



■ Martti Saarilahti

Martti Saarilahti

Estevastus ja estetyö maastossa liikkuvien koneiden kulkumalleissa

Saarilahti, M. 1997. Estevastus ja estetyö maastossa liikkuvien koneiden kulkumalleissa. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 1/1997: 73–84.

Artikkelissa tarkastellaan metsäkuljetusten maastoluokituksen ja kulkumallituksen välistä vuorovaikutusta sekä kehitetään teoreettinen viitekehys estevastuksen ja estetyön laskemiseksi. Pienoismallikokeiden, pienen empirisen aineiston ja kirjallisuustarkastelun avulla yritetään estevastus konkretisoida siten, että tulevaisuudessa maastokokeissa estevastuskomponentti voitaisiin ottaa huomioon sekä kokeita suunniteltaessa että tuloksia analysoidessa.

Asiasanat: estevastus, maastoliikkuvuus, maastoluokitus, metsäkuljetus

Kirjoittajan yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Faksi (09) 8570 5361, sähköposti martti.saarilahti@metla.fi
Hyväksytty 22.11.1996

1 Johdanto

Metsäteknologisissa tutkimuksissa metsäkoneiden suorituskykyä on yleensä mallitettu empiirisesti keräämällä ajokokeista aineistoa ja laskeamalla keskimääräisiä suoritusarvoja (esim. nopeus, m/s) eri maastoluokille tai kehittämällä black-box tyyppisiä regressiomalleja päämuuttujien välille. Tämänlaisia tutkimustuloksia on usein vaikea hyödyntää tietokonepohjaisissa suunnittelumalleissa, koska tarvittavia parametreja ei ole riittävästi. Kuitenkin kehittyvät metsätalouden suunnittelumene-

telmät edellyttävät kehittyneempiä metsäkoneiden suorituskykymalleja.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan maastoluokituksen kuormatraktorin liikkumiskyvyn mallittamisen kannalta. Käytössä oleva maastoluokitus (Tavoiteansioon... 1983) kehitettiin metsäkonemaksujen laskennan apuvälineeksi. Se oli luonteeltaan sopimuspoliittinen, ja sen luokat ovat yhdisteleviä ja kuvailevia. Paikkatietojärjestelmät ja tietokonepohjainen suunnittelu edellyttävät analyttisempää ja numeerisempää maaston kuvaamista. Maastoluokitusta on kirjallisuudessa käsitelty runsaasti (Eriksson ym. 1978, Löffler 1979, Sutton 1979,

Tsay 1979, Terrain classification... 1980, Shoop 1993). Kehittyneemmissä maastoluokituksissa esiintyy yleensä ainakin maapohjaa, maaston mikroesteitä ja makroesteitä kuvaavia parametrejä kuten kantavuus, esteet ja rinnekaltevuus.

Metsäkoneen liikkumista vastustavat voimat, kokonaisvastus (R) mallissa (1), ovat Wongin (1978, s. 123) mukaan:

$$R = R_A + R_R + R_D + R_G + a \times m \quad (1)$$

Alhaisilla nopeuksilla ilmanvastus (R_A) voidaan jättää ottamatta huomioon pienuutensa vuoksi. Kuorma kantavalla koneella vetovastus (R_D) on nolla. Mikä tarkastellaan vakionopeudella kulkevaa konetta myös inertiaavastus (kiihtyvyys $a = 0$, massa m) saa arvon nolla. Malli (1) supistuu kahden parametrin malliksi:

$$R = R_R + R_G \quad (2)$$

eli koneen liikkumista vastustavat voimat koostuvat vierintävastuksesta (R_R) ja rinnevastuksesta (R_G). Valtaosa maailmassa suoritetuista terramekaniikan alaan kuuluvista tutkimuksista on tehty lajittuneilla maalajeilla ja maataloudessa, joissa maasto-olot voidaan yleensä kuvata näiden kahden parametrin avulla. Esimerkiksi Baladi (1987) maastosta (terrain) puhuessaan keskittyy vain maapohjan (soil) parametrien mittaukseen. Malli (2) on kuitenkin riittämätön suomalaiseseen metsämaastoon, joka suurelta osin koostuu pienipiirteisistä moreenikuvioista, joille on tyypillistä kivisyys. Näin ollen tutkimusongelma voidaan tiivistää seuraavaksi: *Mitä lisäparametreja rinne- ja vierintävastuksen lisäksi tarvitaan kuvaamaan suomalaista metsämaastoa maastoliikkuvuuden ennustamiseksi?*

Ongelma pyritään ratkaisemaan käyttäen hyväksi maamekaniikkaan ja konetekniikkaan perustuvia koneiden liikkumiskyvyn teoreettisia ja semiempiirisiä malleja. Tutkimus perustuu lähinnä kirjallisuuteen, mutta hyväksi käytetään myös pienoismalli- ja maastokokein kerättyä aineistoa. Tavoitteena on selvittää miten tulevat maastokokeet ja -mittaukset tulisi suunnitella, jotta tulokset parhaiten soveltuisivat maastoliikkumisen tietokonepohjaisen suunnittelun apuvälineeksi.

2 Estevastuksen ja estetyön teoreettinen mallitus

2.1 Terminologia

Malleissa (1) ja (2) tarkasteltiin koneen liikettä vastustavia voimia. Tällöin vastustavasta voimasta käytetään termiä vastus, esim. vierintävastus, ilmanvastus, rinnevastus jne. Voima mitataan newtoneina.

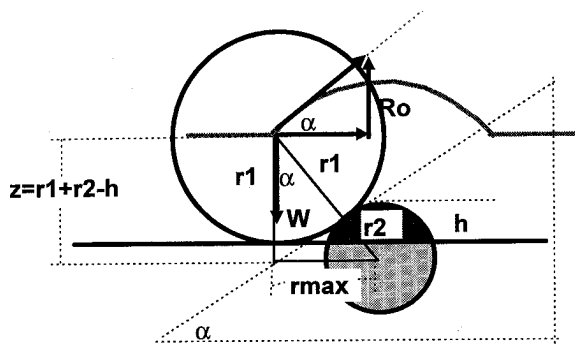
Fysiikassa työ määritellään voiman ja matkan tuloksi, joten koneen liikkumista voidaan kuvata myös koneen liikkumiseksi tekemän työn määrällä. Terramekaniikassa ei työlle ole vakiintunut termejä samalla lailla kuin vastukselle. Tässä raportissa määrätyn matkan kulkemiseen käytetyn vastuksen voittamisesta käytetään sanaa työ, jota täydennetään soveltuvalla lisämääreellä. Esimerkiksi vierintävastuksen voittamiseksi tehty työ on vierintätöitä. Työn yksikkö on joule.

