

Anssi Kivijärvi

## **AJONEUVOYHDISTELMÄN AJOVASTUSSELVITYS**

# **AJONEUVOYHDISTELMÄN AJOVASTUSSELVITYS**

Anssi Kivijärvi  
Opinnäytetyö  
Kevät 2017  
Kone- ja tuotantotekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka, ajoneuvo- ja kuljetustekniikka

---

Tekijä: Anssi Kivijärvi  
Opinnäytetyön nimi: Ajoneuvoyhdistelmän ajovastusselvitys  
Työn ohjaaja: Mauri Haataja  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2017  
Sivumäärä: 86 + 2 liitettä

---

Opinnäytetyössä vertailtiin teoreettisesti kolmen erilaisen perävaunun vaikutusta ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin. Näistä kolmesta perävaunusta vertailukohteeksi valittiin 76 t painavissa ajoneuvoyhdistelmissä yleisesti käytetty 5-akselinen paripyörillä varustettu perävaunu. Kaksi muuta perävaunua olivat 6-akselinen perävaunu, jossa kaikilla akseleilla oli yksikköpyörät, ja 5-akselinen perävaunu, jossa akseleilla 3 ja 5 oli yksikköpyörät. Vertailtavat perävaunut oli suunnitellut Konepaja Antti Ranta Oy.

Tutkimuksessa perehdyttiin tiekuljetuksiin ja ilmatäytteisen renkaan ominaisuuksiin. Ajoneuvoyhdistelmän ajovastuksiin perehdyttiin syvemmin. Tutkimuksessa selvitettiin varsinkin renkaiden vierintävastuksen syntymistä ja vierintävastukseen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa perehdyttiin myös ajoneuvoyhdistelmien ilmanvastuksen syntymiseen ja keinoihin, joilla ilmanvastusta voidaan pienentää. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin ajovastuksien mittaamiskeinoja ja mittaamisessa huomioitavia muuttujia. Ajoneuvoyhdistelmien vierintävastusvoimien vaikutuksen arvioimiseksi tutkimuksessa käytettiin yksinkertaista analyysiä, joka perustuu ajovastusvoimiin, moottorin ja voimansiirron hyötysuhteeseen sekä polttoaineen alempaan lämpöarvoon.

Tutkimuksen tuloksissa vertailtiin täydellä kuormalla olevien ajoneuvoyhdistelmien kuljetustehokkuutta, päästöjä ja polttoaineenkeskikulutusta. Tuloksissa havaittiin, että täydellä kuormalla ajettaessa 6-akselinen yksikköpyörillä varustettu perävaunu alentaa polttoaineenkulutusta tonnikilometriä kohden noin 7,5 % verrattuna 5-akseliseen paripyörillä varustettuun perävaunuun. 5-akselisen sekarengastetun perävaunun havaittiin alentavan polttoaineenkulutusta tonnikilometriä kohden noin 4,0 %. Yhdistelmien hiilidioksidipäästöt alenivat samassa suhteessa. Tutkimuksessa on käytetty paljon oletuksia ja lähdekirjallisuudessa mainittuja arvoja, joten tulokset ovat suuntaa antavia. Luotettavien tuloksien saaminen edellyttää ajovastusmittauksia ja ajoneuvoyhdistelmän vetoauton moottorin ja voimansiirron hyötysuhteen kokeellista määrittämistä.

---

Asiasanat: vierintävastus, ajovastus, paripyörä, yksikköpyörä, ajoneuvoyhdistelmä, perävaunu, polttoaineenkulutus

## **ALKULAUSE**

Haluaisin kiittää Konepaja Antti Ranta Oy:n tuotepäällikkö Esa Monosta tämän opinnäytetyön mahdollistamisesta. Lisäksi haluaisin kiittää opinnäytetyön ohjaajaa professori Mauri Haatajaa.

Oulussa 21.5.2017

Anssi Kivijärvi

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 TIEKULJETUKSET	8
2.1 Ajoneuvon käyttökustannukset	9
2.2 Ajoneuvoyhdistelmät	11
2.3 Kehityssuunta	13
3 ILMATÄYTTEINEN RENGAS	15
3.1 Renkaan rakenne	15
3.2 Kumin ominaisuuksia	18
3.2.1 Hystereesi	18
3.2.2 Kitkan muodostus	19
3.2.3 Viskoelastisuus	21
4 AJOVASTUKSET	24
4.1 Vierintävastus	26
4.1.1 Kuorma	29
4.1.2 Rengaspaine	29
4.1.3 Ajonopeus	30
4.1.4 Renkaan lämpötila	32
4.1.5 Tienkarheus	34
4.1.6 Sortokulma	35
4.1.7 Renkaan koko, rakenne ja kuluminen	40
4.1.8 Renkaaseen vaikuttava vääntö	43
4.1.9 Paripyörä asennus	44
4.2 Ilmanvastus	46
4.2.1 Epäsuoran ilmanvirtauksen vaikutus ilmanvastukseen	49
4.2.2 Ajoneuvoyhdistelmän ilmanvastus	51
4.2.3 Ilmanvastuksen vähentäminen	53
4.3 Muut vastusvoimat	59
5 MITTAUSMENETELMÄT	61

5.1 Tiekokeet	61
5.1.1 Tien pituuskaltevuus	62
5.1.2 Tuulen vaikutus	63
5.2 Ilmanvastus	64
5.3 Vierintävastus	65
5.4 Ajovastusvoimien vaikutus polttoaineenkulutukseen	67
6 PERÄVAUNUJEN VERTAILU	71
6.1 Vierintävastuskertoimet ja -voimat	71
6.2 Vierintävastuksen vaikutus polttoaineenkulutukseen	74
6.3 Kuljetustehokkuuden arviointi	75
6.4 Tulokset	79
7 YHTEENVETO	81
LÄHTEET	83
LIITTEET	
Liite 1/1 Perävaunujen rengastus ja pystykuormat	
Liite 1/2 5-akselinen perävaunu	
Liite 1/3 6-akselinen perävaunu	
Liite 2 Ajoneuvoyhdistelmien vetoauto	

# 1 JOHDANTO

Tehokkaan ja vähäpäästöisen liikenteen painotteesta on Suomessa siirrytty aiempaa suurempi massaisiin ajoneuvoyhdistelmiin. Selvityksen tilaaja Konepaja Antti Ranta Oy halusi tämän tutkimuksen myötä selvitettävän yrityksen suunnittelemien perävaunujen polttoainetaloudellisuutta verrattuna yleisesti 76 t painavissa ajoneuvoyhdistelmissä käytettyyn 5-akseliseen varsinaiseen perävaunuun. Muutoksia perinteiseen perävaunuun verrattuna on varsinkin akseleiden määrässä ja renkasvalinnoissa. Lisäksi 6-akselisen perävaunun suurin sallittu yhdistelmämassa on rajoitettu syntyvän tierasituksen johdosta. Suurin sallittu yhdistelmämassa 6-akseliselle perävaunulle on täten 74 t.

Tutkimuksessa perehdytään tiekuljetuksiin ja ajoneuvosta syntyviin kustannuksiin. Renkaiden ominaisuuksien tunteminen on oleellista vierintävastuksen syntymisen tuntemiseksi, joten tutkimuksessa perehdytään myös ilmatäytteisen renkaan ominaisuuksiin. Polttoaineenkulutukseen vaikuttavia tekijöitä tarkastellaan varsinkin ajovastusten vaikutuksen kannalta. Vierintävastus erityisesti on mielenkiinnon kohteena, sillä suurimmat erot vertailtavissa yhdistelmissä liittyvät renkaisiin. Myös muiden ajovastukseen vaikuttavien tekijöiden tunteminen on tärkeää ajoneuvon polttoaineenkulutuksen kannalta, joten tutkimuksessa perehdytään myös niiden syntymiseen ja vaikutukseen.

Lisäksi tutkimuksessa selvitetään yleisimmät ajovastusten mittausmenetelmät. Menetelmien perusteiden ja ulkoisten muuttujien tunteminen on tärkeää, mikäli tutkimuksen tuloksia aiotaan vertailla käytännön kokeilla saatuihin tuloksiin. Ajovastuksen vaikutuksen arvioimiseksi polttoaineenkulutukseen tutkimuksessa käytetään yksinkertaista ja karkeaa analyysiä, joka perustuu ajovastuksiin, moottorin ja voimansiirron hyötysuhteisiin sekä ajoneuvon käyttämään polttoaineen alempaan lämpöarvoon.

Konepaja Antti Ranta Oy on yritys, joka valmistaa LIPE-merkkisiä raskaan kaluston korirakenteita ja perävaunuja erityisesti turpeen ja puuhakkeen kuljettamiseen. Yrityksen valmistamien korirakenteiden erityisominaisuuksia ovat ketjupurkuiset, sivukaatuvat sekä avautuvat kaappirakenteet.

## 2 TIEKULJETUKSET

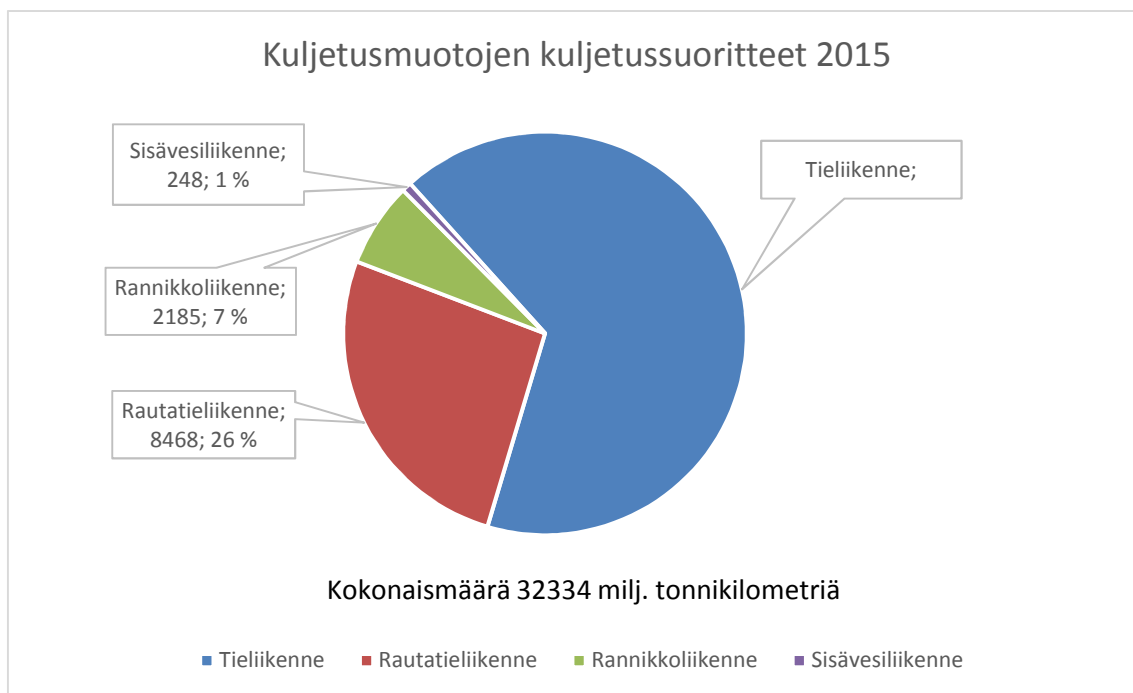
Tiekuljetuksella tarkoitetaan kumipyörillä varustetulla ajoneuvolla suoritettavaa tavarankuljetusta tiellä. Näitä kuljetuksia suoritetaan tavaraliikenteessä pääasiassa kuorma-autoilla, kuorma-autoyhdistelmillä sekä kevytkuorma-autoilla. Suomessa tiellä suoritettujen kuljetussuoritteiden osuus on suuri pitkien etäisyyksien, harvan asutuksen ja suurien ajoneuvon massojen takia. Siksi myös kuljetussuoritteiden suuruus asukasta kohden on verrattain korkea. Kuvassa 1 on esitetty koko Suomen kaikkien kuljetusmuotojen kuljetussuorite asukasta kohden. Kuljetussuoritteita mitataan tonnikilometreillä, joilla ilmoitetaan kuljetetun tavarankuljetuksen tonni määrä ajettujen kilometrien tulona. (1, s. 13, 31.)

Valtio	Kuljetussuorite tonnikilometriä/ asukas	Väestötiheys asukasta/neliökm	Kaupunkien väestö %:ja koko väestöstä
Suomi	4 700	15	62
USA	4 300	28	76
Espanja	3 200	78	79
Ruotsi	3 000	19	84
Islanti	2 800		
Italia	2 800	189	70
Länsi-Saksa	2 500	228	86
Ranska	2 400	106	73
Iso-Britania	2 050	238	89
Tanska	1 950	120	85
Norja	1 950	13	76
Belgia	1 950	329	97
Hollanti	1 300	365	89
Unkari	1 100		
Itävalta	1 100	95	59
Luxemburg	600	154	85

*KUVA 1. Suomen kuljetussuoritteiden määrä verrattuna eräisiin valtioihin (1, s. 13)*

Vuonna 2015 kotimaisista kuljetussuoritteista tonnikilometreinä mitattuna noin 66 % suoritettiin tieliikenteenä (kuva 2). Tiekuljetuksia suorittavat enimmäkseen kuljetusyritykset. Vuonna 2015 ammattimaisen kuorma-autoliikenteen osuus tieliikenteen kuljetussuoritteista oli 92,9 %. (2, linkit Tuotteet ja palvelut – > Suomi lukuina – > Liikenne ja matkailu.)

