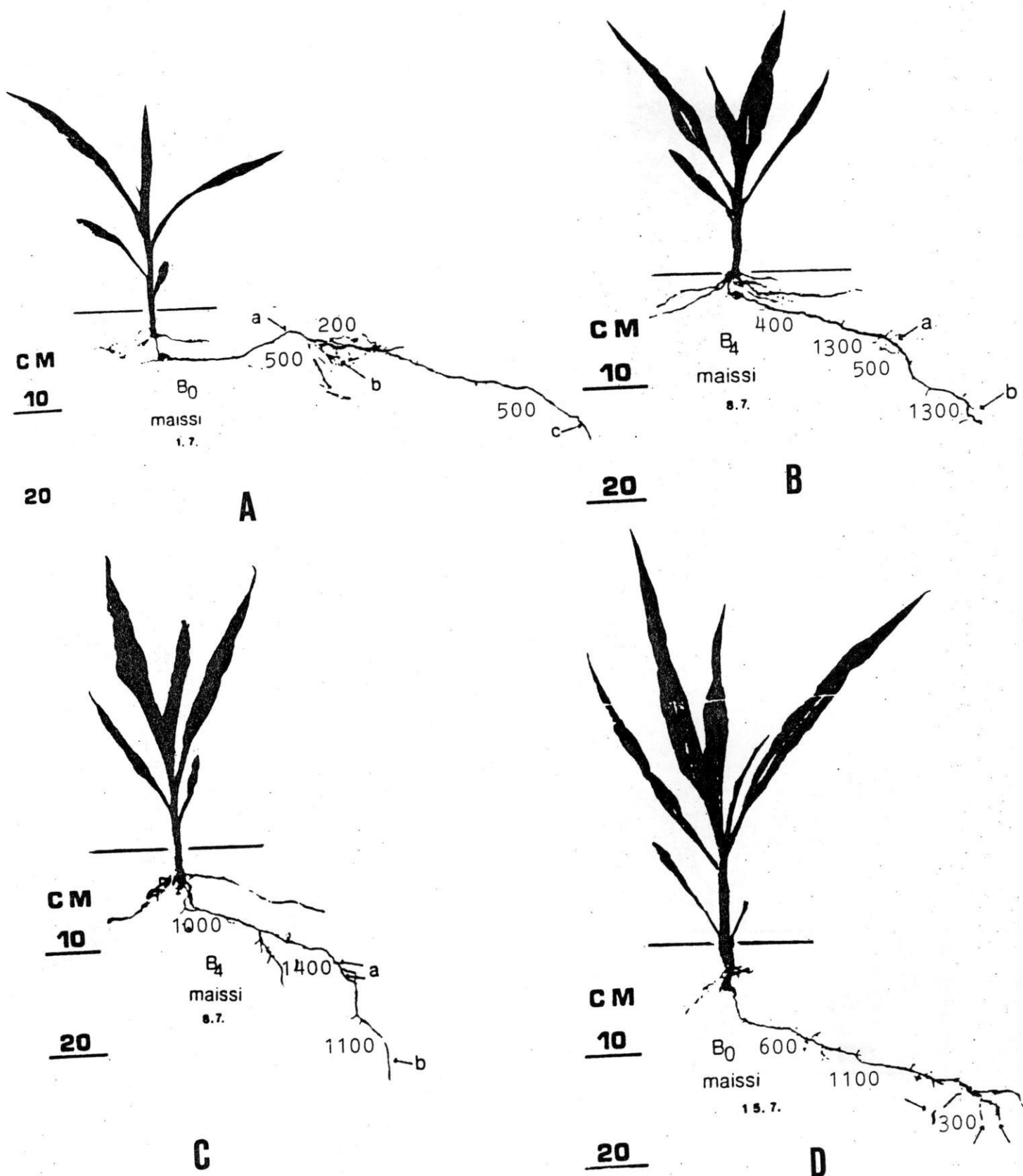


C



D

Kuva 30. Valokuvajäljennöksiä painon alla kuivatusta juurista. Juuria ympäröivät luvut kuvaavat mekaanista vastusta (g) tasakärkisen penetrometrin mittaustuloksena. (Kuvat: Risto Seppälä)



Kuva 31. Valokuvajäljennöksiä painon alla kuivatusta juurista. Juuria ympäröivät luvut kuvaavat mekaanista vastusta (g) tasakärkisen penetrometrin mittaustuloksena. (Kuvat: Risto Seppälä)

2.4 Tiivistyskäsittelyjen vaikutus orastuvuuteen ja sa- toon

Kevätvehnän oraiden lukumäärät yhtä metriä kohden eri tiivistyskäsittelyissä kolmen kerranteen keskiarvoina keskiarvon keskivirheineen olivat seuraavat:

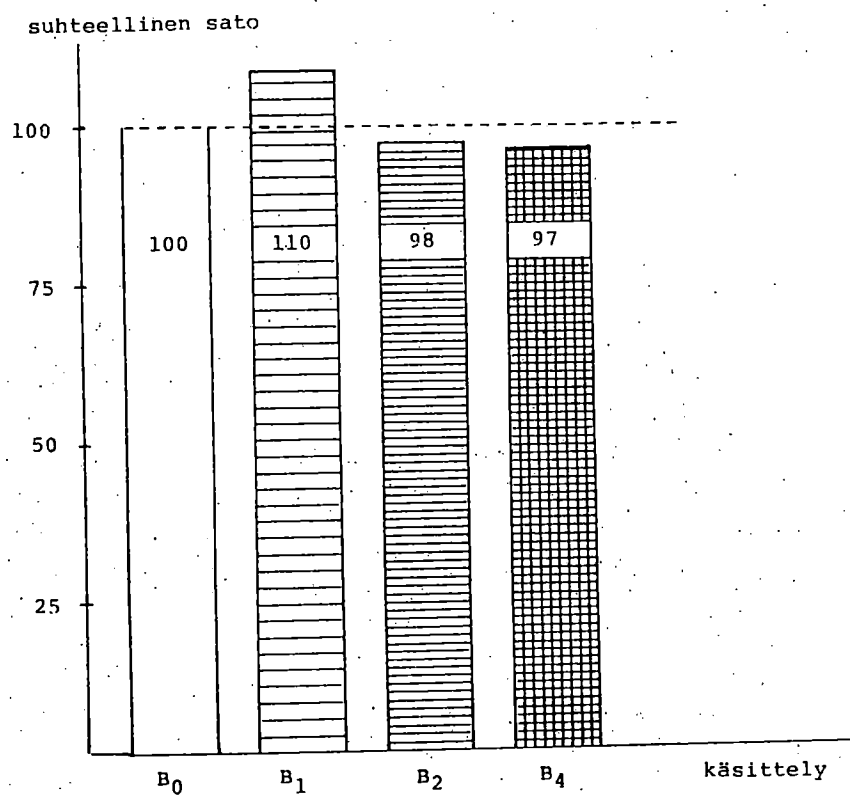
B ₀	67,7 ± 1,6
B ₁	70,8 ± 4,0
B ₂	67,5 ± 1,0
B ₄	63,7 ± 5,4

Käsittelyjen välille ei saatu merkitseviä eroja orastuvuudessa.

Kuvassa 32 on esitetty sokerijuurikkaan suhteelliset sadot neljässä eri käsittelyssä pylväsdiagrammina, ja taulukossa 11 on esitetty sokerijuurikkaan sadot absoluuttisina hehtaarisatoina. Käsittely B₁ oli merkitsevästi parempi kaikkia muita käsittelyjä Tukeyn arvon ollessa 2770 kg. Muiden käsittelyjen välillä ei ollut merkitseviä eroja.

Kuvassa 33 on esitetty rehumaissin suhteelliset kuiva-ainesadot pylväsdiagrammina, ja taulukossa 12 ovat absoluuttiset kuiva-ainesadot. Käsittelyjen välille ei saatu merkitseviä eroja.

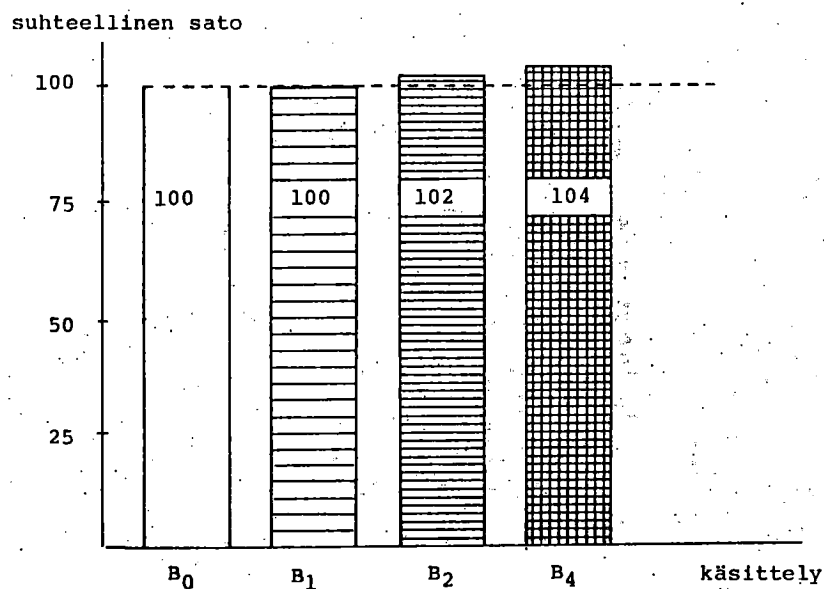
Kuvassa 34 on esitetty rehumaissin kuiva-ainesadot pylväsdiagrammina suhteellisina satoina. Vastaavat absoluuttiset sadot ovat taulukossa 13. Käsittelyjen välillä ei ole merkitseviä eroja.



Kuva 32. Sokerijuurikkaan suhteelliset sadot eri tiivistyskäsittelyissä.

Taulukko 9. Sokerijuurikkaan sadot (kg/ha) eri tiivistyskäsittelyissä kolmen kerranteen keskiarvoina keskiarvon keskivirheineen.

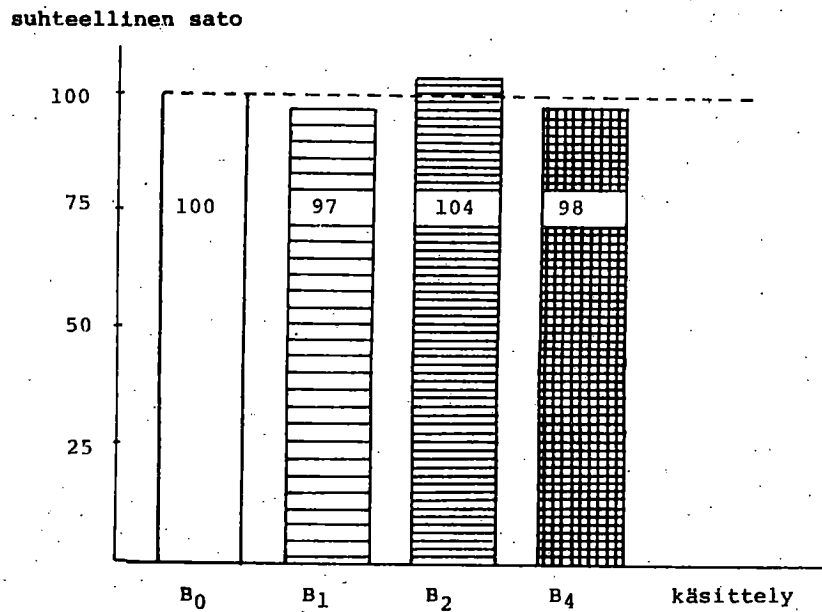
B ₀	30 420	±	1090
B ₁	33 380	±	990
B ₂	29 910	±	420
B ₄	29 490	±	990



Kuva 33. Kevätvehnän suhteelliset sadot eri tiivistyskäsitte-
lyissä.