Pidemmälle menevissä analyyseissa, jolloin myös luistotyö tai -energia lisätään malleihin, tarvitaan vielä tarkempia lisämääreitä, koska myös matkan määrittämiseen ja mittaamiseen liittyy ongelmia (Upadhyaya ym. 1988).

2.2 Estevastus

Vapaasti pyörivän pyörän kulkuvastus voidaan yksinkertaisesti mitata vetämällä tutkittavaa pyörää tai konetta vaakasuoralla alustalla ja rekisteröimällä tarvittavaa voimaa. Mittaustilanne vaikeutuu, kun tutkitaan vetävää pyörää. Tällöin tarvitaan lisämääreitä ja lisälaitteita, sillä vastus voidaan määrittellä koskemaan esim. tarvittavaa voimaa luiston ollessa 0. Mikäli kulkualusta on homogeeninen, kulkuvastus koostuu vain vierintävastuksesta. Tasaisella rinneellä mukaan tulee rinnevastus, jonka laskennallinen tarkastelu on verraten yksinkertaista.

Tilanne mutkistuu, kun pyörä kohtaa esteen, esimerkiksi kiven tai kannon. Kaje (1968) kuvaa estevastuksen voimana, joka tarvitaan jäykän pyörän kosketuskohdassa siirtämään pyörän painopiste tangentin suuntaan, kuva 1. Myös muiden tutkijoiden lähestymistapa on ollut samantapainen (Söderlund ja Scholander 1962, McNally 1975). Estevastusta



Kuva 1. Jäykkä pyörä ylittämässä pyöreää estettä.

ja sen teoriaa on käsitelty myös heilunnan yhteydessä (Nåbo 1987). Seuraavassa tarkastellaan estevastusteoriaa tutkittaessa jäykkää pyörää ylittämässä puolipallon muotoista estettä, esim. kiveä, kuva 1.

Jos r_2 säteisen kiven maanpäällisen osan korkeus on h , niin r_1 -säteinen pyörä koskettaa kiveä kun pyörän akselin vaakaetäisyys kiven keskilinjasta (x_{\max}) on

$$x_{\max} = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 - (r_1 + r_2 - h)^2} \quad (3)$$

josta saadaan sieventämällä

$$x_{\max} = \sqrt{2 \times (r_1 + r_2) \times h - h^2} \quad (4)$$

Pyörän akseli alkaa kiertää $r_1 + r_2$ säteistä rataa kiven keskipisteen ympäri, ja akselin rata voidaan laskea. Tarvittava voima, (estevastus R_o) voidaan laskea pyöräkuormasta (W) kohtauskulman (α) tangentin avulla:

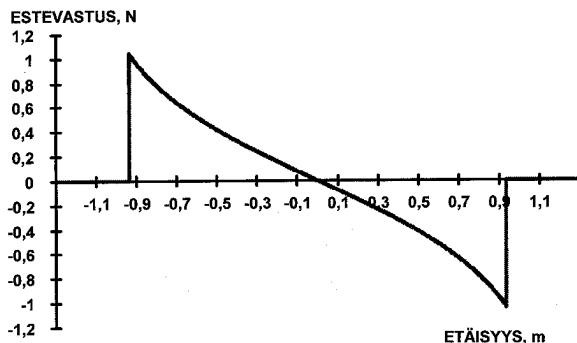
$$R_o = W \times \tan \alpha \quad (5)$$

ja edelleen voidaan kirjoittaa:

$$R_o = W \times \frac{x}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 - x^2}} \quad (6)$$

jossa x on pyörän akselin vaakaetäisyys kiven keskipisteestä.

Kuvaan 2 on laskettu estevastuksen arvot, kun halkaisijaltaan 1,6 m oleva jäykkä vapaasti pyörivä



Kuva 2. Estevastus, kun halkaisijaltaan 1,6 m:n pyörä ylittää halkaisijaltaan 1,0 m:n kiven, josta 0,4 m on maanpinnan yläpuolella.

pyörä ylittää halkaisijaltaan 1,0-metrin kiveä, josta 0,4 m on maanpinnan yläpuolella. Huippuarvo saavutetaan kosketuskohdassa (1,04 kertaa pyöräpaino). Kiven keskikohdalla estevastuksen arvo on 0, ja pyörän kulkusuunta muuttuu laskeutuvaksi. Laskeutuessa estevastus on negatiivinen, eli edetessään pyörä hyödyntää potentiaalienergiaansa.

2.3 Estetyö

Terramekaniikan perusterioissa on yleensä pitäydty vierintävastuksessa ja rinnevastuksessa. Tämä johtuu siitä, että mittauksia on yleensä tehty laboratorioden maa-altaissa, muokatuilla pelloilla tai ”tyyppi maalajeilla”, savella tai hiekalla käyttäen ns. viidettä pyörää, eli hinaamalla koneen perässä erillistä mitta-anturein instrumentoitua pyörää. Perusteoriat ja -mallit pohjautuvat pääosin yksittäisen pyörän analyyseihin sekä pyörä/maamalleihin. Kehittyneemmät maastokonemallit ovat harvinaisia (Schmid 1995, Wong 1995), eikä toistaiseksi ole käytössä yhtään suomalaisessa moreeni- maastossa testattua maastokonemallia.

Kun koneen yksittäinen pyörä kiipeää esteen yllä sen potentiaalienergia (E_p) ylimmässä kohdassa on pyöräpaino (massa m kertaa painovoiman kiihtyvyyss g) kerrottuna esteen korkeudella (h):

$$E_p = m \times g \times h \quad (7)$$

Kun pyörä laskeutuu, esteeltä potentiaalienergia

vähenee ja saavuttaa nollan esteen takaisella tasolla. Yksittäistä jäykkää pyörää tarkasteltaessa estetyö on siten 0. Kun tarkastellaan ilmarenkaista konetta, jonka yksi pyörä nousee esteelle, tilanne muuttuu. Esteen ylitystilanteessa pyörät joutuvat kulkemaan eri pituisia matkoja, jolloin niiden kehänopeuksien tulisi muuttua. Kuitenkin pyörien hitausmomentit, kiinteät akselilukot ja muut koneen ominaisuudet aiheuttavat sen, että pyörien maa- ja kehänopeudet poikkeavat teoreettisista ja aiheuttavat erilaisen momentin eri pyöriin (Marklund 1987). Jotkut pyörät ”vetävät”, toiset voivat ”jarruttaa”. Näin ollen koneen energian kulutus (ja tehty työ) lisääntyvät optimi-tilan tasosta, sillä energiaa tarvitaan renkaan joustoon, muuttamaan renkaan luistoa, lisäämään maapohjan jännityssiirtymiä jne. Mikäli oletetaan että k prosenttia ($0,0k$) potentiaalienergiasta käytetään enegiahäviöihin, esteen aiheuttamalle energiahäviölle, estetyölle (E_O), voidaan kirjoittaa seuraava malli (8):

