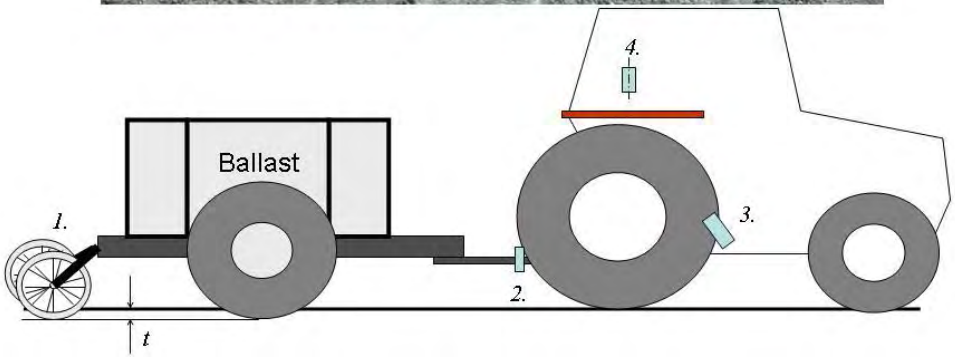


Koneiden kulkukyky

Jukka Ahokas

www.agrotekno.fi

AGROTEKNO

Sisällys

1 Koneiden kulkukyky **2**
1.1 Maan ominaisuuksien vaikutus renkaan tai telan pitoon . . . 2
1.2 Vierimisvastuskerroin ja kehävoimakerroin . . . 4
1.3 Kuormituksen aiheuttama paine maassa . . . 6
1.4 Traktorin vetovoima ja vetoteho . . . 7
1.4.1 Traktorin vetovoima . . . 7
1.4.2 Traktorin vetohyötysuhde . . . 8
1.4.3 Traktorin vetoteho ja moottoriteho . . . 8
1.4.4 Traktorin ja työkoneen koon valinta . . . 9
1.5 Traktorin paino ja lisäpainot . . . 9
1.6 Työsaavutus . . . 10
1.7 Cone index laitteen käyttö kulkukyvyn ennustamiseen . . . 11
1.7.1 Cone-index laite . . . 11
1.7.2 Kulkukyvyn ennustaminen . . . 11
1.7.3 Ennuste ASAE D497 mukaan . . . 12
1.7.4 Yksinkertainen ennustemalli . . . 13
1.7.5 Työkoneen ja traktorin renkaiden valinta . . . 13

2 Renkaiden ominaisuudet **15**
2.1 Kudosrakenne . . . 15
2.2 Rengasmerkinnät . . . 16
2.3 Profiilisuhde . . . 17
2.4 Vetohyötysuhde . . . 18
2.5 Renkaan koko . . . 18
2.6 Renkaan kuviointi . . . 19
2.7 Renkaan kantavuus . . . 20
2.8 Vanteet . . . 21
2.9 Parirenkaat . . . 22
2.10 Pintapaine . . . 22
2.11 Rengaspaine . . . 23
2.12 Akselipainot . . . 24
2.13 Renkaiden ajo-ominaisuudet . . . 26

3 Maan rakenteen säilyttäminen **27**
3.1 Maan rakenne . . . 27
3.2 Maan tiivistyminen . . . 28
3.3 Tiivistymisen mittaaminen . . . 29
3.4 Maalajin ja maan kosteuden vaikutus . . . 30
3.5 Kuormituksen vaikutus tiivistymiseen . . . 30
3.6 Viljely- ja työtavat . . . 31
3.7 Tiivistymisen estäminen . . . 31
3.8 Tiivistymisriskin arviointi . . . 32

Luku 1

Koneiden kulkukyky

Tässä kappaleessa tarkastellaan koneiden liikkumista pellolla, jota yleisesti kutsutaan kulkukyvyksi. Kulkukyky riippuu suurimmaksi osaksi koneiden rengastuksesta ja sen takia renkaat ovat pääasiana. Asiaa käsitellään kolmella eri tavalla. Alussa käsitellään renkaan ja maan välistä yhteyttä sekä mistä renkaan pito pehmeillä mailla syntyy. Näiden avulla ei kuitenkaan voida kovin helposti laskea kulkukykyä. Toinen tarkastelutapa koskeekin renkaan kehävoiman ja vierimisvastusvoiman ns klassista tarkastelua. Kolmas tapa perustuu kulkukyvyn ennustamiseen coneindex arvon avulla. Sen avulla voidaan esimerkiksi mitata milloin pelto tai maasto on kulkukykyinen ja sen avulla voidaan myös valita työkoneisiin ja traktoreihin sopivia rengaskokoja.

1.1 Maan ominaisuuksien vaikutus renkaan tai telan pitoon

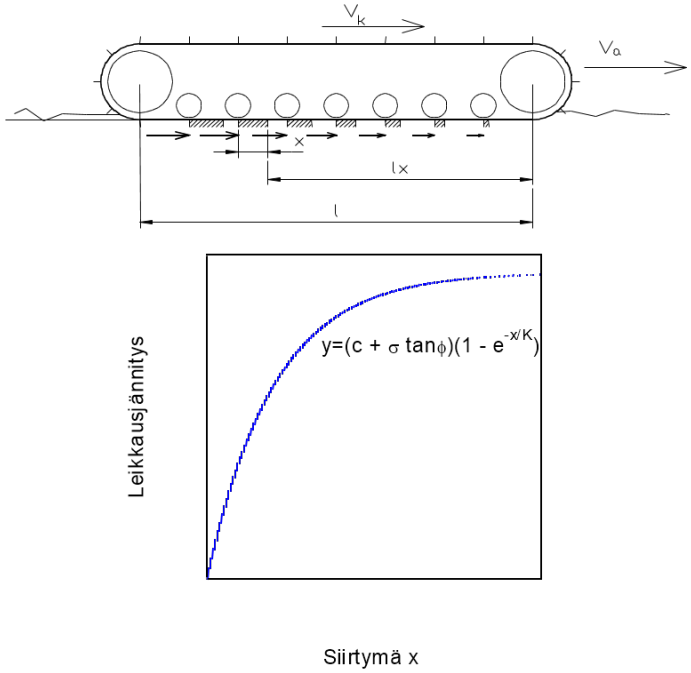
Pehmeällä maalla liikuttaessa, kun renkaan tai telan rivat uppoavat maahan, pito saadaan kuvan 1.1 mukaisesti. Ripojen välinen kannas pyrkii leikkautumaan. Tela saa pitonsa maan leikkauslujuudesta sekä myös telan ja maan välisestä kitkasta ja maan sisäisestä kitkasta. Mitä kauemmas renkaan tai telan alla mennään etureunasta, sitä enemmän maa on leikkaantunut ja sitä suurempi voima ripaan vaikuttaa. Maan leikkauslujuus riippuu maan siirtymästä yhtälön 1.1 mukaisesti.

$$\tau = \tau_{max}(1 - e^{-x/K}) \tag{1.1}$$

τ	maan leikkauslujuus siirtymän x funktiona
τ_{max}	täysin kehittynyt leikkausjännitys, $\tau_{max} = c + \sigma tan\phi$
x	maan siirtymä
K	muotokerroin

Pyörän tai telan luisto määritellään ajonopeuden ja renkaan kehänopeuden mukaan:

$$s = \frac{v_k - v_a}{v_k} \cdot 100\% \tag{1.2}$$



Kuva 1.1: Maan leikkautuminen telan ripojen välissä. Viivoitus kuvaa maan leikkautumista ripojen kohdalla.

s	pyörän tai telan luisto
v_k	pyörän tai telan kehänopeus
v_a	ajonopeus

Luistoprosentti ilmoittaa kuinka paljon ajonopeus on hidastunut pyörien luiston takia kehänopeuteen verrattuna. Luisto on käsitteenä sama maan lujuuden muodonmuutoksen (siirtymän) kanssa. Tämän takia pyörän vetovoiman kuvaaja tai kehävoima kertoimen kuvaaja luiston funktiona esitettynä on samanlainen kuin maan leikkauslujuuskuva. Luistosta voidaan laskea myös luistonopeus v_l, joka on renkaan ja ajonopeuden ero ja tällä nopeudella renkaan kehä luistaa maahan nähden.

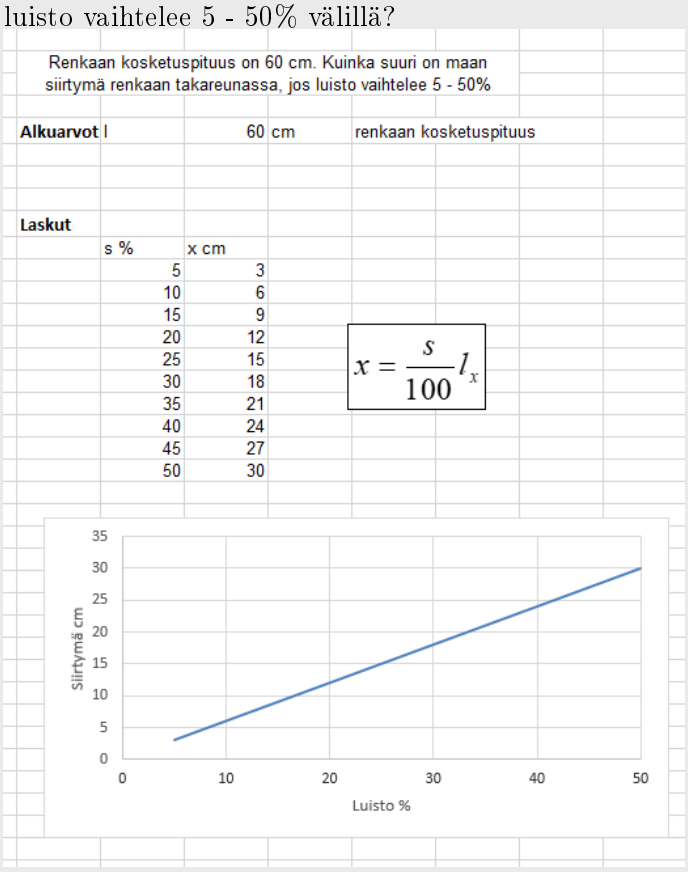
$$v_l = v_k - v_a \tag{1.3}$$

Esimerkki. Traktorin ajonopeus on 8 km/h ja pyörien luisto on 15%. Mikä on renkaiden kehänpeus ja luistonopeus?
Ratkaistaan yhtälöstä 1.2 kehänopeus, $v_k = \frac{v_a}{1-\frac{s}{100}} = \frac{8}{1-0{,}15} =$ 9,4 km/h. Luistonopeus on 9,4 - 8 = 1,4 km/h.

Jos tarkastellaan maan siirtymistä renkaan tai telan alla, siirtymä riippuu luistonopeudesta ja siitä kuinka kauan tarkastelukohta on ollut maassa. Näin saadaan siirtymälle yhtälö $x = v_l \cdot t$. Rivan maassaoloaika t saadaan rivan etäisyydestä telan tai renkaan etureunasta, $t = \frac{l_x}{v_l}$. Kun tämä sijoitetaan edelliseen yhtälöön ja luistonopeus lasketaan luiston avulla, saadaan siirtymälle x yhtälö 1.4.

$$x = \frac{s}{100} \cdot l_x \tag{1.4}$$

Esimerkki. Renkaan kosketuspituus on 60 cm. Kuinka suuri on maan siirtymä renkaan takareunassa, jos luisto vaihtelee 5 - 50% välillä?



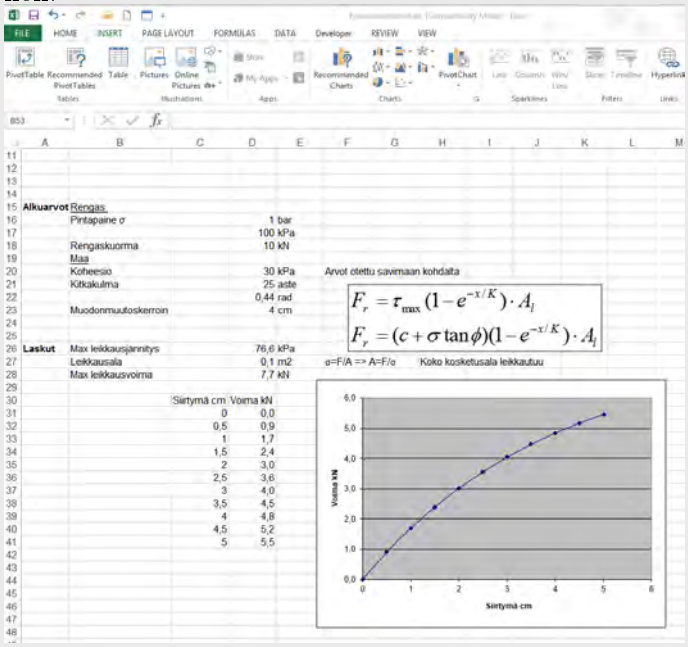
Koska maan siirtymä riippuu luiston lisäksi paikasta kosketuspinnan alla, pitkä kosketuspituus aikaansaa aina samalla luistolla suuremmat maan muodonmuutokset. Täten luisto ei täysin yksiselitteisesti kuvaakaan esimerkiksi urien muodostumista. Telatraktorit jättävät tämän takia selvät urat peltoon jo 10 % luistolla, kun pyörätraktori alkaa jättämään urat vasta 20 % luiston jälkeen.

Kun luiston ja siirtymän yhteys (yhtälö 1.4) ja leikkausvoiman esitys siirtymän funktiona (yhtälö 1.1) otetaan huomioon, saadaan maan siirtymästä aiheutuneeksi leikkausvoimaksi yhtälö 1.5.

$$F_r = \tau_{max} \cdot \left(1 - e^{\frac{-x}{K}}\right) A_l = (c + \sigma \cdot tan\phi) \cdot \left(1 - e^{\frac{-x}{K}}\right) A_l \tag{1.5}$$

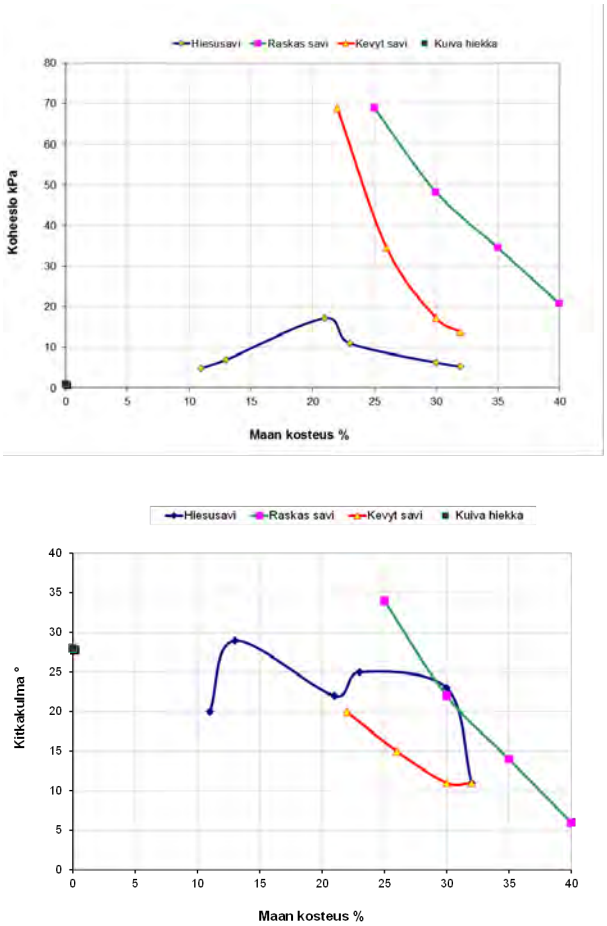
Yhtälössä $A_l$on leikkauspinta-ala. Riippuen siitä mitä lasketaan leikkauspinta-ala vaihtelee. Jos lasketaan telan tai renkaan yhteen ripaan kohdistuvaa voimaa, silloin leikkausalana on ripojen välinen leikkausala. Jos kyse on koko telasta tai renkaasta, silloin yleensä lasketaan koko kosketusalan mukaan.

Esimerkki. Maan käyttäytymistä leikkauksessa voidaan mallintaa eksponenttiyhtälöllä. Jos traktorin renkaan aiheuttama keskimääräinen pintapaine on sama kuin rengaspaine eli 1 bar ja rengaskuorma on 10 kN, laske kuinka suuri voima tarvitaan lukitun renkaan vetämiseen, kun kyseessä savimaa. Kuinka voima muuttuu siirtymän mukana? Muodonmuutoskerroin K on 4 cm ja leikkausala on kosketusalan suuruinen.



Maan kosteus vaikuttaa savimailla hyvin voimakkaasti koheesioon sekä hieman myös kitkaan. Kun savimaa kostuu, se säilyttää koheesionsa melko pitkään. Kun savi tulee tarpeeksi märäksi, sen koheesio loppuu ja maa muuttuu savivelliksi tai liejuksi (kuva 1.2). Usein savimaan pinta on märkä ja syvemmältä maa on kuivaa ja

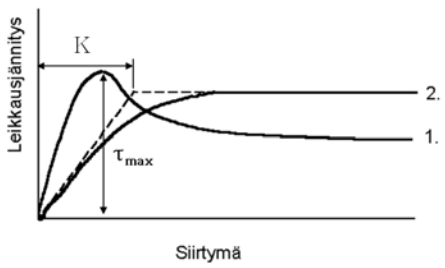
myös lujaa. Renkaan tai telan ripakorkeutta lisäämällä voidaan tunkeutua liejukerroksen läpi kuivempaan ja pitävämpään maahan.



Kuva 1.2: Maan koheesio- ja kitkakertoimia kosteuden funktiona

Kuvan 1.1 mukaan leikkauslujuus riippuu siirtymästä. Renkaaseen tai telaan sovellettuna siirtymän aiheuttaa pyörien tai telan luiston. Kyse on samasta asiasta kuin yleensä aineiden lujuuksissa, venymä ja voima riippuvat toisistaan. Kuvan 1.3 plastinen maa mukainen käyrä saadaan sekoittuvilla mailla, kuten hiekalla, kuivalla lumella ja saviliejulla. Niillä koheesio on pieni ja kitka on vallitsevana. Kiinteillä mailla tai mailla, joilla myös koheesio vaikuttaa saavutetaan selvä leikkauslujuuden huippu, jonka jälkeen siirtymän lisääntyessä leikkausvoima laskee.

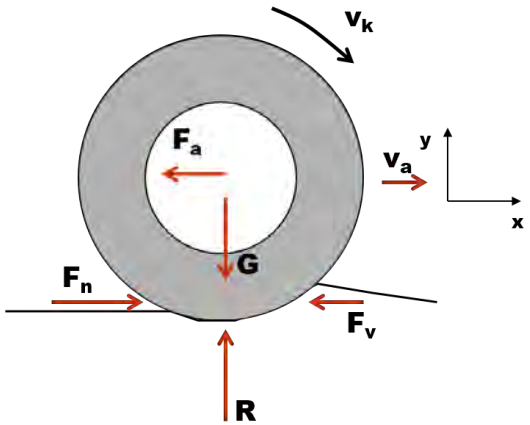
Renkaat ja telat kaivautuvat maahan luiston lisääntyessä ja jokainen ripa useimmiten leikkaa aina uutta syvemmällä olevaa maata. Jos ripojen välit täyttyvät, tällöin rivat eivät voi leikata maata, ja voimat riippuvat maan sisäisestä kitkasta.



Kuva 1.3: Kaksi erilaista leikkauslujuuskäyrää. 1 = hauras maa, 2 = plastinen maa

1.2 Vierimisvastuskerroin ja kehävoimakerroin

Maan koheesio tai kitka-arvoja tiedetään harvoin tarkkaan. Tämän takia vetovoiman laskeminen niiden avulla on hankalaa. Usein laskuissa lähdetäänkin kehävoima- ja vierimisvastuskertoimista. Nämä on kokeellisesti määritetty eri maatyypeille ja eri kosteuksisille maille. Kehävoima F_n ja vierimisvastusvoima F_v voidaan määrittää kuvan 1.4 mukaan. Kehävoiman ja dynaamisen akselikuorman suhdetta sanotaan kehävoimakertoimeksi. Se ilmoittaa kuinka suuri kehävoima on akselipainoon verrattuna.



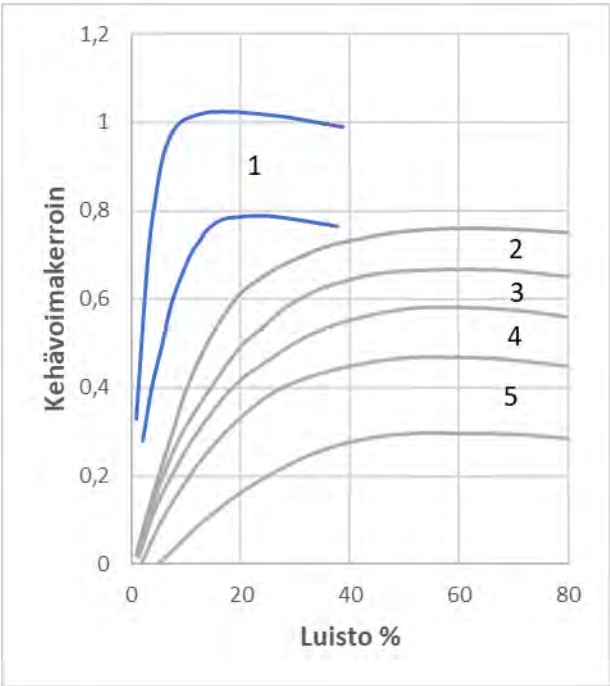
Kuva 1.4: Renkaan kehä- ja vierimisvastusvoimat, F_a= renkaan vetovoima, F_v= vierimisvastusvoima, G = rengaskuorma, R= maan tukivoima, F_n= kehävoima

Kehävoimakerroin on kitkakertoimen luonteinen, mutta siitä ei käytetä kitkakertoimen nimeä, koska kerroin riippuu pyörien luistosta ja se perustuu maastossa liikuttaessa maan leikkauslujuuteen. Kovalla alustalla, jolloin rivat eivät uppoa alustaan, kyseessä on renkaan ja maan välisestä kitkasta. Tällöinkin kehävoimakerroin riippuu pyörien luistosta. Kehävoimakertoimen avulla voidaan laskea renkaan kehävoima. Kehävoimaa laskettaessa täytyy tietää renkaan kuormitus. Tämä on ongelmallista silloin, kun koneessa tapahtuu painonsiirtoa akseleiden välillä. Esimerkiksi kovassa vedossa traktorin etupää voi

nousta kokonaan ilmaan, jolloin etuakselikuorma on nolla ja koko traktorin paino on taka-akselilla. Yleisimmin rengaskuorma lasketaan todellisen tilanteen mukaan eli painonsiirto otetaan huomioon. Joissakin tapauksissa painonsiirto arvioidaan niin vähäiseksi että painonsiirron vaikutusta akseli- ja rengaskuormiin ei oteta huomioon. Jälkimmäinen tapa soveltuu hinattavien työkoneiden vetotarkasteluihin kun traktori ei kannattele työkonetta, silloin virhe jää yleensä pieneksi. Kehävoimakerroin määritellään kehävoiman ja akselipainon suhteeksi, yhtälö 1.6.

$$\mu = \frac{F_n}{R} \tag{1.6}$$

Vaikka kovalla pinnalla renkaan rivat eivät uppoakaan maan sisään, kehävoimakerroin riippuu kuitenkin luistosta samalla lailla kuin pehmeillä pinnoilla. Luiston ylittäessä 20 % rengas yleensä alkaa kaivautua maahan. Tällöin peltoon jää ajourat, mikä ei maan rakenteen kannalta ole hyväksi. Pyörien luisto saisi viljelyspelloilla olla mieluiten 10 - 15 % luokkaa tällöin 'voimansiirto' maan ja renkaan välillä on tehokkainta.



