



## Autonkuljetusajoneuvoyhdistelmän ajovakauden tutkimus simuloimalla

Kirjoittajat Pekka Rahkola

Luottamuksellisuus Julkinen

Raportin nimi Autonkuljetusajoneuvoyhdistelmän ajovakauden tutkimus simuloimalla		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Onnettomuustutkintakeskus Kai Valonen	Asiakkaan viite	
Projektin nimi Autonkuljetusajoneuvon ajovakauden mallinnus ja simulointi	Projektin numero/lyhytnimi 7393/AUTOTRAILER	
Raportin laatija(t) Pekka Rahkola	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 21/-	
Avainsanat raskas ajoneuvoyhdistelmä, stabiilisuus, kiertoheilahtelujen vaimennuskerroin, RA-arvo, ohjautuvuus	Raportin numero VTT-R-08015-06	
Tiivistelmä		
<p>Helmikuussa 2006 tapahtui Pyhtäällä autonkuljetusajoneuvoyhdistelmän ja linja-auton yhteen-törmäys. Kyseinen raskas ajoneuvoyhdistelmä muodostuu kuorma-autosta ja keskiakseliperä-vaunusta. Ajoneuvoyhdistelmän mitoitus perustuu Keski-Euroopassa hyväksytyihin kansalli-siin erivapauksiin, joissa ajoneuvoyhdistelmän pituus ylittää Suomen lainsäädännön salliman keskiakseliperävaunuyhdistelmän maksimipituuden 18,75 metriä. Perävaunun takaosa voidaan kuitenkin lyhentää, jolloin se on Suomen lainsäädännön mukainen. Ongelmana on, että tällöin perävaunun kuormaus muuttuu helposti etupainoiseksi, jolloin vetoaisan pystykuormitus ylit-tää lain sekä valmistajan salliman arvon.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena on mallinnuksen ja simulointien avulla määrittää kuormaustavan vaikutus ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen sekä ohjautuvuuteen. Tutkittavana on kolme kuormaustapaa: edellä mainittu onnettomuustilanteen mukainen kuormaaminen (vetoaisan pystykuormitus ylittää lain salliman arvon), Suomen lainsäädännön täyttävä kuormaaminen sekä Keski-Euroopassa sallittu kuormaaminen.</p> <p>Ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta mitataan kiertoheilahtelujen vaimennuskertoimen ja toi-saalta sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon avulla. Tutkitun autonkuljetusyhdistelmän tapauksessa tutkituista kuormaustavoista etupainoisin kuormaustapa (onnettomuustilanteen mukainen kuormaustapa) on stabiilein vaimennuskertoimella mitattuna. Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon kohdalla erot kuormaustapojen välillä eivät ole merkittäviä. Kuormauksen vaikutus vetoauton ohjautuvuuteen määritetään vetoauton aliohjautuvuusindeksin avulla. Kuormaustavan vaikutus vetoauton ohjautuvuuteen ei ole merkittävä. Kaikilla kuormaustavoilla vetoauto on voimak-kaasti aliohjaava.</p>		
Luottamuksellisuus	Luottamuksellinen	
Espoo 6.9.2006 Allekirjoitukset		
Pekka Koskinen Tutkimuspäällikkö	Pekka Rahkola Tutkija	Tero Kiviniemi Asiakaspäällikkö
VTT:n yhteystiedot VTT, PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Onnettomuustutkintakeskus VTT		
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saa-dun kirjallisen luvan perusteella.</i>		

# Sisällysluettelo

1	Johdanto	3
2	Tavoite	3
3	Simulointimalli	3
3.1	Ajoneuvoyhdistelmän perustiedot	3
3.2	Ajoneuvoyhdistelmän simulointimalli	4
3.3	Mallin yksinkertaistukset	5
4	Simuloitavat kuormaustavat	6
4.1	Kuormaustapa 1: onnettomuustilanteen mukainen kuormaus	6
4.2	Kuormaustapa 2: Suomen lainsäädännön täyttävä kuormaus	7
4.3	Kuormaustapa 3: Keski-Euroopassa sallittu kuormaus	7
5	Ajoneuvoyhdistelmän ajodynamiikka	8
5.1	Stabiilisuus	8
5.1.1	Kiertoheilahtelun vaimennuskerroin	8
5.1.2	Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo	9
5.2	Ohjautuvuus	10
6	Simuloitavat tapaukset	11
6.1	Pulssiheräte	11
6.2	Kaksoiskaistanvaihtokoe	12
6.3	Askelheräte	12
7	Tulokset ja niiden tarkastelu	13
7.1	Kiertoheilahtelun vaimennuskerroin	13
7.2	Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo	15
7.3	Vetoauton ohjautuvuus	17
8	Johtopäätökset	18
8.1	Kuormaustavan vaikutus stabiilisuuteen	18
8.2	Kuormaustavan vaikutus ohjautuvuuteen	19
9	Yhteenveto	20
	Lähdeviitteet	21

# 1 Johdanto

Helmikuussa 2006 tapahtui Pyhtäällä autonkuljetusajoneuvoyhdistelmän ja linja-auton yhteentörmäys. Onnettomuudessa oli osallisena EUROLOHR-merkkinen autonkuljetusyhdistelmä, joka muodostuu rakenteellisesti kuorma-autosta ja keskiakseliperävaunusta.

Ajoneuvoyhdistelmän mitoitus perustuu Keski-Euroopassa hyväksytyihin kansallisiin erivapauksiin, joissa ajoneuvoyhdistelmän pituus ylittää Suomen lainsäädännön salliman keskiakseliperävaunuyhdistelmän maksimipituuden 18,75 metriä. Perävaunun takaosa voidaan kuitenkin lyhentää, jolloin se on Suomen lainsäädännön mukainen. Ongelmana on, että tällöin perävaunun kuormaus muuttuu helposti etupainoiseksi, jolloin vetoaisan pystykuormitus ylittää lain ja valmistajan salliman arvon 1000 kg.

Onnettomuutta tutkii tutkintalautakunta, jota johtaa Kai Valonen Onnettomuustutkintakeskuksesta. Tutkintalautakunta haluaa selvittää mallinnuksen ja simuloinnin avulla kuormaustavan vaikutusta ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen ja ajokäyttäytymiseen.

Tässä raportissa esitetään perustiedot ajoneuvoyhdistelmästä tehdystä simulointimallista, simulointitulokset sekä niiden analysointi.

## 2 Tavoite

Tutkimuksessa selvitetään kyseisen autonkuljetukseen tarkoitettua ajoneuvoyhdistelmän sivuttaisdynaamista käyttäytymistä sekä yhdistelmän stabiilisuutta. Tavoitteena on mallinnuksen ja simulointien avulla määrittää ajoneuvoyhdistelmän kuormaustavan vaikutus ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen sekä ohjautuvuuteen.

Tutkittavana on kolme kuormaustapaa: (1) onnettomuustilanteen mukainen kuormaaminen (vetoaisan pystykuormitus ylittää lain salliman arvon), (2) Suomen lainsäädännön täyttävä kuormaaminen sekä (3) Keski-Euroopassa sallittu kuormaaminen.

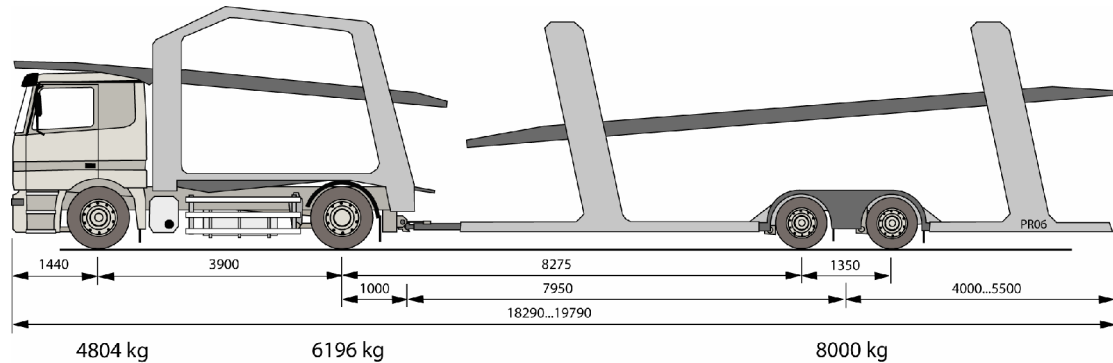
Tutkintalautakunta haluaa selvittää, heikentääkö määräysten vastainen kuormaustapa ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta tai ohjautuvuutta.