$$E_O = k \times W \times h \quad (8)$$

jossa W on pyöräpaino ja h esteen korkeus. Kun pyörä kulkee määrätyn matkan d , jolla on erilaisia esteitä i kappaletta, esteiden aiheuttama energian kokonaishäviö, E_{OTOTAL} , on:

$$E_{OTOTAL} = k \times W \times \sum_{i=1}^i h_i \quad (9)$$

Tästä saadaan estetyö matkayksikköä kohti, eli estevastus R_O :

$$R_O = \frac{k \times W \times \sum_{i=1}^i h_i}{d} \quad (10)$$

Mikäli suhteellinen estekorkeus h_h määritellään:

$$h_h = \frac{\sum_{i=1}^i h_i}{d} \quad (11)$$

voidaan estetyö matkayksikköä kohti, eli estevastus, kirjoittaa muotoon:

$$R_O = k \times h_h \times W \quad (12)$$

Estevastuskerroin μ_O saadaan jakamalla malli (12) pyöräpainolla:

$$\mu_O = k \times h_h \quad (13)$$

eli estevastuskerroin on konevakio kertaa suhteellinen estekorkeus. Tilanne on sama, kuin koneen noustessa jatkuvasti rinnettä, jonka suhteellinen kaltevuus on $k \times h_h$.

Periaatteessa estevastuskertoimen mittaaminen on yksinkertaista. Mikäli koneen vastusta mitataan hinnaamalla, yksittäinen este erottuu terävänä piikkinä ja sitä seuraavana kuoppana vastuskäyrässä. Teorian mukaan estevastuksen minimin itseisarvon tulisi olla pienempi kuin maksimiarvon Näiden erotus kuvaa keskimääräistä estevastusta. Käytännössä keskimääräisen estevastuksen määrittäminen on kuitenkin vaikeaa, varsinkin jos esteiden ja pyörien lukumäärä kasvaa. Tällöin kokonaisvastuskäyrän hajonta näyttää kasvavan, koska yhteen tai useampaan pyörään on kohdistumassa erivaiheinen estevastus ja loppuihin vain vierintävastus. Vastuskäyrän tulkinta- ja analyysitekniikkaa kannattaa kehittää siten, että maapohjasta johtuva kulkuvastus ja esteistä johtuva estevastus voidaan mahdollisuuksien mukaan erottaa.

Kokeita suunniteltaessa ja tuloksia analysoitaessa estevastus ja estetyö kannattaa sisällyttää malliin laajentamalla malli (2) seuraavaksi:

$$R = R_R + R_O + R_G \quad (14)$$

2.4 Esteiden vaikutus koneen liikkumiseen

Esteet vaikuttavat koneen liikkumiseen kolmen eri mekanismin kautta:

- 1) Estevastus johtuu pyörän akselin liikeradan muutoksesta ja aiheuttaa koneeseen heiluntaa. Heilunta on eräs koneen suorituskyvyn rajoittaja (Saarilahti 1991). Yksinkertaisen heiluntamallin tuottamia rajoituksia tarkastellaan luvussa 3.3.2.
- 2) Estevastus lisää kulkuvastusta, joten se tulee lisätä koneen liikettä vastustaviin voimiin (malli 14). Estevastuksen vaikutusta voidaan silloin analysoida ajonopeuden rajoitusmallin avulla, luvut 3.1...3.3.
- 3) Mikäli estevastus on suurempi kuin koneen pyörän ja maan rajapintaan kehityvä tartunta (pitokyky), kone ei voi ylittää estettä, ja päädytään tilanteeseen jossa kone ei voi liikkua. Tätä käsitellään luvussa 3.4.

3 Estevastuksen ja estetyön empiiriset havainnot

Estevastusta tai estetyötä ei yleensä mitata, vaan se joko sisällytetään vierintävastukseen laskemalla vastuskäyrän keskiarvo tai se jätetään vierintävastuksen ulkopuolelle vähentämällä mittaustuloksista ”häiriöpiikit”. Jälkimmäisessä tapauksessa on kyse selvästi vierintävastuksesta, ensinmainitussa kyse on lähinnä ”kulku”vastuksesta. Varsinaisia mittaustuloksia ei siis ole saatavissa kirjallisuudestaan.

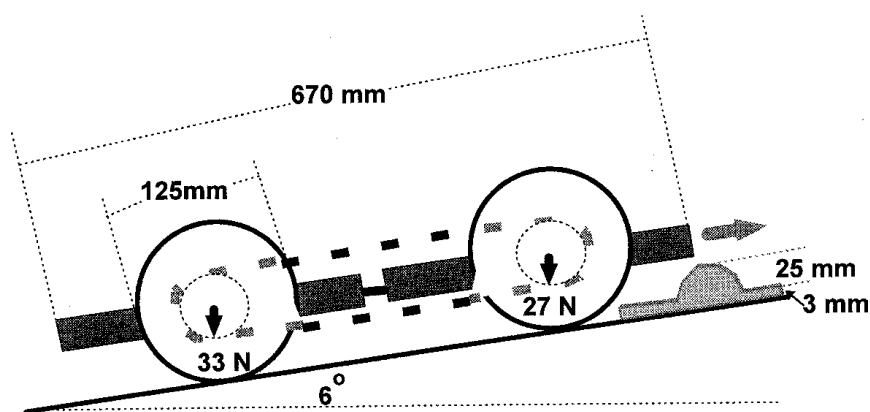
Tässä yhteydessä estevastusta tarkastellaan neljän esimerkin avulla: pienoismallikokeella, luistokokeella ja analysoiden kahta metsätraktoritutkimusta. Toisessa näistä oli tutkittu metsätraktorin pyörien momenttia eri ajotilanteissa (Marklund 1988) ja toisessa metsäkoneiden tuotoksen ja maaston ominaisuuksien välistä riippuvuutta (Frønsdal 1985).

