

Lastauksen painotuksen vaikutus säiliöajoneuvon stabiilisuuteen



Tekijät (toimielimestä: toimielimen nimi, puheenjohtaja, sihteeri) Juha Kortelainen, VTT Tuotteet ja tuotanto		Julkaisun laji Tutkimus	
		Toimeksiantaja Liikenne- ja viestintäministeriö	
		Toimielimen asettamispäivämäärä	
Julkaisun nimi Lastauksen painotuksen vaikutus säiliöajoneuvon stabiilisuuteen			
Tiivistelmä <p>Raportissa kuvataan liikenne- ja viestintäministeriölle tehty tietokonesimulointityö, jonka tavoitteena oli selvittää lastauksen vaikutus ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen kahdessa erilaisessa ajotilanteessa. Simulointityö tehtiin kolmelle ajoneuvoyhdistelmälle niin, että ajoneuvoyhdistelmä lastattiin joko vetoauto- tai perävaunupainotteisesti. Simuloidut ajoneuvoyhdistelmät olivat 1) varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, jossa vetoauto ja perävaunu ovat kolmiakselisia (yhdistelmä 3-3), 2) varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, jossa vetoauto on kolmiakselinen ja perävaunu neliakselinen (yhdistelmä 3-4) ja 3) puoliperävaunuyhdistelmä, jonka perään oli kytketty varsinainen perävaunu; vetoauto sekä puoli- ja varsinainen perävaunu olivat kolmiakselisia (yhdistelmä 3-3-3).</p> <p>Simulointimalleilla laskettiin kaksi perustapausta: kaksoiskaistanvaihto, jossa kuljettaja väistää omalla ajokaistalla olevaa estettä vastaan tulevien ajokaistalle ja palaa heti takaisin omalle ajokaistalle, sekä pientarelleajotilanne, jossa ajoneuvo ajautuu tien pientareelle ja kuljettaja pyrkii ohjaamaan ajoneuvon takaisin ajokaistalle. Kaksoiskaistanvaihtotapauksissa ajoneuvon ajonopeus oli 80 km/h ja pientarelleajotapauksissa 50 km/h. Laskennan tuloksia esitetään raportin lopussa kuvaajien avulla. Näiden lisäksi työn tilaajalle toimitettiin valikoiduista laskentatapauksista tietokoneanimaatiot.</p> <p>Kuljettajan reagointiin ääritilanteissa vaikuttaa oleellisesti se, mitä hän kuljettajan paikalta havaitsee. Jos ajoneuvoyhdistelmän vetoauton renkaiden pito on huomattavasti parempi kuin perävaunun, ei kuljettaja saa palautetta mahdollisesta perävaunun renkaiden pidonmenetyksestä ja perävaunun voi lähteä hallitsemattomaan sivuluistoon. Tämän työn puitteissa saatujen laskentatulosten perusteella tulisi varsinaisella perävaunulla varustetun yhdistelmän lastaamista perävaunupainotteisesti välttää.</p> <p>Pitkän yhdistelmän viimeisen yksikön sivuttaissuuntaiset luistot eivät helposti välity kuljettajalle ajon aikana eikä kuljettaja näin ollen voi korjata tuntuman perusteella mahdollisesti alkavaa varsinaisen perävaunun sivuluistoa. Tämän työn puitteissa saatujen laskentatulosten perusteella puoliperävaunuyhdistelmän perään kytketty varsinainen perävaunu on altis sivuttaisheilahteluille eikä varsinaisen perävaunun kytkemistä puoliperävaunuyhdistelmän perään voida suositella.</p>			
Avainsanat (asiasanat) lastaus, stabiilisuus, säiliöajoneuvo, tietokonesimulointi			
Muut tiedot Yhteyshenkilö/LVM Esko Kärki			
Sarjan nimi ja numero Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 3/2004		ISSN 1457-7488	ISBN 951-723-869-X
Kokonaissivumäärä 40	Kieli suomi	Hinta 7 €	Luottamuksellisuus julkinen
Jakaja Edita Publishing Oy		Kustantaja Liikenne- ja viestintäministeriö	



Författare (uppgifter om organet: organets namn, ordförande, sekreterare) Juha Kortelainen, VTT Industriella System		Typ av publikation Forskning	
		Uppdragsgivare Kommunikationsministeriet	
		Datum för tillsättandet av organet	
Publikation (även den finska titeln) Lastfördelningens inverkan på stabiliteten hos ett tankfordon (Lastauksen painoutuksen vaikutus säiliöajoneuvon stabiilisuuteen)			
Referat Rapporten beskriver ett datasimuleringsarbete som gjorts på initiativ av Kommunikationsministeriet och vars målsättning var att utreda lastningens inverkan på fordonskombinationens stabilitet i två olika körsituationer. Simuleringsarbetet gjordes för tre fordonskombinationer så att fordonssystemet lastades antingen med huvudbelastningen på lastbilen eller på släpet. De simulerade fordonskombinationerna var 1) kombination med en egentlig släpvagn där lastbil och släpvagn har tre axlar (kombination 3-3), 2) kombination med en egentlig släpvagn där lastbilen har tre axlar och släpvagnen fyra (kombination 3-4) och 3) semitrailerkombination med en påhängd släpvagn; lastbilen, semitrailern och den påhängda släpvagnen har 3 axlar (kombination 3-3-3). Två bassituationer beräknades med hjälp av simuleringsmodellerna: dubbelt filbyte där föraren väjar för ett hinder i sin egen körfil och styr in på den mötande trafikens fil och därefter omedelbart styr tillbaka till sin egen fil, samt körning på vägrepen där fordonet hamnar ut på vägrepen och föraren försöker manövrera det tillbaka till körfilen. Vid dubbelfilbytet var fordonets hastighet 80 km/h och vid vägrenskörningen 50 km/h. Beräkningsresultaten visas i form av figurer i rapporten. Dessutom erhöll beställaren dataanimeringar av utvalda situationer i beräkningarna. Förarens reaktioner i extrema situationer påverkas i betydande grad av hans observationer från förarsätet. Om fordonskombinationens lastbil har däck vilkas väggrepp överstiger väggreppet hos släpvagnens däck får föraren ingen information om att släpvagnsdäcken eventuellt förlorat väggreppet, och släpvagnen kan sladda obehärskat åt sidan. På basis av beräkningarna i detta arbete bör man undvika att lasta en fordonskombination med en egentlig släpvagn så att huvudvikten kommer på släpvagnen. Om den sista enheten i en lång fordonskombination börjar sladda i sidled när informationen inte lätt föraren under körning, och han kan därför inte automatiskt reagera om den egentliga släpvagnen eventuellt får sidosladd. På basis av de beräknade resultaten från denna undersökning är en egentlig släpvagn som kopplats efter en semitrailer känslig för sidosvängningar, och koppling av släpvagn efter en semitrailerkombination kan därför inte rekommenderas.			
Nyckelord datasimulering, lastning, stabilitet, tankfordon			
Övriga uppgifter Kontaktperson vid ministeriet: Esko Kärki			
Seriens namn och nummer Kommunikationsministeriets publikationer 3/2004		ISSN 1457-7488	ISBN 951-723-869-X
Sidoantal 40	Språk finska	Pris 7 €	Sekretessgrad offentlig
Distribution Edita Publishing Ab		Förlag Kommunikationsministeriet	



Authors (from body; name, chairman and secretary of the body) Juha Kortelainen, VTT Industrial Systems		Type of publication Research	
		Assigned by Ministry of Transport and Communications	
		Date when body appointed	
Name of the publication The effect of the loading weight distribution on the stability of a tank vehicle			
Abstract <p>The report describes a computer simulation made for the Ministry of Transport and Communications Finland with the objective of evaluating the effect of loading on the stability of an articulated vehicle in two different situations during operation. The simulation was made for three types of articulated vehicles by placing the load either mainly on the truck or the trailer part of the vehicle. The simulated articulated vehicles were 1) a trailer combination where the truck and the trailer have three axles (combination 3-3), 2) a trailer combination where the truck has three axles and the trailer has four axles (combination 3-4), and 3) an articulated semitrailer followed by an additional trailer; the truck, the semitrailer and the trailer all have three axles (combination 3-3-3).</p> <p>The simulation models cover two basic situations: double exchange of driving lane, where the driver manoeuvres around an obstacle in his own lane into the lane of the approaching traffic, and returns immediately to his own lane, and driving on the road shoulder, where the vehicle swerves onto the road shoulder, and the driver tries to manoeuvre back to the traffic lane. The speed was 80 km/h in the case of the double exchange of driving lane and 50 km/h in the case of swerving onto the road shoulder. The results of the calculations are presented as graphs at the end of the report. In addition, the client received computer animations of selected calculated cases.</p> <p>The response of the driver in extreme situations is largely influenced by his observations from the driver's seat. If the grip of the truck tyres is significantly better than that of the trailer tyres, the driver will get no response regarding the possible loss of trailer tyre grip, and the trailer may start to slide uncontrollably sideways. Based on the calculated results of this study, the distribution of load to the trailer part of an articulated vehicle with a separate trailer should be avoided.</p> <p>The sideway slides of the last unit of a long articulated vehicle will not easily be perceived by the driver during driving, and the driver will therefore not be able to feel and correct the possible starting slide of the main trailer. Based on the calculations of this study, a trailer behind an articulated semitrailer is subjected to sideway swerves, and it is therefore not recommended to attach a trailer behind an articulated semitrailer.</p>			
Keywords computer simulation, loading, stability, tank vehicle			
Miscellaneous Contact person at the Ministry: Mr Esko Kärki			
Serial name and number Publications of the Ministry of Transport and Communications 3/2004		ISSN 1457-7488	ISBN 951-723-869-X
Pages, total 40	Language Finnish	Price 7 €	Confidence status Public
Distributed by Edita Publishing Ltd		Published by Ministry of Transport and Communications	

ESIPUHE

Ajoneuvoyhdistelmän lastaustapa vaikuttaa merkittävästi ajoneuvon stabiilisuuteen ääritilanteissa. Harjavallassa 11.10.2002 tapahtuneen säiliöajoneuvon kaatumisonnettomuuden seurauksena liikenne- ja viestintäministeriö käynnisti tutkimuksen, jolla pyrittiin selvittämään ajoneuvoyhdistelmän vetoauton ja perävaunun kuormauksen painotuksen merkitys ajoneuvon stabiilisuuteen. Tutkimuksen tuloksia käytetään hyväksi pohdittaessa mahdollisia lainsäädännöllisiä rajoituksia ajoneuvoyhdistelmien lastaukseen tavoitteena liikenneturvallisuuden parantaminen.

Tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin säiliöajoneuvon stabiilisuutta kahdessa ajotapauksessa lastattaessa ajoneuvoyhdistelmä vetoauto- tai perävaunupainotteisesti. Selvitykseen valitut ajotapaukset olivat kaksoiskaistanvaihto, jossa kuljettaja väistää omalla ajokaistalla olevaa estettä vastaantulevien ajokaistalle ja palaa heti takaisin omalle ajokaistalle, sekä pientareelleajotilanne, jossa ajoneuvo ajautuu tien pientareelle ja kuljettaja pyrkii ohjaamaan ajoneuvon takaisin ajokaistalle. Dynaamisten ajotilanteiden simulointien lisäksi tutkimuksen yhteydessä tehtiin Euroopan talouskomission (ECE) sääntö nro 111 mukainen stabiilisuusanalyysi Harjavallan onnettomuusajoneuvon mitoituksen mukaiselle ajoneuvolle.

Tämä raportti perustuu tietokonesimulointeihin, jotka tehtiin VTT Tuotteet ja tuotanto-yksikössä Ajoneuvot ja työkoneet tutkimusryhmässä käyttäen ADAMS-mekaniikkasimulointiohjelmistoa. Tehdyistä simuloinneista ja tulosten käsittelystä VTT:llä vastasi tutkija Juha Kortelainen. Simulointimalleista varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, jonka perävaunu on kolmiakselinen, vastaa päämitoitukseltaan Harjavallassa tapahtuneen ajoneuvoyhdistelmän kaatumisonnettomuuden ajoneuvoa. Ajoneuvomallin mitoituksen lähtötietojen hankinnassa auttoi Juhani Alaruka Viinikka Oy:stä.

Simuloinneissa käytetyt laskentamallit perustuvat DI Tero Kiviniemen liikenne- ja viestintäministeriön julkaisussa 39/2000 *Säiliöajoneuvon stabiilisuus* kuvaamiin simulointimalleihin. Tero Kiviniemi auttoi myös simulointimallien mallinnus- ja ajoneuvoteknisissä yksityiskohdissa sekä saatujen tulosten tulkinnassa.

Liikenne- ja viestintäministeriössä työstä vastasi liikenneneuvos Seija Miettinen. Hänen lisäseen työhön osallistuivat yli-insinööri Esko Kärki ja ylitarkastaja Mari Makkonen.

Helsingissä 12.1.2003

Liikenneneuvos Seija Miettinen

SISÄLLYSLUETTELO

ESIPUHE

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	4
YHTEENVETO.....	5
1 JOHDANTO	6
2 SIMULOINTIMALLI.....	6
2.1 Vetoautojen ja perävaunujen säiliöt.....	9
2.2 Ajoalusta	10
3 SIMULOINTITAPAUKSET	10
4 TULOKSET	12
4.1 Kaksoiskaistanvaihtotapaukset.....	13
4.1.1 Yhdistelmät 3-3 ja 3-4.....	13
4.1.2 Yhdistelmä 3-3-3.....	14
4.2 Pientareelleajotapaukset.....	23
4.3 Tietokoneanimaatiot	24
5 STABIILISUUSANALYYSI	24
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	24
7 KIRJALLISUUSLUETTELO.....	25
LIITE A: AJONEUVOYHDISTELMIEN PÄÄMITAT.....	26
LIITE B: RENGSMALLIN PARAMETRIT	28
LIITE C: STABIILISUUSANALYYSIN TULOKSET	30

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$F_{z,r min}$	Renkaan pystyvoiman minimiarvo ajotapauksen aikana
$F_{z,r sta}$	Renkaan pystyvoiman staattinen arvo ajotapauksen aikana
PP	Paripyöräasennus
PV	Perävaunu
RA	Vahvistus (Rearward Amplification)
RKS	Rengaskuormitussuhde
$S_{pv max}$	Suureen maksimiarvo perävaunun takimmaisen akselin kohdalla
$S_{va max}$	Suureen maksimiarvo vetoauton etuakselin kohdalla
s	Ajoneuvoyksikön puoli, esim. vetoauton vasen puoli
VA	Vetoauto
YP	Yksittäispyöräasennus
μ	Kitkakerroin

YHTEENVETO

Raportissa kuvataan Liikenne- ja viestintäministeriölle tehty tietokonesimulointityö, jonka tavoitteena oli selvittää lastauksen vaikutus ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen kahdessa erilaisessa ajotilanteessa. Simulointityö tehtiin kolmelle ajoneuvoyhdistelmälle niin, että ajoneuvoyhdistelmä lastattiin joko vetoauto- tai perävaunupainotteisesti. Simuloidut ajoneuvoyhdistelmät olivat:

- varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, jossa vetoauto ja perävaunu olivat kolmiakselisia (yhdistelmä 3-3),
- varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, jossa vetoauto oli kolmiakselinen ja perävaunu neliakselinen (yhdistelmä 3-4), ja
- puoliperävaunuyhdistelmä, johon oli kytketty varsinainen perävaunu; vetoauto, puoliperävaunu ja varsinainen perävaunu olivat kolmiakselisia (yhdistelmä 3-3-3).