## 3 Simulointimalli

### 3.1 Ajoneuvoyhdistelmän perustiedot

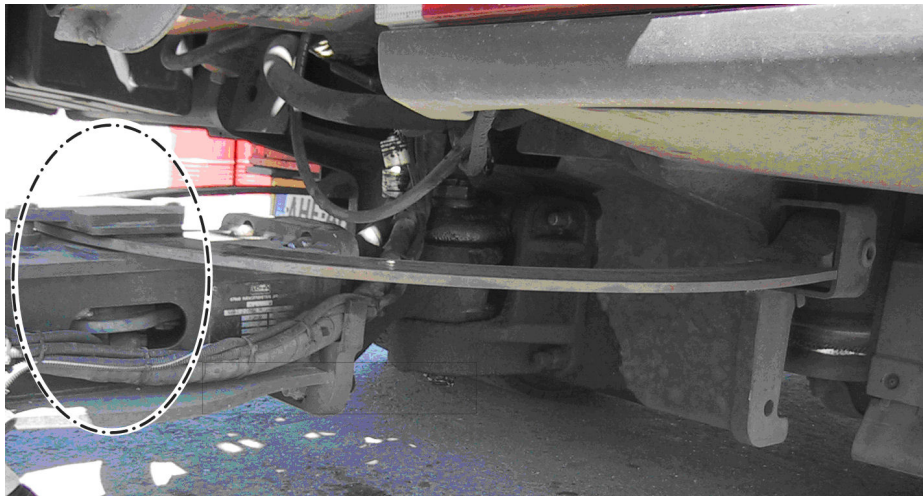
Ajoneuvoyhdistelmän vetoauto on Mercedes-Benz Actros 1832LS 4x2, jonka akseliväli on 3900 mm. Vetoautoon on kytketty EUROLOHR 1.00 E -tyyppinen irroitettava korirakenne, johon on kiinteästi nivelöity kaksiakselinen keskiakseliperävaunu. Kuvassa 1 on esitetty ajoneuvoyhdistelmän päämitat, jotka perustuvat onnettomuusyhdistelmästä tehtyihin mittauksiin [1].

Vetoauto ja perävaunu ovat ilmajousitettuja. Vetoauton rengaskoko sekä edessä että takana on 295/60R22.5. Vetoauton taka-akselilla on paripyöräasennus. Perävaunun rengaskoko on 245/70R17.5 paripyöräasennuksella [2].



Kuva 1. Ajoneuvoyhdistelmän mitoituspiirros ja akselikuormitukset kuormaamattomana. Perävaunu on lyhyessä muodossa.

Vetoauton kuormatila ja perävaunu muodostavat kokonaisuuden, joka on irrotettavissa vetoautosta. Perävaunun vetokytkin kiinnittyy vetoauton kuormatilan runkorakenteeseen. Vetokytkin on suunniteltu 1000 kg:n pystykuormitukselle. Rakenne on esitetty kuvassa 2.



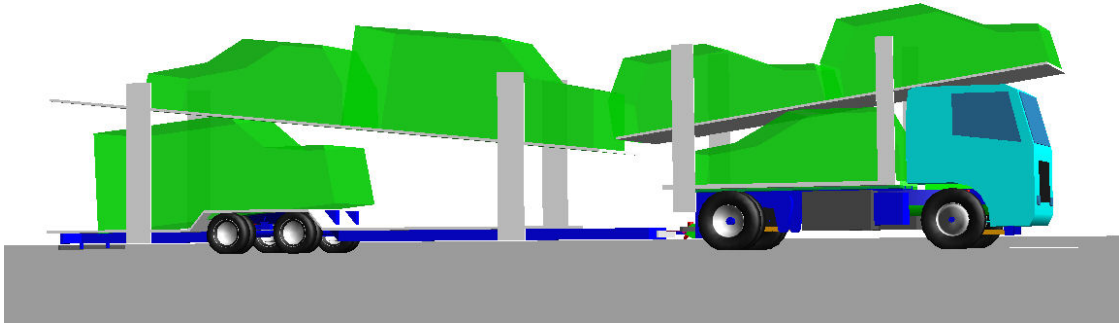
Kuva 2. Vetokytkin ja kitkavaimenninmekanismi, joka on ympyröity.

Vetokyttimeen liittyy kitkavaimenninmekanismi, joka on esitetty kuvassa 2. Vaimentimen muodostavat vetoautoon nivelöity kaari, johon vaimennusvoima vaikuttaa, sekä perävaunun vetoaisassa oleva kitkavoiman muodostava jarrusatarakenne. Kitkapaloja puristava voima saadaan aikaan vetoaisan sisään sijoitetulla ilmapalkeella, joka saa ohjauksen perävaunun ilmajousitusjärjestelmästä. Vaimennusvoima on suuruusluokaltaan 1 – 2 kN riippuen perävaunun kuormauksesta.

### 3.2 Ajoneuvoyhdistelmän simulointimalli

Ajoneuvoyhdistelmästä muodostettiin MSC.ADAMS-ohjelmistolla simulointimalli, joka on esitetty kuvassa 3. Vetoauto ja perävaunu on mallinnettu niiltä osin, kuin se on tutkimuksen

kannalta katsottu tarpeelliseksi. Mallinnuksessa on resurssien säästämiseksi käytetty mahdollisimman paljon hyödyksi VTT:llä jo olemassa olevia raskaiden ajoneuvojen mallikomponentteja.



*Kuva 3. Simulointimalli onnettomuustilanteen mukaisella kuormaustavalla.*

Vetoauton akselistojen tuennan ja jousituksen mallinnuksessa lähtötietoina käytettiin vastaavanlaisesta Mercedes-Benz-vetoautosta mitattuja arvoja. Vetoauton kaikkien osien (esimerkiksi runko, korirakenne) tarkkoja massoja ja hitausmomenteja ei ollut saatavilla, jolloin on täytynyt käyttää arvioita. Näillä ei kuitenkaan ole aiemman kokemuksen perusteella tutkimuksen tulosten kannalta oleellista merkitystä.

Perävaunun akseli- ja jousitustietojen pohjana on käytetty BPW:n www-sivujen [3] ja H.Kraatz Oy:n komponenttiluettelon tietoja [4]. Perävaunun vetokytkimen kitkavaimentimen toiminnalliset mitat on mitattu vastaavanlaisesta ajoneuvoyhdistelmästä. Kitkapalojen kitkeroin on arvioitu ja vaimentimen ilmapalkeen paineen oletetaan olevan suoraan perävaunun ilmajousien paine.

Iskunvaimentimille ei ollut saatavilla tarkkoja komponenttiarvoja. Vetoauton ja perävaunun iskunvaimentimien vaimennusvoimatietoina käytetään aiemmissa tutkimuksissa saatuja lähtötietoja.

Rengasmalli perustuu Pacejkan Magic Formula 87:n. Tienpinnan kitkataso on 0,53. Tämä saavutetaan märällä asfalttipinnalla tai hyvällä talvikelillä.

Tutkimuksen tarkoitus on verrata eri kuormaustapojen vaikutusta ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen ja ohjautuvuuteen. Simulointimallin ominaisuuksien saaminen vastaamaan täysin juuri onnettomuudessa olleen ajoneuvoyhdistelmän ominaisuuksia ei tällöin ole käytettävissä oleviin resursseihin nähden tarkoituksenmukaista. Eri kuormaustapojen simulointitulokset ovat vertailukelpoisia ja mahdolliset erot tulevat esille, vaikka joidenkin komponenttien ominaisuuden poikkeaisivatkin hieman todellisista arvoista.

### 3.3 Mallin yksinkertaistukset

Tutkimuksessa käytettävä mallinnus perustuu jäykän kappaleen dynamiikkaan. Vetoauton ja perävaunun rungot, ohjaamo ja korirakenteet mallinnetaan jäykkinä kappaleina, jotka ovat jäykästi runkoon kiinnitettyjä. Todellisessa tilanteessa rakenteet ovat jossain määrin joustavia, mutta tällä yksinkertaistuksella ei eri kuormaustapojen vertailussa oleteta olevan tulosten

kannalta oleellista merkitystä. Lisäksi kuormana olevat ajoneuvot on mallinnettu jäykkinä kappaleina, vaikka todellisuudessa ne ovat jousitettuja ja siten vaikuttavat ajoneuvoyhdistelmän käyttäytymiseen.

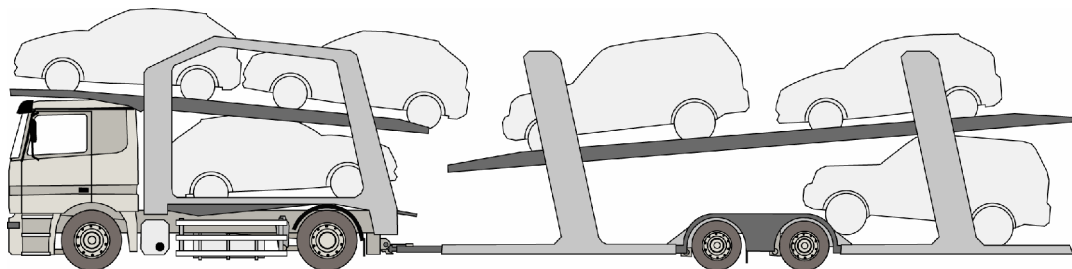
Mallinnuksessa tärkeimpänä lähtökohtana on akselistojen tuennan riittävän todenmukainen mallintaminen. Akselistojen tuenta runkoon on toteutettu idealisoiduilla, joustavilla ja välyksettömillä elementeillä. Ilmajousen toiminta on mallinnettu adiabaattisella tilayhtälöllä, jolloin lämmön vaihtoa ympäristön kanssa jouston aikana ei tapahdu. Ilmajousituksen tasonsäätöjärjestelmän ei oleteta ehtivän vaikuttaa dynaamisessa tilanteessa.

Ajoneuvoyhdistelmän osien tarkkaa geometriaa ei ole mallinnettu, koska sen vaikutus tuloksiin ei ole merkittävä.