3.1 Pienoismallikoe

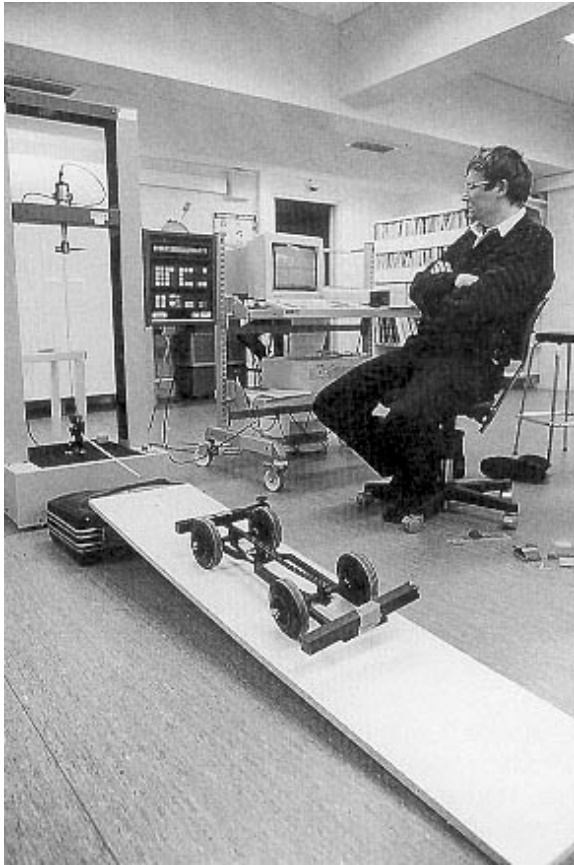
Joensuun yliopiston metsätraktorin pienoismallilla maastolaatikossa suoritettuja mallikokeita on hyödynnetty sekä opetuksessa että kehitettäessä kulkumalleja ja mittaustekniikkaa. Mitta-anturin kalibrointikokeiden yhteydessä pienoismallia testattiin käyttäen Wärtsilän teknillisen oppilaitoksen aineen-koetus koneen mittaustekniikkaa. Pienoismalli oli kytketty polkupyörän jarruvaijerilla aineen-koetus-
koneen voima- ja siirtymäanturiin, kuvat 3 ja 4. Esteinä käytettiin muovista tehtyjä säännöllisiä kap-

paleita. Tässä analysoidaan 6° :n kaltevilla tasolla tehtyä ajoa, jossa esteenä oli toisella ajouralla oleva puolipyöreä este, jonka säde oli 31 mm ja korkeus (maanpäällinen osa) 25 mm. Este oli kiinnitetty 3 mm paksulle muovilevyllä. Pyörän nousu ja lasku levyllä näkyy mittaustuloksissa. Pienoismalli oli 670 mm pitkä ja sen pyörien halkaisija oli 123 mm. Mallin kukin pyörä voitiin kytkeä vapaasti pyöriväksi tai kiinteästi akseliin. Akselit olivat kiinteästi kytketty toisiinsa polkupyörän hammasrattailla ja ketjulla. Ajokokeen aikana kaikki pyörät olivat kiinteästi akseliin kytketyt, mikä aiheutti suuren sisäisen vastuksen. Mitattu vastuskerroin (= vierintävastus ja kone-elinten kitka) oli 0,085, ja se vaihteli jonkin verran pyöräketjun silmukoiden kitkasta johtuen.

Teoreettinen estevastus laskettiin jäykän pyörän geometriaan perustuen (Saarilahti 1991, mallit 2.20 ja 2.22). Mitattu ja laskettu kokonaisvastuskäyrästä on esitetty kuvassa 5. Mitatut ja lasketut arvot sopivat jokseenkin hyvin yhteen varsinkin vastushuippujen osalta. Ero lasketun ja mitatun vastuksen välillä on suurempi esteeltä tai levyltä laskettaessa, kuin levyllä tai esteelle noustessa. Osa erosta on mittaustulokseen, joka johtuu mittalaitteen vaijerin joustamisesta, mikä pienentää laskeutumishuippua työnnön aikana. Pääosa erosta johtuu estevastuksesta, sillä kone ei pysty ”kiihtymään” yhtä tehokkaasti esteeltä laskeutuessaan kuin ”hidastumaan” sille noustessaan. Esimerkiksi laskeutumisvaiheen aikana pienoismalli pyrki kääntymään keskinivelestä sivuttain pituusakselin suunnassa.



Kuva 3. Kokeessa käytetyn pienoismallin dimensiot ja painot.



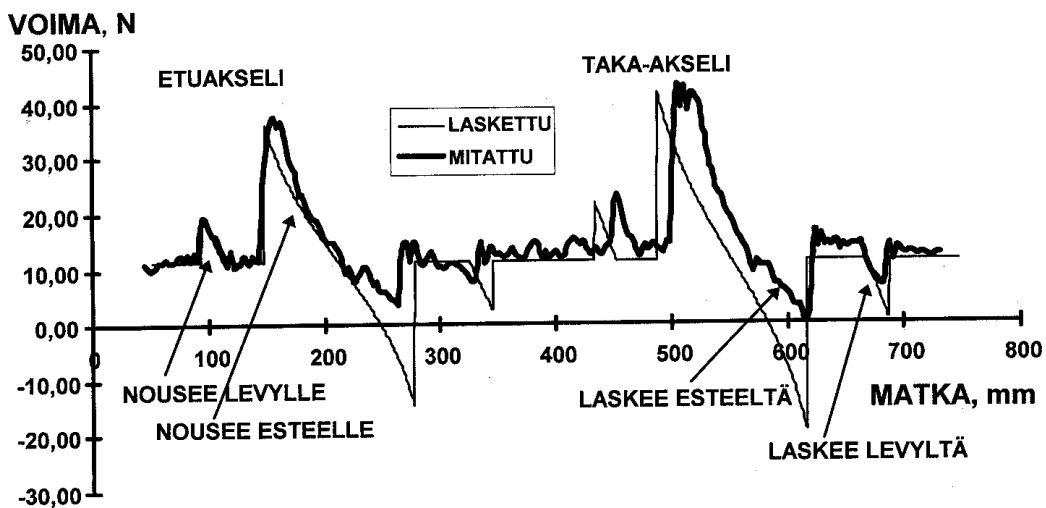
Kuva 4. Koejärjestely.