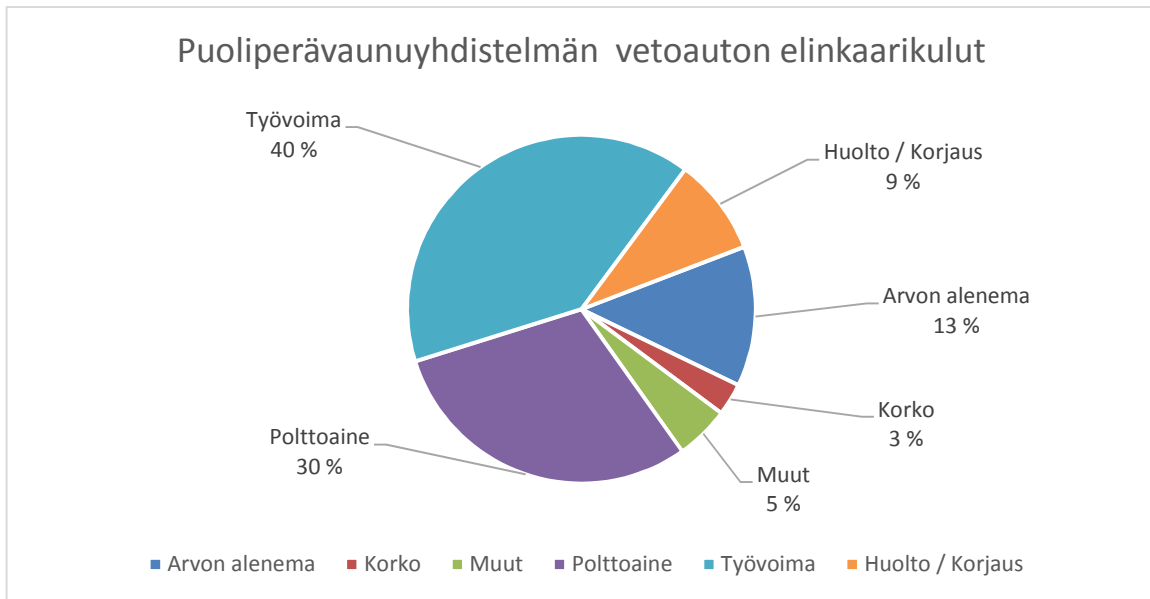




*KUVA 2. Eri kuljetusmuotojen kuljetussuoritteet vuonna 2015 (2, linkit Tuotteet ja palvelut – > Suomi lukuina – > Liikenne ja matkailu)*

## 2.1 Ajoneuvon käyttökustannukset

Kuljetusyritysten tavoitteena ja edellytyksenä on tuottaa taloudellista voittoa. Kilpailu kuljetusalalla on varsin tiukkaa, joten kustannusten tarkkailu ja minimointi on tärkeää kuljetusyrityksille. Merkittävä tekijä kuljetusyrityksen taloudessa on, kuinka tehokkaasti ja taloudellisesti yksittäiset ajoneuvot toimivat. Ajoneuvokohtainen tehokkuus korostuu varsinkin pienissä yrityksissä. Ajoneuvon elinkaaren aikana suurimmat kustannukset ovat työvoima- ja polttoainekustannukset (kuva 3). Polttoainekustannukset ovat noin 30 % ajoneuvon elinkaaren kustannuksista ja noin 20 % koko yrityksen toiminnankustannuksista. Ajoneuvokohtaiset kustannukset voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri ryhmään: kiinteät, muuttuvat ja työvoimakustannukset. (1, s. 90–94; 3, s. 711–712.)



*KUVA 3. Puoliperävaunun yhdistelmän vetoauton elinkaarikulut (3, s. 712)*

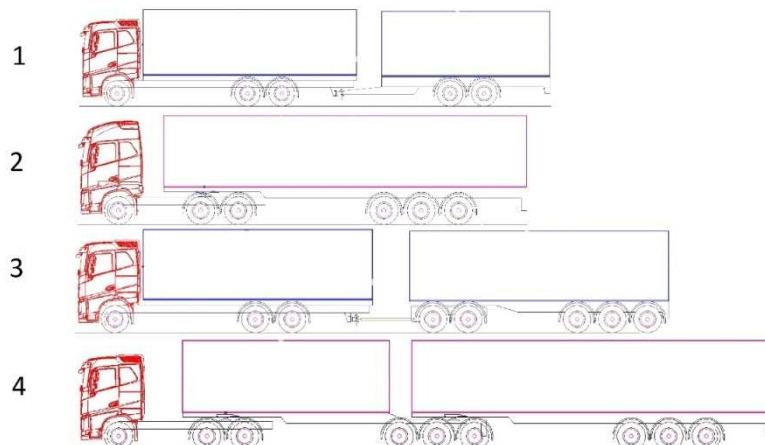
Työvoimakustannuksiin kuuluvat kuljettajien palkat, päivärahat sekä välilliset kulut. Näihin kuluihin voidaan vaikuttaa suunnittelemalla työajat ja -vuorot mahdollisimman tehokkaiksi. Kiinteitä kuluja ovat ne kustannukset, joita ajoneuvolla liikennöinnistä koituu sen käytöstä riippumatta. Näitä kuluja ovat esimerkiksi korot, ylläpito-kustannukset, vakuutukset ja liikennöimismaksut. Kiinteisiin kuluihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi kilpailuttamalla vakuutuksia ja lainoja. Muuttuvia kuluja ovat ne, joita syntyy pääasiallisesti ajoneuvon käytöstä. Näitä kuluja ovat etenkin polttoaine-, korjaus-, huolto- sekä rengaskustannukset. Muuttuviin kustannuksiin voidaan vaikuttaa pitämällä kuljetuskalusto hyvässä toimintakunnossa ja pyrkimällä valitsemaan mahdollisimman sopiva ajoneuvo kuljetustehtävään. (1, s. 90–93.)

Kuljettajan ajotavalla on paljon merkitystä ajoneuvon polttoainekulutukseen. Taloudellisen ajotavan omaksuminen on edellytys polttoainekustannusten alentamiseksi. Polttoainekulutuksen, muiden kustannusten ja kuljettajan ajotavan tarkkailu ja analysointi on tärkeää ajoneuvojen tehokkuutta arvioitaessa ja parannettaessa. (1, s. 90–93.)

## 2.2 Ajoneuvoyhdistelmät

Yleisimmät raskaan kaluston ajoneuvot ja yhdistelmätyypit ovat kuorma-auto ilman perävaunua, varsinainen perävaunuyhdistelmä, moduuli-, keskiakseli- sekä puoliperävaunuyhdistelmä (1, s. 42–45). Varsinaisella perävaunulla tarkoitetaan vähintään kaksiakselista perävaunua, jonka etuakselistoa ohjaava vetolaite on nivelletty siten, että se sallii pystysuuntaisen liikkeen perävaunuun nähden eikä välitä merkittäviä pystysuuntaisia voimia vetolaitteeseen. Puoliperävaunulla tarkoitetaan perävaunua, jossa ei ole etuakselistoa ja joka aiheuttaa huomattavan pystysuuntaisen kuormituksen vetolaitteeseen. Keskiakseliperävaunulla tarkoitetaan perävaunua, jonka akselisto on sijoitettu perävaunun painopisteeseen tai sen läheisyyteen eikä vetoaisaa ole nivelletty, jolloin vain vähäinen osa perävaunun kokonaispainosta välittyy vetolaitteeseen. Myös puoliperävaunujen vetämiseen tarkoitettut apuvaunut eli dollyt ovat keskiakseliperävaunuja. (4, 1.luku § 11.)

Varsinaisella ajoneuvoyhdistelmällä tarkoitetaan varsinaisen perävaunun ja kuormatilalla varustetun vetoauton yhdistelmää. Puoliperävaunuyhdistelmällä tarkoitetaan puoliperävaunun ja sen vetämiseen tarkoitettun vetoauton yhdistelmää. Keskiakseliperävaunuyhdistelmä on kuormatilalla varustetun vetoauton ja keskiakseliperävaunun yhdistelmä. Moduuliyhdistelmiä ovat ajoneuvoyhdistelmät, jotka koostuvat vetoautosta ja kahdesta perävaunusta. Tällaisia ovat esimerkiksi puoliperävaunuyhdistelmät, joiden perään on lisätty keskiakseliperävaunu tai kuormatilallinen vetoauto, joka on kytketty dollyyn ja puoliperävaunuun. Lisäksi on olemassa niin kutsuttu B-linkki yhdistelmä, joka koostuu puoliperävaunun vetoautosta sekä kahdesta toisiinsa kytketyistä puoliperävaunuista (kuva 4). (1, s. 37–45.)



*KUVA 4. Erilaisia ajoneuvoyhdistelmiä: keskiakseliperävaunuyhdistelmä (1), puoliperävaunuyhdistelmä (2), varsinainen perävaunuyhdistelmä (3), moduuliyhdistelmä, kuvassa niin kutsuttu B-linkki (4)*

Ajoneuvoissa käytetään yleensä kahta erilaista renkaiden asennustapaa akselille (kuva 5). Renkaat voidaan asentaa paripyöräasennuksena, jolloin samalle akselille on asennettu yhteensä neljä rengasta. Tämän tyyppinen asennus tapahtuu asentamalla kaksi rengasta vierekkäin akselin navalle. Paripyöräasennusta käytetään varsinkin vetävillä akseleilla sekä vapaasti pyörivillä teliakseleilla. Toinen yleisesti käytetty renkaiden asennustapa on asentaa akselin navalle ainoastaan yksi rengas, joka on leveämpi kuin yksittäinen paripyöräasennuksessa käytetty rengas. Yksikköpyöriä käytetään yleisesti vapaasti pyörivillä ja ohjaavilla akseleilla.



*KUVA 5. Yleisesti käytetyt renkaiden asennustavat raskaiden ajoneuvojen akselille, kuvassa vasemmalla ovat paripyörät ja oikealla Super single -yksikköpyörä (5, s. 112)*

Yksikkörenkaiden käyttö on yleistynyt raskaissa ajoneuvoissa. Paripyöriin verrattuna yksikköpyörällä voidaan vähentää ajovastuksia ja siten vähentää polttoaineenkulutusta ja päästöjä. Yksikköpyörä on myös kevyempi, jolloin hyötykuormaa voidaan lisätä. Myös rengaskulut pienenevät renkaiden määrän vähentyessä. Säiliöperävaunuissa yksikkörengas mahdollistaa leveämmän runkorakenteen, jolloin säiliö voidaan asentaa alemmaksi täten madaltaen ajoneuvon painopistettä. Paripyöräasennukseen verrattuna yksikköpyörä on kuitenkin herkempi ohjautumaan tienpinnan epätasaisuuksien mukaan. (6, s. 3–4.)

## 2.3 Kehityssuunta

Valtioneuvoston asetus asetuksen 4.12.1992/1257 muuttamisesta on pyrkinyt parantamaan tiekuljetusten tehokkuutta. Muutos sallii suuremmat ajoneuvojen ja ajoneuvoyhdistelmien massat sekä suuremman ajoneuvon korkeuden. Massojen korottamisen ehtoja ovat olleet esimerkiksi tarpeellinen määrä akseleita, massan kohdistuminen vetäville ja paripyörillä varustetuille akseleille sekä painon jakautuminen telin akseleille. (6, s. 1–2; 6, s. 12–19.)

Suomessa kaupallisista kuljetuksista suurin osa suoritetaan tiekuljetuksina. Suomen kuljetussuoritteet ovatkin muita EU-maita suuremmat (kuva 1). Tästä johtuen myös kuljetuskustannukset ovat keskimääräisesti suuremmat kuin muissa EU-maissa. Suuret kuljetuskustannukset vaikuttavat yritysten lopputuotteiden hintoihin ja kilpailukykyyn. Harvan asutuksen takia Suomessa on hankala parantaa kuljetustehokkuutta esimerkiksi raideliikennettä ja -verkkoa parantamalla. Tieliikenteen kuljetustehokkuuden parantaminen on täten toteuttamiskelpoisiin tapa pienentää kuljetuskustannuksia. (6, s. 1–2.)

Kuljetuskustannukset ovat käytännössä verrannollisia kuljetusten ympäristövaikutuksiin. Siksi kuljetusten tehostamisella voidaan vaikuttaa tieliikenteestä syntyviin päästöihin. Tieliikenteen kuljetustehokkuutta voidaan parantaa korottamalla ajoneuvojen ja ajoneuvoyhdistelmien tilavuutta ja massoja. Mikäli lisääntynyt kuljetuskapasiteetti voidaan hyödyntää, niin muutos vähentää tiellä suoritettavaa liikennöintiä. Tällä on alentava vaikutus tieliikenteen kustannuksiin ja päästöihin. (5, s. 1–2.)

Massojen korottamiseen on käytännössä kolme vaihtoehtoa. Voidaan joko korottaa sallittua akseleista tiehen kohdistuvaa massaa, lisätä ajoneuvon akselien määrää tai lisätä ajoneuvoyhdistelmässä olevien ajoneuvojen lukumäärää. Akseleista tiehen kohdistuvan massan lisääminen ja ajoneuvojen lisääminen ajoneuvoyhdistelmään kuitenkin aiheuttavat enemmän haittaa ja kuluja liikenneympäristölle, kuin akselien määrän lisääminen. (6, s. 2.)

Kuljetustilavuuden lisääminen on käytännössä mahdollista vain ajoneuvon päämittoja suurentamalla. Ajoneuvon leveyden kasvattamisella on todennäköisesti liikenneturvallisuutta huonontava vaikutus, joten leveyden kasvattamista ei suositella.

Liikenneympäristö asettaa puolestaan rajoituksia ajoneuvoyhdistelmien pituuden lisäämiselle. Täten ajoneuvon lisääminen ajoneuvoyhdistelmään tai ajoneuvon pituuden kasvattaminen voi vaikeuttaa ajoneuvolla liikkumista. (6, s. 3.)

Ajoneuvon korkeus on koettu ainoaksi päämitaksi, jonka kasvattamiselle ei ole koettu olevan merkittäviä haittatekijöitä. Korkeuden lisäämisellä pyritään parantamaan erityisesti kevyen tavarankuljetuksen tehokkuutta. Erityisesti tästä hyötyvät kuljetukset, joissa kuljetettava materiaali mukautuu korirakenteen muotoihin. Lisäksi muutoksesta hyötyvät kuljetukset, joissa korkeuden kasvu mahdollistaa useaan kerrokseen lastaamisen. Korkeuden kasvattaminen kuitenkin lisää yläpuoleisiin esteisiin osumisen vaaraa sekä saattaa nostaa ajoneuvon painopistettä. (6, s. 3.)

Raskaiden ajoneuvojen rengastuksella voidaan merkittävästi vaikuttaa tierakenteen rasitukseen. Teiden kunnossapitokustannusten kannalta yksikköpyörä on haitallisempi kuin paripyörä. Pahimmillaan yksikköpyörä voi aiheuttaa 2,5-kertaisen kuormituksen tierakenteeseen paripyöriin verrattuna. Teiden kunnan ylläpitämiseksi ja ylläpidon kustannusten kasvun kohtuullistamiseksi on raskaimpien yhdistelmien käytettävä tarpeellista määrää paripyörillä varustettuja akseleita. (6, s. 3–4.)