## 4 Simuloitavat kuormaustavat

### 4.1 Kuormaustapa 1: onnettomuustilanteen mukainen kuormaus

Ajoneuvoyhdistelmän pituus 18,30 metriä. Vetoautossa kuormana on kolme 1200 kg:n massaista henkilöautoa. Perävaunussa kuormana on yksi henkilöauto, jonka massa on 1200 kg sekä kaksi maastoautoa, joiden massat ovat 2585 kg ja 2100 kg. Kuormana olevien autojen sijoittelu on esitetty kuvassa 4. Ajoneuvoyhdistelmän akselimassat ja vetoaisan pystykuormitus on esitetty taulukossa 1. Perävaunun akselimassoja määrittämisessä on käytetty mitattuja perävaunun vetoaisan pystykuormituksen ja akselikuormitusten arvoja sekä kuvista arvioituja autojen sijainteja kuormatilassa [2], [5]. Vetoauton osalta akselikuormitustietoja ei ollut saatavilla, joten ne ovat laskettu simulointimallilla. Vetoautossa kuormana olevien henkilöautojen sijainnit on arvioitu onnettomuusajoneuvosta otettujen kuvien perusteella [5].



Kuva 4. Onnettomuustilanteen mukainen kuormaus.

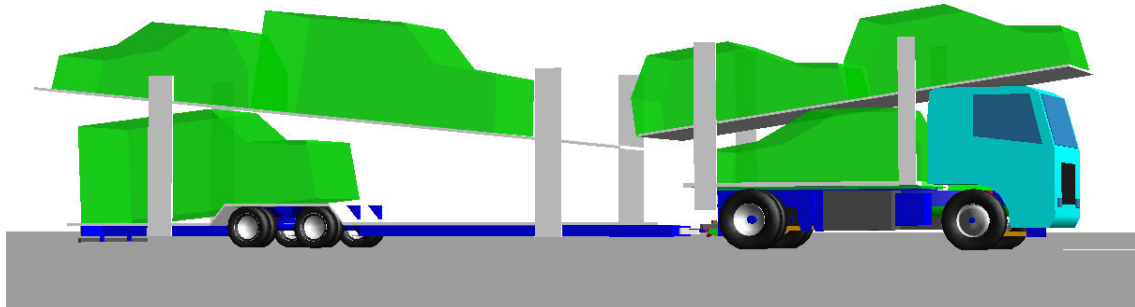
Taulukko 1. Akselikuormitukset ja vetoaisan pystykuormitus kuormaustavalla 1.

<b>Kuorma-auto</b>	<b>15039 kg</b>
Etuakseli	5829 kg
Vetävä akseli	9210 kg
<b>Vetoaisan pystykuormitus</b>	<b>1434 kg</b>
<b>Perävaunu</b>	<b>13346 kg</b>
Akseli 1	6671 kg
Akseli 2	6675 kg
<b>Yhteensä</b>	<b>28385 kg</b>

## 4.2 Kuormaustapa 2: Suomen lainsäädännön täyttävä kuormaus

Ajoneuvoyhdistelmän pituus 18,30 metriä. Vetoautossa kuormana on kolme 1200 kg:n massaista henkilöautoa. Perävaunussa kuormana on yksi henkilöauto, jonka massa on 1200 kg sekä kaksi maastoautoa, joiden massa ovat 2585 kg ja 2100 kg. Kuormana olevien autojen sijoittelu on esitetty kuvassa 5. Ajoneuvoyhdistelmän akselimassat ja vetoaisan pystykuormitus on esitetty taulukossa 2.

Kuorman massa on samansuuruinen kuin edellisen kohdan (4.1) onnettomuustilanteen mukaisessa kuormauksessa. Poikkeavuus edelliseen tilanteeseen verrattuna on, että perävaunun osalta kuorman painopistettä on siirretty taaksepäin. Tämä on tehty siirtämällä kaikkia perävaunun kuormana olleita autoja taaksepäin niin paljon, että vetoaisan pystykuormitus on alle lainsäädännön salliman maksimiarvon 1000 kg.



Kuva 5. Suomen lainsäädännön täyttävä kuormaustapa.

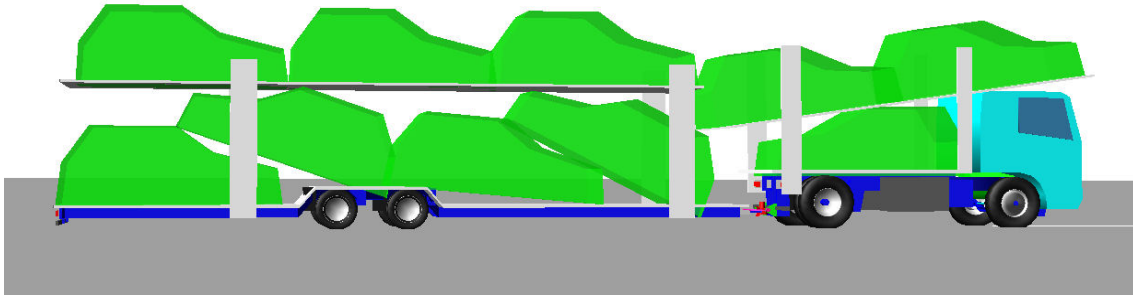
Taulukko 2. Akselikuormitukset ja vetoaisan pystykuormitus kuormaustavalla 2.

<b>Kuorma-auto</b>	<b>14475 kg</b>
Etuakseli	5987 kg
Vetävä akseli	8488 kg
<b>Vetoaisan pystykuormitus</b>	<b>870 kg</b>
<b>Perävaunu</b>	<b>13910 kg</b>
Akseli 1	6943 kg
Akseli 2	6967 kg
<b>Yhteensä</b>	<b>28385 kg</b>

## 4.3 Kuormaustapa 3: Keski-Euroopassa sallittu kuormaus

Ajoneuvoyhdistelmän pituus 19,80 metriä. Perävaunun kuormaamisessa on käytetty esimerkkinä EUROLOHR-esitteessä olleita kuvia [6]. Vetoautossa kuormana on kolme 1200 kg:n massaista henkilöautoa. Perävaunussa kuormana on alatasolla neljä 1200 kg:n massaista henkilöautoa ja ylätasolla kolme 1100 kg:n massaista henkilöautoa. Kuormana olevien autojen sijoittelu on esitetty kuvassa 6. Ajoneuvoyhdistelmän akselimassat ja vetoaisan pystykuormitus on esitetty taulukossa 3.





Kuva 6. Keski-Euroopassa sallittu kuormaustapa.

Taulukko 3. Akselikuormitukset ja vetoaisan pystykuormitus kuormaustavalla 3.

<b>Kuorma-auto</b>	<b>14461 kg</b>
Etuakseli	6022 kg
Vetävä akseli	8439 kg
<b>Vetoaisan pystykuormitus</b>	<b>856 kg</b>
<b>Perävaunu</b>	<b>16227 kg</b>
Akseli 1	8086 kg
Akseli 2	8141 kg
<b>Yhteensä</b>	<b>30688 kg</b>

## 5 Ajoneuvoyhdistelmän ajodynamiikka

### 5.1 Stabiilisuus

Ajoneuvoyhdistelmien sivuttaisdynamiikkaa voidaan tarkastella värähtelyjärjestelmänä. Tässä tutkimuksessa ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuudella tarkoitetaan ajoneuvoyhdistelmän sivusuuntaisen värähtelyn stabiilisuutta. Tämä käsittää ajoneuvoyksiköiden sivusuuntaisen liikkeen sekä pystyakselin suhteen tapahtuvan kiertymisen.

Tärkeimmät sivuttaisstabiilisuuteen vaikuttavat tekijät ovat ajoneuvon ominaisuudet (mitoitus, painonjakauma, rengastus) sekä kuljettajan toiminta (ajonopeus, ohjausliikkeiden nopeus). Tutkittavien ajoneuvoyhdistelmien dynaamista stabiilisuutta arvioidaan seuraavassa kiertohilahtelun vaimennuskertoimen ja sivuttaiskiiktyvyyden RA-arvon avulla.

#### 5.1.1 Kiertohilahtelun vaimennuskerroin

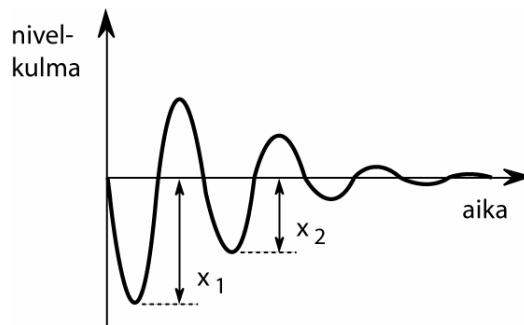
Ajoneuvoyhdistelmän värähtelyominaisuuksia arvioidaan määrittämällä ajoneuvoyksiköiden pystykiertymäliikkeen vaimennuksen suuruus. Nopean ohjausliikkeen seurauksena vetoauton

ja perävaunun kulkusuunta muuttuu ja syntyy kiertoheilahteluja. Vaimennuskerroin (*Yaw Damping Coefficient*) kuvaa ajoneuvoyhdistelmän ominaisuutta vaimentaa syntynyt kiertoheilahtelu. Vaimennuksen suuruus on ajoneuvoyhdistelmän ominaisuus ja se ei riipu ohjausherätteestä, joten sen avulla voidaan arvioida ja verrata eri kuormaustapojen vaikutusta ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen.