Kuvissa 6 ja 7 esitetään erikseen etupyörän ja takapyörän mitatut ja lasketut estevastukset. Näistä voidaan todeta, että

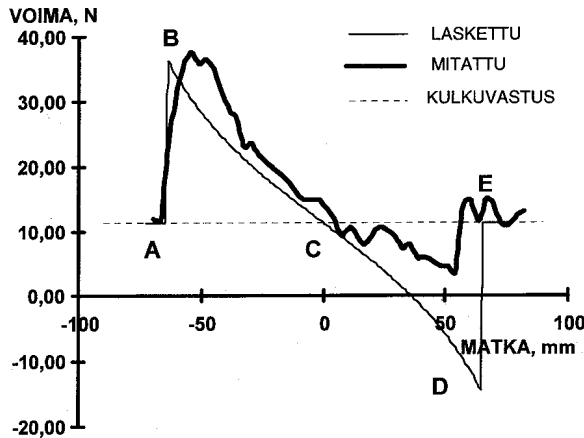
- mitatut vastuksen maksimiarvot ovat lähellä laskettuja
- mitatut minimiarvot ovat oleellisesti laskettuja arvoja korkeammat
- esteelle noustaessa mitattu ja laskettu arvo ovat samaa suuruusluokkaa (= sama kulmakerroin), mutta esteeltä laskeuduttaessa mitattu arvo on oleellisesti pienempi (loivempi kulmakerroin)
- teoreettiset nousu- ja laskumatkat ovat yhtä pitkät, sensijaan mitattu laskumatka on lyhyempi kuin laskettu.

Teoreettinen nousutyö, voima integroituna matkan yli ennen esteen keskikohtaa ("kolmion" ABC ala), on sama kuin laskutyön itseisarvo ("kolmion" CDE ala). Mitatuilla vastuksilla nousutyö on huomattavasti suurempi kuin laskutyö, eli pienosmallin liikkuessa voimaa on käytetty myöhän kuin kiven ylitykseen. Osa erosta on mittausvirhettä, mutta pääosa johtuu estetyöstä.

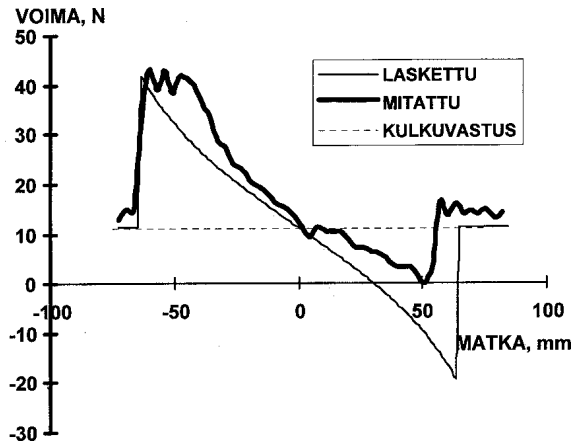
Mitatun ja lasketun enimmäisvastuksen suhde oli etuakselilla 1,07 ja taka-akselilla 1,00, eli mitatut arvot ovat lähellä laskennallisia. Mitatun ja lasketun estetyön suhde noustessa oli etuakselilla 1,26 ja taka-akselilla 1,03. Mitatun ja lasketun vähimmäisvastuksen (= suurin "työntö") suhteet olivat 0,33 ja 0,39, eli esteeltä laskeuduttaessa työntö oli



Kuva 5. Mitattu ja laskettu kokonaisvastus.



Kuva 6. Mitattu ja laskettu estevastus etupyörän ylittäessä estettä. Kirjainten selitys tekstissä.



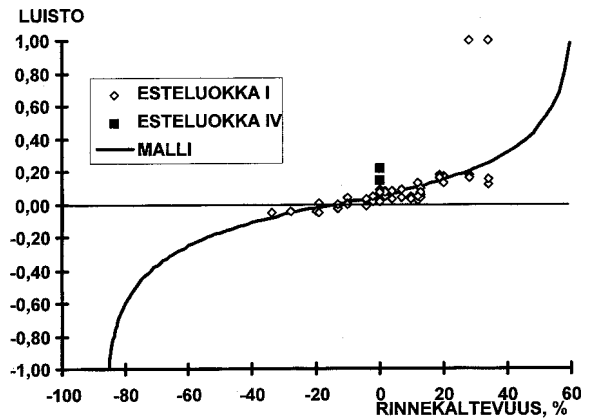
Kuva 7. Mitattu ja laskettu estevastus takapyörän ylittäessä estettä.

vain noin kolmannes teoreettisesta. Laskuvaiheessa mitatun ja lasketun estetyön suhde oli etuakselilla 0,32 ja taka-akselilla 0,54.

Kokonaisuudessaan esteelle kivuttaessa oli käytetty 1764 J, josta vapautui 684 J laskeuduttaessa. Näin ollen esteen ylitys satoi kaikkiaan 1080 J eli k -arvoksi saadaan 0,73. Korkea k -arvo johtuu pienoismallin jäykkyydestä ja energian hukkaantumisesta keskiniivelen linkkuuntumiseen. Lukuun sisältyy myös mittausvaijerin aiheuttama mittausvirhe. Täten on selvää, ettei tällä pienoismallilla saatuja arvoja voida soveltaa suoraan metsäkoneisiin.

3.2 Luistokoe

Ponsse S-15 -metsätraktorin pyörien luistoa tutkittiin videoimalla metsätraktorin liikkumista testiradoilla erilaisilla rinteillä. Videokuvista mitattiin pyörän pyörähdyskulman ja akselin liikeradan avulla luisto. Luistokokeen koejärjestely ja tulokset tasisella maapohjalla (I maastoluokka) on esitetty Saarilahden ja Ala-Ilomäen (1996) raportissa. Luistokokeen kaksi koerataa oli sijoitettu kivikkoon, jossa kivien korkeus oli 0,40...0,50 m, ja tiheys 3...4 kpl/m² (IV maastoluokka). Mitattu luistokerroin näillä kahdella kivikossa olevalla radalla oli 0,14 ja 0,24, kun se I maastoluokassa oli keskimäärin 0,05, (kuva 8).



Kuva 8. Kuormatraktorin pyörän luisto I (alle 0,1 m:n esteet) ja IV (estekorkeus yli 0,4 m) maastoluokassa.

Sijoittamalla edellä mainitut luistokertoimet malliin (15) ja ratkaisemalla vierintävästuskerroin (m_R) saatiin vierintävästuskertoimelle korkeammat arvot. Vähentämällä näistä I esteluokan vierintävästus, tuli estevastuskertoimiksi 0,06 ja 0,22.

$$S = -1 \times \frac{\ln \left(1 - \frac{|\mu_R \times \cos \alpha_S + \sin \alpha_S|}{\mu_{TMAX} \times \cos \alpha_S} \right)}{0,3 \times C_n} \quad (15)$$

Mallissa (15) S on luisto, α rinteen kaltevuus astetta, μ_{MAX} maksimitartunta luistolla 1 ja C_n on konevakio. Koska h_n , eli suhteellinen korkeus oli 0,8 eli kaksi 0,40 m:n korkuista kiveä metrin matkalla, voidaan laskea, että k -arvo vaihteli välillä 0,1...0,3.