Taulukko 10. Kevätvehnän sadot (kg/ha) eri tiivistyskäsitte-
lyissä kolmen kerranteen keskiarvoina keskiarvon keskivir-
heineen.

B ₀	4 470 ± 140
B ₁	4 470 ± 180
B ₂	4 570 ± 140
B ₄	4 650 ± 60



Kuva 34. Rehumaissin suhteelliset kuiva-ainesadot eri tiivistyskäsittelyissä.

Taulukko 11. Rehumaissin kuiva-ainesadot (kg/ha) eri tiivistyskäsittelyissä kolmen kerranteen keskiarvoina keskiarvon keskivirheineen.

B ₀	4 580 ± 170
B ₁	4 440 ± 130
B ₂	4 750 ± 360
B ₄	4 460 ± 320

3 Tulosten tarkastelu

3.1 Tiivistyskäsittelyjen vaikutus maan mekaaniseen vastukseen ja huokosjakaumaan

Tiivistysvaikutus ulottui 15-25 cm:n syvyyteen, mikä vastaa AURAN (1983) saamia tuloksia keväällä kylvötöiden yhteydessä tapahtuneesta tiivistyksestä. Taka-akselikuormituksen ollessa vain 3000 kg tiivistysvaikutus ei ulottunut muokkauskerroksen alapuolelle niin kuin tiivistettäessä savimaata raskaalla 16000 kg:n taka-akselikuormituksella (HÄKANSSON 1979).

Suurin ero tiivistämättömän ja neljästi tiivistetyn maan mekaanisessa vastuksessa oli 450 kPa 15-20 cm:n syvyydessä. Yksi ajokerta tiivisti maata 20-25 cm:n syvyydessä kohottaen mekaanista vastusta 250 kPa. Luvut ovat selvästi pienempiä ERIKSSONIN (1982) saamaa 1200 kPa:in eroa 50000 kg:n panssarivaunulla tiivistetyn maan ja tiivistämättömän nurmella olleen maan välillä. ERIKSSON (1982) oli tiivistänyt maata 15 kertaa joka toinen vuosi, ja maan suurin mekaaninen vastus oli 2100 kPa 30-40 cm:ssä. Tämä mekaaninen vastus on pieni verrattuna B_4 -käsittelyn aiheuttamaan suurimpaan mekaaniseen vastukseen 2300 kPa 15 cm:ssä ja 30 cm:n syvyydessä. Tiivistämättömän B_0 -käsittelyn maan suurin mekaaninen vastus oli 15 cm:ssä 1940 kPa ja 30 cm:n syvyydessä 2400 kPa. Koekenttä oli siten varsin tiivis jo ennen tiivistystä verrattaessa mekaanista vastusta ERIKSSONIN (1982) saamiin penetrometrilukemiin. Tosin eri penetrometreillä mitattuja mekaanisia vastuksia on vaikea verrata keskenään (VOORHEES ym. 1975).

Tutkimuksessa käytetyllä kartiokärkisellä penetrometrillä on mitattu mekaanista vastusta myös Sokerijuurikkaan tutkimuskeskuksessa Perniössä. Savimailla mekaaninen vastus on vaihdellut muokkauskerroksessa 500 kPa:ista 1500 kPa:iin, muokkauskerroksen ja jankon välissä mekaaninen vastus on ollut 1000 - 1750 kPa.

Jankossa mekaaninen vastus on vaihdellut 1000 kPa:in ja 2000 kPa:in välillä (ERJALA, M. 1986, suullinen tieto). Luvut ovat ainakin muokkauskerroksessa pienemmät kuin B_0 -ruuduista mitatut mekaaniset vastukset, mikä osoittaa koekentän normaalia suurempaa tiiviystilaa.

Tiivistäminen vaikutti maan huokosiin siten, että neljästi tiivistetyssä maassa kokonaishuokostilavuus 10-20 cm:n syvyydessä oli 3,3 % pienempi kuin tiivistämättömässä maassa. Vaikutus kohdistui suuriin huokosiin ($\phi \geq 30 \mu\text{m}$), joiden osuus väheni tiivistyskäsittelyllä vielä 40 cm:n syvyydessäkin. Erot eivät tosin olleet merkitseviä, sillä otos oli pieni ja hajonta suuri. Lisäksi tiivistysajankohtana maa oli erittäin kantava ja ehtinyt kuivua pintakerroksesta merkittävästi. Kentän ollessa jo alkuaan tiivis tiivistysvaikutus lienee ollut lähinnä elastista ja vain vähän pysyvää plastista, eikä huokostilavuus ja -jakauma näin merkitsevästi muuttunut. AURAn (1983) mukaan traktorilla ajo vaikuttaa maan huokoisuuteen, jolloin varsinkin suurien huokosten osuus vähenee (ERIKSSON ym. 1974).

Juuritutkimusten yhteydessä otettujen kosteusnäytteiden perusteella voidaan myös havaita, että neljästi tiivistetyissä ruuduissa maa oli hieman kuivempaa 15 cm:n syvyyteen asti verrattuna tiivistämättömiin ruutuihin. Tämä viittaa kenttäkapasiteetin heikkenemiseen tiivistetyillä ruuduilla.

3.2 Tiivistyskäsittelyn vaikutus juuren kasvuympäristöön ja kasvutapaan

Neljään kertaan tiivistetyn maan mekaaninen vastus tasakärkisellä penetrometrillä mitattuna juurien kasvureiteissä oli 16-20 cm:ssä 200 g suurempi kuin tiivistämättömän maan mekaaninen vastus. Ero 26-30 cm:n syvyydessä oli 500 g. Hajonta oli varsin suuri, mutta yleisesti ottaen voidaan sanoa, että tiivistyskäsittely kohotti hieman juurien kasvuympäristön mekaanista vastusta 16-30 cm:n syvyydessä.

Tiivistyneessä kerroksessa taskupenetrometrilukemat vaihtelivat keskimäärin 800 g:n ja 1300 g:n välillä, kun B_0 -ruuduissa vastaava mekaaninen vastus oli 400-800 g. Koska kokeen tasakärkiselle penetrometrille ei ole kehitetty kerrointa, jolla grammat voitaisiin muuttaa paineen yksiköiksi savimaassa, luku-

ja ei voida verrata kartiokärkisellä penetrometrillä mitattuun koekentän tiiviystilaan. Lisäksi suuri kartiokärkinen penetrometri mittasi vain maan yleisen mekaanisen vastuksen, kun taskupenetrometri jäljitti juurien pienimmän mekaanisen vastuksen kulkureittejä. Toisaalta halkaisijaltaan 1 mm:n taskupenetrometrikään ei kyennyt täysin seuraamaan juurien kulkureittejä eikä mahtunut varsinkaan sokerijuurikkaan ohuen juuren ($\phi = 0,5$ mm) käyttämiin halkeamiin. Taskupenetrometrin antamat suhteelliset mekaanista vastusta kuvaavat lukemat olivat siten ainakin paikoin liian suuria verrattuna juuren kulkureitin mekaaniseen vastukseen. Mittausmenetelmä olikin varsin puutteellinen tiiviin heterogeenisen savimaan olosuhteissa. Vastaavissa juuritutkimuksissa tulisi käyttää savimaalle kehitettyä, hyvin ohuella kartiokärjellä varustettua taskupenetrometriä, joka mittaisi mekaanisen vastuksen paineen yksikkönä. Tällöin mittauksia voisi verrata paremmin muihin tutkimustuloksiin, vaikka eri penetrometreillä mitatut mekaaniset vastukset eivät olekaan täysin vertailukelpoisia. Esimerkiksi pieni penetrometri antaa suhteessa suurempia mekaanisia vastuksia kuin suuri penetrometri (WHITELEY ja DEXTER 1981a).

Tiivistyskäsittely johti hyvin vähäiseen maan kosteuden pieneenemiseen 15 cm:n syvyyteen asti (luku 3.1). Tilavuuspainoon tiivistys ei vaikuttanut kuin 20-25 cm:n syvyydessä nostoen tilavuuspainoa $0,09 \text{ g/cm}^3$. Tilavuuspaino ei siten kuvannut mekaanisen vastuksen kohoamista kuin vain osassa tiivistynyttä maakerrosta. Tilavuuspainon ei ole todettukaan olevan hyvä mitta mekaaniselle vastukselle varsinkaan heterogeenisessä maassa (EHLERS ym. 1983). Toisaalta mekaanisen vastuksen ja tilavuuspainon välille saatiin huono selitysaste mittausvaikeuksien vuoksi (luku 3.3).

Juuret kasvoivat keskimäärin samoihin syvyyksiin kummassakin käsittelyssä. Tiivistäminen ei siten mataloittanut juuria, niin kuin mekaaninen vastus RUSSELLIN JA GOSSIN (1974) mukaan yleisesti tekee. Selityksenä on maan heterogeenisuus: Lieronreiät, halkeamat, raot ja suuret huokokset toimivat juurien kulkureitteinä ja pienensivät siten tiivistyneen maan mekaanisen vastuksen haitallisuutta. Saman havainnon on tehnyt mm. HIDDING

ja VAN DEN BERG 1960, McCOWAN ym. 1983. Tiivistynyt mutta heterogeeninen maa ei siten välttämättä estä juurien kehitystä merkittävästi. Kokonaishuokostilavuus ei ole tärkeintä, vaan huokosten jatkuvuus (RUSSELL ja SHONE 1972).

Juurien kasvusuuntiin tiivistyskäsittely sen sijaan vaikutti. Sokerijuurikkaan kasvu poikkesi B_4 -ruuduissa hieman enemmän pystysuorasta (5°) kuin B_0 -ruuduissa, mikä kuvaa juuren suurempaa taipumista tiivistetyssä maassa ja vastaa DEXTERin ja HEWITTin (1978) kuvausta juuren taipumisesta. Maissin kasvu muuttui pystysuuntaisemmaksi tiivistyskäsittelyn myötä, mikä on sinänsä epäloogista. Tosin maissi ei näyttänyt olevan yhtä geotrooppinen kuin sokerijuurikas, ja se näytti pyrkivän kasvamaan luontaisesti huomattavasti vinommin kuin selvästi geotrooppinen sokerijuurikas. Ero näiden kasvien keskimääräisessä kasvusuunnassa oli 45° . Sokerijuurikkaan juuri on maissin juurta huomattavasti ohuempi, ja sokerijuurikas voi siten kasvaa pienemmissä halkeamissa kuin maissi, jonka juuren halkaisija on keskimäärin 1 mm sokerijuurikkaan juuren kärjen ollessa 0,5 mm halkaisijaltaan. Myös tämä lienee vaikuttanut maissin juuren vinoon kasvutapaan. Lisäksi maissin kasvupaine saattaa olla pienempi sokerijuurikkaan kasvupainetta. Yleisesti kasvupaine on lähellä kasvin suurinta mahdollista turgorpainetta eli 1000 kPa, ja se vaihtelee suhteellisen vähän eri kasvilajien välillä (HEINONEN 1983). Kasvupaineen erolla ei siten liene suurta vaikutusta.

