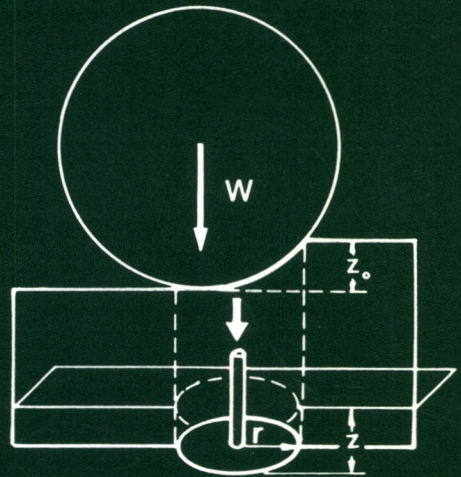


$$P = \frac{W}{A}$$

$$F_T = C + P \tan \phi$$



$$P = k \cdot z^n$$

$$E = \frac{1.5 \cdot P \cdot r}{z}$$

Martti Saarilahti

MAASTOLIIKKUVUUDEN PERUSTEET



METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 390

Metsäteknologian tutkimusosasto
Metsätyötieteen tutkimussuunta 1991

Martti Saarilahti

MAASTOLIIKKUVUUDEN PERUSTEET

ISBN 951-40-1174-0
ISSN 0358-4283
Valtion Painatuskeskus, Helsinki 1991

SISÄLLYS

1. Johdanto	5
1.1. Esittely.....	5
1.2. Termistö.....	5
1.3. Maastoliikkuvuuden viitekehys	6
2. Koneen liikkumista vastustavat voimat	6
2.1. Rinnevastus	
2.2. Vierintävastus.....	8
2.2.1. Jäykän pyörän vierintävastus, teoreettinen viitekehys	8
2.2.2. Pyörän leveyden vaikutus vierintävastukseen, empiirinen malli	10
2.2.3. Ilmarenkaan vierintävastus, teoreettinen viitekehys	11
2.3. Lumivastus.....	13
2.4. Estevastus	13
2.4.1. Jäykän pyörän teoreettinen estevastusmalli.....	13
2.4.2. Ilmarenkaisen pyörän teoreettinen estevastusmalli	15
2.5. Yleinen estevastusmalli pyöreälle esteelle	18
2.6. Kulkuvastus	20
2.7. Kulkuvastus kaltevilla tasolla	20
2.8. Hitausvastusvastus, inertia.....	21
2.9. Muiden tekijöiden vaikutus kulkuvastukseen	21
3. Maamekaniikan perusteet	22
3.1. Maatyypit	22
3.2. Maan mekaanisten ominaisuuksien mittaaminen	24
3.3. Maan kantavuus	25
3.4. Maan leikkauslujuus	26
3.5. Cone Index ja tunkeumavastus	28
3.5.1. Tunkeumavastuksen mittaaminen	28
3.5.2. Hiekka-hiesumaat	29
3.5.3. Turvemaat	30
3.5.4. Moreenimaat	30
3.6. Bevametri	30
3.7. Paineen jakautuminen maaperässä	34
3.8. Maan tiivistyminen	35
4. Lumi.....	36
4.1. Lumen ominaisuuksien mittaaminen	36
4.2. Lumivastus.....	37
5. Tartunta ja luisto	39
5.1. Luisto	39
5.2. Tartunta	40
5.3. Nettovetokyky	43
6. Painuma	44
6.1. Painuma staattisessa kuormituksessa	44
6.2. Painuma luiston funktiona	46
6.3. Painuma dynaamisessa kuormituksessa	46
6.4. Painuma eri kuormituskerroilla	47
7. Heilunta, ohjattavuus ja vakavuus	48

7.1. Teoreettinen heiluntamalli	48
7.2. Heilunnan fysiologiset rajoitukset	53
7.3. Ajonopeus, estekorkeus ja metsätraktorin heilunta.....	54
7.4. Ohjattavuus	55
7.5. Vakavuus	57
8. Renkaat	59
8.1. Litistymä	60
8.2. Kosketuspaine	60
8.3. Kosketusala	62
8.4. Kriittinen kosketuspaine.....	64
9. Metsäkoneen suorituskyky	65
9.1. Tekninen ja taloudellinen liikkumiskyky	65
9.2. Koneen suorituskykymalli	65
9.2.1. Tuotosmalli	65
9.2.2. Kuormakoko	66
9.2.3. Ajonopeus.....	68
9.2.4. Suorituskyvyn rajoitusyhtälöt.....	69
9.3. Metsäkoneen liikkumiseen käytettävissä oleva teho.....	71
9.4. Muutokset koneen liike-energiassa	72
10. Laskennalliset menetelmät	73
10.1. WES-menetelmä	73
10.2. Bekker-menetelmä.....	75
10.3. Plastisuusteoria.....	76
10.4. Rowlandin menetelmä	76
10.5. Schreinerin menetelmä.....	77
10.6. NIAE-menetelmä	77
10.7. RARDE-menetelmä	78
10.8. WES-menetelmä kahdelle kulkukerralle	78
11. Maastoliikennöinnin ekologia.....	79
11.1. Raiteistuminen.....	80
11.2. Tiivistyminen	81
11.3. Juuristo- ja puustovauriot.....	83
12. Kulkukelpoisuuden vuodenaikainen vaihtelu	84
12.1. Roudan sulaminen	84
12.2. Kesäliikennöinti.....	85
12.3. Talviliikennöinti	86
12.3.1. Kivennäismaat	86
12.3.2. Turvemaat	87
13. Maastoluokitus.....	87
Kirjallisuus	89
Liitteet	91

1. Johdanto

1.1. Esittely

Puunkorjuussa maastoliikennöinnillä on keskeinen osa, onhan metsäkuljetus kokonaisuudessaan maastoliikennöintiä ja puutavaran koneellisen korjuuosuuden lisääntyessä myös maastossa liikkuvien korjuukoneiden määrä lisääntyy. Lisäksi maastoliikuminen liittyy moneen muuhun metsätalouden toimintaan. Koneiden ja koneketjujen operatiivinen suunnittelu edellyttää tuotosten ja kustannusten arviointia. **Terramekaniikka** on tieteenhaara joka tutkii koneen ja maaston välisiä riippuvuuksia, maastoliikkuvuutta ja maastoliikennöintiä. Tästä syystä terramekaniikka soveltuu hyvin metsänhoitajakoulutuksen apuaineeksi.

Terramekaniikka on verraten nuori tieteenala, vaikka ensimmäiset aihepiiriä koskevat Bernsteinin tutkimukset ovatkin vuosisadan alussa tehty. Kuitenkin varsinainen terramekaniikan tutkimus eriytyi omaksi tietekseen toisen maailmansodan jälkeen tapahtuneen nopean koneellistamisen seurauksena. Terramekaniikan perusteet ovat maamekaniikassa, mutta sovellutusalat kattavat sekä sota-, maatalous-, metsä- ja insinööritieteet että kuljetustalouden ja koneenrakennuksen erilaiset tehtävät. Tässä yhteydessä painotus on metsäkoneiden maastoliikennöinnissä ja tarkastelun kohteena ovat lähinnä pyöräajoneuvot.

Metsäteknologisten maastoliikennöimistutkimusten viitekehystenä on yleensä ollut empiirisesti määritetty riippuvuus koneen suorituskyvyn ja joidenkin maastoa sekä konetta kuvaavien parametrien välille (black-box malli). Tällaisten mallien ekstrapoloiminen toisiin olosuhteisiin tai toisiin koneisiin on yleensä mahdollista, koska malli sisältää riittämättömän määrän parametreja. Mallien avulla ei voida esimerkiksi selvittää, miten suorituskyky muuttuisi, jos koneeseen vaihdettaisiin tehokkaampi moottori tai rengaskokoa vaihdettaisiin. Terramekaniikkaan perustuvat viitekehukset helpottavat koesuunnittelua ja saatujen mallien validiteetti on laajempi.

Tämän kirjan syntyyn on suuresti vaikuttanut Kajen (1968) kirjoittama vihkonen Maaston kulkukelpoisuus. Vihkonen ja sen edeltäjä Kajen sotakorkeakoulun diplomityö ovat erinomainen osoitus perusmatematiikan käyttökelpoisuudesta analysoitaessa maastoliikennöinnin ongelmia.

1.2. Termistö

Tässä raportissa pyritään käyttämään suomennoksina ISTVS¹:n (1977) suosittelmia terminologiaa. Seuraavassa muutamia termejä määritelmineen:

(Maaston) kulkukelpoisuus - (*Terrain*) *trafficability*

Maaston kyky kestää koneiden kulkemista

¹ The International Society for Terrain Vehicle Systems, INC

(Koneen) liikkumiskyky - (Vehicle) mobility

Koneen kaikkinaisen suoriutumiskyky sen liikkeessä paikasta toiseen kuljetustehtävässään

1.3. Maastoliikkuvuuden viitekehys

Terramekaniikka perustuu insinööritieteisiin, joissa mekaniikalla ja statiikalla on suuri merkitys. Tärkeä on muistaa työhön liittyvät käsitteet teho, työ ja voima sekä aikaan ja paikkaan liittyvät käsitteet matka, nopeus ja kiihtyvyys.

Koneen liikkuminen maastossa voidaan kuvata kahdella osasysteemillä, jotka välittyvät toisiinsa renkaan tai telan kosketuspinnan kautta. Sekä kone- että maastosysteemi kuvataan yksinkertaistettuina. Yksinkertaisimmissa malleissa voidaan tarkastella vain kuormitetun pyörän ja maan välistä vuorovaikutusta, seuraavan tason malleissa jo koneen geometria otetaan huomioon mutta kuormitukset oletetaan staattisiksi. Kolmannen tason malleissa konemalli on jo dynaaminen, jolloin kiihtyvyydet ja niiden momentit otetaan huomioon. Koska kolmannen tason mallit liittyvät läheisesti koneiden suunnitteluun ja edellyttävät monimutkaisia laskentamalleja, tässä raportissa rajoitutaan yksinkertaisiin malleihin. Myös maasto- ja maasysteemissä voidaan erottaa useita tasoja riippuen kuinka yksityiskohtaisesti maahan kohdistuneet jännitykset analysoidaan. Paitsi tekniseen liikkumiseen liittyviä parametreja mukaan voidaan ottaa taloudellisia ja ympäristö- tms tekijöitä, jolloin voidaan puhua kuljetus-ympäristö-tason malleista.

Terramekaniikassa tarkastelun kohde voi olla joko

- jäykkä pyörä, jolloin teoreettiset laskelmat ovat yleensä yksinkertaisia, ja tulokset yleisiä, tai
- joustava rengas, josta käytetään termiä ilmarengas, jolloin tarvitaan rengasta kuvaavia parametreja kuten rengaspaine, litistymä, jne. Teorianmuodostus ja laskelmat ovat yleensä monimutkaisempia. Pyörä voi olla
- vapaasti pyörivä, jolloin vääntömomentti = 0
- vetävä pyörä, jolloin vääntömomentti on > 0
- jarruttava pyörä, jolloin vääntömomentti < 0

Lisäksi pyörään voi kohdistua ohjauksesta johtuvia sivuttaisvoimia. Tässä yhteydessä tyydytään tutkimaan vain vetävää ja vapaasti pyörivää pyörää, koska pääosa kuljetuskapasiteettiin vaikuttavista tekijöistä voidaan analysoida näiden avulla.

2. Koneen liikkumista vastustavat voimat

Pyörän liikettä vastustavat voimat, kulkuvastus, voidaan jakaa kolmeen komponenttiin:

- rinnevastus
- vierintävastus
- estevastus

Koneen suorituskykyä arvioitaessa myös kiihdytykseen tarvittava liike-energian muutos, hitausvastus, inertia, voidaan ajatella vastuksena.

2.1. Rinnevastus

Rinnevastus (*Grade Resistance*) voidaan johtaa suoraan kaltevan tason tasapainoehdosta (kuva 1). Koska sekä vapaasti pyörivällä että vetävällä pyörällä eteenpäin työntävä voima on rinteeseen suuntainen, saadaan molemmille rinnevastukseksi

$$F_G = \sin\alpha \cdot W \quad (2.1)$$

jossa

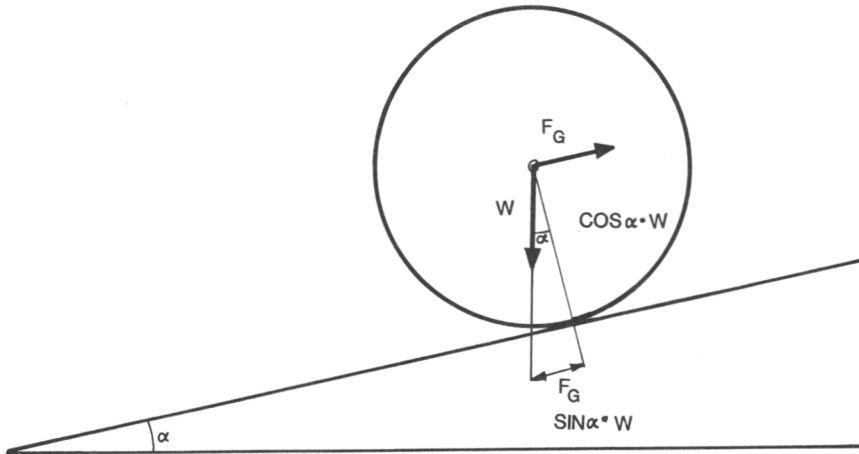
F_G on rinnevastus, N
 α rinteeseen kaltevuus, °
 W pyöräkuorma, N

Rinnevastuskerroin on rinnekulman sini eli nousun suhde rinteeseen pituuteen

$$\mu_G = \sin\alpha \quad (2.2)$$

jossa

μ_G on rinnevastuskerroin
 α rinteeseen kaltevuus, °



Kuva 1. Rinnevastus.

Taulukko 2.1. Kulman Sini, Tangentti ja Kosini.

Kulma, °	Sini	Tangentti	Kaltevuus, %	Kosini
0	0,000	0,000	0,0	1,000
5	0,087	0,087	8,7	0,996
10	0,174	0,176	17,6	0,985
15	0,259	0,270	27,0	0,966
20	0,342	0,364	36,4	0,937
25	0,423	0,466	46,6	0,906
30	0,500	0,577	57,7	0,866

Suomalaisilla rinnekaltevuuksilla (< 20°, < 35%) $TAN\alpha$:n arvo on lähellä $SIN\alpha$:a ($TAN\alpha = SIN\alpha/COS\alpha$) (taulukko 2.1). Käytännön laskelmissa voidaan siten käyttää

$$\mu_G = \frac{S}{100} \quad (2.3)$$

jossa

μ_G on rinnevastuskerroin
S rinteeseen kaltevuusprosentti, %

2.2. Vierintävastus

Vierintävastus (*Rolling Resistance*) on pyörän liikettä vastustava vaakakomponentti. Vierintävastuskerroin määritellään vierintävastuksen ja pyöräkuorman suhteeksi. Vierintävastus johtuu sekä renkaan että maan muodonmuutoksiin kuluva työstä.

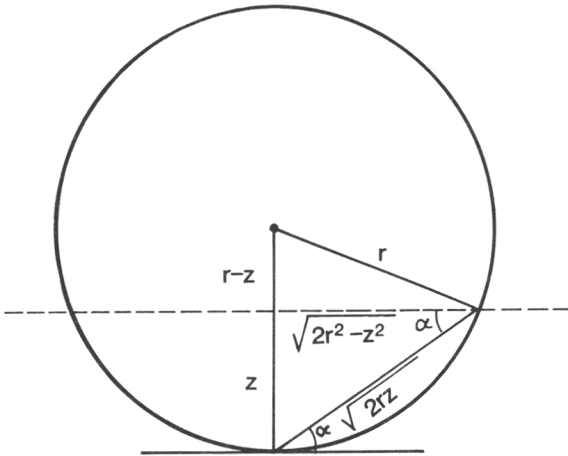
$$\mu_R = \frac{F_R}{W} \quad (2.4)$$

jossa

μ_R on vierintävastuskerroin
 F_R vierintävastus,
W pyöräkuorma, N

2.2.1. Jäykän pyörän vierintävastus, teoreettinen viitekehys

Pyöräkuormasta ja maan kantavuudesta riippuen kuormitettu pyörä painuu maahan tiettyyn tasapainosyvyyteen z. Yksinkertaistaen voidaan ajatella, että edetessään pyörän on voitettava sama vastustava voima kuin sen noustessa ylös rinnettä, jonka korkeus on z ja pituus kosketuskohdan ja akselin välinen vaakaaetäisyys. Vetävällä pyörällä voima on kuvitellun rinteeseen suuntainen, vapaasti pyörivällä voima on vaakasuuntainen. Rinnevastuksen analogiaa käyttäen vierintävastuskertoimeksi tulee kuvan 2 perusteella



Kuva 2. Jäykän pyörän vierintävastusgeometria.

Vetävä pyörä

$$\mu_R = \text{SIN}\alpha \quad (2.5)$$

Vapaasti pyörivä

$$\mu_R = \text{TAN}\alpha \quad (2.6)$$

jossa

μ_R on vierintävastuskerroin
 α vierintätangentin kulmakerroin

Kuvasta 2 saadaan sinin ja tangentin arvoiksi:

Vetävä pyörä

$$\text{SIN}\alpha = \frac{z}{\sqrt{2*r*z}} \quad (2.7)$$

Vapaasti pyörivä

$$\text{TAN}\alpha = \frac{z}{\sqrt{2*r*z - z^2}} \quad (2.8)$$

jossa

z on painuma, m
 r pyörän säde, m

Käytännössä vierintävastusta voidaan siis arvioida pyörän painuman suuruuden perusteella. Koska ympyrän kehäkulma on puolet keskuskulmasta, voidaan myös kirjoittaa

Vetävä pyörä

$$\mu_R = \text{SIN}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.9)$$

Vapaasti pyörivä

$$\mu_R = \text{TAN}\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (2.10)$$

jossa

μ_R on vierintävastuskerroin
 φ painumaa vastaava keskuskulma, °

Pyörän leveys ei tullut mukaan näihin yksinkertaisiin malleihin. Todellisuudessa vierintävastus riippuu myös pyörän leveydestä, koska kosketuspinta ei ole suora eikä paineen jakautuminen maapohjaan ole tasainen, kuten mallissa (2.5) ja (2.6) oletettiin.

2.2.2. Pyörän leveyden vaikutus vierintävastukseen, empiirinen malli

Koska pyörän leveyden vaikutusta on vaikea analysoida yksinkertaisen mallin avulla, apuna käytetään Gee-Clough'n (1979) empiiristä koetta, jossa hän tutki eri levyisten jäykkien pyörien vierintävastusta kuivassa hiekassa. Kuvassa 3 verrataan mallilla (2.8) laskettua vierintävastusta eri levyisillä pyörillä mitattuihin arvoihin. Voidaan todeta, että malli 2.8 antaa vierintävastuksen kapealle renkaalle ja että vierintävastus kasvaa lineaarisesti renkaan leveyden lisääntyessä.

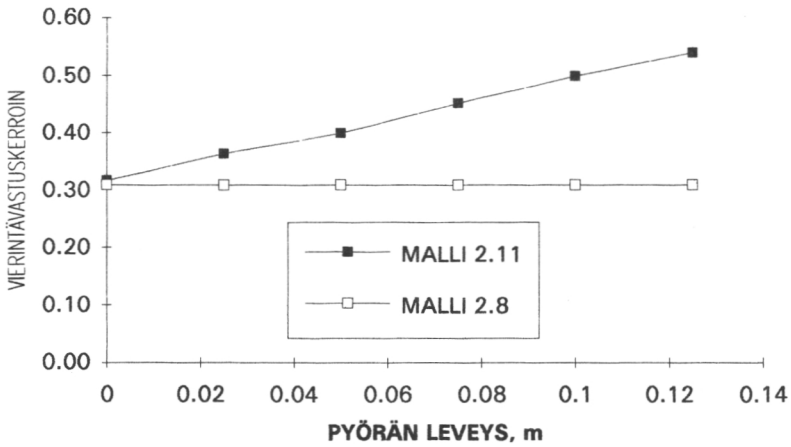
Gee-Clough'n (1979) mukaan jäykän pyörän vierintävastus voidaan estimoida mallilla (2.11):

$$\mu_R = \sqrt{\frac{z}{d}} * (1 + 1.3 * \frac{b}{d}) \quad (2.11)$$

jossa

μ_R on vierintävastuskerroin
 z painuma, m
 d pyörän läpimitta, m
 b pyörän leveys, m

Todennäköisesti kerroin $(1 + 1.3 * b/d)$ voidaan liittää myös malleihin (2.7) ja (2.8).

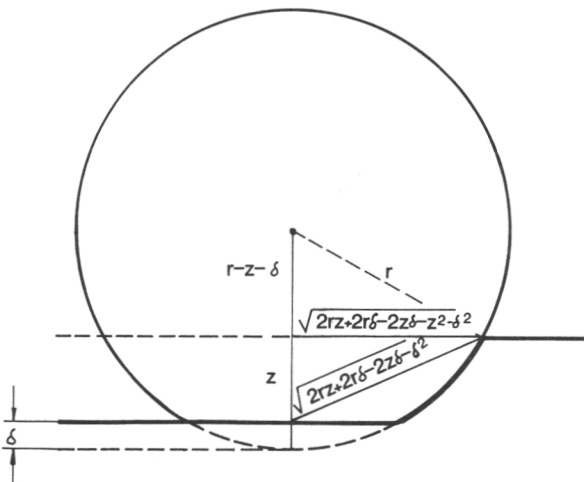


Kuva 3. Jäykän pyörän vierintävastus pyörän leveyden funktiona (Gee-Cloug 1979).

2.2.3. Ilmarenkaan vierintävastus, teoreettinen viitekehys

Ilmarenkas (*Pneumatic tyre*) painuu joustavuutensa ansiosta jonkin verran. Renkaan profiili muistuttaa ympyräkaarta, jonka vierintäsäde on suurempi kuin renkaan säde (Qun & Guogang 1990). Mallin (2.1) ja (2.2) mukaan samalla painumasyvyydellä ilmarenkaan vierintävastuksen tulisi täten olla pienempi kuin jäykän pyörän.

Mikäli renkaan joustoa (*Deflection*) merkitään δ ja painumaa z niin joustavan renkaan vierintävastuskertoimeksi saadaan kuvan 4 perusteella



Kuva 4. Ilmarenkaan vierintävastusgeometria.

Vetävä pyörä

$$\mu_r = \frac{z}{\sqrt{2rz + 2r\delta - 2z\delta - \delta^2}} \quad (2.12)$$

Vapaasti pyörivä

$$\mu_r = \frac{z}{\sqrt{2rz + 2r\delta - 2z\delta - z^2 - \delta^2}} \quad (2.13)$$

jossa

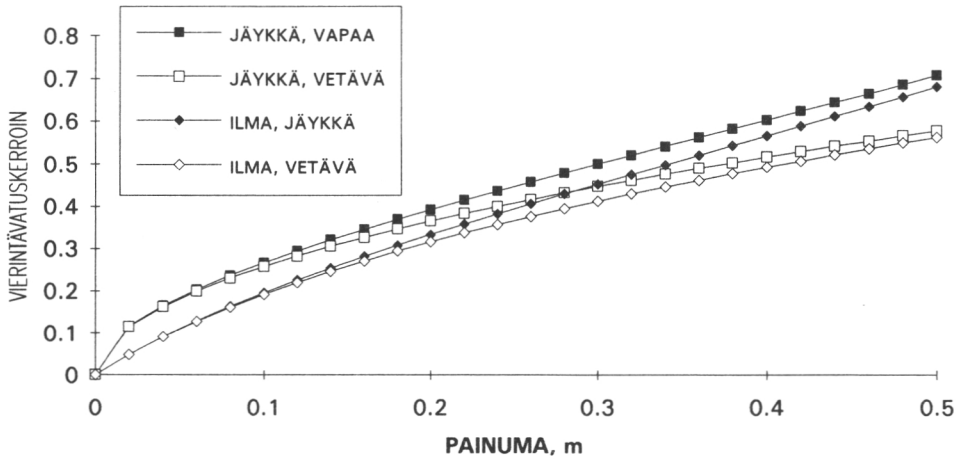
- μ_r on vierintävastuskerroin
 r renkaan säde, m
 z renkaan painuma, m
 δ renkaan litistymä, m

Vetävän pyörän vierintävastus voidaan määrittää mittaamalla pyörän momentti 0-luistolla. Teoriassa vetävän pyörän vierintävastus on hieman pienempi kuin vapaasti pyörivän, mutta käytännössä ero on merkityksetön (esim. Maclaurin 1990). Vierintävastusta normaaliluistolla voidaan siis mitata tutkimalla vapaasti pyörivää pyörää maastossa. Tarvittaessa voidaan korjaus tehdä jälkeenpäin matemaattisesti.

Kuvassa 5 esitetään $d=1,5$ m pyörän vierintävastuksen riippuvuus painuman syvyydestä. Voidaan todeta, että vierintävastus kasvaa hyvin nopeasti pienillä painuman lisäyksillä. Alle 0,10 vierintävastuskertoimilla traktorin pyörän painuma voi olla korkeintaan joitain senttimetrejä, 0,30 vierintävastuskertoimilla jo toistakymmentä senttiä. Vierintävastus voidaan siis arvioida kohtalaisen hyvin painuman perusteella, ja käytännössä voidaan käyttää seuraavia keskimääräisiä arvoja (taulukko 2.2.).

Taulukko 2.2. Vierintävastus erilaisilla alustoilla.

Alustan laatu	Vierintävastuskerroin
Tie	<0,05
Kova hiekkakangas	<0,10
Löysä hiekka	<0,15
Metsämaa	<0,20
Upottava pehmeikkö	<0,25



Kuva 5. Vierintävastus eri painumasyvyyksillä ($d=1,5$ m).

2.3. Lumivastus

Lumivastus johtuu työstä, jonka pyörä tekee lunta muokatessaan. Lumivastus on tavallaan vierintävastuksen erikoistapaus, ja sitä käsitellään yksityiskohtaisemmin luvussa 4.

2.4. Estevastus

Estevastusta tutkitaan teoreettisesti tarkastelemalla neljää tilannetta:

- suorakulmainen este: vapaasti pyörivä ja vetävä pyörä ylittämässä suorakulmaista estettä
- pyöreä este: vapaasti pyörivä ja vetävä pyörä ylittämässä puolipallon muotoista estettä

2.4.1. Jäykän pyörän teoreettinen estevastusmalli

Tarkastellaan vapaasti pyörivää jäykkää pyörää ylittämässä suorakulmaista estettä, esim. kantoa, (kuva 6). Vaakatyönnöllä on ylitettävä este, jonka korkeus on h . Tilanne vastaa vipujärjestelmää, jossa painopisteessä P oleva kuorma W on vivuttava kosketuspisteen A ympäri vaakatasossa vaikuttavalla voimalla F_H . Saadaan seuraava tasapainoehto:

$$W \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot h - h^2} = (r - h) \cdot F_H \quad (2.14)$$

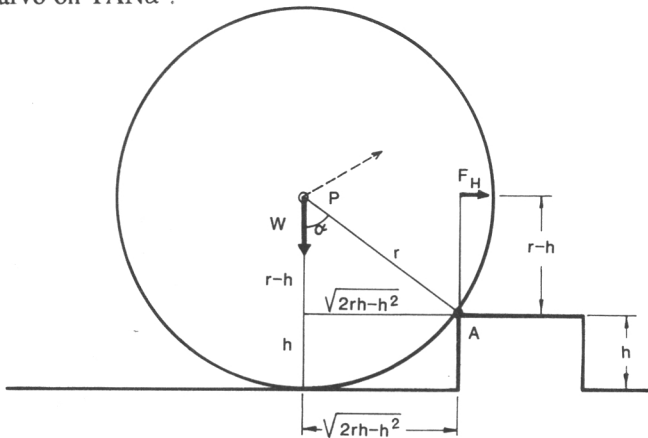
josta F_H voidaan ratkaista.

$$F_H = W \frac{\sqrt{2rh - h^2}}{r - h} \quad (2.15)$$

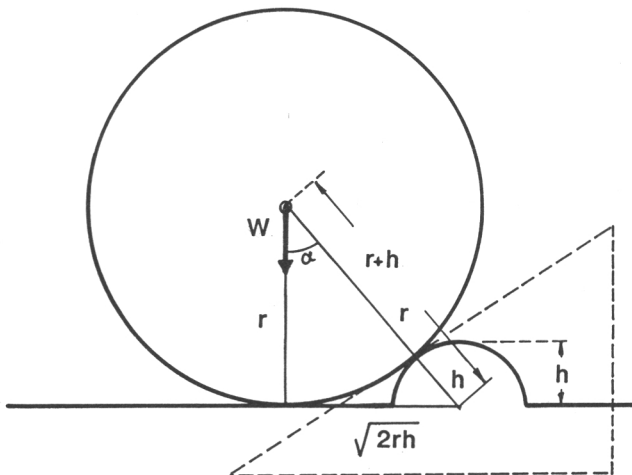
Edellä olevan yhtälön johdon on esittänyt McNally (1975). Eri menetelmällä saman yhtälön on johtanut myös Kaje (1968), ja hänen menetelmäänsä käytetään tutkittaessa vapaasti pyörivän jäykän pyörän estevastusta ylitettäessä puolipallonmuotoista estettä, esim. kiveä (kuva 7). Pyörägeometriasta voidaan todeta, että estevastukseksi tulee alhaisempi arvo, koska tangenttipiste tulee esteen korkeutta matalammalle:

$$F_H = W \frac{\sqrt{2rh - h^2}}{r} \quad (2.16)$$

Voidaan todeta että molemmissa vapaasti pyörivän pyörän tapauksissa estevastuskerroimen arvo on $\tan \alpha$.