3.3 Metsätraktorilla suoritettut kokeet

3.3.1 Ajotestit metsätraktorilla

Ruotsissa instrumentoitiin ”Skonsam terrängmaskin” -projektin aikana 8-pyöräisen Kockum KS-83-35 metsätraktorin kaikki akselistot, jotta pyörien kehittämät momentit voitiin mitata (Marklund 1988). Kuvassa 9 esitetään Marklundin (1988, kuva 14) mitaamat momentit, kun kone ylittää 0,16 m korkea ja 0,25 m leveää terävää estettä. Tässä analysissä käytetään mitattuja momenteja, koska ne suuruussuhteiltaan ovat verrattavissa estevastukseen. Kuvaan 9 on piirretty keskimääräinen momentti, joka edustaa vierintävastusta. Tätä on käytetty 0-tasona. Maksimimomentti nousuvaiheen ja minimimomentti laskuvaiheen aikana on mitattu tästä tasosta. Momentit ovat taulukossa 1. Suhteellinen estevastus on laskettu maksimin ja minimin (absoluuttisen arvon) erotuksena (kadonnut energia) ja maksimiarvon (potentiaalienergia) suhteen. Suhteellinen estetyö (k -arvo) on 0,28 etu- ja

Taulukko 1. Mitattu momentti pyörän noustessa ja laskeutuessa 0,16 m korkealta esteeltä Marklundin (1988) mukaan.

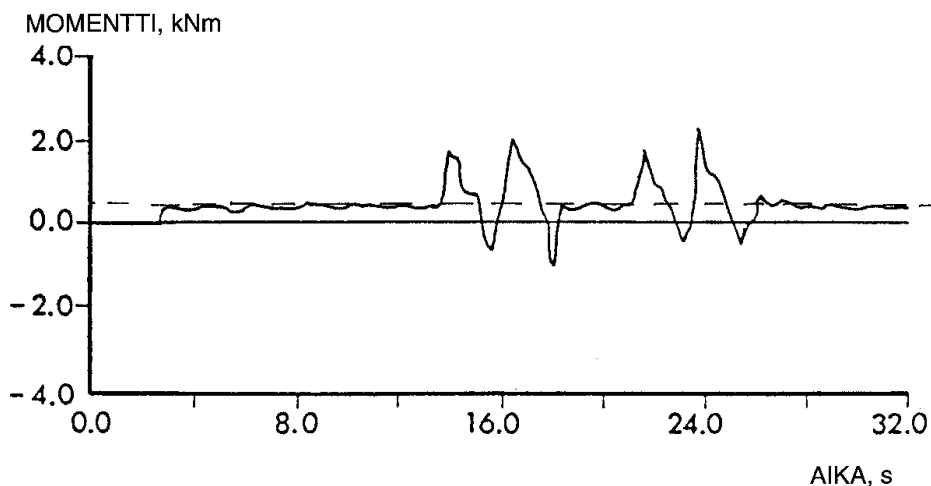
Pyörä	Veto	Momentti, kNm		Erotus kNm	Suhteellinen estevastus
		Ylös	Alas		
EE	1	1,3	-1,1	-0,2	0,18
ET	0	1,6	-1,4	-0,2	0,08
TE	1	1,3	-0,8	-0,5	0,36
TT	0	1,8	-1,0	-0,8	0,47
k.a./yht		1,49	-1,07	-1,7	0,28

EE, etutelin etupyörä
TE, takatelin etupyörä
ET, etutelin takapyörä
TT, takatelin takapyörä

takatelin yhden akselin vetäessä. Mikäli vain etumaisin akseli vetää (Marklund 1988, kuva 13), suhteellinen estetyö on 0,44, eli energian hukka on suurempi.

Marklundin (1988) mittausten perusteella voidaan todeta, että

- nousutyö on suurempi kuin laskutyö, sillä vierintävastustason yläpuolinen alue on systemaattisesti suurempi kuin alapuolinen alue
- etutelin kohdalla suhteellinen estetyö (0,13) on pienempi kuin takatelin kohdalla (0,42)
- vetävän (0,27) ja vapaastipyörivän (0,29) akselin välillä ei ole yhtä huomattavaa eroa (1:1,07) kuin teoreettisesti tulisi olla (1:1,47).



Kuva 9. Keskimääräinen momentti metsäkoneen ylittäessä 0,16 m:n korkuista terävää estettä Marklundin (1988) mittausten mukaan.

Ajokokeen tulokset näyttävät vahvistavan pienois-mallikokeen havaintojen suuntaa. Tasoero johtuu osittain siitä, että pienoismallikokeet tehtiin jäykällä renkaalla, ja ajokokeet joustavalla ilmarenkaalla.

3.3.2 Ajotestianalyysi

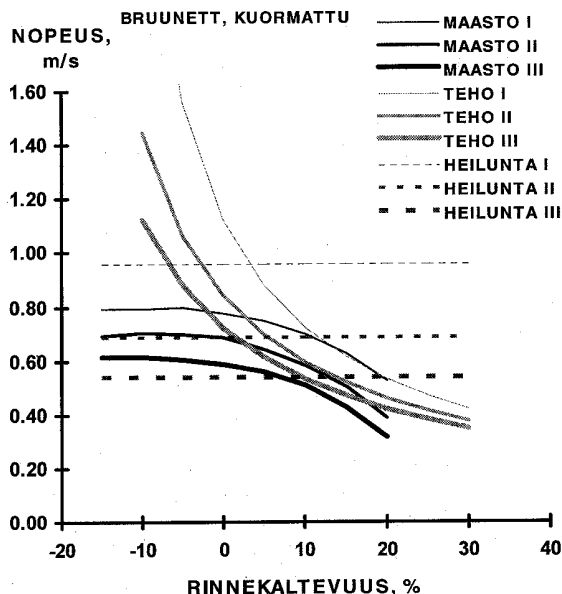
Frønsdal (1985) tutki kuutta eri metsäkoneetta vaihtelevissa maasto-oloissa. Tässä tarkastelun kohteeksi on otettu kuormatun Mini Bruunetin ajonopeus maastoesteiltään erilaisissa oloissa rinteiden funktiona (Frønsdal 1985, kuva 26). Lähtöolettamuksena on, että Frønsdalin mallit ovat harhattomia siten, etteivät rinteiden, ajonopeuden ja maastoluokkien mahdolliset yhdysvaikutukset ole vaikuttaneet annettuihin tuloksiin. Analyysin perusteet on esitetty Saarilahden (1991) oppikirjasssa.