Laskennan tuloksia esitetään tämän raportin lopussa kuvaajien avulla. Kuvaajien lisäksi työn tilaajalle toimitettiin valikoiduista laskentatapauksista tietokoneanimaatiot.

Simulointimalleilla laskettiin kaksi perustapausta: kaksoiskaistanvaihto, jossa kuljettaja väistää omalla ajokaistalla olevaa estettä vastaantulevien ajokaistalle ja palaa heti takaisin omalle ajokaistalle, sekä pientareelleajotapaus, jossa ajoneuvo ajautuu tien pientareelle ja kuljettaja pyrkii ohjaamaan ajoneuvon takaisin ajokaistalle. Kaksoiskaistanvaihtotapauksissa ajoneuvon ajonopeus oli 80 km/h ja pientareelleajotapauksissa 50 km/h.

Kuljettajan reagointiin ääritilanteissa vaikuttaa oleellisesti se, mitä hän kuljettajan paikalta havaitsee. Jos ajoneuvoyhdistelmän vetoauton renkaiden pito on huomattavasti parempi kuin perävaunun, ei kuljettaja saa palautetta mahdollisesta perävaunun renkaiden pidonmenetyksestä ja perävaunun voi lähteä hallitsemattomaan sivuluistoon. Jos vetoauto kallistelee vähän verrattuna perävaunuun, ei kuljettajalle välity välitöntä tuntumaa tilanteesta, mikä voi johtaa perävaunun kaatumiseen. Vastaavasti jos vetoauto kallistelee voimakkaammin kuin perävaunu ja mahdollinen renkaiden pidon menettäminen tapahtuu ensin vetoautossa, saa kuljettaja tästä välittömän palautteen ja voi yrittää korjata tilanteen ennen kuin luisto on liian suuri. Tämän työn puitteissa saatujen laskentatulosten perusteella tulisi varsinaisella perävaunulla varustetun yhdistelmän lastaamista perävaunupainotteisesti välttää.

Koska kuljettajan ajotapaan vaikuttaa oleellisesti se, mitä hän havaitsee ajon aikana, on yhdistelmän, jossa puoliperävaunuyhdistelmän perään on kytketty varsinainen perävaunu, käyttäminen kyseenalaista. Pitkän yhdistelmän viimeisen yksikön sivuttaissuuntaiset luistot eivät helposti välity kuljettajalle ajon aikana eikä kuljettaja näin ollen voi korjata tuntuman perusteella mahdollisesti alkavaa varsinaisen perävaunun sivuluistoa. Tämän työn puitteissa saatujen laskentatulosten perusteella puoliperävaunuyhdistelmän perään kytketty varsinainen perävaunu on altis sivuttaisheilahteluille eikä varsinaisen perävaunun kytkemistä puoliperävaunuyhdistelmän perään voida suositella.

1 JOHDANTO

Tässä raportissa kuvataan Liikenne- ja viestintäministeriölle tehty tietokonesimulointityö. Työn tavoitteena oli selvittää, miten seuraavat tekijät vaikuttavat ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen:

- vetoauton tai puoliperävaunun ja varsinaisen perävaunun välinen kuormauksen painotus,
- varsinaisen perävaunun akselien lukumäärä,
- telin laskemisen vaikutus tapauksessa, jossa vetoauto on tyhjä ja perävaunu on lastattu, sekä
- varsinaisella perävaunulla varustettujen yhdistelmien stabiilisuuden vertailu puoliperävaunuyhdistelmästä ja varsinaisesta perävaunusta muodostetun yhdistelmän stabiilisuuteen.

Simuloineissa käytettiin kahta erilaista ajotilannetta: kaksoiskaistanvaihto, jolloin ajoneuvo väistää ajoradalla olevaa estettä, sekä tien pientareelleajotilanne, jossa ajoneuvo ajautuu tien piennaralueelle. Simulointityö tehtiin kolmella ajoneuvoyhdistelmällä. Laskennan tuloksia esitetään tämän raportin lopussa kuvaajien avulla. Näiden lisäksi työn tilaajalle toimitettiin valikoiduista laskentatapauksista tietokoneanimaatiot.

Simulointien lisäksi tehtiin yhdelle ajoneuvoyhdistelmälle Euroopan talouskomission (ECE) sääntö nro 111 mukainen stabiilisuusanalyysi. Analyysin tulos on esitetty liitteessä C.

2 SIMULOINTIMALLI

Kuvassa 1 on esitetty esimerkki yhdestä simulointeihin käytetystä laskentamallista. Laskennassa käytettyjen simulointimallien mallinnusperiaatteet on kuvattu aikaisemmin julkaistussa raportissa [1].

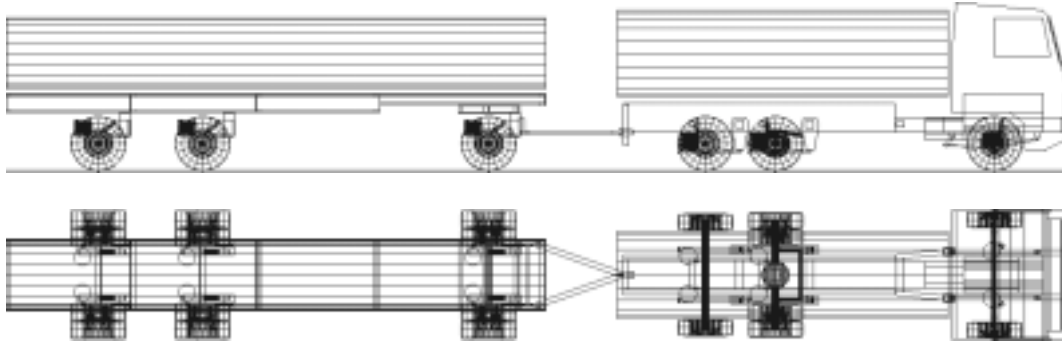
Tämän työn puitteissa mallinnettiin kolme ajoneuvoyhdistelmää:

- varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, jossa vetoauto ja perävaunu olivat kolmiakselisia (yhdistelmä 3-3),
- varsinaisella perävaunulla varustettu yhdistelmä, jossa vetoauto oli kolmiakselinen ja perävaunu neliakselinen (yhdistelmä 3-4) ja
- puoliperävaunuyhdistelmä, johon oli kytketty varsinainen perävaunu; vetoauto, puoliperävaunu ja varsinainen perävaunu olivat kolmiakselisia (yhdistelmä 3-3-3).

Mallinnettujen kolmen ajoneuvoyhdistelmän päämitat sekä akseli- ja kokonaismassat on esitetty liitteen A kuvissa 1 – 4. Taulukossa 1 on esitetty mallinnettujen ajoneuvoyhdistelmien osakokonaisuuksien massat ja kokonaismassat. Taulukossa 2 on esitetty vetoautojen ja perävaunujen massakeskipisteiden sijainnit (tyhjä ja kuormatut ajoneuvot). Taulukossa 3 on esitetty ajoneuvoyhdistelmien rengastustiedot ja taulukossa 4 perävaunujen akselistojen jousivälit. Liitteessä B on esitetty laskennassa käytetyn rengasmallin parametrien arvot. Laskenta tehtiin käyttäen ADAMS-mekaniikkasimulointiohjelmistoa.

Taulukko 1. Ajoneuvoyhdistelmien osakokonaisuuksien massat ja yhdistelmien kokonaismassat.

Yhdistelmä	3-3	3-4	3-3-3
Vetoauto			
Runko	2204 kg	2204 kg	2004 kg
Moottori + vaihteisto	1500 kg	1500 kg	1800 kg
Ohjaamo	2000 kg	2000 kg	1300 kg
Säiliö	3100 kg	3100 kg	-
Vetopöytä	-	-	102 kg
Etuakselisto	713 kg	713 kg	713 kg
Telin etuakseli (vetävä)	1192 kg	1192 kg	1192 kg
Telin taka-akseli	650 kg	650 kg	650 kg
Kokonaismassa, tyhjä	11360 kg	11360 kg	7762 kg
Kuorma	11800 kg	11800 kg	-
Kokonaismassa, kuormattu	23160 kg	23160 kg	7762 kg
Puoliperävaunu			
Runko	-	-	3000 kg
Säiliö	-	-	4000 kg
Akseli a1	-	-	723 kg
Akseli a2	-	-	723 kg
Akseli a3	-	-	723 kg
Kokonaismassa, tyhjä	-	-	9169 kg
Kuorma	-	-	25678 kg
Kokonaismassa, kuormattu	-	-	34847 kg
Varsinainen perävaunu			
Veto-osa + aisa	550 kg	550 kg	550 kg
Runko	3000 kg	3000 kg	3000 kg
Säiliö	2690 kg	2690 kg	1500 kg
Akseli a1	720 kg	720 kg	720 kg
Akseli a2	720 kg	720 kg	720 kg
Akseli a3	720 kg	720 kg	720 kg
Akseli a4	-	720 kg	-
Kokonaismassa, tyhjä	8400 kg	9120 kg	7210 kg
Kuorma	19413 kg	19413 kg	10176 kg
Kokonaismassa, kuormattu	27813 kg	28533 kg	17386 kg
Ajoneuvoyhdistelmä			
Kokonaismassa, tyhjä	19760 kg	20480 kg	24141 kg
Kokonaismassa, kuormattu	50972 kg	51692 kg	59995 kg



Kuva 1. Laskentamalli ajoneuvoyhdistelmästä 3-3.

Taulukko 2. Ajoneuvoyhdistelmien vetoautojen ja perävaunujen massakeskipisteiden asemat.

Yhdistelmä		3-3	3-4	3-3-3
Vetoauto⁽¹⁾				
X-asema, tyhjä	[mm]	-2583	-2583	-1309
Z-asema, tyhjä	[mm]	1386	1386	948
X-asema, kuormattu	[mm]	-3395	-3395	-1315
Z-asema, kuormattu	[mm]	1824	1824	938
Puoliperävaunu⁽²⁾				
X-asema, tyhjä	[mm]	-	-	-5946
Z-asema, tyhjä	[mm]	-	-	1628
X-asema, kuormattu	[mm]	-	-	-5323
Z-asema, kuormattu	[mm]	-	-	2210
Varsinainen perävaunu⁽²⁾				
X-asema, tyhjä	[mm]	-4220	-3486	-2879
Z-asema, tyhjä	[mm]	1374	1257	1216
X-asema, kuormattu	[mm]	-4198	-3639	-2830
Z-asema, kuormattu	[mm]	1996	1853	1836

¹⁾ Vetoauton painopisteen aseman referenssipiste on vetoauton etuakselinlinjalla maanpinnan tasossa ajoneuvon ollessa mallinnusasennossa.

²⁾ Perävaunun painopisteen aseman referenssipiste on perävaunun etutelin tai -akselin nivel-pisteen tai vetopisteen kohdalla maanpinnan tasossa ajoneuvon ollessa mallinnusasennossa.

Taulukko 3. Ajoneuvoyhdistelmien rengastus.

Yhdistelmä	3-3 ¹⁾		3-4 ¹⁾		3-3-3 ¹⁾	
Vetoauto						
Etu	295/80-R22.5	YP	295/80-R22.5	YP	295/80-R22.5	YP
Teli / etu	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP
Teli / taka	385/65-R22.5	YP	385/65-R22.5	YP	385/65-R22.5	YP
Puoliperävaunu						
Teli / etu	-	-	-	-	385/65-R22.5	YP
Teli / keski	-	-	-	-	385/65-R22.5	YP
Teli / taka	-	-	-	-	385/65-R22.5	YP
Varsinainen perävaunu						
Etuteli / etu	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP
Etuteli / taka	-	-	295/80-R22.5	PP	-	-
Takateli / etu	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP
Takateli / taka	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP	295/80-R22.5	PP

¹⁾ PP = paripyöräasennus, YP = yksittäispyöräasennus

Taulukko 4. Perävaunujen akselistojen jousivälit.

	Yksittäispyöräasennus	Paripyöräasennus
Ilmajousien väli	1140 mm	700 mm
Tukijousien väli	1300 mm	900 mm

2.1 Vetoautojen ja perävaunujen säiliöt

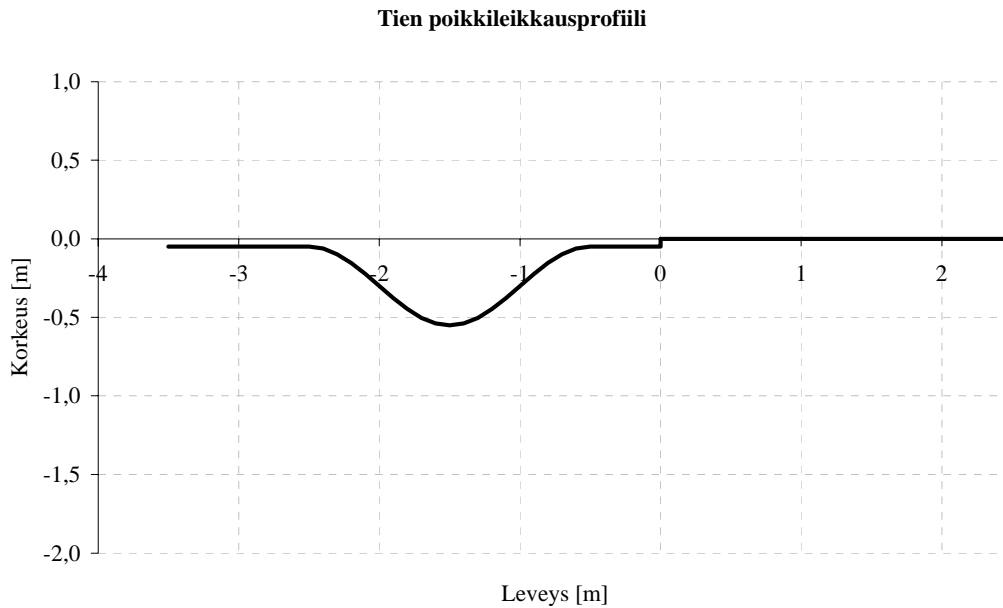
Laskennassa vetoauton ja perävaunujen säiliöiden täyttöaste oli 0 %, 50 % tai 100 % (kappaaleen *Simulointitapaukset* taulukossa 6 on esitetty laskennassa käytetyt lastausvaihtoehdot). Taulukossa 5 on esitetty säiliöiden neste-elementtien jako sekä laskennassa käytetyt nestetiheydet. Neste-elementtien tiheydet valittiin niin, ettei vetoautojen ja perävaunujen kokonaismassa 100 % täyttöasteella ylittänyt suurinta sallittua arvoa.