Kuva 6. Jäykän pyörän estevastus ylitettäessä suorakulmaista estettä.



Kuva 7. Jäykän pyörän estevastus ylitettäessä puolipallon muotoista estettä.

Vetävällä pyörällä vaikuttava voima on tangentin suuntainen ja tällöin kertoimeksi tulee $\sin\alpha$, mikä on johdettavissa suoraan kaltevan tason tasapainoehdosta. Täten saamme seuraavat yleistapaukset:

$$\text{Vetävä pyörä: } F_H = \sin\alpha \cdot W \quad (2.17)$$

$$\text{Vapaasti pyörivä: } F_H = \tan\alpha \cdot W \quad (2.18)$$

Terävä este

$$\text{Vetävä pyörä: } \sin\alpha = \frac{\sqrt{2rh - h^2}}{r} \quad (2.19)$$

$$\text{Vapaasti pyörivä: } \tan\alpha = \frac{\sqrt{2rh - h^2}}{r - h} \quad (2.20)$$

Pyöreä este

$$\text{Vetävä pyörä: } \sin\alpha = \frac{\sqrt{2rh + h^2}}{r + h} \quad (2.21)$$

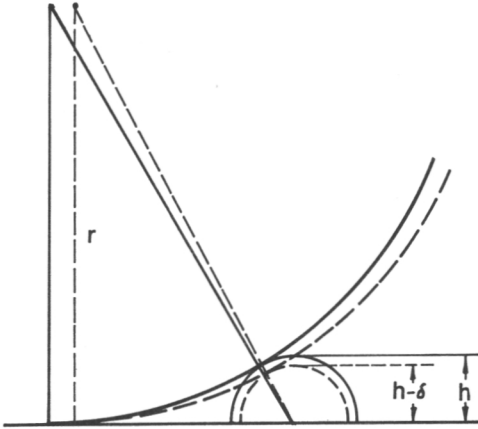
$$\text{Vapaasti pyörivä: } \tan\alpha = \frac{\sqrt{2rh + h^2}}{r} \quad (2.22)$$

jossa

F_H	on	estevastus, N
W	pyöräkuorma, N	
r	pyörän säde, m	
h	esteen korkeus, m	

2.4.2. Ilmarenkaisen pyörän teoreettinen estevastusmalli

Verrattaessa jäykän pyörän estevastusta ja vierintävastusta havaitaan, että samankorkeisen esteen ylittämiseen tarvitaan erisuuruinen voima. Tämä johtuu erilaisesta perushypoteesista: estevastus laskettiin pisteen suhteen mutta vierintävastuksessa malli oli yksinkertaistettu koskemaan keskimääräistä kosketuspintaa (kuva 4). Täten voidaan olettaa, että vierintävastuksen mallit (2.12) ja (2.13) soveltuvat verraten hyvin ilmarenkaalle. Ilmarengashan joustaa kosketuskohdassa, joten tangenti tulee loivemmaksi. Tätä voidaan tarkastella teoreettisesti olettamalla joustoksi δ (kuva 8). Tällöin saadaan ilmarenkaalle seuraavat estevastusyhtälöt:



Kuva 8. Ilmarenkaan estevastusgeometria.

Vetävä pyörä: $F_H = \text{SIN}\alpha * W$ (2.23)

Vapaasti pyörivä: $F_H = \text{TAN}\alpha * W$ (2.24)

Terävä este

Vetävä pyörä: $\text{SIN}\alpha = \frac{\sqrt{2rh - 2r\delta + \delta^2 - h^2}}{r - \delta}$ (2.25)

Vapaasti pyörivä: $\text{TAN}\alpha = \frac{\sqrt{2rh - 2r\delta + \delta^2 - h^2}}{r - h}$ (2.26)

Pyöreä este

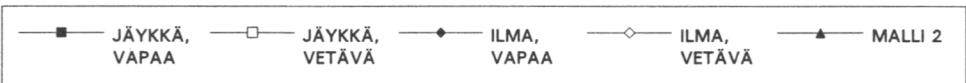
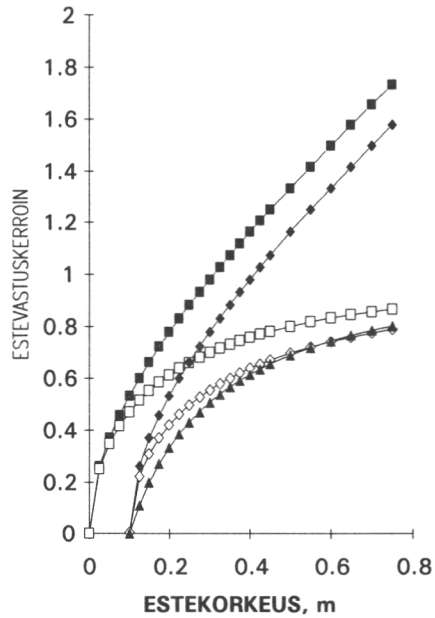
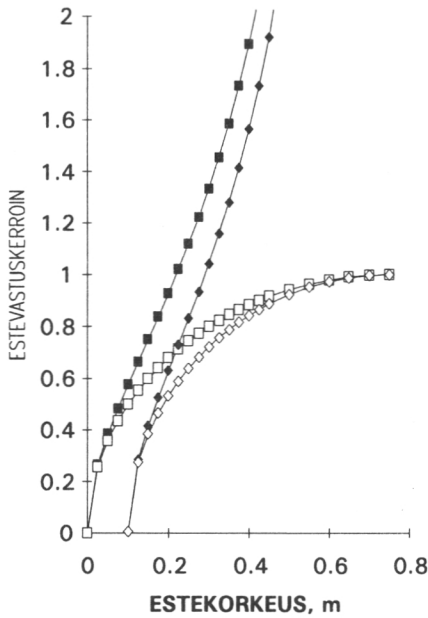
Vetävä pyörä: $\text{SIN}\alpha = \frac{\sqrt{2rh - 2r\delta - 2h\delta + \delta^2 + h^2}}{r + h}$ (2.27)

Vapaasti pyörivä: $\text{TAN}\alpha = \frac{\sqrt{2rh - 2r\delta - 2h\delta + \delta^2 + h^2}}{r}$ (2.28)

jossa

- F_H on estevastus, N
- r pyörän säde, m
- h esteen korkeus, m
- δ litistymä, m

Kuvassa 9 esitetään estevastuksen teoreettiset arvot kosketuskohdassa, kun $d=1,5$ m rengas ylittää erikorkuisia suorakulmaisia esteitä. Vastaavat estevastuksen arvot ylitettäessä puolipallonmuotoisia esteitä esitetään kuvassa 10.



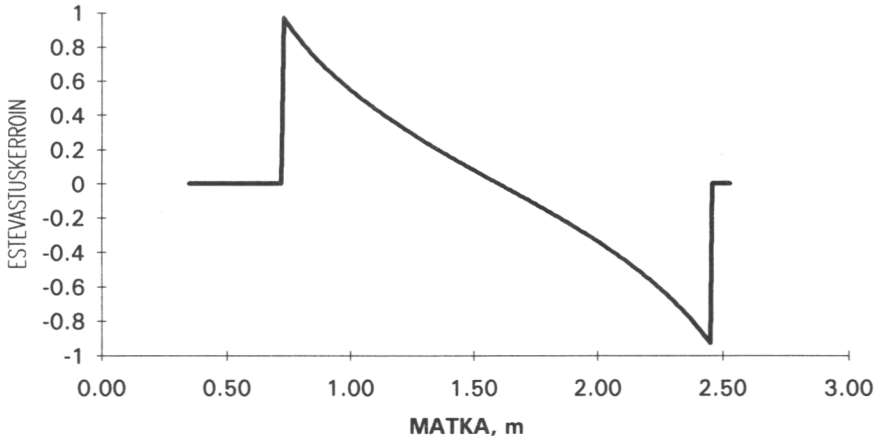
Kuva 9. Estevastuskerroin ylitettäessä suorakulmaista estettä.

Kuva 10. Estevastuskerroin ylitettäessä puolipallonmuotoista estettä.

Lasketut estevastukset ovat estevastuksen maksimiarvoja, jotka saadaan juuri kosketuskohdassa. Estevastus pienenee, kun pyörä nousee esteen päälle ja muuttuu negatiiviseksi, kun pyörä laskeutuu esteeltä (kuva 11). Kuvassa 11 esitetään estevastuskertoimen vaihtelu, kun 1,5 m pyörä lähestyy 0,30 m korkuista kiveä, jonka säde on 0,6 m ja ylittää sen.

Periaatteessa estevastus lisää pyörän potentiaalienergiaa nousuvaiheessa, ja energia vapautuu esteeltä laskettaessa. Käytännössä metsäkoneessa pyörät ovat melko kiinteässä yhteydessä toisiinsa, ja erot pyörän liike-energiassa voivat esiintyä jarruttavina momentteina toisissa pyörissä. Täten suurin osa estevastuksesta on todellista kulkuvastusta.

Mallista (2.19) voidaan päätellä, että terävä este (kanto) on vaakatyönnöllä vaikeasti ylitettävissä vapaasti pyörivällä pyörällä, jos esteen korkeus on yli $1/3$ pyörän säteestä. Pyörän kiven ylittäminen vaikeutuu, jos korkeus on n. $1/2$ säteestä. Trak-



Kuva 11. Estevastuskerroin kun 1,5 m pyörä ylittää 0,3 m korkuista kiveä.

tori ja vetämätön peräkärri, jossa pyörän halkaisija on 1 m pystyy siten toimimaan n. 0,15-0,20 m kannokossa ja 0,20-0,25 m kivikossa. Ero vetävän ja vapaasti pyörivän pyörän estevastuksen välillä havainnollistuu sulkjuontokärriä käytettäessä. Estettä ylitettäessä laitetta on helpompi liikuttaa pyörittämällä pyörästä kuin vetämällä aisasta.

Vetävä pyörä yleensä pystyy kiipeämään esteen yli pyörä pyörältä. Mikäli koneen kaikki pyörät ovat vetäviä, ei rajoittavaksi tekijäksi yleensä tulekaan estevastus, vaan ajonopeuden hidastuminen, heilunta, vakavuus tai rungosta kiinnijääminen (pieni maavara). Näitä rajoituksia käsitellään luvussa 9. Jos kiven pinta on liukas, voi tartunta jäädä liian pieneksi ja tällöin estevastus voi muodostua rajoittavaksi tekijäksi. Jotta rengas voisi kiivetä kiven yli tartuntakertoimen on oltava suurempi kuin estevastuskertoimen.

2.5. Yleinen estevastusmalli pyöreälle esteelle

Pyörän painuma ja pyöreän esteen muoto voidaan lisätä malleihin, jolloin päädytään seuraaviin estevastuksen yleisiin yhtälöihin (kuva 12):

$$\text{Vetävä rengas:} \quad \sin \alpha = \frac{X}{R} \quad (2.29)$$

$$\text{Vapaasti pyörivä rengas:} \quad \tan \alpha = \frac{X}{Y} \quad (2.30)$$

$$Y = \sqrt{R^2 - X^2} \quad (2.31)$$

jossa

R on akselin pyörähdyssäde, m
 X pyörän akselin vaakaetäisyys kiven keskipisteestä, m

Koska ilmarenkas joustaa, akselin pyörähdyssäde on suurempi kuin $R=r_1+r_2$. Laskelmissa R voidaan korvata ilmarenkassysteemin pyörähdyssäteellä R_p , joka voidaan laskea mallilla (2.32)²:

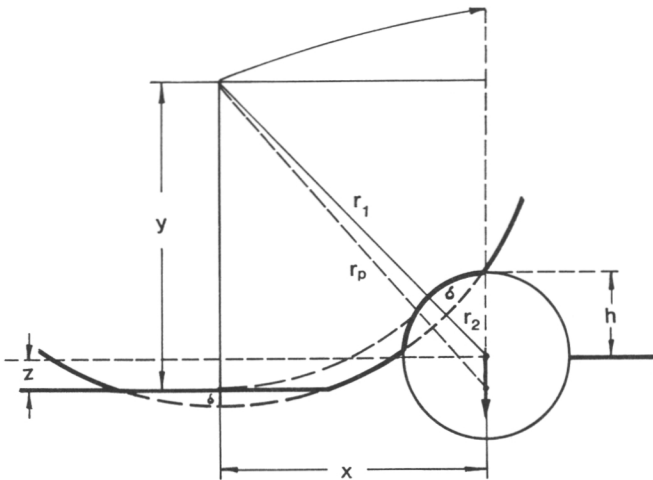
$$R_p = \frac{h^2 - 2 \cdot h \cdot \delta + \delta^2 + X_{\max}^2}{2 \cdot (h - \delta)} \quad (2.32)$$

$$X_{\max} = \sqrt{2 \cdot (r_1 + r_2) \cdot h - h^2} \quad (2.33)$$

jossa

R_p on akselin pyörähdyssäde, m
 h esteen korkeus, m
 δ renkaan litistymä, m
 X_{\max} akselin vaakaetäisyys kiven keskipisteestä kohtauspisteessä, m

Mallilla (2.30) laskettua estevastusta verrataan kuvassa 10 (Malli 2) malliin (2.27). Voidaan todeta, että malli (2.30) antaa pienillä estekorkeuksilla pienempiä arvoja kuin malli (2.27). On todennäköistä, että mallin (2.30) antamat arvot ovat lähempänä todellisia kuin mallilla (2.27) saadut.



Kuva 12. Estevastusgeometria ilmarenkaalle, yleinen tapaus.

² Mallin johto esitetään heilunnan yhteydessä luvussa 7.1

2.6. Kulkuvastus

Koska on vaikeaa erikseen mitata ja arvioida vierintävastusta ja pienistä esteistä johtuvaa estevastusta, kannattaa nämä tutkia yhdessä. Niinpä käytännössä vierintävastus yleensä sisältää paitsi painumasta johtuvan vierintävastuksen myös mikroesteistä eli maanpinnan epäsäännöllisyyksistä johtuvan estevastuksen, pienet kivet, juuret jne. Mikäli esteet ovat harvassa, puhdas estevastus (iso kivi, korkea kanto) aiheuttaa mittaukseen selvän piikin, joka jätetään yleensä laskematta keskiarvoon. Vierintävastus on yleensä pienesteitä sisältävän aineiston mittaustulosten keskiarvo. Yksittäisten esteiden estevastus on arvioitava erikseen.

2.7. Kulkuvastus kaltevalla tasolla

Vierintä- ja estevastusta tarkasteltiin edellä vaakatason maastossa. Rinteessä rinteeseen suuntaiseksi kuorman komponentiksi tulee $\text{COS}\alpha * W$, joka voidaan johtaa suoraan kaltevan tason tasapainoehdosta. Täten kulkuvastukseksi rinteessä saadaan

$$F_T = W * (\text{SIN}\alpha + \text{COS}\alpha * \mu_R) \quad (2.34)$$

jossa

F_T on	kulkuvastus, N
W	pyöräkuorma, N
μ_R	vierintä + estevastuskerroin
α	rinnekaltevuus, °

Koska pyöräajoneuvokaltevuuksilla (< 35%) $\text{SIN}\alpha$ voidaan korvata $\text{TAN}\alpha$:lla ja $\text{COS}\alpha = 1$, saadaan yksinkertaisempi malli

$$F_T = W * \left(\frac{S}{100} + \mu_R \right) \quad (2.35)$$

jossa

F_T on	kulkuvastus, N
W	pyöräkuorma, N
μ_R	vierintä + estevastuskerroin
S	rinnekaltevuus, %

Pyörän kulkuvastuskerroin on siten rinnekaltevuus/100 lisättynä vierintävastuskerroin.

2.8. Hitausvastus, inertia

Kun koneen nopeutta lisätään, tarvittava voima on

$$F_A = m \cdot a \quad (2.36)$$

jossa

F_A on hitausvastus, N
 m koneen massa, kg
 a kiihtyvyys, m/s^2

Taulukossa 2.3 havainnollistetaan kokonaismassaltaan 20 t metsätraktorin kiihdyttämiseen tarvittavia voimia. Kiihdytys ajatellaan tapahtuvaksi 100 m matkalla alkunopeudesta 0. Kiihtyvyyden arvo m/s^2 on analoginen vierintävastuskertoimelle, eli jos metsäkone kiihdytetään 100 m matkalla 5,0 m/s nopeuteen tarvitaan sama voima kuin kuljettamaan traktoria vierintävastuksella 0,125 (eli pyörä painuneena 58 mm syvyyteen).

Taulukko 2.3. Hitausvastus ja tehontarve kiihdytettäessä massaltaan 20 t metsäkone 100 m matkalla annettuun loppunopeuteen.

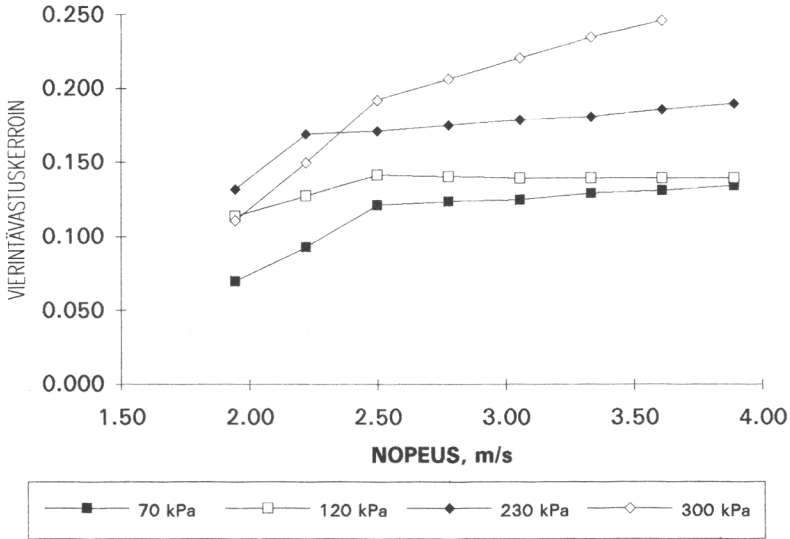
Loppunopeus, m/s	1,0	2,5	5,0	10,0
Loppunopeus, km/h	3,6	9,0	18,0	36,0
Kiihtyvyys, m/s^2	0,005	0,031	0,125	0,5
Hitausvastus, kN	0,981	6,13	24,5	98,1
Tehontarve, kW	1	6	25	98

2.9. Muiden tekijöiden vaikutus kulkuvastukseen

Edellä olevissa tarkasteluissa ei pyörän etenemisnopeus sisältynyt malliin, ja vanhempien terramekaanisten tutkimusten perusteella ideaalimaalajeilla³ suoritetuissa testeissä nopeuden vaikutus oli merkityksetön (Wisner ym. 1976). Käytännön mitauksissa on kuitenkin todettu, että vierintävastus/kulkuvastus riippuu pyörän kulkunopeudesta (esim. Holm ym. 1990). Tämä johtuu siitä, että maan muodonmuutos riippuu myös kuormitusnopeudesta. Kulkuvastus on alhaisimmillaan pienillä nopeuksilla mutta kasvaa n. 2 m/s nopeuksiin saakka. Teoreettiset laskelmat pätevät parhaiten normaaleille (2-10 m/s) nopeusalueille, joten niitä voidaan käyttää verraten hyvin maastoliikennöinnin käytännön tilanteissa. Kehitettäessä täydellisempiä malleja maan kuormitusnopeus/muodonmuutosfunktio on lisättävä malleihin.

Kuvassa 13 esitetään vierintävastus pehmeällä alustalla rengaspaineen ja ajonopeuden funktiona. Voidaan todeta, että normaaleilla rengaspaineilla (< 200 kPa) ja ajonopeuksilla (> 2 m/s) kulkuvastuserroin on lähes vakio.

³ Ideaalimaalajilla tarkoitetaan laboratorioiden maa-altaissa käytettyjä homogeenisoituja maalajeja, yleensä "puhtaita kitkamaalajeja" tai "puhtaita koheesiomaalajeja"



Kuva 13. Vierintävastuksen riippuvuus ajonopeudesta ja rengaspaineesta (Holm ym. 1990).

Käytännössä myös maaston epätasaisuudesta johtuva pyörän värähtely (heilunta) lisää kulkuvastusta (esim. Yong & Eiyö 1990). Metsäkoneiden nopeuksilla se voidaan jättää huomioonottamatta.

3. Maamekaniikan perusteet

Metsämaatiiede (*Soil Science*) käsittelee maata luonnontieteellisestä lähtökohdasta käsin ja tavoitteena on mallittaa maan tuottokykyä. Maamekaniikka (*Soil Mechanics*) tarkastelee maata insinöörیتieteiden näkökulmasta ja tavoitteena on mallittaa maan lujuusominaisuuksia. Maaston kulkukelpoisuuden ja koneiden liikkumiskyvyn arviointi edellyttää riittäviä perustietoja maalajeista ja maalajien ominaisuuksista. Mikäli kulkualustaa ei tunneta riittävän hyvin, ei koneen suorituskykyään pystytä arvioimaan oikein. Maamekaniikka, geotekniikka ja geologia ovat terramekaniikan eräitä perustieteitä.

3.1. Maatyypit

Terramekaniikassa erotetaan kaksi kivennäismaaluokkaa

- kitkamaat ja
- koheesiomaat

sekä orgaaniset maalajit

- turve ja
- lieju.

Lajittuneet kivennäismaalajit ovat yleisiä laajoilla alueilla muualla maailmassa. Kitkamaat ovat yleensä suurirakeisempia hiekkamaita ja koheesiomaat hienojakoisia savimaita. Lisäksi käytännössä tavataan erityyppisiä välimaalajeja. Pääosa terramekaniikan teoreettisista tarkasteluista ja käytännön kokeista on tehty joko tyyppillisellä kitka- tai savimaalla, ja siksi niiden tulosten soveltaminen suoraan suomalaisille moreenimaille voi johtaa virheisiin. Samoin orgaanisten maalajien käyttäytyminen poikkeaa kivennäismaista. Lajittuneiden maalajien ominaisuuksia on esitelty taulukossa 3.1.

Suomessa yleisin maalaji on moreeni, jossa hienot ja karkeat maajakeet vaihtelevat laajoissa rajoissa. Tyyppillistä suomalaisille maalajeille on myös kivisyys. Podsoli-tyyppisessä moreenimaassa voidaan yleensä erottaa 3 kerrosta: humus eli H-horisontti ja A-, B- ja C-horisontit, jotka ovat kivennäismaata. Eri kerrosten fysikaaliset ominaisuudet ovat taulukon 3.2 mukaiset. Suomessa tavataan myös lajittuneita maalajeja, savikoita, lähinnä maan lounaisosissa ja erilaisia hiekkakankaita (harjuja) eri puolilla maata.

Taulukko 3.1. Maalajien ominaisuuksia (Kuonen 1983).

Ominaisuus	Koheesiomaat		-> Siltti	Kitkamaat	
	Savi	Silttisavi		Hieno hiekka	Hiekka
Raekoko	< 0,002	< 0,06	< 0,02	< 3	< 6
Koheesio, kPa	25	20	0	0	0
Kitkakulma	22	27	33	34	38
Vesipitoisuus, %	47	25	32	17	13
Märkätiheys	1750	2000	1900	2000	1950

Taulukko 3.2. Maaperän humusosuus, tiheys ja aineistiheys sekä huokostilavuus maanoskerroksittain (Westman 1990).

Kerros	Paksuus, mm	Orgaaninen aines, %	Aineistiheys, kg/m ³	Tiheys, kg/m ³	Huokostila, e ₀
H	62	69	1450	150	90
A	98	4	2470	1050	57
B	200	5	2490	1110	56
C		2	2570	1340	48

Taulukko 3.3. Maalajien keskimääräinen lajitejakautuma metsätyypeittäin (Westman 1990).

Maalajite	Metsätyyppi			
	CT	VT	MT	OMT
	Lajitteen osuus, %			
Hiekka	35	48	26	34
Hieta	61	30	43	30
Hiesu	2,9	4,7	8,1	8,4
Savi	0,5	2,2	1,5	3,7

Pintahumus on tiheydeltään alhaista ja siksi hyvin kokoonpuristuvaa ja vielä A- ja B-horisontin tiheydet ovat verraten alhaisia. C-horisontti alkaa keskimäärin 0,35 m syvyydessä ja on jo tiivistä ja kantavaa.

Metsätyypeittäin maaperässä voidaan todeta hiesu- ja saviaineksen osuuden kasvavan kohti rehevempiä tyyppisiä (taulukko 3.3). Koska orgaanisen aineksen ja hiesujakeen osuus yleensä huonontaa maalajin kulkukelpoisuutta, huononee kulkukelpoisuus metsätyypin parantuessa.

3.2 Maan mekaanisten ominaisuuksien mittaaminen

Maa-aineksiä tai maaperää voidaan tutkia eri tavoin. Periaatteessa voidaan puhua

- maan kemiallisten ominaisuuksien
- maan fysikaalisten ominaisuuksien ja
- maan mekaanisten ominaisuuksien (lujuusominaisuuksien) mittaamisesta.

Kemialliset ominaisuudet ovat tärkeitä arvioitaessa maan tuottokykyä mutta vähemmän merkityksellisiä arvioitaessa kulkukelpoisuutta. Kulkukelpoisuuden kannalta humuspitoisuus on oleellinen indikaattori.

Maan fysikaaliset ominaisuudet

- rakenne, maatyypit
- raekoko, -muoto ja -jakautuma,
- tiheys,
- vesipitoisuus

pitäisi aina ilmoittaa jonkinlaisella tarkkuudella kulkualustaa kuvattaessa.

Maan lujuusominaisuuksien mittaamiseen on maamekaniikassa ja terramekaniikassa kehitetty useita sekä laboratorio- että kenttämenetelmiä ja laitteita. Periaatteessa niillä mitataan joko maan muodonmuutosominaisuuksia tai leikkauslujuutta. Tunnetuin laboratoriomenetelmä on kolmiakselikoe (*Triaxial Test*), jolla mitataan maan leikkauslujuus. Yksinkertaisempi laboriotesti on suora leikkauslujuuden mittaaminen (*Direct Shear*) rasiakokeella. Kenttämittauksiin on kehitetty mm. siipikaira (*Vane Tester*). Muodonmuutosominaisuuksien kenttämittauksiin on kehitetty erilaisia levykuormituskokeita (*Plate Test*) ja pyöreä leikkausrenkas (*Shear Annulus*). Kartiopenetrometri (*Cone Penetrometer*) on kenttämittausväline, jolla mitataan

leikkauslujuuden ja muodonmuutosominaisuuksien yhdysvaikutusta. Maan lujuusominaisuuksien kuvaamisessa on vaikeutena, että eri menetelmillä saadaan erilaisia tuloksia (esim. Shoop 1989) ja niiden soveltaminen kulkukelpoisuusanalyysiin on standardoimatta. Kuitenkin jonkinlainen kulkualustan mekaanisten ominaisuuksien mittaaminen ja numeerinen kuvaus pitäisi sisältyä raportteihin.

3.3. Maan kantavuus

Maapohjan kantavuus on sen kyky vastustaa pystysuoraa kuormitusta. Maamekaniikassa ja terramekaniikassa voidaan erottaa termit kantokyky ja kantavuus. Maapohjan kantokyvyllä tarkoitetaan maan murtokuormaa. Kantavuus taas kuvaa maapohjan muodonmuutosominaisuuksia pystysuoran kuormituksen alla. Maamekaniikassa maapohjan kantavuutta on perinteisesti analysoitu joko

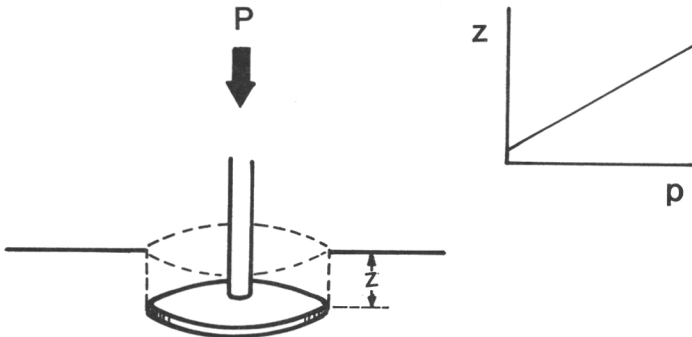
- kimmo- tai
- plastisuusteorian pohjalta.

Kimnoteoria on laajalti käytössä tienrakennustekniikassa. Pyöreää kuormituslevyä kuormitetaan ja vastaava painuma mitataan (kuva 14). Kimmomoduuli E on laskennallinen arvo, malli (3.1). Terramekaniikassa käytetty Bekker-menetelmä perustuu kimmoteorian sovellutukseen.

$$E = \frac{1.5 \cdot p \cdot r}{z} \quad (3.1)$$

jossa

- | | |
|--------|---|
| E on | kimmomoduuli, kN/m^2 |
| p | kuormitus, kPa |
| z | painuma, m |
| r | kuormituspinnan säde, m (standardimenetelmässä 0,15 m) |



Kuva 14. Levykuormituskoe.