Loivilla rinteillä koneen heilunta rajoittaa ajonopeutta, ja vasta jyrkemmällä vastarinteillä moottoriteho/kulkuvastus alkaa tulla rajoittavaksi tekijäksi. Alle +5 %:n rinteillä ajonopeutta voidaan siten estimoida heiluntamallilla (Saarilahti 1991). Jyrkemmällä rinteillä ajonopeutta voidaan estimoida ajonopeuden rajoitusmallin (malli 16) avulla. Mikäli nettotehoksi vetopyörillä asetetaan 50 % moottoritehosta (P), voidaan malliin (14) perustuen kirjoittaa seuraava ajonopeuden (v) rajoitusmalli

$$v = \frac{0,5 \times P}{W \times (\cos \alpha_S \times \mu_R + \sin \alpha_S \times \cos \alpha_S \times \mu_O)} \quad (16)$$

jossa W on koneen paino, α_S rinnekaltevuus, μ_R vierintävastus ja μ_O estevastus.

Koska Frønsdal ei ollut mitannut vierintävastusarvoja, tässä käytetään arvioituna arvona $\mu_R = 0,15$. Suhteellinen estekorkeus (h_r) kussakin (Frønsdal'in) maastoluokassa laskettiin käyttämällä renkaan (tehollisena) leveytenä 0,333 m, jolloin annettu estetiheys kpl/m² jaettiin kolmella. Tämä kerrottiin keskimääräisellä estekorkeudella, jolloin saatiin suhteellinen estekorkeus. Eri k-arvoja kokeilemalla k = 0,1 näytti soveltuvimmalta, ja näin estevastuskertoimiksi μ_O on saatiin: I luokka 0,03, II luokka 0,09 ja III luokka 0,13. Arvot on sijoitettu malliin (16) ja tuloksia verrataan mitattuihin ajonopeuk-



Kuva 10. Frønsdalin (1987) mitaamat ajonopeudet I–III (Frønsdalin) esteluokissa (MAASTO I, II, III) verrattuna mallilla (15) laskettuihin nopeuksiin (TEHO I–III) ja heiluntamallin tuottamaan rajoitukseen (HEILUNTA I–III).

siin kuvassa 10. Kuvaan 10 on piirretty Frønsdalin eri maasto-oloissa mitaamien traktorin ajonopeuksien lisäksi heilunnan rajoitusmallilla (Saarilahti 1991, s. 54, malli 7.12) ja ajonopeuden rajoitusmallilla lasketut rajanopeudet.

Kuvasta 10 voidaan tehdä seuraavat päätelmät:

- Loivemmillä kuin +5 %:n rinteillä mitatut nopeudet jäävät heiluntamallilla estimoitujen nopeuksien välille. Heilunnan rajoitusmalli antaa verraten oikean arvion (Frønsdal'in) maastoluokassa II.
- +5...+20 %:n (vasta)rinteessä ajonopeuden rajoitusmalli antaa verraten realistisia tuloksia. Annetut estevastuksen arvot parantavat ennusteen osuuvuutta.
- Yli 15...20 %:n rinteissä luisto alkaa lisääntyä oleellisesti, jolloin luistotyö täytyisi lisätä malleihin. Tätä ei kuitenkaan ole tässä yhteydessä tehty.

Esteet vaikuttavat koneen suorituskykyyn sekä heiluntaa että tehonkulutusta lisäämällä.

3.4 Enimmäisestevastus

Teoreettinen estevastuksen enimmäisarvo saavutetaan pyörän koskettaessa estettä. Luvussa 2.2 johdettiin estevastusmalli vapaasti pyörivälle pyörälle ja saatiin enimmäisestevastukseksi kosketuskulman tangenti. Vastaavasti vetävälle pyörälle voidaan johtaa estevastuksen enimmäisarvo. Pyörägeometrian perusteella enimmäisarvoksi saadaan kosketuskulman sini. Maksimiestevastukselle vetävälle (F_{OMAXDR}) ja vapaastipyörivälle (F_{OMAXFR}) pyörälle voidaan siten kirjoittaa seuraavat mallit:

$$F_{OMAXDR} = W \times \sin \alpha \quad (17)$$

$$F_{OMAXFR} = W \times \tan \alpha \quad (18)$$

jossa W on pyöräpaino ja α kosketuspisteen tangentin kulma. Jäykällä vapaasti pyörivällä pyörällä säteen korkuisella tai korkeammalla esteellä vaakatyöntö yrittää tunkea pyörän esteen läpi eikä aiheuta enää pyörää ylöspäin nostavaa voiman komponenttia. Jotta työntö aiheuttaisi riittävän ylöspäin suuntautuvan voimakomponentin $\tan \alpha$:n arvo ei saisi ylittää yhtä, mikä siis vastaa pyöräpainoa. Laskennallisesti estevastuksen 1 arvoa vastaa esteekorkeus, joka on 0,29 kertaa pyörän säde. Käytännössä tätä voidaan pitää enimmäisestekorkeutena vapaasti pyörivälle pyörälle, koska tätä korkeammilla esteillä estevastuksen arvo alkaa kasvaa jyrkästi.

Vetävä pyörä pystyy kiipeämään estettä ylös mikäli tartunta esteen pinnasta on suurempi kuin estevastus. Koska $n - 1$ pyörää kehittää pyörää esteeseen painavaa voimaa, niin tartunnan esteen pinnasta on oltava vähintään $\sin \alpha / (\mu_T \times (n - 1))$, ennenkuin pyörä pystyy ”kiipeämään”. Käytännössä kokonaistartunta muuttuu jyrkästi, kun useampi pyörä kohtaa esteen samanaikaisesti. Esimerkiksi ojaa ylitettäessä estevastus kasvaa, mutta tartunta vähenee. Pyörägeometrian avulla voidaan laatia tarkempia estevastukseen perustuvia rajoitusmalleja laskemalla tartunta ja estevastus pyörittäin. Jotta kone pystyisi liikkumaan on kokonaistartunnan on oltava suurempi kuin kokonaisvastuksen.

4 Johtopäätökset ja suositukset

Yleisesti tiedetään, että maaston ja maapohjan ominaisuudet vaikuttavat metsäkoneen suorituskykyyn. Samoin tiedetään, että ajonopeus riippuu myös koneen ominaisuuksista. Vähemmän tiedetään koneen ja maaston ominaisuuksien vuorovaikutusmekanismeista, esimerkiksi miten ja miksi kivet tai kuopat hidastavat työskentelyä. Terramekaanisten teorioiden hyväksikäyttö tutkimusten suunnittelussa ja toteuttamisessa näyttää mahdolliselta, jolloin tulosten yleistettävyyttä ja tarkkuutta voidaan parantaa.