### 3 ILMATÄYTTEINEN RENGAS

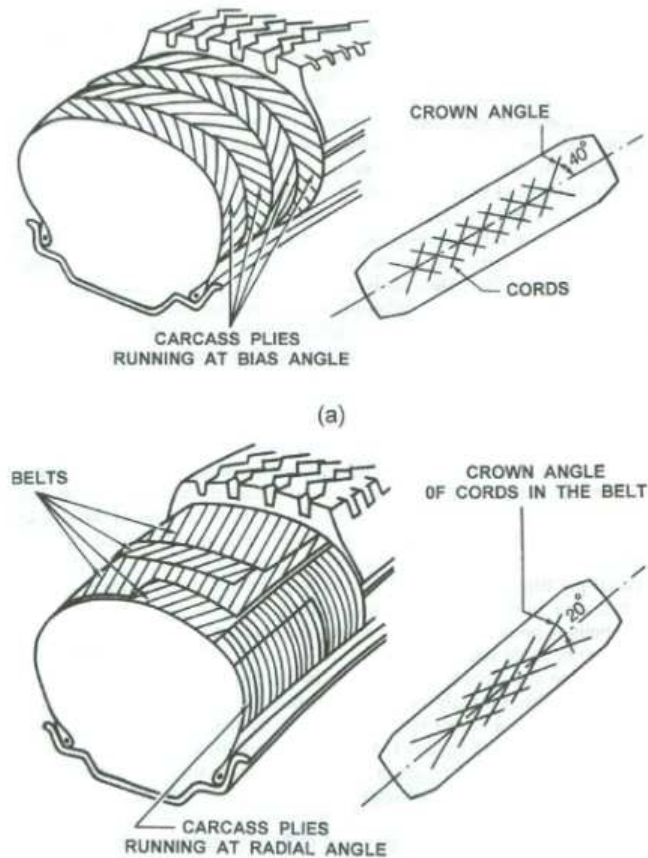
Tässä luvussa selvitetään ilmatäytteisen kumirenkaan ominaisuuksia ja toimintatapaa. Rengas on ainoa ajoneuvonosa, joka on kosketuksessa tiehen. Painovoimasta ja aerodynamiikasta aiheutuvat voimat ja momentit poislueutuna rengas välittää kaikki merkittävät ajoneuvon voimat ja momentit tiehen. Renkaan tärkeimpinä tehtävinä on

- kantaa ajoneuvon massa
- tasoittaa ja vaimentaa tien epätasaisuuksia ja niiden johtumista ajoneuvon
- tuottaa tarvittava pito ajo- ja jarrutustilanteisiin
- tuottaa riittävä ohjaus- ja suuntavakaus.

Ilmatäytteiset renkaat täyttävät nämä vaatimukset ja ovat laajasti käytössä tiellä kulkevilla ajoneuvoissa. (7, s. 3.)

#### 3.1 Renkaan rakenne

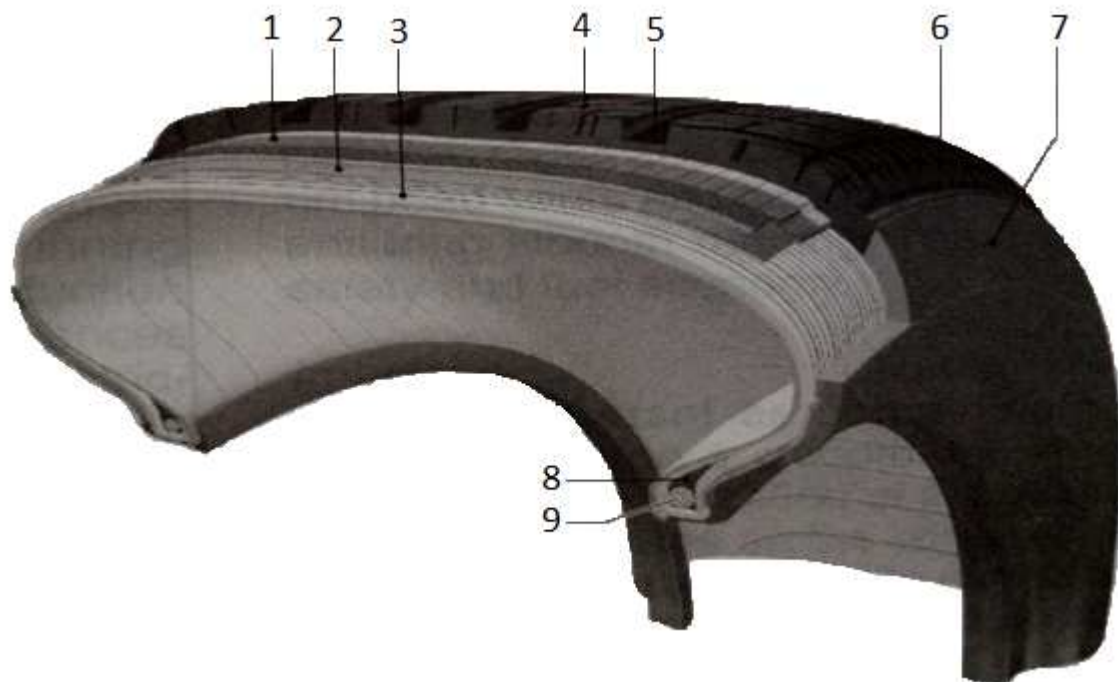
Ilmatäytteiset renkaat voidaan jakaa pääasiallisesti kahteen eri perusrakenteeseen, ristikudos- ja vyörenkaisiin (kuva 6). Näistä kahdesta rakenteesta vyörenkaat ovat huomattavasti yleisempiä ja ovat lähes täysin syrjäyttäneet ristikudosrenkaat. Suurin syy tähän on ero renkaiden kudoserakenteessa ja sen vaikutuksessa renkaan ominaisuuksiin. (7, s. 3–6.)



KUVA 6. Perinteinen ristikudosrenkaan rakenne (a) ja nykyään yleisen vyörenkaan rakenne (b) (7, s. 5)

Ristikudosrakenteessa renkaan kudokset kulkevat yleensä noin 40°:n kulmassa renkaan keskilinjaan nähden. Tämä aiheuttaa pyyhkäisyliikkeen renkaan ja tien välille pyörivän renkaan jostaessa. Ilmiöllä on suuri vaikutus renkaan kulumiseen ja vierintävastukseen. Vyörakenteessa kudokset on asetettu 90°:n kulmaan eli ne ovat poikkisuunnassa renkaan keskilinjaan nähden. Kudoksien päälle tulee teräsvyö, joka kulkee noin 20°:n kulmassa keskilinjaan nähden. Lisäksi vyörakenteissa renkaissa voidaan kulutuspinnan ja teräsvyö välissä käyttää nylon- tai aramidikerrosta, jolla pyritään parantamaan renkaan nopeudenkestoa vähentämällä keskeisvoiman aiheuttamaa muodonmuutosta. Tarkempi kuvaus henkilöauton vyörenkaan rakenteesta on esitetty kuvassa 7. (7, s. 3–6.)





*KUVA 7. Henkilöauton vyörenkaan rakenne: (1) nylon- tai aramidikerros, (2) teräs-  
vyöt, (3) vyökudos, (4) kulutuspinna, (5) vesiura, (6) olka-alue, (7) kylki, (8) kolmio-  
liuska, (9) kaapeli (8, s. 880)*

Vyörakenteessa ei tapahdu samanlaista pyyhkäisyilmiötä kuin ristikudosraken-  
teessa ja siksi vyörenkaan energiahäviö voi olla 40 % pienempi ja elinikä jopa kak-  
sinkertainen. Ristikudosrenkaita kuitenkin käytetään esimerkiksi moottoripyörissä,  
työ- ja maatalouskoneissa sekä sotilaskäytössä. (7, s. 4–6.)

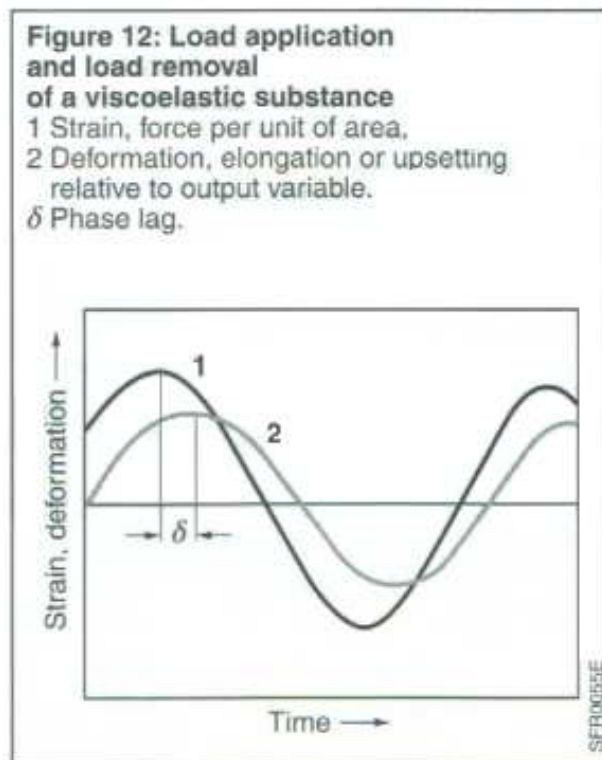
Henkilöauton vyörenkaissa on yleensä kaksi kudoksetta, jotka ovat raionia tai  
polyesteriä. Näiden päällä on kaksi kerrosta teräsvöitä ja kaksi tukikerrosta syn-  
teettistä materiaalia, kuten nylonia tai aramidia. Kuorma-auton renkaissa yleensä  
käytetään yhtä teräksestä tehtyä kudoksetta ja neljää teräsvökerrosta (7, s.  
6). Kuorma-auton vyörenkaat ovat henkilöautorenkaisiin verrattuna suurempia ja  
painavampia sekä renkaan käyttöpaineet ovat korkeammat. Kuorma-auton ren-  
kaan ominaisuuksissa on pyritty enemmän kohti taloudellisia ominaisuuksia esi-  
merkiksi kulumisenkeston ja hystereesin osalta. Rengas tulisi myös olla mahdol-  
lista pinnoittaa uudelleen. (8, s. 883.)

### 3.2 Kumin ominaisuuksia

Suurin osa renkaan ominaisuuksista on riippuvainen käytetyn kumin ominaisuuksista. Varsinkin renkaan pidon ja vierintävastuksen ominaisuudet ovat riippuvaisia materiaalin viskoelastisista ominaisuuksista. Kumin viskoelastisuus on puolestaan riippuvainen käytetystä kumiseoksesta sekä ulkoisista tekijöistä, kuten lämpötilasta, kuormitustaajuudesta ja venymästä. (9, s. 11.)

#### 3.2.1 Hystereesi

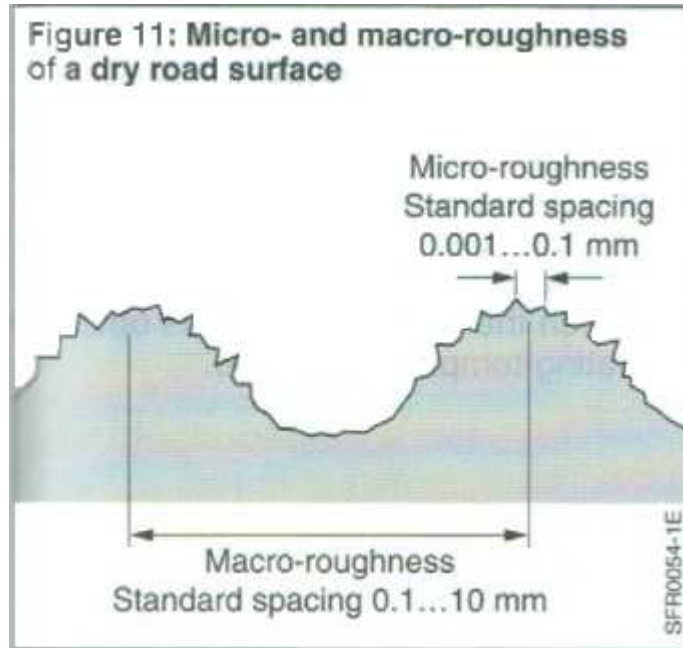
Kumin hystereesi kuvaa, miten kumin muodonmuutokseen käytettyä energiaa ei saada takaisin kumin palaututtua takaisin muotoonsa. Kumiin ei palaudu kimmoisesti kuormituksesta vaan osa muodonmuutokseen käytetystä energiasta muuttuu lämmöksi materiaalin sisäisen vaimennuksen takia. Häviötä kuvaa häviökerroin  $\tan\delta = G''/G'$ .  $G''$  on kumin häviömoduuli ja  $G'$  on kumin varastomoduli, joka kuvaa kumin elastisuutta eli kykyä palauttaa kumiin varastoitu energia. Kumiin syötetyn voiman ja siirtymän välistä eroa kuvataan vaihesiirtymällä  $\delta$ :lla (kuva 8). (9, s. 11–12.)



KUVA 8. Kumin hystereesin aiheuttama vaihesiirtymä  $\delta$  (9, s. 887)

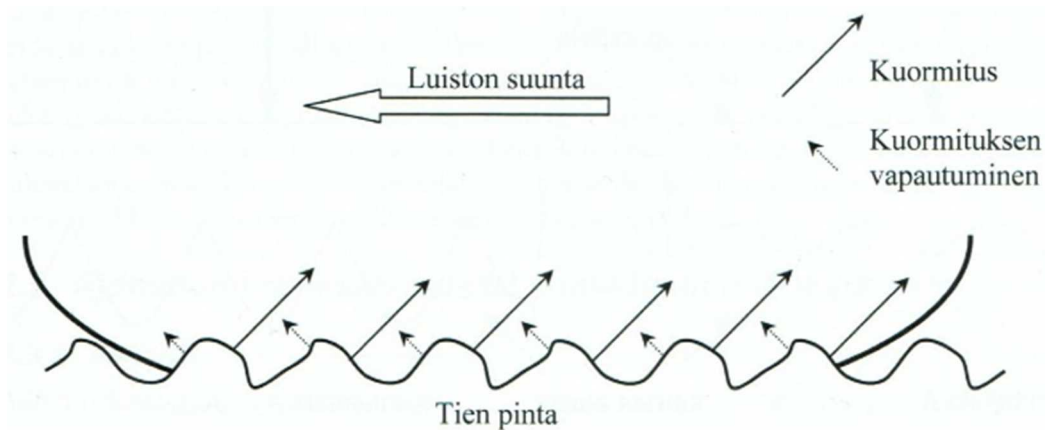
### 3.2.2 Kitkan muodostus

Renkaan ja tien välinen kitka koostuu lähinnä kahdesta eri kitkamekanismista, hystereesistä ja adheesiosta, jotka vaikuttavat tien makro- ja mikrokarheuden avulla (kuva 9). Hystereesin avulla muodostettua kitkaa kutsutaan hystereesikitkaksi. Hystereesikitka vaikuttaa kumin muodonmuutoksen avulla ja täten se muodostuu enimmäkseen tienpinnan epätasaisuuksien vaikutuksesta. (9, s. 11–14.)