Taulukko 5. Vetoautojen ja perävaunujen säiliöiden neste-elementtijako ja käytetyt nestetiheydet.

	Vetoauto	Varsinainen perävaunu	Varsinainen perävaunu	Puoliperävaunu
	3-3 ja 3-4	3-3 ja 3-4	3-3-3	3-3-3
Osastojen lkm	5	8	5	10
Osaston pituus	1300 mm	1325 mm	1520 mm	1380 mm
Nesteen tiheys	1190 kg/m ³	1190 kg/m ³	870 kg/m ³	820 kg/m ³

2.2 Ajoalusta

Kuvassa 2 on esitetty laskennassa käytetyn ajoalustan poikkileikkausprofiili. Kaikissa simulointitapauksissa käytettiin samaa ajoalustaa. Ajoalusta on ideaalisen tasainen ja suora tie. Tien reunaan mallinnettiin 50 mm korkea päällysteen reuna, 0,5 m leveä piennar sekä oja, jonka syvyys on 0,5 m ja leveys 2 m. Laskennassa tien ja renkaan välisen kontaktin kitkakerroin oli $\mu = 0,8$.



Kuva 2. Laskennassa käytetty tien poikkileikkausprofiili.

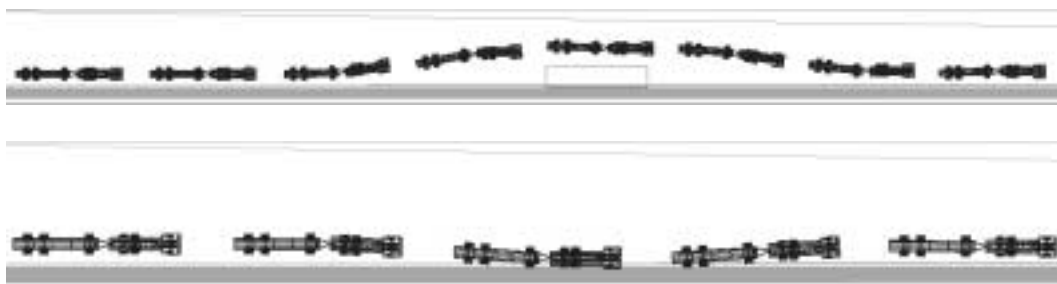
3 SIMULOINTITAPAUKSET

Simulointimalleilla laskettiin kaksi perustapausta:

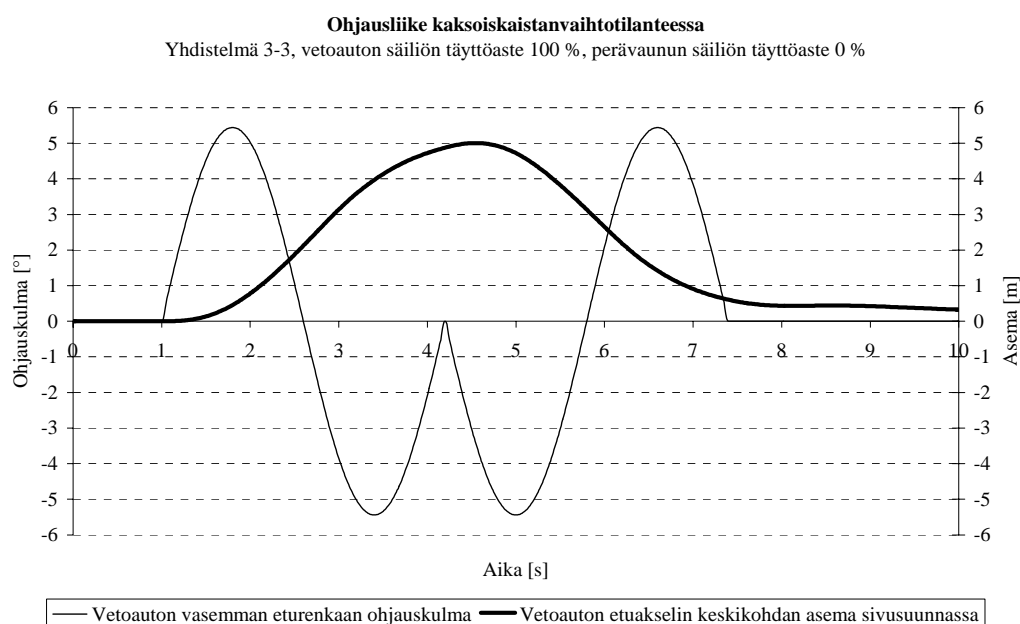
- kaksoiskaistanvaihto, jossa kuljettaja väistää omalla ajokaistalla olevaa estettä vastaantulevien ajokaistalle ja palaa heti takaisin omalle ajokaistalle (kuva 3), sekä
- pientareelleajotilanne, jossa ajoneuvo ajautuu tien pientareelle ja kuljettaja pyrkii ohjaamaan ajoneuvon takaisin ajokaistalle (kuva 3).

Kaksoiskaistanvaihtotapauksissa ajoneuvon ajonopeus oli 80 km/h ja pientareelleajotapauksissa 50 km/h.

Kaikissa kaksoiskaistanvaihtotapauksissa käytettiin samantyyppistä matemaattista ohjausliikettä. Jokaisen tapauksen etupyörien maksimikäntökulma valittiin niin, että vetoauton sivuttaissiirtymä oli 5 m mitattuna etuakselin keskikohdasta. Kaksoiskaistanvaihtotapausten ohjausliikkeiden kesto oli kaikissa tapauksissa yhtä pitkä. Kuvassa 4 on esitetty vetoauton vasemman eturenkaan kääntökulma sekä vetoauton etuakselin keskikohdan sivuttaisasema ajan funktiona, kun simulointimallina on käytetty ajoneuvoyhdistelmää 3-3. Taulukossa 6 on esitetty lasketut kaksoiskaistanvaihtotapaukset ja niissä käytetyt vasemman eturenkaan maksimiohjauskulmat.



Kuva 3. Lasketut ajotapaukset: kaksoiskaistanvaihto (yläkuva) ja pientareelleajo (alakuva).



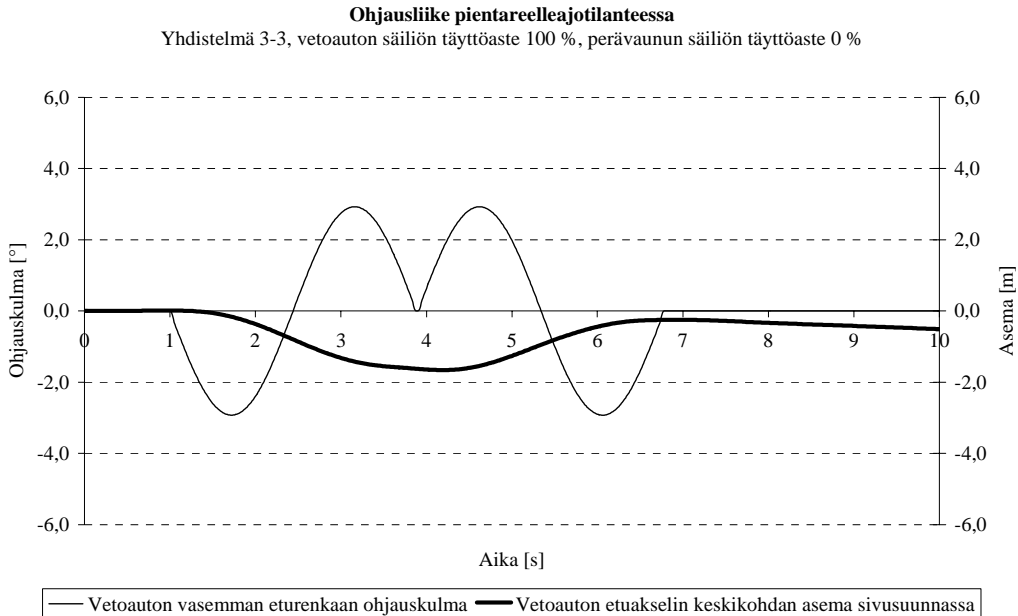
Kuva 4. Kaksoiskaistanvaihtotapausten ohjausliike sekä vetoauton etuakselin keskikohdan sivuttaisasema.

Taulukko 6. Lasketut kaksoiskaistanvaihtotapaukset.

Lastaustapa	Maksimiohjauskulma		
	3-3	3-4	3-3-3
VA 100 % - PV 0 %	5,441 °	5,430 °	4,260 °
VA 50 % - PV 0 %	3,654 °	3,641 °	3,348 °
VA 0 % - PV 0 %	2,542 °	2,514 °	2,936 °
VA 0 % - PV 50 %	2,136 °	2,190 °	2,983 °
VA 0 % - PV 100 %	1,646 °	1,830 °	3,081 °
VA 0 % - PV 0 %, vetoauton teli alhaalla	2,973 °	2,944 °	-
VA 0 % - PV 50 %, vetoauton teli alhaalla	2,591 °	2,647 °	-
VA 0 % - PV 100 %, vetoauton teli alhaalla	2,099 °	2,311 °	-
Tapauksia yhteensä	8	8	5

Pientareelleajotapauksissa käytettiin vastaavaa ohjausliikettä kuin kaksoiskaistanvaihtotapauksissa, mutta ohjauskulma oli negatiivinen ja ohjausliikkeen ajallinen kesto oli lyhyempi.

Ohjauskulmien suuruudet valittiin niin, että yhdistelmien 3-3 ja 3-3-3 kaikki tapaukset pysyvät tiellä. Yhdistelmän 3-4 osalta käytettiin yhdistelmän 3-3 ohjauskulmaa. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki pientareelleajotapausten ohjausliikkeestä sekä vetoauton etuakselin keskikohdan sivuttaisasema ajan funktiona. Taulukossa 7 on esitetty lasketut pientareelleajotapaukset.



Kuva 5. Pientareelleajotapausten ohjausliike sekä vetoauton etuakselin keskikohdan sivuttaisasema.

Taulukko 7. Lasketut pientareelleajotapaukset.

Lastaustapa	Maksimiohjauskulma		
	3-3	3-4	3-3-3
VA 100 % - PV 0 %	-2,926 °	-2,903 °	-2,363 °
VA 0 % - PV 100 %	-1,808 °	-1,774 °	-2,060 °
VA 0 % - PV 100 %, vetoauton teli alhaalla	-2,175 °	-2,141 °	
Tapauksia yhteensä	3	3	2

4 TULOKSET

Laskennan tuloksina esitetään ajoneuvoyhdistelmän ajoneuvoyksikön (vetoauto ja perävaunu) sivuttaiskiihtyvyyden ja sivuttaisaseman RA-arvot, ajoneuvoyksikön maksimikallistuskulma sekä rengaskuormitussuhde (RKS).

Suureen (esim. ajoneuvoyksikön sivuttaiskiihtyvyys) RA-arvo kuvaa suureen vahvistusta vetoauton etuakselilta perävaunun taka-akselille. Suureen RA-arvon ollessa yksi, ei suure vahvistu. Suureen RA-arvo lasketaan

$$RA = \frac{S_{pv \max}}{S_{va \max}} \quad (1)$$

missä

$S_{pv \max}$	Suureen maksimiarvo perävaunun takimmaisena akselin kohdalla ajotapauksen aikana
$S_{va \max}$	Suureen maksimiarvo vetoauton etuakselin kohdalla ajotapauksen aikana

Rengaskuormitussuhde kuvaa renkaan pystyvoiman minimiarvon suhdetta renkaan pystyvoiman staattiseen arvoon (renkaan pystyvoima ajoneuvon ollessa paikallaan tasaisella alustalla). Rengaskuormitussuhteen arvon mennessä nolnaan renkaan ote tiestä irtoaa.

Rengaskuormitussuhde lasketaan

$$RKS = \frac{\sum_s F_{zr \min}}{\sum_s F_{zr \text{sta}}} \quad (2)$$

missä

$F_{zr \min}$	Renkaan pystyvoiman minimiarvo ajotapauksen aikana
$F_{zr \text{sta}}$	Renkaan pystyvoiman staattinen arvo ajotapauksen aikana
s	Ajoneuvoyksikön puoli, esim. vetoauton vasen puoli

4.1 Kaksoiskaistanvaihtotapaukset

Kuvissa 6 – 20 on esitetty seuraavat laskennan tulokset:

- Kuvat 6 – 8: sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvot yhdistelmille 3-3, 3-4 ja 3-3-3 eri lastaustavoilla
- Kuvat 9 – 10: sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvot yhdistelmille 3-3 ja 3-4, kun vetoauton teli on laskettu alas; lastaustapoina tyhjä yhdistelmä sekä perävaunun painotteisesti lastatut vaihtoehdot (VA 0 % - PV 50 % ja VA 0 % - PV 100 %)
- Kuvat 11 – 13: ajoneuvoyksikön maksimikallistuskulma yhdistelmille 3-3, 3-4 ja 3-3-3 eri lastaustavoilla
- Kuvat 14 – 15: ajoneuvoyksikön maksimikallistuskulma yhdistelmille 3-3 ja 3-4, kun vetoauton teli on laskettu alas; lastaustapoina tyhjä yhdistelmä sekä perävaunun painotteisesti lastatut vaihtoehdot (VA 0 % - PV 50 % ja VA 0 % - PV 100 %)
- Kuvat 16 – 18: ajoneuvoyksikön rengaskuormitussuhde yhdistelmille 3-3, 3-4 ja 3-3-3 eri lastaustavoilla
- Kuvat 19 – 20: ajoneuvoyksikön rengaskuormitussuhde yhdistelmille 3-3 ja 3-4, kun vetoauton teli on laskettu alas; lastaustapoina tyhjä yhdistelmä sekä perävaunun painotteisesti lastatut vaihtoehdot (VA 0 % - PV 50 % ja VA 0 % - PV 100 %)

4.1.1 Yhdistelmät 3-3 ja 3-4

Laskentatulosten perusteella voidaan ajoneuvoyhdistelmien ajodynamiikasta todeta seuraavaa.

Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo:

- Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo on suhteellisen korkea vetoauton painotteisesti lastatussa tapauksissa. Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo laskee lastauksen painotuksen siirtyessä edestä taakse. Tämä johtunee siitä, että lastattu perävaunu käyttäytyy rauhallisemmin kaarroksen aikana kuin tyhjä perävaunu.

- Perävaunupainotteisesti lastatuissa tapauksissa vetoauton telin laskeminen nostaa hiukan sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvoa. Telin ollessa alhaalla vetoauton liikkeet välittyvät voimakkaammin perävaunuun, jolloin perävaunun kiihtyvyydsarvot nousevat.

Maksimikallistuskulma:

- Vetoauton ja perävaunun maksimikallistuskulmien arvot ovat johdonmukaisia eri lastausvaihtoehdoilla. Mitä enemmän ajoneuvoyksikön säiliössä on kuormaa, sitä voimakkaammin kyseinen yksikkö kallistelee.
- Perävaunupainotteisesti lastatuissa tapauksissa vetoauton telin laskeminen pienentää vetoauton kallistelua, mikä on johdonmukaista, koska vetoauton kallistusjäykkyys kasvaa. Vastaavasti perävaunun maksimikallistuskulma kasvaa kasvavien sivuttaiskiihtyvyyksien seurauksena.

Rengaskuormitussuhde (RKS):

- Vetoautopainotteisesti lastattujen yhdistelmien vetoauton RKS-arvot ovat alhaisempia kuin perävaunujen RKS-arvot. Vastaavasti perävaunupainotteisesti lastattujen yhdistelmien perävaunujen RKS-arvot ovat selvästi alhaisempia kuin vetoauton RKS-arvot.
- Perävaunupainotteisesti lastattujen yhdistelmien vetoauton telin laskeminen huonontaa RKS-arvojen suhdetta vetoauton ja perävaunun välillä. Tällöin kuljettajan tuntuma yhdistelmän käyttäytymiseen heikkenee ja renkaiden pidon ja sitä kautta ajoneuvon hallinnan menetyksen riski kasvaa.

Yhdistelmän 3-4 tulokset ovat hyvin samanlaiset kuin yhdistelmän 3-3. Yhdistelmän 3-4 perävaunu kallistelee hiukan enemmän kuin yhdistelmän 3-3 perävaunu. Perävaunupainotteisesti lastattujen tapausten osalta vetoauton telin laskemisen RKS-arvojen suhdetta huonontava vaikutus on selvempi kuin yhdistelmillä 3-3.

Kuljettajan käyttäytymiseen ääritilanteissa vaikuttaa oleellisesti se, mitä kuljettaja tuntee ja näkee. Jos vetoauton renkaiden pito on huomattavasti parempi kuin perävaunun tai jos vetoauto kallistelee vähän verrattuna perävaunuun, ei kuljettaja saa palautetta mahdollisesta renkaiden pidonmenetyksestä ja perävaunun voi lähteä sivuluistoon. Jos vetoauto kallistelee voimakkaammin kuin perävaunu ja mahdollinen renkaiden pidon menettäminen tapahtuu ensin vetoautossa, saa kuljettaja tästä välittömän palautteen ja voi yrittää korjata tilanteen ennen kuin luisto on liian suuri.

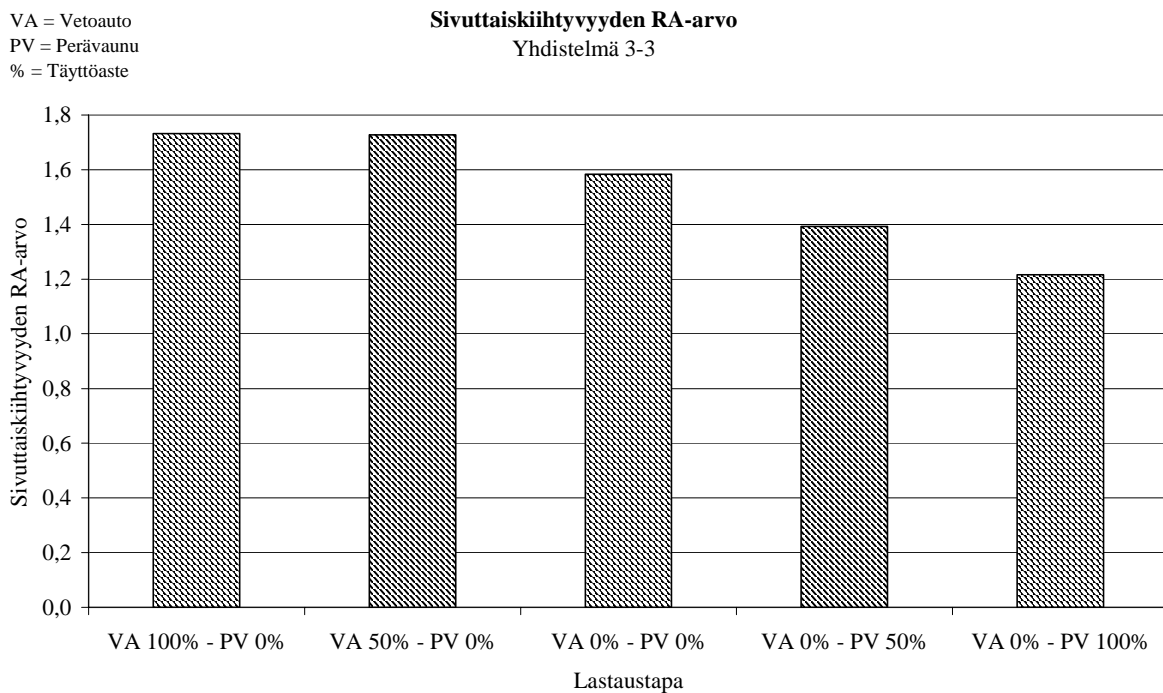
4.1.2 Yhdistelmä 3-3-3

Laskentatulosten perusteella voidaan todeta seuraavaa.

- Perävaunupainotteisesti lastatuissa tapauksissa puoliperävaunuyhdistelmän perään kytketyn varsinaisen perävaunun toisen puolen renkaiden kontakti tiehen irtoaa hetkelisesti (rengas nousee hiukan irti tien pinnasta), mikä näkyy sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvojen tuloksissa.
- Laskentatapausten animaatioiden perusteella puoliperävaunuyhdistelmä suoriutuu kaksoiskaistanvaihdoista rauhallisesti, mutta perään kytketyn varsinaisen perävaunun liikkeet ovat rajuja.
- Ajoneuvoyksikön maksimikallistuskulman kuvaajista näkyy selvästi varsinaisen perävaunun voimakas kallistelu perävaunupainotteisesti lastatuissa tapauksissa.
- Yhdistelmällä 3-3-3 vetoauton RKS-arvot ovat kaikilla lastaustavoilla korkeammat kuin varsinaisella perävaunulla. Näin ollen on todennäköisempää, että varsinaisen pe-

rävaunun renkaiden ote irtoaa tiestä enemmän kuin vetoauton tai puoliperävaunun renkaiden ote.

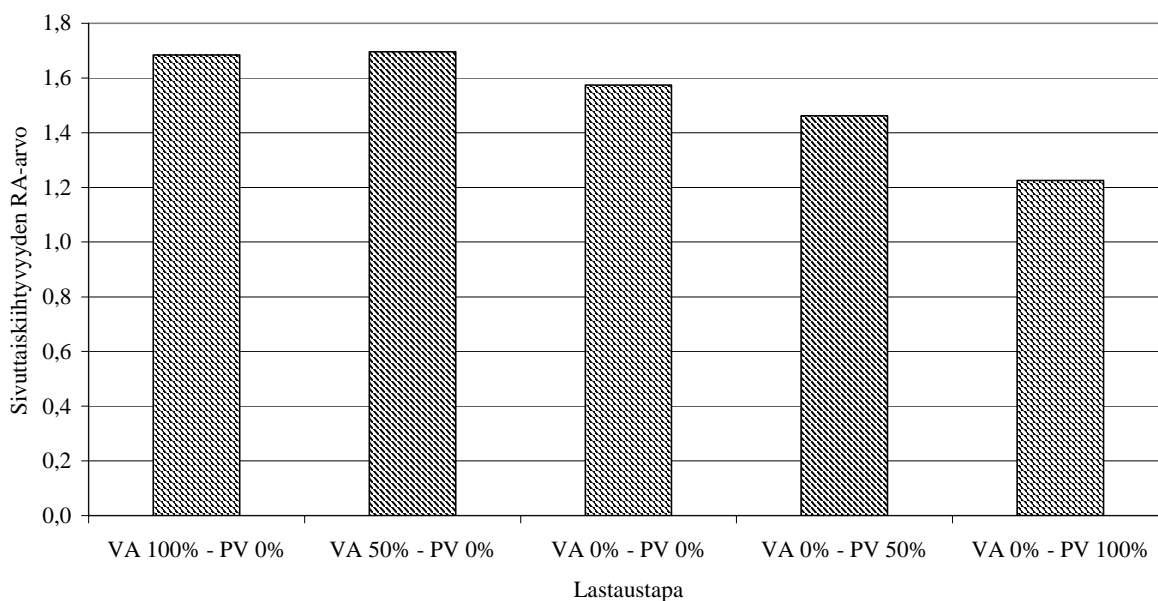
Koska kuljettajan ajotapaan vaikuttaa oleellisesti se, mitä hän näkee ja kokee ajon aikana, on tällaisen yhdistelmän (puoliperävaunuyhdistelmän perään on kytketty varsinainen perävaunu) käyttäminen kyseenalaista. Pitkän yhdistelmän viimeisen yksikön luistot eivät juurikaan tunnu kuljettajalle ajon aikana eikä kuljettaja näin ollen voi korjata tuntuman perusteella mahdollisesti alkavaa varsinaisen perävaunun luistoa. Tämän työn puitteissa saatujen laskentatulosten perusteella ei varsinaisen perävaunun kytkemistä puoliperävaunuyhdistelmän perään voida suositella.



Kuva 6. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

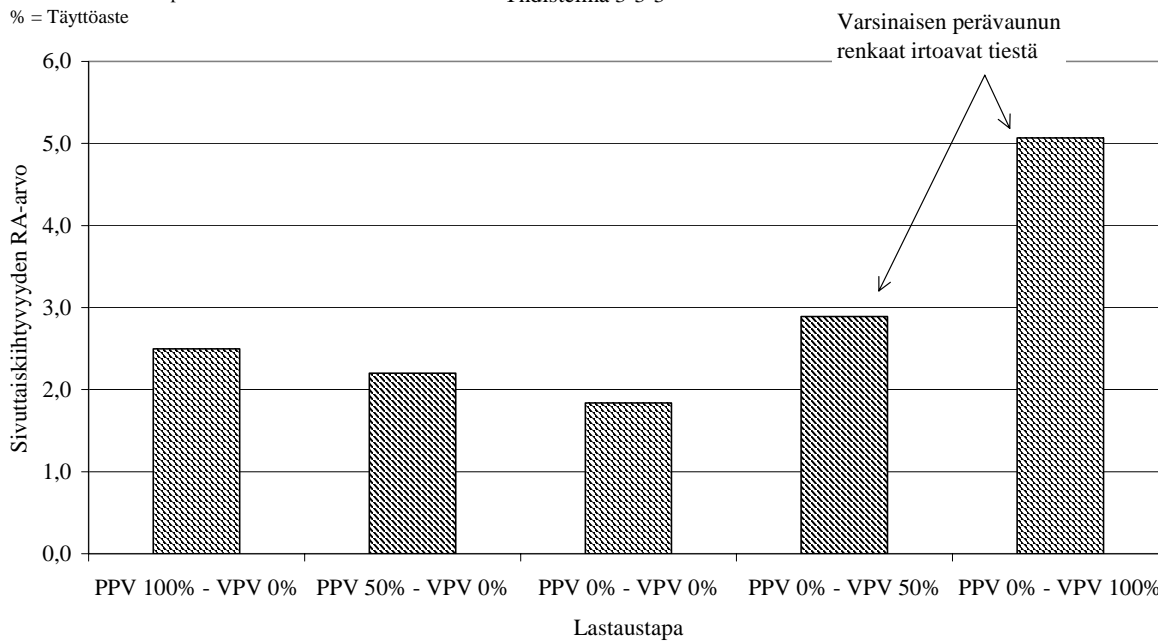
Sivuttaiskihtiyyden RA-arvo
 Yhdistelmä 3-4



Kuva 7. Ajoneuvoyhdistelmän 3-4 sivuttaiskihtiyyden RA-arvo.