Plastisuusteoria on kehitetty perustusten vakavuuden analysointiin. Kuormituspinta on suorakaiteen muotoinen, ja kuormitus ajatellaan pitkäaikaiseksi. Maapohjan kantavuus määritetään murtokuormana

$$Q_t = C \cdot N_c + \gamma \cdot z_0 \cdot N_q + \frac{b}{2} \cdot \gamma \cdot N_\gamma \quad (3.2)$$

jossa

Q_t on maan kantokyky, kN/m^2

C maan koheesio, kN/m^2

N_c, N_q, N_γ maan kantavuusvakiot jotka riippuvat maan kitkakulmasta

z_0 perustamissyvyys, m (vastaa painumaa)

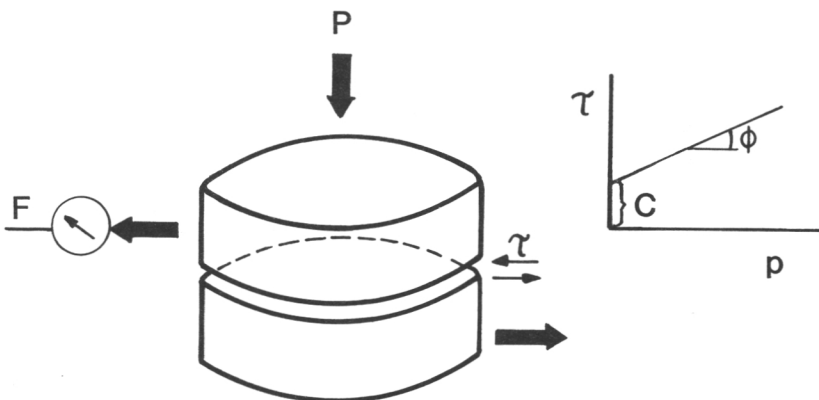
γ maan tiheys, kN/m^3

b kuormituspinnan leveys, m

Erityisesti Karafiath ja Nowatzki (1978) ovat kehittäneet plastisuusmenetelmään perustuvia laskentamentelmiä terramekaniikan tarpeisiin.

3.4. Maan leikkauslujuus

Maan leikkauslujuus (*Shear strength*, τ) on maan ominaisuus vastustaa sisäisiä muodonmuutoksia. Leikkauslujuus mitataan yksinkertaisesti rasiakokeella suorana leikkauksena (kuva 15). Kun pystykuormitus kasvaa, maarakeet puristuvat toisiaan vastaan ja leikkausvoima kasvaa. Leikkauslujuus kasvaa pystyjännityksen funktiona (3.3).



Kuva 15. Rasiakoe maan leikkauslujuuden mittaukseen.

$$\tau = C + p * \text{TAN}\phi \quad (3.3)$$

jossa

τ	on	leikkauslujuus, kN/m ² (kPa)
C		koheesio, kN/m ² (kPa)
p		kuormitus, kPa
ϕ		maan sisäinen kitkakulma, °

Mikäli koheesio on suuri ja sisäinen kitkakulma pieni, maa kuuluu koheesiomaalajeihin. Hienojakeiset maalajit, nimenomaan savet, ovat tyypillisiä koheesiomaalajeja. Kitkamaille ominaista on pieni koheesio mutta suuri sisäinen kitkakulma. Hiekkamaat ovat tyypillisiä kitkamaita. Kitkakulma kasvaa maarakeiden koon ja särmikkyuden kasvaessa. Maan koheesio yleensä alenee vesipitoisuuden aletessa. Kitkakulma on yleensä suurin optimikosteudessa. Kuivan hiekan leikkauslujuus voi olla hyvin alhainen. Taulukossa 3.4 annetaan esimerkkejä eri maalajien leikkauslujuuden komponenteista. Kitkamaan lujuus pääsääntöisesti paranee kulkukertojen mukaan, koheesiomaalla se heikentyy koheesio pienentyessä maan häiriintymisen myötä.

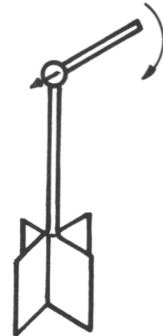
Maastoliikennöinnissä turve voidaan kuvata koheesiomaana, vaikka se käyttäytyykin kivennäismaista poiketen. Turpeen leikkauslujuutta in situ voidaan mitata siipikairalla (kuva 16). Siipikaira soveltuu myös saven ja lumen ominaisuuksien mittaamiseen. Turpeen leikkauslujuutta voidaan arvioida Amarjanin (1972) mallilla.

$$\tau = \frac{140}{w} * (100 - 1.1 * R) \quad (3.4)$$

$$\tau = \frac{140}{w} * (100 - 0.2 * H) \quad (3.5)$$

jossa

τ	on	turpeen leikkauslujuus, kN/m ²
w		turpeen kosteussuhde, %
R		maatumisprosentti, % ⁴
H		turpeen maatumisaste v. Postin asteikolla



Kuva 16. Siipikaira.

⁴ Pjavtsenkon menetelmällä mitattu turpeen maatuneisuus

Taulukko 3.4. Eri maalajien leikkauslujuuden komponenttien arvoja.

Maalaji	Kosteus	Koheesio	Kitkakulma	Tunkeuma- vastus
	MC, %	C, kPa	ϕ , °	CI, kPa
Löysä hiekka ¹⁾	4	2,0	22-24	N.A.
Hiekkapelto ¹⁾	5	0,0	30-33	N.A.
Savipitoinen pelto ¹⁾	18	19-21	29-38	N.A.
Riisipelto ²⁾	40	12,0	24,0	150
Riisipelto ²⁾	50	6,7	15,9	120

¹⁾ Komandi 1990²⁾ Salokhe ym. 1990

35. Cone Index ja tunkeumavastus

3.5.1. Tunkeumavastuksen mittaaminen

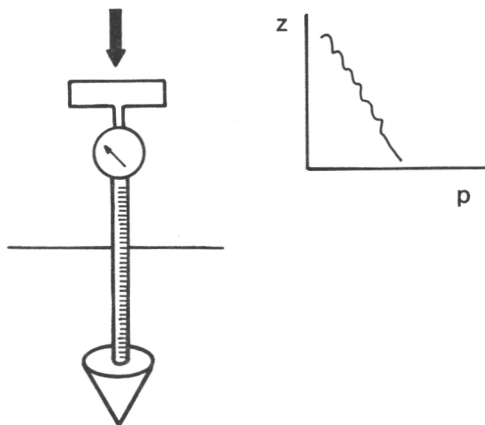
Cone Index -arvo on standardikärjellä ($A=0.5$ sq.in, kärkikulma 30°) varustetulla kartiopenetrometrillä, (kuva 17) mitattu tunkeutumavastus. Cone Index -menetelmää on kehitetty 1950-1960-luvulla Yhdysvalloissa WES'n⁵ toimesta, ja tunkeutumavastusta käytetään edelleen runsaasti maaperän kulkukelpoisuutta osoittavana parametrimana. Vanhemmassa kirjallisuudessa CI-arvo ilmoitetaan lb/sq.in⁶ ja myöhemmissä raporteissa SI-yksiköin, kPa tai MPa, joskus myös bar'eina. Selvytyden vuoksi pyritään yleensä käyttämään nimitystä tunkeumavastus CI-arvosta, jos se ilmaistaan SI-järjestelmän yksiköissä (kPa tai MPa).

Taulukko 3.5. CI-arvojen ja kulkukelpoisuuden välinen riippuvuus turvemaalla (Murfit ym. 1975).

CI-arvo, lb/sq.in	Tunkeuma- vastus, kPa	Kulkukelpoisuuden kuvaus
0 - 3	0 - 21	Juoksuraja, käytännössä ei kantava
6 - 9	41 - 62	Käveleminen vaikeaa
15 - 24	103 - 165	Erikoistela-ajoneuvo (WEASEL), 50 ajokertaa
27 - 33	186 - 228	D4 telatraktori, 50 ajokertaa
40 - 51	276 - 352	D7 telatraktori, 50 ajokertaa
54 - 72	372 - 497	Maansiirtoauto, 5 t kuorma-auto, 50 ajokertaa
75 - 96	517 - 662	Raskaat maansiirtokoneet
99 - 135	683 - 935	Henkilöautot
150 -	1034 -	Ei ongelmia

⁵ US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Mississippi⁶ 1 lb/sq.in = 6.897 kPa

Tunkeumavastus riippuu sekä maan leikkauslujuudesta että kokoonpuristuvuudesta ja on verraten luotettavasti mitattavissa puhtailla kitka- tai koheesiomailla. Moreenimailla CI-arvon mittaaminen esim. kivisyydestä johtuen on hankalaa, eikä CI-arvoon perustuvien laskentamenetelmien katsota soveltuvan moreenimaille. Haarlaan (1972) empiirisissä kokeissa ei CI-arvon ja koneiden liikkumiskyvyn välillä ollut riippuvuutta. Koska CI-mittauksiin perustuvia menetelmiä käsittelevä kirjallisuus on laajaa, menetelmä soveltuu joihinkin suomalaisiin olosuhteisiin (esim. savikoille) ja on usein sovellettavissa metsäteknologisiin tutkimuksiin; esim. kehitysmaissa menetelmän peruspiirteet kannattaa omaksua.



Kuva 17. Kartiopenetrometri.

Taulukossa 3.5 annetaan CI-arvojen ja kulkukelpoisuuden välinen riippuvuus lähinnä turvemaille ja tela-ajoneuvoille. Kivennäismailla arvot ovat hieman alhaisemmat. 4x4 maastoautolla voidaan liikkua, jos CI-arvo on yli 40 (275 kPa). Raskas pyörätraktori vaatii vähintään 45 CI-arvon (310 kPa) ja henkilöauto 75 CI (520 kPa).

3.5.2 Hiekka-hiesumaat

Tunkeumavastus on riippuvainen maaperän kosteudesta ja hienon lajitteen osuudesta. Hinzen (1990) tutkimusten perusteella CI-arvon ja kosteussuhteen (MC) välinen riippuvuus on erilaisilla maalajeilla seuraava:

Hiekkainen siltti	Kosteusalue	
$CI = 2872 - 61 * MC$	$MC = 14 - 40 \%$	(3.6)

Hiekkainen siltti		
$CI = 2520 - 53 * MC$	$MC = 14 - 40 \%$	(3.7)

Silttinen hiekka		
$CI = 1720 - 22.6 * MC$	$MC = 18 - 26 \%$	(3.8)

3.5.3. Turvemaat

Raakaturpeen leikkauslujuus on suuri johtuen kuitujen vetolujuudesta, mutta tunkeumavastus ja kantavuus ovat alhaiset johtuen turpeen alhaisesta kuivatiheydestä. Tunkeumavastus kasvaa maatumisasteen noustessa, koska tällöin myös turpeen kosteus yleensä laskee ja kuivatiheys on korkeampi. Turpeen CI-arvo voidaan arvioida kosteussuhteen ja maatuneisuuden perusteella (Amarjan 1972)

$$q = \frac{2500}{w} * (100 - 1.4 * R) \quad (3.9)$$

$$CI = \frac{363}{w} * (100 - 7.7 * H)^7 \quad (3.10)$$

jossa

q on	tunkeumavastus, kN/m ²
CI	cone-index arvo, lb/sq.in
w	turpeen kosteussuhde, %
R	maatumisprosentti, %
H	v. Postin maatumisaste

3.5.4. Moreenimaat

Suomalaista moreenimaata varten menetelmää voitaisiin kehittää olettamalla maa koostuneeksi juurista, kivistä ja hienojakoisesta maa-aineksesta. Tällöin penetrometrilukemasta täytyisi erikseen laskea kivisyysindeksi, juurikerroksen lujuus ja varsinaisen maa-aineksen lujuus. Toistaiseksi mittauksia ei ole tehty eikä menetelmää kehitetty.

3.6. Bevametri

Bevametri on Bekkerin (1960) kehittämä maan ominaisuuksien mittauslaite, jolla mitataan maan kantavuutta ja leikkauslujuutta. Yleensä maan kantavuuden ajatellaan riippuvan vain pintapaineesta mutta se riippuu myös kuormituspinnan muodosta ja jäykkyydestä. Puhtailla koheesiomailla painuma on riippuvainen pintapaineesta, mutta kitkamailla painuma on pintapaineen ja renkaan leveyden funktio. Maan kantavuutta mitataan tämän vuoksi levykuormituskokeella, jossa käytetään vähintään kahta eri läpimittaisia kuormituslevyjä (kuva 18). Bekker olettaa kuormitus/painumafunktion olevan muotoa

$$p = k * z^n \quad (3.11)$$

jossa

⁷ Malli saatu sijoittamalla malliin (3.9) $CI = q/6.98$ ja $H = R/5.5$ (Saarilahti 1982 liite 5)

p on	kuormitus, kPa
k	maavakio
z	painuma, m
n	painumavakio

Kuormitus/painumafunktio on yleensä käyräviivainen (kuva 19), joten se on ensin linearisoitava logaritimuunnoksella (kuva 20). PainumaekspONENTTI voidaan laskea regressioanalyysillä⁸ molemmille levykoille erikseen. Koska käytännön mittauksissa tulee aina hajontaa, niin painumaekspONENTiksi otetaan keskiarvo. Samasta analyysistä saadaan myös arvo $\ln(k)$ ja siitä antilogaritmillalla ratkaistaan k .

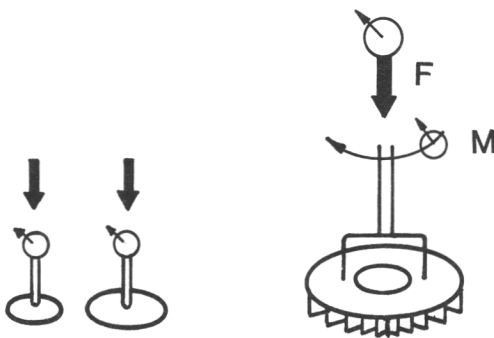
$$\ln(p) = \ln(k) + n \cdot \ln(z) \quad (3.12)$$

Bekker (1960) olettaa lisäksi, että muodonmuutosmoduuli k riippuu sekä maan koheesio- että kitkakomponentista. Koheesio- ja kitkakomponentti on levyn halkaisijasta riippuvainen seuraavan mallin (3.13) mukaisesti.

$$k = \frac{b}{k_c} + k_\phi \quad (3.13)$$

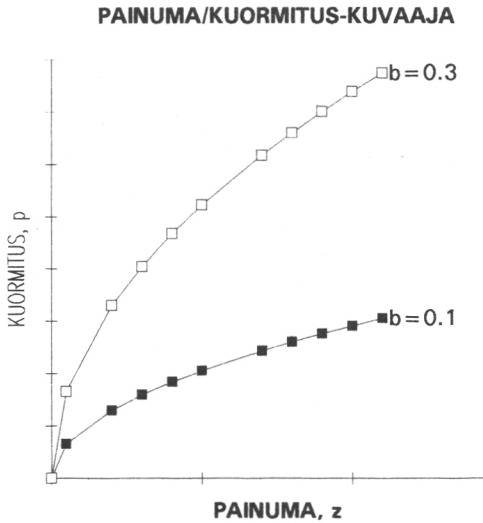
jossa

k on	maan muodonmuutosmoduuli (<i>Bernsteinin vakio</i>)
b	kuormituspinnan säde tai lyhempi sivu, m
k_c	muodonmuutosmoduulin koheesio-osa
k_ϕ	muodonmuutosmoduulin kitkaosa

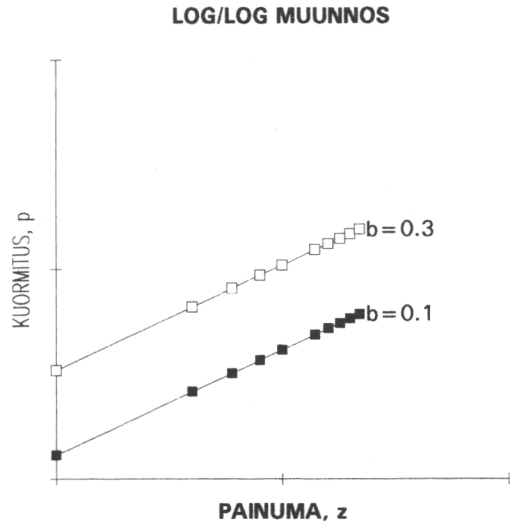


Kuva 18. Bevametrin periaate.

⁸ Wong (1989 s. 33) varoittaa regressioanalyysin käytöstä, koska logaritimuunnoksen vuoksi mallista tulee harhainen. Tarkempia tieteellisiä analyyseja varten kannattaa siirtyä Wongin menetelmään. Käytännön tarkkuuteen riittänee yksinkertainen regressioanalyysin käyttö



Kuva 19. Kuormitus/painumakuvaaja kahdella eri levykoolla.



Kuva 20. Kuormitus/painuma logaritmiasteikolla.

Jos merkitään levy 1:n mittaussarjaa alaviitalla 1 ja 2:n sarjaa alaviitalla 2 saadaan kahden yhtälön sarja, josta maavakiot voidaan laskea. Kuvasta 2 nähdään, että koheesiokomponentti on kuvaajan y-akselin leikkauspiste ja kulmakerroin kuvaa kitka-komponenttia.

$$k_1 = \frac{b_1}{k_{c1}} + k_{\phi 1} \quad (3.14)$$

$$k_2 = \frac{b_2}{k_{c2}} + k_{\phi 2} \quad (3.15)$$

Kun levyjen läpimitat tunnetaan yhtälöparista, voidaan ratkaista maavakioiden arvot.

$$k_c = b_1 * b_2 * \frac{k_1 - k_2}{b_2 - b_1} \quad (3.16)$$

$$k_{\phi} = k_1 - b_2 * \frac{k_1 - k_2}{b_2 - b_1} \quad (3.17)$$

Maavakiota käytetään pyörän painuman (kellunnan, *flotation*) laskemiseen. Suomessa ei ole bevametriä käytetty eikä mitattuja maavakioita ole saatavilla. Ensimmäinen Suomessa konstruoitu bevametri otetaan käyttöön vuoden 1991 aikana.

Toinen osa bevametrimittauksista koostuu maan leikkausjännitys/siirtymämittauksista. Laite koostuu kuormitettavasta vaakatasossa pyöritettävästä rivallisesta teräsrenkaasta, jonka pyörähdykskulmaa ja momenttia mitataan (kuva 18). Kuvassa esitetään myös tyypillinen leikkausjännitys/siirtymäkuvaaja koheesio- ja kitkamaalle. Koheesiomaille on tyypillistä jännityshuippu, jota seuraa alhaisempi häiriintyneen leikkauslujuuden arvo (kuva 21). Tiiviillä kitkamaalla jännityshuippu on matalampi. Löyhillä kitkamailla ja märillä koheesiomaille leikkauslujuus lähestyy asymptoottisesti huippuarvoaan.

Leikkausjännitys/siirtymäfunktion mallittaminen on verraten hankala sen monimuotoisuuden vuoksi. Bekker sovelsi vaimenevan värähtelyn mallia sovittaakseen erikokoisesti koheesiomaalajeilla tavattavan leikkauslujuusmaksimihuipun malliin. Tällöin päädytään kuitenkin verraten monitekijäiseen malliin. Mikäli tyydytään jäännöslujuuteen, malli yksinkertaistuu seuraavaksi malliksi (Janosi & Hanamoto 1961):

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = 1 - \exp^{-(j/K)} \quad (3.18)$$

jossa

- τ on leikkauslujuus, kPa
- τ_{\max} leikkauslujuuden maksimiarvo, kPa
- j siirtymä, m
- K jännitysvakio

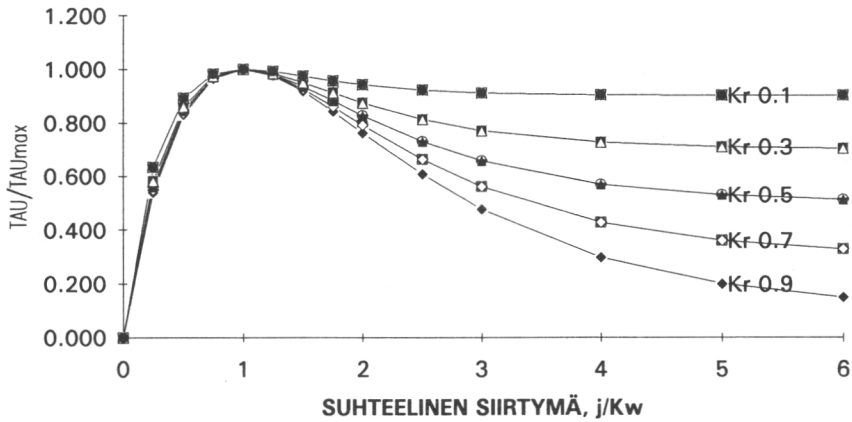
Bekkerin yhtälöä on matemaattisesti sieventänyt Oida (1979) ja hänen mallinsa soveltuu ehkä parhaiten tutkimuskäyttöön. Vakiot K_r ja K_w etsitään kokeellisesti sovittamalla mittaustulokset mahdollisimman hyvin mallin (3.19) muotoon.

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = K_r * \left(1 - \frac{\sqrt{1-K_r} * \left[1 + \frac{\sqrt{1-K_r}-1}{K_r} \right]^{j/K_r}}{\sqrt{1-K_r} * \left(1 - \frac{2}{K_r} \right) + \frac{2}{K_r} - 2} \right) * \left(1 - \left[1 + \frac{\sqrt{1-K_r}-1}{K_r} \right]^{j/K_w} \right) \quad (3.19)$$

jossa

- τ on leikkausjännitys, kPa
- τ_{\max} leikkauslujuusmaksimi, kPa
- K_r maavakio, jäännösleikkauslujuuden ja leikkauslujuusmaksimin suhde
- j jännityssiirtymä, m
- K_w maavakio, jännityssiirtymä leikkauslujuusmaksimissa

Kuvassa 21 havainnollistetaan Oida'n (1979) mallin muoto erilaisilla jäännösleikkauslujuussuhteilla. Vaaka-akselilla on suhteellinen siirtymä, jolloin maksimileikkauslujuus saavutetaan siirtymällä 1. Huipun jälkeen leikkauslujuus alenee jäännöslujuudeksi.



Kuva 21. Koheesiomaan leikkauslujuus.

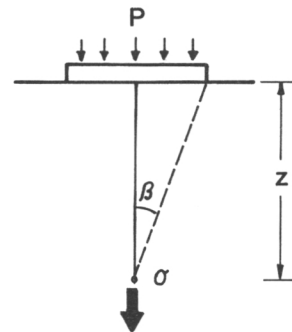
3.7. Paineen jakautuminen maaperässä

Kulkukelpoisuusanalyysissä ja maapohjan tiivistymistä (*Soil Compaction*) analysoitaessa on tunnettava myös mekanismi kuinka pyöräkuorma (pyörän kosketuspaine) vaikuttaa syvempiin maakerroksiin. Pystyjännitys ympyränmuotoisen laatan keskipisteen alapuolella eri syvyyksissä voidaan laskea mallilla (3.20) (Helenelund 1974) (kuva 22).

$$\sigma_z = p \cdot (1 - \cos^n \beta) \quad (3.20)$$

jossa

- σ_z on normaalijännitys syvyydellä z , kPa
- p kosketuspaine, kPa
- n - paineenkeskityskerroin (yleensä 3 - 4)
- β syvyydestä z johtuva kulma, °



Kuva 22. Ympyränmuotoisen laatan keskipisteen alapuolella vaikuttava jännitys.

Voidaan todeta, että pystyjännitys laskee nopeasti syvyyden kasvaessa ja on pudonnut kolmasosaan kuormituspinnan leveyttä vastaavassa syvyydessä. Maastoliikennöintiä varten maan pintaosien analysointi on siten hyvin tärkeä.

Eräänä vaikeutena maastoliikennetutkimuksissa on maan kerroksellisuus. Ideaalimaalajit ja suuri osa kerrostuneista maalajeista ovat syvyysuunnassa verraten homogeenisia ja tästä syystä niiden parametrit voidaan kuvata yhdellä tai muutamalla muuttujalla, kuten keskimääräinen leikkauslujuus tai CI-arvo⁹. Suomalainen maasto, varsinkin metsämaa, on kerroksellista ja tästä syystä maaperän kuvaamisessa tulisi siirtyä kerrosmalleihin, jotka kuitenkin ovat vaikeampia hallita. Peruseriaatteina kerrosmalleista voidaan esittää

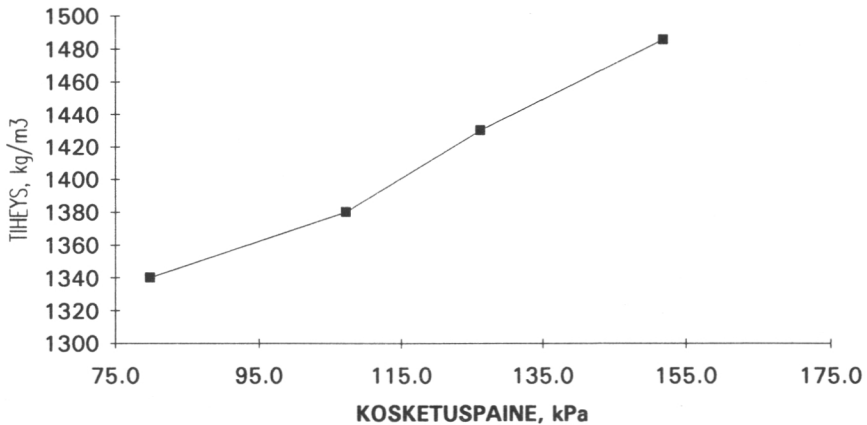
- koska paineen jakautuminen on riippuvainen kuormituspinnan leveydestä (tai kuormituslevyn säteestä) eri levyisten renkaiden vastaavat kerrokset ovat eri syvyydellä. Jos renkaan leveys kaksinkertaistuu, niin kriittisten kerrosten syvyyskin kaksinkertaistuu.
- mikäli kerrosten lujuus alenee alempia kerroksia kohti, saman pintapaineisista renkaista kapeilla renkailla on parempi suorituskyky
- mikäli kerrosten lujuus lisääntyy syvempiä kerroksia kohti, niin pintapaineen lisääminen voi lisätä pyörän suorituskykyä ja leveämmän renkaan valinnalla voidaan kuormakokoa kasvattaa

3.8. Maan tiivistyminen

Maan tiivistyminen (*Soil Compaction*) on maan tilavuuden pienenemistä maahiukasten siirtyessä tiiviimmin toistensa lomiin. Koska maan kantavuus riippuu tiiviydestä tienrakennustekniikassa, tutkitaan erityisesti, miten maata voidaan tiivistää. Terramekaniikassa tavoite on usein päinvastainen, eli miten välttää maan tiivistyminen pyöräkuormien alla.

Maan tiivistymisaste riippuu pääasiassa maan alkuperäisestä tiiviydestä ja pyöräkuormasta, sillä maan kantavuus mobilisoituu sen tiivistymisestä. Tiivistymistä voidaan kuvata huokostilavuuden e tai tiheyden muutoksella. Kuvassa 23 esitetään kuormituksen ja maan tiheyden välinen riippuvuus löyhässä hiesumaassa. Maan tiivistymistä tarkastellaan lähemmin luvussa 11.2. maastoliikennöinnin ekologian yhteydessä.

⁹ Maastoliikkuvuutta on myös laajasti tutkittu maataloudessa ja muokattu peltomaata on myös verraten lähellä ideaalimaata



Kuva 23. Maan tiheyden ja kosketuspaineen välinen riippuvuus löyhässä hiesumaassa Schwanghartin (1990) mukaan.

4. Lumi

4.1. Lumen ominaisuuksien mittaaminen

Lumi on ominaisuuksiltaan erittäin vaikea aine kuvata ja mallittaa, koska lumen rakenne muuttuu jatkuvasti. Lumi tiivistyy ja kovettuu vanhetessaan tai paineen alaisena ja tiivistynyt lumi on ominaisuuksiltaan täysin erilaista kuin uusi lumi. Lumen tiivistymisominaisuudet ovat tärkeitä tuntea talviteitä rakennettaessa, kun sen sijaan tuoreen lumen ominaisuudet ovat metsäkoneiden kulkemisen kannalta oleelliset.

Lumen tiheys kuvaa verraten hyvin lumen kantavuutta ja lumivastusta. Lumen tiheyttä mitataan lumivaa'alla. Lumesta otetaan tilavuustarkka näyte vaa'an sylinteriin, joka punnitaan. Nykyisin kehitteillä on radiosondi, jolla lumen tiheys voidaan helposti mitata (Ala-Ilomäki ym. 1989). Lumen tiheyksiä annetaan taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Lumen tiheyksiä.

Lumen laatu	Tiheys, kg/m ³
Löyhä uusi pakkaslumi	< 100
Alkutilven lumi, keskimäärin	150 - 200
Lopputilven lumi, keskimäärin	250 - 300

Lumen rakenne voidaan kuvata sanallisesti (jauhomainen, ryynimäinen, karkearakeinen) tai mittaamalla lumikiteiden kokoa. Yleensä uusi lumi on jauhomaista, mutta lumikiteet suurenevät vesihöyryn kulkiessa lumessa ja kevät lumi on yleensä karkearakeista. Lumipartikkeleiden muoto, raekoko ja raekokojakauma vaikuttavat suuresti lumen ominaisuuksiin, varsinkin osasten keskinäiseen sitoutumiseen.

Lumi sisältää aina myös jäätyvätöntä vettä, vesihöyryä, ja lumen kosteus vaihtelee. Koska lumen lämpötila sisäosissa on yleensä korkeampi kuin ilman (paitsi suojalla), lumi kovettuu polanteeksi, kun kosteammat kerrokset sekoitetaan kuivempaan ja kylmempään pintalumeen niitä vielä tiivistäen. Lumen vapaavesipitoisuutta mitataan harvoin työläytensä vuoksi (kalorimetrimenetelmä tai dilatometrimenetelmä). Vesipitoisuuden mittaukseen on kehitteillä mikroaaltosondi ja IR-sondi, jolla voidaan mitata myös lumen keskimääräinen raekoko.