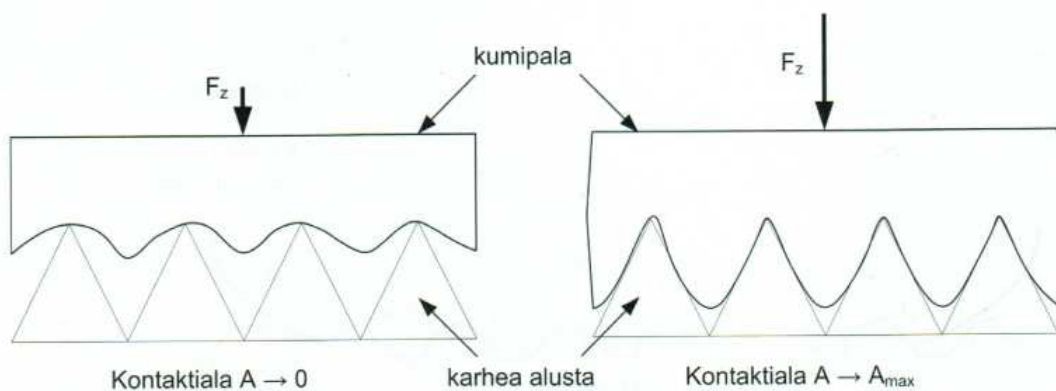
KUVA 9. Tienpinnan makro- ja mikrokarheus (8, s. 887)

Renkaan liukuessa pitkin tienpintaa on renkaan johtoreunalla eli sillä reunalla, joka ensin osuu karheuteen, suuri jännityksen arvo, koska levossa ollut kumi aletaan puristaa (kuva 10). Renkaan jatkaessa liukumista kumi jatkaa puristumista, kunnes se ohittaa karheuden huipun. Tämän jälkeen kumi alkaa palautua, mutta koska hystereesin takia kumi ei palaudu kimmoisesti, on jännitys jättöreunalla alhaisempi. Tämän seurauksena johtoreunalla oleva tukivoima on suurempi. Hystereesihäviöiden ansiosta kumi pystyy tuottamaan kitkavoiman, vaikka karheuden pinta olisi ideaalisen liukas. Tämä ilmiö ei ole mahdollinen ideaalikimmoiselle materiaalille. (9, s. 14–15.)



KUVA 10. Kumin hystereesi-ilmiön vaikutus renkaan kitkavoimiin luistotilanteessa (9, s. 15)

Toinen merkittävä kitkamekanismi on adheesio. Adheesio on kumin ja tienpinnan molekyylien välistä vuorovaikutusta, joka johtuu Van der Waalsin voimista. Adheesio on enemmän riippuvainen kosketuksissa olevista materiaaleista ja kosketuksen pinta-alasta kuin pintapaineesta. Kumin todellinen kosketusala on elastisesti kovia materiaaleja huomattavasti suurempi, jolloin adheesio vaikuttaa kitkaan merkittävästi. Kitkavoiman lisäksi adheesio lisää renkaan todellista kosketusala. Renkaan kosketusala kasvaa pystykuorman  $F_z$  funktiona siihen pisteeseen saakka, kunnes kumi on täysin pureutunut karheuden huippujen väliin. Tämän pisteen jälkeen pinta-ala ei kasva, vaikka kuormaa lisättäisiin (kuva 11). Mikäli renkaan ja tien väliin joutuu epäpuhtauksia esimerkiksi vettä, adheesionkitkan muodostuminen heikkenee tai jopa häviää. (9, s. 15–16.)

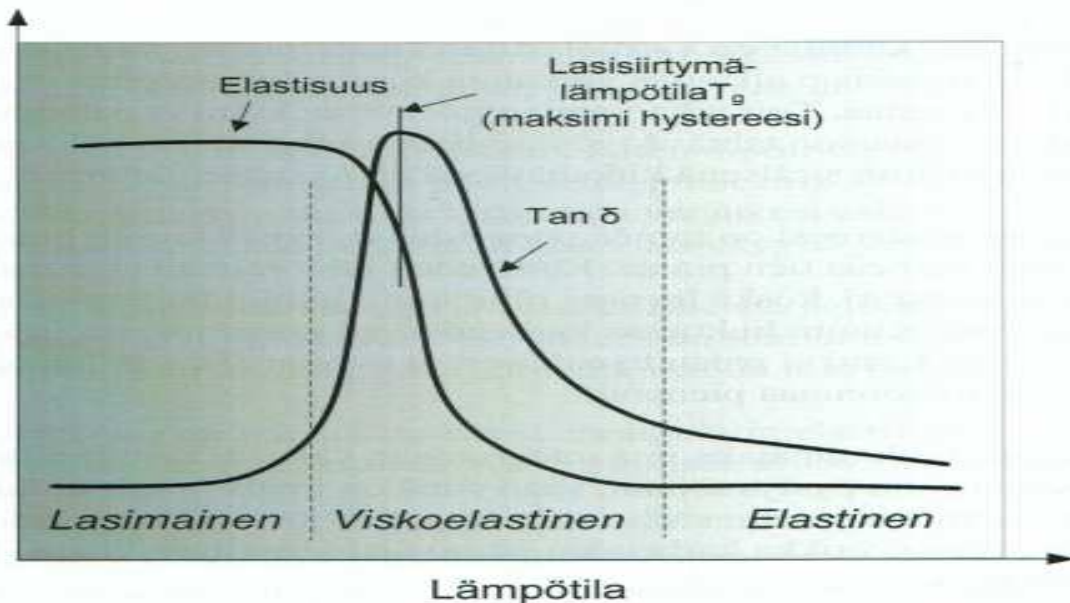


KUVA 11. Kuorman lisäämisen vaikutus renkaan kosketusalaan (9, s. 16)

Mikrotason hystereesikitkan perustana on kumimolekyylien pysyminen kontaktissa tiehen Van der Waals -sidoksilla, vaikka kumi on makrotasolla liikkeessä. Sidos ehtii kestää tarpeeksi kauan aiheuttaakseen kumimolekyylien venymisen. Kun sidos katkeaa kumin edelleen liikkeessä, pääsee kumi palautumaan lähes alkuperäiseen tilaansa. Kumimolekyylit täten irtoavat ja kiinnittyvät jatkuvasti alustaan ja ovat tällöin tihkomisvärähtelyn kaltaisessa tilassa. Van der Waals -sidokset venyvät ennen katkeamista ja täten pienellä adheesiotyöllä saadaan aikaan suuret hystereesihäviöt. Hystereesihäviö syntyy kumimolekyylien välisestä kitkasta ja aiheuttaa renkaan lämpenemistä. Kumin hystereesin ja Van der Waals -sidoksien katkeamisen aiheuttamien häviöiden suhde on suuruudeltaan 100–1 000 riippuen lämpötilasta ja liukumisnopeudesta. (9, s. 15–17.)

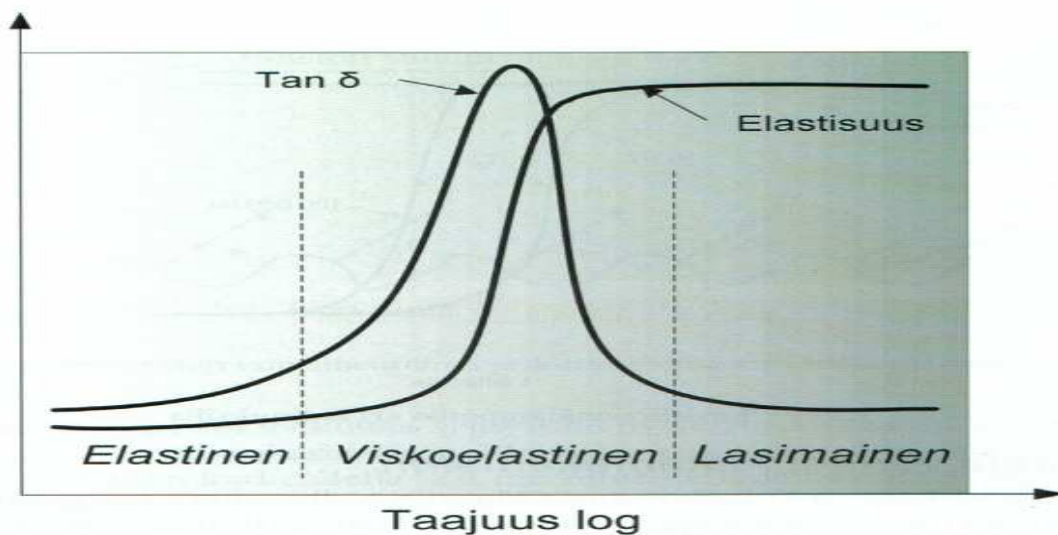
### **3.2.3 Viskoelastisuus**

Merkittävä tekijä renkaan kitka- ja vierintäominaisuuksille on kumin viskoelastisuuden muutos lämpötilan ja kuormitustaajuuden mukaan. Kumin ollessa kylmä rengas käyttäytyy lasimaisesti, jolloin kumin hystereesihäviöt ovat pienet. Renkaan ollessa kuuma kumi muuttuu elastisemmaksi, joka myös vähentää hystereesihäviöitä. Alueiden välissä kumi on viskoelastisessa tilassa, jolloin hystereesihäviöt ovat suurimmillaan (kuva 12). Lämpötilaa hystereesihäviöiden huipussa kutsutaan lasisiirtymälämpötilaksi  $T_g$ . Kumin lasisiirtymälämpötilaa on mahdollista muokata eri kumiseoksilla olemaan välillä  $-60-0$  °C kuormitustaajuudella 10 Hz. Luonnonkumille  $T_g$  on noin  $-72$  °C. (9, s. 11–12.)



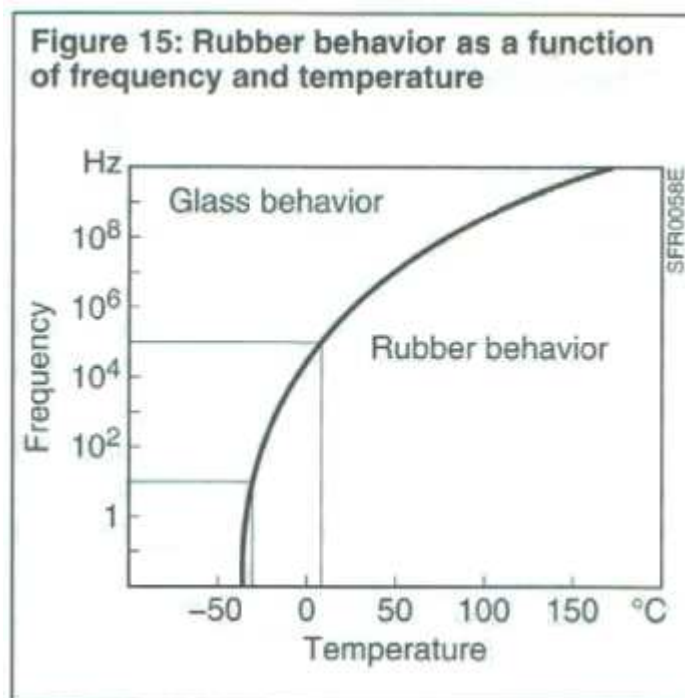
KUVA 12. Kumin hystereesihäviön sekä elastisuuden muutos lämpötilan mukaan vakio kuormitustaajuudella (9, s. 13)

Kuormitustaajuuden vaikutus kumin hystereesihäviöihin ja elastisuuteen on päinvastainen lämpötilaan verrattuna. Kumi käyttäytyy elastisesti alhaisilla taajuuksilla ja muuttuu lasimaiseksi korkeilla taajuuksilla (kuva 13). (9, s. 13.)



KUVA 13. Kumin hystereesihäviön sekä elastisuuden muutos kuormitustaajuuden suhteen vakio lämpötilassa (9, s. 13)

Renkaassa voi ilmetä useita eri kuormitustaajuuksia. Ne syntyvät tien epätasaisuuksien ja karheuden sekä renkaan pyörimisen ja tiekosketuksen aikana tapahtuvan muodonmuutoksen seurauksena. Lämpötilan ja kuormitustaajuuden yhteisvaikutusta voidaan havainnollistaa kuvalla 14. (8, s. 887–889.)



KUVA 14. Kumin ominaisuuksien muutos kuormitustaajuuden ja lämpötilan funktiona (8, s. 889)

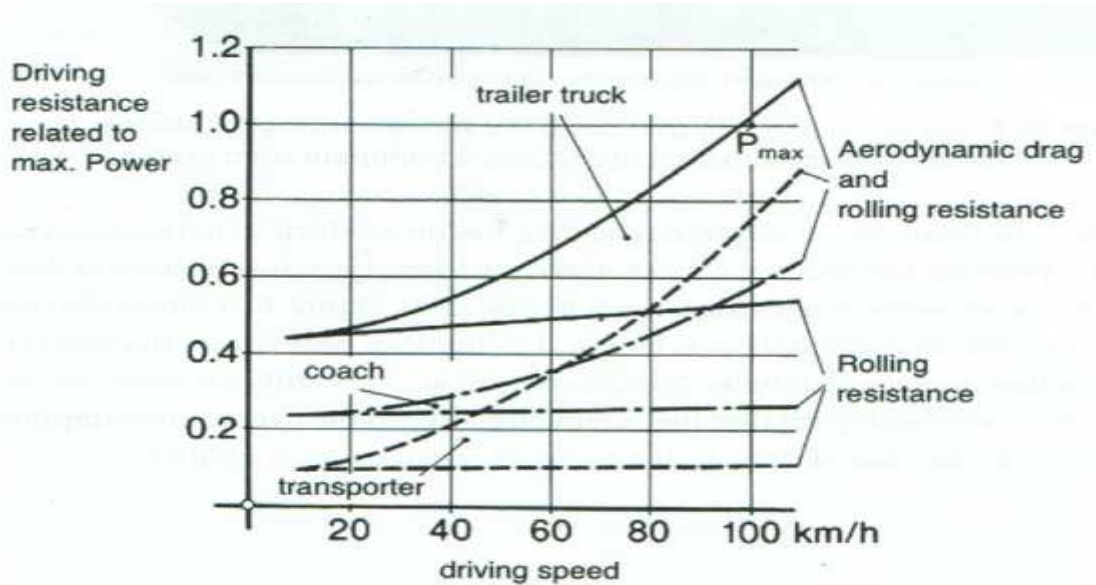
Hystereesi aiheuttaa ristiriitaa renkaan haluttujen ominaisuuksien välille. Paras mahdollinen pito saavutetaan kumin ollessa mahdollisemman viskoelastisessa tilassa, sillä silloin adheesio- ja hystereesikitka saavat huippuarvonsa. Samalla kuitenkin renkaan vierintävastus saa suurimman arvonsa, sillä noin 90 % renkaan vierintävastuksesta aiheutuu kumin hystereesin aiheuttamasta häviöstä. (8, s. 889–891.)