Suomalaista kivistä ja kantoista metsämaastoa ja moreenimaapohjaa varten tarvitaan entistä monipuolisempia maasto/konemalleja. Kuvaavan maastoluokituksen asemesta olisi siirryttävä numeerisempaan olojen kuvaamiseen, jotta tietoa voi hyödyntää laskennallisesti. Nykyisen luokkien yhdistämisen asemesta maastotekijät, kaltevuus, kantavuus ja esteet, on luokiteltava ja rekisteröitävä erikseen. Vierintävastusta voidaan arvioida kantavuuden perusteella. Kaltevuuden vaikutus joudutaan mallittamaan erikseen myötä- ja vastarinteille. Estevastus kehittyy maastopintojen ja koneen pyörien erisuuruisten momenttien aiheuttamasta hukkaenergiasta, ja sitä voidaan myös mallittaa. Estevastusta voidaan estimoida, kun tunnetaan esteiden tiheys ja korkeus. Tieto esteiden muodosta (kannot/kivet) parantaa luokituksen arvoa.

Pienoismallikokeet saattavat olla hyödyllisiä kehitettäessä teknistä viitekehystä ja mittaustekniikkaa, koska resursseja vaativia maastokokeita voidaan vähentää tai hyödyntää entistä paremmin.

Kirjallisuus

- Baladi, G. Y. 1987. Terrain evaluation for off-road mobility. *Journal of Terramechanics* 24(2): 127–140.
- Eriksson, T., Nilsson, G. & Skråmo, G. 1978. The Inter-Nordic project of terrain and machines in 1972–1975. Seloste: Yhteispohjoismainen metsäntutkimusprojekti ”Maasto-kone” 1972–1975. *Acta Forestalia Fennica* 164. 61 s.
- Frønsdal, J. 1985. Terrengekjørning med ulike skogsmas-

- kiner. 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. 63 s. ISSN 0333-001X.
- Kaje, L. 1968. Maaston kulkukelpoisuus. Summary: Terrain trafficability. Helsinki. 53 s.
- Löffler, H. 1979. Recording and classification of soil conditions within the scope of terrain classification. Julkaisussa: Proceedings of the Symposium on Stand Establishment Techniques and Technology in Moscow and Riga, 3–8 September 1979. IUFRO S 3.02-00. II. s. 297–317.
- Marklund, B. 1987. Torque distribution on wheeled vehicles affects damage on the forest ground. Proceedings of 9th ISTVS Conference, Barcelona, Spain 31st Aug.–4th Sept. 1987, I. s. 347–354
- 1988. Moment- och varvtalsfördelningens påverkan på krafter i markkontakten för terrängfordon. The effect of the distribution of torque and number of wheel revolutions on the ground contact forces of terrain vehicles. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik, Uppsatser och resultat 117. 61 s.
- McNally, J. A. 1975. Trucks and trailers. Their application to logging operations. A reference manual. University of New Brunswick, Fredricton, Canada. 338 s.
- Nåbo, A. 1987. Helkroppsvibrationer i skogsmaskiner. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik, Intern stencil 67. 61 s.
- Saarilahti, M. 1991. Maastoliikkuvuuden perusteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 390. 99 s. IBSN 951-40-1174-0.
- & Ala-Ilomäki, J. 1996. Measurement and modelling of wheel slip in forwarding on moraine forest floor. Scandinavian Journal of Forestry. (Painossa).
- Schmid, I. C. 1995. Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research at IKK. Journal of Terramechanics 32(1):3–26.
- Shoop, S. 1993. Terrain characterization for trafficability. CRREL Report 93-6: 1–23.
- Sutton, A. R. 1979. Terrain classification in Great Britain. Julkaisussa: Proceedings of the Symposium on Stand establishment Techniques and Technology in Moscow and Riga, 3–8 September 1979. IUFRO S 3.02-00. II. s. 385–407.
- Söderlund, J. & Scholander, J. 1964. Luftgummihjul vid hindertagning. Svenska skogsvårdsföreningens tidskrift 61: 194–229.
- Tavoiteansioon perustuvat puutavaran metsätraktorikuljetusmaksut. 1983. Metsäalan kuljetustenantajat ja koneyrittäjälitto.
- Terrain classification for Canadian forestry. 1980. FERICO. Canadian Pulp and Paper Association, Montreal, Canada. 13 s.
- Tsay, T-B. 1979. An approach to terrain classification for forestry in Canada. In: Proceedings of the Symposium on Stand Establishment Techniques and Technology in Moscow and Riga, 3–8 September 1979. IUFRO S 3.02-00. II. s. 350–374.
- Upadhyaya, S. K., Chancellor, W. J., Wulfsohn, D. & Glancey, J.L. 1988. Sources of variability in traction data. Journal of Terramechanics 25(4): 249–272.
- Wong, J. Y. 1978. Theory of ground vehicles. John Wiley & Sons Inc, New York. 330 s. ISBN 0-471-03470-3.
- 1995. Application of the computer simulation model NTVPM-86 to the development of a new version of the infantry fighting vehicle ASCOD. Journal of Terramechanics 32(1): 53–61.

21 viitettä

Symbolit

α	pyörän kohtauskulman tangentin kaltevuus, °
α_S	rinnkaltevuus, °
μ_O	estevastuskerroin
μ_R	vierintävastuskerroin
μ_T	tartuntakerroin
μ_{TMAX}	maksimitartuntakerroin
a	ajoneuvon kiihtyvyys, m/s ²
d	matka, m
g	maan vetovoiman kiihtyvyys, m/s ²
h	estekorkeus, m
h_h	suhteellinen estekorkeus
k	konevakio
m	massa, pyörämassa, kg
n	pyörien lukumäärä, kpl
r_1	pyörän säde, m
r_2	kiven säde, m
v	ajonopeus, m/s
x	akselin vaakasuora etäisyys kiven keskipisteestä, m
x_{MAX}	akselin vaakasuora etäisyys kiven keskipisteestä renkaan koskettaessa estettä, m
C_n	pyörävakio
E_P	potentiaalienergia, J
E_O	esteen aiheuttama energiahäviö, estetyö, J
E_{OTOTAL}	estetyö, J
P	koneteho, W
R	kokonaisvastus, N
R_A	ilmanvastus, N
R_D	vetoaisaan liitetyn laitteen hinausvastus (vetovastus), N
R_G	rinnevastus, N
R_O	estevastus, N
R_{OMAXDR}	enimmäisestevastus vetävällä pyörällä, N
R_{OMAXFR}	enimmäisestevastus vapaasti pyörivällä pyörällä, N
R_R	vierintävastus, N
S	luistokerroin
W	paino, pyöräpaino, N