Lumen leikkauslujuus voidaan mitata pienoissiipikairalla ja leikkauslujuutta voidaan käyttää kuvaamaan lumen lujuutta. Leikkauslujuus ja tiheys ovat selvästi korreloituneita. Itserekisteröivällä penetrometrillä voidaan myös analysoida muutoksia lumikerroksen lujuudessa.

Lumen kokoonpuristuvuutta ja leikkauslujuutta voidaan tutkia bevametrillä. Lumen kuormitus/painumakuvaaja on sahamainen, paksu lumikerros ensin tiivistyy kunnes kantaa erään kuormituksen. Jos kuormitusta lisätään, niin kerros lysähtää, kunnes saavutetaan uusi tasapainotila ja näin kuvaajasta tulee sahamainen. Laskelmissa voidaan käyttää tasoitettua kuvaajan muotoa. Mikäli lumen pohjavaikutus (lumi tiivistyy maanpintaa vastaan) halutaan malliin mukaan, tulee lumen kuormituslevyn ja renkaan kosketusalan olla suurinpiirtein samaa luokkaa.

4.2. Lumivastus

Talviliikennöinnissä voidaan erottaa kaksi pyörä/maa tilannetta

- lumesta vetävä ja
- lumen läpi kaivautuva.

Lumesta vetävässä vetolaitteessa lumi tiivistyy renkaan/telan alla ja kehittää riittävän kantavuuden ja tartunnan. Lumen läpi kaivautuvassa vetolaitteessa kantavuus ja veto kehittyvät pohjamaasta. Tavallaan välimuoto on tilanne, jossa lumen pohjavaikutus on tuntuva, lumi puristuu vetolaitteen ja maan väliin. Metsätraktorit ovat suurelta osin lumen läpi kaivautuvia eli kehittävät tartunnan pohjamaasta ja liikkuvat lunta syrjäyttäen ja tiivistäen. Lumikelkat ovat tyyppillisiä lumesta vetäviä laitteita, jotka liikkuvat lunta tiivistäen.

Käytännössä ilmarenkaalla teknisen liikkumiskyvyn rajana voidaan pitää lumikerroksen paksuutta, joka on 30% renkaan läpimitasta. (Nuttall & McGowan 1962). Puoliteloilta ja lumiketjuilla tartuntaa maapohjasta voidaan parantaa, joten lumikerros voi olla paksempi. Metsätraktorilla raja on yli 50 % renkaan läpimitasta.

Metsätraktorilla lumivastus on noin 40-65 kW/m lumikerroksen paksuutta (taulukko 4.2). Vastus on kuitenkin riippuvainen pyörien koosta ja koneen rakenteesta. Arvoa voidaan jonkin verran lisätä, jos lumen tiheys on suuri ja/tai lumi sisältää jääkerroksia. Kuivassa löyhässä lumessa pienempi arvo voi olla paikallaan. Metsäkoneen nopeus voidaan laskea mallilla

$$v = \frac{P - P_s * h}{(W+L)*(\mu_r + S/100)} \quad (4.1)$$

jossa

v on	koneen nopeus, m/s
P	koneen pyörateho, kW
P _s	lumivastusteho, kW/m
h	lumikerroksen paksuus, m
W	koneen paino, kN
L	kuorman paino, kN
μ _r	vierintävastukerroin
S	rinnekaltevuus, %

Lumivastusmalli 4.3 on laskettu testituloksista, jossa konetta on seurattu lyhyen ajan suoralla rinneosuudella. Kun lumivastus laskettiin Sirén ym. (1987) tutkimuksen todellisista metsäkuljetusolosuhteista, vierintävastukseksi saatiin 0.24 ja vastaavasti lumivastukseksi tuli alhaisempi arvo, malli (4.2). Lumivastus riippui myös rinteiden kaltevuudesta johtuen todennäköisesti suurenevasta luistosta.

$$P_s = 35 * \left(1 + \frac{S}{100}\right) \quad (4.2)$$

jossa

P _s on	lumivastus, kW/m
S	rinnekaltevuus, %

Traktori pystyy kulkemaan kaivautuen lumessa vain, jos sen maavara ja massa ovat riittävän suuret, jottei kone jää kannatukselle lumeen, vaan pyörät todella saavat kehitettyä tarvittavan tartunnan maapohjasta. Tällöin se pystyy nousemaan myös rinnettä. Lumesta vetävän koneen on vaikea kehittää riittävää vetokitkaa lumesta, ja siksi niiden mäennousukyky on huono.

Taulukko 4.2. Talviajotesteistä laskettu lumivastus, vierintävastus ja suhteellinen eteneminen.

Konemerkki	Lähde	Lumivas- tus,kW/m	Vierintävas- tuserroin	Suhteellinen eteneminen ¹⁰
Kockums 84-35 etuteloilla	1	64 - 70	0,09	86 - 110
Kockums 84-35 6 pyöräinen	1	69 - 74	0,07	65 - 111
Lokomo 919 T 8 pyöräinen	1	63 - 64	0,07	115 - 136
Lokomo 919 T 6 pyöräinen	1	65 - 71	0,07	79 - 123
Ponsse S 15	1	54 - 54	0,08	203 - 326
Valmet Jehu	1	62 - 69	0,07	77 - 138
Volvo BM Valmet 862	1	55 - 56	0,08	193 - 361
ÖSA 250	1	67 - 79	0,09	52 - 88
Kockums 83-35	1	53 - 59	0,07	192 -
Norcar HTP-480	1	54 - 58	0,10	
Ford County 6	2	49 - 53	0,15	
Ford Brunett 5000	2	37 - 37	0,15	
MF-Robur	2	35 - 37	0,15	
BM-Boxer T-350	2	34 - 35	0,15	
BM Volvo SM 660	2	32 - 38	0,10	
Fiskars 510	2	28 - 30	0,15	
Clark Ranger 666	2	60 - 67	0,15	
Timberjack 230 C	2	57 - 58	0,15	

Lähde 1: Laskettu Sirén ym. (1987) tuloksista

Lähde 2: Laskettu Silvennoinen & Haarlaa (1971) tuloksista

5. Tartunta ja luisto

5.1. Luisto

Luisto (*Slip*, S) määritellään akselin ja pyörän kehäpisteen kulkemien matkojen suhteeksi. Luisto aiheutuu maapohjan ja renkaan jännitysten aiheuttamista siirtymistä. Luisto on aina 0 ja 1 välillä. 0 luistolla ei tartunta ole vielä kehittynyt, 1 luistolla pyörä sutii tyhjää. Luisto on riippuvainen sekä tartunnasta että kulkuvastuksesta. Jos kulkuvastus suurenee, on luiston lisääntyttävä, jotta tarpeellinen tartunta voisi kehittyä. Jos tartuntakerroin on pieni, luisto tulee suureksi samasta syystä.

$$S = 1 - \frac{d_a}{d_c} \quad (5.1)$$

jossa

$$^{10} \text{ Verrattuna malliin } v = \frac{P - 63 \cdot h}{(0.1 + \frac{S}{100}) \cdot (W + L)} \quad (4.3)$$

- S on luisto
 d_a pyörän keskipisteen kulkema matka, m
 d_c pyörän kehäpisteen pyörähtämä matka, m

WES-mallissa laskelmat perustuvat 20% luistoon, ja 0,2 luistoa voidaan pitää normaaliarvona. Tiellä ja kantavalla alustalla, jossa tartuntakerroin on korkea, voi luisto olla $< 0,1$. Normaaaleissa metsäkuljetuksissa luisto ollee 0,10-0,15 luokkaa. Upottavilla osuuksilla voidaan käyttää arvoja 0,20-0,25. Liejuisissa olosuhteissa luistoksi kehittyvä 0,3-0,5. Jos tartuntakerroin on alhainen ja kulkuvastuskerroin suuri, luisto voi kasvaa 0,4-0,5 tasolle. Ylämäissä luisto on suurempi kuin tasaisella ja alamäissä ja jarruttaessa luisto on negatiivinen. Metsämaastossa kivennäismaalla mitattuja luistokertoimia annetaan taulukossa 5.1. Turvemailla Ala-Ilomäki & Högnäs (1987) mittasivat 10-15% luistoja tyhjälle ja 12,5-20% luistoja kuormatulle Ponsse S15 kuorma-traktorille. Vilkkö (1986) mittasi samalle koneelle 10-20% luiston normaalirenkailla mutta vain 6-12% luiston ylläveillä renkailla. Luisto siis lisääntyy painuman ja vierintävastuksen kasvaessa.

5.2. Tartunta

Tartunta (*Thrust*, T), vetokitka on voima, joka kehittyy pyörän ja maanpinnan kosketuspintojen välille renkaan pyörimismomentin kasvaessa. Se riippuu pääasiassa maapohjan leikkauslujuudesta. Tartuntaa voidaan tarkastella olettamalla pyörän kosketuspinta jäykäksi laataksi. Tällöin saadaan

$$T = A \cdot C + W \cdot \tan \phi \quad (5.2)$$

$$\mu_T = \frac{A}{W} \cdot C + \tan \phi \quad (5.3)$$

jossa

- T on renkaan tartunta, N
 μ_T tartuntakerroin
A renkaan kosketuspinta-ala, m²
C maan koheesio, kPa
W rengaskuorma, N
 ϕ maan sisäinen kitkakulma

Taulukko 5.1. Frønsdal'in (1985) kivennäismaalla mitattavia luistoprosentteja.

Kone	Rinnekaltevuus, %					
	-20		0		+20	
	Estekorkeus, m					
	<0,30	>0,70	<0,30	>0,70	<0,30	>0,70
Luisto, %						
John Deere 2140 ¹⁾	5	8	12	22	24	40
Mini Bruunett ²⁾		4	4	12	12	24
Kockum 821 ³⁾	1	3	10	14	22	28
Volvo BM 400 ⁴⁾	8	16	20	32	32	42
Variotrac 912 ⁵⁾		20	4	34	12	42
Krabat 232 ⁶⁾	8	16	16	24	24	38

¹⁾ 4W Maataloustraktori²⁾ Forwarder³⁾ Skidder⁴⁾ 1/2-tela maataloustraktori⁵⁾ Pienoistelakone⁶⁾ Telatraktori

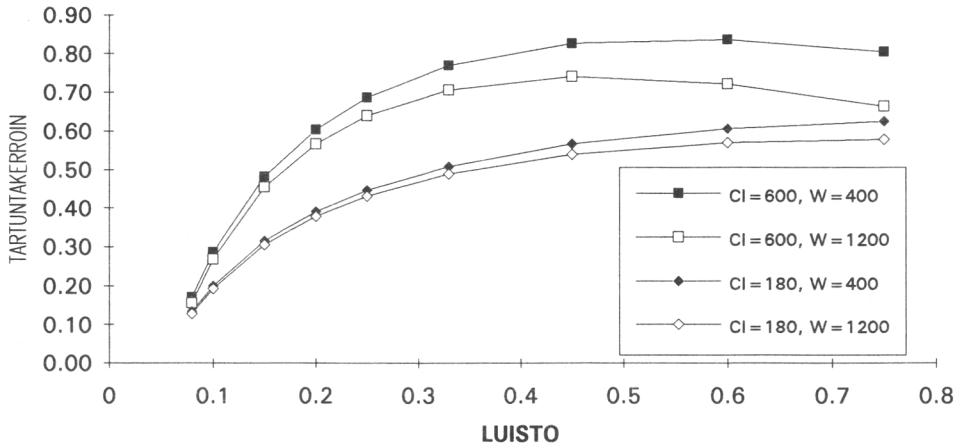
Mikäli maan leikkauslujuus tunnetaan mallilla (5.2), voidaan laskea estimaatti maksimivoimalle, jonka rengas voi kehittää kuljettaakseen pyörää eteenpäin. Mallilla (5.4) voidaan määrittää tartunta eri luistoilla. Koska leikkauslujuus on riippuvainen siirtymästä, niin tartuntakerroin on riippuvainen pyörän luistosta. Kitkamailla leikkauslujuus lähenee assymptoottisesti maksimiarvoaan siirtymän funktiona. Koheesiomailla esiintyy maksimiarvo, mutta yleensä laskelmat kannattaa perustaa jäännöslujuuteen. Tällöin kone voi ensimmäisellä kerralla tai pienellä luistolla kehittää suuremmankin tartunnan.

Tartunta luiston funktiona voidaan kuvata seuraavalla mallilla (Janosi & Hanamoto (1961):

$$T = (A \cdot C + W \cdot \tan \phi) \cdot (1 - \exp(-S/k)) \quad (5.4)$$

jossa

T on	renkaan tartunta, N
A	renkaan kosketuspinta-ala, m ²
C	maan koheesio, kPa
W	rengaskuorma, N
ϕ	maan sisäinen kitkakulma
S	luisto
k	maan lujuusparametri



Kuva 24. Tartuntakerroin eri luistoilla turvealustalla.

Kuvassa 24 esitetään tartuntakerroin luiston funktiona verraten kantavalla (CI=600-800) ja huonostikantavalla (CI=180) turvepellolla kahdella eri kuormalla.

Metsämaastossa tartunta muodostuu maapohjasta ja siinä olevista juurista ja hakkuutahteista. Erikoisesti juurien vetolujuus on suuri, joten tartunta riippuu olennaisesti kasvipeitteen laadusta. Riittävän kattavaa mallia tartunnan arvioimiseksi ei vielä ole kehitetty, joten empiiriset tartunnan mittaukset ovat tarpeen.

Käytännössä tartunta ilmoitetaan yleensä tartuntakertoimen μ_T , joka määritellään

$$\mu_T = \frac{T}{W} \quad (5.5)$$

jossa

μ_T on tartuntakerroin
 T tartuntavoima, N
 W pyöräkuorma, N

Yleisesti tartuntakerroin ilmoitetaan joko 20% luistolla tai maksimiarvona, jolloin luisto on 40-60%. Tartuntakerroin on riippuvainen sekä alustan että renkaan ominaisuuksista. Yleensä tartunta pienenee koheesiomailla vesipitoisuuden kasvaessa. Kitkamailla tartunta on suurin lähellä optimikosteutta.

Mallin (5.3) perusteella voidaan päätellä, että koheesiomailla tartuntakerroin pienenee, jos suhde A/W pienenee eli pintapaine kasvaa. Puhtailta kitkamailla tartuntakerroin on riippumaton kuormituksesta ja tartuntakerroin on $\tan\phi$. Koska suurin osa maalajeista sisältää sekä kitka- että koheesiokomponentin ja koska A/W suhde pienenee kuormituksen kasvaessa, niin tartuntakerroin yleensä pienenee

kuormituksen kasvaessa (esim. kuva 24). Metsäkoneiden pintapaineen vaihtelualue on verraten suppea, joten μ_T voidaan katsoa melko vakioksi samalle renkaalle ja rengaspaineelle kuormasta riippumatta.

Renkaan kuvionti vaikuttaa tartuntakertoimeen. Rivat lisäävät tartuntaa, käytännössä rivoitetun/sileän renkaan tartuntojen suhde on 1,25 - 1,4. Ripojen vaikutus on pieni kuivilla kitkamailla (suhde 1 - 1,1). Metsämaalla ripojen vaikutus on suurin, sillä rivat kehittävät lisätartuntaa maaston esteistä, pikkukivistä ja erikoisesti juurista. Pyörän päälle asennetut kitkaketjut lisäävät myös tartuntaa. Maan leikkauslujuuteen perustuvat tartunnan arviot antavat aliarvion metsämaalle, jossa osa tartunnasta johtuu juuriston suuresta vetolujuudesta. Humusmaan leikkauslujuushan on alhaisesta tiheydestä johtuen huono. Rivat auttavat pyörää painumaan pitävämpään pohjakerrokseen.

Juuriston vaikutusta voidaan arvioida Wästerlundin (1990) mittausten pohjalta (taulukko 5.2). Eri lähteistä kerättyjä tartuntakertoimen arvoja annetaan taulukossa 5.3 ja liitteessä 4.

Taulukko 5.2. Maksimitartunta juuristoa sisältävässä metsämaassa (Wästerlund 1990).

Maalaji	Harva	Juuristo	Tiheä
	Juuriston poikkipinta-ala mm ² /kosketusala		
	20	200	600
	Maksimitartunta, kPa		
Hiekkamoreeni		360	
Hiesumoreeni	160	250	330

5.3. Nettovetokyky

Nettovetokyky (*Net Thrust*) voidaan määrittää tartunnan ja vierintävastuksen erotuksena

$$T_n = T - RR \quad (5.6)$$

Nettovetokyky on paras pyörän liikkumiskyvyn indikaattori, ja sen avulla voidaan laatia hyvinkin tarkkoja kulkukelpoisuusmalleja. Valitettavasti nettovetokyvyn määrittäminen on yhtä vaikea kuin sen komponenttienkin. Nettovetokyky on käytettävissä kiihdyttämään koneen massa tai voittamaan rinnevästus.

Taulukko 5.3. Tartuntakertoimia eri maalajeille.

Maalaji	Lähde	Kosteussuhde, %	Tartuntakerroin
Hiekkamaa	1)	22 - 27	0,57
Peltomaa	1)	32	0,45
Turvelto	1)	220	0,55
Metsä, hiekkamoreeni, MT	1)	28 - 47	0,80
Metsä, hiesumoreeni, OMT	1)	20 - 35	0,61
Turvelto, CI = 700	2)		0,70
Turvelto, CI = 270	2)		0,48
Asfaltti	2)		0,90
Löysä hiekka	3)	4	0,40 - 0,45
Tiiviihkö hiesusavi	3)	15 - 20	0,55 - 0,79
Savi, kuiva	4)		0,55
Savi, märkä	4)		0,45
Hiesu, kuiva	4)		0,35
Hiesu, märkä	4)		0,20

1) Ruotsi (Wästerlund 1990)

2) Suomi (Ala-Ilomäki & Saarilahti 1990)

3) Unkari (Komandi 1990)

4) Ranska (Ragot 1976)

6. Painuma

6.1. Painuma staattisessa kuormituksessa

Painuma (*Sinkage*, z) on koneen liikettä vastustavan voiman, vierintävastuksen, pääasiallinen aiheuttaja. Painuman suuruus taas riippuu maaperän ominaisuuksista vastustaa kuormitusta. Yksinkertaisimmillaan kuormituksen ja painuman riippuvuus voidaan kuvata Bekkerin (1960) esittämällä mallilla:

$$p = k \cdot z^n \quad (6.1)$$

jossa

- p on kuormitus, kPa
- k maan muodonmuutosmoduuli
- z painuma, m
- n painumaekspONENTTI

Mikäli painumaekspONENTTI $n=1$, painuma on lineaarisesti riippuvainen kuormituksesta. Jos $n > 1$, niin pyörän painuma suurilla kuormituksilla on suhteellisesti pienempi, ja maa on hyvin kantava. Tilanne on yleinen, jos maan pinnalla on huonostikantavampi kerros. Jos $n < 1$, niin painuma suurilla kuormituksilla kasvaa jyrkästi. Tällöin syvemmät kerrokset ovat heikkoja. Mikäli maan lujuusparametrit k ja n tunnetaan, malli (6.1) voidaan kirjoittaa painuman laskemiseksi muotoon

$$z = n \sqrt[n]{\frac{p}{k}} \quad (6.2)$$

Wästerlund (1990) on mitannut seuraavanlaisia kertoimia ruotsalaisille moreenimaille (taulukko 6.1). Taulukkoon on laskettu myös referenssipainuma 75 kPa pintapaineelle. Verraten suuri painuma metsämailla johtuu osittain paksusta kokoonpuristuvasta humuskerroksesta. Metsämaalla painuma on 20 - 40 mm luokkaa ja vastaa 1,5 m traktorinrenkaalle 0,1 - 0,2 vierintävastuskerrointa.

Koska maan muodonmuutosmoduuli k on koheesio- ja kitkamoduulien funktio, painuma voidaan arvioida tarkemmin, jos maavakiot k_c ja k_ϕ tunnetaan. Tällöinhän painumamalliksi saadaan

$$z = \left(\frac{p}{\frac{k_c}{b_1} + k_\phi} \right)^{1/n} \quad (6.3)$$

jossa

z on	painuma, m
p	pintapaine, kPa
k_c	muodonmuutosmoduulin koheesio-osa
k_ϕ	muodonmuutosmoduulin kitkaosa
b_1	kuormituspinnan leveys, m
n	painumaeksponentti

Taulukko 6.1. Maalajien muodonmuutosindeksit (laskettu Wästerlund'in 1990 raportista).

Maalaji	Kosteus- suhde, %	Muodonmuutos- moduuli, k	Painuma- eksponentti n	Laskettu pai- numa z_0 , mm
Ei metsämaa				
Paljas hiekka	22 - 27	26 600	1,09	5
Hiesuhiekka, pelto	32	5 250	1,10	21
Turvemaa, pelto	220	1 200	0,90	46
Metsämaa				
Hiekkamoreeni	28 - 47	26 100	1,49	20
Hiesumoreeni	20 - 35	80 800	2,18	40

6.2. Painuma luiston funktiona.

Painuman mittausta on yleensä staattinen, sillä kuormituslevyn vaakasuora liike = 0. Kuitenkin pyörä pyöriessään aiheuttaa maa-ainesten siirtymää ja "kaivautuu" maahan. Tällöin painuma suurilla luiston arvoilla on suurempi kuin pienillä. Kaivautumisen suuruutta voidaan estimoida lisäämällä staattiseen painumaan luistopainuma. Estimaattina voidaan käyttää seuraavia Wästerlundin (1990) tuloksista johdettuja arvoja, malli (6.4):

$$z_s = 0.15 * S * \sqrt{z * r} \quad (6.4)$$

jossa

- z_s on luistosta johtuva lisäpainuma, m
- S luistokerroin
- z painuma, m
- r pyörän säde, m

6.3. Painuma dynaamisessa kuormituksessa

Maamekaniikassa kuormitus on yleensä staattinen ja kohdistuu kohtisuoraan maanpintaa vastaan. Pyörän liikkua eteenpäin kuormitusolosuhteet ovat kuitenkin toisenlaiset. Eteenpäin liikkuvan pyörän aiheuttama kuormitus on lyhytaikainen ja maan muodonmuutos on riippuvainen kuormitusnopeudesta. Grahn (1990) esittää staattiseen painumamalliin lisättäväksi nopeudesta johtuvan lisätekijän, malli (6.5):

$$p = k_0 * z^n * z_v^m \quad (6.5)$$

jossa

- p on kuormitus, kPa
- k_0 maan kokoonpuristumiskerroin
- z painuma, m
- z_v kuormitusnopeus, m/s
- n painumaeksponentti
- m nopeuseksponentti

Tästä edelleen voidaan kehittää jäykälle pyörälle dynaamisen painuman ja kuormituksen välille malli (6.6) (Grahn 1990):

$$z_0 = \left[\frac{W}{b * k_0 * \left(\frac{2 * v}{1 - S}\right)^m * d^{(1-m)/2} * \left[\frac{1}{1+m} - \frac{n}{3+m}\right]} \right]^{2/(2^n + 1 + m)} \quad (6.6)$$

jossa

z_0	on dynaaminen painuma, m
W	pyöräkuorma, N
b	pyörän leveys, m
k_0	maan kokoonpuristumiskerroin
n	painumaeksponentti
v	ajonopeus, m/s
S	luisto
d	pyörän halkaisija, m
m	nopeuseksponentti

Ajonopeuden lisääntyessä dynaaminen painuma pienenee; maa ei ehdi painua kokoon täydellisesti. Täten siis staattisella painumamallilla laskettu painuma voidaan pitää maksimipainumana, ja siihen perustuvat laskelmat sisältävät eräänlaisen varmuusmarginaalin.

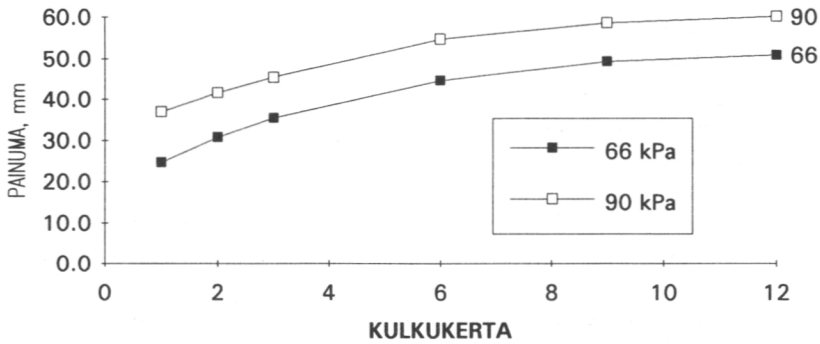
6.4. Painuma eri kuormituskerroilla

Teoreettinen malli (6.2) tarkastelee rengasta ensimmäisellä kulkukerralla. Mikäli seuraava rengas kulkee täsmälleen samaa uraa se kulkee jo tiivistyneellä tai häiriytyneellä alustalla, joten painuma on yleensä pienempi. Ainoastaan märillä savimailla ja turvemailla, joissa leikkauslujuus muodostuu koheesiosta ja joissa leikkausjännitys/siirtymässä on selvä huippu, painuma voi kasvaa ajokertojen mukaan. Tällöin yleensä painumaeksponentti on $n < 1$, mikä merkitsee alaspäin pehmeneviä kerroksia. Tiivistyvillä maalajeilla pyöräpaineesta johtuva maan tiivistyminen lisää maan kantokykyä ja pienentää seuraavien ajokertojen painumaa. Kuvassa 25 esitetään painuman pieneneminen ajokertojen ja kuormituksen funktiona. Yleensä painuma ajokertojen funktiona voidaan kuvata mallilla

$$z_N = z * N^{(1/a)} \quad (6.7)$$

jossa

z_N	on painuma N ajokerralla, m
z	painuma 1. ajokerralla, m
N	ajokerta
a	vakio, 2-3 löysille alustoille tai alhaisille kuormille 3-4 keskikantaville alustoille tai keskimääräisille kuormille 4-5 kovalle alustoille tai suurille kuormille

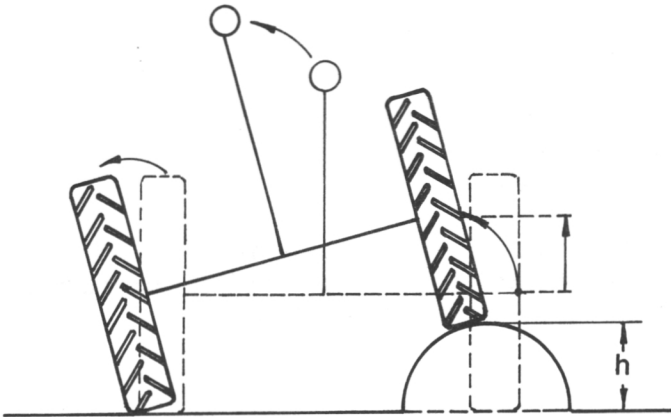


Kuva 25. Painuma eri kulkukerroilla (Abebe ym. 1989).

7. Heilunta, ohjattavuus ja vakavuus

7.1. Teoreettinen heiluntamalli

Tarkastellaan akselistoa ylittämässä puolipallon muotoista estettä (kuva 26). Sivuttaiskiihtyvyydet ovat sidoksissa pyörän pystysuoraan kiihtyvyyteen a_z . Jos jäykkä kuljettaja olisi jäykästi kiinni penkissään, voitaisiin esim. hänen päähänsä kohdistuvat kiihtyvyydet laskea. Vaikka tällainen tilanne onkin käytännössä mahdoton, voidaan laskentaa käyttää hyväksi malleja laadittaessa. Laskennallinen arvo on siten teoreettinen maksimi. Mitatun ja teoreettisen arvon ero kuvaa systeemin jousivakiota, ja on helpompi muodostaa alamalleja, jossa on osa tuntemattomia vakioita kuin että koko malli olisi tuntematon.



Kuva 26. Heilunta.

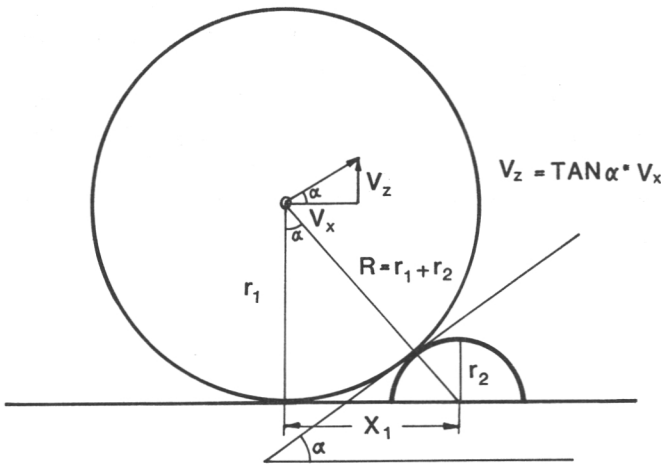
Heiluntaa voidaan analysoida tutkimalla pyörän z-akselin suuntaista (pystysuoraa) liikettä. Tarkastellaan jäykkää pyörää ylittämässä puolipallon muotoista estettä y tasossa. Tällöin ongelma on helppo havainnollistaa geometrisesti (kuva 27). Kun r_1 -säteinen pyörä kohtaa r_2 -säteisen kiven, josta maan pinnalla on h-korkuinen segmentti, pyörän keskipiste alkaa nousta kosketuspisteen tangentin suuntaisena. Tilanne on periaatteessa sama kuin estevastusta laskettaessa, sillä estevastus koostuu nimenomaan akselin (kuorman) nostamisesta ylös. Pystykiehtyvyys on pyörän nousunopeuden derivaatta eli kuvan 27 kuvaajan tangentin kulmakerroin kussakin pisteessä.