Vaimennuskerroin määritetään ajoneuvoyhdistelmän vapaasta värähtelystä. Ohjausherätteenä käytetään pulssiherätettä (kappale 6.1), jonka seurauksena ajoneuvoyhdistelmä poikkeutetaan tasapainoasemasta. Vaimennuskerroin lasketaan vetoauton ja perävaunun välisen nivelkulman käyttäytymisestä seuraavasti kaavalla [7]

$$\zeta = \frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{\sqrt{4\pi^2 + \left(\ln \frac{x_1}{x_2}\right)^2}}, \quad (1)$$

jossa  $x_1$  ja  $x_2$  ovat nivelkulman värähtelyn peräkkäiset amplitudit. Nivelkulman amplitudien määrittäminen on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Vaimennuskertoimen määrittäminen.

Mitä suurempi vaimennuskerroin on, sitä nopeammin ajoneuvoyhdistelmän kiertoheilahtelut vaimenevat. Jos vaimennuskertoimen arvo on nolla, ei systeemissä ole vaimennusta. Tällöin systeemi on epästabiili.

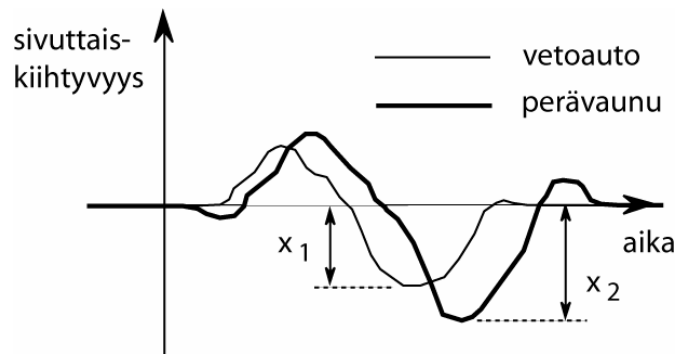
### 5.1.2 Sivuttaiskiikityvyyden RA-arvo

Kuljettajan tekemien nopeiden ohjausliikkeiden seurauksena ajoneuvoyhdistelmän perävaunu kokee vetoautoa suurempia sivuttaisliikkeitä. RA-arvo (*Rearward Amplification*) kuvaa sitä, kuinka paljon perävaunun liike vahvistuu vetoauton liikkeeseen verrattuna tietyn ohjausherätteen seurauksena.

RA-arvolla mitataan ajoneuvoyhdistelmän sivuttaisia pakotettujen värähtelyjen ominaisuuksia. Tässä tutkimuksessa RA-arvo määritetään vetoauton etuakselin ja perävaunun takimmaisien akselien sivuttaiskiikityvyyksien perusteella seuraavasti

$$RA = \frac{|x_2|}{|x_1|}, \quad (2)$$

jossa  $x_1$  ja  $x_2$  ovat vetoauton ja perävaunun tutkittavan suureen maksimiarvot ajokokeen aikana. Maksimiarvojen määrittäminen on esitetty kuvassa 8. RA-arvon ollessa yli yhden perävaunun liikkeet vahvistuvat vetoauton liikkeisiin verrattuna. Jos esimerkiksi sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo ajoneuvoyhdistelmälle on 2,0 ja maksimi sivuttaiskiihtyvyys vetoauton etuakselilla kokeen aikana on  $2 \text{ m/s}^2$ , niin perävaunun takimmaisen akselin kokema suurin sivuttaiskiihtyvyys on  $4 \text{ m/s}^2$ .



Kuva 8. Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon määrittäminen.

Ajoneuvoyhdistelmän käyttäytymistä kuvaava sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo riippuu käytetyn ohjausherätteen taajuussisällöstä, joten erilaisilla ajokokeilla määrätty RA-arvot ovat erisuuruisia. Tässä tutkimuksessa RA-arvo lasketaan kaksoiskaistanvaihtokokeen perusteella. RA-arvo riippuu käytettävän ohjausherätteen muodon lisäksi voimakkaasti ajoneuudesta.

## 5.2 Ohjautuvuus

Ajoneuvoyhdistelmän ohjautuvuutta tutkitaan määrittämällä vetoauton ajokäyttäytymisen tyyppi, joka voi olla ali-, neutraali- tai yliohjautuva. Vetoautolle lasketaan ali-/yliohjautuvuusindeksi, joka kuvaa vetoauton käyttäytymisen luonteen erisuuruisilla keskeiskiihtyvyyksillä [8].

Ali-/yliohjautuvuusindeksi keskeiskiihtyvyyden funktiona voidaan määrittää vakiokaarrekojeilla, jotka suoritetaan vakiona pysyvällä ajonopeudella ja erisuuruisilla askelmallisilla ohjausherätteillä. Näissä määritetään vetoauton vakioilanteessa saavuttamat pystykiertymäkulmanopeudet sekä sivuttaiskiihtyvyydet (keskeiskiihtyvyys), joiden perusteella ohjautuvuusindeksi lasketaan.

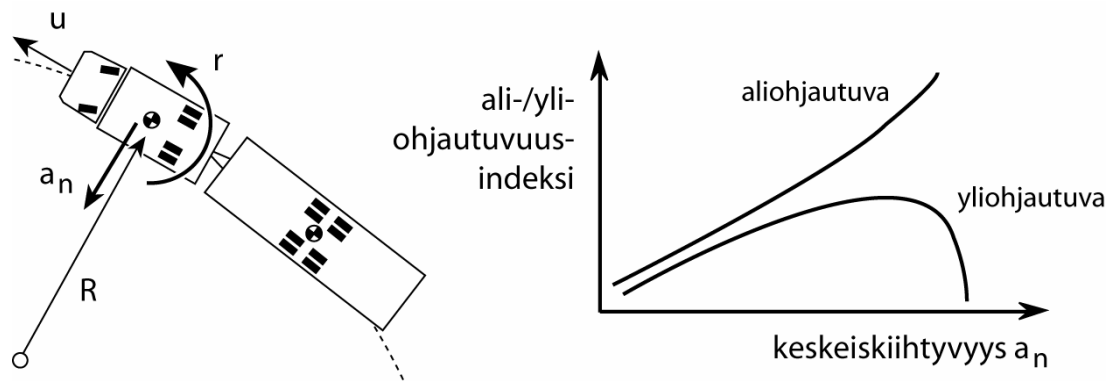
Ali-/yliohjautuvuusindeksi  $d\delta$  määritetään kaarteeseen ajamiseen tarvittavan ohjauskulman  $\delta$  ja geometrisen kääntökulman  $\delta_A$  (Ackerman) erotuksena. Ohjautuvuusindeksi lasketaan kaavalla

$$d\delta = \delta - \delta_A = \delta - \frac{Lr}{u}, \quad (3)$$

missä  $L$  on vetoauton akseliväli,  $r$  vakioilanteessa saavutettu vetoauton pystykiertymäkulmanopeus ja  $u$  ajonopeus. Kuvassa 9 on esitetty ohjautuvuusindeksin määrittäminen vakiokaar-

rekokeella sekä tyypilliset ali- ja yliohjaavan vetoauton ohjautuvuusindeksin kuvaajat keskeiskiihtyvyyden funktiona.

Vetoauton aliohjaava käyttäytyminen on turvallisin. Tällöin vetoauto säilyttää ohjattavuutensa aina kaatumiseen johtavaan sivuttaiskiihtyvyydestasoon saakka. Yliohjaavalla ajokäyttäytymisellä vetoauto sen sijaan voi menettää ohjattavuutensa ja pyörähtää pysty akselinsa ympäri ennen kaatumistaan.



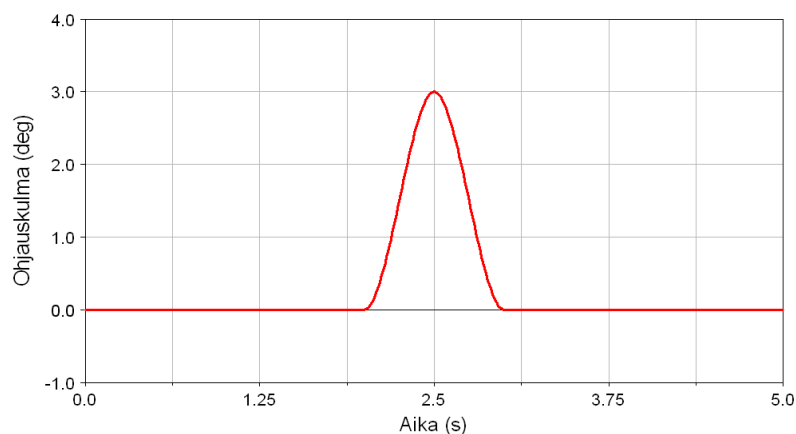
Kuva 9. Ali-/yliohjautuvuusindeksin määrittäminen vakiokaarrekokeella.

## 6 Simuloitavat tapaukset

Tässä tutkimuksessa ajodynamiikan selvittämiseksi käytetään avoimen tyyppin (*open-loop*) kokeita. Tämä tarkoittaa sitä, että simuloinnissa käytetään ennalta määrättyä ohjauserätettä. Tällöin kuljettajan vaikutusta ei huomioida, joten arvostelu perustuu puhtaasti ajoneuvoyhdistelmän ominaisuuksiin.