Kuva 1.5: Tyypillisiä kehävoimakertoimia eri alustoilla: 1. Asfaltti - betoni, 2. Kuiva savisänki, 3. Kuiva hiesusänki, 4. Märkä hiesu, 5. Märkä savi [Söhne 1968]

Kehävoima- ja vierimisvastuskertoimia on kuvassa 1.5. Renkaan omaan liikkumiseen tarvittavaa voimaa kutsutaan vierimisvastusvoimaksi (F_v). Sen ja dynaamisen akselipainon suhdetta kutsutaan vierimisvastuskertoimeksi f, yhtälö 1.7.

$$f = \frac{F_v}{R} \tag{1.7}$$

Vierimisvastuskerroin on pyörimiskitkan luonteinen. Siinä kyseessä on alustan ja renkaan muodonmuutoksiin kuluvasta voimasta. Jos liikutaan rinteissä, rinteen vaikutus otetaan huomioon jakamalla painovoiman vaikutus rinnettä vastaan olevaan komponenttiin ja rinteen suuntaiseen komponenttiin. Rinteen suuntaisesta komponentista käytetään nimeä rinnevastus.

Jos rengas uppoaa reilusti alustaansa, renkaan eteen muodostuu maasta aaltomainen kasauma. Tällöin puhutaan renkaan puskuvastuksesta. Se on usein mukana vierimisvastuskertoimessa. Samoin renkaan sivujen hankaus maata vasten on vierimisvastuskertoimessa mukana. Jos rengas uppoaa maahan niin paljon, että koneen maavara loppuu ja maa ottaa alustaan kiinni, tällöin vastus lisääntyy voimakkaasti ja koneella on huomattavia kulkuvaikeuksia, kun se työntää maata edessään.

Vierimisvastuskerroin riippuu hieman pyörien luistosta ja esimerkiksi vierimisvastuskertoimen mallissa se voi olla mukana (kappale 1.7.3). Tämä johtuu renkaan kaivautumisesta maahan, sekä suuremmista renkaan muodonmuutoksista. Pellolla luiston pitää olla kohtuullinen, jottei maan rakennetta rikota. Tällöin vierimisvastuskertoimet annetaan yhtenä lukuna, taulukko 1.1. Vierimisvastuskerroin voitaisiin antaa renkaille erikseen, mutta näin ei menetellä, vaan vierimisvastuskerroin annetaan yleensä koko koneelle.

Taulukko 1.1: Tyypillisiä vierimisvastuskertoimien arvoja

Alusta	Vierimisvastuskerroin
Asfaltti	0,02
Soratie	0,04 - 0,05
Normaali pelto	0,07 - 0,10
Pehmyt pelto	0,1 - 0,3

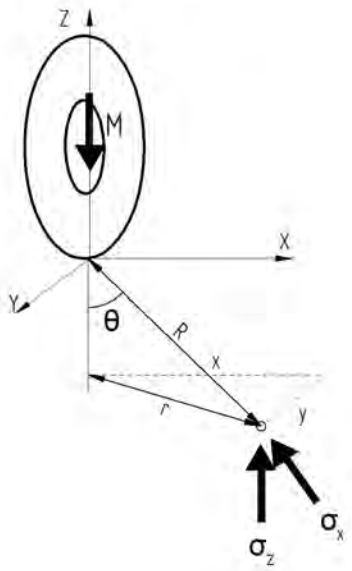
Vierimisvastus- ja kehävoimakertoimet eivät koskaan ole tarkkoja eikä näillä laskien voidakaan saada tarkkoja tuloksia, koska maan ominaisuudet vaihtuvat alinomaa. Näillä saadaan kuitenkin riittävän hyvä ennuste traktorin liikkumista tai työkoneen vetoa ajatellen. Suurin vetovoima saadaan luiston ollessa 50 - 70% paikkeilla, kun taasen peltotyöt pitäisi tehdä alle 20% luistolla. Tällöin renkailla on aina 'vetovoimareserviä' eli kovemmat tai pehmeät kohdat aiheuttavat vain hieman suuremman luiston, mutta kiinnijäämisriskiä ei ole.

Renkaan vetovoima voidaan laskea kuvan 1.4 mukaisesti tarkastelemalla voimatasapainoa ajosuunnassa. Voimatasapainosta saadaan yhtälö 1.8.

$$F_a = F_n - F_v = \mu \cdot R - f \cdot R = (\mu - f) \cdot R \tag{1.8}$$

Rengaskuorma on 14 kN ja sitä käytetään normaalilla peltomaalla. Kuinka suuri on renkaan vetovoima? Lähdetään liikkeelle renkaan liikkumiseen tarvittavasta voimasta. Normaalilla pellolla vierimisvastuskerroin on 0,07 - 0,10. Valitaan kertoimeksi f=0,08, jolloin F_v= 0,08·14 = 1,1 kN. Katsotaan kehävoimakerroin 15 % luiston kohdalta (kuva 1.5), jolloin μ = 0,4. Kehävoima on 0,4·14 = 5,6 kN. Kun kehävoimasta vähennetään renkaan liikkumiseen tarvittava voima, saadaan F_a= 5,6 - 1,1 = 4,5 kN. Tällä voimalle rengas pystyy vetämään kuormaa perässään.

1.3 Kuormituksen aiheuttama paine maassa



Kuva 1.6: Maahan kohdistuva pistekuormitus

Kun koneilla liikutaan maan pinnalla tai kun rakennetaan rakennuksia, näiden massat aiheuttavat maahan paineen. Pistekuorman aiheuttamaa painetta voidaan tarkastella yhtälöllä 1.9 (kuva 1.6), jonka alunperin on kehittänyt Boussinesq [Wong 2001].

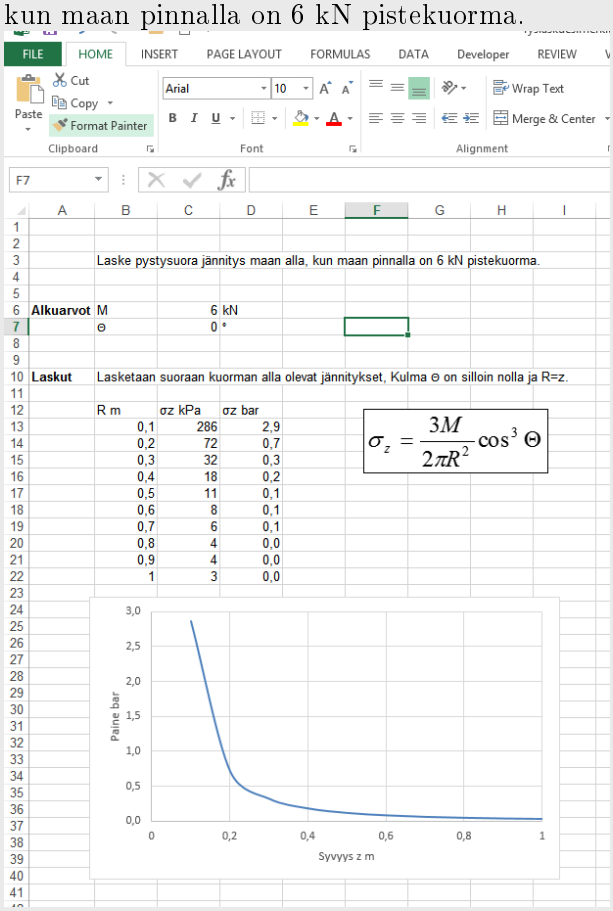
$$\sigma_z = \frac{3M}{2\pi R^2} cos^3\theta \tag{1.9}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{1.10}$$

$$R = \sqrt{z^2 + r^2} \tag{1.11}$$

σ_z	paine maan sisässä pystysuunnassa
M	pistekuorma

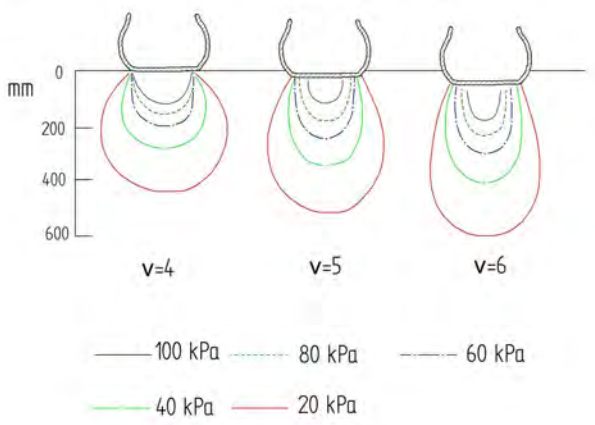
Esimerkki. Laske pystysuora jännitys maan alla, kun maan pinnalla on 6 kN pistekuorma.



Yhtälössä 1.9 oletetaan, että maa käyttäytyy joustavasti (elastisesti), jolloin jännitykset ovat niin pieniä, ettei maahan vielä jää pysyviä muodonmuutoksia. Lisäksi kuorma oletetaan täysin pistemäiseksi. Todellisessa tilanteessa tapahtuu usein urien muodostumista ja kuormitus ei ole pistemäinen. Tällöin laskenta ei päde aivan kuorman kohdalla maan pinnalla, mutta antaa kohtalaisen arvion hieman pintaa syvemmällä. Muiden kuin pistemäisten kuormien laskennasta on esimerkkejä Wongin [Wong 2001] kirjassa. Maan ominaisuudet vaikuttavat paineeseen ja nämä voidaan huomioida Fröhlichin esittämällä tavalla, jossa yhtälön 1.9 luku 3 on korvattu maan kovuudesta johtuvalla kertoimella ν, yhtälö 1.12. Kovilla mailla kerroin ν on 4, normaaleilla viljelysmailla se on 5 ja märillä mailla 6.

$$\sigma_z = \frac{\nu M}{2\pi R^2} cos^\nu\theta \tag{1.12}$$

Kuvassa 1.7 on esimerkki rengaskuorman aiheuttamasta paineesta maassa. Rengas, rengaspaine ja kuorma ovat samat. Maan ominaisuudet muuttuvat kovasta pehmeään. Maan pehmetessä paineet ulottuvat syvemmälle maan sisässä ja myös kapeammalle alueella.



Kuva 1.7: Esimerkki rengaskuorman aiheuttamasta paineesta maassa. υ arvot: 4 = kova maa, 5 = normaali viljelymaa, 6 = märkä ja pehmeä maa

1.4 Traktorin vetovoima ja vetoteho

Edellä käsittelimme vain yhtä rengasta. Nyt otetaan käsiteltäväksi koko traktori. Traktori on maatalouden perustyökone, se ei pysty yksinään tekemään työtä vaan siihen kiinnitetään erilaisia työkoneita työtarpeen mukaan. Kun kyseessä on hinattava työkone sen vetämiseen tarvitaan riittävä vetovoima, jotta työkone saadaan liikkeelle. Jos traktorin vetovoima ei ole riittävä, sen pyörät luistavat ja joko työ etenee hitaasti tai pahimmassa tapauksessa työkonetta ei saada liikkeelle. Pyörien luisto, jos se on liiallista, aiheuttaa urien syntymisen peltoon ja sitä kautta maan rakenne kärsii. Kun työkone on saatu liikkeelle, moottorin teho määrää sen millä nopeudella liikutaan. Jokaisella työllä on sille sopiva nopeus ja jos moottoriteho on liian pieni, tätä nopeutta ei saavuteta. Jos moottoriteho taasen on suurempi kuin työssä tarvittava teho, silloin käytetään vain osa moottoritehosta hyödyksi.

1.4.1 Traktorin vetovoima

Vetäminen on usein maataloustraktorin tärkein tehtävä. Tähän voi liittyä myös muita toimintoja, kuten työkoneen kannattaminen tai voimansiirto työkoneeseen. Työn onnistumisen kannalta ratkaisevana asiana on riittävä vetovoima ja riittävä vetoteho. Hinattava työkone kiinnitetään traktorin vetokoukkuun, vetotankoon tai vetovarsiin. Tilannetta voidaan tarkastella kuvan 1.8 mukaan. Voima- ja momenttitasapainoista ratkaistaan vetovoima. Kun tarkastellaan alustan suuntaisia voimia, saadaan yhtälön 1.13 mukainen tasapaino.

$$F_n - F_v - F_t - F_r = 0 \tag{1.13}$$

F_n kehävoima (kitkavoima), joka syntyy renkaan ja maan välillä
F_v vierimisvastusvoima, joka syntyy renkaiden ja maan muodonmuutoksesta
F_t työkoneen vetämiseen tarvittava voima
F_r rinnevastus

Maan vetovoiman vaikutus traktoriin voidaan jakaa kahteen komponenttiin, rinnettä vastaan kohtisuoraan komponenttiin F_m ja rinteen suuntaiseen komponenttiin F_r, yhtälöt 1.14 ja 1.15.

$$F_r = G \cdot sin\alpha \tag{1.14}$$

$$F_m = G \cdot cos\alpha \tag{1.15}$$

F_r rinnevastus
F_m rinnepaino
G traktorin paino, G=g·m
α rinnekulma

Yhtälön 1.13 kehävoima F_n saadaan yhtälön 1.6 avulla, $F_n = \mu G cos\alpha$. Kun kyseessä on nelipyörävetoinen traktori (koko traktorin massa on vetävien pyörien päällä), rengaskuorman R tilalla on traktorin massan G rinnettä vastaan oleva komponentti ($Gcos\alpha$). Tässä oletetaan, että etu- ja takarenkailla on yhtä hyvä pito (sama kehävoimakerroin).

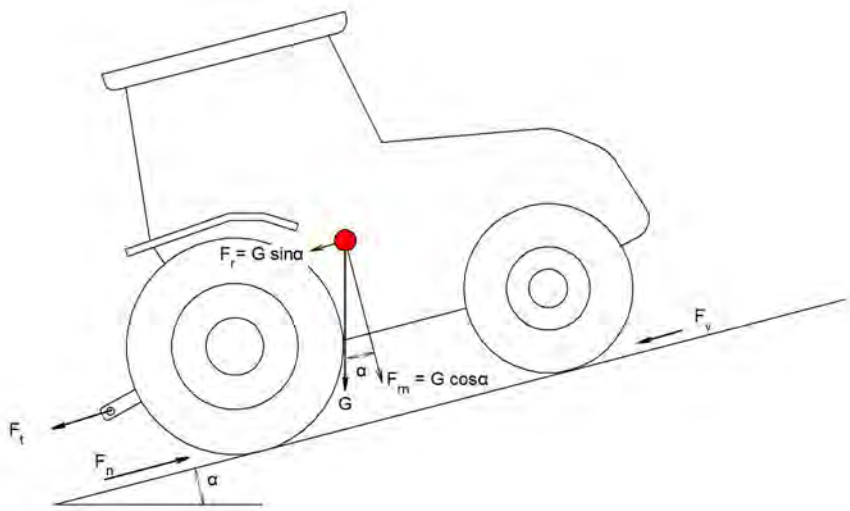
Traktorin omaan liikkumiseen tarvittava voima saadaan yhtälön 1.7 avulla, $F_v = fGcos\alpha$. Tässä oletetaan että etu- ja takarenkailla on yhtä suuret vierimisvastuskertoimet. Tätä voimaa kutsutaan vierimisvastusvoimaksi. Rengaskuorman R tilalla on traktorin massan G rinnettä vastaan oleva komponentti ($Gcos\alpha$).

Rinnevastus F_r on seurausta ylöspäin nousemisen aiheuttavasta mäkivastuksesta. Kun tämä otetaan huomioon, saadaan traktorin vetovoimaksi rinteessä yhtälö 1.16.

$$F_t = G\left[(\mu - f)cos\alpha - sin\alpha\right] \tag{1.16}$$

Nelipyörävetoisen traktorin vetovoima vaakasuoralla alustalla saadaan sijoittamalla yhtälöön 1.16 rinnekulman α arvoksi 0, jolloin saadaan yhtälö 1.17.

$$F_t = G \cdot (\mu - f) \tag{1.17}$$



Kuva 1.8: Hinattavan työkoneen vedossa vaikuttavat voimat

Esimerkki. *Traktorin massa on 4500 kg. Jotta peltoon ei jäisi luistouria, pyörien luisto ei saa ylittää 20 %. Kuinka suuri vetovoima ja vetoteho saadaan aikaiseksi kuivalla savella kun ajonopeus on 9 km/h?*

Katsotaan kuvasta 1.5 20% kohdalta kehävoimakerroin $\mu \approx$0,45 ja pellon vierimisvastuskerroin f= 0,1. F_t=(0,45 - 0,1)·4500·9,81 = 15,5 kN (yhtälö 1.17). Ajonopeus pitää muuttaa laskuja varten yksikköön m/s, yhdessä kilometrissa on 1000 m ja tunnissa on 3600 s, v= $9\frac{1000m}{3600s}$ = 2,5 m/s. Vetoteho P=$F_t \cdot v$= 15,5 kN·2,5 m/s = 38,8 kW. Traktorin vierimisvastuskerroin oli 0,1, jolloin traktorin omaan kulkemiseen tarvitaan 0,1·4500·9,81 = 4,4 kN voima ja P=4,4·2,5 m/s = 11,0 kW teho. Tämän lisäksi tehoa hukkaantuu myös pyörien luistoon. Normaalisti tarvitaan 1,5 - 2 kertainen moottoriteho vetotehoon verrattuna. Tässä tapauksessa moottoriteho olisi 58 - 78 kW.

Kuten kuvasta 1.5 nähdään, kehävoimakerroin riippuu pyörien luistosta. Ilman luistoa ei olisi kehävoimaa, luisto on siten välttämätön paha. Sitä tarvitaan, jotta saataisiin vetovoima aikaiseksi, mutta toisaalta luisto on suoraan häviötehoa. Pyörien ja telojen pito perustuu siihen, että pehmeällä maalla renkaan rivat uppoavat maahan ja rengas yrittää leikata ripojen väliin jäävän maakannaksen irti. Leikkausvoiman suuruus riippuu siirtymästä eli kehävoimakerroin riippuu luistosta. Luisto aikaansaa siirtymän. Kuvasta 1.5 nähdään, että myös kovalla alustalla kehävoimakerroin riippuu luistosta. Tuossa tapauksessa renkaan luisto aiheuttaa maan ja renkaan välille liukukitkaa ja sen voimakkuus riippuu liukunopeudesta (luistosta). Pyörän luistaessa sen kehänopeus on ajonopeutta suurempi.

1.4.2 Traktorin vetohyötysuhde

Traktorille voidaan johtaa yhtälö, joka suoraan ilmaisee koko traktorin vetohyötysuhteen. Renkaan vetohyötysuhteen yhtälön 2.6 rengaskuorma R korvataan traktorin massalla G ja renkaan vetovoima korvataan traktorin vetovoimalla. Vetohyötysuhde näyttää kuinka suuren osan pyörän akselille tulevasta tehosta traktori saa muutettua työkoneen vetämiseen, yhtälö 1.18.

$$\eta = \frac{P_t}{P_a} = \frac{F_t v_a}{M\omega} = \frac{F_t v_a}{F_k v_k}$$
$$\eta = \frac{(\mu - f) \cdot G \cdot v_a \cdot (1-s)}{\mu \cdot G \cdot v_a} = (1-s)(1-\frac{f}{\mu}) \quad (1.18)$$

1.4.3 Traktorin vetoteho ja moottoriteho

Kun traktori vetää työkonetta, sen vetämiseen tarvittava vetoteho saadaan yhtälöstä 2.2. Tarvittava akseliteho (moottoriteho) voidaan sen jälkeen laskea yhtälön 1.18 avulla. Tästä laskennasta puuttuu rinteiden vaikutus. Sen mukaan ajetaanko ylä- tai alamäkeä tarvitaan hieman enemmän tai vähemmän tehoa. Normaalisti tarvitaan 1,5 - 2 kertainen moottoriteho vetotehoon verrattuna, yhtälö 1.19.

$$P_m = k \cdot P_t \quad (1.19)$$

P_m	traktorin moottoriteho
P_t	vetoteho
k	kerroin (1,5 - 2)

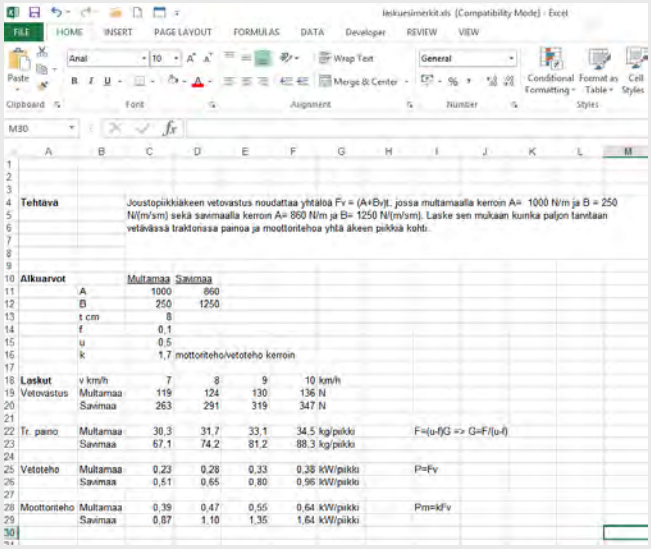
Mistä tuo kerroin k sitten tulee? Edellä käsittelimme vetohyötysuhdetta ja saimme sille parhaimmillaan 60 - 70 % arvoja. Vetohyötysuhde on vetotehon ja akselitehon suhde, $\eta = \frac{P_t}{P_a} \Rightarrow P_a = \frac{P_t}{\eta} = \frac{1}{\eta}P_t$. Jos rinnevastusta

ei oteta huomioon, silloin k on vetohyötysuhteen käänteisluku ja esimerkiksi 60% vetohyötysuhde tarkoittaa k-kerrointa 1,7 ($\frac{1}{0,6} = 1,7$).