3.3 Mekaanisen vastuksen ja muiden maan fysikaalisten ominaisuuksien väliset riippuvuudet

Mekaaninen vastus ja maan kosteus olivat keskenään korreloituja. Tosin selitysaste oli varsin pieni ja merkityksetön, ainoastaan 1,7 %. Kosteuden lisääntymisen on yleisesti todettu pienentävän maan mekaanista vastusta (CAMP ja GILL 1969, EAVIS 1972, STITT ym. 1982) ja pieni selitysaste kuvaa osaltaan maan heterogeenisuutta, osaltaan tasakärkisen penetrometrin puutteellisuutta mittaussuunnitelmana heterogeenisessä maassa. Vesipitoisuuksien määrittämiseksi varten otettiin maasta 2,5 cm:n paksuiset maalieriöt, joissa mekaaninen vastus voi vaihdella huomattavasti.

Negatiivinen korrelaatiokerroin oli kuitenkin käytetylläkin menetelmällä erittäin merkitsevä laskettaessa vesipitoisuus painoprosentteina. Tilavuusprosentteina laskettaessa vesipitoisuuden ja mekaanisen vastuksen välille ei saatu luotettavaa korrelaatiota. Tämä johtunee siitä, että mekaanisen vastuksen ja tilavuuspainon välillä todettiin positiivinen korrelaatio.

Tilavuuspainon ja maan mekaanisen vastuksen välille saatiin erittäin merkitsevä positiivinen korrelaatio, mutta selityksaste oli pieni 3,4 % mittausvaikeuksista ja maan heterogeenisuudesta johtuen. STIBBEn ja TERPSTRAn (1981) mukaan mekaaninen vastus kasvaa eksponentiaalisesti tilavuuspainon kasvaessa. Heterogeenisessä maassa tilavuuspaino kuitenkin vaihtelee, ja huokokset ja halkeamat eliminoivat tilavuuspainon vaikutusta mekaaniseen vastukseen (EHLERSym. 1983). Tilavuuspainon ei siten tulekaan selittää kaikkea mekaanisen vastuksen vaihteluista.

3.4 Juuren kasvusuunnan ja mekaanisen vastuksen välinen riippuvuus

Sekä sokerijuurikkaan että maissin kasvusuunta 1. poikkeama pystysuunnasta ja mekaaninen vastus olivat keskenään erittäin merkitsevästi korreloituneita. Kasvusuunta muuttuu siten yhä enemmän kohti vaakatasoa mekaanisen vastuksen kasvaessa juuren kärjen alapuolella. Kuitenkin vain melko vähän voitiin kasvusuuntaa selittää mekaanisella vastuksella. Sokerijuurikkaalla selityksaste oli 7,0 % ja maissilla 10,7 %. Selityksasteiden pienuus johtui mittausvirheistä, sillä penetrometrillä oli hyvin vaikea jäljittää kaikkia juuren kulkureittejä, ja mekaaninen vastus saattoi vaihdella hyvinkin voimakkaasti juuren lähiympäristössä aiheuttaen tulkintavaikeuksia. Penetrometripiistot pyrittiin

tekemään kohtisuoraan alaspäin, vaikka joskus juuren kasvusuuntaa olisaattanut muuttaa muualla juuren ympäristössä oleva kova kokkare tai myös halkeama, johon juuri oli kasvanut pienemmän mekaanisen vastuksen vuoksi. Penetrometrilukemat eivät siten aina kuvanneet juuren kohtaamia mekaanisia vastuksia. Varsinkin sokerijuurikkaan juuri kasvoi usein kohtisuoraan alaspäin, vaikka taskupenetrometri antoi yli 1500 g:n mekaanisia vastuksia, ja juuri oletettavasti kasvoi tällöin pienessä halkeamassa. Sokerijuurikkaan regressiokäyrän muoto kuvaa myös juurien kasvusuunnan (poikkeaman pystysuunnasta) pienenemistä 1500 g:a suuremmissa mekaanisissa vastuksissa, mikä selittyy juuri tulkintavaikeuksista juuren kasvaessa kovan maan halkeamissa suoraan alaspäin.

Juuren taipuminen ei selity ainoastaan siitä mekaanisesta vastuksesta, jonka juuren kärki kohtaa, vaan myös aiemmasta juuren kasvuympäristöstä. Juuren taipumiseen vaadittava jännitys lisääntyy WHITELEYn ym. (1982) mukaan juuren paksuuntuessa. Jos juuri on aiemmin kasvanut suuressa mekaanisessa vastuksessa ja paksuuntunut, juurella on paremmat edellytykset läpäistä tuleva kova maakerros taipumatta kuin pehmeässä maassa kasvaneella ohuella ja helposti taipuvalla juurella. Koska taipuminen näin riippuu maan kovuudesta, josta juuri kasvaa, perättäisten kasvusuuntien erotusten ja perättäisten mekaanisten vastusten erotusten välinen regressioanalyysi antoi paremmat selitysasteet sekä sokerijuurikkaalle että maissille kuin yksittäisten mittausten välinen regressioanalyysi. Erotukset korreloivat toisiaan positiivisesti, eli mitä suurempi on mekaanisen vastuksen ero juuren kasvaessa maakerroksesta toiseen, sen suurempi on myös kasvusuunnan välinen ero eli juuren taipuminen. Kasvusuunnan muutosta voitiin selittää mekaanisen vastuksen muutoksella 14,5 %:n selitysasteella sokerijuurikkaalla ja 22,6 %:n selitysasteella maissilla. Tämä riippuvuus pitäneekään paikkansa myös juuren kasvaessa kovasta maasta pehmeään. Tällöin juuri yleisesti läpäisee pehmeän maan ilman taipumista, ellei pehmeänkin maan mekaaninen vastus ylitä juuren kasvupainetta (DEXTER ja HEWITT 1978). Kovassa maassa juuri on todennäköisesti

kasvanut vinosti ja kasvaessaan pehmeään maahan se suoristuu, jolloin mekaanisten vastusten välinen erotus kovassa ja pehmeässä maassa on positiivisessa korrelaatiossa juuren suoristuman suuruuden kanssa.

3.5 Mekaanisen vastuksen aiheuttamat morfologiset muutokset juurissa

Sekä sokerijuurikkaan että maissin juurilla oli selvästi kyky taipua ja välttää kovia kohtia maassa. Myös DEXTER ja HEWITT (1978) totesivat juuren pystyvän mutkittelemaan ja välttämään mekaanista vastusta. WHITELEYn ym. (1982) toteama juuren taipumiseen liittyvä juuren paksuuntuminen näkyi myös selvästi kaivettujen juurien morfologiassa. Juuren ohittaessa kovan kohdan se jälleen ohentui normaalin paksuiseksi ABDALLAn ym. (1969) kuvaamalla tavalla. Paksuuntumisen yhteydessä juuret pyrkivät haaroittumaan, mikäli juuren ympärillä oli juuren haaroja suurempia huokosia, joissa haaroilla oli mahdollisuus kehittyä. Joskus haarat jäivät lyhyiksi, jolloin huokokset lienevät olleet lyhyitä eivätkä jatkuvia. Juuri saattoi myös paksuuntua ilman paksun juuren osan haaroittumista, jolloin mekaaninen vastus esti ehkä myös haarojen muodostumisen. Jos tällainen paksuuntunut haaroittumaton juuri kasvoi onkaloon tai suurempaan halkeamaan, seurasi usein intensiivinen runsas haaroittuminen, joka pyrki korvaamaan aiemmin puristuksissa ollutta kasvua. Tämä ilmiö näkyi niin sokerijuurikkaan kuin maissinkin juurissa. Myös BROUWER (1966), DREW ja GOSS (1974), RUSSELL ja GOSS (1974) sekä VOORHEES ym. (1975) ovat todenneet tyrehtyneen primäärisen juuren pituuskasvun korvautuvan haaroittumisella, mikä on merkinä liian suuresta mekaanisesta vastuksesta.

Morfologisia muutoksia juuriin alkoi ilmaantua 1000 g:n molemmin puolin. Sokerijuurikas taipui yleensä kohdatessaan 1200 g:n maakokkareen tai tiivistymän. Maissi kasvoi vaakasuoraan ja haaroittui jo hieman yli 400 g:n mekaanisessa vastuksessa, joskus jopa vieläkin alhaisemmassa mekaanisessa

vastuksessa. Samoin olkimatot ehkäisivät juuren suoraa kasvua, vaikka oljen mekaaninen vastus oli alle 500 g, eli suhteellisen alhainen. ERIKSSONin ym. (1974) mukaan juureen vaikuttava kriittinen mekaaninen vastus voi vaihdella 800-5000 kPa, ja ERIKSSONin (1982) mukaan penetrometrit antavat yleensä 3-5 kertaa juuren kohtaamaa mekaanista vastusta suuremman arvon. Juurella on kyky etsiä pienimmän mekaanisen vastuksen reitit, joita pienelläkin penetrometrillä on vaikea jäljittää, erittää limaa ja paksuuntua. Siten on hyvin vaikea esittää selvää rajaa, jossa penetrometrimittausten perusteella juuren morfologiassa tapahtuu selviä muutoksia.

Todettakoon, etteivät morfologiset muutokset olleet välttämättä vain mekaanisen vastuksen aiheuttamia, vaan tiivistymissä maan ilmatilan puute saattoi myös vaikuttaa juuren kasvuun (EAVIS ym. 1969, SAINI 1979).

3.6 Tiivistyskäsittelyjen vaikutus orastuvuuteen ja sadonmuodostukseen

Tiivistyskäsittelyt eivät vaikuttaneet orastumiseen, sillä tiivistäminen ei vaikuttanut pintakerroksen mekaaniseen vastukseen. Orastuminen oli tasaista, eikä 700 kPa:in mekaaninen vastus häirinyt orastumista. Vasta yli 1000 kPa:in vastuksen onkin todettu vaikuttaneen merkittävästi orastuvuuteen (STIBBE ja TERPSTRA 1981).

Tiivistyskäsittelyt eivät johtaneet sadonalennuksiin, vaikka vastaava kevättiivistys (3 x 3000 kg:n akselipaino) on muina vuosina aiheuttanut kevätvehnän sadonalennusta 20-30 % (ELONEN 1980). Samoin ERIKSSON (1982) piti 200 kPa:in pintapaineen tiivistyskäsittelyä kriittisenä raja-arvona, sillä tätä korkeampi pintapaine johti kasvien elinolojen merkittävään heikkenemiseen. Kuitenkaan tämän kokeen 120 kPa:in pintapaine neljästi toistamallakaan ei johtanut minkäänlaisiin sadonalennuksiin.

Tiivistyskäsittelyjen tehottomuus johtui osaksi maan kosteus-tilasta. Koekenttä oli tiivistyshetkellä erittäin kuiva verrattuna yleensä kevättiivistyksen ajankohtana olevaan pellon kosteustilaan. Tiivistymisvaikutus ei siten ollut samaa luokkaa kuin muina vuosina tehdyissä savimaan kokeissa (ELONEN 1980).