### 6.1 Pulssiheräte

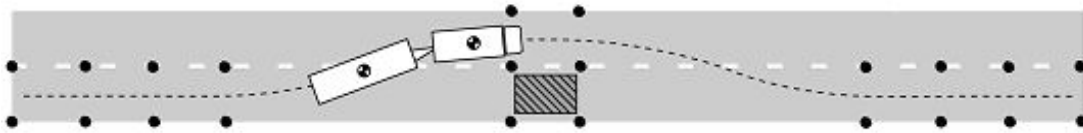
Pulssiherätteen avulla määritetään vapaasti värähtelevän ajoneuvoyhdistelmän kiertöheilahteluja kuvaava vaimennustekijä. Ohjauserätteenä käytettävä pulssiheräte on esitetty kuvassa 10. Käytetyn ohjauspulssin äärellisen keston vuoksi taajuussisältö ei ole kovinkaan laaja, mutta se saa aikaan sivusuuntaisen vapaan värähtelyn.



Kuva 10. Simuloinnissa käytetty pulssiheräte.

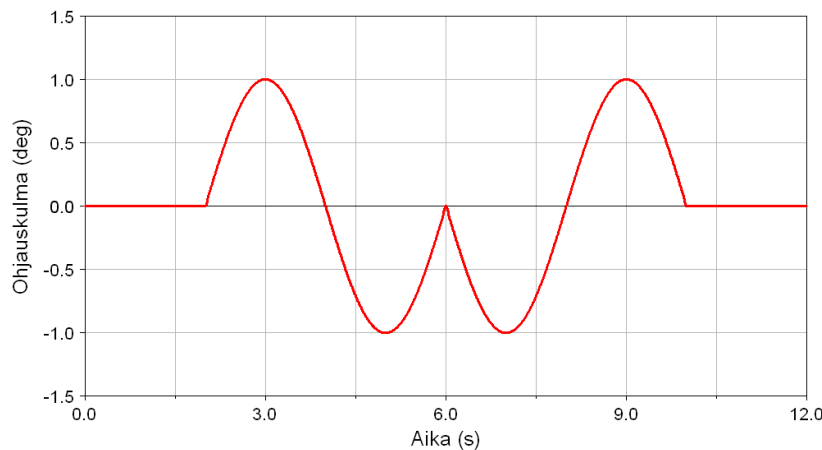
## 6.2 Kaksoiskaistanvaihtokoe

Yleisesti käytetty ajoneuvojen käyttäytymistä selvittävä koe on kaksoiskaistanvaihtokoe, joka on ISO 3888 -standardin mukainen. Kaksoiskaistanvaihtokokeessa ajoneuvoyhdistelmällä väistetään estettä viereiselle kaistalle, jonka jälkeen palataan takaisin omalle kaistalle. Ajoneuvoyhdistelmän kulkema ajoura standardin mukaisessa kokeessa on esitetty kuvassa 11. Kaksoiskaistanvaihtokokeen perusteella määritetään sivuttaiskihtiyyden RA-arvo.



Kuva 11. Ajoura kaksoiskaistanvaihtokokeessa.

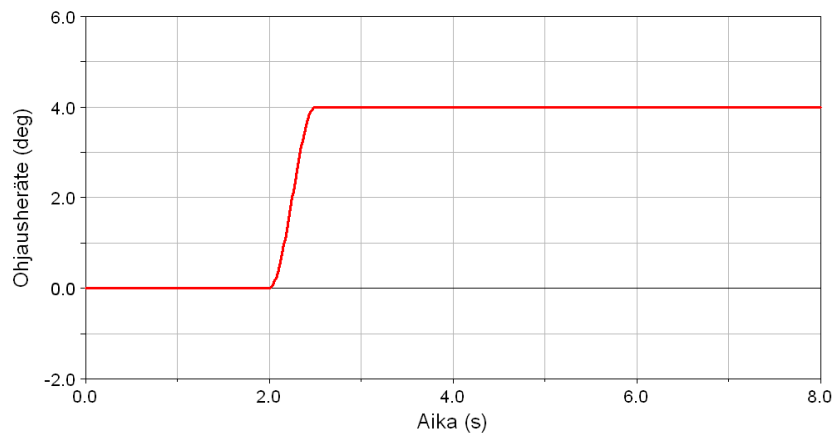
Tässä tutkimuksessa käytetään kaksoiskaistanvaihtokokeen mukaista ohjauserätettä, joka on esitetty kuvassa 12. Ohjauseräte muodostuu kahdesta vastakkaisessa vaiheessa olevasta sinijaksosta. Kokeessa saavutettava ajoneuvoyhdistelmän ajoura ei ole standardin mukainen, mutta se tuo esille ajoneuvoyhdistelmän käyttäytymisen kaistanvaihtokokeen aikana.



Kuva 12. Simuloinnissa käytetty ohjauseräte kaksoiskaistanvaihtokokeessa.

## 6.3 Askelheräte

Ajoneuvoyhdistelmän ohjautuvuutta tutkitaan määrittämällä vaste askelmaiseen ohjauseräteeeseen, jonka seurauksena ajoneuvoyhdistelmän alkaa kaartaa. Ohjauseräte on esitetty kuvassa 13. Vetoauton saavutettua kaarreajossa vakioilanteen määritetään ohjauserätteen aikaansaama pystykiertymäkulmanopeus sekä sivuttaiskihtiyyys, joiden perusteella lasketaan ohjautuvuusindeksi. Simulointi suoritetaan vakiona pysyvällä ajonopeudella ja ohjauserätteen arvoilla 0,5 – 5,5 deg, jolloin saadaan määritettyä ohjautuvuusindeksin riippuvuus keskeiskihtiyydestä.

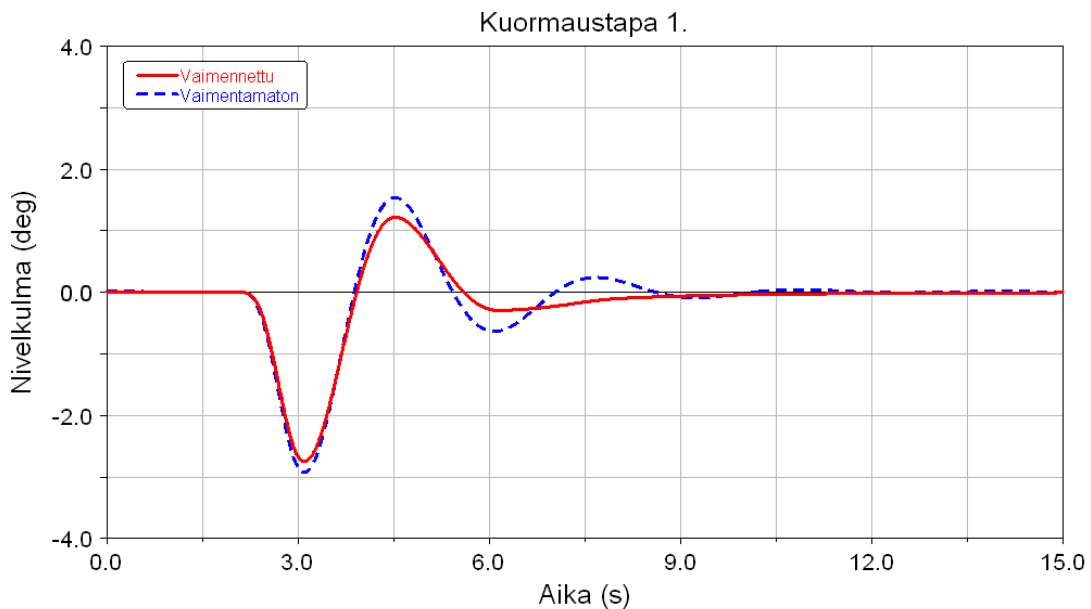


Kuva 13. Simuloinnissa käytetty askelmainen ohjausheräte.