Kuvasta 27 voidaan päätellä, että estettä ylitettäessä akselin pyörien kehänopeudet ovat erilaiset¹¹. Mikäli akseli on kiinteä, toinen pyörä vetää ja toinen jarruttaa. Oletetaan, että traktorin (akselin) maanopeus, v_x , pysyy vakiona. Pyörän keskipisteen z-suuntainen nopeusfunktio on kuvan 27 perusteella

$$v_z = \text{TAN}\alpha * v_x \quad (7.1)$$

Kuvan 27 perusteella voidaan kirjoittaa

$$\text{TAN}\alpha = \frac{X}{\sqrt{R^2 - X^2}} \quad (7.2)$$



Kuva 27. Pyörä ylittämässä puolipallon muotoista estettä.

¹¹ Kiveä ylitettäessä pyörän kehä kulkee ympyrän kehää pitkin, kun taas maata pitkin kulkevan pyörän kehä kulkee ympyrän jännettä vastaavan matkan, joten matkojen erojen vuoksi nopeuksien on oltava erilaiset. Koska nopeudet ennen kiveä olivat samat, toisen pyörän kiihtytys tai toisen pyörän hidastus aiheuttaa pyöriin erilaiset vääntömomentit

Koska nopeus on matkan derivaatta ajan suhteen ja kiihtyvyys nopeuden derivaatta ajan suhteen, voidaan pystynopeudelle ja -kiihtyvyydelle johtaa yhtälöt matemaattisesti.

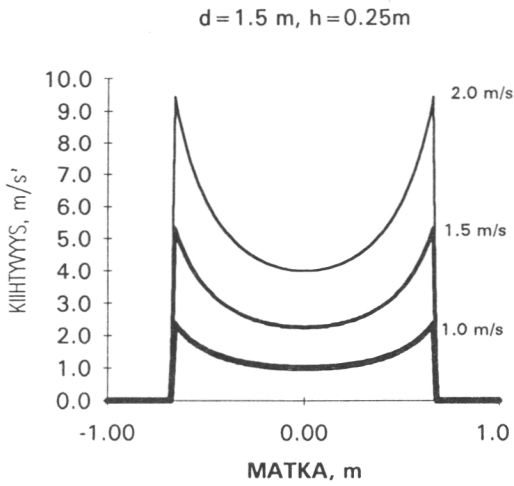
$$Z = \sqrt{R^2 - X^2} \quad \text{akselin pystysiirtymä, m} \quad (7.3)$$

$$Z' = -\frac{X}{Z} * v_x \quad \text{akselin nopeus, m/s} \quad (7.4)$$

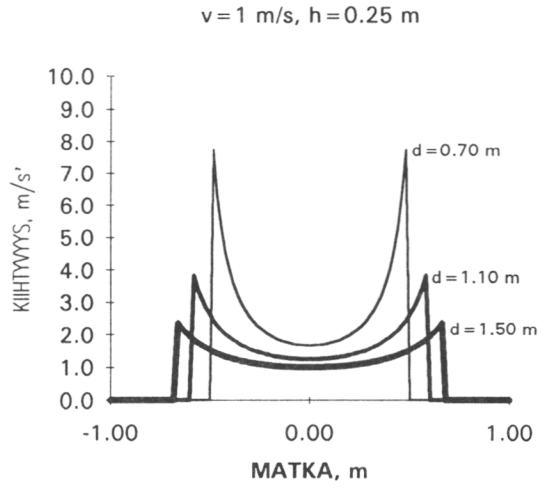
$$Z'' = \frac{R^2}{Z^3} * v_x^2 \quad \text{akselin kiihtyvyys, m/s}^2 \quad (7.5)$$

Pystykiihtyvyys siis kasvaa ajonopeuden neliössä, eli heilunta lisääntyy nopeasti ajonopeuden funktiona. Samoin voidaan todeta, että estekorkeuden vaikutus on riippuvainen pyörän säteestä, suuripyöräinen ajoneuvo heiluu pienipyöräistä vähemmän. Kuvasta 28 voidaan todeta, että ajonopeuden vaikutus heiluntaan on huomattava. Kuvissa 28-31 havainnollistetaan heilunnan riippuvuutta yksittäisistä eri tekijöistä tarkastelemalla 1,5 m jäykkää pyörää ylittämässä erilaisia esteitä.

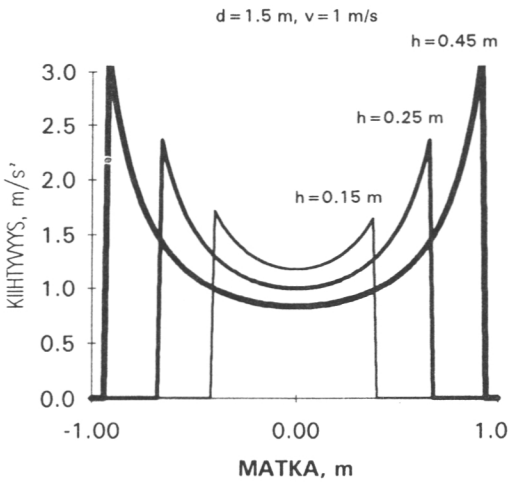
Mikäli rengas myötää kohtauskulman, tangentti pienenee eli pystykiihtyvyys alenee (kuva 32). Erikoistapaus on, kun rengas on niin joustava, että se taipuu esteen yli. Tällöin tangentti=0, eikä pystykiihtyvyyttä esiinny. Täten siis joustavuudesta riippuen ilmarenkaisen akselin heilunta on pienempää kuin jäykkäpyöräisen. Seuraavaksi johdetaan malli ilmarenkaan heilunnan laskemiseksi. Oletetaan renkaan litistymäksi δ . Tällöin akselin nousu kiven yläkohdassa on $(h-\delta)$. Oletetaan, että akselin liike noudattaa ympyränkaarta, jonka säde on suurempi kuin jäykän pyörän tapauksessa ($R_p = r_1 + r_2$) ja että akseli alkaa nousta samasta etäisyydestä X kuin jäykkä pyörä. Tällöin ilmarenkaisen akselin pyörähdyssäde R_p voidaan laskea kolmion ympäri piirretyn ympyrän avulla (kuva 33).



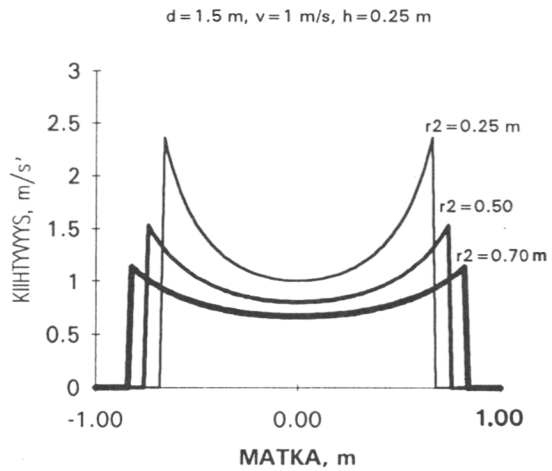
Kuva 28. Ajonopeuden vaikutus heiluntaan.



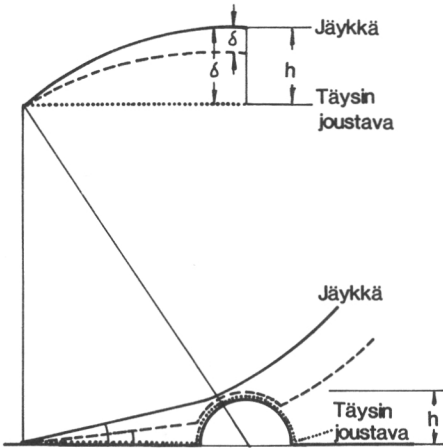
Kuva 29. Heilunnan riippuvuus pyöräkoosta.



Kuva 30. Heilunnan riippuvuus kiven korkeudesta.



Kuva 31. Heilunnan riippuvuus esteen muodosta (kiven säteestä).



Kuva 32. Ilmarenkaan heiluntamalli.

Jäykkä pyörä**Ilmarenkas**

$$\sin \alpha = \frac{h}{a}$$

$$\sin \alpha = \frac{h-\delta}{a}$$

(7.6)

$$a^2 = h^2 + X^2$$

$$a^2 = (h-\delta)^2 + X^2$$

(7.7)

Kolmion ympäri piirretyn ympyrän säde voidaan laskea yhtälöstä (7.8)

$$R = \frac{a}{2 \cdot \sin \alpha}$$

(7.8)

Sijoittamalla yhtälö (7.7) yhtälöön (7.8) saadaan sieventämällä

$$R_r = \frac{h^2 + X_{\max}^2}{2 \cdot h}$$

(7.9)

$$R_p = \frac{h^2 - 2 \cdot h \cdot \delta + \delta^2 + X_{\max}^2}{2 \cdot (h - \delta)}$$

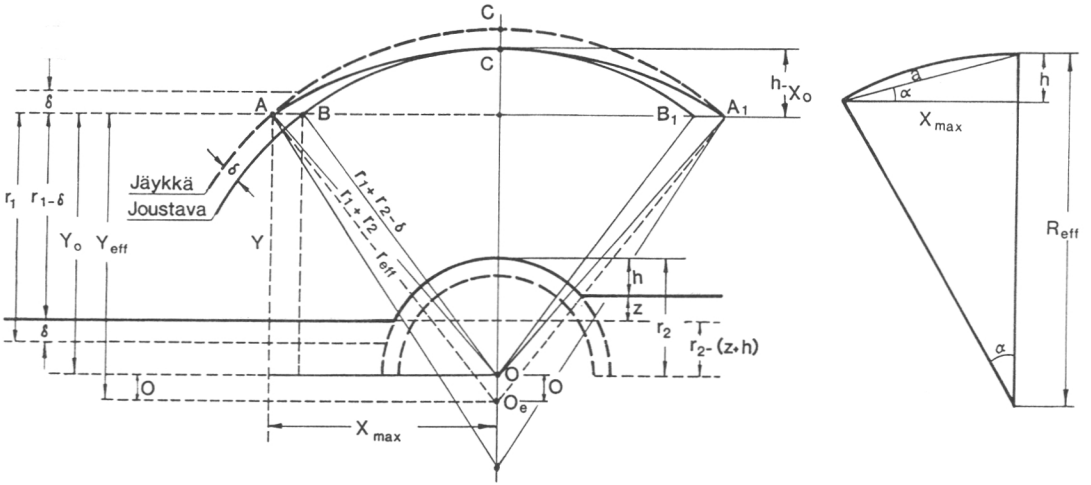
(7.10)

jossa

 R_r on jäykän renkaan akselin pyörähdyssäde, m R_p ilmarenkaisen akselin pyörähdyssäde, m

h estekorkeus, m

 δ litistymä, m X_{\max} akselin suurin vaakaetäisyys kiven keskilinjasta, m



Kuva 33. Ilmarenkaan heiluntamallin geometria.

X_{\max} voidaan laskea kuvasta 33. Sen arvoksi saadaan

$$X_{\max} = \sqrt{2 * (r_1 + r_2) * h - h^2} \quad (7.11)$$

jossa

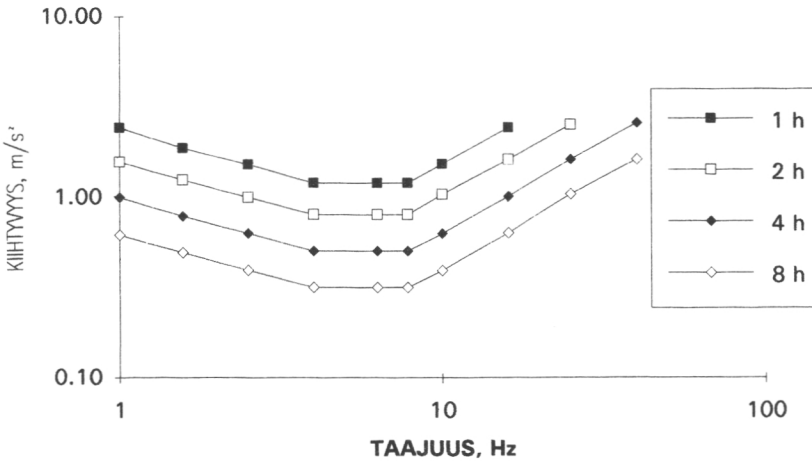
- r_1 on pyörän säde, m
- r_2 kiven säde, m
- h kiven korkeus, m

Sijoittamalla R_p R :n tilalle malliin (7.5) voidaan tutkia litistymän vaikutusta heiluntaan.

Heilunta on energiatilan muutosta heilaudustilasta toiseen, joka vaimenee eri koneelimissä eri lailla. Jousittamattomassa metsäkoneessa pääosa heilunnasta absorboituu renkaaseen ja osa heiluriakselien kitkaan ja ohjaamon vaimennukseen. Merkittävä heilunnanvaimennin on kuljettajan istuin, joka suunnitellaan nimenomaan estämään koneen heiluntaa siirtymästä kuljettajaan. Vaimennusta voidaan kuvata vaimennuskertoimen tai imeytyneen energian avulla. Heiluntaa voidaan tutkia matemaattisesti mutta tällöin edellytetään korkeampaan matematiikkaan perustuvia malleja.

7.2. Heilunnan fysiologiset rajoitukset

Ihmisruumis pystyy työskentelemään heiluvassa ajoneuvossa mutta vain määrättyyn rajaan saakka. Rajoiksi tulevat toisaalta ohjausliikkeiden koordinointi ja toisaalta aluksi heilunnan aiheuttama epämiellyttävyyden tunne ja heilunnan lisääntyessä



Kuva 34. Suositeltu maksimi altistusaika eri heiluntataajuuksilla ja -voimakkuuksilla.

ruumiin eri elinten fyysinen kestävyys. Käytännön rajana heilunnalle voidaan pitää 6 W absorboitua tehoa (Kaczmarek 1990). Laskelmissa tämä on korvattu keskikihtyvyydellä 6 m/s². Yksittäisen esteen kohdalla kriteerinä voidaan pitää kuljettajan paikalle suurimpana sallittuna arvona 2,5 G:n (25 m/s²) kiihtyvyyttä (Beck 1978).

Heilunnalle on annettu ergonomiset suositukset, ISO (1978) standardi (kuva 34). Käytännössä heiluntaa mitataan kuljettajan istuimeen sijoitetun erikoisanturin avulla, ja kiihtyvyydet mitataan x, y ja z tasoissa. On huomattava, että paitsi kiihtyvyyden suuruudella myös heilunnan taajuudella on vaikutusta.

Metsätraktorilla ajonopeutta rajoittavaksi tekijäksi tulee usein joko heilunta tai ohjattavuus, joten heilunta on eräs etenemisen rajoitusyhtälöistä.

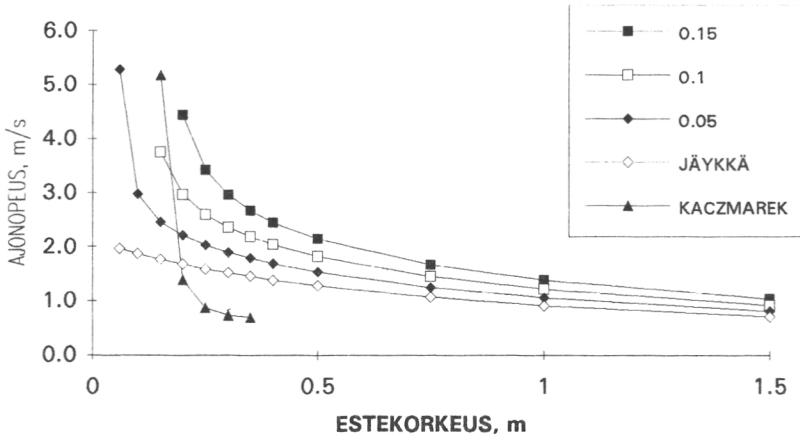
7.3. Ajonopeus, estekorkeus ja metsätraktorin heilunta

Pystykihtyvyyden malli (7.5) voidaan ratkaista ajonopeuden suhteen, malli (7.12):

$$v_{\max} = \sqrt{a_z \cdot \frac{(R_p^2 - X_{\max}^2)^{1.5}}{R_p^2}} \quad (7.12)$$

jossa

- v_{\max} on maksimi ajonopeus, m/s
- a_z pystykihtyvyys, m/s²
- R_p akselin pyörähdys säde, m
- X_{\max} suurin akselin vaakaetäisyys kiven keskipisteestä, m



Kuva 35. Suurin mahdollinen ajonopeus esteessä eri litistymillä.

Käyttämällä suurimpana sallittuna pystykiihtyvyyden arvona 6 m/s^2 voidaan laskea seuraavat maksiminopeudet (kuva 35). Kuvassa laskettuja nopeuksia verrataan Kaczmarekin (1990) jousittamattomalla 4W sotilasajoneuvolla ($d=1,5 \text{ m}$) empiirisesti mittaamaan ajonopeuteen. Voidaan todeta tietty yhteensopivuus: estekorkeus $0,2 \text{ m}$ tulee nopeutta rajoittavaksi tekijäksi $>0,1$ litistymällä. Vaikka malli (7.12) onkin teorialtaan vajavainen, voitaneen sitä käyttää estekorkeuden rajoitusmallina kunnes täydellisempi malli on kehitetty. Malli (7.12) antaa suurempia arvoja ($> 2 \text{ m/s}$) kuin käytännön ajokokeissa saavutetut helpoissa maastoissa ($<0,3 \text{ m}$ estekorkeus) mutta suurin piirten vastaavia arvoja vaikeissa maastoissa ($>0,7 \text{ m}$ estekorkeus) (vrt. esim. taulukkoon 9.3 ja liitteeseen 5).

7.4. Ohjattavuus

Metsässä ajourat ovat mutkaisia ja kapeita, joten koneen täytyy jatkuvasti muuttaa suuntaansa. Varsinkin alamäissä ohjattavuus muodostuu usein rajoittavaksi tekijäksi. Koska laskennallisesti ohjattavuuden huomioonottaminen vaatii runsaasti laskentaa, niin käytännössä on kätevintä lisätä empiirisesti kerätty tieto nopeuksista erityyppisissä olosuhteissa rajoitusyhtälöiksi. Ohjattavuutta voidaan tarkastella yksinkertaisen mallin avulla. Tasaisella alustalla, kun renkaan sivuttaispito tunnetaan (liikimain μ_T alhaisella luistolla), voidaan maksiminopeutta estimoida keskipakovoiman avulla

$$W^* \mu_T > \frac{m^* v^2}{r} \quad (7.13)$$

josta maksiminopeudeksi saadaan

$$v_{\text{kaarre}} = \sqrt{9.81 * \mu_T * r} \quad (7.14)$$

jossa

v_{kaarre} on maksiminopeus kaarteessa, m/s
 μ_T tartuntakerroin
 r kaarresäde, m

Kaarresäde voidaan estimoida esteen etäisyyden y avulla (kuva 36). Kuvan 36 geometriasta saadaan kolmion 1 avulla

$$\text{TAN}\alpha = \frac{y}{d_a} \quad (7.15)$$

Toisaalta

$$\text{TAN}\alpha = \frac{d_a}{r} \quad (7.16)$$

Ratkaisemalla r yhtälöparista (7.15) ja (7.16) saadaan kaarresäteen arvoksi

$$r = \frac{d_a^2}{y} \quad (7.17)$$

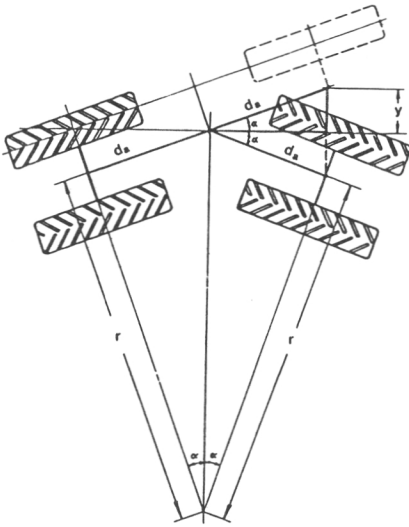
Sijoittamalla r arvo malliin (7.14) ja lisäämällä varmuuskerroin $f = 2 \dots 4$ saadaan kaarrenopeudeksi

$$v_{\text{kaarre}} = d_a * \sqrt{\frac{9.81 * \mu_T}{f * y}} \quad (7.18)$$

jossa

v_{kaarre} on maksiminopeus kaarteessa, m/s
 d_a 1/2 akseliväli, m
 μ_T tartuntakerroin
 f varmuuskerroin (2 ... 4)
 y väistöetäisyys puolen akselivälin päässä, m

Mallilla (7.18) lasketut maksimi kaarrenopeudet esitetään taulukossa 7.1. Tartuntakerroinena on käytetty $\mu_T=0.3$. Kaarrenopeus on laskettu käyttäen varmuuskerrointa 2.5. Nivelohjatun traktorin akseliväli on 3 m ($d_a = 1,5$). Nivelen kääntökulma ja vastaava y -akselin suuntainen etäisyys 1,5 metrin päässä on annettu havainnollistamaan kaarresädettä (kuva 36 ja taulukko 7.1).



Kuva 36. Nivelohjatun koneen geometria.

Nopeudet 5-10° nivelkulmilla voivat olla 10-15 km/h ja 20-30° nivelkulmilla todennäköinen nopeus on noin 6-7 km/h. Kirjallisuudessa ei ole saatavissa empirisiä arvoja ajoradan mutkaisuuden vaikutuksesta, jotta taulukon 7.1 arvoja voitaisiin verrata maastossa mitattuihin.

Mainittakoon, että erityisesti telavetoisten sotilasajoneuvojen ohjattavuuden ja kaarrenopeuden täydellisemmät mallit ovat osoittautuneet hyväiksi, ja koneen laskettu ja havaittu käyttäytyminen sopivat hyvin yhteen (esim. Kitano ym. 1981).

Taulukko 7.1. Kaarrenopeus eri nivelkulmilla.

Nivelkulma, °	y-Etäisyys, m	Kaarresäde, m	Kaarrenopeus, m/s	Kaarrenopeus, km/h
1,0	0,026	85,9	10,05	36,2
2,5	0,065	34,3	6,36	22,9
5,0	0,131	17,1	4,49	16,2
10,0	0,260	8,5	3,16	11,4
20,0	0,546	4,1	2,17	7,8
30,0	0,866	2,6	1,75	6,3
45,0	1,500	1,5	1,33	4,8

7.5. Vakavuus

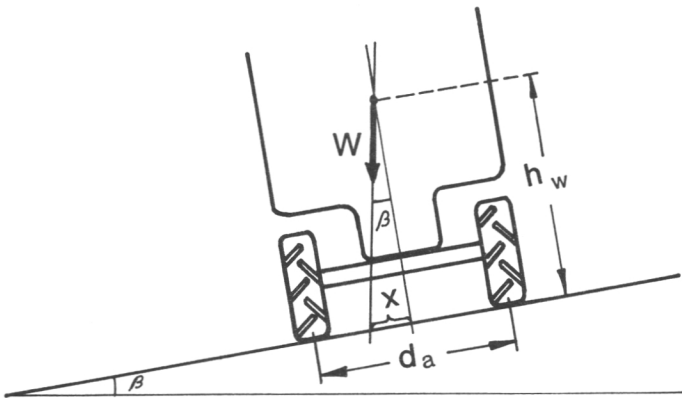
Tarkastellaan kuormattua konetta kulkemassa rinteessä, jonka sivukaltevuus on β (kuva 37). Painopisteen on pysyttävä tukipinnan sisäpuolella, joten voidaan kirjoittaa

$$\text{TAN}\beta = \frac{d_a}{2 \cdot f \cdot h_w} \cdot 100 \quad (7.19)$$

jossa

- TAN β on suurin sallittu sivukaltevuus, %
- f varmuuskerroin (2.5 ... 4)
- d_a akseliväli, m
- h_w painopisteen korkeus, m

Teoreettisesti kuormakone voi selviytyä 35% sivukaltevuudesta ($f=2$). Tällöin kuitenkin renkaan sivuttaispito voi muodostua rajoittavaksi tekijäksi. Sen vuoksi on parasta käyttää varmuuskerrointa $f=3$, jolloin sivukaltevuudeksi saadaan 25%. Dynaamiset kuormat, renkaan litistymä ja kääntymisen aiheuttama tukipinnan pienentyminen on myös otettava huomioon tarkemmissa matemaattisissa analyyseissa, ja ne saattavat vieläkin pienentää sallittua sivukaltevuutta.



Kuva 37. Koneen vakavuus sivukaltevassa rinteessä.

8. Renkaat

Renkaiden ominaisuuksilla on suuri merkitys koneen liikkumiskykyyn. Koska jäykän pyörän ja ilmarenkaan välinen ero riippuu litistymästä, on renkaan muodonmuutosominaisuuksien tunteminen hyödyksi malleja kehitettäessä. Toinen tärkeä tunnettava ominaisuus olisi renkaan kosketuspinta-ala, sillä sen avulla voidaan laskea keskimääräinen kosketuspaine tai tartunta (malli 5.3).

8.1. Litistymä

Jäykkä rengas ei jouta kosketuskohdassaan ja teoreettisesti jäykän renkaan kosketusalue joustamattomalla alustalla on renkaan leveyden pituinen jana. Käytännössä sekä alusta että rengas joustavat, joten kosketusalue kasvaa. Ilmarenkas joustaa rakenteesta, kuormituksesta, rengaspaineesta ja alustan ominaisuuksista johtuen, joten kosketusalueen suuruus on riippuvainen monesta tekijästä.

Renkaan ominaisuuksia kuvaavana parametrina käytetään renkaan litistymää (*Deflection*, δ), joka mitataan kovalla alustalla eri kuormituksilla. Mikäli renkaan jousivakio (*Spring rate*, C_0) tunnetaan, voidaan litistymä laskea seuraavasti (Schwinghamart 1990):

$$\delta = \frac{0.8 \cdot W}{C_0} \quad (8.1)$$

jossa

δ on litistymä, m
 W pyöräkuorma, N
 C_0 jousivakio, N/m

Jousivakio riippuu rengastyypistä ja rakenteesta sekä rengaspaineesta. Jousivakio voidaan arvioida mallilla (8.2), jonka kertoimet saadaan kokeellisesti mittaamalla painuma jäykällä alustalla. Taulukossa 8.1. annetaan joitain arvoja kertoimille a ja b.

$$C_0 = a + b \cdot P_i \quad (8.2)$$

jossa

C_0 on jousivakio, N/m
a, b empiirisesti määrättyt vakiot
 P_i rengaspaine, kPa

Taulukko 8.1. Kertoimet malliin (8.2) erilaisille renkailla.

Rengastyyppi	Vakio a	Vakio b
Maastoautorenkaat	42 000	368
Maastokuorma-autorenkaat	60 000	1580
Metsätraktorirenkaat		
Maataloustraktorirenkaat	53 000	1080

8.2. Kosketuspaine

Rengaspaine (*Inflation Pressure, P*) on renkaan sisäinen ilmanpaine. Kosketuspaine (*Ground Pressure*) on renkaan keskimääräinen paine maanpintaa vastaan, ja se lasketaan jakamalla rengaskuorma kosketuspinta-alalla. Vaikeutena kosketuspaineen määrittämisessä on kosketuspinta-alan mittaus, koska pinta-ala riippuu sekä renkaan että alustan kimmo-ominaisuuksista.

Yleisesti käytetty kosketuspaineen laskentamenetelmä on ilmoittaa kosketuspaine 15% painumalla, jolloin kosketuspaineeksi saadaan (Mikkonen & Wuolijoki 1975):

Pyörä

$$P = \frac{W}{b \cdot r} \quad (8.3)$$

Tela

$$P = \frac{W}{(0.72 \cdot r_1 + 0.53 \cdot r_2 + l) \cdot b} \quad (8.4)$$

jossa

- p on kosketuspaine, kPa
- W rengaskuorma, N
- r renkaan säde, m
- b renkaan leveys, m
- r₁ telan 1. renkaan säde, m
- r₂ telan 2. renkaan säde, m
- l 1. ja 2. pyörän akselin välinen etäisyys, m

Laskennallinen kosketuspaine (pintapaine) on konekaupassa usein käytetty arvo. Metsäkoneilla laskennalliset kosketuspaineet vaihtelevat 50 ja 100 kPa välillä (taulukko 8.2 ja 11.1).

Todellinen kosketuspaine kantavalla alustalla on huomattavasti suurempi kuin taulukossa 8.2 esitetty johtuen pienestä kosketusalasta. Pehmeillä alustoilla todellinen kosketuspaine on lähempänä taulukon 8.2 arvoja. Todellinen kosketuspaine on myös epätasaisesti jakautunut renkaan alla (varsinkin rivoitetuilla renkailla), joten todelli-

nen kosketuspaine joissain kosketuspinnan kohdassa voi olla huomattavan korkea, jopa 10-kertainen laskennalliseen arvoon.

Jonkin verran käyttökelpoisemmän renkaan kosketuspaineen lasketamenetelmän esittää Dwyer (1984), sillä hänen Turnagen (1972) korjaamasta *Clay Numeric'* sta johtamassa pintapaineindeksissä (*Ground Pressure Index, G*) on mukana litistymisestä ja pyörän muotosuhteesta johtuvat tekijät. Pintapaineindeksi lasketaan mallilla (8.5)

$$G = \frac{W}{b*d} \sqrt{\frac{h}{\delta} \left[1 + \frac{b}{2*d} \right]} \quad (8.5)$$

jossa

- G on pintapaineindeksi, Pa
- W pyöräkuorma, N
- b renkaan leveys, m
- d renkaan läpimitta, m
- h rengasosan korkeus, m
- δ litistymä, m

Taulukko 8.2. Laskennallinen kosketuspaine.