Esimerkki. *Äkeen vetovastus on 14 kN ja äestysnopeus on 9 km/h. Kuinka suuri moottoriteho tähän tarvitaan?*

P_t=14 kN·$\frac{9}{3,6}$m/s = 35 kW. Jos vetohyötysuhde on parhaimmillaan 70 % (edellisen esimerkin kuva), $P_a = \frac{1}{\eta}P_t$=$\frac{1}{0,7}$·35 = 1,4·35= 49 kW. Tässä tapauksessa moottoritehon tarve oli 1,4 kertainen vetotehoon verrattuna.

Esimerkki. Joustopiikkiäkeen vetovastus noudattaa yhtälöä Fv = (A+Bv)t, jossa multamaalla kerroin A= 1000 N/m ja B = 250 N/(m/sm) sekä savimaalla kerroin A= 860 N/m ja B= 1250 N/(m/sm). Laske sen mukaan kuinka paljon tarvitaan vetävässä traktorissa painoa ja moottoritehoa yhtä äkeen piikkiä kohti.



Tehtävä	Joustopiikkiäkeen vetovastus noudattaa yhtälöä Fv = (A+Bv)t, jossa multamaalla kerroin A= 1000 N/m ja B = 250 N/(m/sm) sekä savimaalla kerroin A= 860 N/m ja B= 1250 N/(m/sm). Laske sen mukaan kuinka paljon tarvitaan vetävässä traktorissa painoa ja moottoritehoa yhtä äkeen piikkiä kohti.						
Alkuarvot		Multamaa	Savimaa				
	A	1000	860				
	B	250	1250				
	t cm	8					
	f	0,1					
	u	0,5					
	k	1,7	mottoriteho/vetoteho kerroin				
Laskut	v km/h	7	8	9	10 km/h		
Vetovastus	Multamaa	119	124	130	136 N		
	Savimaa	263	291	319	347 N		
Tr. paino	Multamaa	30,3	31,7	33,1	34,5 kg/piikki	F=(u-f)G => G=F/(u-f)	
	Savimaa	67,1	74,2	81,2	88,3 kg/piikki		
Vetoteho	Multamaa	0,23	0,28	0,33	0,38 kW/piikki	P=Fv	
	Savimaa	0,51	0,65	0,80	0,96 kW/piikki		
Moottoriteho	Multamaa	0,39	0,47	0,55	0,64 kW/piikki	Pm=kFv	
	Savimaa	0,87	1,10	1,35	1,64 kW/piikki		

1.4.4 Traktorin ja työkoneen koon valinta

Traktorin ja työkoneen valinnassa on kaksi pääkohtaa:

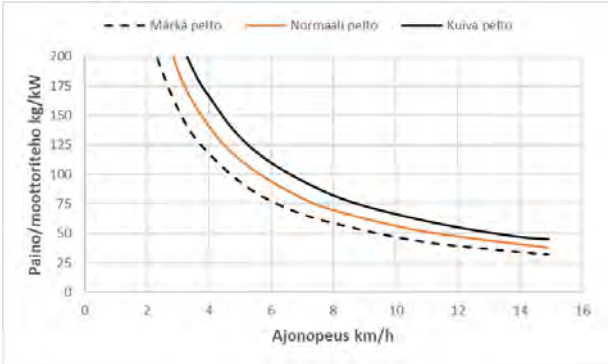
1. Traktorin vetovoiman on oltava riittävä. Raskaita maata muokkaavia koneita vedettäessä vetovoiman on oltava silloin kun pyörien luisto on alle 20% riittävä työkoneen vetämiseen. Kun luisto on alle 20% peltoon ei jää renkaiden luistojälkiä. Ratkaistaan yhtälöstä 1.17 traktorin paino $G = \frac{F_t}{\mu - f}$.

2. Traktorin moottoritehon on oltava riittävä, jotta saavutetaan normaali työnopeus. Kullakin työkoneella on sille sopiva työnopeus ja moottoritehon on oltava riittävä, jotta tämä nopeus saavutetaan. Yhtälön 1.19 avulla lasketaan moottoriteho, kun $P_t = F_{vv}v$.

1.5 Traktorin paino ja lisäpainot

Yhtälön 1.17 mukaisesti traktorin vetovoima riippuu traktorin massasta, renkaiden pidosta ja vierimisvastuksesta. Vetovoimaa voidaan siten lisätä lisäämällä massaa ja käyttämällä pitävämpiä renkaita ja renkaita, joiden vierimisvastus on alhainen. Nämä vaikuttavat myös polttoainetalouteen. Työkone tarvitsee tietyn vetovoiman ja jos traktorin vetokyky paranee, sen seurauksena luisto pienenee ja usein polttoainetalous paranee.

Traktorin paino vaikuttaa siihen kuinka hyvin moottoriteho pystytään hyödyntämään raskaassa vedossa. Jos traktori on liian kevyt vetotehtävään, silloin seurauksena on pyörien luisto ennenkuin moottori kuormittuu täysin. Jos traktori on liian painava, silloin suuri osa moottorin tehosta kuluu traktorin omaan kulkemiseen. Kappaleessa 1.4.2 on käsitelty vetohyötysuhdetta. Se on parhaimmillaan normaalilla peltomaalla kun pyörien luisto on 10 - 20% luokkaa. Tämän perusteella on tehty kuva 1.9, jossa on nopeuden funktiona tarvittava paino-tehosuhde. Normaalilla peltotyön nopeusalueella (5 - 10 km/h) raskaassa vedossa tarvitaan 60 - 100 kg painoa jokaista moottorin kW kohden. Katsotaan tilannetta esimerkiksi 5 km/h kohdalta, painoa pitäisi olla 100 kg moottorin kW kohden. Jos näin ei ole pyörät lähtevät luistamaan ennenkuin moottorin koko teho on käytössä eli traktorin paino on liian pieni, jotta moottoriteho voitaisiin hyödyntää kokonaan.

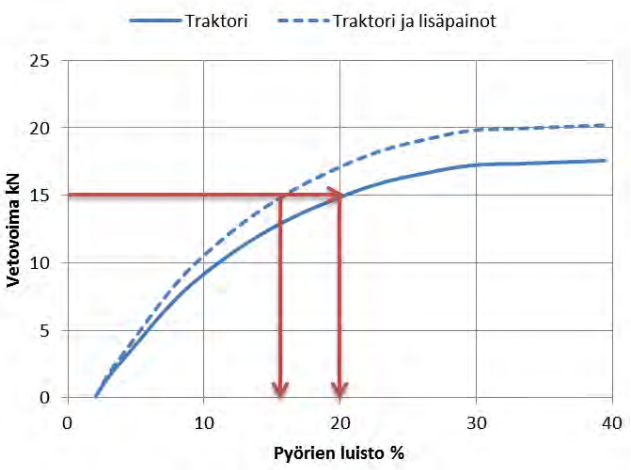


Kuva 1.9: Traktorin painon suhde moottoritehoon, kriteerinä on vetotehon hyvä hyödyntäminen

Lisäpainot lisäävät traktorin massaa ja tämä lisää vetovoimaa. Se mitä työnteossa tapahtuu lisäpainoja käytettäessä on pyörien luiston pieneneminen. Kuvassa 1.10 on esimerkki miten lisäpainot vaikuttavat luistoon. Tässä esimerkissä työkone tarvitsee 15 kN vetovoiman. Kun traktoriin lisätään lisäpainot, se aikaansaa tämän vetovoiman pienemmällä pyörien luistolla. Esimerkissä luisto pienenee lähes 5 %-yksikköä ja vastaavasti ajonopeus ja työsaavutus lisääntyvät lähes saman verran.

Käytännössä asia ei ole aivan näin yksioikoinen. Jos lisäpainojen takia traktorin pyörät uppoavat maahan, silloin traktorin oma kulkuvastus lisääntyy ja lisäpainojen hyöty menetetään. Lisäksi voidaan aiheuttaa maan tiivistymistä.

Lisäpainoja käytetään nykyisin yleensä traktorin ohjattavuuden varmistamiseen. Raskaat työkoneet keventävät etuakselia ja traktorin ohjattavuus heikkenee. Lisäpainoilla saadaan riittävä akselipaino aikaiseksi.



Kuva 1.10: Lisäpainojen vaikutus työtekoon. Normaali pelto, traktorin paino 4000 kg ja lisäpainoja 600 kg.

Vetävän renkaan kuvion jäljen pellon pinnassa pitäisi olla melko selvä eikä rengas saa kaivautua maahan. Jos kuvio häviää ja rengas tekee uran, silloin pitää joko vähentää työkoneen vetovastusta tai parantaa traktorin kulkukykyä. Ensimmäiseksi kannattaa tarkistaa traktorin rengaspaineet. Seuraavaksi kannattaa tarkastaa työkoneen säädöt ja työsyvyys. Tämän jälkeen voidaan parantaa traktorin vetovoimaa lisäpainoilla sillä edellytyksellä, ettei rengas uppoa maahan.

1.6 Työsaavutus

Traktorin kokoa ja työkoneita valittaessa pitää ottaa myös huomioon työsaavutukset. Ajonopeuden tai työleveyden lisääminen lisäävät vetovoiman ja vetotehon tarvetta, mutta samalla työsaavutus myös lisääntyy. Työsaavutuksella tarkoitetaan sitä kuinka monta hehtaaria tunnissa saadaan tehtyä tai sadonkorjuussa myös, kun satotaso otetaan huomioon, kuinka monta tonnia tunnissa korjataan. Kun työkonetta käytetään pellolla ja sen työleveys on b, käsitelty ala on $A = b \cdot s$, s on työn aikana kuljettu matka. Kun ajonopeus on $v = \frac{s}{t}$, saadaan että kuljettu matka on, $s = v \cdot t$. Työsaavutus ilmoitetaan aikayksikössä tehtynä työnä, perusyksikköjen mukaan se olisi m^2/s, mutta käytännössä on helpompi käyttää ha/h yksikkönä. Kun nämä yhdistetään, saadaan yhtälö 1.20. Kun halutaan laskea suoraan ha/h ja ajonopeus ilmoitetaan muodossa km/h, saadaan yhtälö 1.21.

$$q_t = \frac{A}{t} = \frac{bs}{t} = \frac{bvt}{t} = bv \tag{1.20}$$

$$q_t = \frac{b[m]v[km/h]}{10} \tag{1.21}$$

q_t	työsaavutus
b	työkoneen työleveys
v	ajonopeus

Esimerkki. *Peltoa äestetään 4,5 m leveällä äkeellä ja ajonopeus on 9,5 km/h. Mikä on teoreetiinen työsaavutus?*

$q_t = \frac{4{,}5 \cdot 9{,}5}{10} = 4{,}3\ ha/h$

Yhtälö 1.21 antaa teoreettisen työsaavutuksen. Käytännössä ei pystytä useinkaan käyttämään koko koneen työleveyttä hyväksi. Lisäksi aikaa kuluu käännöksiin päisteissä ja täyttöihin, tyhjennyksiin ja säätöihin. Todellinen työsaavutus voidaan laskea ottamalla huomioon nämä työnteon hyötysuhteella. Tyypillisesti nämä ovat 60 - 85 % luokkaa eli todellinen työsaavutus on 60 - 85% teoreettisesta työsaavutuksesta.

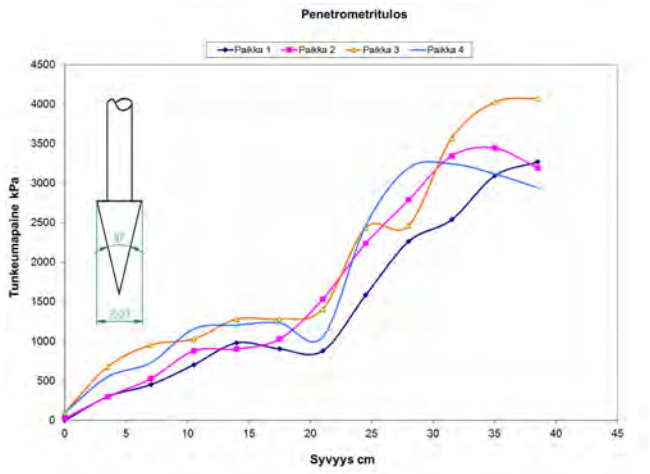
1.7 Cone index laitteen käyttö kulkukyvyn ennustamiseen

Koneiden kulkukykyä on tutkittu runsaasti ja niille on kehitetty malleja, joidenka avulla voitaisiin ennustaa kulkukyky. Näitä malleja käytetään maastossa liikuttaessa ja niitä voidaan käyttää myös pellolla työskenneltäessä. Malleja voidaan käyttää myös suunnitteluvaiheessa valittaessa koneiden rengaskokoja. Tässä keskitytään lähinnä pelto-olosuhteissa käytettyihin malleihin. Erilaisia malleja on esitetty kattavasti Saarilahden [Saarilahti 2002] julkaisussa.

1.7.1 Cone-index laite

Koneiden kulkukyvyn mittaamiseen on kehitetty yksinkertainen menetelmä. Se perustuu kartion työntämiseen maahan ja työntövoimasta voidaan laskea tarvittava työntöpaine. Laitteesta käytetään nimitystä penetrometri ja sillä mitattuja arvoja sanotaan usein Cone Index arvoiksi. Kuvassa 1.11 on mittapiirros penetrometrin kartiopäästä ja esimerkki tarvittavasta työntövoimasta. Maalajin kovuudesta riippuen käytetään erikokoisia kartioita. Mittalaite on standardisoitu, ASAE S313.1 [ASAE S313.3].

Kuten kuvasta 1.11 nähdään työntövoima (maan vastus) muuttuu syvyyden mukana ja maan kovat kerrokset ja esimerkiksi kyntöanturat näkyvät mittauksissa selvästi. Liikkumiskykymittausten lisäksi laitetta käytetään runsaasti maatalousmaiden tutkimuksissa. Saatu coneindex arvo kuvaa karkeasti maan tilaa, mutta sen käyttö varsinaisena selittävänä muuttujana ei useinkaan anna hyviä tuloksia.



Kuva 1.11: Penetrometrin kartiopään mitat ja mittaustulos

Esimerkki. Penetrometrissä käytetään 20,27 mm kartiota ja työntövoima rekisteröidään 5 cm välein. Tulokseksi saadaan seuraava taulukko. Laske tunkeumapaine.
Kartion poikkileikkausala A=$\frac{\pi 20{,}27^2}{4}$ = 323 mm^2. Voima jaetaan tällä alalla, jolloin saadaan paine.

Syvyys cm	Voima N	Paine kPa
5	100	310
10	160	495
15	200	619
20	250	774
25	350	1084
30	320	991

Penetrometrejä on saatavissa monenlaisia. Yksinkertaisissa malleissa tunkeumavoima tai paine näytetään suoraan viisarinäytöstä ja käyttäjän pitää lukea voima ja syvyys, kuva 1.12. Penetrometrin painaminen voidaan pysäyttää ja sen hetkinen voima ja paine luetaan sekä esimerkiksi varressa olevan asteikon avulla saadaan syvyyslukema.

Hyvin varusteluissa penetrometreissä on automaattinen paikan tallennus (GPS koordinaatit), maan kosteuden mittaus sekä tunkeumavoiman tai paineen ja syvyyden automaattinen tallennus (https://en.eijkelkamp.com/). Penetrometreistä saa helposti lisätietoa hakusanalla 'soil penetrometer'.

Kuva 1.12: Maan kovuuden (tunkeumapaineen) mittaaminen penetrometrilla [Penetrometri 2015]

1.7.2 Kulkukyvyn ennustaminen

Pito-ominaisuuksia määritettäessä käytetään 15 cm syvyyteen työnnetyn kartion työntövoiman keskiarvoa ko-

ko työntömatkalta. Tämä pätee silloin kun rengas uppoaa korkeintaan 7,5 cm. Jos rengas uppoaa enemmän, silloin on käytetty suurimman renkaan uppouman ja 15 cm syvyyden välisen voiman keskiarvoa. Jos rengas uppoaa tätäkin enemmän, mittaus on ulotettava vielä syvemmälle ja kokemusperäisesti on etsittävä sopivin menetelmä.

Mittaus tehdään ennen liikennöintiä, koska maa tallaantuu ja tiivistyy ajettaessa. Mittaukset täytyy tehdä melko tiheään, koska mittaus on täysin pistemäinen. Eri paikkojen väliset vaihtelut ovat melko suuret, mutta lopputuloksena saatava ennuste on melko hyvä, tarkkuus on usein 10-20 % sisällä.

Eri kovuisia maalajeja varten kartio voidaan vaihtaa pienemmäksi tai suuremmaksi. Työntövoiman keskiarvo jaetaan kartion pinta-alalla ja tulos ilmoitetaan paineena. Menetelmä on kehitetty alunperin sotilasajoneuvojen kulkukyvyn määrittämiseen ja sen mukaan maasto voidaan luokitella taulukon 1.2 mukaisesti [Saarilahti 1991]. Ennusteen tekeminen perustuu dimensioanalyyseillä johdettuihin yhtälöihin, lisätietoja esim. viitteessä Liljedahl et al [Liljedahl ym 1979].

Taulukko 1.2: Ajoneuvojen kulkukyky cone-index arvon perusteella [Saarilahti 1991]

Cone-index kPa	Kulkukelpoisuus
0 - 20	Ei kantava maa
40 - 60	Käveleminen vaikeaa
100 - 170	Erikoistela-ajoneuvo 50 ajokertaa
190 - 230	D4 telatraktori 50 ajokertaa
280 - 350	D7 telatraktori 50 ajokertaa
370 - 500	Maansiirtoauto, 5 t kuorma-auto, 50 ajokertaa
520 - 660	Raskaat maansiirtokoneet
680 - 940	Henkilöautot
$>$ 1030	Ei ongelmia

Kun kyseessä on maatalousmaa, se voidaan luokitella cone-index arvon mukaan taulukon 1.3 mukaisesti.

Taulukko 1.3: Maatalousmaan ominaisuuksien ja cone-index arvon riippuvuus

Maa	Cone-index kPa
Märkä ja pehmeä maa	200
Kuiva ja pehmeä maa	400
Märkä savi	500
Kuiva sänki	1000

Esimerkki. Maan cone-index mittauksessa saatiin alla olevat arvot. Mikä on tämän mukainen maan luokitus?

Syvyys cm	Paine kPa
0	0
3,5	302
7	453
10,5	704
14	981
17,5	906

Mittaus on tehty 3,5 cm välein, jolloin 14 cm syvyys on lähinnä 15 cm. Lasketaan syvyyksien 3,5 - 14 cm keskiarvo, joksi saadaan 610 kPa. Taulukon 1.2 mukaisesti pellolla voisi liikkua raskailla maansiirtokoneilla ja taulukon 1.3 perusteella kyseessä on melko kuiva peltomaa.

1.7.3 Ennuste ASAE D497 mukaan

Vierimisvastuskerroin f saadaan ASAE D497 [ASAE D497]standardin mukaan seuraavasti:

$$f = \frac{1}{B_n} + 0,04 + \frac{0,5 \cdot s}{\sqrt{B_n}} \tag{1.22}$$

Yhtälön 1.22 kerroin Bn on dimensioton ja se voidaan laskea CI-arvon (Cone Index arvo), renkaan koon ja litistymän mukaan yhtälön 1.23 avulla. Siinä CI-arvo on normaalisti 15 cm asti mitattu tunkeumapaineen keskiarvo. Jos rengas uppoaa syvälle maahan, tällöin käytetään hieman syvemmältä mitattua keskiarvoa (kappale 1.7).

$$B_n = \frac{CI \cdot b \cdot d}{R} + \frac{1 + 5\frac{\delta}{h}}{1 + 3\frac{b}{d}} \tag{1.23}$$

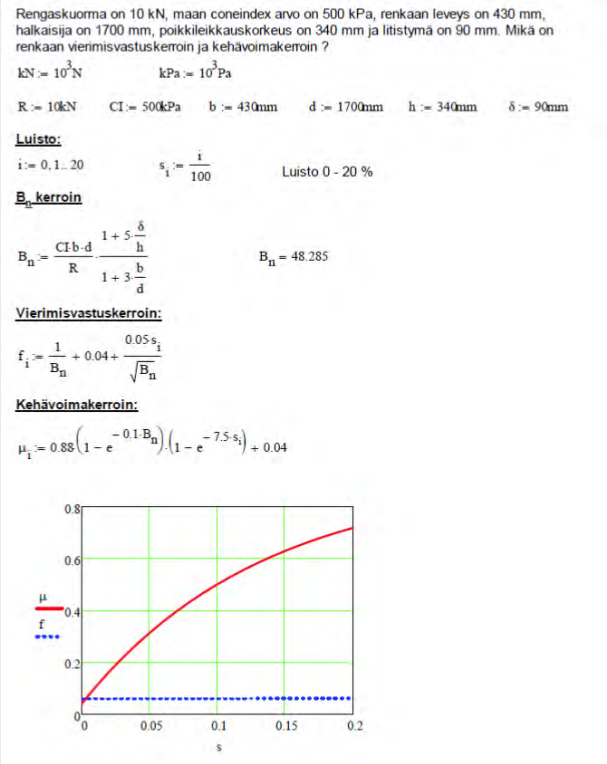
B_n	kerroin
CI	maan cone-index arvo
b	kuormittamattoman renkaan leveys
d	kuormittamattoman renkaan halkaisija
R	rengaskuorma
δ	renkaan litistymä
h	renkaan poikkileikkauskorkeus

Ongelmana yhtälössä 1.23 on renkaan litistymä, sehän vaihtelee kuormituksen ja rengaspaineiden funktiona ja kussakin tilanteessa se pitäisi mitata erikseen.