Todettakoon, että ERIKSSON (1982) oli päätenyt 200 kPa:n kriittiseen raja-arvoon tiivistäessään erittäin märkää maata, jonka p_F oli 0,7.

Maa oli myös jo alkuaan tiivis ja kantava, eikä tiivistyskäsittely tehonnut niin kuin kuohkeaa maata tiivistettäessä. Maa ei siten enää absorboinut energiaa ja tiivistynyt plastisesti, vaan tiivistysvaikutus oli lähinnä elastista.

Lisäksi maa oli hyvin heterogeeninen savimaa, jossa oli runsaasti halkeamia. Vaikka mekaaninen vastus hieman nousikin tiivistyskäsittelyillä, se ei riittänyt sadonalennuksiin, sillä juuret hakivat pienimmän mekaanisen vastuksen reitit, lieronreiät, halkeamat. Samoin paikoin tyrehtynyttä juuren pituuskasvua oli mahdollisuus korvata haaroittumisella raoissa ja onkaloissa, eikä juurien absorboiva pinta-ala siten välttämättä vähentynyt. Kasvit kärsivät kuitenkin selvästi vedenpuutteesta, ja kuohkeassa maassa juuret olisivat todennäköisesti kasvaneet syvemmälle kostempaan maahan. Koska tiivistämättömät ruudutkin olivat jo ennestään tiiviitä, tätä eroa ei voitu testata. Jos koekentän tiivistämättömät ruudut olisivat olleet todella tiivistymättömiä, niin satoerojakin olisi luultavasti saatu. Koe oli siten puutteellinen.

Sokerijuurikkaan parempi sato yhteen kertaan tiivistetyissä ruuduissa johtunee B_1 -käsittelyn jyrävästä vaikutuksesta ja siten karkeaksi jääneen kylvöalustan hienontumisesta ja kosteusolosuhteiden parantumisesta kehityksen alkuvaiheissa.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- ABDALLA, A. M., HETTIARATCHI, D. R. P. & REECE, A. R. 1969. The mechanics of root growth in granular media. J. Agric. Engng. Res. 14: 236-248.
- AFFLECK, B., KIRKHAM, Don & BUCHELE, W. F. 1976. Seedbed preparation for optimum temperature, moisture, aeration and mechanical impedance. Proc. 7th Conf. Intern. Soil Till. Res. Org. ISTRO, Uppsala, Sweden. Rep. Div. Soil Management 45: 1/1-6.
- AGRAWAL, R. P. 1976. Soil compaction and shallow depths and crop growth. Proc. 7th Conf. Intern. Soil Till. Res. Org. ISTRO, Uppsala, Sweden. Rep. Div. Soil Management 45: 2/1-6.
- ALLISON, L. E. 1969. Organic carbon. Agronomy 9: 1367-1378.
- ANDERSEN, M. N. 1985. Planternes tørkeresistens, rodudvikling og vandforråd på sandjord. (Drought resistance, root development and soil water supply on sandy soil). Tidsskrift for Planteavl's Specialserie. Beretning N:o S 1775, p. 22-37. København.
- ANDERSON, G., PIDGEON, J. D., SPENCER, H. B. & PARKS, R. 1980. A new hand-held recording penetrometer for soil studies. J. Soil Sci. 31: 279-296.
- ANON. 1979. Instruction manual for use of bush recordings soil penetrometer. Finlay, Irvine Limited. Boy road, Penicuik, Midlothian, Scotland. 35 p.
- 1983. SPSSX Userguide. 806 p. New York.
- 1985. Kuukausikatsaus Suomen ilmastoon 79: huhti-syyskuu. Ilmatieteen laitos.
- 1986. Viljavuustutkimuksen tulkinta peltoviljelyssä. Viljavuuspalvelu. 63 p.
- AURA, E. 1983. Soil compaction by the tractor in spring and its effect on soil porosity. J. Scient. Agric. Soc. Finl. 55: 91-107.

- BALIGAR, V. C., NASH, V. E., HARE, M. L. & PRICE Jr., J. A. 1975. Soybean root anatomy as influenced by soil bulk density. *Agron. J.* 67: 842-844.
- BARLEY, K. P. 1962. The effects of mechanical stress on the growth of roots. *J. Exptl. Botany* 13: 95-110.
- 1970. The configuration of root system in relation to nutrient uptake. *Adv. Agron.* 22: 159-201.
- , FARRELL, D. A. & GREACEN, E. L. 1965. The influence of soil strength on the penetration of a loam by plant roots. *Austral. J. Soil Res.* 3: 69-79.
- BERTILSSON, G. 1969. Studier över tryckets markpåverkan. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen 18:1-20. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- BISHOP, A. W. & BLIGHT, G. E. 1963. Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. *Geotechnique* 13: 177-197.
- BLAKE, G. R. 1965. Particle density. *Agronomy* 9: 371-373.
- BOWEN, H. D. 1981. Alleviating mechanical impedance. Modifying the root environment to reduce crop stress. *Trans. ASAE Monogr.* 4: 21-57.
- BRACEGIRDLE, B. & MILES, P. H. 1983. *An Atlas of Plant Structure.* Vol 1. p.123. 6th Ed. London.
- BROUWER, R. 1966. Root growth of grasses and cereals. Milthorp, F. L. & Ivins, J. L. (ed.) *The Growth of Cereals and Grasses.* p. 153-166. London.
- BYRD, C. W. & CASSEL, D. K. 1980. The effect of sand content upon cone index and selected physical properties. *Soil Sci.* 129: 197-204.
- CALLOT, G., CHAMAYOU, H., MAERTENS, C. & SALSAC, L. 1982. Croissance et développement du système racinaire. Les Interactions Sol-Racine, Incidence sur la Nutrition Minérale, I.N.R.A. p. 209-218. Paris.
- CAMP, C. R. & GILL, W. R. 1969. The effect of drying on soil parameters. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33: 641-644.
- CANNELL, R. Q. & DREW, M. C. 1973. Plant root systems and crop growth. *Span* 16: 38-40.

- CASSEL, D. K. & NELSON, L. A. 1979. Variability of mechanical impedance in a tilled one-hectare field of Norfolk sandy loam. *Soil Sci. Amer. J.* 43: 450-455.
- CHAMPION, R. A. & BARLEY, K. P. 1969. Penetration of clay by root hairs. *Soil Sci.* 108: 402-407.
- CHAUDHARY, M. R. & AGGARWAL, G. C. 1984. A simple technique to evaluate the effect of mechanical stress on root growth. *J. Agric. Sci.* 102: 79-80.
- CROSSETT, R. N. & CAMPBELL, D. J. 1975. The effects of ethylene in the root environment upon the development of barley. *Pl. Soil* 42: 453-464.
- , CAMPBELL, D. J. & STEWART, H. E. 1975. Compensatory growth in cereal root systems. *Pl. Soil* 42: 673-683.
- DEXTER, A.R. & HEWITT, J. S. 1978. The deflection of plant roots. *J. Agric. Engng. Res.* 23: 17-22.
- DREW, M. C. 1979. Root development and activities. *International Biological Programme* 16: 573-606.
- & GOSS, M. J. 1973. Effect of soil physical factors on root growth. *Chem. Ind.* 21: 679-684.
- & GOSS, M. J. 1974. Environmental stress and the growth of barley root systems: The effect of nutrient ion concentration and mechanical impedance. Mechanism of regulation of plant growth. *Bull. Royal. Soc. New Zealand* 12: 111-119.
- DURRANT, M. J., LOVE, B. J. G. MESSEM, A. B. & DRAYCOTT, A. P. 1973. Growth of crop roots in relation to soil moisture extraction. *Ann. Appl. Biol.* 74: 387-394.
- EAVIS, B. W. 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth. *Pl. Soil* 36: 613-622.
- , RATLIFF, L. F. & TAYLOR, H. M. 1969. Use of dead-load technique to determine axial root growth pressure. *Agron. J.* 61: 640-643.
- EHLERS, W., KÖPKE, U., HESSE, F. & BÖHM, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil & Till. Res.* 3: 261-275.
- ELLIOT, M. C. 1980. Auksiinit. Kallio, P. & Rousi, A. (ed.) *Kasvien Maailma* 1. p. 135-137. Keuruu.

- ELONEN, P. 1971. Particle-size analysis of soil. *Acta Agr. Fenn.* 122: 1-122.
- 1974. Paripyörillä parempiin satoihin. *Käytännön Maamies* 4: 24-27.
- 1980. Soil compaction- a severe problem in Finnish agriculture. *Rapporter från jordbearbetningsavdelningen* 60: 41-45. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- ERIKSSON, J. 1982. Markpackning och rotmiljö. (Soil compaction and root environment). Div. Agric. Hydrotechnics, Sw. Univ. Agric. Sci., Report 126. 138 p. Uppsala.
- , HÅKANSSON, I. & DANFORS, B. 1974. Jordpackning-markstruktur-gröda. Jordbrukstekniska institutet, Medd. 354. 82 p. Uppsala.
- FELDMAN, L. J. 1980. Auxin biosynthesis and metabolism in isolated roots of *Zea mays*. *Physiol. Pl.* 49: 145-150.
- FERGEDAL, L. 1971. Jordpackning av traktor vid vårdbruket. *Rapporter från jordbearbetningsavdelningen* 26: 1-140. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- GERARD, C. J. 1965. The influence of soil moisture, soil texture, drying conditions and exchangeable cations on soil strenght. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29: 641-645.
- , CROWLEY, W. R., BURLESON, C. A. & BLOODWORTH, B. E. 1962. Soil hardpan formation as affected by rate of moisture loss, cuclic wetting and drying and surface-applied forces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26: 601-605.
- GILL, W. R. 1961. Mechanical impedance of plants by compact soils. *Trans. ASAE Monogr.* 4: 238-242.
- & BOLT, G. W. 1955. Preffer's studies of the root growth pressures exerted by plants. *Agron. J.* 47: 166-168.
- & MILLER, R. D. 1956. A method for study of the influence of mechanical impedance and aeration on the growth of seedling roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 20: 154-157.
- GOODWIN, P. B. & MORRIS, S. C. 1979. Application of phytohormones to pea roots after removal of the apex. Effect on lateral root production. *Aust. J. Pl. Physiol.* 6: 195-200.

- GOSS, M. J. 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). *J. Exp. Bot.* 28: 96-111.
- & RUSSELL, R. S. 1980. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L.). III Observations on the mechanism of response. *J. Exp. Bot.* 31: 577-588.
- GREACEN, E. L., BARLEY, K. P. & FARRELL, D. A. 1969. Mechanics of root growth in soils with particular reference to the implication of root distribution. Whittington, W. J. (ed.) *Root Growth*. p. 256-269. London.
- & OH, J. S. 1972. Physics of root growth. *Nature New Biol.* 235: 24-25.
- HEINONEN, R. 1960. A soil core sampler with provision for cutting successive layers. *J. Scient. Agric. Soc. Finl.* 32: 176-178.
- 1982. Jordens igenslamning och förhårdnande. Speciella skrifter 12. Sveriges Lantbruksuniversitet. 24 p. Uppsala.
- 1983. Specifika styrningsfaktorer för rotutvecklingen. Konsulentavdelningens rapporter. Allmänt 47: 49-53. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- HEMSATH, D. L. & MATZURAK, A. P. 1974. Seedling growth of sorghum in clay-sand mixtures at compaction and water contents. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38: 387-390.
- HESS, D. 1975. Cell elongation. *Plant Physiology*. p. 231-235. New York.
- HIDDING, A. P. & VAN DEN BERG, C. 1960. The relation between pore volume and the formation of root systems in soils with sandy layers. *Trans. 7th Int. Cong. Soil Sci.* 1: 369-373.
- HORGAN, R. 1980. Abkissihappo. Kallio, P. & Rousi, A. (ed.) *Kasvien Maailma* 1. p. 23. Keuruu.
- HURD, E. A. 1968. Growth of roots of seven varieties of spring wheat at high and low moisture levels. *Agron. J.* 60: 201-205.