Kone	Rengaskoko	Massa, t	Laskennallinen kosketuspaine, kPa	
			Eturenkaat	Takarenkaat
Valmet 828	600-22,5	14,75	59	55
Valmet 838	600-26,5	20,10	45	79

Kullakin renkaalla on valmistajan antama rengaspaine/rengaskuorman arvo, normi-kuorma (liite 4). Renkaan kestoikä ja käytön taloudellisuus ovat keskimääräisissä olosuhteissa yleensä optimissa, kun käytetään suositeltua rengaspainetta. Kosketuspaine riippuu renkaan ja alustan kimmomoduuleista. Kovalla alustalla rengas jous-
taa, pehmeällä alustalla rengas käyttäytyy lähes jäykän pyörän tavoin. Rengaspai-
neen ja kosketuspaineen välinen kokeellisesti mitattu riippuvuus pehmeällä alustalla
on seuraava (Schwangerhart 1990).

$$p = 45 + 0.32 * p_i \quad (8.6)$$

jossa

- p on kosketuspaine, kPa
- p_i rengaspaine, kPa

Arvioissa voidaan käyttää seuraavia arvoja (taulukko 8.3.).

Taulukko 8.3. Rengaspaine ja kosketuspaine pehmeällä alustalla.

Rengaspaine, kPa	50	75	100	150	200
Kosketuspaine, kPa	61	69	77	93	109

Rowland (1972) kehitti menetelmän erilaisten telojen keskimääräisen maksimipaineen arvioimiseksi pehmeikölle. Vaikka menetelmää voidaan pitää jo vanhanaikaisena, voidaan sitä yksinkertaisuutensa vuoksi käyttää arvioitaessa metsäkoneen pintapainetta. Pintapainetta voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa koneen suorituskykyä (luku 10) tai maastovaurioita (luku 11).

Jäykkä tela-ajoneuvo

$$\text{MMP} = \frac{1.26 \cdot W}{2 \cdot m \cdot c \cdot b \cdot \sqrt{d \cdot p}} \quad (8.7)$$

Kumipyörä tela-ajoneuvo

$$\text{MMP} = \frac{0.50 \cdot W}{2 \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{d \cdot \delta}} \quad (8.8)$$

Cross-country Rengas

$$\text{MMP} = \frac{1.18 \cdot W}{2 \cdot m \cdot b \cdot \sqrt{d \cdot h}} \quad (8.9)$$

jossa

MMP	on keskimääräinen maksimipaine, N/m ²
W	pyöräkuorma, telakuorma, N
m	kannatuspyörien lukumäärä yhdessä telassa
b	pyörän tai telan leveys, m
c	telalappujen pinta-alan suhde telan pinta-alaan
d	pyörän, kannatuspyörän halkaisija, m
p	kannatuspyörien välinen etäisyys, m
δ	renkaan litistymä, m
h	rengasosan korkeus, m

8.3. Kosketusala

Kosketusala (*Footprint Area*, A) on renkaan ja maan kosketuspinta-ala. Kuten edellä mainittiin, kosketusalan määrittäminen on vaikea johtuen sekä alustan että renkaan ominaisuuksien suurista kombinaatiomahdollisuuksista. Esim. kovalla alustalla renkaan kosketusala koostuu vain ripojen pinta-alasta, pehmeällä alustalla myös renkaan runko vastaa maahan. Usein käytetty menetelmä kosketusalan mittaamiseksi on

painaa rengasta maahan eri kuormituksilla ja suihkuttaa väriainetta kosketuskohtaan. Kun rengas nostetaan ylös voidaan kosketusala mitata. Tosin tällöin saadaan kosketusala staattisen kuormituksen alla, eikä ala täysin kuvaa vetävän renkaan kosketusala. Renkaan laskennallinen kosketusala määritellään teoreettisena kosketuspinta-alana 15% painumalla, jolloin alaksi saadaan

$$A = b \cdot r \quad (8.10)$$

jossa

- A on laskennallinen kosketusala, m²
- b renkaan leveys, m
- r renkaan säde, m

Lähempänä todellisuutta oleva kosketusala voidaan laskea Schwanghartin (1990) mallilla

$$A = 0.77 \cdot b \cdot l \quad (8.11)$$

$$l = \sqrt{d \cdot (z + \delta) - (z - \delta)^2} + \sqrt{d \cdot \delta - \delta^2} \quad (8.12)$$

jossa

- A on kosketusala, m²
- b renkaan leveys, m
- l kosketusalueen pituus, m
- d renkaan halkaisija, m
- z painuma, m
- δ litistymä, m

Voidaan todeta, että pehmeällä alustalla suurilla pyöräkuormilla kosketusala alkaa lähestyä laskennallista, mutta käytännössä harvoin liikutaan näin suurilla painumilla. Käytännössä painuma on tällöin 225 mm ja vierintävastus 35% luokkaa.

Komandin (1990) empiirisesti saama malli maataloustraktorirenkaille on seuraava

$$A = \frac{c \cdot W^{0.7} \cdot \sqrt{\frac{b}{d}}}{P_i^{0.45}} \quad (8.13)$$

jossa

- A on renkaan kosketusala, m²
- c vakio taulukosta 8.3
- W pyöräkuorma, kN
- b renkaan leveys, m
- d renkaan läpimitta, m
- P_i rengaspaine, kPa

Taulukko 8.4. Kerroin c malliin (8.13) eri alustoilla (Komandi 1990).

Alusta	Kerroin c Malliin 8.13
Jokseenkin kantava maaperä	0,30 - 0,32
Hiekkainen peltomaa	0,36 - 0,38
Löysähkö hiekka	0,42 - 0,44

8.4. Kriittinen kosketuspaine

Joustava rengas litistyy joustamattomalla alustalla mutta joustavalla alustalla käyttäytyy kuin jäykkä rengas. Renkaan käyttäytyminen riippuu sekä renkaan että alustan kimmo-ominaisuuksista. Useat tutkijat ovat selvittäneet renkaan käyttäytymismuotoa, mutta tässä yhteydessä esitetään alunperin Bekker'in (1960) esittämä ja myöhemmin Wong'in (1989, s. 208) yksinkertaistama malli kriittisen kosketuspaineen (*Critical Ground Pressure*) laskemiseksi. Kriittistä kosketuspainetta pienemmällä paineella rengas käyttäytyy joustavasti, suuremmalla kuin jäykkä pyörä.

$$p_{CR} = k^{[1/(2n+1)]} * \left(\frac{3W}{(3-n)*b*d} \right)^{[2n/(2n+1)]} \quad (8.14)$$

$$k = \frac{k_c}{b_1} + k_\phi$$

jossa

- p_{CR} on kriittinen kosketuspaine, kPa
- k muodonmuutosmoduuli
- n muodonmuutosekspONENTTI
- W pyöräkuorma, kN
- d pyörän halkaisija, m
- b renkaan leveys, m
- k_c muodonmuutosmoduulin koheesiokomponentti
- b_1 kosketuspinnan leveys¹², m
- k_ϕ muodonmuutosmoduulin kitkakomponentti

¹² b on renkaan leveys, b_1 on kosketuspinnan lyhyempi dimensio. Jos renkaan leveys on suurempi kuin kosketusalueen pituus l niin b korvataan kosketusalueen pituudella l .

9. Metsäkoneen suorituskyky

9.1. Tekninen ja taloudellinen liikkumiskyky.

Maasto-kone tasolla konetta voidaan arvioida teknisen tai taloudellisen suorituskyvyn perusteella. Teknisen suorituskyvyn kriteereinä voidaan pitää go/no-go tilanetta ja taloudellista suorituskykyä arvioida koneen tuotoksen avulla.

Tekninen liikkumiskyky määritetään "no go" tilanteena, jolloin kone ei pysty selviytymään maastokohdasta. Tällöin yleensä $T_{net} < 0$. Toinen mahdollisuus on, että moottorin vääntömomentti ei ole riittävä. Kuitenkin esimerkiksi lyhyistä rinteistä tai kapeista pehmeikköjuonteista kone voi selvitä liike-energiansa turvin. Liikuttaessa teknisen liikkumiskyvyn rajaolosuhteissa myös kuljettajan kokemuksella ja ajotavalla on suuri merkitys, joten absoluuttisia liikkumiskyvyn/kulkukelpoisuuden indikaattoreita ei käytännössä voida asettaa. Tekninen liikkumiskyky riippuu yleensä joko maapohjan kantavuudesta tai rinnekaltevuudesta. Harvoissa tapauksissa myös esteet, suuret kivet, saattavat tulla rajoitteiksi. Talvella lumi voi rajoittaa teknisen liikkumiskyvyn no-go tilanteeksi.

Taloudellinen liikkumiskyky voidaan määrittää miniminopeutena, jolla koneen on pystyttävä liikkumaan kuormattuna maastossa. Maapohjan kantavuuden ja kaltevuuden lisäksi estekorkeus ja -tiheys saattavat tulla rajoittaviksi tekijöiksi. Metsäkoneen taloudellinen suorituskyky riippuu kahdesta tekijästä, kuormakoosta ja kulkunopeudesta, joita tarkastellaan yksinkertaisen konemallin avulla.

9.2. Koneen suorituskykymalli

9.2.1. Tuotosmalli

Koneen tuotos voidaan estimoida kuormakoon ja kuorma-ajan avulla (9.1).

$$\text{PROD} = \frac{1}{t} * L \quad (9.1)$$

jossa

PROD on koneen tuotos, m^3/s
 t kuorma-aika, s
 L kuormakoko, m^3

Koneen kuorma-ajaan, malli (9.2), liittyvistä tekijöistä kuorman vakioaika voidaan määrittää aikatutkimuksin tai sopimusteitse. Kuormaus- ja purkuajat voidaan luotetavasti määrittää aikatutkimuksiin perustuen suhteellisen pieneen otokseen. Kulkuaikojen määrittämiseksi on yksinkertaisinta luoda teoreettinen viitekehys, jonka luotettavuutta kontrolloidaan aikatutkimuksin ja empiirisin havainnoin. Kuorman koko voidaan niinkään määrittää teoreettisen viitekehysten avulla.

Koneen kuorma-aika on

$$t = (a + a_L + a_U) + \left(\frac{1}{V_A} + \frac{1}{V_R}\right) * D \quad (9.2)$$

jossa

t on	kuorma-aika, s
a	kuorman vakioaika, s
a _L	kuormausaika, s
a _U	kuorman purkuaika, s
v _A	kulkunopeus tyhjänä, m/s
v _R	kulkunopeus kuormattuna (kuormakoolla L m ³), m/s
D	juontomatka, m

9.2.2. Kuormakoko

Koneella on valmistajan antama maksimikuorma, joka perustuu koneen rakenteelliseen kestävytyteen. Käytännössä kuorman kokoa rajoittavaksi tekijäksi voi muodostua tartunta. Maksimikuorma voidaan laskea nettotartunnan perusteella.

Kantava kone

$$F_{net} = (W + L) * (\cos \alpha * (\mu_T - \mu_R) - \sin \alpha) \quad (9.3)$$

Juontokone

$$F_{net} = (W + 0.5 * L) * \cos \alpha * (\mu_T - \mu_R) - 0.5 * L * \cos \alpha * \mu_L - (W + L) * \sin \alpha \quad (9.4)$$

jossa

F _{net} on	nettovetovoima, kN
W	koneen paino, kN (Massa, t * 9.81)
L	kuorman paino, kN (Tukkien tilavuus * tiheys * 9.81)
α	rinnekaltevuus, °
μ _T	tartuntakerroin
μ _R	kulkuvastuskerroin
μ _L	tukin juontovastuskerroin

Maksikuorma saadaan asettamalla

$$F_{net} = 0 \quad (9.5)$$

Mallin (9.3) perusteella voidaan päätellä, että kantavalla koneella nettovetokyky ei suurestikaan vaihtele kuorman koon mukaan, sensijaan juontokoneella kuormakoko pienenee (vasta)rinteen jyrketyssä. Mikäli μ_R kasvaa kuormakoon kasvaessa (z kas-

vaa kiihtyvästi kuormituksen funktiona), niin nettotartunta pienenee rajoittaen kuormaa myös kantavalla koneella. Mikäli μ_T ja μ_R tunnetaan kuormituksen funktiona, voidaan maksimikuorma määrittää verraten tarkasti.

Juontokoneen maksimikuorman malliksi saadaan ratkaisemalla yhtälö (9.4) kuormakoon suhteen:

$$L = \frac{W * [\cos \alpha * (\mu_T - \mu_R) - \sin \alpha]}{0.5 * \cos \alpha * (\mu_L - \mu_T + \mu_R) + \sin \alpha} \quad (9.6)$$

Esimerkin vuoksi analysoidaan maksimikuorma afrikkalaisissa olosuhteissa 90 kW koneella, jonka massa on 15 t (Saarilahti ym. 1987). Oletusarvoina taulukon 9.1 kertoimet.

Taulukossa 9.2 verrataan mallin (9.6) antamia tuloksia empiirisiin havaintoihin sekä FAOn (1977) käsikirjan aineistosta kehitettyyn malliin (9.7) kuormakoon laske-
miseksi.

$$L = P^{1/(2.76 + 0.035 * S)} \quad (9.7)$$

jossa

L on	kuorman koko, m ³
P	juontotaktorin teho, kW
S	rinnekaltevuus, %

Taulukko 9.1. Pyörän suorituskykykertoimet.

Kerroin	Maan pinnan kosteus			
	Kuiva	Kostea	Märkä	Liejuinen
Vierintävastus, μ_R	0,11	0,13	0,15	0,17
Tartunta, μ_T	0,55	0,52	0,49	0,46
Juontovastus, μ_L	0,80	0,75	0,75	0,70

Taulukko 9.2. Juontokoneen maksimikuorma.

Laskentamalli	Kuiva	Maan pinnan kosteus		
		Kuormen koko, m ³	Märkä	Liejuinen
Malli (9.2), 22 % vastarinne	5,0	4,0	2,5	2,0
Malli (9.2), 25 % vastarinne	4,0	3,0	2,0	1,0
Malli (9.7), 22 % vastarinne	3,6	3,6	3,6	3,6
Malli (9.7), 25 % vastarinne	3,4	3,4	3,4	3,4
Empiirinen havainto, < 25 % vastarinne	4,5	4,0	3,8	2,0

Nettotartunnan perusteella voidaan arvioida koneen suorituskykyä. Mikäli nettotarunta on pieni, niin koneen suorituskyky jää alhaiseksi, koska pyörät "sutivat tyhjää" hyvin helposti. Tällöin kiinnijuuttumisien riski kasvaa ja vakio a mallissa (9.2) tulee suureksi, koska aikaa hukkaantuu koneen irroittamiseen.

9.2.3. Ajonopeus

Koska teho on voima*matka/aika ja toisaalta nopeus on matka/aika voidaan koneen teoreettinen maksiminopeus laskea nettomoottoritehon (pyörätehon) ja kokonaisvastuksen perusteella

$$v = \frac{P}{F_t} \quad (9.8)$$

jossa

v on kulkunopeus, m/s
 P koneen pyöräteho, kW
 F_t kokonaiskulkuvastus, N

Kulkuvastus F_t on riippuvainen kuormakoosta, rinteän jyrkkyydestä ja alustan ominaisuuksista. Sijoittamalla F_t mallista (2.35) malliin (9.8) saadaan kulkunopeuden yksinkertaiseksi malliksi

$$v = \frac{P}{W * \left(\frac{S}{100} + \mu_R \right)} \quad (9.9)$$

jossa

v on kulkunopeus, m/s
 P koneen pyöräteho, kW
 S rinnekaltevuus, %
 μ_R vierintävastuskerroin
 W koneen paino, kN

Jos jätetään koneen painopisteen siirtymisestä johtuvat akselipainojen muutokset huomioimatta, oletetaan koneen kaikki pyörät yhtä suuriksi ja kuorma tasaisesti jakaantuneeksi, saadaan kokonaisvastusmalleiksi mallit (9.10) ja (9.11). Juontokoneessa on oletettu, että puolet kuorman painosta on koneen ja puolet maan kannatuksella. Kantavassa koneessahan kuorma on kokonaan koneen pyörien kannatuksella. Niistä on edelleen johdettu ajonopeuden mallit (9.12) ja (9.13).

Kantava kone

$$F = (W+L) * (\cos \alpha * \mu_R + \sin \alpha) \quad (9.10)$$

Juontokone

$$F = (W+0.5*L) * (\cos \alpha * \mu_R) + 0.5*L*\cos \alpha * \mu_L + (W+L)*\sin \alpha \quad (9.11)$$

Kantava kone

$$v = \frac{P}{(W+L) * (\mu_R * \cos \alpha + \sin \alpha)} \quad (9.12)$$

Juontokone

$$v = \frac{P}{(W+0.5*L) * (\mu_R * \cos \alpha) + 0.5*L*\cos \alpha * \mu_L + (W+L)*\sin \alpha} \quad (9.13)$$

jossa

F on	kokonaisvastus, kN
v	ajonopeus, m/s
W	koneen paino, kN (massa, t * 9.81)
L	kuorman paino, kN (tukkien tilavuus*tiheys*9.81)
α	rinnekaltevuus, °
μ_R	kulkuvastuskerroin
μ_L	tukin juontovastuskerroin

Näin laskettu ajonopeus on maksiminopeus, ja malliin on asetettava ohjattavuuden ja heilunnan rajoitusyhtälöt.

9.2.4. Suorituskyvyn rajoitusyhtälöt

Metsämaastossa koneen liikkumista rajoittaa moni muukin tekijä kuin maapohjan kantavuus tai moottoriteho. Muut tekijät voidaan asettaa rajoitusyhtälöinä, alamelaina, varsinaiseen malliin, jolloin mallilla saadaan loogisissa rajoissa olevia tuloksia.

Ensimmäiseksi rajoitusyhtälöksi täytyy asettaa koneen maksimikantavuus eli valmistajan suositusarvo suurimmaksi mahdolliseksi kuormakooksi.

$$L < L_{\max} \quad (9.14)$$

Toiseksi rajoitusyhtälöksi täytyy asettaa nettotartunta. Käytännössä rajana voidaan pitää

$$\mu_{\text{net}} > 0.10 \quad (9.15)$$

Kolmanneksi rajoitusyhtälöksi täytyy asettaa vääntömomentti. Alhaisilla nopeuksilla teoreettinen vääntömomentti kasvaa liian suureksi. Joko koneen tartunta tai voimansiirron kestävyys tulevat rajoituksiksi. Tästä syystä koneelle tulee asettaa miniminopeus. Suuruusluokaltaan 0,1 - 0,05 m/s saattaa olla soveltuva.

$$v > v_{\min} \quad (9.16)$$

Jos laskettu nopeus jää alle minimin, on kuormakokoa pienennettävä, kunnes riittävä nopeus saavutetaan. Mikäli 0 kuormalla ei saavuteta miniminopeutta, ollaan no-go tilanteessa.

Neljäs koneen suorituskykyä rajoittava tekijä on heilunta. Koneen rakenteen (pyörä koko, akseliväli, painopiste) ja maaston profiilin perusteella voidaan hahmottaa koneen pystykiiltovykyksiä ja näistä päätellä tuleeko heilunta rajoittavaksi tekijäksi. Käytännön tutkimuksissa on saatu seuraavia maksiminopeuksia eri maastoluokissa (taulukko 9.3 ja Liite 5). Kahalan ja Kuiton (1986) tutkimuksesta lasketut keskimääräiset ajonopeudet metsätraktoreille olivat maastoluokassa I 0,76-0,85, maastoluokassa II 0,64-0,70 ja maastoluokassa III 0,55-0,60 m/s. Metsäkoneen nopeus on suurimmillaan 0...-10% rinteillä ja laskee hiukan jyrkemmissä alamäissä ohjattavuuden vuoksi. Noin +5% rinteistä lähtien koneen moottoriteho alkaa vaikuttaa rajoittavasti varsinkin kuorman kanssa. Keskimääräisinä maksiminopeuksina eri maastoluokille voidaan käyttää taulukon 9.3. lukuja. Voidaan todeta että malli (7.12) antaa lähes relevantteja arvoja metsätraktoreille, jos käytetään pieniä litistymän arvoja.

Taulukko 9.3. Metsäkoneiden maksiminopeus eri maastoluokissa (Aho & Kättö 1971).

Maasto	Tekninen nopeus, m/s ¹⁾	Operatiivinen nopeus m/s ²⁾
Metsäautotie	3,55	3,55
Maastoluokka 1	1,55	1,00
Maastoluokka 2	1,30	0,90
Maastoluokka 3	1,10	0,70

¹⁾ Tekninen nopeus, sallittu ajoaika < 1 h/d

²⁾ Operatiivinen nopeus, ajoaika < 2.5 h/d

Viides suorituskykyä rajoittava tekijä on ohjattavuus. Varsinkin alamäissä ohjattavuudesta tulee rajoittava tekijä. Maksiminopeutta eri olosuhteissa voidaan arvioida joko laskennallisesti tai käyttää empiirisesti kerättyä rajoitusmatriisia. Useassa tutkimuksessa ei ole analysoitu onko nopeutta rajoittava tekijä ollut heilunta vai ohjattavuus, ja yleensä ne ovat voimaakkaasti ristiinkorreloituja. Tästä syystä taulukon 9.3 luvut sopivat hyvin myös ohjattavuuden rajanopeuksiksi, jos malli (7.18) tuntuu antavan liian korkeita kaarrenopeuksia.

Kuudes suorituskyvyn rajoitusyhtälö on koneen maavara. Koneen maavara saadaan valmistajan suositusarvosta. Mikäli esteitä on harvassa, kone voi pyörä kerrallaan kiivetä niiden yli. Jos estetiheys kasvaa riittävän suureksi, esteitä jää myös koneen alle ja tällöin kone voi jäädä kiinni alustastaan. Esteen rajoitustiheytenä voidaan pitää sitä, ettei pyörien rajoittaman alan sisään jää maksimikorkuista estettä, eli esteiden lukumäärän on oltava alle $1/(l*b)$. Metsäkoneelle raja-arvo on noin 500 (rajoitettavaa) estettä/ha.

$$h < \text{maavara} \quad (9.17)$$

$$N < \frac{1}{l*b} \quad (9.18)$$

jossa

h on rajoittava estekorkeus, m
 N esteiden lukumäärä/m²
 l koneen pituus, m
 b koneen leveys, m

9.3. Metsäkoneen liikkumiseen käytettävissä oleva teho

Moottoriteho ilmoitetaan yleisimmin joko DIN tai SAE normein mitattuna. Koska kyseessä on testipenkin arvo ilman lukuisia metsäkoneen lisälaitteita (esim. laturi, hydraulipumput), on traktorin kampiakseliteho pienempi kuin ilmoitettu moottoriteho. Kampiakseliteho on

$$p = 0.9 * \text{DIN moottoriteho}^{13} \quad (9.19)$$

$$p = 0.8 * \text{SAE moottoriteho} \quad (9.20)$$

jossa

p on moottorin nettoteho, kW

Voimansiirron tehohäviö on suuruusluokkaa 3-5%/hammaspyöräpari (esim. Wong 1978), eli voimansiirron tehokerroin on

$$\text{TRe} = 0.95^n \quad (9.21)$$

jossa

TRe on voimansiirron tehokerroin
 n hammaspyöräparien lukumäärä

¹³ Jos moottoriteho on annettu hevosvoimissa (hv), (*horsepower*, hp) on se kerrottava 0.75:lla jotta saataisiin bruttoteho kilowatteina (kW)

Metsäkoneessa on yleensä 2-3 alennusvaihdetta tai tasauspyörästä jne, joten voimansiirron mekaanisten osien tehokertoimeksi tulee 0.85-0.90. Hydraulinen momentinmuunnin on hyötösuhteeltaan alhainen noin 75-80%. Tehohäviöt johtuvat energian muuttumiseksi lämmöksi kitkan vuoksi. Metsäkoneen kokonaistehokertoimeksi saadaan siten $0.87 \cdot 0.8 = 0.7$ eli noin 70% kampiakselitehosta voidaan saada kuljetusvastuksen voittamiseen. Moottoritehosta laskettuna tehokertoimiksi saadaan (DIN) $0.9 \cdot 0.7 = 0.63$ ja (SAE) $0.8 \cdot 0.7 = 0.56$ eli alle 2/3 ilmoitetusta moottoritehosta saadaan käyttöön.

Koska kuljettaja harvoin ajaa kaasu pohjassa ja kone harvoin pystyy säädöistä johdun edes antamaan ilmoitettua huipputehoa, niin laskelmissa voidaan käyttää kerrointa 0.55 muutettaessa DIN tehoja ja 0.5 muutettaessa SAE tehoja pyöratehoiksi.

9.4. Muutokset koneen liike-energiassa

Edellä esitetyt koneen liikkumisen mallit ovat perustuneet statiikkaan, konetta liikuttavat ja vastustavat voimat ovat tasapainossa. Kiihdytysvastuksen yhteydessä todettiin koneen liike-energian muutoksen vaativan työtä. Niinpä käytännössä esiintyy tilanteita, joista kone voi selviytyä joistain maastokohdista liike-energiansa turvin. Lyhyissä nousuissa tai pehmeikoilla koneen teho tai tartunta eivät ole riittäviä, mutta käytännössä kone pystyy niistä selviytymään, jos sillä on riittävä nopeus. Tarkastellaan koneen potentiaali- ja liike-energian muutoksia koneen noustessa korkeudeltaan h metriä olevan mäen päälle. Mäen alla koneen potentiaalienergia $= 0$, mäen päällä vastaavasti liike-energia $= 0$. Koneen energiayhtälö on tällöin

$$E_p = E_k \quad (9.22)$$

jossa

E_p on koneen potentiaalienergia, J
 E_k koneen liike-energia, J

Kun sijoitetaan vastaavat energiatilojen yhtälöt saadaan

$$m \cdot g \cdot h = \frac{m \cdot v^2}{2} \quad (9.23)$$

jossa

m on koneen massa, kg
 g painovoiman kiihtyvyyden, 9.81 m/s^2
 h mäen korkeus, m
 v koneen nopeus mäen alla, m/s

Tästä voidaan ratkaista mäennousuun vaadittava alku- tai suurin mäenkorkeus

määrätyllä alkunopeudella, jolla rinnevastus μ_G tulee nolaksi.

$$h = 0.051 \cdot v^2 \quad (9.24)$$

$$v = \sqrt{19.6 \cdot h} \quad (9.25)$$

10. Laskennalliset menetelmät

Aikojen kuluessa on kehitetty lukuisia menetelmiä koneen suorituskyvyn arvioimiseksi. Seuraavassa esitellään joitain tunnettuja menetelmiä.

10.1. WES-menetelmä

WES-menetelmä on käytetyin menetelmä pyörän (koneen) suorituskyvyn arvioimiseksi. Menetelmän on kehittänyt Yhdysvaltain armeijan tutkimuslaitos, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi 1950-luvun lopulla. WES-menetelmässä mitataan maan tunkeumavastus, jonka oletetaan olevan riippuvainen maan koheesiosta tai kitkasta, ja täten tunkeumavastusarvoa käsitellään eri tavoin eri maatyypeillä. Perusmenetelmässä määrättiin empiirisin kokein koneen liikkumiskyvyn, koneen ominaisuuksien ja tunkeumavastuksen väliset riippuvuudet. Mallia on myöhemmin täydennetty ja se on yhä edelleen pohjana mm. NATO Reference Mobility Model'ille (NRMM). Tutkimukset on tehty 1960-luvun koneilla, ja tästä syystä empiirisesti määrätty mallit soveltuvat huonosti nykyisille kehittyneemmille koneille ja niiden teloille tai renkaille. Eri tutkijat ovat kehittäneet menetelmää edelleen ja niistä esimerkkeinä Turnagen (1972) ja Wismer & Luth'in (1973) mallit. Mallit sopivat parhaiten vanhempimallisille ristikudosrenkaille. Apu-suureina käytetään dimensiotomia Clay ja Sand Numeric'ia¹⁴.

$$N_c = \frac{C \cdot b \cdot d}{W} \quad (10.1)$$

$$N_{ci} = \frac{C \cdot b \cdot d}{W} * \sqrt{\frac{\delta}{h}} * \frac{1}{1 + \frac{b}{2 \cdot d}} \quad (10.2)$$

$$N_s = \frac{G \cdot (b \cdot d)^{3/2}}{W} * \frac{\delta}{h} \quad (10.3)$$

jossa

¹⁴ Jos penetrometriarvo on lb/sq.in niin muutkin arvot on annettava samoissa yksiköissä

N_c	on Clay Numeric, Clay Mobility Number, apusuure pyörän suorituskyvyn arvioimiseksi kosteilla ja märillä koheesiomailla
N_{ci}	Korjattu Clay Numeric, korjattu Clay Mobility Number, apusuure pyörän suorituskyvyn arvioimiseksi kosteilla ja märillä koheesiomailla
N_s	Sand Numeric, Sand Mobility Number, apusuure pyörän suorituskyvyn arvioimiseksi kuivilla kitkamailla (hiekkä)
C	tunkeumavastus, kPa
G	tunkeumavastusgradientti hiekassa, kPa ¹⁵
b	renkaan leveys, m
d	renkaan läpimitta, m
W	rengaskuorma, kN
δ	litistymä, m
h	rengasosan korkeus, m

Clay ja Sand Numeric'ia käytetään selittävänä muuttujana kehitettäessä kulkukelpoisuusmalleja mittausaineistosta. Selitettävät muuttujat ovat tartuntakerroin (T/W), nettovetokkykerroin (T_N/W) ja suhteellinen painuma (z/d). Eri tutkijat ovat kehittäneet empiirisiä malleja käyttäen Clay ja Sand Numeric'ia.