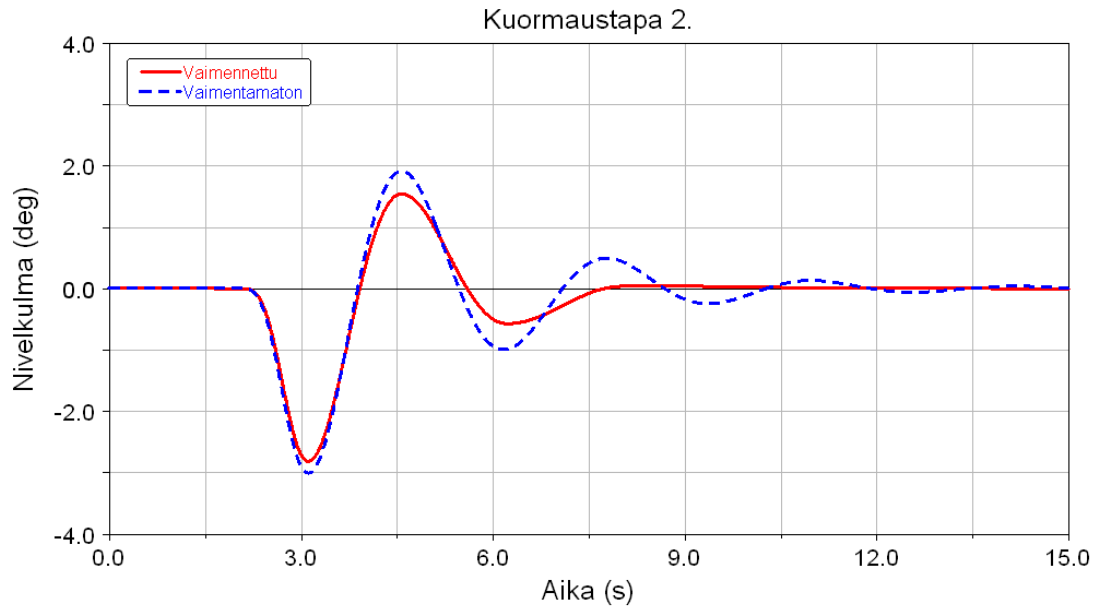
## 7 Tulokset ja niiden tarkastelu

### 7.1 Kiertoheilahtelun vaimennuskerroin

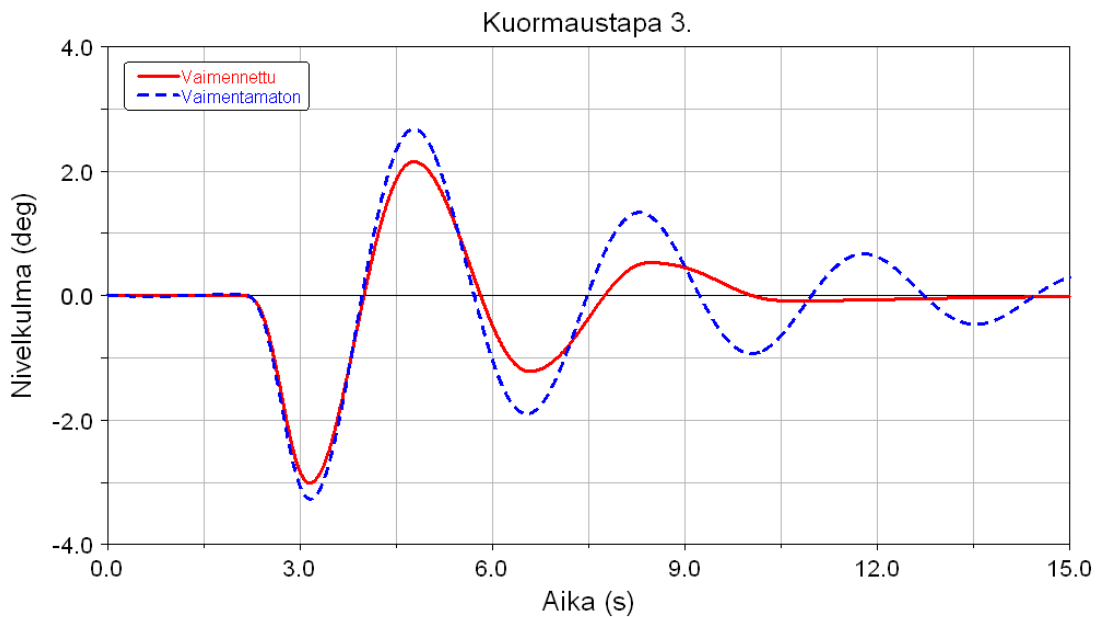
Kuvissa 14, 15 ja 16 on esitetty nivelkulmien vasteet ajan funktiona pulssimaisella ohjausherätteen seurauksena (kappale 6.1) eri kuormaustavoilla (luku 4). Ajonopeus kokeissa on 80 km/h. Tuloksissa on esitetty kuvaajat vetokytkimen kitkavaimentimen ollessa toiminnassa ja pois toiminnasta.



Kuva 14. Nivelkulma pulssimaiselle ohjausherätteelle kuormaustavalla 1.



Kuva 15. Nivelkulma pulssimaiselle ohjauseränteelle kuormaustavalla 2.



Kuva 16. Nivelkulma pulssimaiselle ohjauseränteelle kuormaustavalla 3.

Taulukossa 4 on esitetty vaimennuskertoimen arvot, jotka ovat laskettu kaavan (1) mukaisesti nivelkulmavasteista. Vaimennuskertoimen arvot on esitetty erilaisille kuormaustavoilla vaimennetulle sekä vaimentamattomalle tapaukselle.

Taulukko 4. Kiertoheilahtelun vaimennuskerroin eri kuormaustavoilla.

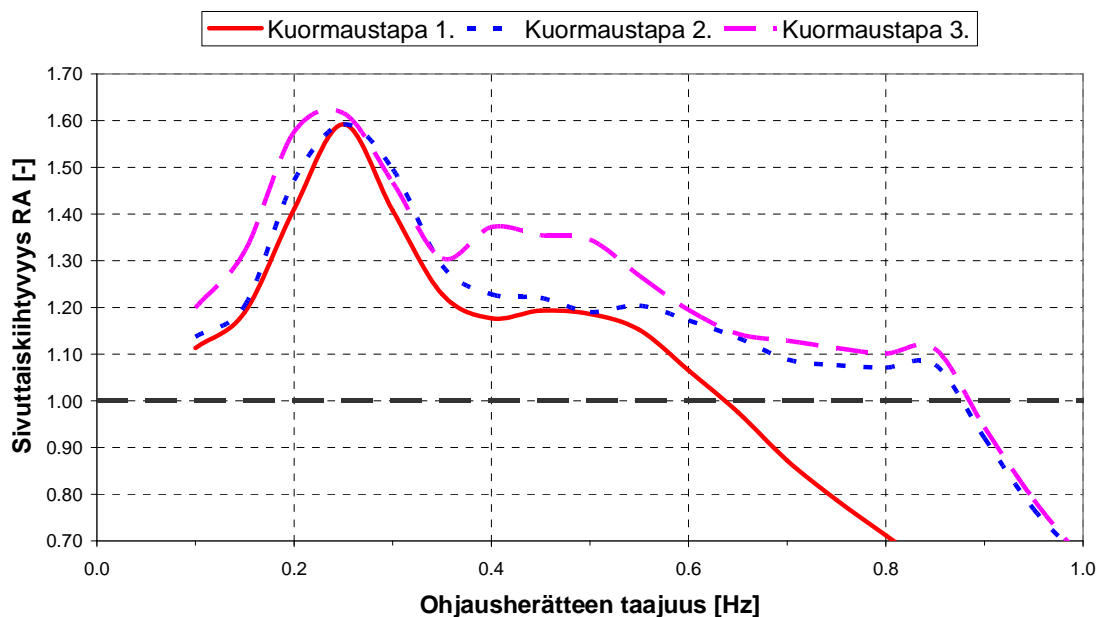
	vaimennettu	vaimentamaton
<b>Kuormaustapa 1.</b>	15 %	10 %
<b>Kuormaustapa 2.</b>	11 %	8 %
<b>Kuormaustapa 3.</b>	6 %	4 %

Vaimennuskertoimen perusteella kuormaustapa 1 on vakain. Tällöin vaimennuskertoimen arvo on 15 %. Kuormaustavassa 2 perävaunun painopistettä siirretään taemmaksi siten, että vetoaisan pystykuormitus laskee alle sallitun maksimiarvon 1000 kg. Tällöin vaimennuskertoimen pienenee arvoon 11 %. Kuormaustavalla 3, joka vastaa Keski-Euroopassa sallittua kuormausta, vaimennuskertoimen arvo on 6 %.

Ajoneuvoyhdistelmän vetokytkimeen rakennetun vaimennin mekanismin vaikutus kiertoheilahtelujen vaimennuksessa on suhteellisen merkittävä. Tämä selviää vertaamalla taulukon 4 vaimennuskertoimen arvoa vaimennetulle ja vaimentamattomalle tapaukselle. Vaimentimen poistaminen pienentää vaimennuskerrointa noin 30 %.

## 7.2 Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo

Kuvassa 17 on esitetty kaksoiskaistanvaihtokokeista kaavan (2) perusteella lasketut sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvot ohjauseräteen taajuuden funktiona eri kuormaustavoille. RA-arvojen määrittämisessä on käytetty vetoauton etuakselin ja perävaunun takimmaisena akselin sivuttaiskiihtyvyyden arvoja. Ajonopeus laskennassa on ollut 80 km/h.



Kuva 17. Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo ohjauseräteen taajuuden funktiona tutkituilla kuormaustavoilla.

Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvojen maksimiarvot ja vastaavat ohjauseräteen taajuudet eri kuormaustavoilla on esitetty taulukossa 5. Kuormaustavoilla 1 ja 2 RA-arvon maksimiarvo on 1,59. Kuormaustavalla 3 RA-arvon maksimiarvo on 1,62, jolloin kasvua kuormaustapoihin 1 ja 2 verrattuna on 2 %. Kuormaustapa ei siis vaikuta merkittävästi RA-arvon maksimiarvoon. Ohjauseräteen taajuuteen, jolla maksimiarvo saavutetaan, kuormaustapa ei myöskään merkittävästi vaikuta. Kaikilla kuormaustavoilla suurimmat RA-arvot saavutetaan ohjauseräteen taajuusalueella 0,2 – 0,3 Hz.

RA-arvon kuvaajan muotoon kuormaustapa vaikuttaa selvästi. Kuormaustapojen 2 ja 3 tapauksessa suurilla taajuusarvoilla RA-arvo on huomattavasti korkeampi kuin kuormaustavalla 1.



Tällaiset ohjausherätteen taajuudet (0,5 – 1,0 Hz) ovat kuitenkin todella suuria arvoja käytännön ajotilanteisiin verrattuna.