- HÅKANSSON, I. 1979. Försök med jordpackning vid hög axelbelastning. Markundersökningar 1-2 år efter försökens anläggande. Rapporter från jordbearbetningsavdelningen 57: 1-15. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- 1986. Jordpackningens effekter på grödornas avkastning. Konsulentavdelningens rapporter, Allmänt 84: 18/ 1-7. Sveriges Lantbruksuniversitet, Uppsala.
- JUNIPER, B. E. 1980. Juurihuntu. Kallio, P. & Rousi, A. (ed.) Kasvien Maailma 2. p. 583-584. Keuruu.
- , GROVES, S., LANDAU-SCHACHAR, B. & AUDUS, L. J. 1966. Root cap and the perception of gravity. *Nature* 209: 93-94.
- JUUSELA, T. & WÄRE, M. 1956. Suomen peltojen kuivatustila. Draining condition of the cultivated fields in Finland. *Soil- and Hydrotechn. Res.* 8: 1-89.
- KAYS, S. J., NICKLOW, C. W. & SIMONS, D. H. 1974. Ethylene in relation to the response of roots to physical impedance. *Pl. Soil* 40: 565-571.
- KUNDU, K. K. & AUDUS, L. J. 1974. Root growth inhibitors from root cap and root meristem of *Zea mays* L. *J. Exp. Bot.* 25: 479-489.
- LACHNO, D. R., HARRISON-MURRAY, R. S. & AUDUS, L. J. 1982. The effects of mechanical impedance to growth on the levels of ABA and IAA in root tips of *Zea mays* L. *J. Exp. Bot.* 33: 943-951.
- LARQUÉ-SAAVEDRA, A., WILKINS, H. & WAIN, R. L. 1975. Promotion of cress root elongation in white light by 3,5-diiodo-4-hydroxybenzoic acid. *Planta* 126: 269-272.
- LEHTONEN, J. 1980. Juuri. Kallio, P. & Rousi, A. (ed.) *Kasvien Maailma* 2. p. 579-583. Keuruu.
- LEMOS, P. & LUTZ, J. F. 1957. Soil crusting and some factors affecting it. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 21: 485-491.
- LOWRY, F. E., TAYLOR, H. M. & HUCK, M. G. 1970. Growth rate and yield of cotton as influenced by depth and bulk density of soil pans. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 306-309.
- LUTZ, J. F. 1952. Mechanical impedance and plant growth. *Agronomy* 2: 43-71.

- McGOWAN, M., WELLINGS, S. R. & FRY, G. J. 1983. The structural improvement of damaged clay subsoils. *J. Soil Sci.* 34: 233-248.
- McKYES, E. 1985. Soil cutting and tillage. *Developments in Agric. Engineering* 7: 11-35.
- MADSEN, H. B. 1978. Bygs rodudvikling i relation til fysiske parametre i naturlig lejret jord. *Tidsskr. Planteavl.* 82: 335-342.
- MAERTENS, C. 1964. Influence des propriétés physiques des sols sur le développement racinaire et conséquences sur l'alimentation hydrique et azotée des cultures. *Sci. Sol* 2: 1-11.
- MARSHALL, T. J. & HOLMES, J. W. 1979. *Soil Physics*. 345 p. London.
- MILTHORPE, F. L & MOORBY, J. 1981. *An Introduction to Crop Physiology*. 246 p. 2nd Ed. London.
- NASH, V. E. & BALIGAR, V. C. 1974. The growth of soybean (*Glycine max*) roots in relation to soil micromorphology. *Pl. Soil* 41: 81-89.
- PAYNE, P. C. J. & FOUNTAINE, E. R. 1952. A field method of measuring the shear strength of soils. *J. Soil Sci.* 3: 136-144.
- PHILLIPS, R. E. & KIRKHAM, Don 1962. Soil compaction in field and corn growth. *Agron. J.* 54: 29-33.
- POHJANHEIMO, O. & HEINONEN, R. 1960. The effect of irrigation on root development, water use, nitrogen uptake and yield characteristics of several barley varieties. *Acta Agric. Fenn.* 95: 1-20.
- PRIHAR, S. S., CHOWDHARY, M. R. & VARGHESE, T. M. 1971. Effect of post-planting loosening of unstable soil on the anatomy of corn root. *Pl. Soil* 35: 57-63.
- PYYKKÖ, M. 1980. Putkilokasvien kasvullisten elinten anatomiaa. *Kasvianatomia*. p. 149-221. Hämeenlinna.
- RICHARDS, L. A. 1948. Porous plate apparatus for measuring moisture retention and transmission by soil. *Soil Sci.* 66: 105-110.

- 1953. Modulus of rupture as an index of crusting of soil. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 17: 321-323.
- RIVIER, L. & PILET, P-E. 1981. ABA levels in the root tips of seven Zea mays varieties. Phytochemistry 20: 17-19.
- RUSSELL, R. S. 1977. Plant Root Systems: Their Function and Interaction with the Soil. 298 p. London.
- & GOSS, M. J. 1974. Physical aspects of soil fertility. The response of roots to mechanical impedance. Neth. J. Agric. Sci. 22: 305-318.
- & SHONE, M. G. T. 1972. Root function and the soil. Proc. 11th British Weed Control Conf. 3: 1183-1192.
- SAARINEVA, J. 1979. Lujuusoppi, peruskurssi. Sonator, Tampere.
- SAINI, G. R. 1979. Root elongation and plant growth in a basal till compact soil treated with 3,5-diiodo-4-hydroxybenzoic acid and gibberellic acid. Agron. J. 71: 1067-1070.
- SALLBERG, J. R. 1965. Shear strenght. Agronomy 9: 431-447.
- SCHUURMAN, J. J. & BOER, J. J. H. de 1974. The effect of soil compaction at various depths on root and shoot growth of oats. Neth. J. Agric. Sci. 22: 133-142.
- SIPPOLA, J. 1982. A comparison between a drycombustion method and a rapid wetcombustion method for determining soil organic carbon. Ann. Agric. Fenn. 21: 146-148.
- SMITH, K. A. & RESTALL, S. W. F. 1971. The occurrence of ethylene in anaerobic soil. J. Soil Sci. 22: 430-443.
- SOANE, B. D., BLACKWELL, P. S., DICKSON, J. W. & PAINTER, D. J. 1980. Compaction by agricultural vehicles: A review II. Compaction under tyres and other running gear. Soil & Till. Res. 1: 373-400.
- STIBBE, E. & TERPSTRA, R. 1981. Effect of penetration resistance on emergence and early growth of silage corn in a laboratory experiment with sandy soil. Soil & Till. Res. 2: 143-153.
- , TERPSTRA, R. & KOUWENHOVEN, J. K. 1980. Effect of spring tillage on seedbed characteristics, plant establishment and yield of silage corn on a light sandy soil. Soil & Till. Res. 1: 47-56.

- STITT, R. E., CASSEL, D. K., WEED, S. B. & NELSON, L. A.
1982. Mechanical impedance of tillage pans in Atlantic Coastal Plains soils and relationships with soil physical, chemical and mineralogical properties. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 46: 100-106.
- SUBOTIĆ, B. & STANAČEV, S. 1982. Effect of the depth of basic tillage and additional soil compaction after harvest on the yield, deformations and diseases of sugarbeet roots. *Proc. 9th Conf. Intern. Soil Till. Res. Org., ISTRO, Osijek, Yugoslavia.* p. 243-248.
- TACKETT, J. L. & PEARSON, R. W. 1964. Oxygen requirements of cotton seedling roots for penetration of compacted soil cores. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28: 600-605.
- TAYLOR, H. M. 1976. The effect of soil compaction on rooting patterns and water uptake of cotton. *Proc. 7th Conf. Intern. Soil Till. Res. Org., ISTRO, Uppsala, Sweden. Rep. Div. Soil Management* 45: 43/1-4.
- 1981. Root zone modification: fundamentals and alternatives *Trans. ASAE* 4: 3-16.
- & BURNETT E. 1964. Influence of soil strenght on the root growth habits of plants. *Soil Sci.* 98: 174-180.
- & GARDNER, H. R. 1963. Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk density, moisture content and strenght of soil. *Soil Sci.* 96: 153-156.
- , HUCK, M. G. & KLEPPER, B. 1972. Root development in relation to soil physical conditions. Hillel, D. (ed.) *Optimizing the Soil Physical Environment Toward Greater Crop Yields.* p. 57-77. London.
- , LOCKE L. F. & BOX, J. E. 1964. Pans in Southern Great Plains soils. III Their effects on yield of cotton and grain sorghum. *Agron. J.* 56: 542-545.
- & RATLIFF, L. E. 1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strenght and soil water content. *Soil Sci.* 108: 113-119.
- TAYLOR, S. A. 1972. Energy relations of plant water. *Physical Edaphology.* p. 178-183. San Francisco.

- TORREY, J. G. 1956. Physiology of root elongation. *A. Rev. Pl. Physiol.* 7: 237-266.
- 1976. Root hormones and plant growth. *A. Rev. Pl. Physiol.* 27: 435-459.
- TROUSE, A. C. & HUMBERT, R. P. 1961. Some effects of soil compaction on the development of sugar cane roots. *Soil Sci.* 91: 208-217.
- VOORHEES, W. B. 1976. Plant response to wheel-traffic- induced soil compaction in the northern corn belt of the United States. *Proc. 7th Conf. Intern. Soil Till. Res. Org., ISTRO, Uppsala, Sweden, Rep. Div. Soil Management* 45: 44/1-6.
- , FARRELL, D. A. & LARSON, W. E. 1975. Soil strength and aeration effects on root elongation. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 39: 948-953.
- WARNAAS, B. C. & EAVIS, B. W. 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth. II Mechanical impedance, aeration and moisture availability as influenced by grain-size distribution and moisture content in silica sands. *Pl. Soil* 36: 623-634.
- WHITELEY, G. M. & DEXTER, A. R. 1981 a. The dependence of soil penetrometer pressure on penetrometer size. *J. Agric. Engn. Res.* 26: 467-476,
- & DEXTER, A. R. 1981 b. Elastic response of the roots of field crops. *Physiol. Plant.* 51: 407-417.
- & DEXTER, A. R. 1983. Behaviour of roots in cracks between soil beds. *Pl. Soil* 74: 153-162.
- , HEWITT, J. S. & DEXTER, A. R. 1982. The buckling of plant roots. *Physiol. Plant.* 54: 333-342.
- , UTOMO, W. H. & DEXTER, A. R. 1981. A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Pl. Soil* 61: 351-364.
- WIERSUM, L. K. 1957. The relationship of the size and structural rigidity of pores to their penetration by roots. *Pl. Soil.* 9: 75-85.