Turnage (1972) kehitti seuraavat mallit vierintävastuksen ja tartunnan laskemiseksi 20% luistolla

$$\mu_T = 0.8 - \frac{1.31}{N_{ci} - 2.45} \quad (10.4)$$

$$\mu_R = 0.04 + \frac{0.20}{N_{ci} - 2.50} \quad (10.5)$$

Wisner & Luth'n (1973) mallilla voidaan laskea vierintävastus ja tartunta eri luistoilla

$$\mu_R = 0.04 + \frac{1.2}{N_c} \quad (10.6)$$

$$\mu_T = 0.75 * (1 - \exp^{-0.3 * N_c * S}) \quad (10.7)$$

¹⁵ Tarkemmissa malleissa G on korvattu efektiivisellä gradientilla G_e tai G_{ey} , jotka ottavat huomioon paremmin hiekan kosteudesta ja tiivyydestä aiheutuvan vaihtelun (Turnage 1984)

jossa

N_{ci}	on korjattu Clay Mobility Number (Malli 10.2)
N_c	Clay Mobility Number (Malli 10.1)
C	tunkeumavastus, kPa
b	renkaan leveys, m
d	renkaan läpimitta, m
W	rengaskuorma, kN
δ	litistymä, m
h	rengasosan korkeus, m

10.2. Bekker-menetelmä

Terramekaniikan suuria nimiä on puolalaissyntyinen Yhdysvaltoihin muuttanut Gregory Bekker (1905-1989), joka työskenteli pitkään Yhdysvaltain armeijan Land Locomotion Laboratory'ssa Detroitissa siirtyen General Motors'in tutkimuslaitokseen kehittämään kuuajoneuvoa. Hän on kirjoittanut tunnetut oppikirjat Off-the-Road Locomotion, Research and Development in Terra-mechanics (1960) ja Introduction to Terrain-Vehicle Systems (1969). Bekker-menetelmää voidaan pitää puolisolvellettuna tieteenä, sillä hän sovitti maamekaniikan teorioita laboratoriossa tehtyihin havaintoihin kehittäen laskentaa varten uusia malleja. Erityisesti plastisuusmenetelmän kannattajat ovat kärkevästikin arvostelleet Bekkerin malleja tuomien ne teorioiltaan vääriksi, jotka sattumalta antavat oikeita tuloksia (esim. Karafiath & Nowatski 1978). Bekker-menetelmä on kuitenkin osoittautunut hyväksi ratkottaessa käytännönläheisiä maastoliikkuvuuden ongelmia.

Periaatteessa menetelmä perustuu maan kantavuusvakioiden mittaamiseen Bevametrilla. Bevametri koostuu eri kokoisista kuormituslevyistä, joilla mitataan painuma/kuormitussuhde painuman arvioimiseksi ja leikkauslujuusrenkaasta, jolla mitataan maan leikkausjännitystä ja vastaavaa siirtymää. Yleensä maan kantavuuden ajatellaan riippuvan pintapaineesta, mutta se riippuu myös kuormituspinnan muodosta ja jäykkyydestä. Puhtailla koheesiomailla painuma on riippuvainen pintapaineesta, mutta kitkamailla pintapaineen ja renkaan leveyden funktio. Pyörän painuma voidaan laskea kellunnan (*flotation*) avulla

$$z = \sqrt[n]{\frac{p}{\frac{k_c}{b} + k_\phi}} \quad (10.8)$$

jossa

z	on renkaan painuma, m (kellunta, <i>flotation</i>)
p	pintapaine, kPa
k_c	muodonmuutosmoduulin koheesiokomponentti
b	renkaan leveys, m
k_ϕ	muodonmuutosmoduulin kitkakomponentti
n	painumaeksponentti

Vierintävastus arvioidaan painumaan perustuen maan tiivistymiseen (*compaction*) ja työntämiseen (*bulldozing*) tarvittavan työn määrällä. Pyörän kehittämä tartunta arvioidaan leikkauslujuusrengasmittauksista laskettujen maan muodonmuutosparametrien avulla. Bekker sovelsi vaimenevan värähtelyn mallia sovittaakseen erikoisesti koheesiomaalajeilla tavattavan leikkauslujuus-maksimihuipun malliin. Tällöin päädytään kuitenkin verraten monitekijäiseen malliin. Mikäli tyydytään jäännöslujuuteen, malli yksinkertaistuu seuraavaksi malliksi (10.9) (Janosi & Hanamoto 1961):

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = 1 - \exp^{-(j/K)} \quad (10.9)$$

jossa

- τ on leikkauslujuus, kPa
- τ_{\max} leikkauslujuuden maksimiarvo, kPa
- j siirtymä, m
- K jännitysvakio

10.3. Plastisuusteoria

Tunnetuin plastisuusteoriaa terramekaniikan tutkimuksiin soveltaneista tutkijoista on Karafiath, ja hänen pääteoksensa on yhdessä Nowatzki'n (1978) kanssa kirjoittama Finite Element menetelmän sovellutukseen opastava teos Soil mechanics for offroad vehicle engineering. Plastisuusteoriaa soveltavissa menetelmissä tutkitaan pyörän alle syntyviä murtotiloja ja niiden avulla analysoidaan vierintävastus ja tartunta.

10.4. Rowlandin menetelmä

Rowlandin (1972) menetelmässä lasketaan ensin keskimääräinen maksimipintapaine (MMP), mallit (8.7 - 8.9). Vehicle Cone Index, joka on alhaisin koneelle sallittu CI- arvo lasketaan malleilla (10.10) ja (10.11).

Yhtä ajokertaa kohti, tekninen kulkukelpoisuus

$$VCI = \frac{0.58 * MMP}{1000} \quad (10.10)$$

Viittä ajokertaa kohti, operatiivinen kulkukelpoisuus

$$VCI = \frac{1.0 * MMP}{1000} \quad (10.11)$$

jossa

- VCI on alin koneelle sallittu CI-arvo, lb/sq.in
- MMP keskimääräinen maksimipintapaine, Pa

10.5. Schreinerin menetelmä

Schreiner (1967) tutki telakoneiden liikkumiskykyä turvemaidilla ja kehitti seuraavan mallin VCI:n laskemiseksi

$$VCI = 14 + \frac{0.0086 * W}{pp} \quad (10.12)$$

jossa

VCI on alin koneelle sallittu CI-arvo, lb/sq.in
pp molempien telojen piirin pituus, m

Turpeen tunkeumavastus tulee mitata kriittisestä kerroksesta, joka mitataan eri syvyyksiltä riippuen koneen massasta (taulukko 10.1).

Taulukko 10.1. Tunkeumavastuksen mittaussyvyys, kriittinen syvyys, eri ajoneuvopainoille.

Ajoneuvon paino, kN	Kriittinen syvyys, m
- 15	0,00 - 0,15
15 - 45	0,07 - 0,25
40 - 70	0,15 - 0,30
70 - 110	0,25 - 0,40

10.6. NIAE-menetelmä¹⁶

Dwyer (1984) tutki WES-menetelmän käyttökelpoisuutta Brittein saarilla maatalouskoneiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen ja esitteli pintapaineindeksin (luku 8.2 ja malli 8.5) ja siihen perustuvat empiiriseen aineistoon sovitetut koneen suorituskykykerroinmallit. NIAE-mallit soveltuvat parhaiten 1980-luvun maatalouskoneiden renkaille.

$$\mu_{TMAX} = 0.80 - \frac{0.92 * G}{C} \quad (10.13)$$

$$\mu_{T20\%} = 0.56 - \frac{0.47 * G}{C} \quad (10.14)$$

$$T_{EFF} = 78 - \frac{55 * G}{C} \quad (10.15)$$

$$\mu_R = 0.05 + \frac{0.29 * G}{C} \quad (10.16)$$

¹⁶ NIAE, National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, UK

jossa

μ_{TMAX}	on	maksimaalinen tartuntakerroin
$\mu_{T20\%}$		tartuntakerroin 20% luistolla
T_{EFF}		tractive efficiency, %
μ_R		vierintävastuskerroin
G		pintapaineindeksi ¹⁷
C		tunkeumavastus (penetrometriarvo), kPa

10.7. RARDE-menetelmä¹⁸

Maclaurin (1990) antaa seuraavat kokeelliset mallit WES-parametreille. Mallit soveltuvat parhaiten 1980-luvun sotilasajoneuvojen vyörenkaille. Nettotartunta on laskettu 20% luistolle.

$$\mu_R = 0.017 + \frac{0.453}{N_{Ci}} \quad (10.17)$$

$$\mu_{TN} = 0.8 - \frac{3.2}{N_{Ci} + 1.81} \quad (10.18)$$

$$z = \frac{d * 0.224}{N_{Ci}^{1.25}} \quad (10.19)$$

jossa

μ_R	on	vierintävastuskerroin
N_{Ci}		wheel numeric
μ_{TN}		nettotartuntakerroin
z		painuma, m
d		pyörän halkaisija, m

10.8. WES-menetelmä kahdelle kulkukerralle

Ajoneuvossa yleensä on vähintään kaksi akselia joten toinen pyörä kulkee ensimmäisen jäljessä ainakin osan matkasta. Verratessaan pyörän suorituskykyä 1. ja 2. ajokerralla erilaisilla peltomailla Dwyer ym. (1977) saivat seuraavat tulokset:

$$\frac{\mu_{T1}}{\mu_{T2}} = 1 + \frac{0.620}{N_{Ci}} \quad (10.20)$$

¹⁷ Pintapaineindeksi lasketaan mallilla 8.5

$$G = \frac{W}{b*d} \sqrt{\frac{h}{\delta}} \left(1 + \frac{b}{2*d}\right)$$

¹⁸ RARDE, Royal Armament Research & Development Establishment, Chertsey, Surrey, UK

$$\frac{\mu_{R1}}{\mu_{R2}} = 1 - \frac{0.896}{N_{Ci}} \quad (10.21)$$

$$\frac{\mu_{TN1}}{\mu_{TN2}} = 1 + \frac{0.473}{N_{Ci}} \quad (10.22)$$

jossa

μ_{T1}/μ_{T2}	on	tartunnan lisääntyminen toisella kulkukerralla
μ_{R1}/μ_{R2}		vierintävastuksen väheneminen toisella kulkukerralla
μ_{TN1}/μ_{TN2}		tractive efficiencyn paraneminen toisella kulkukerralla
N_{Ci}		korjattu Clay Mobility Number (Malli 10.2)

Ero 1. ja 2. ajokerran välillä on vähäinen, ja koska metsäkoneen pyörät usein kulkevat hieman eri rataa, niin käytännön laskelmissa voidaan useampiakselisen koneen kaikkien pyörien ajatella käyttäytyvän kuin pyörä ensimmäisellä ajokerralla. Tällöin laskelmat sisältävät pienen varmuusmarginaalin.

11. Maastoliikennöinnin ekologia

Kolmas taso tai vaihe maastoliikennöinnin suunnittelussa käsittää kuljetusympäristö-yhteisvaikutuksen. Kestävä metsätalous edellyttää maan tuottokyvyn säilyvän vähintään ennallaan korjuuoperaation jälkeen. Tämä edellyttää, että maastovauriot, joita koneen liikkuminen aiheuttaa, ovat joko ohimeneviä tai merkityksettömiä. Kannattava metsätalous edellyttää, että operaatioiden on oltava taloudelliselta tulokseltaan positiivisia. Taloudellisiin laskelmiin tulee tällöin liittää mahdollisten ympäristövaurioiden kustannukset. Tekninen päätöksenteko edellyttää, että päätöksentekoon liittyvät tekijät tunnetaan riittävän hyvin, muutoin päätöksestä tulee asenteellisesti tai tunteenomaisesti väritynyt. Tietämys maastovaurioista ja niiden merkityksestä on vielä verraten vähäistä mutta lisääntyy tutkimuksen myötä. Terramekaniikkaa voidaan myös soveltaa puutavarakuljetusten ekologiaan.

Maastovauriot voidaan luokitella joko maaperävaurioiksi tai puustovaurioiksi. Maastovaurioissa maaperän kasvukunto alenee lähinnä maaperän tiivistymisen tai huuhtoutumisen vuoksi. Senyk (1990) listaa seuraavat puunkorjuun aiheuttamat maaperävauriot

- maa-aineksen siirtyminen paikasta toiseen
- mineraalimaan paljastuminen
- maa-aines tiivistyy
- maaperä erodoituu
- maa-aineksia huuhtoutuu pois
- ravinteeton kova maakerros tai pohjakallio paljastuu
- ravinteet vähenevät

Puunkorjuun maaperävauriot voivat olla hyvin monitahoiset riippuen maaperästä, topografiasta, ilmastosta ja puunkorjuumenetelmästä sekä siinä käytetyistä koneista.

Puustovauriot syntyvät kasvutappioista, jotka ovat seurausta metsäkoneen aiheuttamista runko- ja/tai juurivaurioista. Tappiot syntyvät sekä laadun alenemisesta että lahon aiheuttamista menetyksistä (Sirén 1990).

11.1. Raiteistuminen

Raiteistumisella tarkoitetaan koneen pyörien aiheuttamia maaperämuutoksia. Raiteistuminen johtuu painuman ja tartunnan aiheuttamista jännityksistä maaperään. Raiteistumisen suuruutta voidaan arvioida painuman ja nettovetokitkan avulla. Jos arvioitu painuma jää pieneksi ja nettovetokitka on suuri, oletettava raiteistuminen on vähäistä. Jos sensijaan painuma kasvaa suureksi, niin samalla vierintävästus kasvaa. Jotta kone pystyy kehittämään tarpeellisen tartunnan niin luiston on lisääntyttävä. Tällöin pyörään siirtyvä teho kasvaa, ja teho kuluu maaston "repimiseen", eli raiteistumisen täytyy kasvaa.

Raidesyvyyttä voidaan arvioida painuman+luistopainuman avulla. Kasvipeitevauriot ovat enemmän luistosta kuin pintapaineesta riippuvia. Erittäin tärkeää on, ettei maan pintakerros leikkaannu rikki. Jos pintakerroksen leikkauslujuus ylittyy, pyörä painuu syvemmälle lisäten raiteistumista.

Turvemaalla Ala-Ilomäki & Saarilahti (1990) saivat raiteistumiselle seuraavan mallin:

$$RD = \frac{0.0350 * p * S^{1.41}}{CI^{0.54}} \quad (\text{lb/sq.in}) \quad (11.1)$$

$$RD = \frac{0.0122 * p * S^{1.41}}{CI^{0.54}} \quad (\text{kPa}) \quad (11.2)$$

jossa

- RD on raidesyvyys (5 ajokerran jälkeen), m
- p renkaan laskennallinen kosketuspaine, kPa
- S luisto
- CI Cone index, lb/sq.in tai kPa

Mallilla (11.2) lasketut raidesyvyyksien estimaatit¹⁹ sopivat verraten hyvin yhteen Myhrman'in (1990) empiirisissä kokeissa turvemailla mitaamien raidesyvyyksien kanssa (taulukko 11.1).

¹⁹ Oletusarvoina käytetty CI = 600, S=0.35 < 50 kPa ja 0.45 > 80 kPa pintapaineille. Suurempi luisto johtuu oletetusta suuremmasta vierintävästuksesta

Taulukko 11.1. Raidesyvyys turvepellolla 10 ajokerran jälkeen (Myhrman 1990).

Kone	Kokonais- massa, t	Laskennallinen pintapaine, kPa		Raidesyvyys, mm	
		Etuosa	Takaosa	Mitattu	Malli (11.1)
Kuormakoneet					
FMG 678 Mini	15,8	59	55	47	47
Valmet 828	14,8	54	54	45	43
Valmet 838	20,1	45	79	82	77
FMG 250 ÖSA	22,0	47	96	106	110
FMG 250 ÖSA	22,8	37	67	47	54
Korjuukoneet					
FMG 0470	4,9	63	35	35	41
Valmet 901	11,8	66	59	77	53
FMG Super	13,5	55	41	60	44

Koska luisto on ilmeisen vaarallista maastolle, sen arvioimiseen ja luiston vähentämiseen tulisi kiinnittää huomiota. Pintapaineen vähentäminen yleensä vähentää luistoa, mutta joissain olosuhteissa luisto voi lisääntyäkin. Aggressiiviset renkaat lisäävät tartuntaa vähentäen luistoa mutta toisaalta lisäävät maastovaurioita. Maastovaurioita voidaan vähentää kehittämällä vetolaitteita (renkaita, teloja) maastoa vähemmän vaurioittavaksi ja tasaamalla eri pyörien vääntömomenttia. Luistoa voidaan vähentää käyttämällä luistonrajoittimia tai hydraulista voimansiirtoa. Myös empiirisesti on todettu, että luistoa pienentävät koneratkaisut aiheuttavat matalamman raiteistumisen (Myhrman 1990).

Raiteistuminen katkoo puiden juuria, ja syvät (< 10 cm) raiteet katkovat jo käytännössä puiden ravinnonsaannin raiteiden väliseltä alueelta. Jos raideväli on 1,5 m ja tieväli on 30 m, niin 5% maan ravinteista jää puuston saavuttamattomiin. Lisäksi kasvutappioita lisää puiden juuriston pieneneminen ja mahdollinen lahon aiheuttama kasvutappio. Toisaalta raiteiden väliin voi helposti syntyä taimiainesta, koska puiden juuristokilpailu on vähentynyt.

11.2. Tiivistyminen

Koneiden koon ja massan kasvaessa maaperän tiivistyminen renkaan alla on tullut maataloudessa ongelmalliseksi, koska sadon suuruuden on todettu korreloivan negatiivisesti maan tiheyden kanssa. Koneiden koon suurentuessa maapohjan tiivistymistä on koetettu pienentää kontrolloimalla pintapainetta käyttämällä leveämpiä renkaita, mutta tällöin ongelmaksi on tullut syvempien kerrosten tiivistyminen.

Myös meisälalla tiivistymisen on epäilty ja joskus todistettukin aiheuttavan kasvutappioita (esim. Batardy & Abeels 1985). Senyk (1990) arvioi avohakkuun jälkeisen kasvutappion olevan n. 10-15% kiertoajan aikana. Useassa tutkimuksessa on kuitenkin verrattu vain raiteeseen ja raiteen ulkopuolelle istutetun taimen kasvua, ja poikkeuksetta raiteessa kasvanut taimi on kehittynyt hitaammin. Maaperän tiivisty-

miseen erityisesti trooppisten alueiden istutusmetsissä on suhtauduttava vakavasti, koska kokorunkojuontoa käytettäessä suuri osa avohakkuualasta joutuu lisäkuormituksen alaiseksi. Tiivistyminen pienentää veden imeytymisnopeutta maahan, joten pintavirtaus ja erosioriski lisääntyvät.

Maan tiivistyessä juurten kasvu vaikeutuu. Senykin (1990) mukaan maan tiheys 1200 - 1500 kg/m³ on kriittinen suurimmalle osalle metsäpuita. Tämä tiheys saavutetaan n. 100-125 kPa kosketuspaineella jo muutaman ajokerran jälkeen. Koneiden aiheuttamaa tiivistymistä voidaan myös arvioida kuvan 38 avulla. Siinä on annettu maan huokostilavuus (%) maan kosteussuhteen ja kuormitusluvun funktiona. Kuormitusluku lasketaan pintapaineen ja kosketuskertojen tulona. Jos maan ilmatila laskee alle 10-12 %:n, niin juurten kasvu häiriytyy (Löffler 1979). Maan ilmatila n_{AIR} voidaan laskea seuraavalla mallilla

$$n_{AIR} = 100 - (2.7 - 0.027 * n) * (37 + W) \quad (11.3)$$

jossa

n_{AIR}	on ilmatila, %
n	huokostila, % (kuvasta 38)
W	maan kosteussuhde, %

Maan kuivatiheys kuormaluvun (pintapaine*kuormitusten lukumäärä) funktiona voidaan laskea Raghavan'in ym. (1977) Kanadan kivennäismaille kehittämän mallin²⁰ avulla

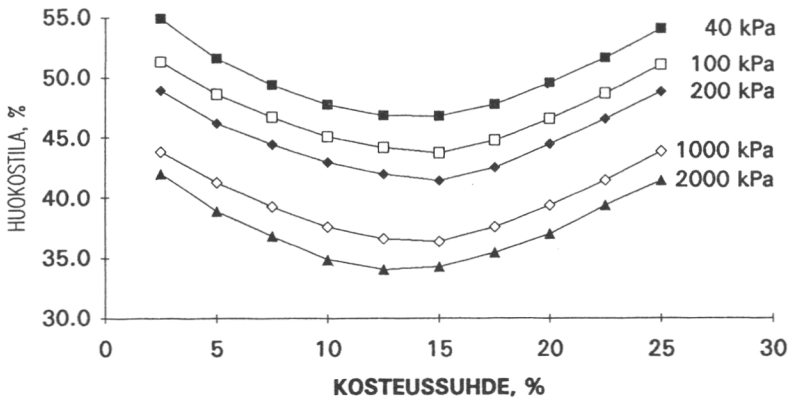
$$\gamma_{dry} = A + B * \ln(p * N) + C * \ln(W) \quad (11.4)$$

jossa

γ_{dry}	on maan kuivatiheys, g/cm ³
A, B, C	kertoimet taulukosta 11.2
p	pintapaine, kg/cm ²
N	kuormituskertojen lukumäärä
W	maan kosteussuhde, %

Koska maan tiivistyminen on suurin optimikosteudessa W_{OPT} (esim. kuva 38) maan tiivistyminen lisääntyy aluksi kosteuden noustessa mutta alkaa sitten taas laskea. Mikäli maan optimikosteutta ei tunneta, lasketaan tiivistyminen molemmille tapauksille ($W < W_{OPT}$) ja ($W > W_{OPT}$) ja tiivistyneen maan kuivatiheydeksi valitaan alempi luku. Samalla nähdään, liikutaanko optimikosteuden ylä- vai alapuolella. Mallista 11.4 voidaan todeta, että hiekkamaissa tiivistyminen on suurempaa kuin savimaissa.

²⁰ Huomaa, että poikkeuksellisesti ei käytetä SI-yksiköitä



Kuva 38. Maan huokostila kosteussuhteen ja kuormitusluvun funktiona (Löfflerin 1979) mukaan.

Taulukko 11.2 Kertoimet malliin (11.4) maan tiheyden laskemiseksi (Raghavan et al. 1977).

Sovellutusalue	Kerroin		
	A	B	C
Savipitoiset koheesiomaat			
$W < W_{OPT}$	0,9622	0,0651	0,0121
$W > W_{OPT}$	1,8579	0,0766	-0,2391
Hiekkapitoiset kitkamaat			
$W < W_{OPT}$	1,1936	0,0880	0,1182
$W > W_{OPT}$	2,7660	0,0880	-0,4624

11.3. Juuristo ja puustovauriot

Juuristovauriot syntyvät, kun pyörän aiheuttama leikkausjännitys ylittää juuriston (juuristokerroksen) leikkauslujuuden. Lävistysmurtumassa maaperä juuristokerroksen alla on heikkoa, ja pyörä painuu syväälle katkaisten juurimaton. Leikkausmurtumassa maan pinnan suuntainen leikkausvoima on suurempi kuin juurimaton leikkauslujuus. Tilanne on tyypillinen kantavimmilla mailla, joissa tarvitaan suurta tartuntaa kuten ylämäissä tai kiihdyttäessä. Juuristovauriot ylämäissä ovat oletettavasti suurempia kuin tasaisella. Yleisin vaurio on molempien tyyppien yhdistelmä, huono kantavuus lisää painumaa ja vierintävästusta, joten sekä pysty- että vaakasuuntainen siirtymä tulevat suureksi.

Runkovauriot syntyvät koneen tai kuorman osuessa puun runkoon. Osa vaurioista syntyy lastatessa ja on siten varsinaisen terramekaniikan alueen ulkopuolella, mutta erityisesti heilunnasta johtuvien koneen liikkeiden aiheuttamia vaurioita voidaan tarkastella terramekaanisin mallein. Esimerkkinä ajouran leveneminen estekorkeuden

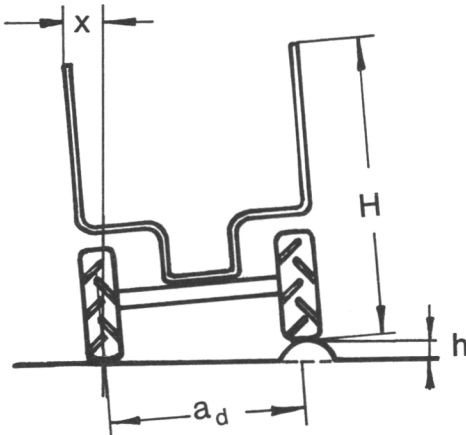
funktiona (kuva 39). Mallilla (11.5) voidaan laskea että akseliväliltään 2,0 m ja korkeudeltaan 4,0 m kuorman uloimman pisteen vaatima lisätila kasvaa 0,125 m kun pyörä ylittää 0,25 m korkuista estettä. Käytännössä tilan tarve on vielä suurempi, koska kuormitus heiluntasuunnan puoleisella renkaalla kasvaa, jolloin painuma ja liistymä kasvavat lisäten kallistumaa.

$$x = a_d * \frac{h}{H} \quad (11.5)$$

jossa

x on	kuorman vaatima heilahdustila, m
a_d	akseliväli, m
h	estekorkeus, m
H	kuorman korkeus, m

Osa puunkorjuun vaurioista syntyy kaatovaiheen tai kuormauksen aikana, joten vain osa vaurioista syntyy kuljetuksen aikana. Vaurioiden evaluointi on siten enemmän varsinaisen metsäteknologian aihepiiriin kuuluvaa kuin suppeaan terramekaniikkaan kuuluvaa.



Kuva 39. Kuormakoneen heilunnan vaatima ajouran levitys.

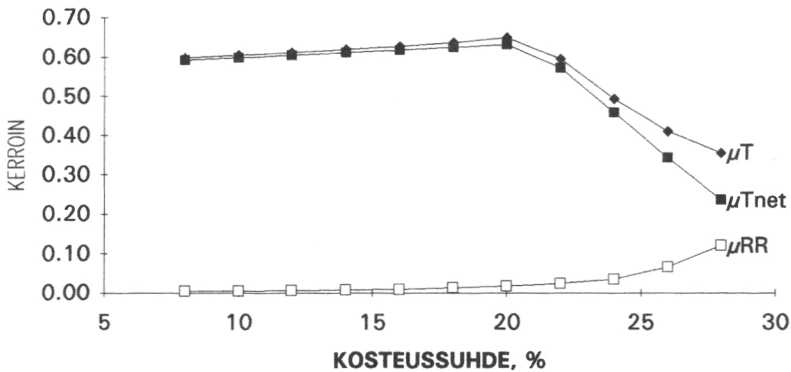
12. Kulkukelpoisuuden vuodenaikainen vaihtelu

Koska maapohjan lujuusparametrit ovat sidoksissa ilmastollisiin tekijöihin, kulkukelpoisuudelle voidaan laatia tarkkuudeltaan jonkinasteisia estimaatteja seuraamalla säätilan kehitystä. Seuraavassa tarkastellaan yleisesti kulkukelpoisuuden vuodenaikaisista vaihtelua.

12.1. Roudan sulaminen

Kulkukelpoisuuden kannalta ongelmallisin vuodenaika on kevät, koska tällöin maan

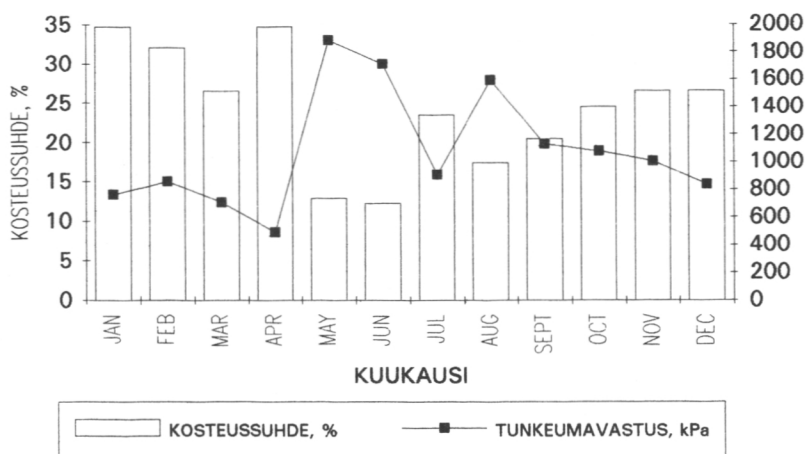
pintaosien kosteus on suurimmillaan. Lumen sulamisvedet eivät imeydy syvemmälle routakerroksen läpi ja roudan sulaessa jää muuttuu vedeksi lisäten sulamiskerroksen vesipitoisuutta. Karkeilla maalajeilla, joissa vesipitoisuuden, kantavuuden ja leikkauslujuuden välinen riippuvuus on pienempi, roudan sulaminen ei aiheuta selvästi havaittavaa muutosta kantavuudessa. Sensijaan hienojakoisilla maalajeilla lujuusominaisuudet muuttuvat hyppäyksenomaisesti, kun maan juoksuraja ylitetään. Tällöin pyörän suorituskyky huononee jyrkästi (kuva 40, Shoop 1990). Maan sulaessa roudan päälle kehittyy paksuneva juoksurajakosteuden ylittänyt kerros, jonka kantavuus ja leikkauslujuus ovat huonot. Sulan kerroksen paksuus ja routakerroksen ominaisuudet määräävät pyörän suorituskyvyn, sillä rengas kaivautuu helposti sulan kerroksen läpi roudan pintaan. Tällaisissa olosuhteissa juuristokerroksen ominaisuudet ovat ratkaisevat, ja toisaalta tällaisissa olosuhteissa juuristovauriot ovat suurimmillaan. Liikennöintiä maaperällä, jonka kosteus ylittää juoksurajan, tulisi siten välttää.