*Taulukko 5. Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvojen maksimiarvot eri kuormaustavoilla.*

	<b>RA-arvon maksimi</b>	<b>Ohjausherätteen taajuus (Hz)</b>
<b>Kuormaustapa 1.</b>	<b>1.59</b>	<b>0.25</b>
<b>Kuormaustapa 2.</b>	<b>1.59</b>	<b>0.25</b>
<b>Kuormaustapa 3.</b>	<b>1.62</b>	<b>0.23</b>

Taulukossa 6 on esitetty erilaisille ajoneuvoyhdistelmätyypeille laskettuja sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvojen maksimiarvoja ohjausherätteen taajuusalueella 0,2 – 0,3 Hz [9, Kiviniemi]. Verrattaessa tutkitun autonkuljetusyhdistelmän sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvoa muiden ajoneuvoyhdistelmien arvoihin (taulukko 6) havaitaan, että autonkuljetusyhdistelmä käyttäytyy stabiilisti. Autonkuljetusyhdistelmän sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvo on hieman korkeampi kuin puoliperävaunuyhdistelmällä (1).

Kuorma-auton ja keskiakseliperävaunuyhdistelmän (2) (pituus 18,75 m) sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon maksimiarvo taajuusalueella (0,2 – 0,3 Hz) on 1,72, joka on 6 – 8 % suurempi kuin autonkuljetusyhdistelmän tapauksessa. Tähän RA-arvon kasvuun vaikuttaa ajoneuvoyhdistelmien erilainen mitoitus sekä kuormaus, mutta suuri vaikutus autonkuljetusyhdistelmän eduksi on vetokytkimen kitkavaimentimella.

Varsinaisilla perävaunuyhdistelmillä (3) sekä moduuliyhdistelmillä (4 ja 5) taajuusalueella 0,2 – 0,3 Hz olevien sivuttaiskiihtyvyyksien RA-arvojen maksimiarvot ovat 1,55 – 2,10, joten myös näihin ajoneuvoyhdistelmiin verrattuna autonkuljetusyhdistelmä käyttäytyy stabiilisti. Näillä ajoneuvoyhdistelmätyypeillä (3, 4 ja 5) on kuitenkin lisäksi toinen huomattavasti korkeampi sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon maksimikohta ohjausherätteen taajuuksilla 0,6 – 0,8 Hz. Tämä on otettava huomioon verrattaessa yleisesti ajoneuvoyhdistelmien stabiiliteettia. Kuten edellä on todettu, tällaiset ohjausherätteen taajuudet ovat kuitenkin todella suuria arvoja käytännön ajotilanteisiin verrattuna, joten niitä ei ole huomioitu tässä vertailussa.

*Taulukko 6. Sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon maksimiarvoja erilaisille ajoneuvoyhdistelmätyypeille ohjausherätteen taajuusalueella 0,2 – 0,3 Hz [9, Kiviniemi].*

<b>Ajoneuvoyhdistelmätyyppi</b>	<b>RA-arvon maksimi</b>	<b>Ohjausherätteen taajuus (Hz)</b>
<b>1 Puoliperävaunuyhdistelmä, 16,5 m</b>	<b>1.55</b>	<b>0.30</b>
<b>2 Keskiakseliperävaunuyhdistelmä, 18,75 m</b>	<b>1.72</b>	<b>0.25</b>
<b>3 Kuorma-auton ja varsinaisen perävaunun yhdistelmä 22 m</b>	<b>1.55</b>	<b>0.25</b>
<b>4 Kuorma-auton ja varsinaisen perävaunun yhdistelmä 25,25 m</b>	<b>1.85</b>	<b>0.25</b>
<b>5 Kuorma-auton, puoliperävaunun ja keskiakseliperävaunun yhdistelmä, 25,25 m</b>	<b>2.10</b>	<b>0.30</b>

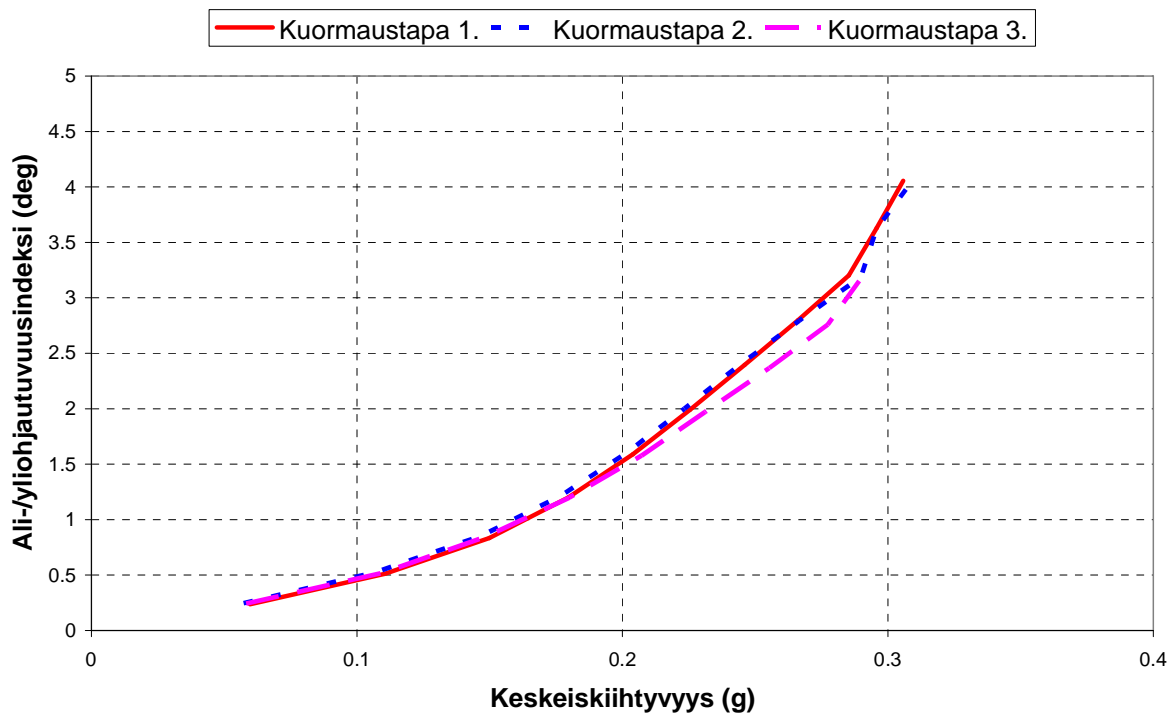
### 7.3 Vetoauton ohjautuvuus

Kuvassa 18 on esitetty ajoneuvoyhdistelmän simulointimallilla vetoautolle kaavan (3) mukaisesti laskettu aliohjautuvuusindeksi eri kuormaustavoilla. Simulointi on suoritettu ajonopeudella 80 km/h ja simuloinnissa on käytetty askelmaista ohjausherätettä (kappale 6.3).

Kuormaustavan vaikutus vetoauton ohjautuvuuteen ei ole merkittävä. Aliohjautuvuusindeksi kasvaa selvästi sivuttaiskihtiyyden kasvaessa, joten vetoauto on voimakkaasti aliohjaava kaikilla kuormaustavoilla.

Vetoauton ohjautuvuus riippuu pääasiassa akseleiden välisestä painonjakaumasta sekä rengastuksesta. Kaksiakseliset vetoautot ovat yleisesti aliohjaavia. Tämä johtuu akseleiden välisestä painojakaumasta (etuakseli 7000 kg ja taka-akseli 11000 kg) sekä taka-akselin paripyöräasennuksesta. Tällöin taka-akselin renkaat pystyvät kehittämään etuakselin renkaita enemmän sivuttaisvoimaa, jolloin vetoauto on aliohjaava.

Perävaunun kuormaustavan vaikutus vetoauton etuakselin pystykuormitukseen on noin 200 kg ja taka-akselin kuormitukseen noin 800 kg (taulukot 1, 2 ja 3). Tällaiset renkaiden pystykuormamuutokset eivät vaikuta oleellisesti vetoauton ajokäyttäytymiseen, koska taka-akselin renkailla on kaikilla kuormaustavoilla etuakselin renkaita enemmän sivuttaisvoimapotentiaalia.



Kuva 18. Vetoauton ali-/yliohjautuvuusindeksi keskeiskihtiivyyden funktiona eri kuormaustavoilla.

## 8 Johtopäätökset

Raskaan ajoneuvoyhdistelmän ajodynamiikan mallintaminen on erittäin vaativa tehtävä. Simulointimalliin liittyy useita epävarmuustekijöitä, jotka johtuvat niin komponenttien todellisten arvojen puuttumisesta, toiminnan yksinkertaistamisesta kuin mallien verifiointien vähäisyydestä. Vaikka simulointimallin toimintaa ei ole verifioitu todellisella ajoneuvoyhdistelmällä tehdyillä mittauksilla, ovat eri kuormaustavoilla saadut tulokset kuitenkin vertailukelpoisia ja antavat kuvan kuormauksen vaikutuksesta stabiilisuuteen ja ajokäyttäytymiseen. Simulointien perusteella voidaan todeta seuraavaa.

### 8.1 Kuormaustavan vaikutus stabiilisuuteen

Kuormaustavan vaikutus ajoneuvoyhdistelmän kiertoheilahtelujen vaimenemisominaisuuksia kuvaavaan vaimennuskertoimeen on suhteellisen merkittävä. Kuormaustapa 1 on stabiilein. Ajoneuvoyhdistelmä on stabiili myös kuormaustavoilla 2 ja 3, mutta tällöin ajoneuvoyhdistelmän kyky vaimentaa syntynyt sivusuuntainen värähtely on heikompi verrattuna kuormaustapaan 1.