- WIKLERT, P. 1961. Om sambandet mellan markstruktur, rotutveckling och upptorkningsförlopp. Grundförbättring 14: 221-239.
- WIGHTMAN, F., SCHNEIDER, E. A. & THIMANN, K. V. 1980. Hormonal factors controlling the initiation and development of lateral roots. II Effect of exogenous growth factors on lateral root formation in pea roots. *Physiol. Plant.* 49: 304-314.
- WILKINS, S., WILKINS, H. & WAIN, R. L. 1976. Chemical treatment of soil alleviates effect of soil compaction on pea seedling growth. *Nature* 259: 392-394.
- WILSON, A. J., ROBARDS, A. W. & GOSS, M. J. 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley *Hordeum vulgare* L. II Effects on cell development in seminal roots. *J. Exp. Bot.* 28: 1216-1227.
- ÅBERG, B. 1957. Auxin relations in roots. *A. Rev. Pl. Physiol.* 8: 153-180.

Liite 1. Mekaaniset vastukset kPa:eina eri tiivistyskäsitelyissä kartiokärkisellä penetrometrillä mitattuina ruuduttain määritetyn mediaanin keskiarvoina keskiarvon keskivirheineen.

$$(\bar{x} - s_{\bar{x}}; S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}; n = 12)$$

syvyys cm	B ₀	B ₁	B ₂	B ₄
3,5	120 ± 20	180 ± 20	160 ± 20	230 ± 30
7	590 ± 40	570 ± 30	560 ± 40	650 ± 30
10,5	1790 ± 70	1860 ± 120	1620 ± 110	2020 ± 100
14	1940 ± 80	2040 ± 50	2120 ± 90	2320 ± 50
17,5	1640 ± 90	1880 ± 40	1930 ± 90	2110 ± 60
21	1300 ± 60	1590 ± 70	1550 ± 60	1720 ± 80
24,5	1240 ± 60	1490 ± 100	1500 ± 80	1630 ± 100
28	2070 ± 70	2130 ± 90	1960 ± 130	2160 ± 170
31,5	2370 ± 120	2220 ± 120	2070 ± 130	2390 ± 150
35	2200 ± 140	1970 ± 110	1890 ± 110	2060 ± 160
38,5	1890 ± 120	1770 ± 90	1750 ± 100	1850 ± 140
42	1750 ± 90	1600 ± 60	1590 ± 60	1590 ± 70
45,5	1590 ± 70	1570 ± 60	1540 ± 60	1580 ± 60
49	1630 ± 80	1560 ± 50	1550 ± 70	1660 ± 60
52,5	1670 ± 70	1600 ± 50	1660 ± 70	1690 ± 70

Liite 2. Maan vesipitoisuudet tilavuusprosentteina B_0 - ja B_4 -ruuduissa eri pF-pisteissä kahdeksan näytteen keskiarvoina keskiarvojen keskivirheineen.

	imu kPa	ekvivalentti huokoskoko mm	syvyys cm	B_0	B_4
pF 0,4	0,25	1,2	0 - 10	48,7 ± 0,7	48,5 ± 0,9
			10 - 20	47,5 ± 0,7	46,4 ± 0,7
			20 - 30	45,0 ± 1,2	47,0 ± 0,9
			30 - 40	45,3 ± 1,1	48,7 ± 0,7
pF 1	1	0,3	0 - 10	45,9 ± 0,9	46,3 ± 1,0
			10 - 20	45,6 ± 0,7	45,4 ± 0,6
			20 - 30	44,0 ± 1,1	46,1 ± 0,8
			30 - 40	44,7 ± 1,2	43,2 ± 0,7
pF 2	10	0,03	0 - 10	40,2 ± 0,8	41,0 ± 1,0
			10 - 20	41,7 ± 0,7	42,5 ± 0,7
			20 - 30	41,4 ± 1,0	43,0 ± 0,7
			30 - 40	42,9 ± 1,5	41,5 ± 0,9
pF 3	100	0,003	0 - 10	34,5 ± 0,7	35,5 ± 1,2
			10 - 20	36,5 ± 0,7	37,7 ± 0,6
			20 - 30	37,3 ± 0,9	38,6 ± 0,5
			30 - 40	39,3 ± 1,5	37,9 ± 1,0
pF 4,2 (kahden näytteen keskiarvot)	1500	0,0002	0 - 10	27,7 ± 0,9	28,6 ± 1,1
			10 - 20	31,6 ± 2,3	32,7 ± 1,5
			20 - 30	32,1 ± 0,6	30,9 ± 3,6
			30 - 40	36,5 ± 0,6	34,0 ± 1,9



Kuva A. Maan tiivistyessä juureen kohdistuva maan mekaaninen vastus kasvaa. Kun pitenevän juuren aiheuttama kasvupaine ei pysty enää voittamaan maan aiheuttamaa vastusta, juuren pituuskasvu estyy, ja juuren kärjen kasvu häiriintyy. (maissi)



Kuva B. Juurella on kyky taipua ja välttää kovia kohtia maassa. Tiivistyneessäkin maassa juuren kasvuympäristössä voi olla halkeamia ja onkaloita, joihin juuri suuntaa kasvunsa. (sokerijuurikas)



Kuva C. Juuri voi kasvaa aivan vaakatasossa tai jopa hieman ylöspäin tiivistymän seinämää pitkin ja jatkaa taas alaspäin mekaanisen vastuksen pienentyessä. Mutkittelemalla ja kierteisesti kasvaen juuri seuraa pienimmän mekaanisen vastuksen reittiä. (sokerijuurikas)



Kuva D. Liiallisesta maan tiivyydestä kärsivän juuren tuntomerkkeihin kuuluu myös osittainen paksuuntuminen. Tämä tapahtuu juuren kärjen takana, jolloin juuri muodostaa normaalia tehokkaamman kiilan, mikä vähentää juuren kärjen kohtaamaa painetta. Kun juuri on ohittanut kovan kohdan, se jälleen ohentuu. (maissi)



Kuva E. Paksuuntumisen yhteydessä juuret pyrkivät haaroittumaan, mikäli juuren ympärillä on juuren haaroja suurempia huokosia, joissa haaroilla on mahdollisuus kehittyä. (maissi)



Kuva F. Juuri saattaa paksuuntua ilman paksun juurenosan haaroittumista, jos mekaaninen vastus estää juurihaarojen muodostumisen. Mikäli tällainen paksuuntunut haaroittumaton juuri kasvaa onkaloon tai suurempaan halkeamaan, seuraa usein runsas haaroittuminen, joka korvaa aiemmin puristuksissa ollutta kasvua. (sokerijuurikas)

MAATALOUDEN TUTKIMUSKESKUKSEN TIEDOTTEET

1983

1. Maatalouden tutkimuskeskuksen yksiköiden tiedotteet 1975-1982. 48 p.
2. KONTTURI, M. Mallasohra - kirjallisuuskatsaus. 42 p.
3. NORDLUND, A. & ESALA, M. Maatalouden sääpalvelut ulkomailla. Kirjallisuustutkimus. 66 p.
4. MUSTONEN, L., PULLI, S., RANTANEN, O. & MATTILA, L. Virallisten lajikekokeiden tuloksia 1975-1982. 186 p. + 4 liitettä.
5. SUONURMI-RASI, R. & HUOKUNA, E. Kaliumin lannoitustason ja -tavan vaikutus tuorerehunurmien satoihin ja maiden K-pitoisuuksiin. 13 p. + 8 liitettä.
6. KEMPPAINEN, E. & HEIMO, M. Förbättring av stallgödselns utnyttjande. Litteraturöversikt. 81 p.
7. MULTAMÄKI, K. & KASEVA, A. Kotimaiset lajikkeet. 10 p.
8. LÖFSTRÖM, I. Kasvien sisältämät aineet tuholaistorjunnassa. 26 p.
9. HEIKINHEIMO, O. Kirvojen preparointi ja määrittäminen. 67 p. + 12 liitettä.
10. SAARELA, I. Soklin fosforimalmi fosforilannoitteena. p. 1-13. Humuspitoiset lannoitteet. p. 14-20.
11. YLÄRANTA, T. Jordanalyset i de nordiska länderna. 13 p.
12. LUOMA, S. & HAKKOLA, H. Avomaan vihanneskasvien lajikekokeiden tuloksia vuosilta 1979-1982. 21 p.
13. KIVISAARI, S. & LARPES, G. Kylvöajankohdan vaikutus kevätvehnän, ohran ja kauran satoon 10-vuotiskautena 1970-1979 Tikkurilassa. 54 p.
14. ERVIÖ, R. Maaperäkarttaselitys. ESPOO - INKOO. 26 p.
15. BREMER, K. Ydinkasvien tuottaminen kasvisolukkoviljelyn avulla. 63 p.

1984

1. Tiivistelmät eräistä MTTK:n julkaisuista 1983. 74 p.

2. ESALA, M. & LARPES, G. Kevätviljojen sijoituslannoitus savimailla. 35 p.
3. ETTALA, E. Ayrshire-, friisiläis- ja suomenkarjalehmien vertailu kotoisilla rehuilla. 7 p. + 18 liitettä.
4. LUOMA, S. & HAKKOLA, H. Keräkaalin lajikekokeiden tuloksia vuosilta 1975-1983. 22 p.
5. KURKI, L. Tomaattilajikkeet ja hiilidioksidin lisäys. Kasvi-huonetomaatin viljelylämpötiloista. Kasvihuonekurkun tuentamenetelmien vertailua. Sijoituslannoitus ja kasvualustan ilmastus kasvihuonekurkulla ja tomaatilla. 21 p.
6. VUORINEN, M. Italianraiheinä ja viljat tuorerehuna. 17 p.
7. ANISZEWSKI, T. Lupiini viherlannoituskasvina. Arviointeja esikokeiden ja kirjallisuuden pohjalta. 11 p.
8. HUOKUNA, E. & HAKKOLA, H. Koiranheinän ja timotein kasvu ja rehuarvon muutokset säilörehuasteella. 54 p.
9. VALMARI, A. Roudan kehittymisen tilastollinen malli. 33 p.
10. HAKKOLA, H. Kuonakalkituskoekokeiden tuloksia 1978-1983. 42 p.
11. SIPPOLA, J. & SAARELA, I. Eräät maa-analyysimenetelmät fosforilannoitustarpeen ilmaisijoina. 20 p.
12. RAVANTTI, S. Terhi-punanata. 37 p.
13. URVAS, L. & HYVÄRINEN, S. Kolme ravinesuhdetta Suomen maala-jeissa. 10 p.
14. ANSALEHTO, A., ELOMAA, E., ESALA, M., KERSALO, J. & NORDLUND, A. Maatalouden sääpalvelukokeilu kesällä 1983. 101 p.
15. MUSTONEN, L., PULLI, S., RANTANEN, O. & MATTILA, L. Virallisten lajikekokeiden tuloksia 1976-1983. 202 p. + 4 liitettä.
16. JUNNILA, S. Ympäristötekijöiden vaikutus herbisidien käyttäytymiseen maassa. Kirjallisuustutkimus. 15 p. + 4 liitettä.
17. PESSALA, R., HAKKOLA, H. & VALMARI, A. Kylvöajan merkitys porkkanan viljelyssä. 22 p.
18. NISULA, H. Uusimpia tuloksia Ruukin lihanautakokeista. 39 p.
19. SAARELA, I. Kevätöljykasvien boorilannoitus. 122 p. + 2 liitettä.
20. URVAS, L. Maaperäkarttaselitys. PORI - HARJAVALTA. 28 p. + 14 liitettä.
21. LEHTINEN, S. Avomaavihannesten lannoitus- ja kastelukokeet 1978-1983. 62 p. + 17 liitettä.