Kuva 40. Pyörän suorituskyky maan juoksurajalla (Shoop 1990).

12.2. Kesäliikennöinti

Kesäaikana paikallinen maaperän kosteusvaihtelu on riippuvainen sateista. Kesäelokuussa maaperä on kuivimmillaan johtuen suuresta haihdunnasta, ja tällöin kulkukelpoisuus on hyvä. Seuraamalla sateiden esiintymistä ja maan paikallisia kosteusvaihteluita voidaan laatia verraten hyviä alueellisia kulkukelpoisuusanalyseja. Kuvassa 41 esitetään CI-arvon vuosittainen vaihtelu ja kuukausittainen sademäärä Pohjois-Saksassa (Hinze 1990).



Kuva 41. CI-arvon ja sademäärän kuukausittainen vaihtelu Pohjois-Saksassa (Hinze 1990).

12.3. Talviliikennöinti

Talviliikennöinnin perustekijät ovat routa- ja lumikerroksen paksuudet. Ne taas vaihtelevat suuresti vuodesta toiseen sääoloista riippuen. Talviliikennöinnissä voidaan erottaa kaksi tyyppiluokkaa, kivennäismaat ja pehmeiköt (pääosin turvemaita).

12.3.1. Kivennäismaat.

Kivennäismaiden talviliikennöintiin vaikuttaa ratkaisevasti lumipeitteen satamisajan kohta. Syksyllä maa on yleensä märkä syyssateiden johdosta ja maapohjan kantavuus on yleensä huono. Mikäli ilmat kylmenevät alle 0°C , alkaa maan pinta routaantua ja jo muutaman cm:n paksuinen routakerros kantaa pyöräpaineen, jolloin kulkukelpoisuus paranee. Myös tartunta paranee, koska näennäinen leikkauslujuus kasvaa roudan sitoessa pinnan epätasaisuudet paikoilleen. Lumi on hyvä eriste. Jos lumi sataa maahan ennenkuin maa on riittävästi kylmennyt routa sulaa ja maapohjan kulkukelpoisuus pysyy huonona koko talven. Eräänä keinona on tiivistää lumi ajourilla ennen kuljetusten alkamista ja näin jouduttaa maan jäätymistä.

Ohut lumikerros pienentää maaston epätasaisuuksia, joten ajonopeus saattaa aluksi kohota lumikerroksen paksutessa. Lumikerroksen paksuuntuessa lumen estevastus alkaa kuitenkin pienentää ajonopeutta, koska tartunta heikkenee ja konetehosta pääosa menee lumivastuksen voittamiseen. Paksu lumikerros lisää vierintävastusta, joten paksuluminen talvi on yleensä kulkukelpoisuudeltaan huono. Ohuen lumikerroksen alla routa paksuntuu ja kulkukelpoisuus paranee talven mittaan, varsinkin jos pakkasumma on korkea.

12.3.2. Turvemaat

Monet turvemaat, varsinkin luonnontilaiset, ovat liikennöitävissä ainoastaan kun routakerros on riittävän paksu. Roudan murtolujuus kasvaa vesipitoisuuden kasvaessa, joten luonnontilaisten soiden routakerros on murtolujuudeltaan suurempi. Toisaalta ojitetuilla turvemaidella kuivakuori lisää kantavuutta, joten yksinomaan ojituksen perusteella ei turvemaan kokonaiskantavuutta voida arvioida. Turpeen ominaislämpö on korkea ja tästä syystä suot paksun lumipeitteen alla pysyvät sulina. Talviliikkuvuutta voidaan huomattavasti parantaa tiivistämällä lumi alkutalvesta, jolloin suolle muodostuu riittävä routakerros. Samoin voidaan tyhjällä koneella polkea urat edeltäkäsien. Routaannuttuaan urat kantavat kuormatun koneen.

13. Maastoluokitus

Maastoluokituksen tavoitteena on vähentää informaation määrää ja esittää sitä helpommin hallittavassa muodossa. Ennen tietokoneaikaa, informaatioyhteiskuntaa, tavoite oli erittäin relevantti. Kuitenkin luokiteltaessa aina osa primääritiedosta katoaa ja tiedon arvo vähenee. Maastoluokitus tehdään yleensä jotain tarkoitusta varten. Metsäteknologiassa luokitus perustuu yleensä käytössä olevia koneita tai menetelmiä varten.

Suomessa nykyään käytössä oleva taksavihkojen maastoluokitus palvelee vain sopimusten noudattamista. "Upottavuutta esiintyy jonkin verran" voidaan todeta yleensä vasta operaatiohetkellä ja taksaa korjata lisääntyneen työajan mukaisesti. Tällainen luokitus on myös sidoksissa koneeseen, lähinnä pyörävarustukseen.

Metsätaloudellisia operaatioita varten tarvitaan tieto

- maasta
- maastosta

Erilaiset operaatiot edellyttävät hieman erilaatuista tietoa maasta

- kuljetus ja liikennöinti: kantavuus,
- metsänviljely: muokattavuus
- tienrakennus: kaivettavuus, kantavuus

Kuitenkin muokattavuus, kaivettavuus, kantavuus jne. ovat sidoksissa maan perusominaisuuksiin, joten maalajien, raekoon, tiiviyden ja vesipitoisuuden kuvaus riittää eri operaatioiden arvioimiseksi.

Maaperää koskevan vähimmäisinformaation tulisi käsittää

- maalaji vähintään geoteknisen luokituksen mukaan
- viitteitä raekoosta, kivisyydestä
- orgaanisen aineksen, humuksen, juurien määrä
- vesipitoisuus
- kasvipeitekuvaus
- pehmeiköistä ja koheesiomaista, savesta, liejusta ja turpeesta mitattava leikkauslujuus ja/tai tunkeumavastus

Näiden avulla voidaan vierintävastus, painuma, tartunta ja nettovetokyky arvioida riittävän tarkasti.

Maastoa koskevan informaation tulisi käsittää maan pintaprofiilin kuvauksen. Maan pinnan epäsäännöllisyydet voidaan ilmaista aaltofunktioiden tiheyksinä, ja ne vuorostaan sopivat hyvin heilunnan ja estevastuksen analyysiin. Havainnollisempaa on ilmoittaa esteitten lukumäärien ja korkeuksien jakaantumia. Koska esteen muodolla on myös vaikutus, tulisi kannot ja terävät esteet sekä kivet ja pyöreähköt esteet erikseen. Rinteen yleiskaltevuudet ja pituudet olisi myös ilmoitettava, koska koneet voivat kineettisen energian avulla selviytyä lyhyistä rinteistä mutta eivät pitkistä.

Lumen ominaisuudet tulisi kartoittaa riittävästi, vähintään mittaamalla tiheyksiä ja lumikerroksen paksuutta ja havainnoimalla lumen rakennetta. Testiä edeltävät ja testin aikaiset sääsuhteet tulee myös kirjata siinä määrin kuin niillä on merkitystä.

Soveltamalla terramekaniikkaa maastoluokitukseen voidaan kehittää dynaamisia maastoluokitusmalleja, joilloin säätilatietojen päivityksellä voidaan ennustaa alueeltaista kulkukelpoisuutta. Toistaiseksi alueellisia ennustusmalleja on kehitelty vasta tutkimustarkoituksiin, mutta kehitys johtaa yhä täydellisempiin maasto- ja maastokonemalleihin.

Kirjallisuus

- Abebe, A., Tanaka, T. & Yamazaki, M. 1989. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. *Journal of Terramechanics* 26(2):139-148.
- Aho, K., & Kättö, J. 1971. Experiment for developing a method how to measure and evaluate the rocking of the forest tractor. Tiivistelmä: Tutkimus metsätraktorin heilumisen mittaus- ja arvostelumenetelmän kehittämiseksi. Finnish Research Institute of Engineering in Agriculture and Forestry, VAKOLA, Helsinki. Study Report 9. 41 s.
- Ala-Ilomäki, J. & Högnäs, T. 1987. Painonjakauman vaikutus kuusipyöräisen kuormatraktorin raiteenmuodostukseen turvemaalla. Metsähallitus, Kehittämisyhteisö, Hirvas. Koeselostus 246. 10 s.
- & Saarilahti, M. 1990. Rut formation on peat soil - Experience from a forced-slip wheel tester. *Proceedings of the 10th ISTVS Conference Kobe, August 20-24, 1990. II:457-466.*
- , Saarilahti, M., Toikka, M. & Hallikainen, M. 1989. Microwave snow sounding for trafficability analysis. *Proc SAE Subzero engineering conditions conference, Rovaniemi 11-13 January 1989. 6 s.*
- Amarjan, L. S. 1972. Metody rasceta prognosti u svigaemosti torfjanyh gruntov. Materialy k pervoj vsesojunoz konferencii po stroitel'stvu na torfjanuk gruntah. Kalinin. Cast 1:69- 90.
- Batardy, I. J. & Abeels, P. F. J. 1985. Forest harvesting operations and soil damages. University Catholique de Louvain, Department of Genie Rural. 73 s.
- Beck, R. R. 1978. Parametric analysis of the off-road-performance of a special tracked test vehicle. *Proc 6th ISTVS Conf Vienna, Austria, August 22-25, 1978, III:1145-1176.*
- Bekker, M. G. 1960. Off-the-road locomotion, research and development in terramechanics. University of Michigan Press, Ann Arbor. 220 s.
- 1969. Introduction to terrain-vehicle systems. University of Michigan Press, Ann Arbor. 846 s.
- Dwyer, M. J. 1984. Tractive performance of wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics* 21(1):19-34.
- , McAllister, M. & Evernden, D. W. 1977. Comparison of the tractive performance of a tractor driving wheel during its first and second passes in the sam track. *Journal of Terramechanics* 14(1):1-10.
- FAO 1977. Planning forest roads and harvesting systems. Forestry paper 2. Rome. 61 s.
- Frønsdal, J. 1985. Terrengekjørning med ulike skogsmaskiner. En praktisk og teoretisk analyse av terrengfaktorens innvirkning på maskinens stabilitet og hastighet. Summary: Off-road transport by different forest machines. A practical and theoretical analysis of effects of various terrain factors on the machine's travel speed and stability. Norwegian Forest Research Institute, Ås-NHL, Rapport 6/85. ISSN 0333-001X. 63 s.
- Gee-Clough, D. 1979. The effect of wheel width on the rolling resistance of rigid wheel in sand. *Journal of Terramechanics* 15(4):161-184.

- Grahn, M. 1990. Prediction of sinkage and rolling resistance for off-the-road vehicles considering penetration velocity. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. II: 371-381.
- Haarlaa, R. 1972. Lisättyjen konekomponenttien vaikutus metsätraktoreiden maastokelpoisuuteen. Summary: Effect of additional machine components on the mobility of forest tractors. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos, Tiedonantoja 9. 88 s.
- Helenelund, K. V. 1974. Maanrakennusmekaniikka. Teknillisen korkeakoulun ylioppilaskunta, TKY 137. ISBN 951-671-060-3. 277 s.
- Hinze, D. 1990. The influence of seasonal moisture changes on soil strength. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. I:107-116.
- Holm, C., Heiming, G. & Grahn M. 1990. A comparison of experimental and theoretical investigations of motion resistance and drawbar pull for vehicles in soft soil. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. II:359-370.
- ISO 1978. International standard ISO 2631. Guide for the evaluation of human exposure to whole-body vibrations. 15 s.
- ISTVS Standards. 1977. International Society for Terrain-Vehicle System Standards. Journal of Terramechanics 3(3):153-182.
- Janosi, Z. & Hanamoto, B. 1961. An analysis of pneumatic tire performance on deformable soil. Proceedings of the 1st ISVS Conference, Torino-Saint Vincent, 12-16 Giugno 1961: 707-726.
- Kaczmarek, R. 1990 Effect of varying suspension system designs upon tactical vehicle ride quality. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. III:911-919.
- Kahala, M. & Kuitto, P-V. 1986. Puutavaran metsäkuljetus keskikokoisella kuormatraktorilla. Metsäteho, moniste 25.4.1986. 26 s.
- Kaje L. 1968. Maaston kulkukelpoisuus. Summary: Terrain trafficability. Helsinki. 53 p.
- Karafiath, L. L. & Nowatzki, E. A. 1978. Soil mechanics for off-road vehicle engineering. Trans. Tech. Publications, Series on rock and soil mechanics 2:5. 515 s.
- Kitano, M., Watanabe, K. & Swagashira, K. 1981. An analysis of plane motion of articulated tracked vehicles. Proceedings of the 7th ISTVS Conference, Calgary, Canada, August 30-Sept 3, 1981. III:
- Komandi, G. 1990. Establishment of soil-mechanical parameters which determine traction on deforming soil. Journal of Terramechanics 27(2):115-124.
- Kuonen, V. 1983. Wald und Guterstrassen. Pfaffhausen, Switzerland. 743 s.
- Löffler, H. D. 1979. Recording and classification of soil conditions within the scope of terrain classification. IUFRO Symposium on Stand establishment techniques and technology, Moskwa and Riga. 15 s.
- Maclaurin, E. B. 1990. The use of mobility numbers to describe the in-field tractive performance of pneumatic tyres. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. II: 177-186.
- McNally, J. A. 1975. Trucks and trailers. Their application to logging operations. A reference manual. University of New Brunswick,

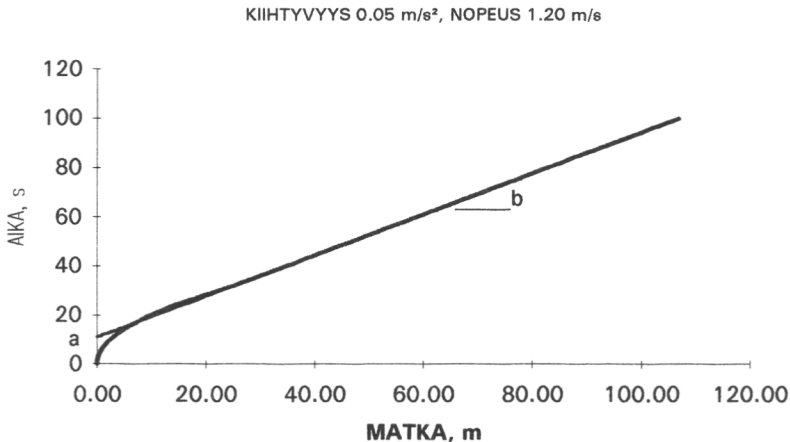
- Fredricton, Canada. 338 s.
- Mikkonen, E. & Wuolijoki, E. 1975. Pikatestausten suoritustekniikka. The technique of short term testing. *Metsätehon katsaus* 9. 5 s.
- Murfitt, A. W., McMullen, W. B., Baker Jr, M & McPhail, J. F. 1975. Design and construction of roads in muskeg in arctic and subarctic regions. *Proceedings of the 16th Muskeg Research Conference, October 7, 1975. NRCC, ACGR TM 116:152-185.*
- Myhrman, D. 1990. Factors influencing rut formation from forestry machines. *Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. II:467-475.*
- Nuttall Jr. C. J. & McGowan, R. P. 1962. Scale models of vehicles in soils and snows. *Proceedings of the 1st ISVS Conference, Torino-Saint Vincent, 12-16 Giugno 1961: 656-677.*
- Oida, A. 1979. Study on equation of shear stress-displacement curves. Kyoto University, Farm power and machinery laboratory, Report No 5.
- Qun, Y. & Guogang X. 1990. A new method for measuring shape and size of tire-soil contact zone. *Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. I:171-175.*
- Raghavan, G. S. V., McKeyes, E. & Baulieu, B. 1977. Prediction of clay soil compaction. *Journal of Terramechanics* 14(1):31-38.
- Ragot, M.J. 1976. Matériels et techniques de débardage à l'aide de véhicules à roues. *Cahiers du Centre Technique du Bois, Paris, Cahier 102, 64 s.*
- Rowland, D. 1972. Tracked vehicle ground pressure and its effect on soft ground performance. *Proceedings of the 4th ISTVS Conference, Stockholm-Kiruna, April 24-28, 1972. I:353-384.*
- SaariLahti, M. 1982. Tutkimuksia radioaaltonetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkukelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands. *Acta Forestalia Fennica* 176. 105 s.
- , Malilah, P., Mgalihya, E., Mrosso, D., Mwayangu, N. & Nduwayezu, B. 1987. Studies on timber cutting of tropical hardwood forest. Report delivered to Sikh Sawmills Ltd, Tanga, Tanzania. Sokoine University/Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos, Helsinki. 33 s.
- Salokhe, V.M., Gee-Clough, D. & Harjone. 1990. The measurement of forces under multiple cage wheel lugs. *Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. I:217-228.*
- Schreiner, B.G. 1967. A technique for estimating the performance of tracked vehicles in muskeg. *Journal of Terramechanics* 4(3):23-29.
- Schwanghart, H. 1990. Measurement of contact area, contact pressure and compaction under tires in soft soil. *Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. I:193-204.*
- Senyk, J.P. 1990. Effects of ground-based forest harvesting operations on soils and tree productivity. *Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. II:567-575.*
- Shishiuchi, M. 1990. Tractive performance of logging tractors on snow-covered grounds. *Bulletin of the Iwate University Forests* No. 21, Ueda, Morioka, Japan: 75-83.

- Shoop, S. 1989. Thawing soil strength measurements for predicting vehicle performance. Proc. Regional Canada-USA ISTVS Meeting April 1989, Victoria B.C. 18 p.
- 1990. Mechanisms controlling vehicle mobility on a thawing soil. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. I:301-311.
- Silvennoinen, U. & Haarlaa, R. 1971. Metsätraktoreiden liikkuvuus lumessa. Summary: The mobility of logging tractors on snow. *Silva Fennica* 5(2):145-167.
- Sirén, M. 1990. Cost of mechanized thinning to the stand - how to evaluate. Proc. IUFRO P4.02.01 Conference September 17-22, 1989, Hyytiälä, Finland. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 355: 23-40.
- , Ala-Ilomäki, J. & Högnäs, T. 1987. Harvennuksiin soveltuvan metsäkuljetuskaluston maastokelpoisuus. Mobility of forwarding vehicles used in thinnings. *Folia Forestalia* 692. 60 s.
- Turnage, G. W. 1972. Tire selection and performance prediction for off-road wheeled-vehicle operations. Proceedings of the 4th ISTVS Conference, Stockholm-Kiruna, April 24-28, 1972. I:62- 82.
- 1978. A synopsis of tire design and operational considerations aimed at increasing in-soil tire drawbar performance. Proceedings of the 6th ISTVS Conference, Vienna, Austria, August 22-25, 1978, II:757-810
- 1984. Prediction of in-sand tyre and wheeled vehicle drawbar performance. Proceedings of the 8th ISTVS Conference, Cambridge, 6-10 July 1984, I:121-150.
- Vilkko, J. 1986. Metsätraktorin suokelpoisuuden parantaminen. *Metsähallitus, Kehittämisjaosto, Hirvas. Koeselostus* 237. 27 s.
- Westman, C.J. 1990. Metsämaan fysikaaliset ja fysikaalis-kemialliset ominaisuudet CT-OMaT kasvupaikkasarjassa. Summary: Soil physical and physico-chemical properties of Finnish upland forest sites. *Silva Fennica* 24(1):141-158.
- Wismer, R. D., Freitag, D. R. & Shafer, R. L. 1976. Application of similitude to soil machine systems. *Journal of Terramechanics* 13(3):153-182.
- & Luth, H. J. 1973. Off-road traction prediction for wheeled vehicles. *Transaction ASAE* 17(1):8-10,14.
- Wong, J. Y. 1978. *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons, New York. ISBN 0-471-03470-3. 330 s.
- 1989. *Terramechanics and off-road vehicles*. Elsevier Amsterdam, ISBN 0- 444-88301-0. 251 s.
- Wästerlund, I. 1990. Soil strength in forestry measured with a new kind of test rig. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. I:73-82.
- Yong, R. N. & Eiyoy, F. 1990. Effect of traction surface roughness on tyre performance. Proceedings of the 10th ISTVS Conference, Kobe, August 20-24, 1990. I:313-324.

Liite 1. Nopeuden käsittely analyyseissa.

1. Multiplikatiivinen malli

Regressioanalyysillä lasketaan regressiosuoran $y = a + b \cdot x$ kertoimet. Mikäli mallia sovelletaan koneiden liikkumiseen asettamalla kulkuaika selitettäväksi muuttujaksi, niin b on koneen nopeuden käänteisarvo (s/m). Termi a on tarvittava kiihdytysaika (kuva 1).



Kuva 1. Aika-matkakuvaaja

Koneen kulkuaika voidaan siten kuvata matkan X_1 funktiona

$$y = a + b \cdot X_1 \quad (1)$$

Olkoon X_1 kulkumatka. Ajatellaan koneen nopeuden riippuvan tekijästä X_2 (esimerkiksi rinnekaltevuus). Riippuvuus voi olla lineaarinen tai epälineaarinen, jolloin se voidaan muunnoksien avulla linearisoida. Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan riippuvuus lineaariseksi. Tällöin nopeus (oikeammin sen käänteisarvo) riippuu tekijästä X_2 seuraavasti

$$b = a_2 + b_2 \cdot X_2 \quad (2)$$

Kuten kulmakertoimesta a havaittiin, se voi riippua myös tekijästä X_2 (esimerkiksi kiihtyvyyden rinteessä). Tällöin a :lle saadaan malli

$$a = a_1 + b_1 \cdot X_2 \quad (3)$$

Kun mallit (1) ja (2) sijoitetaan malliin (3) saadaan kahden tekijän malli

$$y = a_1 + b_1 \cdot X_2 + a_2 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_1 \cdot X_2 \quad (4)$$

Kun sovelletaan regressioanalyysia, aineisto saattaa olla vaillinainen ja osittain ristiinkorreltoitunut, joten eri kertoimet saattavat tulla tilastollisesti merkitsemättömiksi. Tästä syystä saattaa olla aiheellista ensin laskea kulmakertoimet b eri tekijäluokille. Ristiintaulukoimalla b tekijän 2 suhteen, voidaan määrittää ajonopeuden riippuvuus tekijästä 2.

Mikäli regressioanalyysissa käytetään kulkuajan asemesta nopeutta, ei kiihtyvyyttä voida erottaa tekijäkseen, todetaan vain nopeuden kasvavan assymptoottisesti matkan funktiona. Tämä assymptoottinen malli voidaan helpommin ratkaista laskemalla lineaarimalli kulkuajalle ja muuttamalla se nopeuden malliksi.

$$T = a + b \cdot D \quad (5)$$

$$\text{josta} \quad (6)$$

$$v = \frac{1}{\frac{a}{D} + b} \quad (7)$$

$$v = \frac{D}{a} + \frac{1}{b} \quad (8)$$

Huomataan, että nopeus on kulmakertoimen b käänteisarvo, johon pitää lisätä kiihtyvyydestä johtuva tekijä D/a , jossa a on vakio.

Terramekaanisissa tutkimuksissa tulisi pyrkiä ensin laatimaan malli ja pyrkiä määrittämään tekijät ja riippuvuussuhteet. Suuri aineisto ei välttämättä anna oikeaa kuvaa riippuvuuksista, jos analyysi on riittämätön. Erittäin vaarallinen tilanne syntyy jos aineisto on ristiinkorreltoitunut, esim. aineistoon kuuluu lyhyitä ylämäkiä ja pitkiä alamäkiä. Tällöin regressioanalyysi voi antaa korkeita selitysasteita mallille, jota ei voida soveltaa esim. palstalle, jossa joudutaan kuljettamaan pitkiä matkoja ylämäkeen.

2. Nopeuden keskiarvo

Nopeus on matka jaettuna ajalla. Kun lasketaan keskinopeuksia, tulee laskea yhteen ajat ja jakaa ne matkojen summalla.

$$v_a = \frac{\sum D_i}{\sum t_i} \quad (9)$$

jossa

v_a on keskinopeus

ΣD_i matkojen summa

Σt_i aikojen summa

Mikäli kuitenkin operoidaan samanpituisten havaintovälien (keski)nopeuksilla, niin näiden yhteinen keskiarvo tulee laskea geometrisena keskiarvona

$$v_a = \frac{N}{\frac{1}{\Sigma v_i}} \quad (10)$$

jossa

v_a on keskinopeus

N havaintojen määrä

Σv_i keskinopeuksien summa

Liite 2. Maaperän kantavuus.

Maalaji	Kosteus	Kantavuus, kPa	Lähde
Turve		20	1
Hiekka	Kuiva	200	1
Hiekka	Märkä	400	1
Hieno sora		500	1
Karkea sora		200 - 600	1
Pehmeä savi	Märkä	100	1
Savi	Kostea	200	1
Savi	Kuivahko	400	1
Lumipolanne		900	1

1) Ragot (1976)

Liite 3. Nettovetokykykerroin ja tukin juontovastuskerroin erilaisilla alustoilla.

Maalaji	Kosteus	Pyörä	Tela	L1	L2	Lähde
Betoni	Kuiva	0,88	0,45			1
Savi	Kuiva	0,55	0,58	0,62	0,78	1
Savi	Märkä	0,45	0,46	0,48	0,62	1
Hiekkainen savi	Kuiva	0,35	0,56	0,64	0,82	1
Hiekkainen savi	Märkä	0,20	0,42	0,52	0,64	1
Multa	Kuiva	0,35	0,56	0,58	0,74	1
Multa	Märkä	0,15	0,29	0,44	0,54	1
Hiekkainen humus	Kuiva	0,35	0,53	0,60	0,76	1
Hiekkainen humus	Märkä	0,17	0,27	0,46	0,57	1
Hiekka	Kuiva	0,20	0,29	0,53	0,67	1
Hiekka	Märkä	0,35	0,32	0,55	0,70	1
Sora		0,36				1
Jää		0,12	0,12			1
Kovettunut lumi		0,20				1
Kova kallio	Kuiva	0,50	0,20			1
Kova kallio	Kosteaa	0,20	0,15			1
Lumi		0,30	0,74	0,45		2
Hiesumaa	Märkä	0,43	0,57	0,70		2

1) Ragot (1976)

2) Shishiuchi (1990)

L1 Juontovastus, tukin pää koneen kannatuksella

L2 Vetovastus, maanpinnan suuntainen veto

Liite 4. Suositeltu rengaskuorma eri rengaspaineille.

Taulukko 1. Suositeltu rengaskuorma eri rengaspaineille.

MAATALOUSTRAKTORIRENKAAT					
Rengaskoko	Rengaspaine, kPa				
	96	110	124	138	152
	Rengaskuorma, kN				
16.9/14-30 PG		17,5	18,6		
16.9/14-34 PG	—	18,4	19,8		
13.6/12-38 PG	12,5	13,5	14,5	15,4	16,3

Taulukko 2. Suositeltu rengaskuorma eri rengaspaineille.

MAASTOAJONEUVORENKAAT						
Rengaskoko	Rengaspaine, kPa					
	75	100	150	200	250	300
	Rengaskuorma, kN					
12.5/80-18		12,0	14,8	17,8	20,8	23,8
13.6/12-28	10,9	11,2	13,8			
16.9/14-26	13,8	15,4	19,4	23,2		
16.9/14-44	15,4	17,6	22,2			

Liite 5. Metsätraktorin empiirisesti mitattuja maksiminopeuksia eri olosuhteissa.

Kone	Rinnekaltevuus, %					
	-20		0		+20	
	< 0,30	> 0,70	Estekorkeus, m		< 0,30	> 0,70
				Ajonopeus, m/s		
John Deere 2140 1)	1,40	1,12	1,46	1,24	1,00	0,64
Mini Bruunett 2)	0,80	0,56	0,88	0,74	0,46	0,32
Kockum 821 3)	1,28	1,10	1,26	1,14	0,74	0,60
Volvo BM 400 4)	1,44	1,10	1,46	1,12	0,84	0,52
Variotrac 912 5)	1,72	1,24	1,72	1,26	1,12	0,84
Krabat 232 6)	1,02	0,86	1,16	1,02	0,62	0,48
Volvo BM Valmet 862, paljas maa 7)			1,56			
ohut lumipeite 7)			1,60			
Valmet 880 8)			1,55	1,15		
Clark 660 9)			1,65	1,10		
Juonto-Lokkeri 10)			1,65	1,20		
BM-Volvo SM 868 11)			1,50	0,95		
BM-Volvo SM 661 12)			1,50	1,00		
Teli-Lokkeri 13)			1,45	1,20		

Lähde: Frønsdal 1985

- 1) 4 W Maataloustraktori 2) Forwarder 3) Skidder
 4) 1/2-tela maataloustraktori 5) Pienoistelakone 6) Telatraktori

Lähde: Sirén et al. 1987

- 7) Forwarder

Lähde Aho & Kättö 1971

- 8) Skidder 9) Skidder 10) Skidder
 11) Forwarder 12) Forwarder 13) Forwarder

ISBN 951-40-1174-0

ISSN 0358-4283

VALTION PAINATUSKESKUS, HELSINKI 1991