Kuormitustaajuudet, jotka ovat edullisimmat vierintävastukselle, ovat välillä 1–100 Hz. Makro- ja mikrokarheuden aiheuttama kuormitustaajuus on yleensä välillä 10<sup>3</sup>–10<sup>10</sup> Hz, mikä on edullinen hystereesikitkalle ja täten pidolle. Renkaiden valmistuksessa on pyritty kompromissiratkaisuun, jossa kulutuspinnalla käytetään korkea hystereesistä kumia ja renkaan sisämateriaaleissa käytetään matala hystereesistä kumia. Tällöin tienkarheuden aiheuttama korkea kuormitustaajuus voidaan hyödyntää pidolle renkaan kulutuspinnalla sekä renkaan pyörimisen aiheuttama matala kuormitustaajuus saadaan hyödynnettyä alhaisina hystereesihäviöinä renkaan sisärakenteessa. (8, s. 889–891.)



## 4 AJOVASTUKSET

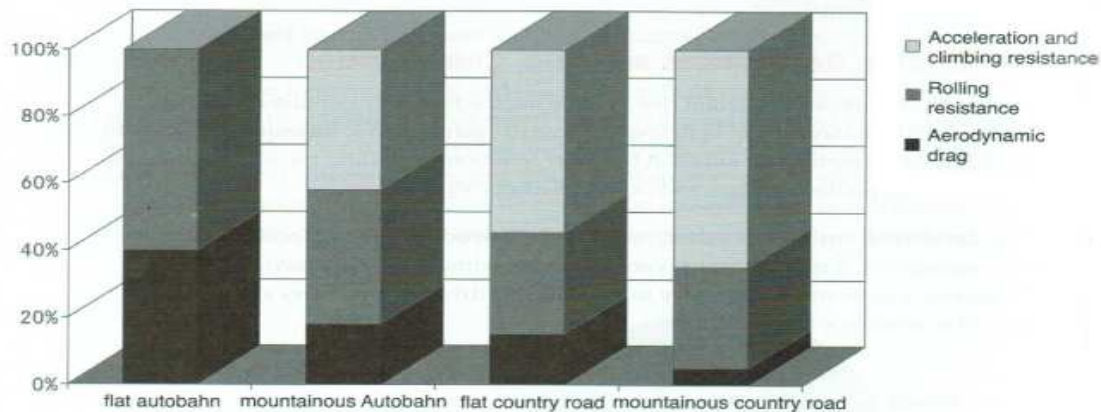
Ajovastukset ovat merkittävä osatekijä ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutuksesta. Ajovastukset koostuvat tasaisella tiellä ajettaessa pääasiallisesti vierintä- ja ilmanvastuksesta, jotka kasvavat ajonopeuden noustessa. Muita ajonopeudesta riippumattomia ajovastuksia ovat mäennousu- ja kiihdytysvastus. Mäennousuvastuksen suuruus riippuu noustavan mäen jyrkkyydestä, ajoneuvon massasta sekä maanvetovoimankiihtyvyydestä. Kiihdytysvastus syntyy ajoneuvoa kiihdytettäessä ja on riippuvainen kiihdytyksen suuruudesta, ajoneuvon massasta sekä pyörivien osien massahitausmomentista. Tasaisella tiellä ja nopeudella ajettaessa voidaan ajatella, että ainoat ajovastukset syntyvät vierintä- ja ilmanvastuksesta. Näistä kahdesta raskaille ajoneuvoille vierintävastus on hallitseva ajonopeuksille, jotka ovat alle 90 km/h (kuva 15). (3, s. 711–717.)



KUVA 15. Ajovastuksien osuus eri ajonopeuksille ja niiden vaatima teho suhteessa moottorin maksimitehoon (3, s. 713)

Ajettaessa mäkisellä tai vaikeakulkuisella tiellä myös muiden ajovastusten osuus kokonaisvastuksesta kasvaa (kuva 16). Nopeudenvaihtelut, pysähdykset ja mäet voivat aiheuttaa mäennousu- ja kiihdytysvastuksen kasvamisen suurimmaksi vastusvoimaksi. (3, s. 713–714.)





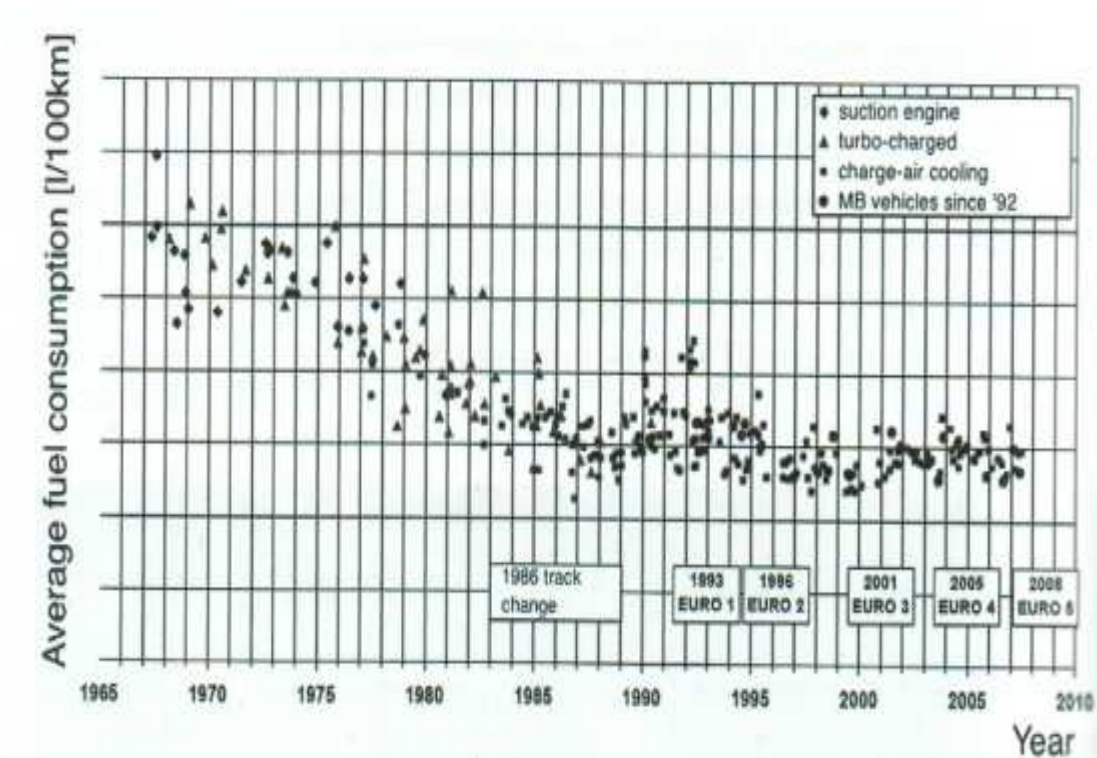
KUVA 16. Ajovastuksien osuus erilaisilla teillä ajettaessa keskieurooppalaisella 40 t puoliperävaunuyhdistelmällä; kiihdytys- ja mäennousuvastus (vaalean harmaa), vierintävastus (tumman harmaa), ilmanvastus (musta) (3, s. 714)

Kaikkea moottorin käyttämää energiaa ei saada hyödynnettyä, vaan noin 44 % polttoaineen energiasta saadaan hyödynnettyä moottorin kampiakselille. Ajoneuvoyhdistelmän, jonka vetoauto on varustettu Euro 5 -tason moottorilla, käyttämästä polttoaineen energiasta noin 29,2 % menee ajovastusten voittamiseen (kuva 17). Ilmanvastuksen osuus ajovastuksesta on noin 40 %. (3, s. 716–717.)

Total energy of Diesel 100%										
Engine loss 55.8 %					Mechanical energy drive shaft 44.2 %					
Thermodynamics and mechanical loss					Consumer 1.4%	Drive train 2.7%	Driving resistance 29.2 %		Brake energy 10.9%	
Exhaust gas energy 31.3%		Cooling energy (Coolant and charge air) 21.3%		Radiation 2.5%		Water, Oil, Injection pump 0.7%		Electric generator, power steering 0.3%		
						Fan 0.3%		Air charger 0.6 %		
						Gear box loss 1.2%		Air drag 13.6 %		
						Axle drive loss 1.5%		Rolling resistance 15.6 %		
								Driving brake 5.7 %		
								Drag moment 1.8 %		
								Engine brake 3.4 %		

KUVA 17. Euro 5 -tason moottorilla varustetun ajoneuvoyhdistelmän energiankulutuskohteet ja niiden prosentuaaliset osuudet polttoaineen energian käytöstä (3, s. 716)

1990-luvulta asti kuorma-autojen polttoaineenkeskikulutus on pysynyt melkoisen tasaisena (kuva 18). Kehitystä on tapahtunut enimmäkseen moottoreiden päästöjenkäsittelyssä ja parantunut polttoaineenkulutus on käytetty tehojen kasvattamiseen. Päästöjen vähentäminen ja polttoainetaloudellisuuden parantaminen ovatkin painottumassa ajovastusten ja voimansiirtolinjan optimointiin. (3, s. 711–718.)



KUVA 18. Erilaisten kuorma-auton moottoreiden keskikulutuksen kehitys seuraavilla moottorimalleilla: ahtamaton moottori (suction engine), turboahdettu moottori (turbo-charged), ahdettu välijäähdytteinen moottori (charge-air cooling), Mercedes-Benz-ajoneuvot vuodesta 1992 (MB vehicles since '92) (3, s. 712)

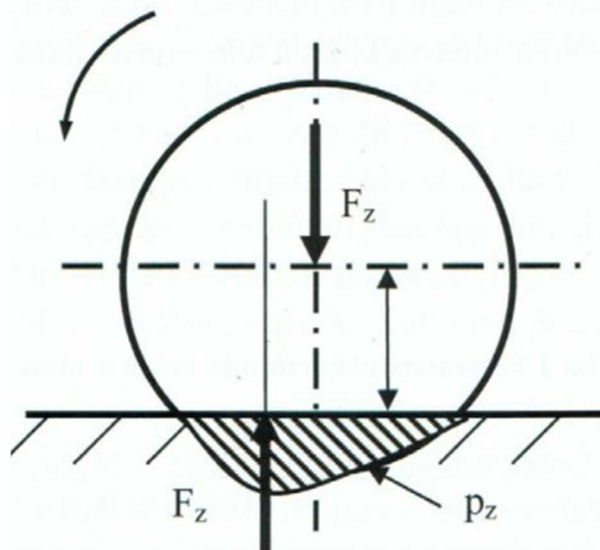
#### 4.1 Vierintävastus

Vierintävastus on merkittävä ajovastus raskaille ajoneuvoille. Kuten kuvasta 17 havaitaan, polttoaineen sisältämästä energiasta käytetään vierintävastuksen voittamiseen muita vastusvoimia suurempi osa. Taulukossa 1 on esitelty erilaisia vierintävastukseen vaikuttavia tekijöitä. Vierintävastuksen suuruuteen vaikuttaa renkaan rakenteen ja materiaalin lisäksi monia ulkoisia tekijöitä.

TAULUKKO 1. Vierintävastukseen vaikuttavia tekijöitä

Kumin Hystereesi	Jarrujen laahaus
Rengaspaine	Pyöränlaakerin vastus
Kuorma	Tien karheus
Ajonopeus	Renkaan koko
Renkaan sortokulma	Tierakenteen kovuus
Lämpötila	Renkaaseen vaikuttava vääntö
Renkaan rakenne	Paripyörä asennus

Ajettaessa kovilla tienrakenteilla, kuten betonilla, on pyörivän renkaan suurin vierintävastuksen aiheuttaja materiaalin hystereesin aiheuttama häviö. Kumin hystereesin vuoksi rengas ei palaudu kimmoisesti ja se on yksi osatekijä, joka aiheuttaa renkaan pystypainejakauman  $p_z$  siirtymän ajosuunnassa eteenpäin (kuva 19). Tästä aiheutuu momenttivarsi pystysuuntaisten voimien  $F_z$  välille. (9, s. 29–32.)



KUVA 19. Pystypainejakauma,  $p_z$  sekä pyörään vaikuttavat pystysuuntaiset voimat  $F_z$  (9, s. 29)

Syntyvää momenttia kutsutaan vierintävastusmomentiksi. Hystereesin aiheuttaman vierintävastusmomentin lisäksi muita renkaan vierintävastukseen vaikuttavia tekijöitä ovat renkaan ja tienpinnan välinen kitka sekä ilmanvastus. Ilmanvastus

syntyy renkaan sisällä kiertävän ilman kitkasta sekä renkaan pyörimisen aiheuttamasta ilmapirrasta. Näiden kolmen vastuksen osuudet vierintävastuksesta on kokeellisin menetelmin arvioitu olevan: 90–95 % materiaalin hystereesi, 2–10 % kitkahäviöt renkaan ja tienvälillä sekä 1,5–3,5 % ilmanvastus. Vyörakenteisen kuorma-auton renkaan rakenteelliset häviöt jakautuvat renkaanosien kesken seuraavasti: 73 % renkaan kulutuspinna mukaan lukien vyöt, renkaan kylki 13 %, olka-alue 12 % sekä kaapelit 2 %. (7, s. 8–9.)

Vierintävastusta kuvataan usein vierintävastusvoiman suhdelukuna renkaan pystykuormaan. Muita käytettyjä tapoja vierintävastuksen ilmoittamiseen on käyttää yksikköä kgt, joka ilmoittaa vierintävastuksen kilogrammoina yhden tonnin pystykuormaa kohden, eli vierintävastuskerroin 0,007 olisi toisella tapaa ilmoitettuna 7 kgt. Vierintävastuksen arvo henkilöauton renkaille on usein välillä 0,007–0,012 sekä kuorma-autoille välillä 0,005–0,007. Kuorma-auton renkaiden pienempi vierintävastuksen arvo selittyy suuremmilla rengaspaineilla, teräskudoksella ja eri kumiseoksien käytöllä. (10, s. 491–492.)