22. ANISZEWSKI, T. & SIMOJOKI, P. Rikkakasvien siementen määrä ja elinvoima eräillä MTTK:n kiertokoealueilla. Kirjallisuustutkimus ja MTTK:n kolmen tutkimusaseman näytteiden analyysi. p. 1-38.
- PALDANIUS, E. & SIMOJOKI, P. Rikkakasvien siementen määrä ja elinvoima Satakunnan ja Etelä-Pohjanmaan tutkimusasemien maanäytteissä. p. 39-56.
23. RINNE, S-L. & SIPPOLA, J. Maatalouden jätteiden kompostointi. I Typpi- ja fosforilisä oljen kompostoinnissa. II Maatalouden jätteet kompostin raaka-aineina. III Kompostin arvo lannoitteena. 52 p.

1985

1. Tiivistelmiä MTTK:n tutkimuksista ja julkaisuista 1984. 67 p.
2. ANSALEHTO, A., ELOMAA, E., ESALA, M., NORDLUND, A. & PILLI-SIH-VOLA, Y. Maatalouden sääpalvelukokeilu kesällä 1984. 127 p.
3. ETTALA, E. Säilörehu Maatalouden tutkimuskeskuksen lypsykarjakoikeissa 1970-luvulla. 270 p.
4. ETTALA, E. Laidun lypsykarjaruokinnassa. 220 p.
5. TUORI, M. & NISULA, H. Ruokintarutiinien merkitys naudoilla. Kirjallisuustutkimus. 38 p.
6. TURTOLA, E. & JAAKKOLA, A. Viljelykasvin ja lannoitustason vaikutus typen ja fosforin huuhtoutumiseen savimaasta. 43 p.
7. AURA, E. Avomaan vihannesten veden ja typen tarve. Nitrogen and water requirements for carrot, beetroot, onion and cabbage. 61 p.
8. Puutarhaosaston tutkimustuloksia. Taimitarha ja dendrologia. 94 p.
9. KEMPPAINEN, E. Kuivikkeen vaikutus lannan arvoon. Kuivikkeiden ammoniakki sitomiskyky. 25 p.
10. JAAKKOLA, A., HAKKOLA, H., HIIVOLA, S-L., JÄRVI, A., KÖYLIJÄRVI, J. & VUORINEN, M. Terästeollisuuden kuonat kalkitusaineina. 44 p.
11. JAAKKOLA, A., ETTALA, E., HAKKOLA, H., HEIKKILÄ, R. & VUORINEN, M. Siilinjärven kalkki kalkitusaineena. 53 p.
12. TAKALA, M. Asumajätevesien imeyttäminen maahan ja energiapajun viljely imeytyskentällä. 36 p.
13. JOKINEN, R. & HYVÄRINEN, S. Eri maalajien magnesiumpitoisuus ja sen vaikutus ravinnesuhteisiin Ca/Mg ja Mg/K. 15 p.
14. JUNNILA, S. Rikkakasvien siementen itämislepo. Kirjallisuuskatsaus. 29 p.

15. MÄKELÄ, K. Talven aikana kuolleiden ryhmäruusujen versoissa esiintyvä sienilajisto vuosina 1976-1982. 13 p. + 8 liitettä.
16. MUSTONEN, L., PULLI, S., RANTANEN, O. & MATTILA, L. Virallisten lajikekokeiden tuloksia 1977-1984. 168 p. + 4 liitettä.
17. SÄKÖ, J. Maatalouden tutkimuskeskuksen puutarhaosastolla Piikkiössä kokeillut ja kokeiltavana olevat omenalajikkeet. Perusrungon merkitys omenapuiden talvehtimisessä 1983-1984.
SÄKÖ, J. & LAURINEN, E. Omenapuiden harjuistutus.
HIIRSALMI, H. & SÄKÖ, J. Mansikan jalostus johtanut tulokseen.
18. ETTALA, E., SUVITIE, M., VIRTANEN, E., PITKÄNEN, T., ZITTING, M., NÄSI, M., TUOMIKOSKI, T. & NISKANEN, M. Metsä- ja maatalouden sivutuotteet lihamullien rehuna. 51 p.
19. MANNER, R. & AALTONEN, T. Pitko-syysvehnä. 6 p. + 27 liitettä.
20. MANNER, R. & AALTONEN, T. Kartano-syysruis. 5 p. + 13 liitettä.
21. ANISZEWSKI, T. Lupiini viljelykasvina. 134 p.
22. HUOKUNA, E., JÄRVI, A., RINNE, K. & TALVITIE, H. Nurmipalkokasvit puhtaana kasvustona ja heinäseoksena. p. 1-12.
HUOKUNA, E. Apilan pahkahomeen esiintymisestä. p. 13-20.
HUOKUNA, E. & HÄKKINEN, S. Englanninraiheinä säilörehunurmissa. p. 21-26.
23. VIRKKUNEN, H., KOMMERI, M., LARPES, E., MICORDIA, A. & LAMPILA, M. Eri säilöntäaineet esikuivatun ja tuoreen säilörehun valmistuksessa sekä kiinteä ja nouseva väkirehun annostus mullien kasvatuksessa. p. 1-32.
VIRKKUNEN, H., KOMMERI, M., SORMUNEN-CRISTIAN, R. & LAMPILA, M. Eri säilöntäaineet nurmirehun säilönnässä. p. 33-45.
24. RISSANEN, H., ETTALA, E., MELA, T. & MUSTONEN, L. Laitumen sadetuksen ja väkirehujen käytön vaikutus lehmien tuotoksiin. p. 1-21.
RISSANEN, H., KOSSILA, V. & VASARA, A. Urean, urea-fosforihappo-viherjauhoyhdisteen (UPV) ja soiijan vertailu raakavalkuaislähteinä maidontuotantokokeissa lehmillä. p. 22-30.
KOSSILA, V., KOMMERI, M. & RISSANEN, H. Monokalsiumfosfaatti ja ureafosfaatti sekä käsittelemätön olki ja ammoniakilla käsitelty olki mullien ruokinnassa. p. 31-40.
25. KORTET, S. Puna-apilan paikalliskantojen ekologia. 66 p.
26. MEHTO, U. Viljojen rikkakasvien torjunta ilman herbisidejä. Kirjallisuustutkimus. 77 p.
27. HUHTA, H. & HEIKKILÄ, R. Rehuviljan viljely Pohjois-Karjalassa. 24 p. + 2 liitettä.

1986

1. Tiivistelmiä MTTK:n tutkimuksista ja julkaisuista 1985. 69 p.

2. KEMPPAINEN, E. Karjanlannan hoito ja käyttö Suomessa. 102 p. + 6 liitettä.
3. KEMPPAINEN, E. & HAKKOLA, H. Lietelanta nurmen peruslannoitteena. 25 p.
4. NIEMELÄINEN, O. Nurmikkoheinien ominaisuudet. Kirjallisuustutkimus. Tuloksia punanatojen ja niittynurmikan virallisista nurmikon lajikekokeista vuosilta 1977-1984. 48 p.
5. MUSTONEN, L., PULLI, S., RANTANEN, O. & MATTILA, L. Virallisten lajikekokeiden tuloksia 1978-1985. 128 p. + 4 liitettä.
6. NIEMELÄINEN, O. & PULLI, S. Puna-apilalajikkeiden siemenmuodostus. Tuloksia apilan virallisista siemenviljelyn lajikekokeista vuosilta 1978-1984. 42 p.
7. NIEMELÄINEN, O. Syksyn, talven ja kevään lämpö- ja valo-olojen vaikutus koiranheinän, niittynurmikan ja punanadan röyhymuodostukseen. Kirjallisuustutkimus. 51 p.
8. ERVIÖ, L-R. & ERKAMO, M. Pakettipellon viljelyn uudelleen aloittaminen herbisidien avulla. p. 1-15.
ERVIÖ, L-R. Korren vahvistaminen timotein siemenviljelyksillä. p. 16-21.
HIIVOLA, S-L. Klormekvatin käyttö timotein siemennurmilla. p. 22-27.
ERVIÖ, L-R. & HIIVOLA, S-L. Herbisidien käytön vähentäminen viljakasvustossa. p. 28-42.
9. KEMPPAINEN, E. & HAKKOLA, H. Säilörehun puristeneste ja virtsa lannoitteina. 43 p.
10. MATIKAINEN, A. & HUHTA, H. Nurmikasvilajikkeet Karjalan tutkimusasemalla. 24 p.
11. SOVERO, M. Nopsa-kevätrypsi. 15 p. + 2 liitettä.
12. NIEMELÄ, P. Kuiviketturpeen soveltuvuus turkistarhoilla kertyvän sonnan ja virtsan käsittelyyn. 15 p. + 4 liitettä.
13. PULLI, S., VESTMAN, E., TOIVONEN, V. & AALTONEN, M. Yksivuotisten tuorerehukasvien sopeutuminen Suomen kasvuoloihin. 51 p.
14. SIMOJOKI, P., RINNE, S-L., SIPPOLA, J., RINNE, K., HIIVOLA, S-L. & TALVITIE, H. Herneaurasta saatava typpilannoitusohje. 27 p. + 22 liitettä.
15. SÄKÖ, J. & YLI-PIETILÄ, M. Hedelmäpuiden ja marjakasvien talvehtiminen talvella 1984-1985. 28 p.
16. MANNER, R. & KORTET, S. Niina-ohra. 31 p. + liite.
17. TURTOLA, E. & JAAKKOLA, A. Viljelykasvien, lannoituksen ja sadetuksen vaikutus kaliumin, kalsiumin, magnesiumin, natriumin, sulfaattirikin sekä kloridin huuhtoutumiseen savimaasta. 43 p.

18. TOIVONEN, V. & LAMPILA, M. Juurikasvisäilörehujen valmistus, laatu, rehuarvo ja mahdollinen käyttö etanolin valmistuksessa. 106 p. + 23 liitettä.
19. ETTALA, E. & VIRTANEN, E. Ayrshiren, friisiläisen ja suomenkarjan monivuotinen vertailu kotovaraisella säilörehu-vilja- ja heinä-vilja-urearuokinnalla. 1. Kolmen ensimmäisen lypsykauden tuotantotulokset. 114 p. + 5 liitettä.
20. ETTALA, E. & VIRTANEN, E. Ayrshiren, friisiläisen ja suomenkarjan monivuotinen vertailu kotovaraisella säilörehu-vilja- ja heinä-vilja-urearuokinnalla. 2. Lehmien syöntikyky, ravinnonsaanti ja rehun hyväksikäyttö sekä hedelmällisyys ja kestävyys kolmen ensimmäisen tuotantovuoden aikana. 293 p. + 23 liitettä.
21. RAVANTTI, S. Iki-timotei. 33 p. + 1 liite.
22. URVAS, L. & VIRKKI, K. Maaperäkarttaselitys. Turku-Rymättylä. 34 p. + 7 liitettä.
23. VUORINEN, M. Kalkituskokeiden tuloksia saraturvemaalta 1977-1983. 22 p.