PPV = Puoliperävaunu
 VPV = Varsinainen perävaunu
 % = Täyttöaste

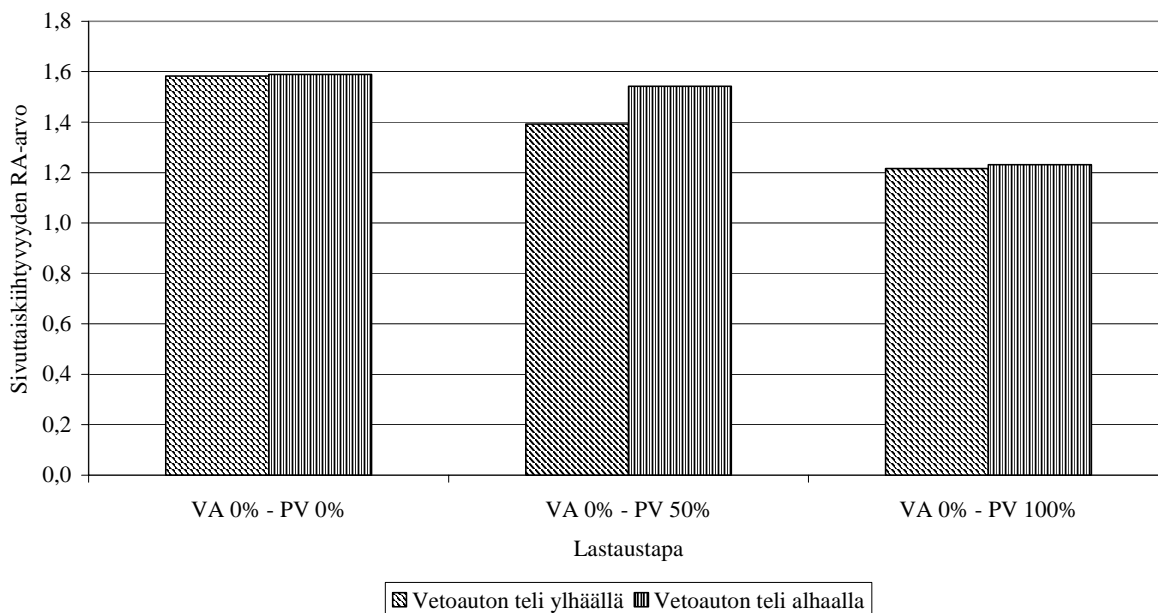
Sivuttaiskihtiyyden RA-arvo
 Yhdistelmä 3-3-3



Kuva 8. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3-3 sivuttaiskihtiyyden RA-arvo.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

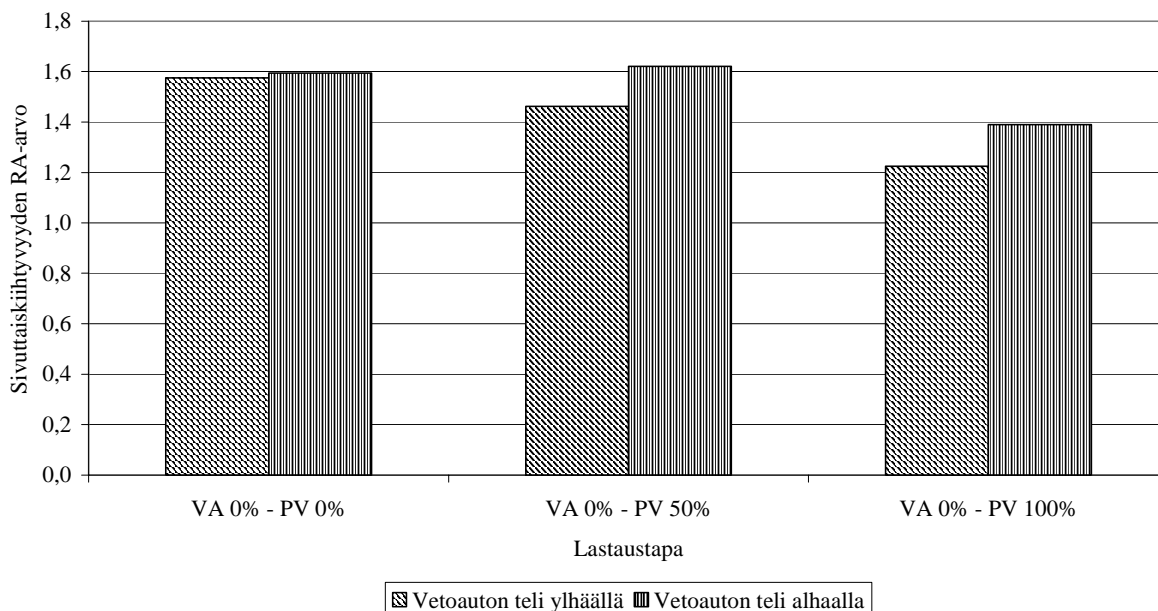
Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo
 Yhdistelmä 3-3



Kuva 9. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo, vetoauton telin laskemisen vaikutus.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

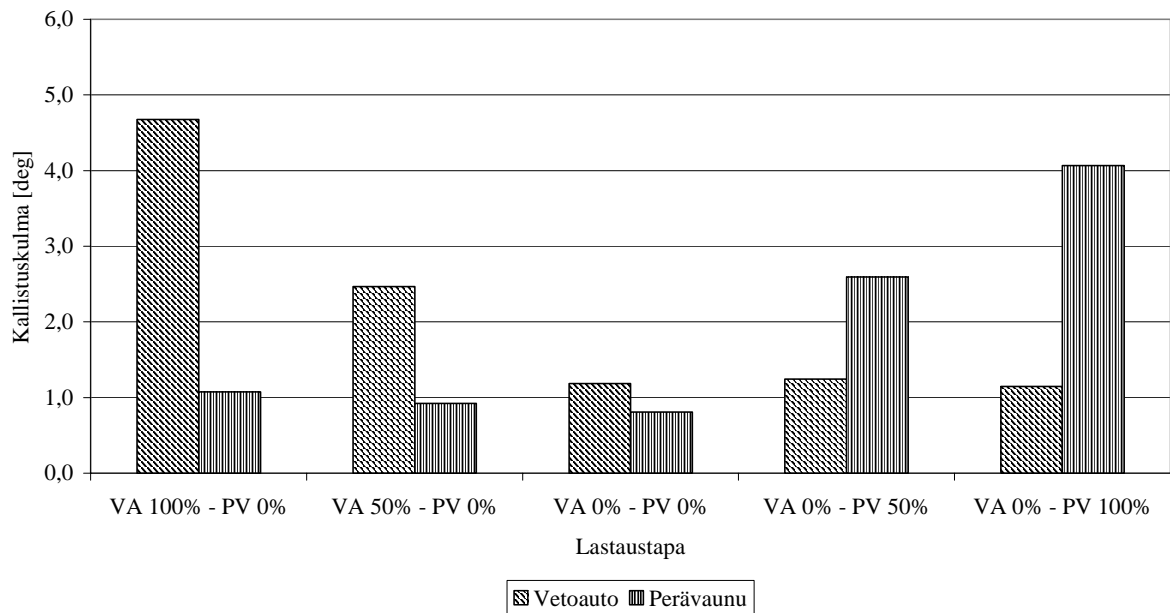
Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo
 Yhdistelmä 3-4



Kuva 10. Ajoneuvoyhdistelmän 3-4 sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo, vetoauton telin laskemisen vaikutus.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

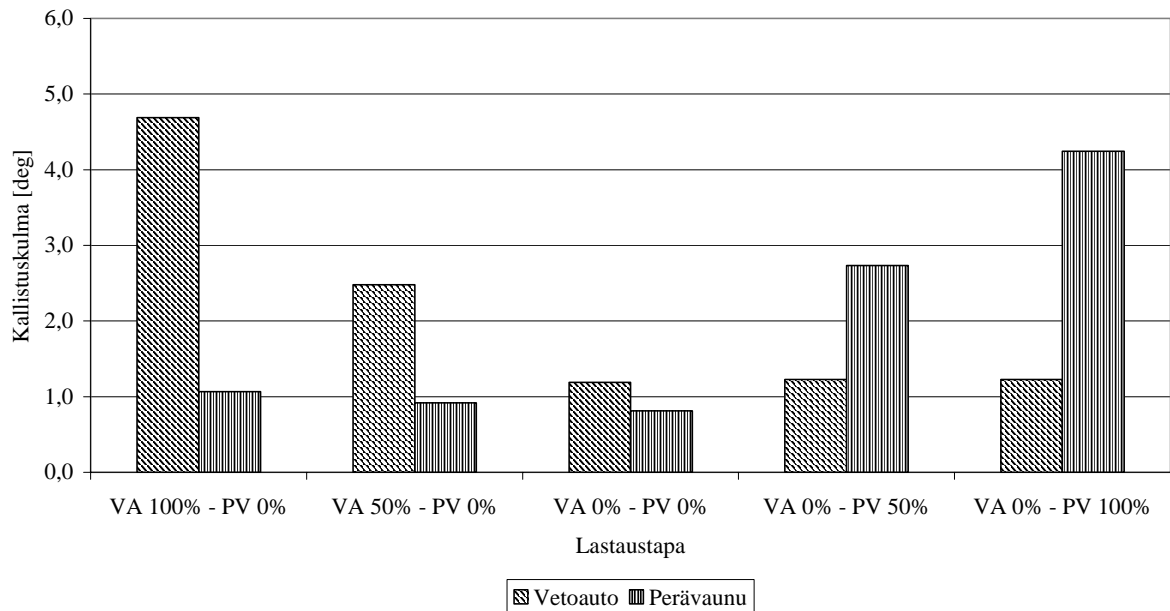
Ajoneuvoyksikön kallistuskulma
 Yhdistelmä 3-3



Kuva 11. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 vetoauton maksimikallistuskulma.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

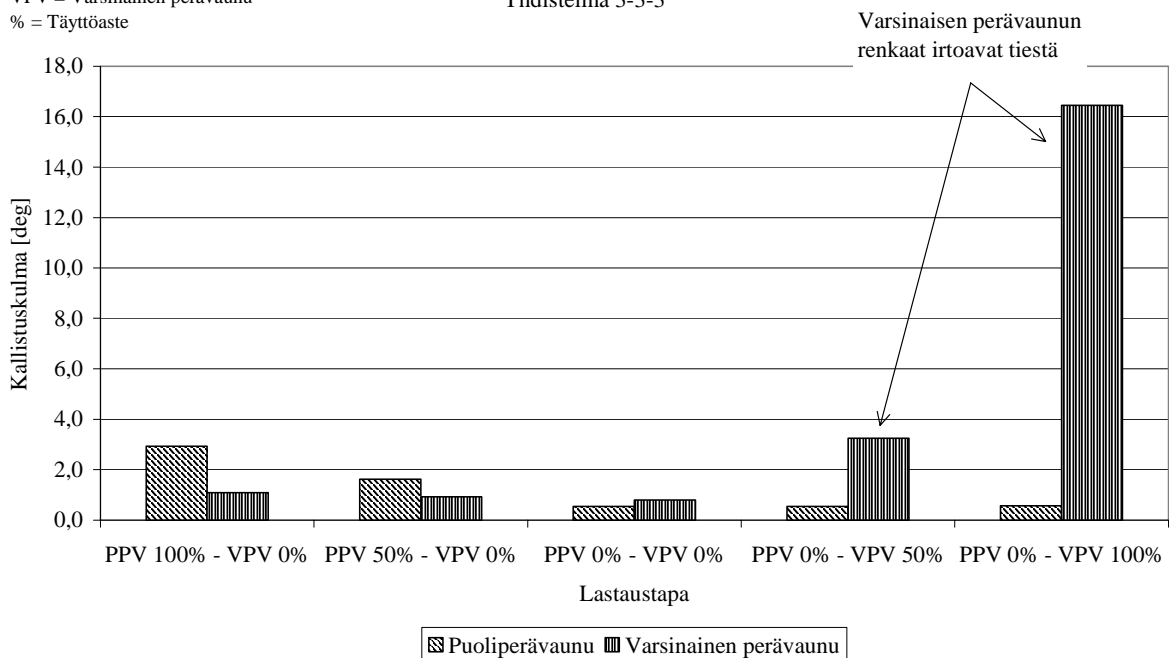
Ajoneuvoyksikön kallistuskulma
 Yhdistelmä 3-4



Kuva 12. Ajoneuvoyhdistelmän 3-4 vetoauton maksimikallistuskulma.

PPV = Puoliperävaunu
 VPV = Varsinainen perävaunu
 % = Täyttöaste

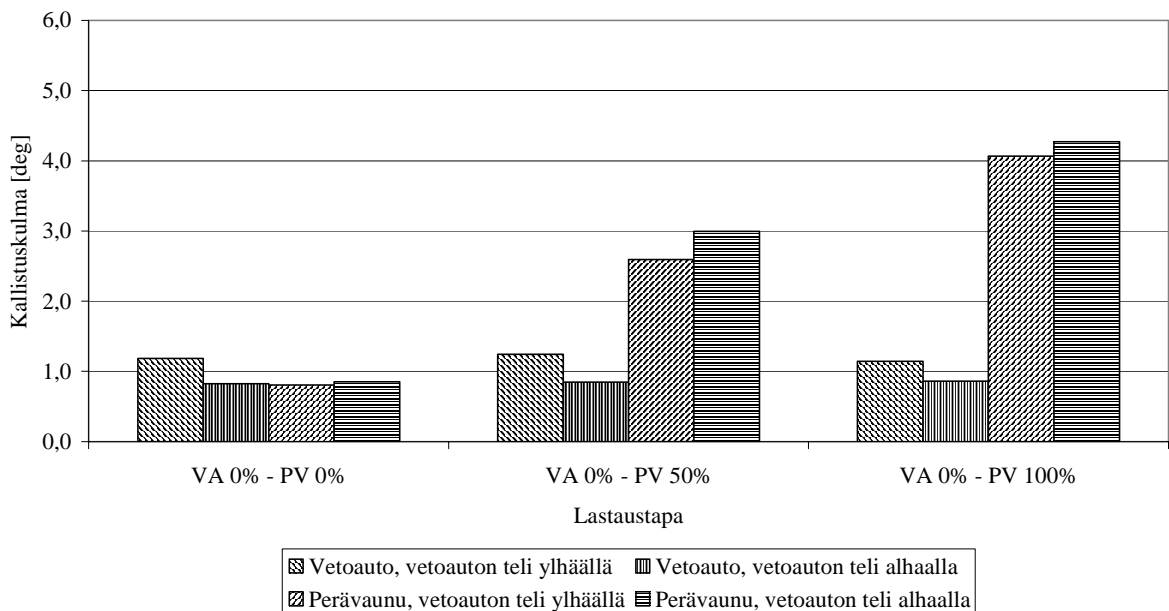
Ajoneuvoyksikön kallistuskulma Yhdistelmä 3-3-3



Kuva 13. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3-3 vetoauton maksimikallistuskulma.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