Vierintävastuskerroin voidaan määrittää kuorma-auton vyörenkaille kaavalla 1 (7, s. 17).

$$f_r = 0,006 + 0,23 * 10^{-6} V^2 \quad \text{KAAVA 1}$$

$f_r$  = vierintävastuskerroin [–]

$V$  = ajonopeus [km/h]

Vierintävastus kuorma-auton ristikudosrenkaille voidaan määrittää kaavalla 2 (7, s. 17).

$$f_r = 0,007 + 0,45 * 10^{-6} V^2 \quad \text{KAAVA 2}$$

Vierintävastusvoima voidaan määrittää kaavalla 3 (11, s. 774).

$$F_r = f_r F_z \cos \alpha \quad \text{KAAVA 3}$$

$F_z$  = renkaaseen kohdistuva pystysuuntainen normaalivoima [N]

$\cos \alpha$  = mäennousukulma [deg]

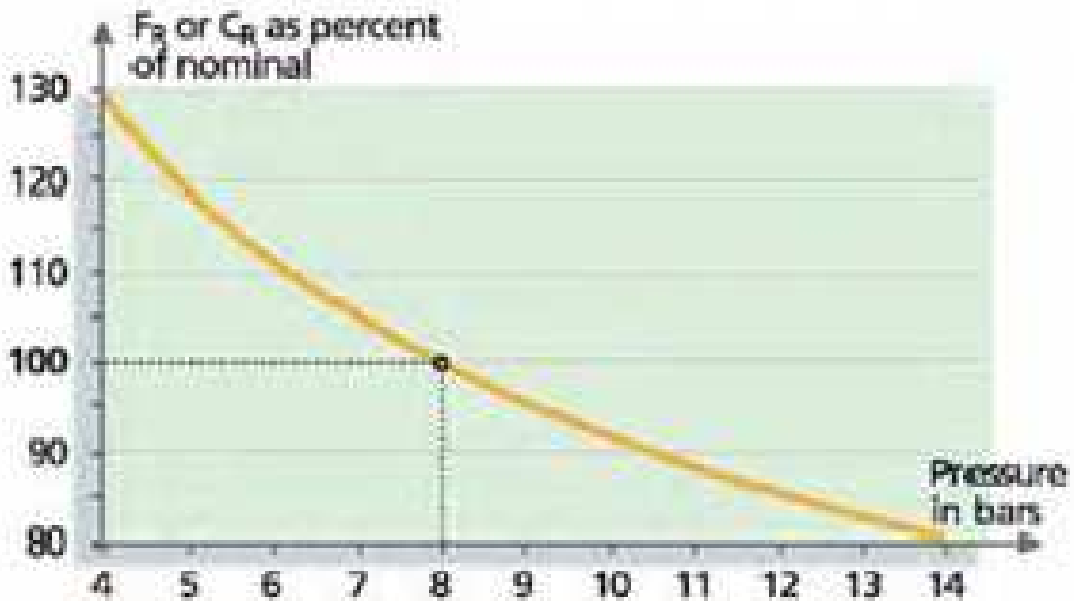
#### **4.1.1 Kuorma**

Suurimmat renkaan vierintävastukseen vaikuttavat ulkoiset tekijät ovat renkaaseen vaikuttava pystysuuntainen normaalivoima eli kuorma sekä ajonopeus. Renkaan pystykuormaa lisätessä rengas painuu tietä vasten samalla kasvattaen renkaan kosketusalaa pystyäkseen kannattamaan kasvaneen kuorman. Noin 90–95 % renkaan vierintävastuksesta aiheutuu renkaan muodonmuutoksen aiheuttamista hystereesihäviöistä. Suuri renkaan painuma joko kuorman tai alhaisen rengaspaineen seurauksena aiheuttaa lisääntyneitä muodonmuutosta. Lisääntynyt kuorma vaikuttaa lisäksi puristavana voimana renkaan kulutuspinnalla ja vyörakenteessa, jossa noin 73 % renkaan hystereesihäviöistä tapahtuu. Lisäksi renkaan olka-alueella ja renkaan kyljissä tapahtuu huomattavaa muodonmuutosta renkaan painuessa kuorman alla. (10, s. 483–492; 7, s. 9.)

#### **4.1.2 Rengaspaine**

Rengaspaineella on suuri vaikutus vierintävastukseen. Rengaspaineella voidaan vaikuttaa renkaan jäykkyyteen ja siten kuormituksen aiheuttamaan muodonmuutokseen. Painetta kasvatettaessa rengas jäykistyy ja muodonmuutos pienenee, joka johtaa varsinkin hystereesihäviöiden vähenemiseen. Kuitenkin on huomiotava, että korotettu rengaspaine lisää tiehen kohdistuvaa pintapainetta. Ajettaessa pehmeällä tierakenteella voi tiehen kohdistuva muokkaustyö kasvaa suuremmaksi vastukseksi kuin rengaspaineen kasvulla saavutettu hystereesihäviöiden lasku. Rengaspaine tulisi olla optimiratkaisu, jolloin näiden häviöiden summa olisi pienimmillään. (7, s. 11–13.)

Rengaspaineen nousun seurauksena myös renkaan painuma pienenee, jolloin renkaan tiekosketuksen pinta-ala vähenee. Tällöin renkaan ja tien väliset kitkahäviöt voivat pienentyä (12, s. 594). Kuvasta 20 nähdään, että kuorma-auton rengaspaineen kasvattaminen noin 1 baarilla vähentää vierintävastusta noin 5 % (10, s. 492).

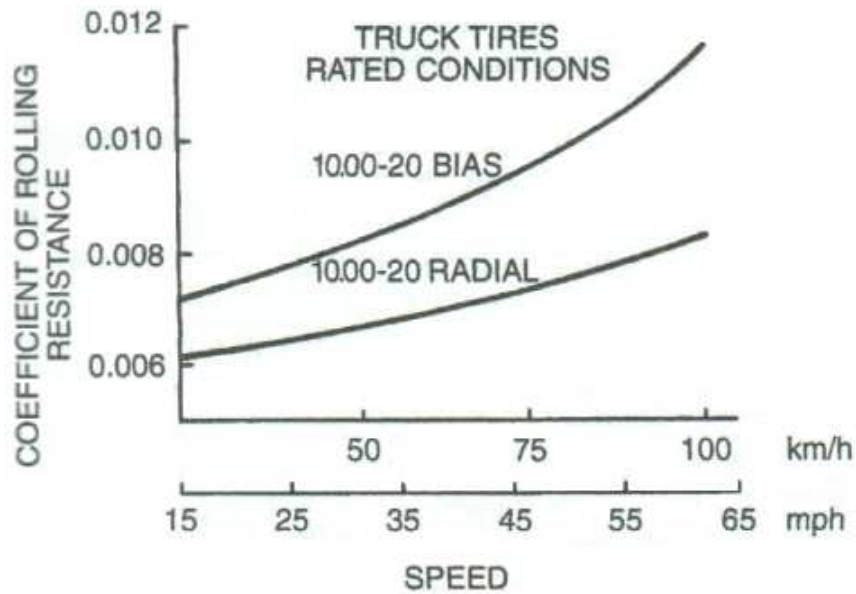


KUVA 20. Renkaan vierintävastuksen muutos rengaspaineen muuttuessa (10, s. 493)

Renkaaseen on vaarassa syntyä runkovaurioita, jos sillä ajetaan yli 20 % vajaapaineella. Eräissä tutkimuksissa havaittiin, että suhteellisesti vajaapaineisimmat renkaat ovat yleensä paripyörien sisemmät renkaat. (13, s. 111.)

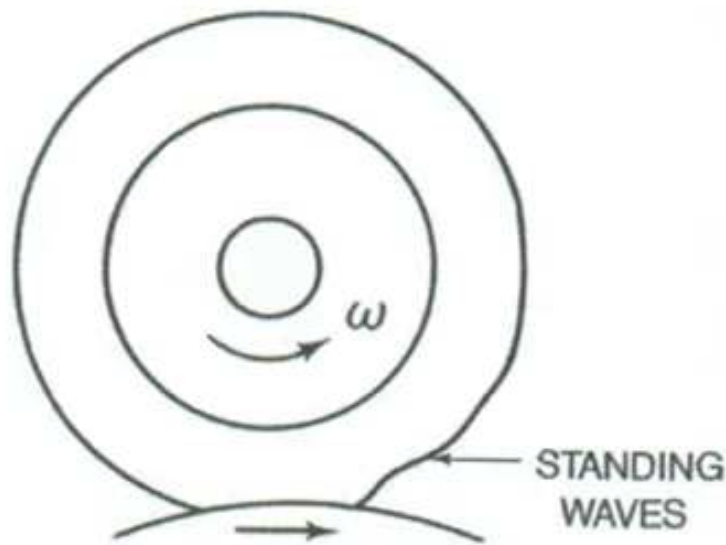
#### 4.1.3 Ajonopeus

Ajonopeus vaikuttaa renkaan kuormitustaajuuteen ja renkaan lämpötilaan. Pyörimisnopeuden kasvun seurauksena rengas joutuu tiheämmin muodonmuutokseen tietä vasten. Ilmiö kasvattaa muodonmuutoksesta johtuvaa hystereesihäviötä ja lämmittää rengasta. Lisäksi pyörimisnopeuden kasvaessa renkaaseen kohdistuva keskeiskiihtyvyyden aiheuttama voima lisää varsinkin kulutuspinnan muodonmuutosta. Toisaalta ilmiöt nostavat renkaan lämpötilaa, joka puolestaan vähentää vierintävastusta. Renkaan lämpötilan ohittaessa lasisiirtymälämpötila  $T_g$  kumi alkaa muuttua elastisemmaksi alentaen siten hystereesistä johtuvia häviötä. Näiden ilmiöiden yhteisvaikutus on kuitenkin yleensä vierintävastusta kasvattava (10, s. 491–493). Ajonopeus vaikuttaa ristikudosrenkaisiin suuremmin kuin vyörenkaisiin renkaan rakenteen takia (kuva 21). (7, s. 8–10.)



KUVA 21. Kuorma-auton renkaan vierintävastuksen muutos maksimikuormalla ja eri rengasrakenteille. Vyörengas (Radial), ristikudosrengas (Bias) (7, s. 10)

Suurilla nopeuksilla renkasiin alkaa muodostua niin kutsuttuja seisovia aaltoja (standing waves), jotka voimakkaasti kasvattavat vierintävastusta. Aallot syntyvät, kun renkaan kehänopeus on niin suuri, että kuormituksen poistuessa rengas ei ehdi heti palautua takaisin alkuperäiseen muotoonsa, vaan alkaa värähdellä. Kehänopeuden edelleen kasvaessa aaltojen muodostus kasvaa kiihtyvällä vauhdilla. Tämä värähtely vaimenee eksponentiaalisesti renkaan kehällä aiheuttaen suuria hystereesihäviöitä. Aalto on suurimmillaan renkaan takalaidalla kosketusalan reunalla, jossa kuormitus poistuu (kuva 22). (7, s. 13–14.)



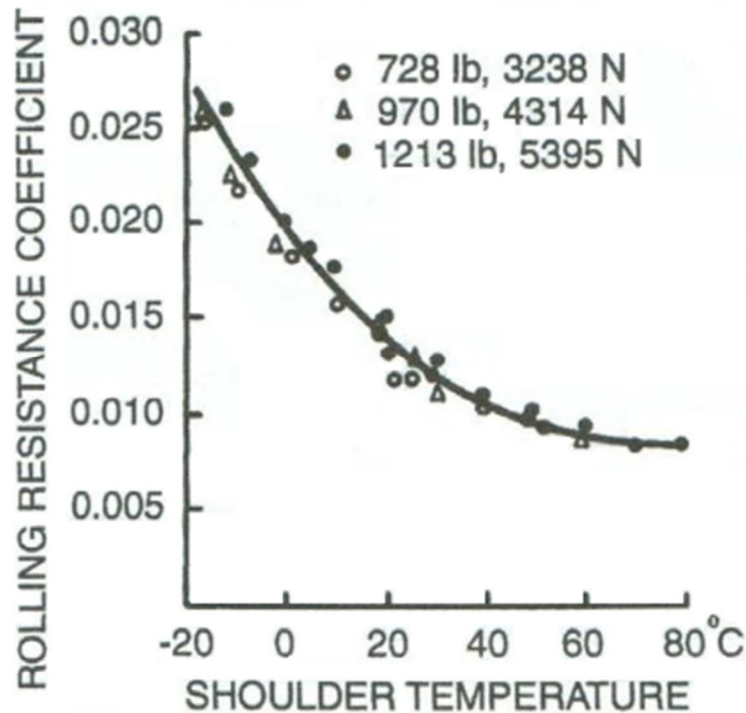
*KUVA 22. Ajonopeuden ja renkaan hystereesin aiheuttaman aallon muodostuminen (7, s. 14)*

Ilmiöstä aiheutuva energiahäviö aiheuttaa renkaassa voimakasta lämpenemistä ja asettaa rajan renkaan turvalliselle ajonopeudelle. Aaltoja ei kuitenkaan yleensä muodostu alle 120 km/h olevilla ajonopeuksilla (7, s. 13–14; 10, s. 492–493.)

#### **4.1.4 Renkaan lämpötila**

Renkaan lämpeneminen aiheutuu pääasiallisesti renkaan hystereesin aiheuttamasta häviöstä sekä pienessä määrin renkaan ja tien välisestä kitkasta. Kumin hystereesihäviöt laskevat, kun lämpötila nousee tarpeeksi, sillä kumi muuttuu elastisemmaksi. Myös renkaan sisällä oleva ilma laajenee renkaan lämmitessä ja nostaa rengaspainetta. Kuvassa 23 on esitelty henkilöauton renkaan vierintävastuskertoimen muuttumista renkaan olka-alueen lämpötilan muutoksen mukaan. Kumin hystereesihäviön pienetessä myös renkaan ja tienpinnan välinen hystereesikitka vähenee, jolloin renkaan luiston aiheuttamat häviöt pienenevät. (7, s. 14; 14, s. 598.)





KUVA 23. Vierintävastuskertoimen muutos renkaan olka-alueen lämpötilan mukaan (7, s. 15)

Renkaan vierintävastus on riippuvainen lämpötilasta, joten myös ulkolämpötilalla vaikutus renkaan vierintävastukseen. Koetulosten vertailtavuuden johdosta käytetään usein lämpötilan korjausta. Korjauksen avulla voidaan vertailla renkaiden ominaisuuksia sellaisissa tilanteissa, joissa lämpötilassa on ollut vaihteluita. Vierintävastuksen korjaus lämpötilan suhteen voidaan suorittaa yhtälöllä 4. Yhtälö perustuu tutkimustuloksiin, joissa on havaittu vierintävastuksen muuttuvan normaaleissa ajo-olosuhteissa lähes lineaarisesti lämpötilavälillä 10–40 °C. Vierintävastus alenee tällä välillä noin 0,6 % jokaista 1 °C:n nousua kohden. Yhtälön 4 lämpötilan korjauskertoimen arvona voidaan käyttää myös muita arvoja kuin 0,006, mutta se on yleensä välillä 0,005-0,008. (10, s. 490.)