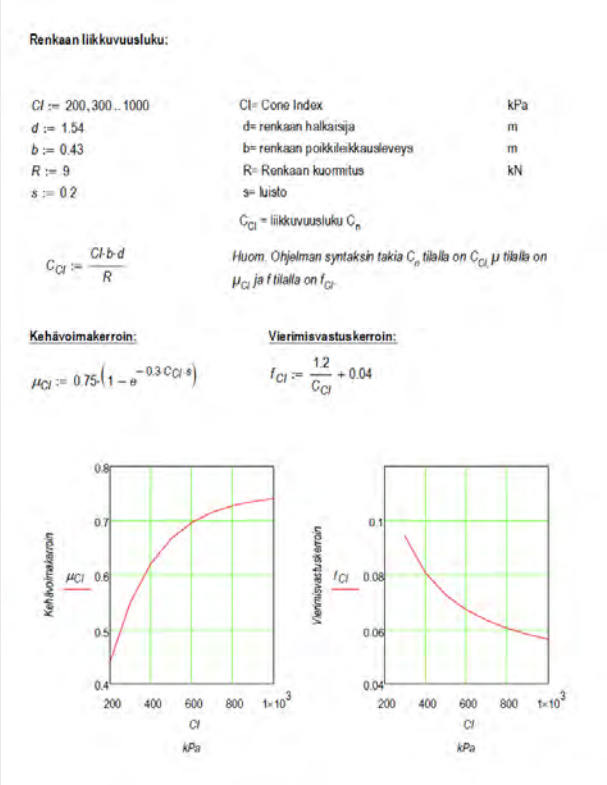
Kehävoimakerroin voidaan laskea yhtälön 1.24 mukaisesti.

$$\mu = 0,88\left(1 - e^{-0,1B_n}\right)\left(1 - e^{-7,5s}\right) + 0,04 \tag{1.24}$$

Esimerkki. Rengaskuorma on 10 kN, maan kulkukyvyn coneindex arvo on 500 kPa, renkaan leveys on 430 mm, halkaisija on 1700 mm, poikkileikkauskorkeus on 340 mm ja litistymä on 90 mm. Mikä on renkaan vierimisvastuskerroin ja kehävoimakerroin ?



Esimerkki. Renkaan halkaisija on 1,54 m, leveys on 0,43 m ja rengaskuorma on 9 kN. Miten renkaan pito ja vierimisvastus muuttuu siirryttäessä pehmeältä pellolta kovalle pellolle ja luisto halutaan pitää kohtuullisena (20%)?
Pehmeän pellon cone-index on luokkaa 200 kPa ja kovan 1000 kPa.



1.7.4 Yksinkertainen ennustemalli

Tähän samaan cone-index arvon käyttöön on olemassa toinenkin yksinkertaisempi laskutapa, siinä ei tarvita renkaan litistymätietoja. Cone-index arvosta lasketaan renkaan laaduton liikkuvuusluku C_n.

$$C_n = \frac{CI \cdot b \cdot d}{R} \tag{1.25}$$

Kehävoimakertoimen ennuste voidaan tämän jälkeä laskea yhtälöllä 1.26.

$$\mu = 0,75\left(1 - e^{-0,3C_n \cdot s}\right) \tag{1.26}$$

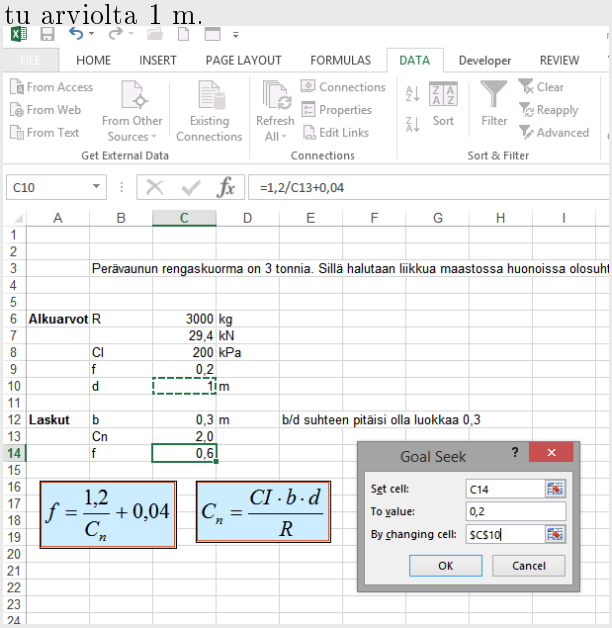
Yhtälö 1.26 pätee silloin, kun renkaan poikkileikkausleveyden suhde halkaisijaan, b/d, on noin 0,3. Samalla tavalla saadaan vierimisvastuskerroin f yhtälöllä 1.27.

$$f = \frac{1,2}{C_n} + 0,04 \tag{1.27}$$

1.7.5 Työkoneen ja traktorin renkaiden valinta

Renkaiden ennustemallit mahdollistavat työkoneiden tai traktorin renkaiden valinnan. Valitaan ensiksi taulukosta 1.3 kuinka pehmeällä maalla haluamme koneella liikkua. Tästä saadaan CI-arvo. Seuraavaksi päätetään kuinka helppoa kulun tuossa olosuhteissa pitäisi olla. Tämä tapahtuu vierimisvastuskertoimen valinnalla. Jos halutaan kevyesti kulkevaa konetta, valitaan f=0,1. Jos taasen halutaan, että maastosta jollain lailla selvitään eli kulku on vaivalloista, valitaan f=0,2. Käyttämällä yksinkertaista mallia ja valitsemalla renkaan leveydeksi b=0,3, voidaan laskea millä halkaisijalla ehto toteutuu.

Esimerkki. Perävaunun rengaskuorma on 3 tonnia. Sillä halutaan liikkua maastossa huonoissa olosuhteissa. Mikä pitäisi renkaan halkaisijan olla?
Valitaan taulukon 1.3 mukaisesti CI-arvoksi 200 kPa. Käytetään hyväksi Excelin Goal Seek ominaisuutta. Vastaukseksi saadaan 1,9 m. Tämän voisi tietysti ratkaista myös analyyttisesti. Kuvassa on Excelin käyttö ennen kuin ratakaisu on saatu, halkaisijaksi on annettu arviolta 1 m.

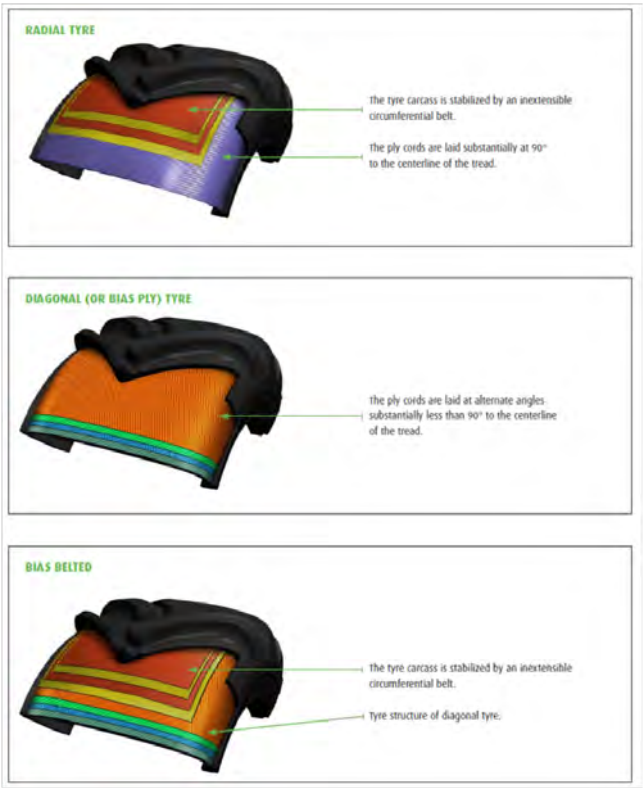


Luku 2

Renkaiden ominaisuudet

Renkaiden ja vanteiden tietoja on saatavissa niitä koskevista standardeista. Nämä standardit ovat rengasvalmistajien sopimia arvoja. Näitä standardeja voi tilata rengasyhdistysten nettisivuilta, yhdysvaltalaisia standardeja julkaisee The Tire and Rim Association, Inc., eurooppalaisia ERTO The European Tyre and Rim Technical Organisation ja pohjoismaisia STRO The Scandinavian Tire & Rim Organization. Rengasvalmistajat julkaisevat omia luetteloita ja myös oppaita. Näitä on saatavissa rengasvalmistajien kotisivuilta.

2.1 Kudosrakenne

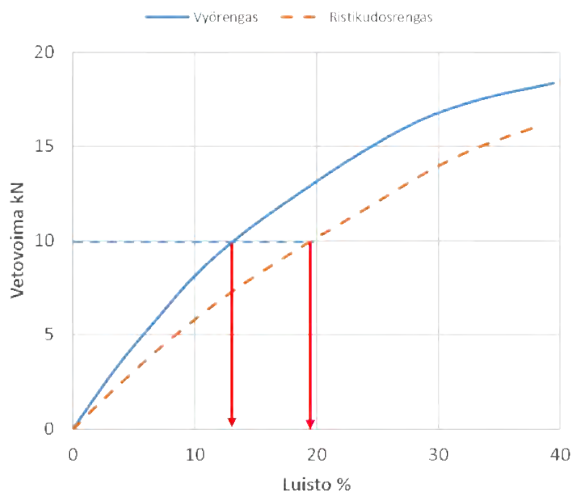


Kuva 2.1: Renkaiden runkorakenteita, Diagonal (Bias Ply) = ristikudosrengas, Radial Tyre = vyörengas, Bias Belted = puolivyörengas [Nokian Tyres 2015]

Maataloustraktorin renkaat ovat kudosrakenteeltaan joko ristikudos- tai vyörenkaita tai näiden kahden perustyypin välimuotoja. Ristikudosrenkaissa kudokset menevät renkaan kehän yli n 45° kulmassa kun taasen vyörenkaissa perusrunko menee kohtisuoraan kehän yli ja pinta on vyönä, kuva 2.1.

Puolivyörengas on näiden kahden perustyypin välimuoto ja siinä vyökerros on ristikudospohjan päällä. Vyörenkaissa renkaan sivussa on vähemmän kudoksia, mikä aiheuttaa joustavamman rakenteen ja erilaisen kosketuspinnan. Vyörenkaan sivut joustavat enemmän ja renkaan kosketuspituus on pidempi, jolloin useampi ripa on yhtaikaa leikkaamassa maata. Tämä näkyy käytännössä parempana pitona.

Jos traktoriin vaihdetaan ristikudosrenkaiden tilalle vyörenkaat ja työkone sekä sen vetovastus pysyvät samana, pyörien luisto on pienempi vyörenkaita käytettäessä. Vyörenkaan sivut ovat kuitenkin arat rikkoontumaan, sen takia niitä ei voida käyttää esim. metsätöissä, jossa terävät kannot tai kivet helposti lävistävät ulos pullistuvat renkaan kyljet. Metsäkäyttöä varten on saatavissa maataloustraktoreihin paremmin pistosuojattuja malleja.

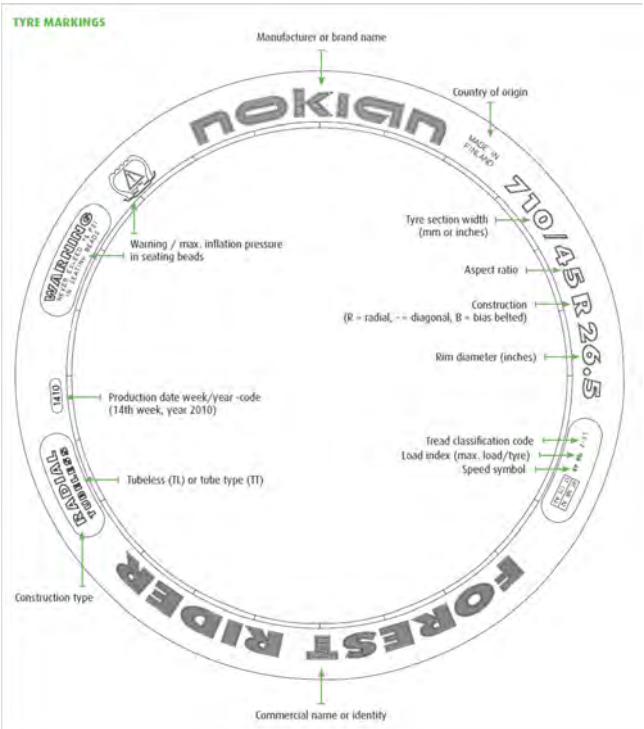


Kuva 2.2: Ristikudos- ja vyörenkaan käytön vaikutus traktorin vetovoimaan

Kuvassa 2.2 on esimerkki rengastyypin vaikutuksesta traktorin vetovoimaan. Katsotaan esimerkkiä, jossa tarvitaan 10 kN vetovoima. Jos käytetään vyörenkaita, luis-

to on 13 % ja jos käytetään ristikudosrenkaita, luisto on 19%. Vaihtamalla ristikudosrenkaat vyörenkaisiin luisto pienenee 6 %-yksikköä. Tämä tarkoittaa lähes samansuuruista työsaavutuksen lisääntymistä, koska renkaan kehänopeuden pysyessä samana ajonopeus on pienemmän luiston ansiosta vyörenkaita käytettäessä suurempi.

2.2 Rengasmerkinnät



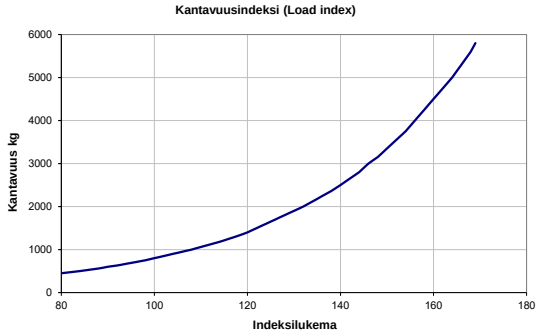
Kuva 2.3: Rengasmerkinnät [Nokian Tyres 2015]

Rengasmerkinnät voivat olla joko valmistajakohtaisia, valmistajajärjestön suosituksen mukaisia tai kansainvälisten standardien mukaisia. Tämä aiheuttaa hieman horjuvuutta merkintätavoissa, koska on valittavissa useista eri tavoista. Kuvassa 2.3 on esitetty renkaiden merkintätapoja.

Merkinnät voivat olla tuumamittoja tai millimetrejä tai näiden sekoituksia. Yleinen esittämismuoto on: renkaan leveys/runkorakenne/vanteen halkaisija. Esimerkiksi 18.4-38 tarkoittaa 18.4 tuumaa leveää rengasta, - tarkoittaa ristikudosrakennetta ja 38 tarkoittaa, että se on tarkoitettu vanteelle, jonka halkaisija on 38 tuumaa. Jos - korvataan R kirjaimella, silloin kyseessä on vyörengas (18.4R38) ja jos siinä on B, silloin kyseessä on puolivyörengas.

Jos koko ilmoitetaan millimetreinä, silloin merkintä on esimerkiksi 710/70R38. Renkaan leveys on 710 mm ja sen profiilikorkeus on 70 % leveydestä, rengas on vyörengas ja se sopii 38 tuuman vanteelle.

Kokomerkinnän jälkeen tulee renkaan luokituskoodi, kantavuus ja nopeusmerkinnät. Näitä kaikkia koodeja ei välttämättä merkata renkaaseen eli merkinnöissä voi olla horjuvuutta. Luokituskoodi ilmaisee renkaan käyttötarkoituksen ja perustyypin. Nämä on esitetty esimerkiksi Nokian Renkaiden [Nokian Tyres 2015] oppaassa.



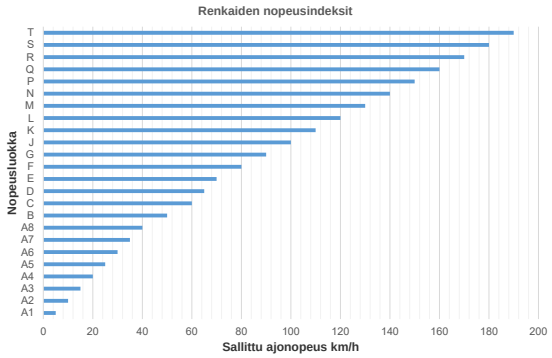
Kuva 2.4: Renkaan kantavuusindeksi

Kantavuus tai oikeammin rungon lujuus ilmoitettiin aikoinaan runkokerrosten lukumäärän avulla. Esimerkiksi 8 PR (Ply Rating) tarkoitti rengasta, jossa on kahdeksan puuvillalankakerrosta. Puuvillalangoista luovuttaessa merkintä tarkoitti rengasta, joka on yhtä vahva kuin vastaava puuvillalangoista tehty runko, esimerkiksi vahvuus vastasi kahdeksan kankaisen rungon kestävyyttä. Kun runko oli vahvempi, renkaassa voitiin käyttää suurempia rengaspaineita ja sitä kautta myös rengaskuormat voivat olla suurempia. Nykyisin renkaiden kudoksissa käytetään muovimateriaaleja, kuten esimerkiksi nylonia, polyesteriä ja rayonia sekä terästä.

PR merkinnän sijasta maataloustraktoreiden renkaissa on käytetty myös tähtiä kuvaamaan suurinta sallittua rengaspainetta. Yksi tähti (★) merkitsee 18 psi (1,2 bar) painetta, kaksi tähteä (★★) 24 psi (1,7 bar) painetta ja kolme tähteä (★★★) 30 psi (2,1 bar) painetta. Myös teollisuus- tai metsärenkaissa on käytetty tähtisymboleja, mutta niissä painesuositukset ovat erisuuret kuin maatalousrenkaissa.

Renkaan kantavuus ilmaistaan nykyisin kantavuusindeksinä, kuva 2.4. Näistä on huomattava, että eri renkailla voi olla sama indeksi, jolloin suurin sallittu kuorma on sama, mutta tarvittavat rengaspaineet voivat olla erisuuret. Esimerkiksi jos kokomerkinnän jälkeen renkaassa on lukema 166 (710/70R38 166), suurin sallittu rengaskuorma on 5300 kg.

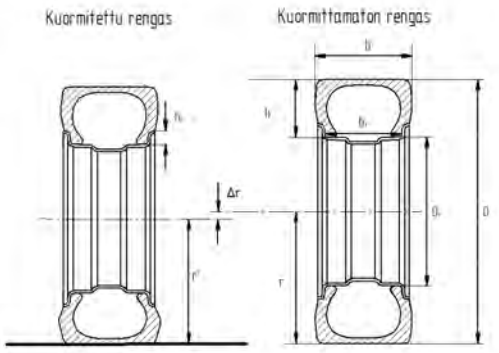
Renkaan suurin sallittu ajonopeus merkitään kirjain- ja numerotunnuksella kuvan 2.5 mukaisesti. Traktoreiden ajonopeudet ovat viimeaikoina kasvaneet ja renkaan nopeusmerkinnän pitäisi vastata traktorin suurinta ajonopeutta. Pienelle nopeudelle tarkoitettu rengas ei kestä



Kuva 2.5: Renkaiden nopeusluokat

nopeaa ajoa eikä se välttämättä ole yhtä hyvin tasapainossa.

2.3 Profiilisuhde



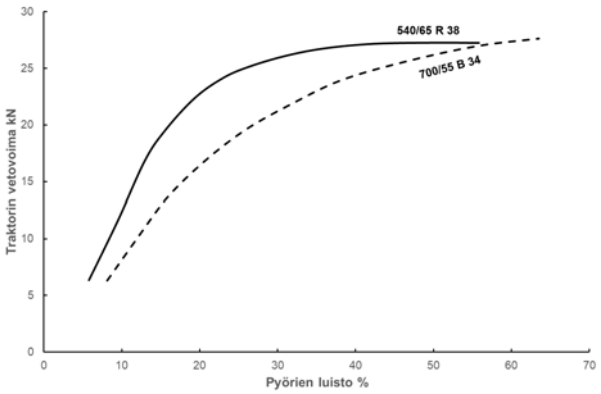
Kuva 2.6: Renkaan mittoja

Renkaan poikkileikkauskorkeuden h suhdetta renkaan leveyteen b kutsutaan profiilisuhteeksi (poikkileikkaussuhde), kuva 2.6. Tavallisesti tämä suhde on 0,85 luokkaa. Jos suhde on pienempi, kyseessä on matalailmatilainen tai matalaprofiilinen rengas. Niissä voidaan yleensä käyttää alempia rengaspaineita, jolloin esim. pintapaine on pienempi.

Erikoisleveät renkaat voidaan lukea myös matalaprofiilisiksi renkaiksi. Niiden pito-ominaisuuksista on saatu ristiriitaisia tuloksia. Pito-ominaisuudet ovat olleet usein huonompia kuin normaaliprofiilisten renkaiden pito-ominaisuudet. Tähän vaikuttaa suurempi vierimisvastus, pienempi pintapaine, lyhyempi kosketuspituus ja huonompi puhdistuvuus. Suurempi vierimisvastus johtuu suuremmista renkaan muodonmuutoksista ja myös siitä, että se tallaa maata normaalirengasta leveämmältä. Tällöin myös rengas usein aiheuttaa eteensä "maaaallon", koska maa ei pysty siirtymään renkaan leveyden takia sivulle, renkaan eteen muodostuu siirtyvä aalto. Tämä puskuvastus lisää myös vierimisvastusta.