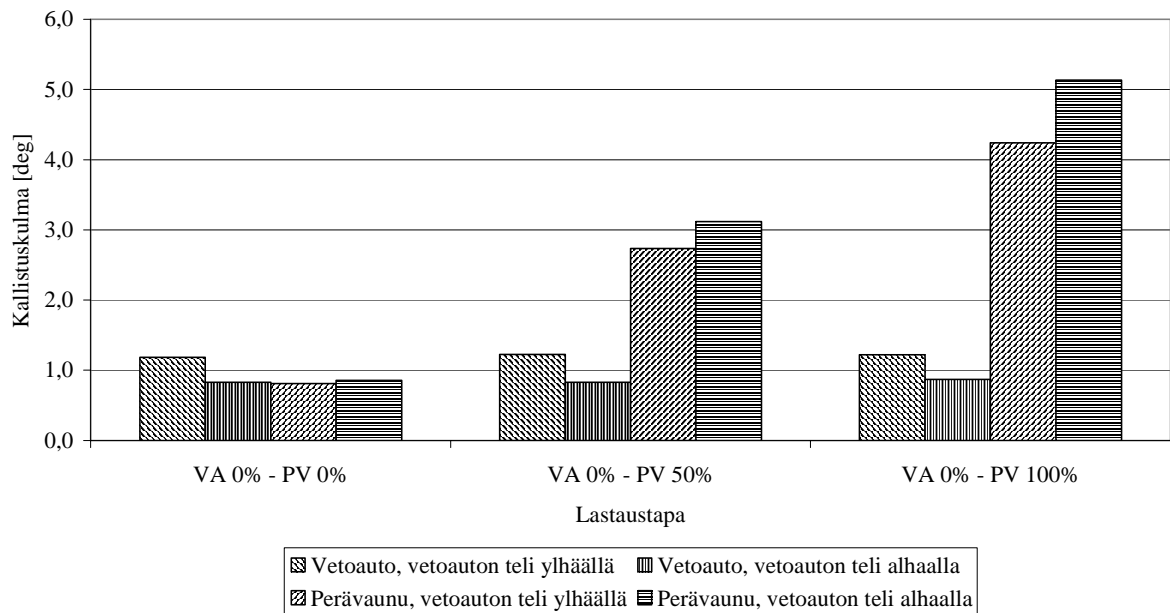
Ajoneuvoyksikön kallistuskulma Yhdistelmä 3-3



Kuva 14. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 vetoauton maksimikallistuskulma, vetoauton telin laskemisen vaikutus.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

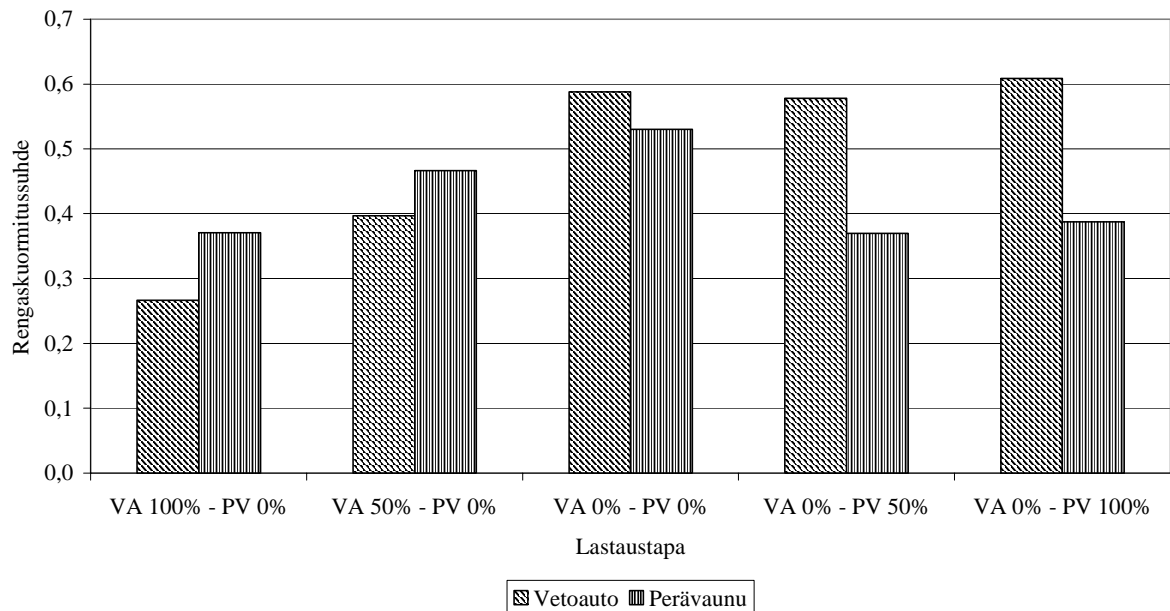
Ajoneuvoyksikön kallistuskulma Yhdistelmä 3-4



Kuva 15. Ajoneuvoyhdistelmän 3-4 vetoauton maksimikallistuskulma, vetoauton telin laskemisen vaikutus.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

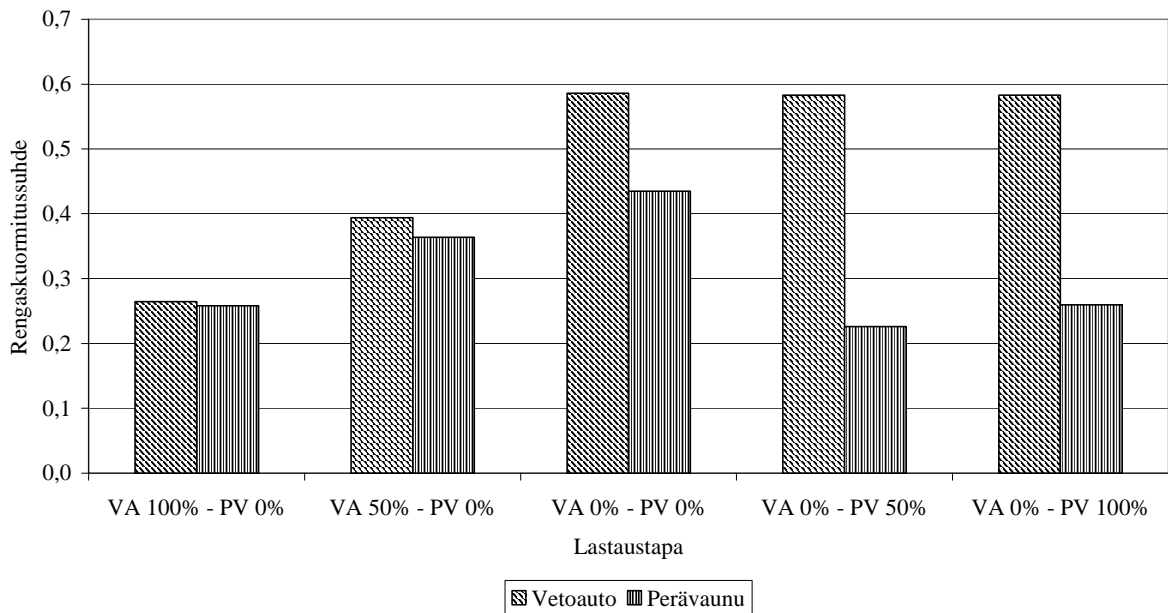
Ajoneuvoyksikön rengaskuormitussuhde RKS Yhdistelmä 3-3



Kuva 16. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 rengaskuormitussuhde.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

Ajoneuvoyksikön rengaskuormitussuhde RKS
 Yhdistelmä 3-4

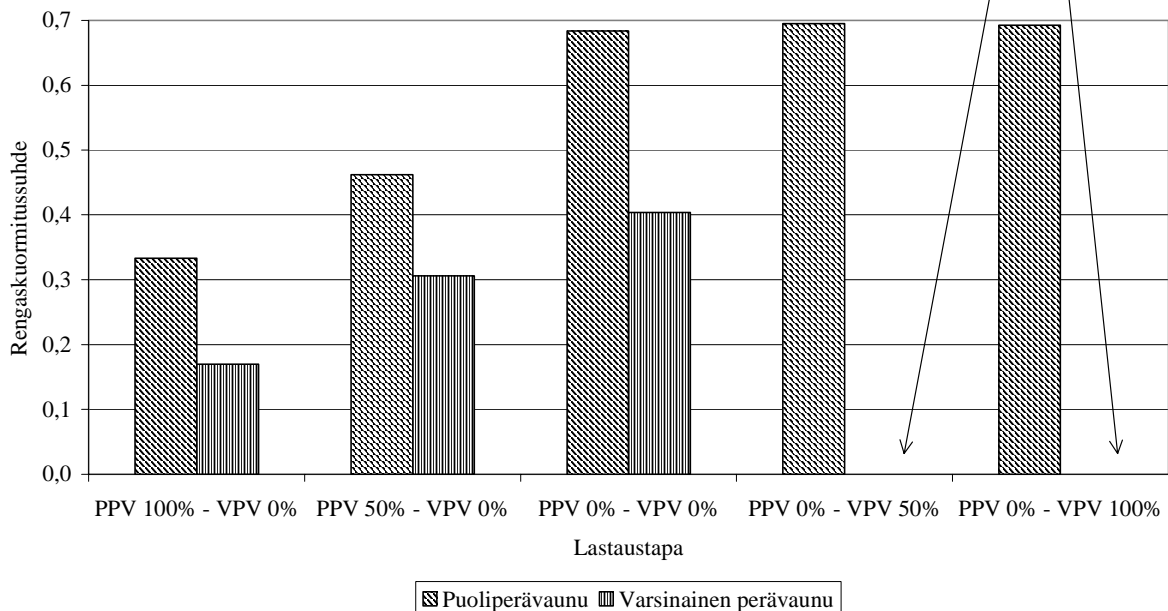


Kuva 17. Ajoneuvoyhdistelmän 3-4 rengaskuormitussuhde.

PPV = Puoliperävaunu
 VPV = Varsinainen perävaunu
 % = Täyttöaste

Ajoneuvoyksikön rengaskuormitussuhde RKS
 Yhdistelmä 3-3-3

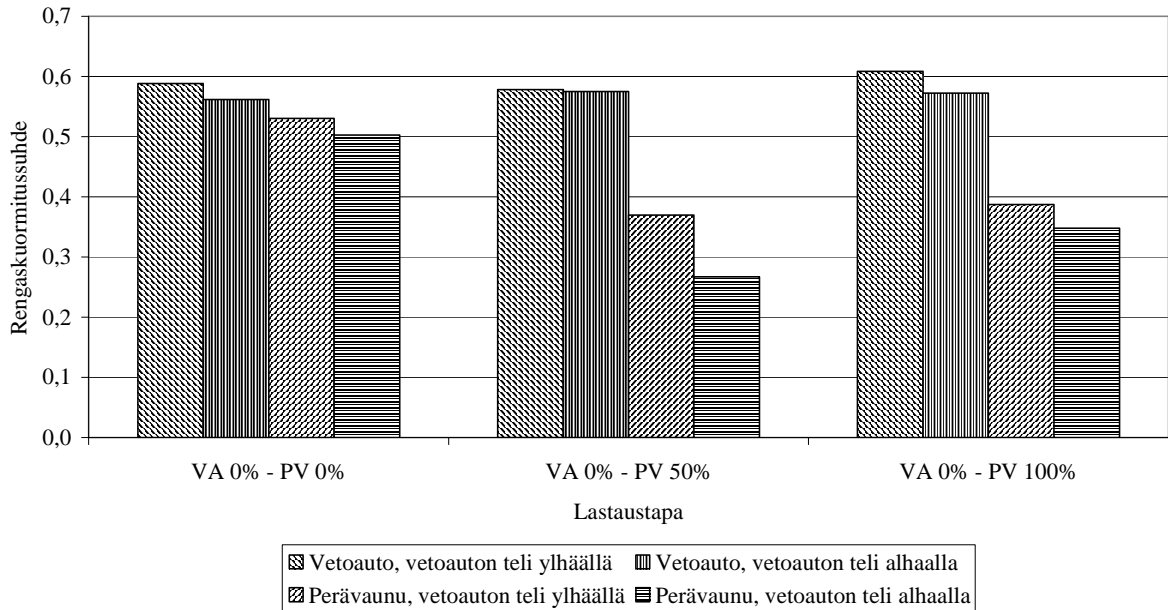
Varsinaisen perävaunu
 renkaat irtoavat tiestä



Kuva 18. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3-3 rengaskuormitussuhde.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

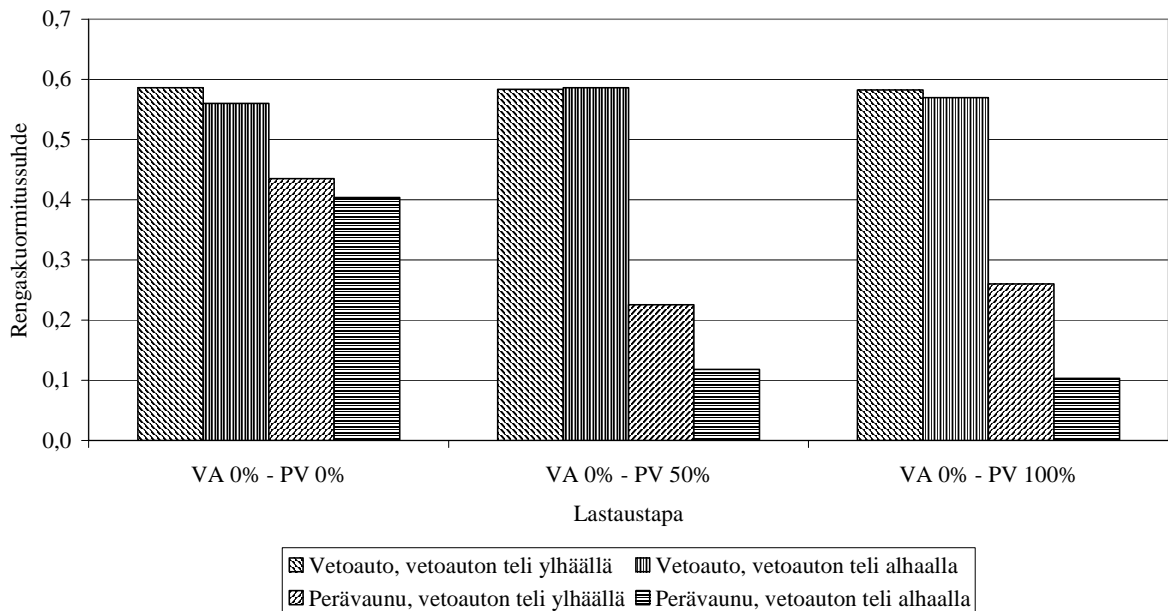
Ajoneuvoyksikön rengaskuormitussuhde RKS
 Yhdistelmä 3-3



Kuva 19. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 rengaskuormitussuhde, vetoauton telin laskemisen vaikutus.