Vierintävastuksen lämpötilakorjaus voidaan määrittää kaavalla 4 (10, s. 490).

$$F_{RTc} = F_r [1 + k(T_{amb} - T_{ref})]$$

KAAVA 4

$F_{RTc}$  = lämpötilakorjattu vierintävastusvoima [N]

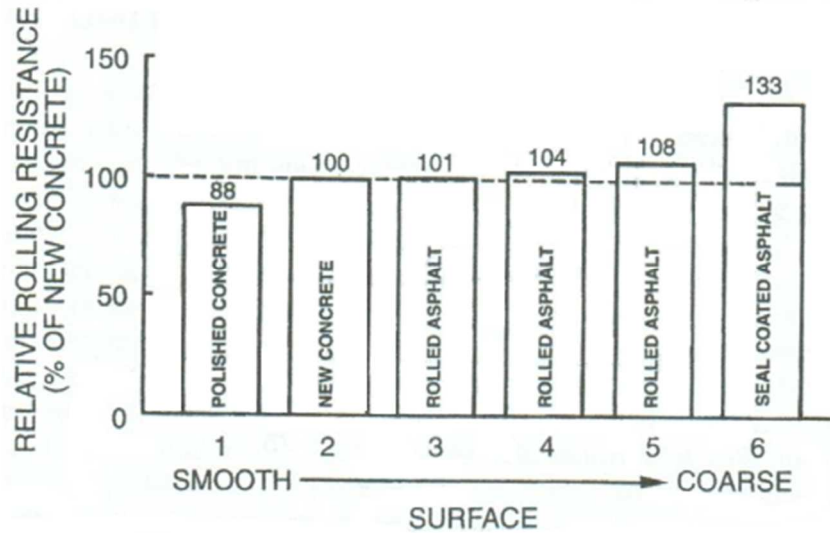
$k$  = lämpötilan korjauskerroin, 0,006 [°C<sup>-1</sup>]

$T_{amb}$  = ulkoilman lämpötila [K]

$T_{ref}$  = referenssi lämpötila [K]

#### 4.1.5 Tienkarheus

Tienkarheudella on myös vaikutus renkaan vierintävastukseen. Vierintävastus on yleensä pienin kovilla ja sileillä pinnoilla (kuva 24). Vierintävastuksen ero voi olla eri asfaltti laaduilla jopa 32 %. (7, s. 11–12.)



KUVA 24. Henkilöauton renkaan vierintävastuksen suhteelliset osuudet verrattuna uuteen betonipintaan (New Concrete) (7, s. 10)

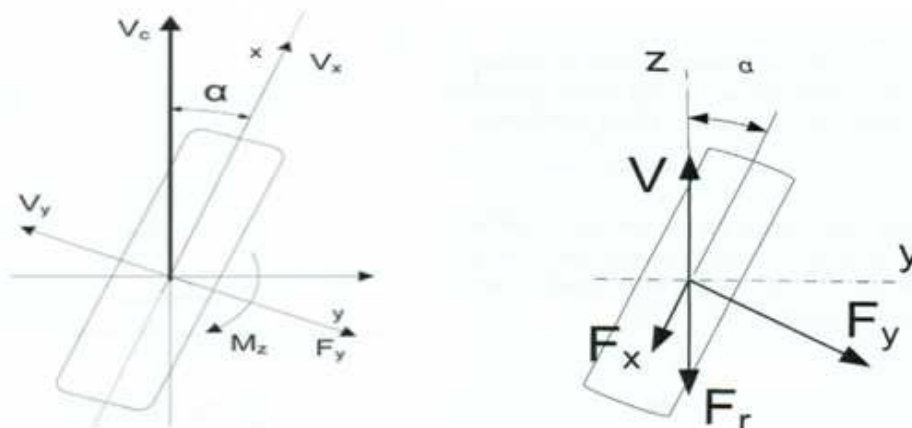
Karkeilla pinnoilla renkaan kulutuspinta joutuu suuremman muodonmuutoksen alaiseksi. Kasvanut muodonmuutos puolestaan lisää kumin hystereesistä johtuvaa häviötä. Pinnankarheudet makro- ja mikrotasolla kuvan 24 tienpinnoille on esitetty kuvassa 25. (9, s. 18.)

		TEXTURE	
		MACRO	MICRO
1.	POLISHED CONCRETE	SMOOTH	SMOOTH
2.	NEW CONCRETE	SMOOTH	HARSH
3.	ROLLED ASPHALT MIXED AGGREGATE-ROUNDED	MEDIUM	MEDIUM SMOOTH
4.	ROLLED ASPHALT MIXED AGGREGATE	MEDIUM	MEDIUM
5.	ROLLED ASPHALT MIXED AGGREGATE	MEDIUM COARSE	MEDIUM
6.	ASPHALT WITH COARSE SEAL COAT	COARSE	HARSH

KUVA 25. Eri tietyyppien mikro- ja makrokarheuksia, vertaa kuva 9 (7, s. 11)

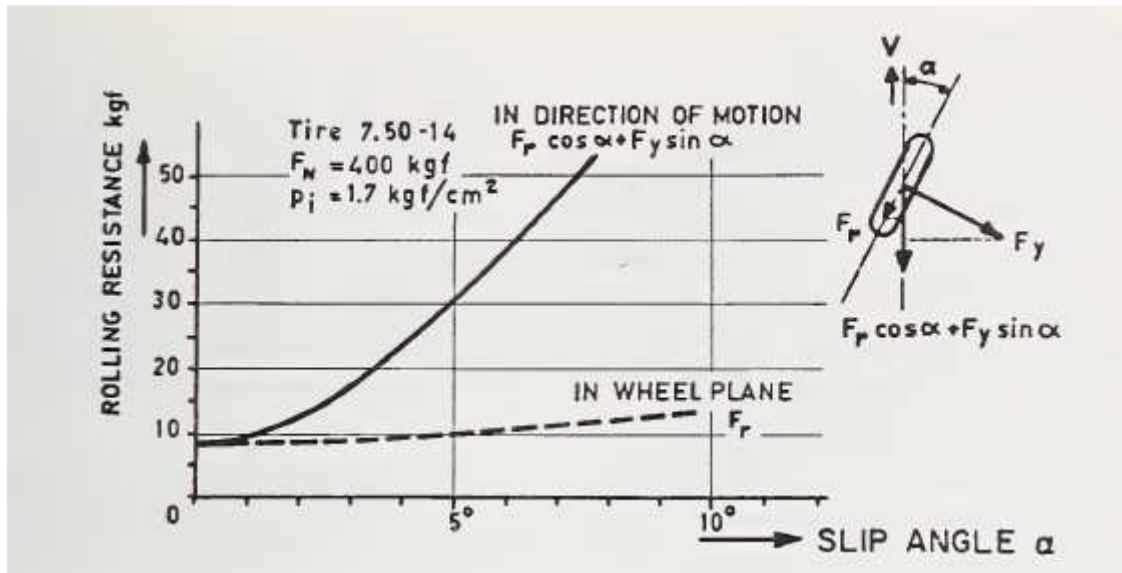
#### 4.1.6 Sortokulma

Renkaan sortokulmalla kuvataan renkaan sivuttais- ( $V_y$ ) ja pitkittäisnopeuden ( $V_x$ ) resultantin ( $V_c$ ) ja renkaan keskilinjan ( $x$ ) välistä kulmaa ( $\alpha$ ) (kuva 26) (9, s. 34).



KUVA 26. Vasemmalla on esitetty renkaaseen kohdistuvat renkaan pitkittäis- ja sivusuuntaiset nopeudet sekä renkaan nopeus ajosuuntaan ja oikealla on esitetty nopeuksille vastasuuntaiset voimat (9, s. 32–35)

Nopeudet aiheuttavat niille vastasuuntaiset voimat, kuten kuvasta 25 havaitaan. Sortokulman lisääminen kasvattaa myös voimaa  $F_x$ , mutta voiman kasvaminen on vähäistä verrattuna voiman  $F_r$  kasvuun (kuva 27). (9, s. 31.)



KUVA 27. Henkilöauton renkaan vierintävastusvoiman kasvu sortokulman suhteen sekä renkaan keskilinjan suuntaisen voiman vähäinen kasvu, kuvassa voima  $F_x$  on esitetty voimana  $F_r$  (14, s. 601)

Mikäli sortokulmaa ei ole saa vierintävastus arvon  $F_x$ . Sortokulman vaikutus vierintävastukseen tasaisella tiellä voidaan määrittää yhtälöllä 5, mikäli ei oteta huomioon renkaan sivukallistumaa. (9, s. 31–34.)

Sortokulman vaikutus vierintävastukseen tasaisella tiellä voidaan määrittää kaavalla 5 (9, s. 31).

$$F_r = F_x \cos \alpha + F_y \sin \alpha$$

KAAVA 5

$F_r$  = vierintävastus renkaan etenemissuuntaan [N]

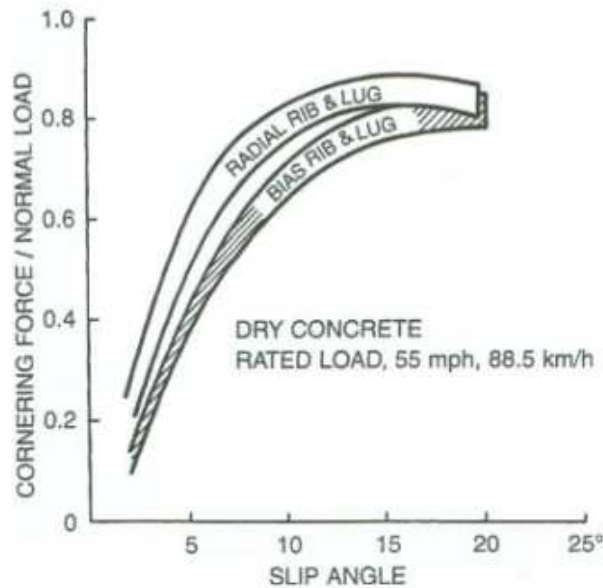
$F_x$  = pitkittäisvoima renkaan keskilinjan suuntaan [N]

$F_y$  = renkaaseen vaikuttava sivuttaisvoima [N]

$\alpha$  = sortokulma [deg]

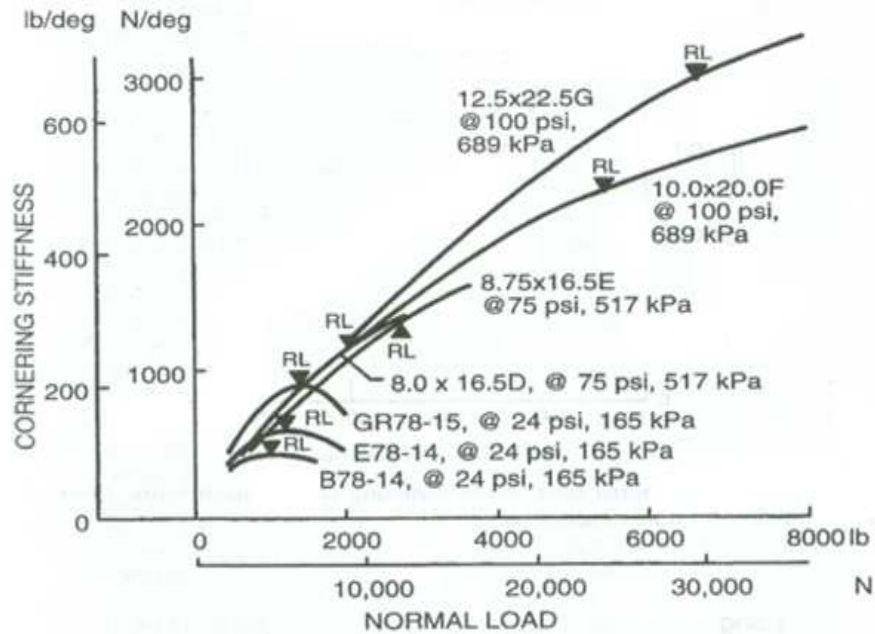
Yleensä renkaaseen vaikuttavien voimien määrittämiseen käytetään simulaatio-ohjelmia tai erilaisia matemaattisia rengasmalleja, jotka voidaan karkeasti jakaa

empiirisiin, semi-empiirisiin ja fysikaalisiin malleihin (9, s. 59–64). Helpoin tapa renkaan sivuttaisvoiman arviointiin on käyttää kaavioita, joista saa hyvin karkean arvion renkaan tuottamasta sivuttaisvoimasta (kuva 28). Sivuttaisvoimakuvaaja käytetään yleensä selvittäessä ajoneuvon kaarreajo-ominaisuuksia mutta ne antavat karkean arvion renkaan sortokulman tuottamasta sivuttaisvoimasta myös suoralla tiellä ajettaessa. (7, s. 30–36.)



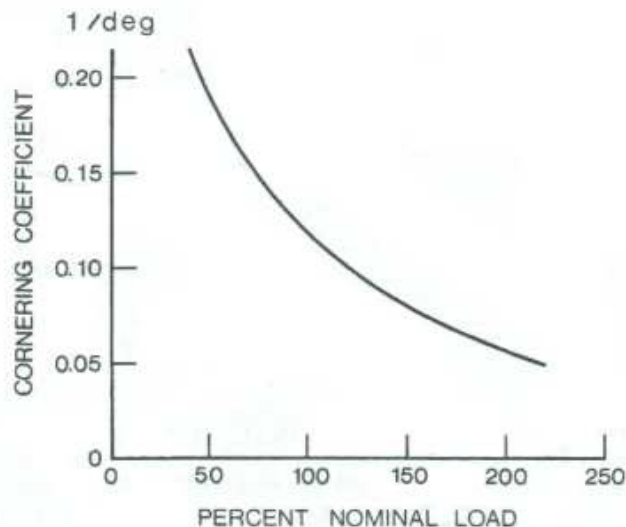
*KUVA 28. Sivuttaisvoima pystykuorman suhteen eri sortokulmilla kuorma-auton vyö- ja ristikudosrenkaille suurimmalla sallitulla kuormalla ja ajonopeudella 88,5 km/h. Slip angle tarkoittaa renkaan sortokulmaa. RIB tarkoittaa sileää, uritettua kulutuspintaa, jota käytetään esimerkiksi maantieajossa. LUG tarkoittaa karkeaa pykäläistä kulutuspintaa, jota käytetään esimerkiksi maansiirtoajossa (7, s. 33)*

Erilaisten renkaiden sivuttaisvoimien vertailemiseksi käytetään renkaan kaarto- ja jämäkkyyttä  $C_{\alpha}$ , joka kuvaa myös sivuttaisvoimakuvaajan kulmakerrointa. Kerroin kuvaa renkaan tuottamaa sivuttaisvoimaa sortokulman suhteen ja sen yksikkö on N/deg. Kertoimen avulla voidaan vertailla eri renkaiden sivuttaisvoiman tuottoa eri pystykuormien alla (kuva 29). (9, s. 39; 7, s. 34–35)



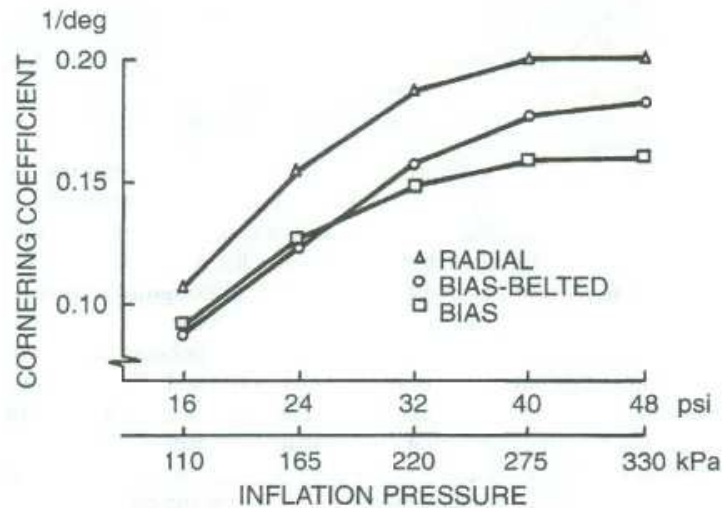
KUVA 29. Henkilöauton, kevyen kuorma-auton sekä kuorma-auton eri renkaiden kaartojäykkyyden ja renkaan pystykuorman suhde (7, s. 35)

Huomioitavaa on, ettei renkaan sivuvoimantuotto kasva lineaarisesti renkaan pystykuorman suhteen. Renkaiden pystykuorman vaikutusta sivuvoimantuottoon kuvataan kaartokertoimella, joka saadaan jakamalla kaartojäykkyys pystykuormalla. Saatu kerroin on tällöin muotoa 1/deg. Tyypillisesti kaartokerroin pienenee renkaan pystykuormaa lisätessä (kuva 30). (7, s. 35.)