Pieni pintapaine aiheuttaa sen, että rengas leveytensä takia koskettaa maata lyhyeltä matkalta ja silloin koskeutuspituus jää lyhyeksi. Tämän seurauksena vetävien ripojen määrä jää pieneksi ja pito heikommaksi kuin pitkällä kosketuspituudella.

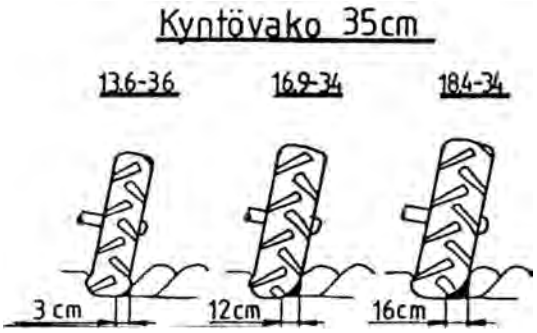
Leveässä renkaassa on pitkät rivat. Ne huonontavat renkaan puhdistumista, koska väli on pitkä, jolloin maa ei samalla lailla irtoa.



Kuva 2.7: Renkaiden vetokoetulos [Elonen ym 1995]

Kuvassa 2.7 on esimerkki renkaiden vetoominaisuuksista. Leveä puolivyörengas on selvästi kapeampaa vyörengasta huonompi. Jos työkoneen vetovastus pysyy samana sitä käytettäessä pyörien luisto suurenee ja työsaavutus heikkenee. Vaikka matalailmatilainen renkaan pito ei aina ole parempi, sen etuna on suurempi ilmatilavuus ja sitä kautta voidaan käyttää alhaisempia rengaspaineita, jolloin pintapaine on alhainen ja rengas ei uppoa samalla lailla maahan.

Renkaan leveyttä rajoittaa kyntötyö, renkaan on mahduttava kyntövakoon ja se ei saisi tallata kovinkaan paljon viilua, kuva 2.8.



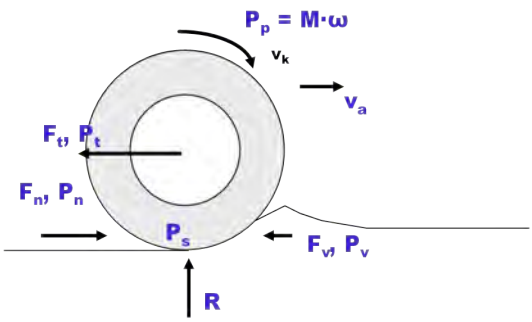
Kuva 2.8: Renkaan mahtuminen kyntövakoon

2.4 Vetohyötysuhde

Kun tarkastellaan vetävää rengasta, kuva 2.9, nin voidaan tehdä yhtälön 2.1 mukainen tehotarkastelu, jossa akselilta pyörälle tuleva teho jakaantuu työkoneen vetämiseen P_t, omaan liikkumiseen P_v ja P_r ja pyörien luistoon P_s. Näistä varsinainen hyödyllinen teho on työkoneen vetäminen eli vetoteho P_t.

$$P_p = P_v + P_r + P_t + P_s \tag{2.1}$$

P_p	pyörälle tuleva teho
P_v	vierimisvastusteho
P_t	vetoteho
P_r	rinteen nousuun tarvittava teho
P_s	luistoon kuluva teho



Kuva 2.9: Pyörään vaikuttavat voimat ja momentit.

Pyörälle tuleva akseliteho P_p saadaan akselilla vallitsevasta vääntömomentista ja akselin nopeudesta, yhtälö 2.3. Vetoteho P_t on yhtälön 2.2 mukainen.

$$P_t = F_{vv} v_a \tag{2.2}$$

P_t	työkoneen vetoteho
F_{vv}	työkoneen vetovastus
v_a	ajonopeus

Työkoneella on vetovastus ja renkaiden on aikaan saatava tätä vastaava vetovoima, jotta työnteko onnistuu. Vierimisvastukseen P_v tarvittava teho saadaan vierimisvastusvoimasta F_v ja ajonopeudesta v_a, yhtälö 2.4. Luistoteho P_s saadaan luistonopeudesta ja kehävoimasta F_n, yhtälö 2.5. Rengas hukkaa luistoon tehon, joka syntyy renkaan alla luistonopeuden ja renkaaseen vaikuttavan kehävoiman tulona. Luistonopeus on kehänopeuden ja ajonopeuden erotus.

$$P_p = M\omega = M \cdot n\frac{\pi}{30} = M \cdot n \cdot 0,105 \tag{2.3}$$

P_p	pyörän teho
M	vääntömomentti
ω	kulmanopeus rad/s
n	pyörimisnopeus 1/min

$$P_v = F_v v_a \tag{2.4}$$

P_v	vierimisvastusteho
F_v	vierimisvastus
v_a	ajonopeus

$$P_s = F_k v_s = F_k v_a \frac{s}{1-s} \tag{2.5}$$

P_s	luistoteho
F_k	kehävoima
v_s	luistonopeus

Tarkastellaan sen jälkeen mikä on vetotehon (hyötytehon) osuus akselitehoon nähden, yhtälö 2.6.

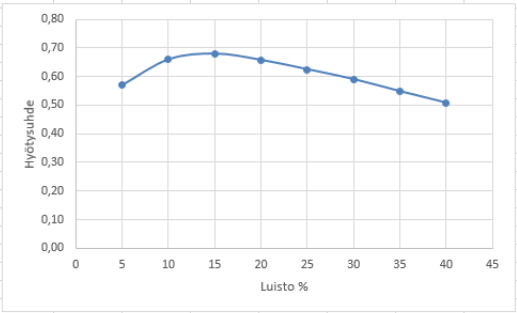
$$\eta = \frac{P_a}{P_p} = \frac{F_a v_a}{M\omega} = \frac{F_a v_a}{F_n v_k} = \frac{(\mu - f)\cdot R \cdot v_a}{\mu \cdot R \cdot \frac{v_a}{(1-s)}} = (1-s)(1-\frac{f}{\mu}) \tag{2.6}$$

Esimerkki. Mikä on renkaan vetohyötysuhde normaalilla pellolla luiston funktiona?
Katsotaan kehävoimakertoimet kuvasta 1.5 ja vierimisvastuskerroin taulukosta 1.1. Näiden perusteella saadaan:

Esimerkki. Mikä on rankaan vetohyötysuhde normaalilla pellolla luiston funktiona?

f 0,08

s %	μ	η	
5	0,2	0,57	Luetaan luiston ja
10	0,3	0,66	kehävoimakertoimien arvot
15	0,4	0,68	kuvasta
20	0,45	0,66	
25	0,48	0,63	
30	0,51	0,59	
35	0,51	0,55	
40	0,52	0,51	

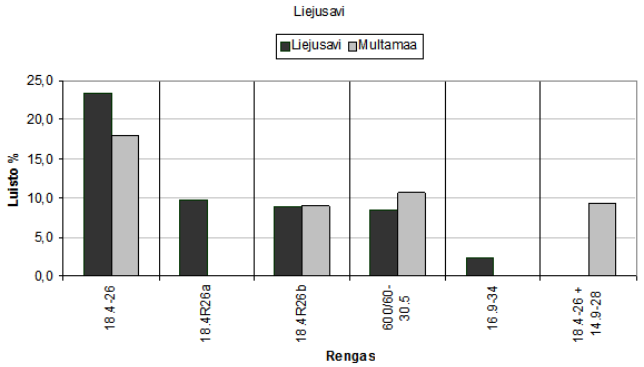


2.5 Renkaan koko

Renkaan kokomerkinnästä selviää jo karkeasti renkaan koko. Erilaiset profiilisuhteet kuitenkin vaikuttavat renkaan halkaisijaan ja tarkka koko on sen takia aina syytä

katsoa valmistajan antamista tiedoista. Myös kuviointikorkeus vaikuttaa halkaisijaan. Renkaalle on usein annettu kaksi halkaisijamittaa (tai sädemittaa), renkaan halkaisija tai säde kuormatta ja kuormitettuna, r ja r' kuvassa 2.6. Kuormitettu säde soveltuu nopeuksien laskentaan, koska siinä on mukana kuormituksen aiheuttama renkaan litistyminen (Δr kuvassa 2.6) ja vetosäde r' vastaa silloin todellista tilannetta. Nelivetoisissa traktoreissa tiettyä takarengaskokoa vastaa tietty eturengaskoko. Kun renkaita uusitaan, on käytettävä vierimissäteeltään vastaavia renkaita.

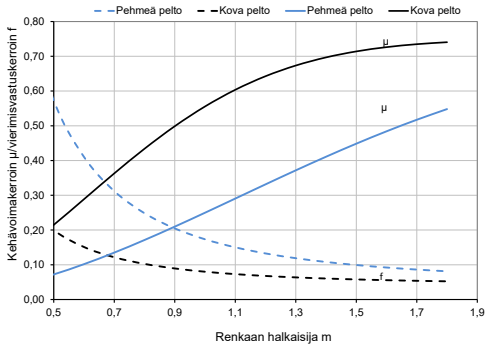
Renkaan halkaisijan kasvattaminen lisää renkaan kosketuspituutta ja sitä kautta saadaan useampi ripa samanaikaisesti vetoon. Tämä on nähtävissä esimerkiksi kuvasta 1.1, jossa telan ripoihin kohdistuva voima kasvaa, kun siirrytään telan alla taaksepäin. Jos renkaan leveyttä lisätään, sama pintapaine saadaan lyhyemmällä kosketuspituudella ja sen seurauksena on odotettavissa pidon huonontumista, koska vetävien ripojen määrä vähenee.



Kuva 2.10: Puimurin etupyörien vaikutus luistoon kahdella eri maalajilla [Mäkelä ja Laurola 1990]

Kuvassa 2.10 on mittaustulos puimurin vetävien pyörien luistosta, kun siinä on käytetty erilaisia renkaita. Esimerkiksi liejusavella luisto on ollut lähes 25 % normaalia rengasvarustusta käytettäessä. Vyörenkaat ja erikoisleveä rengas ovat pienentäneet luiston 10 % paikkeille. Halkaisijaltaan suurempi ristikudosrengas on pienentänyt luiston vain muutamaan prosenttiin. Kulkukyky on muuttunut alkuperäisestä vaikeasta helpoksi.

Renkaan kokoa määritettäessä voidaan käyttää kappaleen 1.7 yhtälöitä apuna. Niistä on nähtävissä, että renkaan halkaisijan kasvattaminen parantaa pitoa ja pienentää vierimisvastusta. Kuvassa 2.11 on laskettu esimerkki tällä menetelmällä. Pyörän kuormana on käytetty 10 kN, luistona 15 %, renkaan leveydeksi on otettu 30 % halkaisijasta ja maan Cone-indeksinä on käytetty 700 kPa. Arvot vastaavat n 50 kW traktorin käyttöä äestyksessä. Kuvasta nähdään selvästi renkaan halkaisijan vaikutus, esimerkissä 1,4 m jälkeen sen kasvattaminen ei enää paljoa vaikuta, mutta sitä ennen vaikutus on huomattava.

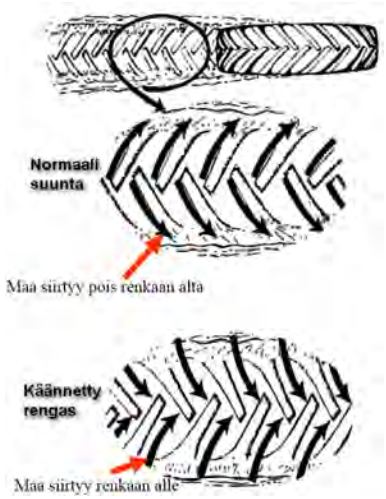


Kuva 2.11: Renkaan koon vaikutus kehävoimakertoimeen ja vierimisvastuskertoimeen

Samoin renkaan halkaisija vaikuttaa vierimisvastukseen. Aluksi vaikutus on huomattava, mutta tasaantuu sen jälkeen.

2.6 Renkaan kuviointi

Renkaan ripojen tehtävänä on upota maahan ja saada pito maan sisästä. Kun renkaan kehänopeus on ajonopeutta suurempi eli rengas luistaa, rivat pyrkivät leikkaamaan (kuorimaan) maata. Renkaan pito perustuu tähän. Rivoitus menee vinosti renkaan kehän yli, jotta sillä olisi myös hyvä sivuttaispito. Täysin poikittain olevat rivat (vrt telaketju) eivät anna sivurinteessä sivuttaispitoa. Ripojen tiheyteen ja muotoon vaikuttaa myös renkaan puhdistuvuus ja kestävyys. Ripavälin pitäisi olla avaran, jotta se puhdistuisi.



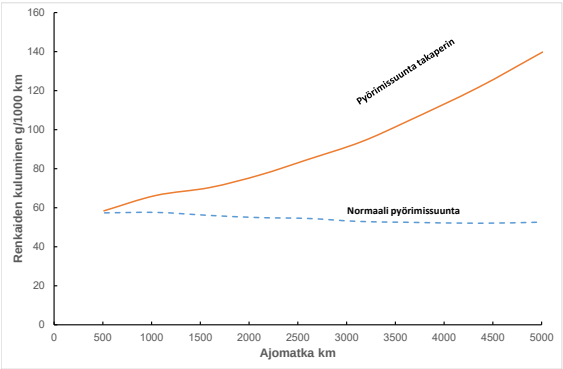
Kuva 2.12: Renkaan pyörimissuunnan vaikutus

Usein pellon pinta on märkä, jolloin sen leikkauslujuus on huono. Tästä pinnasta on päästävä hieman syvemmälle kuivempaan ja pitävämpään maahan. Renkai-

den ripakorkeudeksi suositellaan vähintään 20 mm, jotta renkaiden pito pehmeällä pellolla olisi kohtuullinen. Tämä mitta on eräänlainen "vaihtoraja". Nykyisin uusien renkaiden rivat ovat 40-50 mm luokkaa. Tämä on melko sopiva korkeus, koska ripojen kasvattaminen tästä tuottaa vaikeuksia renkaan kestävyydelle ja vierimisvastus myöskin kasvaa nopeasti renkaan muodonmuutoksen ja maan ryöpyttämisen lisääntyessä.

Ripakulmalla ei ole huomattu olevan suurtakaan merkitystä pitoon. Normaalissa asennuksessa ripojen vinous pakottaa niiden väliin jäänyttä maata pois renkaan alta, kuva 2.12. Rengas puhdistuu tällöin paremmin, mutta rengas voi myös kaivautua maahan, koska maata poistuu renkaan alta. Jos rivat ovat kovin poikittain, pysyminen sivurinteessä voi tulla ongelmaksi.

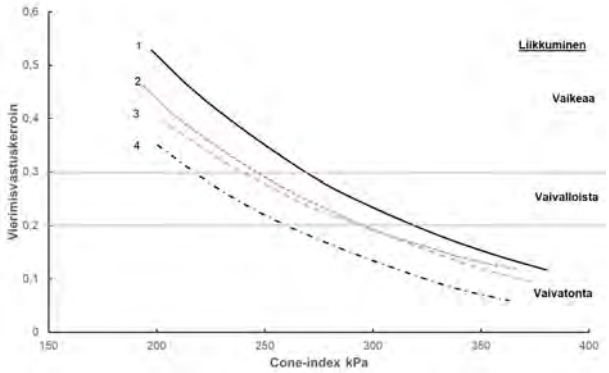
Renkaiden kääntö siten, että kuviointi on "väärinpäin" parantaa niiden kulutuskestävyyttä maantieajossa, koska ripojen reunat koskettavat ensiksi maahan, eivätkä kärjet. Jos ajetaan pelkästään maantieajoa, renkaat kestävät Billerin [Biller 1978] mukaan jopa 4,5 kertaisen ajomatkan ja jos maantieajoa on 30 % kokonaisajosta, kestoikä on kaksinkertainen. Pitoon renkaan kääntö vaikuttaa vasta märällä pellolla maan tarttuessa renkaaseen. Tällöin rivat työntävät maata renkaan alle ja se ei puhdistu kunnolla.



Kuva 2.13: Renkaiden kuluminen ja pyörimissuunta[Biller 1978]

Renkaan kuviointi vaikuttaa sen puhdistuvuuteen. Kuviointi saisi olla avoin ja renkaan runko saisi elää voimakkaasti. Tällöin rengas puhdistuu hyvin. Jos rengas ei puhdistu, "ripakorkeus" pienenee ja kuvion täytyttyä rengas ei pysty leikkaamaan maata, vaan se liikkuu kumin ja maan sekä maan sisäisen kitkan turvain. Maan tarttumiseen vaikuttaa ratkaisevasti maan kosteus. Tietyllä kosteusalueella tarttuminen voi olla hyvinkin voimakasta.

Kuvassa 2.14 on esitetty puimurin takapyörien vierimisvastuskerroin erilaisilla alustoilla. Suurin vierimisvastus on ollut leveillä renkailla ja pienin ripakuviorenkailla, kun vielä takaraideväli on ollut sama kuin edessä. Takapyörät kulkevat tällöin eturenkaiden tallaamissa jäljissä ja ripakuvio auttaa rengasta pyörimään, jolloin sen vierimisvastus on pieni.



Kuva 2.14: Puimurin taka-akselin ja renkaiden vaikutus kulkukykyyn [Mäkelä ja Laurola 1990]1 = kapea raideväli, 400-17.5 rengas, pitkittäiskuvio. 2 = kapea raideväli, 11.5-15.3 rengas, pitkittäiskuvio. 3 = leveä raideväli, 12.5-18 rengas, pitkittäiskuvio. 4 = leveä raideväli, 12.5-18 rengas, ripakuvio

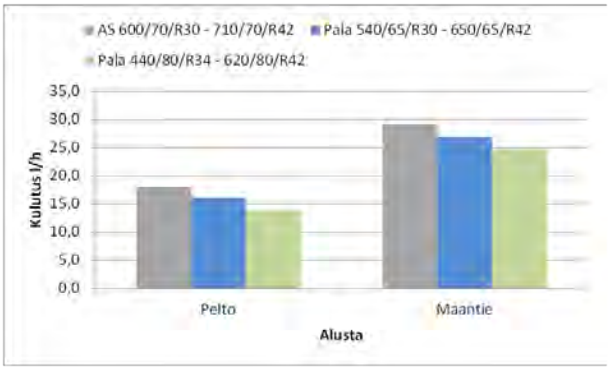
Jos kuljetusajoa on runsaasti, silloin kannattaa käyttää palarenkaita. Reckleben ym [Reckleben yml 2013] vertasivat traktorin maatalousrenkaita ja vastaavan kokoisia teollisuusrenkaita (palarenkaita). Kokeessa käytettiin kolmea samanlaista traktoria, joihin oli asennettu maatalousrenkaat tai palarenkaat. Palarenkaita oli vielä kahta eri kokoa. Traktoreita käytettiin heinän pöyhintään, säilörehun kuljetukseen, paalauksen ja kuljetuksiin. Maatalousrenkaiden kestoikä oli n 3000 tuntia, kun taasen palarenkaiden kestoikä oli n 9000 tuntia.

Traktoreiden polttoainekulutukset on esitetty kuvassa 2.15. Palarenkailla polttoaineen tuntikulutus oli alhaisempi kuin maatalousrenkailla. Palarenkailla suurempi koko vielä oli polttoainetehokkaampi kuin pienempi rengaskoko.

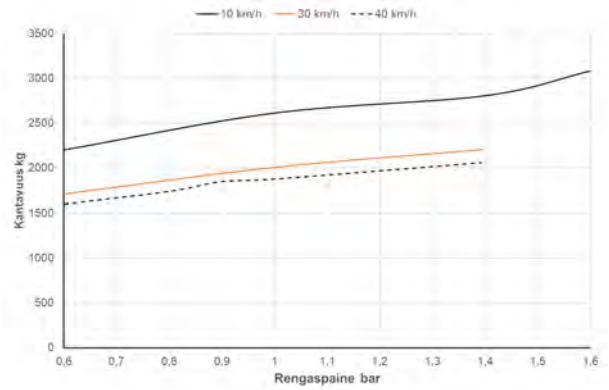
Palarenkaat ovat hyvät niin kauan kuin olosuhteet ovat hyvät. Märällä pellolla rengaskuvio ei enään toimi kunnolla ja pito on heikompi normaaliin maatalousrenkaaseen verrattuna.

2.7 Renkaan kantavuus

Renkaan kantavuus riippuu renkaan ilmatilavuudesta ja rengaspaineesta. Periaatteessa renkaassa oleva ilma kantaa kuorman. Käytännössä myös renkaan sivut kantavat osan kuormasta. Kun rengaspainetta tai renkaan ilmatilavuutta lisätään, myös kuormitusta voidaan lisätä. Renkaan rungon lujuus vaikuttaa siihen, kuinka suuria paineita renkaissa voidaan käyttää eli vahvassa rungossa



Kuva 2.15: Traktorin rengastuksen vaikutus polttoaineenkulutukseen [Reckleben yml 2013]



Kuva 2.16: Esimerkki ajonopeuden ja rengaspaineen vaikutuksesta renkaan kantavuuteen

voidaan käyttää suurempia paineita ja myös suurempaa rengaskuormaa.

Traktoreissa ja maatalouskoneissa renkaat toimivat laitteen ainoana jousina ja tämä jousto aiheuttaa renkaan kuumenemista. Se näkyy etenkin siirtoajoissa. Lämpeneminen voi aiheuttaa renkaan runkorakenteiden rikkoontumisia. Sen takia suurin kuormitus riippuu myös ajonopeudesta.

Renkaiden kuormitusarvot saadaan valmistajien antamista teknisistä tiedoista. Kuvassa 2.16 on esimerkki ajonopeuden ja rengaspaineen vaikutuksesta renkaan kantavuuteen. Renkaan pito on hyvä kun käytetään alhaisia rengaspaineita. Siksi pellolla pitäisi käyttää mahdollisimman alhaisia rengaspaineita. Kuljetuksissa taasen pitäisi käyttää korkeampia paineita.

Pidon lisäämiseksi renkaaseen voidaan joutua asentamaan lisäpainoja. Traktoreille on olemassa valurautasia lisäpainoja, jotka voidaan kiinnittää renkaan levypyörään. Lisäksi kuormitusta voidaan lisätä renkaiden nestetäytöllä. Suurikokoisten renkaiden tilavuudet ovat useita satoja litroja, jolloin nestetäytöllä saadaan helposti muutaman sadan kilon kuormituslisä. Yleisesti nesteenä käytetään vettä tai jos pelkona on veden jäätyminen siihen sekoitetaan suolaa.