Tutkitulla autonkuljetusyhdistelmällä ja tutkituilla kuormaustavoilla perävaunun kuorman painopisteen siirtäminen taakse päin heikentää ajoneuvoyhdistelmän kiertoheilahtelujen vaimennusominaisuuksia. Tämä painopisteen siirtäminen ei tee ajoneuvoyhdistelmästä dynaamisesti epästabiilia, mutta pienentää käytettävissä olevaa stabiilisuusmarginaalia sekä vaikuttaa epämiellyttävästi kuljettajan tuntemukseen ajoneuvoyhdistelmän käyttäytymisestä.

Ajoneuvoyhdistelmään rakennetun vaimenninmekanismin vaikutus kiertoheilahtelujen vaimennuksessa on suuri. Vaimentimen poistaminen pienentää vaimennuskerrointa noin 30 %.

Kuormaustavan vaikutus ajoneuvoyhdistelmän sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvoon ei ole merkittävä. Ohjauseräteen taajuuteen, jolla maksimiarvo saavutetaan, kuormaustapa ei merkittävästi vaikuta. Kuormaustavoilla 1 ja 2 RA-arvon maksimiarvo on 1,59. Kuormaustavalla 3 RA-arvon maksimiarvo on 1,62, jolloin kasvua kuormaustapoihin 1 ja 2 verrattuna on 2 %. Kaikilla kuormaustavoilla sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon maksimiarvo esiintyy taajuusalueella 0,2 – 0,3 Hz, joka vastaa käytännön ajotilanteissa esiintyviä ohjauseräteen taajuuksia. Tämän vuoksi tutkitun ajoneuvoyhdistelmän RA-arvon maksimiarvo kuvaa hyvin ajoneuvoyhdistelmän dynaamista stabiilisuutta.

Ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta mitataan toisaalta kiertoheilahtelun vaimennuskertoimen ja toisaalta sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon avulla. Molemmissa menetelmissä perävaunun painopisteen siirtäminen taemmaksi huonontaa ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta tutkituissa kuormaustavoissa. Yhteenvetona voidaan todeta, että tutkitulla autonkuljetusyhdistelmällä ja tutkituilla kuormaustavoilla perävaunun vetoaisan pystykuormituksen kasvattaminen lisää ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta. Toisaalta on kuitenkin otettava huomioon, että vetokytkin on suunniteltu 1000 kg:n pystykuormitukselle, joten perävaunun etupainoinen kuorma ei ole suotavaa.

On huomattava, että yleisesti vetoaisan pystykuormituksen liiallinen kasvattaminen (kuorman painopisteen siirtäminen eteenpäin) heikentää ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta. Optimaalinen sijainti perävaunun kuorman painopisteelle on hieman perävaunun akselin tai akseleiden keskikohdan etupuolella. Tutkitun autonkuljetusyhdistelmän mitoitus poikkeaa yleisestä kes-

kiakseliperävaunun yhdistelmän mitoitukselta. Toisaalta myös perävaunun kuorman massa on suhteellisen pieni verrattuna perävaunun omamassaan. Nämä seikat vaikuttavat siihen, että tutkituista kuormaustavoista etupainoisin kuormaustapa on stabiilein.

## 8.2 Kuormaustavan vaikutus ohjautuvuuteen

Kuormaustavan vaikutus vetoauton ohjautuvuuteen ei ole merkittävä. Kaikilla kuormaustavoilla vetoauto on voimakkaasti aliohjaava. Vetoauton ajokäyttäytymisen luonnetta kuvaava ali-/yliohjautuvuusindeksi määritetään simuloimalla vakiokaarrekoetta erisuuruisilla askelmaisilla ohjauseränteillä vakiona pysyvällä ajonopeudella. Näistä kokeissa määritetään kaarteeseen ajamiseen tarvittavan ohjauskulman ja geometrisen kääntökulman erotus keskeiskiirtävyyden funktiona. Tarvittava ohjauskulma kasvaa keskeiskiirtävyyden kasvaessa, joten vetoauton on aliohjaava.

Vetoauton aliohjaaminen johtuu akselien välisestä painojakaumasta sekä taka-akselin paripyöräasennuksesta. Perävaunun kuormaustavan vaikutus vetoauton etuakselin pystykuormitukseen on noin 200 kg ja taka-akselin kuormitukseen noin 800 kg. Tällaiset renkaiden pystykuormamuutokset eivät vaikuta oleellisesti vetoauton ajokäyttäytymiseen, koska taka-akselin renkaat pystyvät kaikilla kuormaustavoilla kehittämään etuakselin renkaita enemmän sivuttaisvoimaa.

## 9 Yhteenveto

Tutkittu raskas ajoneuvoyhdistelmä muodostuu kuorma-autosta ja keskiakseliperävaunusta. Ajoneuvoyhdistelmän mitoitus perustuu Keski-Euroopassa hyväksytyihin kansallisiin erivapauksiin, joissa ajoneuvoyhdistelmän pituus ylittää Suomen lainsäädännön salliman keskiakseliperävaunuyhdistelmän maksimipituuden 18,75 metriä. Perävaunun takaosa voidaan kuitenkin lyhentää, jolloin se on Suomen lainsäädännön mukainen. Ongelmana on, että tällöin perävaunun kuormaus muuttuu helposti etupainoiseksi, jolloin vetoaisan pystykuormitus ylittää lain sekä valmistajan salliman arvon.

Tutkimuksessa selvitetään kyseisen autonkuljetukseen tarkoitettua ajoneuvoyhdistelmän sivuttaisdynaamista stabiilisuutta. Tavoitteena on mallinnuksen ja simulointien avulla määrittää ajoneuvoyhdistelmän kuormaustavan vaikutus ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuuteen sekä ohjautuvuuteen.

Tutkittavana on kolme kuormaustapaa: (1) onnettomuustilanteen mukainen kuormaaminen (vetoaisan pystykuormitus ylittää lain salliman arvon), (2) Suomen lainsäädännön täyttävä kuormaaminen sekä (3) Keski-Euroopassa sallittu kuormaaminen.

Ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta mitataan kiertoheilahtelujen vaimennuskertoimen ja toisaalta sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon avulla. Kuormaustavan vaikutus ajoneuvoyhdistelmän kiertoheilahtelujen vaimenemisominaisuuksia kuvaavaan vaimennuskertoimeen on suhteellisen merkittävä. Kuormaustapa 1 on stabiilein. Ajoneuvoyhdistelmä on stabiili myös kuormaustavoilla 2 ja 3, mutta tällöin ajoneuvoyhdistelmän kyky vaimentaa syntynyt sivusuuntainen värähtely on heikompi verrattuna kuormaustapaan 1.

Kuormaustavan vaikutus ajoneuvoyhdistelmän sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvoon ei ole merkittävä. Ohjausherätteen taajuuteen, jolla maksimiarvo saavutetaan, kuormaustapa ei merkittävästi vaikuta. Kaikilla kuormaustavoilla sivuttaiskiihtyvyyden RA-arvon maksimiarvo esiintyy taajuusalueella 0,2 – 0,3 Hz, joka vastaa käytännön ajotilanteissa esiintyviä ohjausherätteen taajuuksia. Tämän vuoksi tutkitun ajoneuvoyhdistelmän RA-arvon maksimiarvo kuvaa hyvin ajoneuvoyhdistelmän dynaamista stabiilisuutta.

Vetoauton ajokäyttäytymistä ja ohjautuvuutta kuvataan ali-/yliohjautuvuusindeksillä, joka määritetään simuloimalla vakiokaarrekoetta erisuuruisilla askelmaisilla ohjausherätteillä vakiona pysyvällä ajonopeudella. Kuormaustavan vaikutus vetoauton ohjautuvuuteen ei ole merkittävä. Kaikilla kuormaustavoilla vetoauto on voimakkaasti aliohjaava.

Yleisesti perävaunun vetoaisan pystykuormituksen liiallinen kasvattaminen (kuorman painopisteen siirtäminen eteenpäin) heikentää ajoneuvoyhdistelmän stabiilisuutta. Optimaalinen sijainti perävaunun kuorman painopisteelle on hieman perävaunun akselin tai akseleiden keskikohdan etupuolella. Tutkitun autonkuljetusyhdistelmän tapauksessa tutkituista kuormaustavoista etupainoisin kuormaustapa on stabiilein.

## Lähdeviitteet

- [1] Ajoneuvoyhdistelmän mitoituspiirros.
- [2] Seppälä Jussi. Onnettomuusyhdistelmän perustietoja. A-Katsastus.
- [3] BPW-akselitot. <http://www.bpw.de>
- [4] *Akselistot ja alustanosat. Luettelo 01.11.2001.* H.Kraatz Oy.
- [5] Kai Valonen. Kuvia onnettomuudessa olleesta ajoneuvoyhdistelmästä. Onnettomuustutkintakeskus.
- [6] Product Data Sheet EUROLOHR 1.00 E. <http://www.lohr.fr/eurolohr300.htm>
- [7] William T Thompson. *Theory of Vibration with Applications 3<sup>rd</sup> Edition.* Prentice-Hall 1993.
- [8] Robert Bosch GmbH. *Autoteknillinen taskukirja.* 19. painos.
- [9] Jukka Räsänen, Veli-Pekka Kallberg, Tero Kiviniemi, Juha Tapio. *Täysperävaunullisten kuorma-autojen talviajan nopeusrajoituksen alentamisen vaikutukset.* Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 68/2004.