VA = Vetoauto
 PV = Perävaunu
 % = Täyttöaste

Ajoneuvoyksikön rengaskuormitussuhde RKS
 Yhdistelmä 3-4



Kuva 20. Ajoneuvoyhdistelmän 3-4 rengaskuormitussuhde, vetoauton telin laskemisen vaikutus.

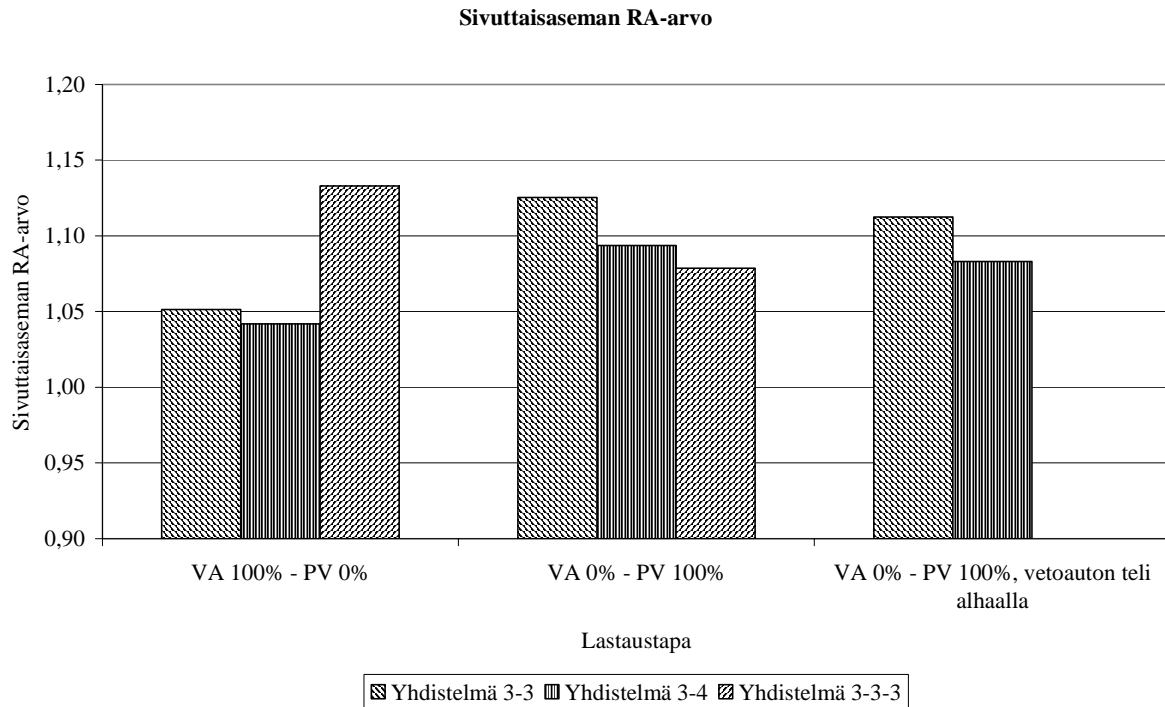
4.2 Pientarelleajotapaukset

Pientarelleajotapauksissa erot eri ajoneuvoyhdistelmien ja lastaustapojen välillä olivat suhteellisen pieniä. Parhaiten erot tulivat esille ajoneuvoyhdistelmän sivuttaisaseman RA-arvojen perusteella. Kuvassa 21 on esitetty laskettujen yhdistelmien sivuttaisaseman RA-arvot eri lastaustavoilla. Kuvassa on esitetty myös vetoauton telin laskemisen vaikutus perävaunupainotteisesti lastatuissa yhdistelmissä 3-3 ja 3-4.

Sivuttaisaseman RA-arvo lasketaan perävaunun taka-akselin keskikohdan ja vetoauton etuakselin keskikohdan absoluuttisen sivuttaisaseman suhteena. Mittauspiste on laskennan lähtötilanteessa akselien keskilinjalla. Sivuttaisaseman RA-arvo sen, ylittääkö perävaunun taka-akselin sivusuunnassa vetoauton etuakselin kulkulinjan. Tällä on erityisesti merkitystä esimerkiksi tilanteissa, joissa ajoneuvoyhdistelmä kulkeutuu lähelle ojaa.

Kuvasta 20 nähdään, että kyseisessä laskentatapauksessa perävaunupainotteisesti lastattujen (vetoauto tyhjä, perävaunu lastattu) ajoneuvoyhdistelmien 3-3 ja 3-4 sivuttaisaseman RA-arvo on korkeampi kuin vetoautopainotteisesti lastatussa yhdistelmässä. Tämä tarkoittaa sitä, että näissä tapauksissa perävaunupainotteisesti lastatun ajoneuvoyhdistelmän perävaunu ajautuu lähemmäs ojaa kuin vetoautopainotteisesti lastatun yhdistelmän perävaunu. Perävaunupainotteisesti lastatun yhdistelmän kaatumisriski on näin ollen suurempi kuin vetoautopainotteisesti lastatun yhdistelmän. Laskennan perusteella yhdistelmien 3-3 ja 3-4 vetoauton telin laskeminen perävaunupainotteisesti lastatuissa tapauksissa ei oleellisesti paranna yhdistelmien sivuttaisaseman RA-arvoa.

Yhdistelmän 3-3-3 sivuttaisaseman RA-arvo vetoautopainotteisesti lastatussa tapauksessa on selvästi korkeampi kuin yhdistelmien 3-3 ja 3-4 sivuttaisaseman RA-arvo. Perävaunupainotteisesti lastatun yhdistelmän 3-3-3 sivuttaisaseman RA-arvo on parempi kuin vetoautopainotteisesti lastatun yhdistelmän. Tässä on syytä huomata, että yhdistelmän 3-3-3 varsinaisen perävaunun kuorman maksimimassa on selvästi pienempi kuin yhdistelmän puoliperävaunun maksimimassa.



Kuva 21. Ajoneuvoyhdistelmän sivuttaisaseman RA-arvo kahdella eri lastaustavalla ja kahdella vetoauton teliakselin asennolla pientareelleajotapauksessa.

4.3 Tietokoneanimaatiot

Tässä raportissa esitettyjen tulosten lisäksi työn tilaajalle toimitettiin tietokoneanimaatioita valikoiduista laskentatapauksista. Tietokoneanimaatiot havainnollistavat ajoneuvoyhdistelmän käyttäytymistä simuloituissa ajotilanteissa. Animaatioissa on esitetty yhdistelmän renkasvoimat vektoreiden avulla.

5 STABIILISUUSANALYYSI

Ajoneuvoyhdistelmälle 3-3 tehtiin Euroopan talouskomission (ECE) sääntö nro 111 mukainen stabiilisuusanalyysi. Analysoidun ajoneuvoyhdistelmän perävaunun säiliön korkeusasema oli laskettu 370 mm, jotta perävaunun painopisteen asema vastaisi Harjavallan onnettomuusajoneuvon perävaunun painopisteen korkeutta. Liitteessä C on esitetty stabiilisuusanalyysin tulokset. Tuloksen perusteella voidaan todeta, että analysoitu syötearvojen mukainen ajoneuvo ylittää ECE sääntö nro 111 mukaisen sivuttaiskiiktyvyyden raja-arvon $4,0 \text{ m/s}^2$.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuljettajan reagointiin ääritilanteissa vaikuttaa oleellisesti se, mitä hän kuljettajan paikalta havaitsee. Jos ajoneuvoyhdistelmän vetoauton renkaiden pito on huomattavasti parempi kuin perävaunun, ei kuljettaja saa palautetta mahdollisesta perävaunun renkaiden pidonmenetyksestä ja perävaunun voi lähteä hallitsemattomaan sivuluistoon. Jos vetoauto kallistelee vähän verrattuna perävaunuun, ei kuljettajalle välity välitöntä tuntumaa tilanteesta, mikä voi johtaa perävaunun kaatumiseen. Vastaavasti jos vetoauto kallistelee voimakkaammin kuin perävau-

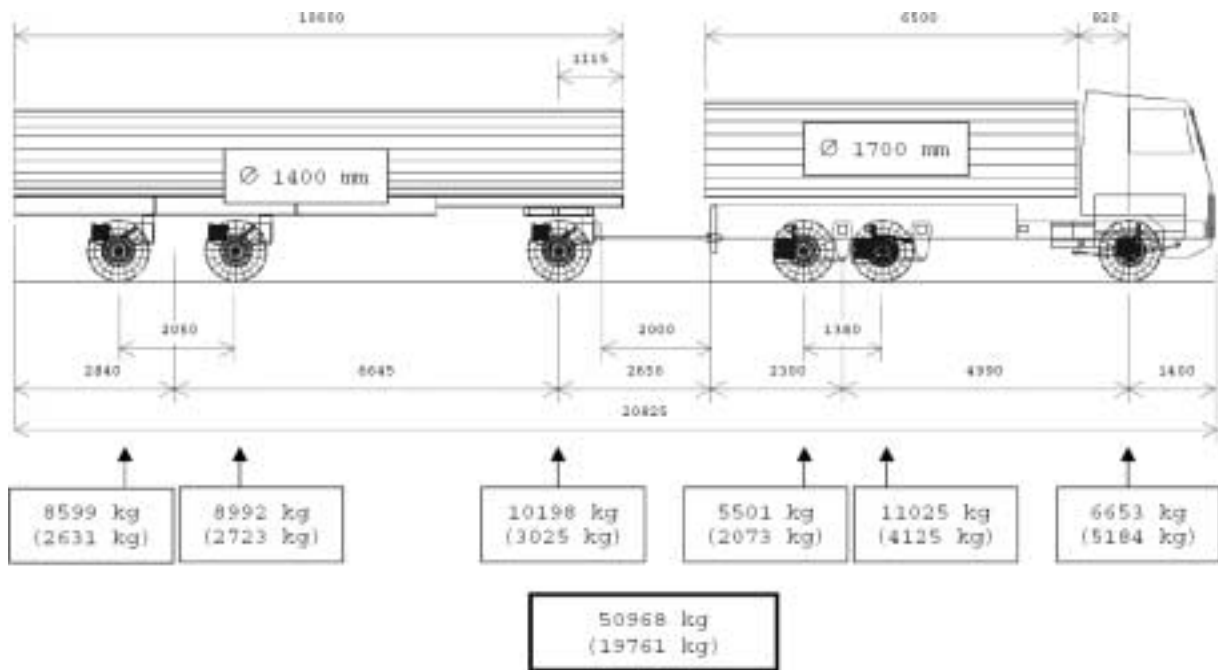
nu ja mahdollinen renkaiden pidon menettäminen tapahtuu ensin vetoautossa, saa kuljettaja tästä välittömän palautteen ja voi yrittää korjata tilanteen ennen kuin luisto on liian suuri. Tämän työn puitteissa saatujen laskentatulosten perusteella tulisi varsinaisella perävaunulla varustetun yhdistelmän lastaamista perävaunupainotteisesti välttää.

Koska kuljettajan ajotapaan vaikuttaa oleellisesti se, mitä hän näkee ja kokee ajon aikana, on yhdistelmän, jossa puoliperävaunuyhdistelmän perään on kytketty varsinainen perävaunu, käyttäminen kyseenalaista. Pitkän yhdistelmän viimeisen yksikön luistot eivät juurikaan tunnu kuljettajalle ajon aikana eikä kuljettaja näin ollen voi korjata tuntuman perusteella mahdollisesti alkavaa varsinaisen perävaunun sivuluistoa. Tämän työn puitteissa saatujen laskentatulosten perusteella puoliperävaunuyhdistelmän perään kytketty varsinainen perävaunu on altis sivuttaisheilauksille eikä varsinaisen perävaunun kytkemistä puoliperävaunuyhdistelmän perään voida suositella.

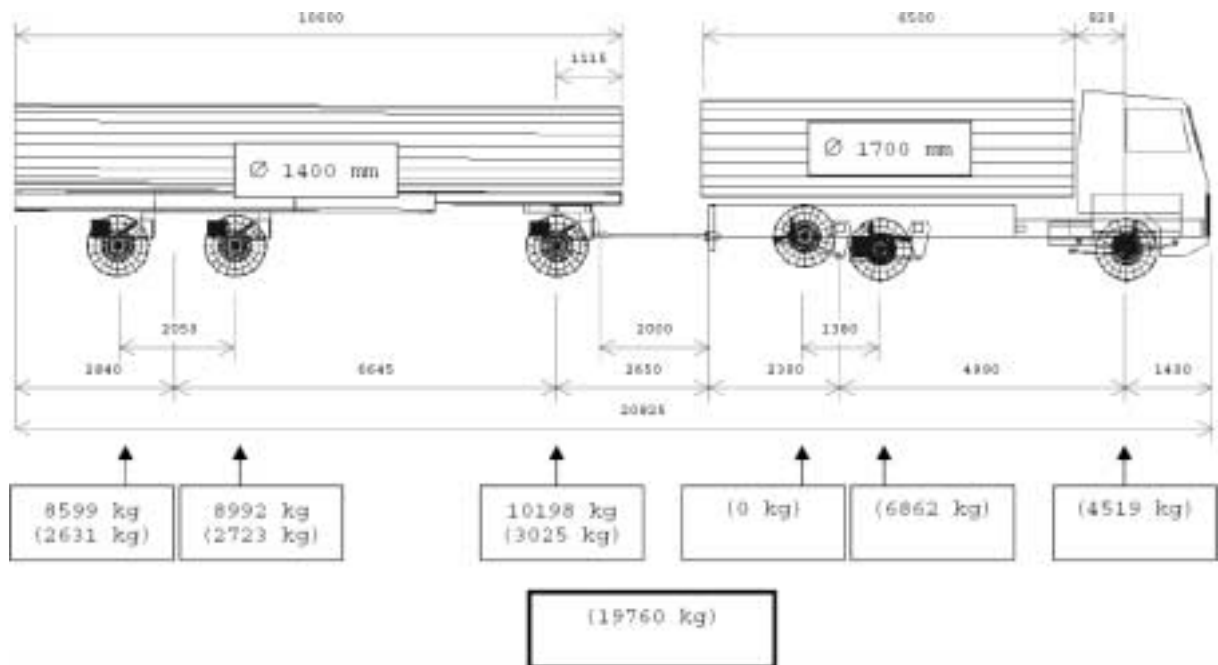
7 KIRJALLISUUSLUETTELO

- [1] Kiviniemi T., 2000, *Säiliöajoneuvojen stabiilisuus*, Helsinki, Oy Edita Ab, 37 s., Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 39/2000, ISBN 951-723-318-3.