1987

1. Tiivistelmiä MTTK:n tutkimuksista ja julkaisuista 1986. 72 p.
2. PALDANIUS, E. Oljen kompostointi erilaisia seosmateriaaleja typpilähteinä käyttäen. 55 p. + 1 liite.
3. LEIVISKÄ, P. & NISSILÄ, R. Säämittauksen tuloksia Pohjois-Pohjanmaan tutkimusasemalla Ruukissa. 31 p.
4. HAKKOLA, H., HEIKKILÄ, R., RINNE, K. & VUORINEN, M. Odelman typpilannoitus, sängenkorkeus ja niittoaika. 39 p.
5. NIEMELÄ, T. & NIEMELÄINEN, O. Kasvualustan tiivistyminen ja nurmikon kulumisen nurmikon stressitekijöinä. Kirjallisuuskatsaus. p. 1-30.
NIEMELÄ, T. Siirtonurmikon kasvatus ja käyttö. Kirjallisuuskatsaus. p. 31-42.
6. LUOMA, S., RAHKO, I. & HAKKOLA, H. Kiinankaalin viljelykokeiden tuloksia 1981-1985. 25 p.
7. MUSTONEN, L., PULLI, S., RANTANEN, O. & MATTILA, L. Virallisten lajikekokeiden tuloksia 1979-1986. 165 p. + 9 liitettä.
8. SEPPÄLÄ, R. & KONTTURI, M. Mallasohran reagointi typpilannoitukseen. p. 1-66.
KUISMA, T. & KONTTURI, M. Typpilannoituksen vaikutus ohralajikkeiden mallastuvuuteen. p. 67-134.
9. YLI-PIETILÄ, M., SÄKÖ, J. & KINNANEN, H. Puuvartisten koristekasvien talvehtiminen talvella 1984-1985. 38 p.
10. VUORINEN, M. & TAKALA, M. Porkkanan ja punajuurikkaan sadetus, typpilannoitus ja kalkitus poutivalla hiekkamaalla. 30 p.

11. MULTAMÄKI, K. & KASEVA, A. Kotimaiset lajikkeet. p. 1-8.
Domestic Varieties. p. 9-17.
12. TUOVINEN, T. Omenakääriäisen ennustemenetelmä. p. 1-17. Pih-
lajanmarjakoin ennustemenetelmä. p. 18-32.
13. MÄKELÄ, K. Peittauksen vaikutus kotimaisen heinänsiemenen
itävyyteen, orastuvuuteen ja sienistöön. 15 p.
14. Osa 1. YLÄRANTA, T. Radioaktiivinen laskeuma ja säteilyval-
vonta. PAASIKALLIO, A. Radionuklidien siirtyminen viljely-
kasveihin. 62 p.
Osa 2. KOSSILA, V. Radionuklidien siirtyminen kotieläimiin ja
eläintuotteisiin sekä vaikutukset eläinten terveyteen ja
tuotantoon. 109 p.
15. RAVANTTI, S. Alma-timotei. 38 p. + 2 liitettä.
16. LEHMUSHOVI, A. Ryhmäruusujen lajikekokeet vuosina 1981-1984.
29 p.
17. JOKINEN, R. & TÄHTINEN, H. Karkeiden kivennäismaiden ja turve-
maiden kuparipitoisuus ja sen vaikutus kauran kasvuun astia-
kokeessa. p. 1-17.
Maan kuparipitoisuuden ja happamuuden vaikutus kuparilannoi-
tuksella saatuihin kauran satotuloksiin. p. 18-37.
Maan pH-luvun ja kuparilannoituksen vaikutus kauran hivenra-
vinnepitoisuuksiin. p. 38-47.
Kaura- ja ohralajikkeiden herkkyys kuparin puutteelle ja eri
kuparimäärillä saadut tulokset. p. 48-62.
Kuparilannoitelajien vertailu astiakokeessa kauralla. p.
63-68.
18. HIIRSALMI, H., JUNNILA, S. & SÄKÖ, J. Ahomansikasta suomalainen
viljelylajike. p. 1-8.
Mesimarjan jalostus johtanut tulokseen. p. 9-21.
19. TALVITIE, H., HIIVOLA, S-L. & JÄRVI, A. Satojen ja satovahin-
kojen arviointitutkimus. 87 p.
20. KEMPPAINEN, R. Puna-apilan ymppeys Rhizobium-bakteerilla.
Inoculation of red clover by Rhizobium strain. 24 p.
21. LAMPILA, M., VÄÄTÄINEN, H. & ALASPÄÄ, M. Korsirehujen vertailu
kasvavien ayrshire-sonnien ruokinnassa. p. 1-40.
ARONEN, I., HEPOLA, H., ALASPÄÄ, M. & LAMPILA, M. Erisuuruiset
väkirehuannokset kasvavien ayrshire-sonnien olkiruokinnassa.
p. 41-66.
ARONEN, I., ALASPÄÄ, M., HEPOLA, H. & LAMPILA, M. Bentsoehappo
säilörehun valmistuksessa. p. 67-86.
22. TURTOLA, E. & JAAKKOLA, A. Viljelykasvien vaikutus ravinteiden
huuhtoutumiseen savimaasta Jokioisten huuhtoutumiskentällä
v. 1983-1986. 32 p. + 2 liitettä.
23. PIETOLA, L. & ELONEN, P. Peltokasvien sadetus normaalia kos-
teampina kasvukausina 1980-85. 76 p. + 1 värikuvaliite.
24. PIETOLA, L. Maan mekaaninen vastus kasvutekijänä. 94 p. + 3
liitettä.

1988

1. Tiivistelmiä MTTK:n tutkimuksista ja julkaisuista 1987. 83 p.
2. ANISZEWSKI, T. Puiden, pensaiden ja viljeltävän turvemaan fenologinen tutkimus. Phenological study on the trees, bushes and arable peat land. 120 p. + 5 liitettä.
3. RINNE, S-L., HIIVOLA, S-L., TALVITIE, H., SIMOJOKI, P., RINNE, K. & SIPPOLA, J. Viherkesannon vaihtoehdot rukiin viljelyssä. 53 p. sisältäen 9 liitettä.
4. JUNNILA, S. Pienannosherbisidit kevätiljoilla - Glean 20 DF, Ally 20 DF ja Logran 20 WG. p. 1-15.
Starane M kevätiljojen rikkakasvien torjunnassa. p. 16-18.
Kamilon B ja Kamilon D kevätiljojen rikkakasvien torjunnassa. p. 19-23.
Kevätviljaherbisidit Rikkahävite KH 10/77, KH 2/83 ja Ipactril. p. 24-31.
5. KIISKINEN, T. & MÄKELÄ, J. Kasvipiperäisten valkuaisrehujen sulavuus minkillä. Smältbarhet av vegetabiliska proteinfodermedel hos mink. Digestibility of protein feedstuffs derived from plants in mink. p. 1-13
KIISKINEN, T., MÄKELÄ, J. & ROUVINEN, K. Eri viljalajien sulavuus minkillä ja siniketulla. Smältbarhet av olika spannmål hos mink och blåräv. Digestibility of different grains in mink and blue fox. p. 14-23.
6. SIMOJOKI, P. Ohran boorinpuutos. 100 p. + 3 liitettä.
7. SIMOJOKI, P. Lupiinin viljelytekniikka. p. 3-22, 2 liitettä.
EKLUND, E. & SIMOJOKI, P. Yksivuotisen lupiinin nystyräbakteerien eristäminen ja valikoitujen siirroskantojen testaus kenttäolosuhteissa. p. 23-34, 1 liite.
ANISZEWSKI, T. Kylvöajan vaikutus lupiinin (*Lupinus angustifolius* L.) siemensatoon Keski- ja Pohjois-Suomessa. p. 35-54.
ANISZEWSKI, T. Lupiinin siementuotanto Keski- ja Pohjois-Suomessa. p. 55-90.
8. HÄMÄLÄINEN, I. & ERVIÖ, R. Maaperäkarttaselitys, Jyväskylä. 39 p. + 14 liitettä.
9. ERVIÖ, R. & HÄMÄLÄINEN, I. Maaperäkarttaselitys, Lahti. 41 p. + 2 liitettä.
10. TAKALA, M. Palkokasvien biologiasta. 18 p. + 26 taulukkoa.
11. TAKALA, M., TAHVONEN, R. & VUORINEN, M. Väkilannoitus ja "biologiset" viljelymenetelmät perunan, porkkanan ja punajuurikkaan viljelyssä. 36 p.
12. MUSTONEN, L., RANTANEN, O., NIEMELÄINEN, O., PAHKALA, K., KONTTURI, M. & MATTILA, L. Virallisten lajikekokeiden tuloksia 1980-1987. 138 p. + 1 liite.
14. SÄKÖ, J. & LUNDEN, K. Talven 1986-87 tuhot hedelmä- ja marjatarhoissa. 34 p.

15. RINNE, K. & MÄKELÄ, J. Karitsoiden kasvu laitumella. 18 p.
16. ILOLA, A. Katovuoden 1987 kevätiljojen siemenen orastumisko-
keet. p. 1-17.
RANTANEN, O. & SOLANTIE, R. Uusi peltoviljelyn alue- ja vyöhy-
kejakoehdotus. p. 18-31.
17. RAHKONEN, A. & ESALA, M. Kevätviljojen ja -öljykasvien kylvö-
aika. 72 p.
18. JUNNILA, S. Perunaherbisidejä tehokkuustarkastuksessa. p. 1-15.
Lehvästön hävitys herneellä ja öljykasveilla. p. 16-24.
19. KEMPPAINEN, E. Didinin (disyandiamidi) vaikutus naudan liete-
lannan tehoon ohran lannoitteena. 35 p.
20. ETTALA, E. & VIRTANEN, E. Ayrshiren, friisiläisen ja suomenkar-
jan vertailu vasikka- ja hiehkokaudella säilörehu-vilja- ja
heinä-vilja-urea-ruokinnalla. 92 p.
22. KÄNKÄNEN, H. & KONTTURI, M. Kylvötiheyden vaikutus lehtityy-
piltään erilaisten herneiden sadon muodostumiseen. 69 p.

1989

2. MUSTONEN, L., RANTANEN, O., NIEMELÄINEN, O., PAHKALA, K. & KONT-
TURI, M. Virallisten lajikekokeiden tuloksia 1981-1988.
147 p. + 8 liitettä.
4. TAKALA, M. Saderiskien ja korjuutappioiden vähentämismahdollii-
suuksista heinäkorjuussa. 21 p. + 12 liitettä.
6. HAKKOLA, H. & LUOMA, S. Perunan viljelykokeiden tuloksia
1981-88. 25 p.
8. HÄRKÖNEN, M. & MUSTALAHTI, A. Perennojen menestyminen ja kukin-
ta-ajat Pohjois-Suomessa 1979-85. 20 p. + 2 liitettä.