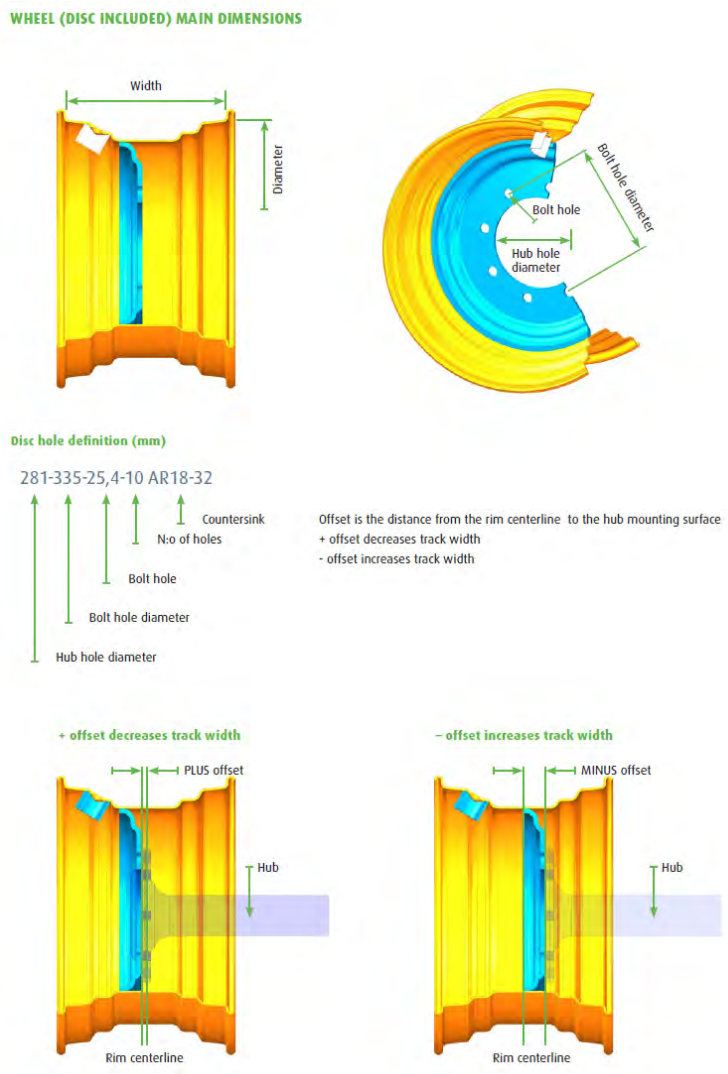
2.8 Vanteet

Renkaissa on aina käytettävä niihin suositeltuja vanteita. Vannekoon lisäksi vannetyypin on oltava oikea. Vanne toimii myös voimansiirtoelimenä, kun akselilla vaikuttava vääntö muutetaan vetovoimaksi. Traktorirenkaissa renkaan on pysyttävä vanteella paikallaan eli vanne ei saa pyörähtää renkaan sisällä. Pyörähtämisestoa varten vanteissa on pyöllys. Suuritehoisissa traktoreissa joudutaan pyörähtämisvaaran takia käyttämään pari- tai kolmoisrenkaita.

Vanteita on kahta päätyyppiä, tasapohjavanteet ja uomavanteet. Uomavanteita on vielä eri syvyyksiä. Uoma tarvitaan renkaan asentamista varten, renkaan sisäreuna laitetaan uomaan, jolloin sitä voidaan liikuttaa vanteellaan. Tasapohjavanteet ovat koottavia tai lukkorengasvanteita ja niissä renkaan vanteelle laiton jälkeen rengas lukitaan tai vanteen osat kootaan kokoon. Niitä ei yleensä käytetä maatalouskoneissa.

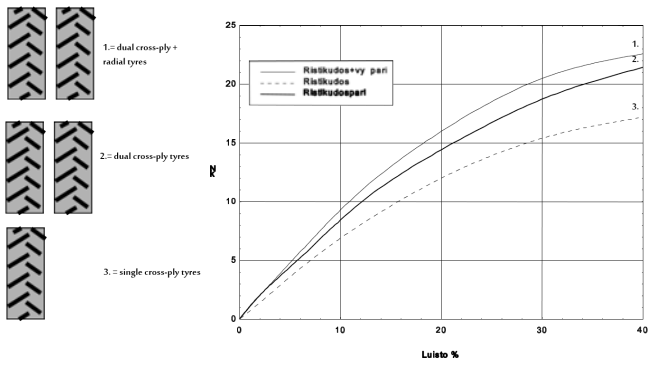
Vannemerkintä on esimerkiksi seuraava: W15Lx30, missä ensimmäiset kirjaimet esittävät vannetyypin (W= uomavanne, DW= syväuomavanne), luku on vanteen leveys (15 = 15 tuumaa), kirjain on sarven tyyppi (L= sarven korkeus on 25,4 mm), seuraava merkki on joko x (yksiosainen vanne) tai - (moniosainen vanne) ja viimeinen luku on vanteen halkaisija (30=30 tuumaa). Renkaiden teknisissä tiedoissa ja rengasvalmistajien taulukoissa on esitetty kullekin renkaalle sopivat vannetyypit. Erikoisrenkaissa voi olla erikoisvanteet ja tämä on aina tarkistettava.

Vanteet kiinnitetään pyörän akselille levypyörän avulla, kuva 2.17. Monesti vanne ja levypyörä ovat yhtä osaa ja sen takia vanne nimellä tarkoitetaan myös levypyöräosaa. Jotta levypyörä voidaan asentaa akselille, sen mitoituksen (jakokehä, pultinreikä, keskireikä, reiän muoto) on oltava oikea. Maataloustraktoreissa on säädettävä raideleveys. Säätö saadaan aikaiseksi epäkeskisellä levypyörän kiinnityksellä. Muuttamalla kiinnitystä saadaan useita raideleveyksiä.



Kuva 2.17: Vanteiden ja levypyörien merkintä [Nokian Tyres 2015]

2.9 Parirenkaat



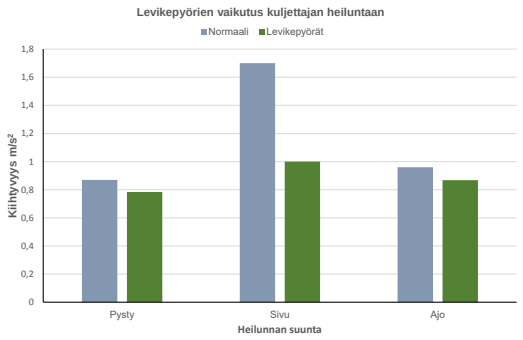
Kuva 2.18: Parirenkaiden vaikutus vetovoimaan

Parirenkaita käytettäessä voidaan rengaspaineita alentaa. Parirenkaiden kantavuus on 1,76 kertainen yhden renkaan kantavuuteen verrattuna. Tämä sallii normaalia alhaisempien paineiden käytön. Vetävissä pyörissä käytettäessä akselipaino kasvaa ja pyörien luisto vähenee. Kuvassa 2.18 on esimerkki parirenkaiden vaikutuksesta vetovoimaan. Parirenkaita voidaan käyttää äestystöissä, kynnöllä niitä ei voida käyttää, koska ne eivät mahdu kyntövakoon.

Parirenkaat vaikuttavat myös ajomukavuuteen. Parirenkaita käytettäessä traktorin ja kuljettajan sivusuuntainen heilunta vähenee huomattavasti. Tällä on merkitystä etenkin kynnöksellä ajettaessa.

2.10 Pintapaine

Ilman tehtävänä renkaassa on kuorman kanto ja renkaan tehtävänä on ilman pitäminen renkaassa.. Renkaan pidon kannalta pitäisi voida käyttää alhaisia paineita ja joustavia renkaita. Tällöin rengas koskettaa maahan pitkältä matkalta ja pehmeästi tasaisesti jakaantuneella pintapaineella ja useampi ripa on silloin yhtaikaa vetämässä. Mitä vahvempi kudosrakenne on, sitä suurempia rengaspaineita ja suurempia kuormituksia voidaan käyttää. Rungon vahventaminen tuo mukanaan jäykem-



Kuva 2.19: Parirenkaiden vaikutus kuljettajan heiluntaan

Kuva 2.20: Renkaan ripoihin laitetun maalin jäljet paperissa

män rakenteen, jolloin ilmatila ei enää yksinään kanna kuormaa, vaan renkaan sivut kantavat osan siitä. Rengaspaine vaikuttaa renkaan pitoon siten, että paineen alentaminen parantaa pitoa. Suurentunut jousto parantaa myös renkaan puhdistuvuutta ja tarttuvilla mailla rengas pysyy paremmin puhtaana.

Koska renkaassa oleva ilma kantaa kuorman, pintapaine on ideaalisessa tapauksessa rengaspaineen suuruinen. Kun otetaan huomioon renkaan rungon kantama osa, pintapaine saadaan lisäämällä rengaspaineeseen kudospaine. Kudospaineet ovat maatalousrenkaissa 0,1-0,5 bar luokkaa. Jotta pellon pinta säilyisi ehjänä, pitää suosia alhaisia paineita. Käytännössä pintapaine vaihtelee maan ominaisuuksien mukaan. Kovalla alustalla renkaan rivat eivät uppoa maahan ja rivat pelkästään kantavat koko kuorman. Tällöin ripojen ja maan välinen pintapaine on korkea. Renkaan upotessa maahan myös ripojen välit alkavat kantamaan ja tällöin pintapaine laskee.

Yleensä pintapaineesta kiinnostaa keskimääräinen pintapaine. Sen määritys käytännössä ei kuitenkaan ole kovin helppoa. Mitattaessa pintapaineita kovalla alustalla voidaan laittaa maalia renkaan ripoihin ja laskea rengas paperin päälle, kuva 2.20. Nostamalla rengasta ja pyörittämällä sitä eri asentoihin saadaan paperille renkaan kosketuskuva. Pehmeällä alustalla voidaan käyttää muovia renkaan ja maan välissä ja ruiskuttamalla spraymaalia renkaan ympärille saadaan renkaan kosketusala selville.

Renkaan kosketuskuvio maahan riippuu renkaan muodosta pehmeydestä, rengaspaineesta ja kuormituksesta. Pienellä kuormalla se on monasti ellipsin muotoinen, mutta kuormituksen kasvaessa muoto muuttuu enemmän suorakulmaiseksi. Jos kosketusala oletetaan ellipsin muotoiseksi, pinta-ala voidaan laskea yhtälöstä 2.7.

$$A = \frac{b \cdot l}{4} \cdot \pi \tag{2.7}$$

Kosketuspinta-alan laskemiseksi pitää tietää kosketuspituus l ja -leveys b. Leveys saadaan renkaan leveydestä, mutta pituus joudutaan mittaamaan. Pintapaineen ennalta arvioiminen onkin helpompaa nyrkkisäännön pintapaine = rengaspaine + 'kudospaine' perusteella.

Pintapaine voidaan myös arvioida yhtälön mukaisesti 2.8. Yhtälön oletuksena on, että rengas on litistynyt tai uponnut alustaan 15% säteestään.

Pintapaineesta on muistettava, ettei se jakaannut tasaisesti renkaan tai telan alla. Renkaan rivat ja teloissa tukirullat aiheuttavat aina suuremman pintapaineen ja muut osat alemman.

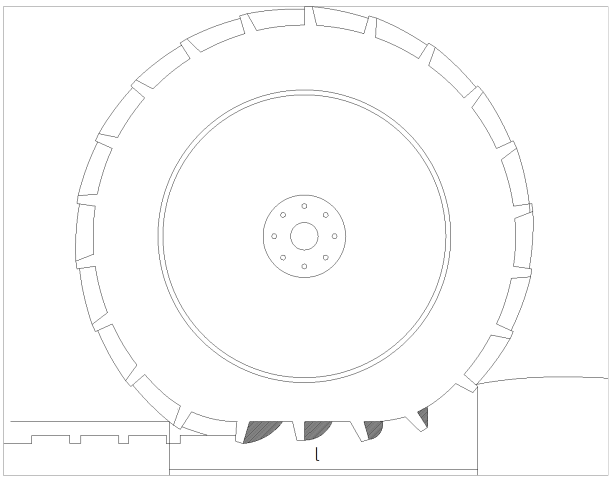
$$A = r \cdot b \tag{2.8}$$

A	renkaan kosketusala
r	renkaan säde
b	renkaan leveys

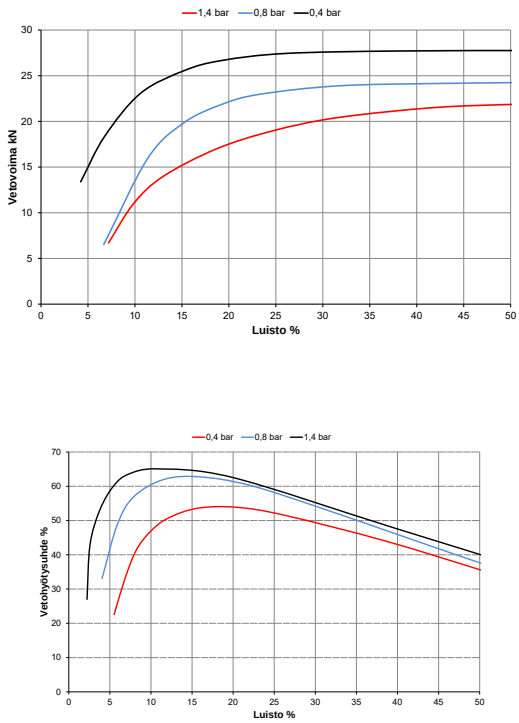
Rengaspaine vaikuttaa pintapaineen lisäksi sekä vetovoimaan että vierimisvastusvoimaan. Jotta pintapaine olisi alhainen, tarvitaan alhainen rengaspaine, silloin renkaat eivät uppoa maahan. Kun renkaan uppouma on pieni, myös vierismisvastus on pieni. Renkaan ilmanpaineen vähentäminen lisää renkaan joustoa ja tämä aikaansaa pidemmän kosketuspituuden.

2.11 Rengaspaine

Jos kuvan 2.21 renkaan kosketuspituus lisääntyy, samalla useampi ripa on vetämässä ja renkaan kehävoima suurenee eli pito paranee. Kuvassa 2.22 on koetulos rengaspaineen vaikutuksesta traktorin vetovoimaan ja vetohyötysuhteeseen. Kun maantiepaine (1,4 bar) vaihdetaan peltopaineeksi 0,8 bar, hyötysuhde paranee 10 %-yksikköä eli samalla myös energiatehokkuus paranee saman verran. Rengaspaine vaikuttaa myös renkaan puhdistuvuuteen. Kova rengas ei jousta ja se ei puhdistu samalla lailla kuin joustava rengas.



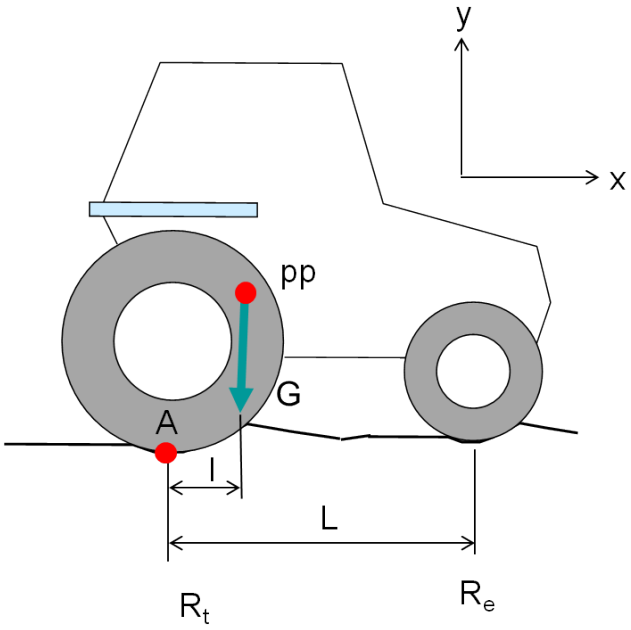
Kuva 2.21: Renkaan pito perustuu ripojen välisen maan leikkaamiseen (harmaa alue ripojen edessä)



Kuva 2.22: Rengaspaineen vaikutus vetovoimaan ja vetohyötysuhteeseen [Elonen ym 1995]

2.12 Akselipainot

Sallitun rengaspaineen määrää renkaan kuormitus ja ajonopeus. Ongelmaksi tulee usein maantiellä kulkemisen ja peltotyön erilaiset painevaatimukset. Tämä johtuu siitä, että kuljetuksen aikana traktori kantaa nostolaitetyökoneen painon, kun taas pellolla maa kantaa osan painosta. Jotta renkaista saadaan hyvä pito, pellolla pitäisi käyttää alempia rengaspaineita kuin kuljetuksissa.



Kuva 2.23: Traktorin akselipainot

Tarkastellaan miten akselipainot voidaan laskea.

Lähdetään tarkastelemaan akselikuormien muutoksia, kun traktoriin on kytketty työkoneita. Laskuja varten pitää tietää traktorin painopisteen paikka. Kuvassa 2.23on esitetty paikallaan oleva traktori. Traktorin tiedoista on saatavissa kokonaispaino ja akselipainot sekä akseliväli. Näiden perusteella voimma laskea traktorin painopisteen paikan. Kuvan tapauksessa maa kannattaa traktorin. Kunkin renkaan alla on tukivoima. Kuvassa asiaa on tarkasteltu tasossa eli etuakselin tukivoima on eturenkaisiin kohdistuvien maan tukivoimien summa ja vastaavasti samalla lailla taka-akselin suhteen. Valitaan x-akselin suunnaksi traktorin pituusakselin suunta ja y-akselin vastaavasti traktorin pystyakseli. X-akseli suunnassa ei ole voimia. Y-akselin suunnassa on kolme voimaa ja näiden summa $\sum y : R + R_e - G = 0$. Muodostetaan taka-akselin ja maan kosketuspisteen A suhteen momenttitasapaino: $\sum M_A : G \cdot l - R_e \cdot L = 0$. Ratkaistaan tästä painopisteen paikka, yhtälö 2.9.

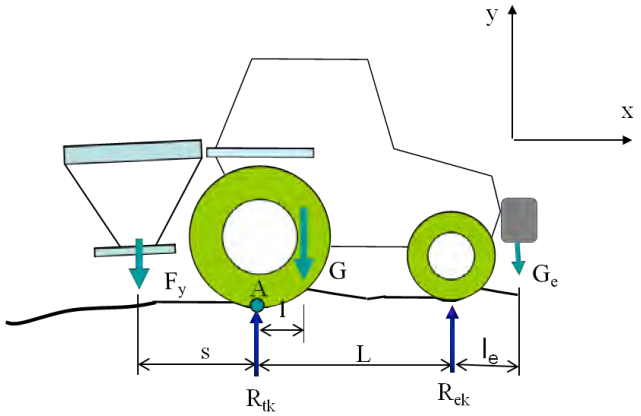
$$l = \frac{R_e}{G} L \tag{2.9}$$

Esimerkki. Traktorin massa on 6500 kg, josta 43% on etuakselilla. Traktorin akseliväli on 2,4 m. Laske traktorin painopisteen paikka.
l = 0,4·2,4m = 0,96 m

Traktoriin kytketyt työkoneet ja lisäpainot aiheuttavat akselipainojen muutoksia, jotka vaikuttavat edelleen rengaspaineiden valintaan. Lisäpainot voidaan laittaa pyörien vanteisiin tai renkaat voidaan täyttää vedellä.

Etulisäpainot ovat erillisessä telineessä etuakselin etupuolella. Jos lisäpainot laitetaan akseleille, silloin painopisteen paikka voidaan laskea yhtälön 2.9 avulla käyttämällä laskuissa painojen kanssa saatuja akselipainoja.

Tarkastellaan ei akseleille laitettuja lisäpainoja kuvan 2.24 mukaisesti. Kyseessä ei tarvitse olla välttämättä lisäpainot, vaan esimerkiksi työkone traktorin edessä ja/tai takana. X-akselin suunnassa ei ole voimia traktorin seisoessa paikallaan. Y-akselin suunnassa on tratkorin oma massa ja etu- ja takapuolella olevien koneiden tai lisäpainojen massat. Näiden painopisteiden paikat ja massat on myös tiedettävä. Merkitään muuttuneita akselipainoja hieman erilailla, jotta ei sotketa niitä ilman työkoneita oleviin painoihin, etuakselipaino on R_{ek} ja taka-akselipaino R_{tk}. Muodostetaan y-akselin suuntainen voimatasapaino: $\sum y : R_{ek} + R_{tk} - G_e - G - F_y = 0$. Nyt halutaan tietää traktorin muuttuneet akselipainot. Muodostetaan momenttitasapaino taka-akselin alla olevan pisteen A suhteen: $M_A = G \cdot l - R_{ek} \cdot L + G_e \cdot (L + l_e) - F_y \cdot s = 0$. Tästä ratkaistaan R_{ek}, yhtälö 2.10.



Kuva 2.24: Traktorin edessä ja takana olevat lisäpainot

$$R_{ek} = G_e + G_e \frac{l_e}{L} + G \frac{l}{L} - F_y \frac{s}{L} \qquad (2.10)$$

Y-akselin suuntaisesta voimatasapainosta voidaan nyt ratkaista taka-akselikuormitus, yhtälö 2.11

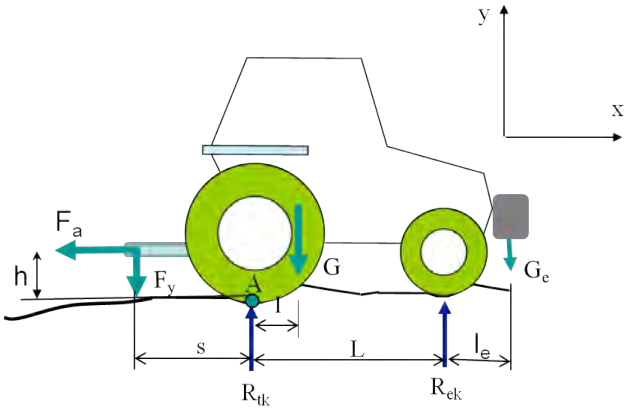
$$R_{tk} = G + F_y + G_e - R_{ek} \qquad (2.11)$$

Näiden yhtälöiden avulla voidaan ratkaista erilaisia kuormitustilanteita. Jos traktorissa ei ole etulisäpainoja tai työkonetta takana, silloin sen massa merkitään yhtälöissä nollaksi.