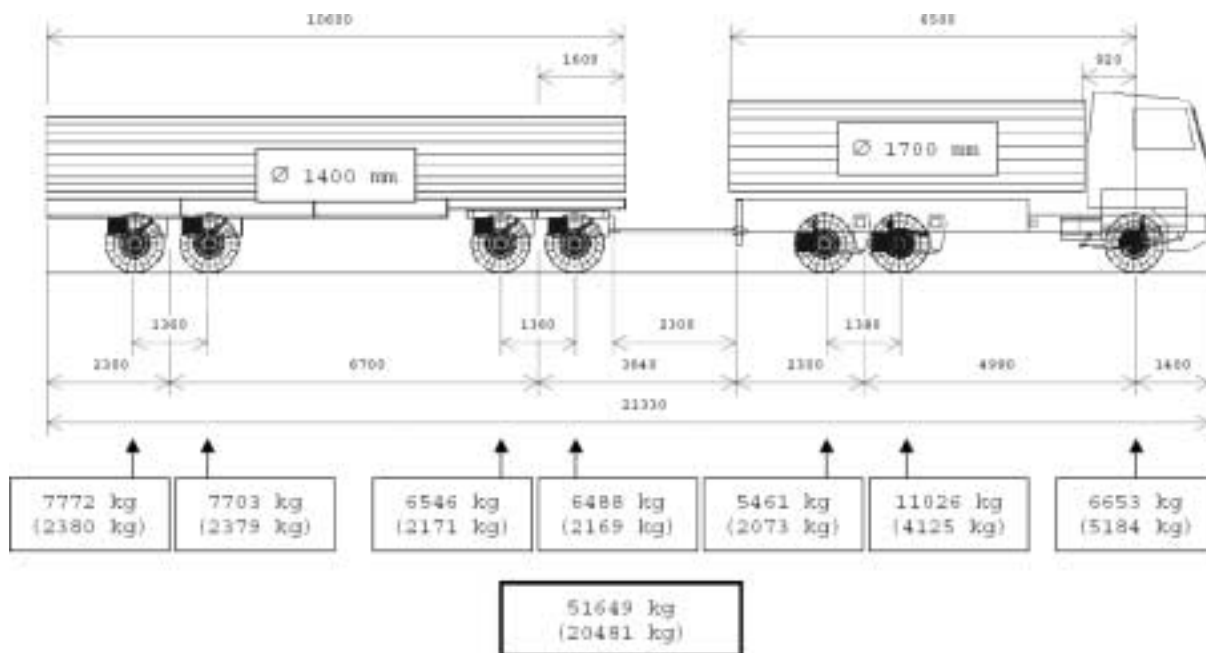
LIITE A: AJONEUVOYHDISTELMIEN PÄÄMITAT



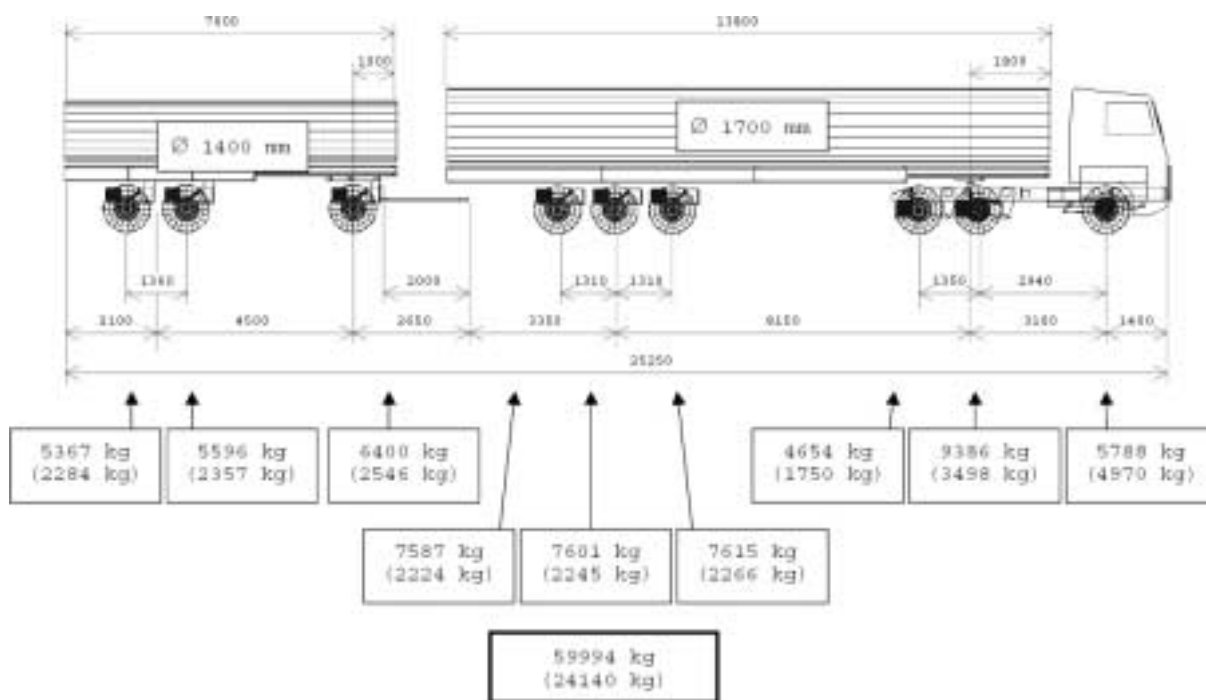
Kuva 1. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 päämitat sekä akseli- ja kokonaismassat (suluissa tyhjän ajoneuvon massat).



Kuva 2. Ajoneuvoyhdistelmän 3-3 päämitat sekä akseli- ja kokonaismassat, kun vetoauton teliakseli on nostettu ylös (suluissa tyhjän ajoneuvon massat).



Kuva 3. Ajoneuvoyhdistelmän 3–4 päämitat sekä akseli- ja kokonaismassat (sulussa tyhjän ajoneuvon massat).



Kuva 4. Ajoneuvoyhdistelmän 3–3–3 päämitat sekä akseli- ja kokonaismassat (sulussa tyhjän ajoneuvon massat).

LIITE B: RENGASMALLIN PARAMETRIT

Rengaskoko 295/80-R22.5

```
[UNITS]
LENGTH           = 'meter'
FORCE            = 'knewton'
ANGLE            = 'degrees'
TIME             = 'sec'
[MODEL]
PROPERTY_FILE_FORMAT = 'PMF87'
[DIMENSION]
UNLOADED_RADIUS    = 0.522
WIDTH              = 0.290
NUMBER_OF_DIVISIONS_FOR_HALF_SHAPE = 5
NUMBER_OF_SHAPE_VALUES = 3
{ rel_radius rel_half_width }
  1.0          0.0
  1.0          0.5
  1.0          1.0
[PARAMETER]
VERTICAL_STIFFNESS      = 850.000
VERTICAL_EXPONENT      = 1.000
VERTICAL_DAMPING       = 3.500
VERTICAL_RELATIVE_PENETRATION = 0.005
ROLLING_RESISTANCE     = 0.020
LIMIT_VEL_FOR_ROLLING_RES = 2.290
[LATERAL_COEFFICIENTS]
a1 = 0.000
a2 = 0.750
a3 = 1.300
a4 = 4.500
a5 = 1.000
a6 = 0.035
a7 = 0.000
a8 = 0.000
a9 = 0.000
a10 = 0.000
a11 = 0.000
a12 = 0.000
a13 = 0.000
[LONGITUDINAL_COEFFICIENTS]
b1 = 0.000
b2 = 0.800
b3 = 1.650
b4 = 0.000
b5 = 0.074
b6 = 0.000
b7 = 0.000
b8 = 0.000
b9 = 0.000
[ALIGNING_COEFFICIENTS]
c1 = 0.004
c2 = 0.090
c3 = 2.000
c4 = 0.000
c5 = -0.030
c6 = -0.005
c7 = -0.030
c8 = 0.100
c9 = 0.000
c10 = 0.000
c11 = 0.000
c12 = 0.000
c13 = 0.000
c14 = 0.000
```

Rengaskoko 385/65-R22.5

```

[UNITS]
LENGTH           = 'meter'
FORCE            = 'knewton'
ANGLE           = 'degrees'
TIME            = 'sec'
[MODEL]
PROPERTY_FILE_FORMAT = 'PMF87'
[DIMENSION]
UNLOADED_RADIUS           = 0.536
WIDTH                     = 0.389
NUMBER_OF_DIVISIONS_FOR_HALF_SHAPE = 5
NUMBER_OF_SHAPE_VALUES   = 3
{ rel_radius rel_half_width }
  1.0         0.0
  1.0         0.5
  1.0         1.0
[PARAMETER]
VERTICAL_STIFFNESS       = 1150.000
VERTICAL_EXPONENT       = 1.000
VERTICAL_DAMPING        = 3.500
VERTICAL_RELATIVE_PENETRATION = 0.005
ROLLING_RESISTANCE      = 0.020
LIMIT_VEL_FOR_ROLLING_RES = 2.290
[LATERAL_COEFFICIENTS]
a1 = 0.000
a2 = 0.750
a3 = 1.300
a4 = 4.500
a5 = 1.000
a6 = 0.035
a7 = 0.000
a8 = 0.000
a9 = 0.000
a10 = 0.000
a11 = 0.000
a12 = 0.000
a13 = 0.000
[LONGITUDINAL_COEFFICIENTS]
b1 = 0.000
b2 = 0.800
b3 = 1.650
b4 = 0.000
b5 = 0.074
b6 = 0.000
b7 = 0.000
b8 = 0.000
b9 = 0.000
[ALIGNING_COEFFICIENTS]
c1 = 0.004
c2 = 0.090
c3 = 2.000
c4 = 0.000
c5 = -0.030
c6 = -0.005
c7 = -0.030
c8 = 0.100
c9 = 0.000
c10 = 0.000
c11 = 0.000
c12 = 0.000
c13 = 0.000
c14 = 0.000

```


LIITE C: STABIILISUUSANALYYSIN TULOKSET

AJONEUVO:	Vetoauto		
Merkki ja malli:	Volvo FH 12 - FH62RB - L - 6x2 / 430 + 138		
Rekisterinumero:	FBM-594		
Valmistenumero:	-		
Akselikuormat: (A)			
akseli 1:	6653,0	kg	65,266 kN
akseli 2:	11025,0	kg	108,155 kN
akseli 3:	5501,0	kg	53,965 kN
Jousittamaton massa: (U)			
akseli 1:	641,7	kg	6,295 kN
akseli 2:	1072,8	kg	10,524 kN
akseli 3:	585,0	kg	5,739 kN
Raideleveys: (T_N)			
akseli 1:	2,172	m	
akseli 2:	2,132	m	
akseli 3:	2,072	m	
Paripyörän asennusväli: (MA)			
akseli 1:	0,000	m	
akseli 2:	0,324	m	
akseli 3:	0,000	m	
Ajoneuvon painopisteen korkeus: (H_G)	1,824	m	
Jousitetun massan painopisteen korkeus: (H_N)	1,993	m	
Kallistusakselin korkeus: (m)			
akseli 1:	0,410	m	(arvio)
akseli 2:	0,410	m	(arvio)
akseli 3:	0,520	m	(arvio)
Kallistusjäykkyys: (C_{DG})			
akseli 1:	750,000	kNm/rad	(arvio)
akseli 2:	750,000	kNm/rad	(arvio)
akseli 3:	750,000	kNm/rad	(arvio)
Renkaiden pystyjäykkyys: (F_{RV})			
akseli 1:	850,0	kN/m	
akseli 2:	1700,0	kN/m	
akseli 3:	1150,0	kN/m	
Vetovoimakiiltoisuus: (g)	9,810	m/s ²	
Tehollinen massakerroin jäykimmällä akselilla: (F_E)	0,35		
Sivuttaiskiiltoisuus, jolla ensimmäinen pyörä nousee ilmaan: (q_M)	0,318	g	3,12 m/s ²
Suurin teoreettinen sivuttaiskiiltoisuus ennen kaatumista: (q_T)	0,479	g	4,70 m/s ²
Edellisten avulla interpoloitu sivuttaiskiiltoisuus: (q_C)	0,441	g	4,33 m/s²
Kallistusalueen rajakulma: (β)	0,415	rad	23,80 deg

AJONEUVO:

Perävaunu

Merkki ja malli:

SAF-Viinikka

Rekisterinumero:

-

Valmistenumero:

-

Akselikuormat: (A)

akseli 1:	10198,0	kg	100,042	kN
akseli 2:	8992,0	kg	88,212	kN
akseli 3:	8599,0	kg	84,356	kN

Jousittamaton massa: (U)

akseli 1:	648,0	kg	6,357	kN
akseli 2:	648,0	kg	6,357	kN
akseli 3:	648,0	kg	6,357	kN

Raideleveys: (T_N)

akseli 1:	1,808	m
akseli 2:	1,808	m
akseli 3:	1,808	m

Paripyörän asennusväli: (MA)

akseli 1:	0,324	m
akseli 2:	0,324	m
akseli 3:	0,324	m

Ajoneuvon painopisteen korkeus: (H_G)**1,702** m**Jousitetun massan painopisteen korkeus: (H_N)****1,715** m**Kallistusakselin korkeus: (m)**

akseli 1:	0,700	m
akseli 2:	0,700	m
akseli 3:	0,700	m

Kallistusjäykkyys: (C_{DG})

akseli 1:	1174,1	kNm/rad	(arvio)
akseli 2:	1174,1	kNm/rad	(arvio)
akseli 3:	1174,1	kNm/rad	(arvio)

Renkaiden pystyjäykkyys: (F_{RV})

akseli 1:	1700,0	kN/m
akseli 2:	1700,0	kN/m
akseli 3:	1700,0	kN/m

Vetovoimakiihtyvyys: (g)**9,810** m/s²**Tehollinen massakerroin jäykimmällä akselilla: (F_E)**

0,33

Sivuttaiskiihtyvyys, jolla ensimmäinen pyörä nousee ilmaan: (q_M)0,456 g 4,48 m/s²**Suurin teoreettinen sivuttaiskiihtyvyys ennen kaatumista: (q_T)**0,492 g 4,82 m/s²**Edellisten avulla interpoloitu sivuttaiskiihtyvyys: (q_C)**0,481 g **4,72** m/s²**Kallistusalueen rajakulma: (β)**0,448 rad **25,67** deg