Esimerkki. Traktorin kokonaismassa on 5200 kg, josta etuakselilla on 35%. Traktorin akseliväli on 2,8m. Etupainoja on 440 kg ja niiden painopiste on 1,2 m etuakselin etupuolella. Nostolaitteessa on kaksoisaura, jonka massa on 1100 kg ja painopiste on 3,2 m taka-akselista. Laske traktorin akselipainot.

Ensiksi pitää laskea traktorin painopisteen paikka. Yhtälön 2.9 mukaisesti l = 0,35·2,8m = 0,98 m. Nyt voidaan laskea etuakselikuorma $R_{ek} = 440kg + 440kg \cdot \frac{1{,}2m}{2{,}8m} + 5200kg \cdot \frac{0{,}98m}{2{,}8m} - 1100kg \cdot \frac{3{,}2m}{2{,}8m} = 1191$kg. Alkuperäinen etuakselikuorma oli 0,35·5200 kg = 1820 kg eli etuakseli keveni 629 kg. Taka-akselikuorma on $R_{tk} = 5200kg + 1100kg + 440kg - 1191kg = 5549$kg. Taka-akselikuorma oli alussa 5200kg - 1820 kg = 3380 kg, jolloin sinne on tullut lisää painoa 2169 kg. Tarkistetaan vielä laskut, akselikuormien summa on 1191 kg + 5549 kg = 6740 kg. Vastaavasti traktori + työkone + etupainot on 5200 kg + 1100 kg + 440 kg = 6740 kg eli lasku on oikein.
Tämä lasku on tehty käyttäen kg yksikkönä. SI-järjestelmän mukaan se on massan yksikkö. Akselipainot on kuitenkin totuttu antamaan kg yksiköissä, koska punnitsemalla akseli vaa'alla saadaan yksiköksi kg. Kun lasketaan esim. vetovoimia yksiköt pitää muuttaa newtoneiksi. Jos traktori vetää työkonetta, silloin vetovoima muuttaa myös akselipainoja.

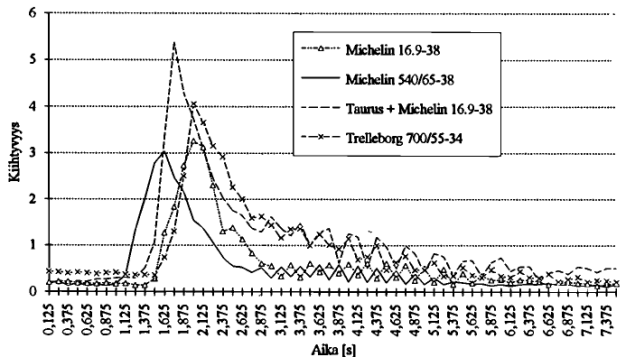
Työkoneen tarvitsema vetovoima aiheuttaa traktorissa myös akselipainojen muutoksia (painonsiirtoa). Kuvassa 2.25 traktorin vetovarsiin vaikuttaa sekä vaaka- että pystysuora voima. Jos kyseessä on täysin hinattava työkone, silloin pystyvoima F_y on nolla ja vetovarsiin vaikuttaa vain vaakavoima. Jos veto ei ole vaakasuora, kiinnityspisteessä on myös pystyvoima $F_y = F_a tan\alpha$. Työkone voi olla kiinnitettynä vetovarsien sijaan traktorin takana olevaan vetolaitteeseen (vetokoukku, maatalousvetolaite). Mitat h ja s ovat tähän vetopisteeseen.



Kuva 2.25: Työkoneen vedossa vaikuttavat voimat

Muodostetaan voimatasapaino y-akselin suunnassa ja momenttitasapaino pisteen A suhteen. Voimatasapainosta saadaan $\sum y : R_{ek} + R_{tk} - G_e - G - F_y = 0$ ja momenttitasapainosta $M_A = G \cdot l - R_{ek} \cdot L + G_e \cdot (L + l_e) - F_y \cdot s - F_a \cdot h = 0$. Tästä saadaan etuakselikuormitukselle yhtälö 2.12 ja taka-akselikuormitukselle yhtälö 2.11.

$$R_{ek} = G\frac{l}{L} + G_e\frac{L + l_e}{L} - F_y\frac{s}{L} - F_a\frac{h}{L} \qquad (2.12)$$



Kuva 2.26: Traktorin runkoon kohdistuva kiihtyvyys m/s^2 ylitettäessä 7,5 cm x 10 cm kokoinen este 30 km/h nopeudella. [Elonen ym 1995]

Esimerkki. Traktorin kokonaismassa on 5200 kg, josta etuakselilla on 35%. Traktorin akseliväli on 2,8m. Etupainoja on 440 kg ja niiden painopiste on 1,2 m etuakselin etupuolella. Nostolaitteessa on kaksoisaura, jonka massa on 1100 kg ja painopiste on 3,2 m taka-akselista. Vetovarsien kiinnityspiste on 1,3 m taka-akselista ja 0,5 m maasta. Kyntövastus on 14 kN ja traktori kantaa auran painosta 450 kg. Työntövarren kiinnityksessä aurassa on hahlo, jonka ansiosta aura käyttäytyy suuremmaksi osaksi puolihinattavasti. Laske akselipainot kynnettäessä.

Edellisen laskun mukaisesti traktorin painopiste on l=0,98 m. Etuakselikuorma on tällöin $R_{ek} = 5200\frac{0,98}{2,8} + 440\frac{2,8+1,2}{2,8} - 450\frac{1,3}{2,8} - \frac{14000}{9,81} \cdot \frac{0,5}{2,8} = 1820 + 629 - 209 - 255 = 1985$kg. $R_{tk} = 5200 + 440 + 450 - 1985 = 4105$ kg.

2.13 Renkaiden ajo-ominaisuudet

Renkaat ovat maatalouskoneissa ja traktoreissa usein ainut joustava elementti ja siten ne vaikuttavat myös ajomukavuuteen. Ajo-ominaisuuksiin vaikuttaa myös renkaiden pyöreys ja resonanssit. Jos rengas on kova se ei kuopissa jousta ja sen seurauksena kuljettajaan kohdistuvat iskut ovat voimakkaita. Kuvassa 2.26 on esitetty kuinka suuri kiihtyvyys traktoriin kohdistuu, kun ajetaan tiellä olevan esteen yli. Suurimmat kiihtyvyydet tulevat käytettäessä kovia renkaita. Pehmeät renkaat joustavat enemmän, jolloin este 'painuu' renkaan sisään.

Luku 3

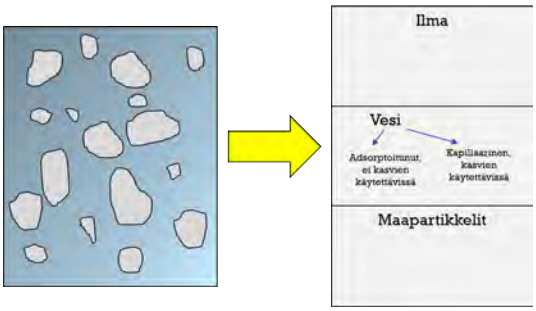
Maan rakenteen säilyttäminen

Suuret koneet ja runsas töiden koneellistaminen aikaansaavat sen, että pelloilla liikutaan runsaasti ja maan rasitukset ovat suuret. Tämän seurauksena maan rakenne muuttuu viljelyn kannalta epäedulliseksi, maa tiivistyy. Kasvit hengittävät juurillaan ja ottavat ravinteet ja veden juurillaan. Maan tiivistyminen vaikeuttaa kasvien elintoimintoja ja sitä kautta myös sadot alenevat. Sadon lisäksi tiivistyminen vaikuttaa maan muokkautuvuuteen ja ravinteiden kulkuun. Koneiden ja konekapasiteetin kasvuun on tultu, koska viljely ei ole muuten kannattavaa. Jos tarkastellaan esimerkiksi traktorikokoa, keskiteho ja paino on jatkuvasti lisääntynyt. Samoin puimureiden ja lietevaunujen koko on suurentunut. Tiivistymistä tapahtuu myös luonnollisesti viljelykauden aikana. Muokattaessa maa kuohkeutuu ja kasvukauden aikana sateiden sekä maan oman painon vaikutuksesta se tiivistyy. Maa myös kuohkeutuu luonnollisesti. Maan kosteusvaihtelut, routa, juuret ja lierot kuohkeuttavat maata. Maan tiivistymisen tutkiminen on hidasta, tulosten saaminen voi kestää vuosia ja sen takia nopeita koetuloksia tiivistymisen vaikuttavista seikoista on hankala saada. Lisäksi tiivistymiseen vaikuttavia seikkoja on useita ja yleispätevien ohjeiden antaminen on vaikeaa.

3.1 Maan rakenne

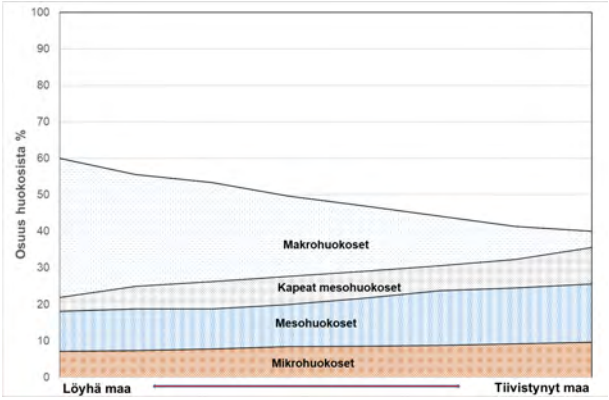
Maan rakenteessa voidaan erottaa kolme eri osaa, kiinteä aines, maassa oleva vesi ja maassa oleva ilma, kuva 3.1. Kiinteä aines on savea, hiekkaa tai eloperäistä ainesta. Vesi on joko kiinteän aineen adsorboimaa (sitomaa) tai se on kapillaarisena partikkelien seassa. Adsorboitu vesi ei ole kasvin käytettävissä, kun taasen kapillaarinen vesi on. Kapillaarinen vesi on ja ilma ovat kiinteän aineen partikkelien välisissä huokosissa, joissa vesi, kaasut ja lämpö liikkuvat maassa.

Maan huokosten koot vaihtelevat ja sen mukaan myös niissä tapahtuvat toiminnot vaihtelevat. Mikrohuokoset ovat alle 0,0002 mm ja niissä olevaa vettä kasvit eivät pysty irrottamaan. Mesohuokoset ovat 0,0002 mm - 0,01 mm kokoisia. Makrohuokoset voivat olla joko kapeita (0,01 mm - 0,05 mm) tai laajoja. Kapeissa huokosissa



Kuva 3.1: Maan rakenne. Maan voidaan katsoa koostuvan kolmesta osasta, kiinteästä aineesta (partikkeleista), vedestä ja ilmasta. Jokaisella näistä on omat osuutensa kokonaistilavuudesta.

voi myös olla vettä, kun taasen laajojen huokosten avulla maa hengittää eli niitä kautta tapahtuu ilman ja kaasujen vaihto. Niissä kasvavat myös kasvien juuret, koko on sopiva juurille.

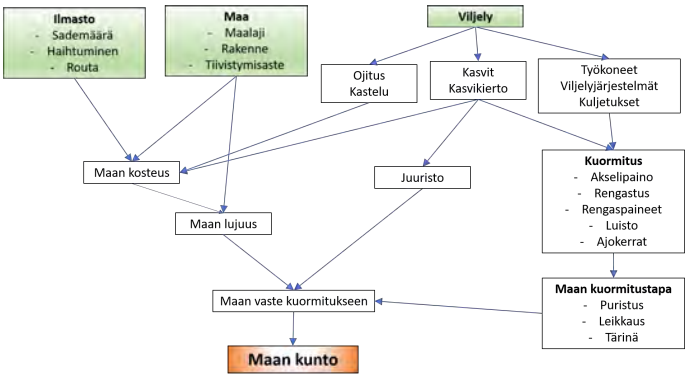


Kuva 3.2: Löyhän ja tiivistyneen maan huokoskoot.

Huokoset syntyvät matojen kaivamina, juurien kasvun myötä, roudan ansiosta, maan kutistumisen ja laajentumisen kautta sekä maan muokkauksen kautta. Matojen ja juurien tekemät huokoset ovat usein pystysuorassa ja niitä kautta vesi pääsee sateella maahan ja niitä kautta myös tapahtuu pohjamaan hengitys. Ongelmana on laajojen makrohuokosten pysyvyys. Jos niitä tuhotaan esimerkiksi liian suurella kuormituksella, myöskin veden virtaus ja hengitys heikkenevät, koska virtaustiet mene-

vät kiinni. Maan tiivistyessä makrohuokosten osuus vähenee ja kasvien elintoiminnot heikkenevät, kuva 3.2.

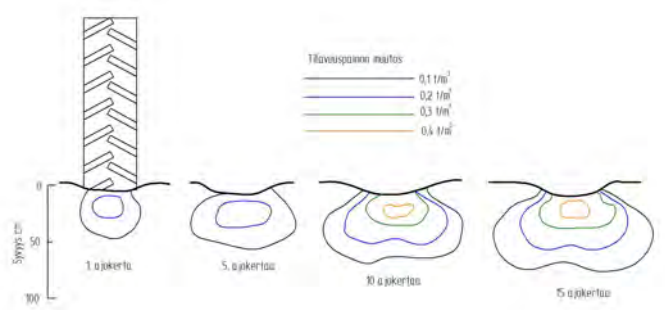
3.2 Maan tiivistyminen



Kuva 3.3: Maan tiivistymiseen vaikuttavia seikkoja [Alakukku 1999]

Tiivistymiseen vaikuttavia tekijöitä on esitetty kuvassa 3.3. Tiivistyminen on monen tekijän yhteisvaikutuksena syntyvä tapahtuma, johon vaikuttaa ilmasto-olosuhteet, maalajin ominaisuudet, maan kunto, kasvikierto ja viljelyn koneellistamistapa. Maan tiivistyminen jaetaan vielä kahteen osaan, pintamaan tiivistymiseen ja pohjamaan tiivistymiseen.

Maan tiivistymisessä maahan kohdistuu niin suuri kuormitus, että maan rakenne muuttuu. Heikoin osa rakenteessa on partikkelien välissä olevat huokoset ja näistä suurimmat eli makrohuokoset litistyvät ensiksi. Maassa voi tapahtua myös kerrosten välisiä liukumia, jolloin huokostiehyet katkeavat. Vesi, ilma ja kasvien juuret tarvitsevat näitä huokosia ja tiivistymisen seurauksena kasvien elinolosuhteet vaikeutuvat.



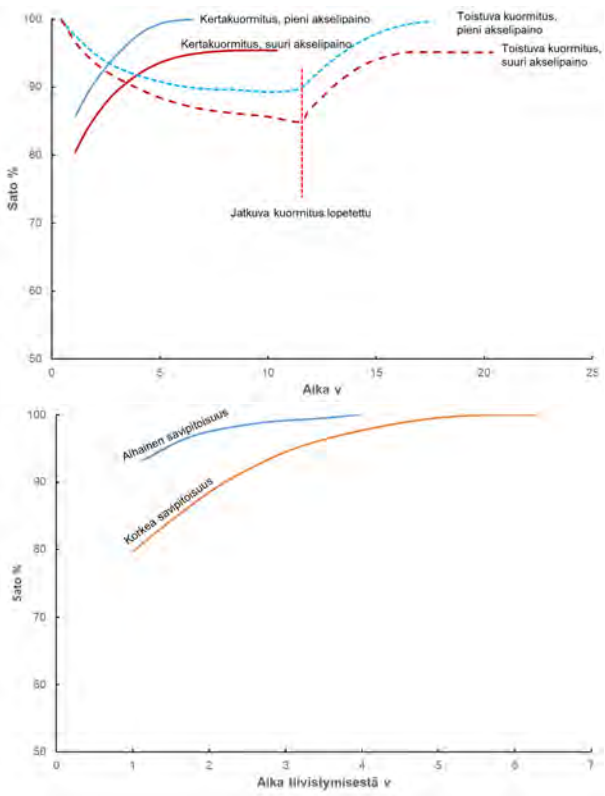
Kuva 3.4: Maan tilavuuspainon lisääntyminen ajettaessa samoja jälkiä usean kerran

Liikuttaessa pellolla tiivistyminen tapahtuu kuvan 3.4 mukaisesti. Mitä useamman kerran samoja jälkiä ajetaan, sitä syvemmällä ja sitä voimakkaammin maa tiivistyy. Tiivistyminen näkyy maan tilavuuspainon lisääntymisenä ja huokostilavuuden vähenemisenä. Tiivistyminen vähentää etenkin isoja makrohuokosia (kuva 3.2). Koska kyseessä on nimenomaan isot makrohuokoset, samalla tietysti vesi- ja kaasuhuokoset menevät kasaan tai pienenevät ja kasvin hengittäminen ja ravinteiden otto heikkenee. Kovettuneen maan takia myös juurien tunkeutuminen vaikeutuu.

Maan tiivistymisessä erotetaan pinta- ja pohjamaan tiivistymiset. Pintamaaksi katsotaan maa 30 cm syvyyteen asti ja pohjamaa on tätä syvemmät osat. Pintamaan tiivistyminen on lyhytaikaista, normaalisti tiivistymä häviää 1 - 5 vuoden sisällä. Pintamaan tiivistyminen häviää muokkauksella, normaaleilla kastumis-, kuivumis- ja jäätymistapahtumilla sekä bioaktiviteettien kautta. Jäykkien savien pintamaan tiivistymät häviävät hitaasti ja ne voivat näkyä kolme tai viisikin vuotta tiivistymisen jälkeen.

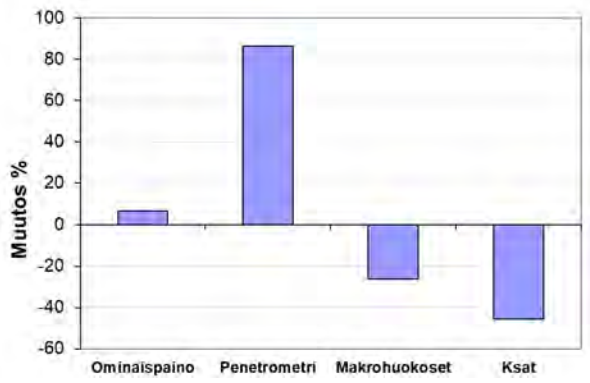
Pohjamaan tiivistymisen vaikutukset säilyvät pitkään. Kuvan 3.5 mukaan raskaasti tiivistynyt maa ei vielä 10 vuoden jälkeen palaa alkutilaansa. Tiivistymistä seuraavana vuonna sadonmenetys on suurin ja sen jälkeen maa palaa hitaasti normaaliin satotasoon. Tämä johtuu siitä, että tiivistämisen jälkeen aluksi palautuu pintamaan tiivistyminen ja pohjamaan tiivistyminen palautuu hitaammin.

Käytännössä tiivistyminen voi tapahtua joka vuosi uudelleen, jolloin tiivistymä säilyy maassa koko ajan. Myöskin toistettu kuormitus voi säilyttää ja lisätä maan tiivistymistä. Esimerkiksi Ruotsissa tehdyissä mittauksissa tehoviljellyillä peruna- ja juurikaspelloilla sekä runsaasti lietelantaa levitetyillä pelloilla cone index vastus oli 40 cm syvyydessä 40 % korkeampi kuin maa-alueilla, joilla ei ollut liikennettä. Vastaavasti ei tehoviljellyillä viljapellolla vastus oli 10 % suurempi. Sadon menetyksiksi arvioitiin peruna ja juurikaspelloilla 6 % ja viljapelloilla 1,5 %. Maan tiivistyminen ei sinänsä ole aina haitallista. Tiivistyneessä maassa veden kapillaarinen nousu on voimakkaampaa ja kasvien veden saanti on parempi. Esimerkiksi jyrättäessä osittain myös tiivistetään maata.



Kuva 3.5: Maan tiivistymisen vaikutus satoon. Alempi kuva = savipitoisuuden vaikutus, ylempi kuva = akselikuorman ja toistuvan kuormituksen vaikutus. Muokattu lähteestä Håkansson [Håkansson 1990].

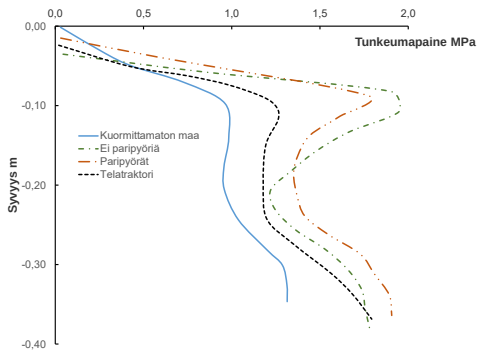
3.3 Tiivistymisen mittaaminen



Kuva 3.6: Pohjamaan tiivistymisessä tapahtuneet maan ominaisuuksien keskimääräiset muutokset. Ominaispaino= ominaispainon muutos, Penetrometri= tunkeumavastuksen muutos, Makrohuokoset= makrohuokosten määrä, Ksat= veden johtokyvyn muutos. [Alakukku 1999]

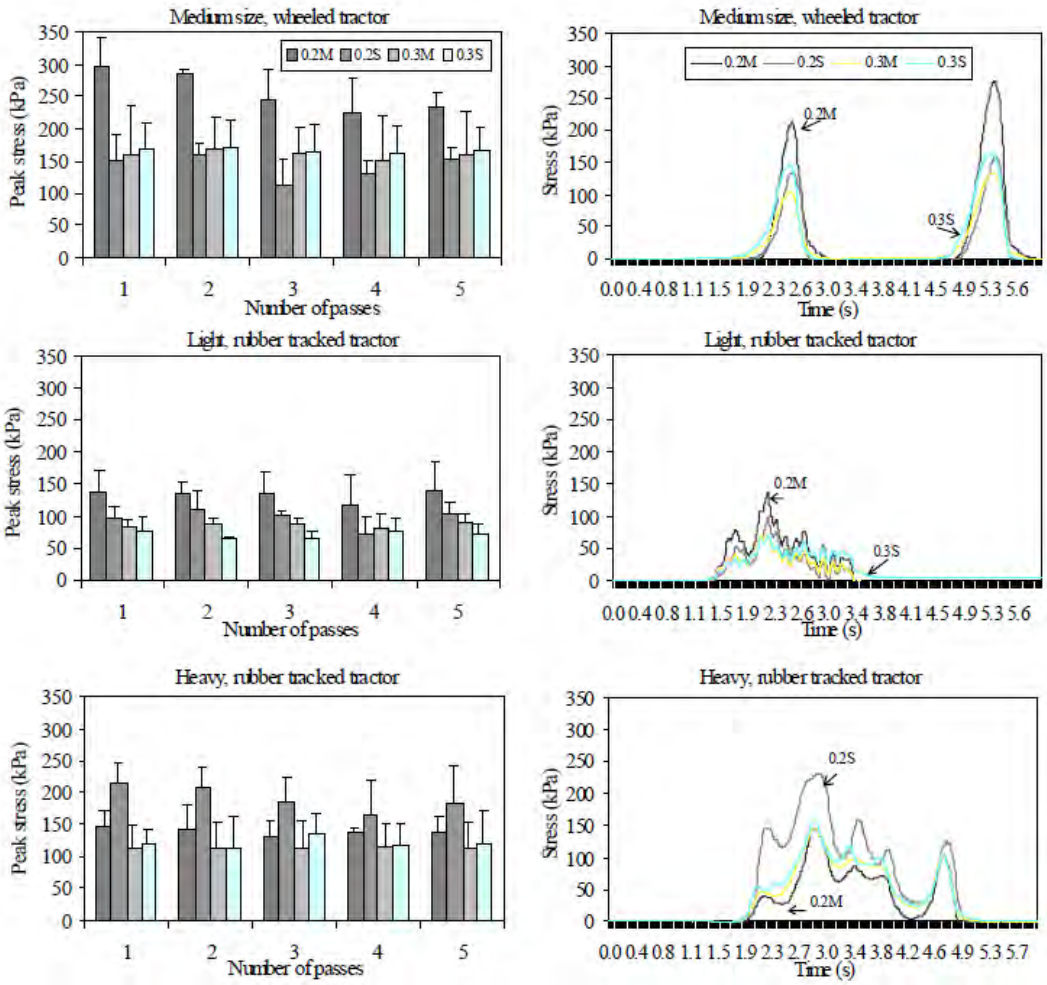
Tiivistymistä mitataan monella eri tavalla. Näitä ovat esimerkiksi maan tilavuuspainon muutos, cone index vastuksen muutos (katso 1.7), huokosten muutokset ja maan veden tai kaasun johtokyvyn muutos, kuva 3.6. Cone index vastuksen mittaaminen on näistä helpoin, mutta sen antama tieto on usein melko heikkoa, koska mittaushetken maan kosteuden vaikutus tulokseen on huomattava. Muissa mittausmenetelmissä joudutaan ottamaan edustavia maanäytteitä ja niiden ottaminen ja käsittely on hankalaa. Maan tilavuuspaino käytetään myös melko paljon tiivistymisen mittaamiseen, mutta maan rakenteessa (huokosissa) voi tapahtua muutoksia, jotka eivät aina näy tilavuuspainossa. Sekä veden että ilman johtokyvyn mittaaminen antavat kuvan maan huokosissa tapahtuneista muutoksista.

Kuvassa 3.7 on esimerkki penetrometrimittauksesta. Samoissa urissa ajaminen on lisännyt vastusta selvästi ja suurin lisäys on tapahtunut n 10 cm syvyydessä. Penetrometrimittaus soveltuu vertailevaan mittaukseen, jossa eri käsittelyjä verrataan toisiinsa. Lukuarvojen vertaaminen esimerkiksi eri vuosien väliltä on vaikeaa, koska maan kosteus vaikuttaa voimakkaasti maan vastukseen. Tällöin pitää käyttää samaa verrannetta ja vertailla suhteellista muutosta verranteeseen.



Kuva 3.7: Maan penetrometrivastus ajourassa viiden ajokerran jälkeen. Telatraktori = kevyen miehittämättömän telatraktorin ajourista mitattu, Paripyörät ja Ei paripyöriä= keskikokoisen maataloustraktorin ajourista mitattu. [Pöyhönen ym 1999]

Eri koneiden ja varusteiden tiivistymisvaikutusta arvioitaessa voidaan mitata penetrometrin tunkeumavastusta, kuten yllä on tehty tai maasta voidaan mitata siihen kohdistuvia jännityksiä tai siirtymiä. Kuvassa 3.8 on esimerkki maasta mitatuista paineista, kun traktorilla ajetaan paineanturin yli. Pyörätraktorin painekäyrissä on kaksi huippua, ensimmäinen on etuakselin aiheuttama ja toinen on taka-akselin aiheuttama. Telatraktoreiden käyrissä näkyy telan tukipyörien vaikutus siten, että painehuiput ovat tukipyörien kohdalla. Paine kuvaa maassa vaikuttavaa jännitystä ja kun ylitetään maan lujuus, maan rakenne muuttuu huokosten rikkoontuessa.



Kuva 3.8: Esimerkki maahan kohdistuvista paineista, oikealla puolella on yliajon aikaiset paineet ja vasemmalla puolella on eri ajokertojen suurimmat paineet.. 0.2M = anturi 20 cm syvyydessä pyörän/telan keskilinjalla, 0.2S= anturi 20 cm syvyydessä pyörän/telan keskilinja vieressä, 0.3M ja 0.3S vastaavasti 30 cm syvyydessä. [Alakukku 1999]

3.4 Maalajin ja maan kosteuden vaikutus

Maan rakenne ja maalaji vaikuttavat siten, että kuivassa ja kantavassa maassa vaurioita ei tapahdu, mutta etenkin kosteassa savimaassa liian raskailla koneilla liikuttaessa tiivistyminen voi tapahtua helposti. Maan kosteus vaikuttaakin eniten maan tiivistymisherkkyyteen. Kuiva maa kantaa hyvin, jolloin vauriot ovat pienet. Kostea maa taasen tiivistyy helposti ja vauriot ovat suuret.

Kosteuden lisääntyminen etenkin savimaissa heikentää maan lujuutta ja sen kykyä kantaa kuormitusta. Tämä näkyy mm kuvasta 1.2, jossa on esitetty kosteuden vaikutus maan koheesioon ja sisäiseen kitkaan. Tämä näkyy myös eri maalajien kantavuuksista. Kuiva savi sietää 3 -5 bar pintapaineen, kostea savi 2 - 3 bar ja märkä savi 0,5 - 1,5 bar pintapaineen. Hiekalla kantavuus ei muutu paljoakaan, vaikka hiekan kosteus muuttuu.

Kuvassa 1.7 on esimerkki maan kosteuden vaikutuksesta maan sisään kohdistuviin jännityksiin. Kosteuden lisääntyessä jännityksen kohdistuvat kapeammalle alalla ja huomattavasti syvemmälle.

3.5 Kuormituksen vaikutus tiivistymiseen

Kuormituksen suuruus vaikuttaa kosteuden ohella voimakkaasti maan tiivistymiseen. Mitä suurempi kuorma maahan kohdistuu, sitä suurempi tiivistymisvaara on. Tämä näkyy myös maan kuormitusyhtälöistä (yhtälö 1.9) ja kuvasta 3.5. Maan turvallisesti kantamaan kuormaan vaikuttaa voimakkaimmin maalaji ja maan kosteus. Tästä johtuen suurin sallittu kuorma vaihtelee maalajin ja kosteuden mukaan, eikä selvää ohjeistusta voida helposti antaa.

Maahan kohdistuva kuormitus ei ole pelkästään pystysuoraa kuormitusta, vaan esimerkiksi vetävä rengas aiheuttaa myös leikkausjännityksen. Tämä aikaansaa

maan tasojen välistä liukumaa ja sitä kautta myös huokostilavuuden muutoksia ja tiehyiden katkeilua.

Maan huokosissa on ilmaa ja vettä. Kun nämä huokoset joutuvat puristukseen, niissä olevat kaasut ja nesteet purkautuvat ulos. Tämä ei kuitenkaan tapahdu hetkessä, vaan kulkeutuminen kestää oman aikansa. Tällöin kuormituksen kestoaika vaikuttaa myös maassa tapahtuviin muutoksiin. Jos kuormitus on nopeaa, huokoset eivät kerkeä rutistua ja maa säilyttää rakenteensa paremmin. Tämä ilmiö on nähtävissä ajonopeutta muutettaessa. Kun käytetään nopeaa nopeutta maahan kohdistuvat rasitukset ja maan rakenteen muutokset ovat vähäisempiä. Käytännössä työ määrää ajonopeuden ja sen muuttaminen ei useinkaan ole mahdollista.

Telatraktoreissa ei useinkaan ole ilmakumirenkaiden tapaista joustavaa elementtiä maan ja kuorman välillä. Tällöin koneen tärinät siirtyvät myös maaperään ja tärinä aiheuttaa iskuja maahan.

3.6 Viljely- ja työtavat

Tilakoon kasvaminen ja työn tehostaminen siten, että yksittäinen viljelijä pystyy viljelemään mahdollisimman suuren alan itse suurentaa myös koneita. Suuret koneet tuovat mukanaan maan tiivistymisen.

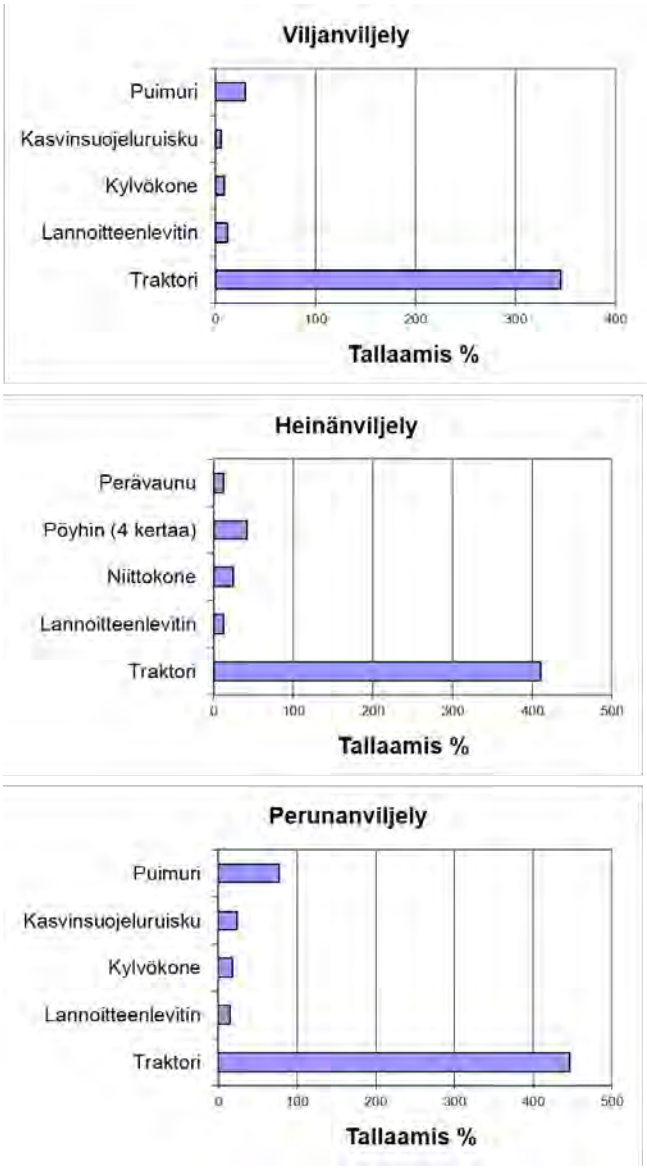
Viljelykautena koneiden renkaat tallaavat viljanviljelyssä pellon keskimäärin neljään kertaan, kuva 3.9. Etenkin savimailla tämä aiheuttaa maan tiivistymisen ja sitä kautta suurentuneen auran tai äkeen vetovoiman tarpeen ja pienentyneen sadon. Koneiden koon suurentaminen pienentää liikennöintiä, koska leveä työleveys vähentää tarvittavia ajokertoja. Toisaalta samanaikaisesti lisätään painon lisääntyessä maan kuormitusta ja tiivistymisriski kasvaa. Työmenetelmillä voidaan vaikuttaa siihen kuinka paljon pellolla joudutaan liikkumaan. Esimerkiksi äestyksessä siirryttäessä jyrsinkylvöön liikennöinti pellolla samalla vähenee.

3.7 Tiivistymisen estäminen

Tämän hetkiset suositukset voidaan jakaa kahteen osaan. Pinnan osalta pitää saada pintapaine (rengaspaine) niin alhaiseksi, että rengas ei uppoa maahan. Tämä tarkoittaa, että rengaspaineet on pidettävä riittävän alhaisina. Märillä ja kosteilla pelloilla rengaspaineet pitäisi olla 0,5 - 0,8 bar ja kantavilla, kuivilla mailla rengaspaineet saavat olla 1 - 2 bar.

Pohjamaan osalta (20 - 30 cm syvyys) suositellaan korkeintaan 4 - 6 t akselipainoja ja telirakenteissa 8 - 10 t akselipainoja. Pehmeillä pelloilla on syytä käyttää näitä pienempiä kuormia.

Maan tiivistymisen välttämiseksi pitää huolehtia maan ojituksen toimivuudesta ja työjärjestelyt pitää



Kuva 3.9: Viljelyn ajojälkien pinta-ala verrattuna viljelyalaan. Muokattu lähteestä Danfors[Danfors 1980].

tehdä niin, että liikennöinti pellolla jää mahdollisimman vähäiseksi. Tähän voidaan vaikuttaa esimerkiksi koneketjujen ja työmenetelmien valinnalla. Pellolla liikkuminen pitää myös ajoittaa oikein. Keväällä mennään pellolle vasta kun se on kantavaa ja syksyllä vältetään täysin märillä pelloilla liikkumista.

Myös viljelykierto vaikuttaa maan rakenteeseen. Nurmella on voimakas ja runsas juuristo, joka aikaansaa luonnostaan maan mururakenteen paranemisen.

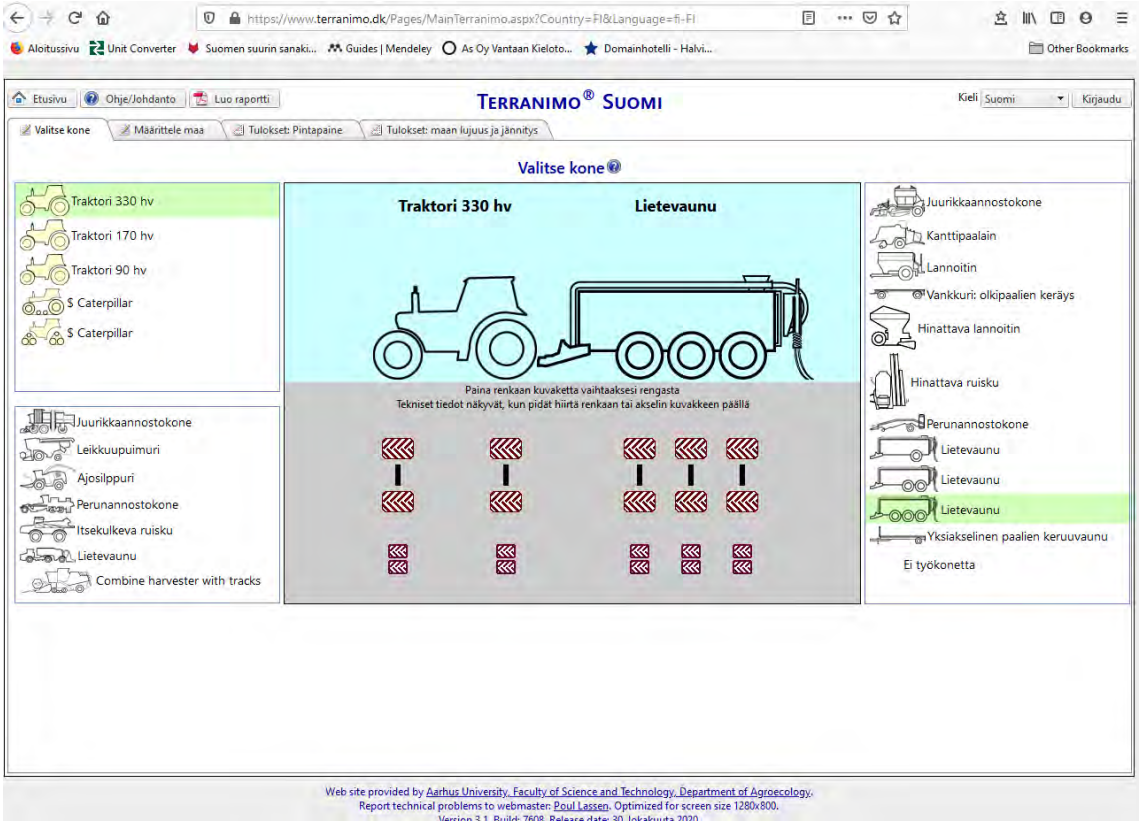
Pintamaan tiivistymisen poistaminen hoituu normaalin muokkauksen avulla. Pohjamaan tiivistyminen voidaan hoitaa vain välttämällä maan lisätiivistämistä. Syvä jankkurointi avaa vedelle tien syvemmälle maahan, mutta se ei paranna maan rakennetta kasveille sopiviksi. Tämän takia se ei poista tiivistymistä, mutta voi helpottaa ainakin hetkellisesti pellon kuivumista. Jankkurointi vaatii suuren vetovoiman, jolloin se voi lisätä maan tii-

AGROTEKNO

vistymistä.

3.8 Tiivistymisriskin arviointi

PredICTor - hankkeessa vamisteltiin maan tiivistymisriskin arvioimiseen työkalu [Terranimo]. Tätä työkalua on kehitetty edelleen ja sen avulla on arvioitavissa pellon tiivistymisriski. Traktorin ja työkoneen sekä niiden renkaiden kokoa voidaan muuttaa. Samoin maalaji, maan kosteus ja rengaspaineet voidaan valita. Näiden perusteella ohjelma laskee tiivistymisriskin [Stettler ym 2014] .



Kuva 3.10: Terranimo työkalun aloitussivu

Kirjallisuutta

[Alakukku 1999] Alakukku L. Subsoil compaction due to wheel traffic. Agricultural and Food Science in Finland, Vol. 8 (1999), p. 335-35. Agricultural research Centre of Finland.

[ASAE S313.3] Soil Cone Pnetrometer. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

[ASAE D497] ASAE D497.7:Mar2011. Agricultural Machinery Management Data. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

[Biller 1978] Biller H. Zum Reifenverschleiss bei Frontreifen allradgetriebene Schlepper. Grundlagen der Landtechnik Nr. 3 1978. P. 89-94.

[Danfors 1980] Danfors B., Däck för traktorer och redskap. Jordbrukstekniska institutet, Meddelande nr 386, 1980. Jorbrukstekniska institutet, Uppsala 1980.

[Elonen ym 1995] Elonen E., Alakukku L. & Koskinen P. Renkaiden vaikutus traktorin vetokykyyn ja maan tiivistymiseen. Vakolan tiedote 69/95. Maatalouden tutkimuskeskus, Maatalousteknologian tutkimuslaitos. Vihti 1995.

[Håkansson 1990] Håkansson I. Soil Compaction Control - Objectives, Possibilities and Prospects. Soil Technology, vol. 3, 1990, p. 231 - 239.

[Liljedahl ym 1979] Liljedahl J.B, Carleton W.M, Turnquist P.K, Smith D.W: Tractors and Their Power Units, 3.painos, John Wiley & Sons, 1979

[Mäkelä ja Laurola 1990] Mäkelä J. & Laurola H. Leikkuupuimurin kulkukyky vaikeissa olosuhteissa. Valtion maatalousteknologian tutkimuslaitos, Tutkimusselostus 58, Vihti 1990.

[Nokian Tyres 2015] Nokian Heavy Tyres Technical manual / General information. http://www.nokianraskaatrenkaat.fi/files/nht/technical_manual/NokianHeavyTyres_Technic , katsottu 22.1.2015

[Penetrometri 2015] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/Penetrometer.jpg, haettu 21.1.2015

[Pöyhönen ym 1999] Pöyhönen A., Alakukku L., Ahokas J., Aura E. & Sampo M. Traktorista välittyvän pystysuoran jännityksen mittaus kynnetyssä ja sänkimuokatussa savimaassa. Maatalouden tutkimuskeskuksen julkaisuja, sarja A. Maatalouden tutkimuskeskus, Jokioinen 1999.

[Reckleben yml 2013] Reckleben Y., Schäfer N. & Weissbach M. Increase in efficiency of road transport in the example of different types of tires of tractors. Landtechnik 68(3), 2013, p. 196 - 201.

[Saarilahti 1991] Saarilahti M., Maastoliikkuvuuden perusteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 390, Metsäntutkimuslaitos, Helsinki 1991.

[Saarilahti 2002] Saarilahti M. Modelling of the wheel and tyre 1. Tyre and soil contact survey on tyre contact area and ground pressure models for studying the mobility of forest tractors. University of Helsinki, Department of Forest Resource Management, 2002.

[Stettler ym 2014] Stettler M., Keller T., Weisskopf P., Lamandé M., Lassen P. & Schjønning P. Terranimo® – a web-based tool for evaluating soil compaction. Landtechnik 69(3), 2014, 132–138

[Söhne 1968] Söhne W. Four-wheel drive or rear-wheel drive for high power farm tractors. Journal of terramechanics 5 (1968) No 3, 9-28

[Terranimo] www.terranimo.dk/Pages/MainTerranimo.aspx?Country=FI&Language=fi-FI , haettu 10.4.2021

[Wong 2001] Wong J.Y., Theory of Ground Vehicles, 3rd edition. John Wiley & Sons, 2001