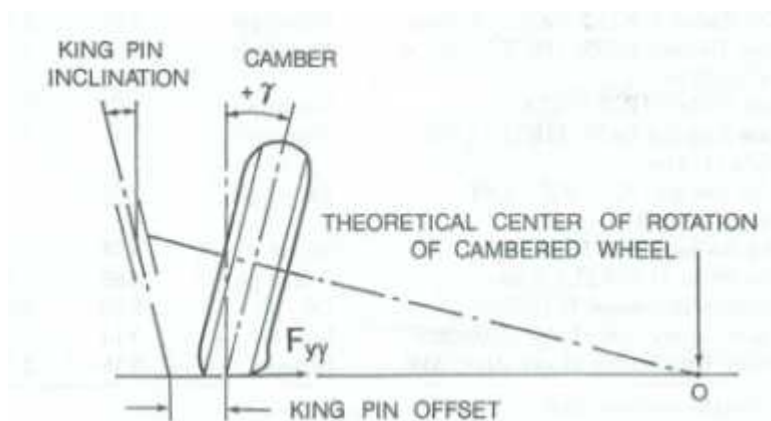
KUVA 30. Renkaan kaartokertoimen muutos suhteessa pystykuorman prosentuaaliseen muutokseen (7, s. 36)

Myös rengaspaineella on vaikutusta renkaan kaartokertoimen suuruuteen. Varsinkin vyörenkailla rengaspaineen nosto kasvattaa kaartokerrointa ja siten kaartojäykkyyttä (kuva 31). (7, s. 36.)



KUVA 31. Rengaspaineen vaikutus henkilöauton renkaan kaartokertoimeen (7, s. 36)

Sortokulman aiheuttaa yleensä ajoneuvon ohjausliike tai pyöräntulma, kuten auras tai haritus. Lisäksi renkaan sivuttaisvoiman tuottoon vaikuttaa myös renkaan sivuttaiskallistuma eli Camber-kulma (kuva 32). (7, s. 40–42.)

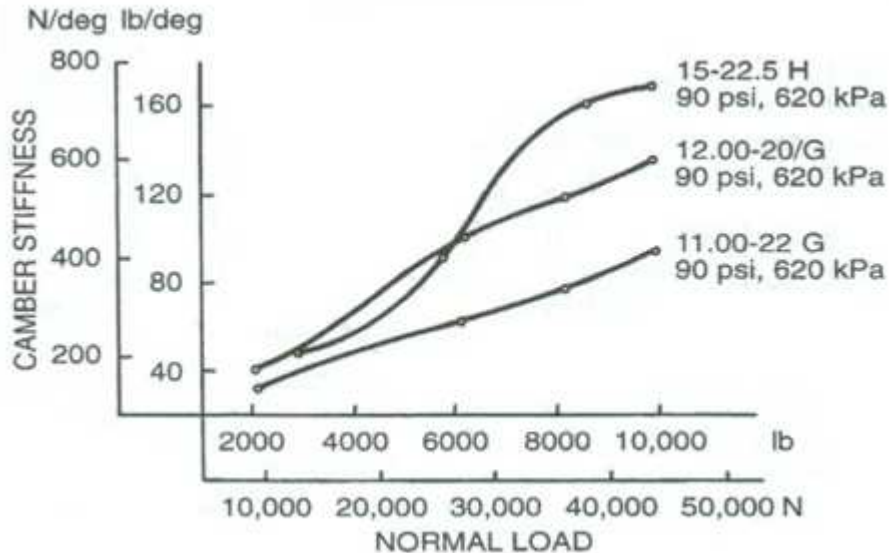


KUVA 32. Renkaan keskilinjan sivuttaiskallistuma tien pintaan nähden (7, s. 40)

Mikäli rengas olisi irti ajoneuvosta alkaisi se Camber-kulman ansiosta kaartaa pisteen O ympäri. Koska rengas on tuettu ajoneuvoon eikä täten voi suorittaa kaartoiluketta, tuottaa rengas sivuttaisvoiman  $F_{y\gamma}$ . Kuorma-autoilla Camber-kulman osuus sivuttaisvoimasta on noin 10–20 % ohjaavilla akseleilla. Kuten sortokulman myös



Camber-kulman tuottama sivuttaisvoima voidaan ilmaista muodossa N/deg eli Camber-kulmajäykkyytenä. Kuvassa 33 on kolmen eri kuorma-autonrenkaan Camber-kulmajäykkyys pystykuorman suhteen. (7, s. 41–42.)



KUVA 33. Kuorma-auton Camber-kulmajäykkyys kolmelle eri kuorma-autonrenkaalle (7, s. 42)

Pienille sorto- ja Camber-kulmille voidaan voimien yhteisvaikutus määrittää yhtälöllä 6. Voimien ollessa samansuuntaiset käytetään positiivista arvoa ja voimien ollessa erisuuntaiset käytetään negatiivista arvoa. (7, s. 42.)

Sorto- ja Camber-kulman yhteisvaikutus voidaan määrittää kaavalla 6 (7, s. 42).

$$F_y = C_\alpha \alpha \pm C_\gamma \gamma$$

KAAVA 6

$C_\gamma$  = Camber-kulmajäykkyys [N/deg]

$\gamma$  = Camber-kulma [deg]

#### 4.1.7 Renkaan koko, rakenne ja kuluminen

Renkaassa käytetyn materiaalin jälkeen suurimmaksi vierintävastuksen aiheuttajaksi renkaan rakenteessa tulee massa. Koska vierintävastus syntyy suurimmaksi osaksi renkaan materiaalin hystereesihäviöiden johdosta, on materiaalin poisto tehokas keino vierintävastuksen alentamiseen. Kulutuspinnan syvyyden ja leveyden vaikutus renkaan massaan on suuri ja molemmat rakenneparametrit vaikuttavat

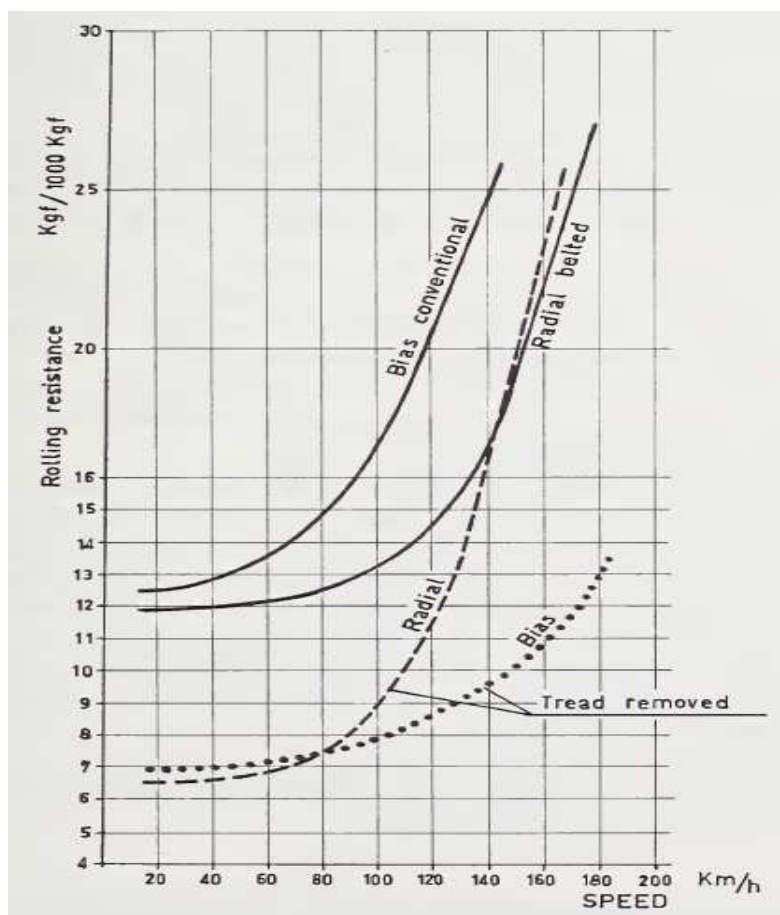


merkittävästi vierintävastukseen. Kokeellisesti on huomattu, että olka-alueen massalla on muita kulutuspinnojen alueita suurempi vaikutus vierintävastukseen. Renkaan kaventaminen myös parantaa vierintävastusta mutta liian kapea rengas alkaa kuormittaa olka-aluetta, jolloin saatu hyöty menetetään muiden renkaan ominaisuuksien mukana. Myös muiden renkaanosien keventäminen parantaa vierintävastusta mutta huomattavasti vähemmän, kuin kulutuspinnojen ja olka-alueen muutokset. (10, s. 501–502.)

Eri rengasmerkeillä ja -malleilla on havaittu olevan merkittäviä keskinäisiä eroja. Pienen vierintävastuksen omaavilla renkailla ja renkaiden oikealla sijoittelulla kaikille ajoneuvoyhdistelmän akselille voidaan polttoaineenkulutusta alentaa jopa 10 %. Renkaiden tasapainotuksella ei ole havaittu olevan suoraa vaikutusta vierintävastukseen. Tasapainotus vaikuttaa enemmän ajomukavuuteen ja renkaiden kulumiseen. (13, s. 110–112.)

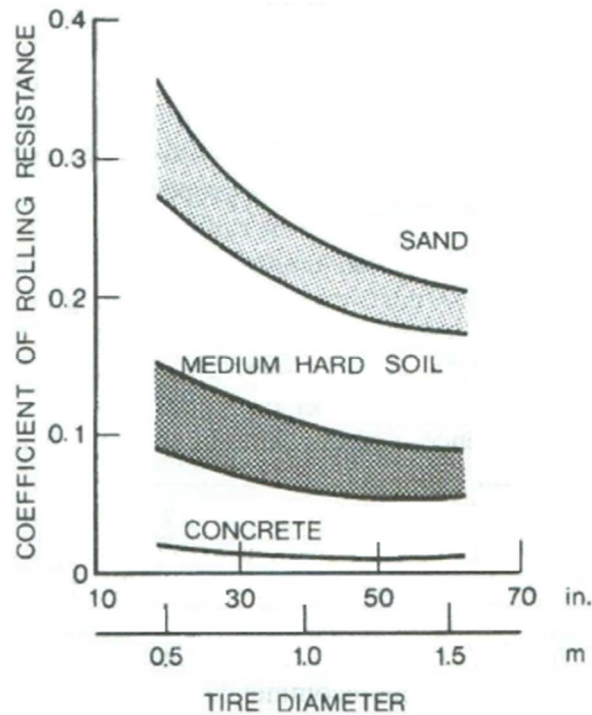
Renkaan eliniän aikana on havaittavissa kolme erilaista vierintävastuksen muutosta. Uuden renkaan vierintävastus pienenee sisäänajon aikana noin 2–5 %. Henkilöauton renkaalle ajaminen 80 km/h nopeudella 60 min ajan on havaittu olevan riittävä renkaan sisäänajoksi. Vierintävastuksen pieneneminen johtuu kumin sisäisten heikkojen sidosten katkeamisesta, jolloin kumin sisäiset jännitykset vähenvät ja tasoittuvat. Tämän jälkeen vierintävastus jatkaa pienenemistä renkaan kudosten, vöiden ja kulutuspinnojen sisäisten jännitysten tasoittuessa. Kun sisäiset jännitykset ovat poistuneet, vierintävastus pienenee lähinnä kulutuspinnoista poistuneen massan ansiosta. (10, s. 500–501.)

Vierintävastus alenee lähes lineaarisesti renkaan massan vähentyessä. Uuden ja kuluneen renkaan vierintävastuksen ero voi olla yli 20 %. Kuvassa 34 on pyritty havainnollistamaan renkaan kulutuspinnojen vaikutusta vierintävastukseen. Kuvasta nähdään henkilöauton renkaan vierintävastus uudella kulutuspinnoilla ja kulutuspinnoita kokonaan poistettuna. (10, s. 500–501.)



KUVA 34. Uuden henkilöauton renkaan sekä täysin kuluneen renkaan vaikutus vierintävastukseen eri rengasrakenteilla ja ajonopeuksilla (14, s. 599)

Renkaan halkaisijan vaikutus vierintävastukseen riippuu tien rakenneominaisuuksista. Kovilla tienrakenteilla renkaan halkaisijan vaikutus on vähäinen mutta pehmeillä tienrakenteilla varsin merkittävä (kuva 35) (7, s. 15–16). Renkaan halkaisijan kasvattaminen vähentää renkaan muodonmuutosta sekä sivuttaisvoimien aiheuttamaa leikkausvoimaa siten vähentäen hystereesihäviöitä. Kuitenkin liiallinen halkaisijan kasvattaminen lisää huomattavasti olka-alueen kuormitusta, jolloin seurauksena voi olla kasvanut vierintävastus. (10, s. 502.)

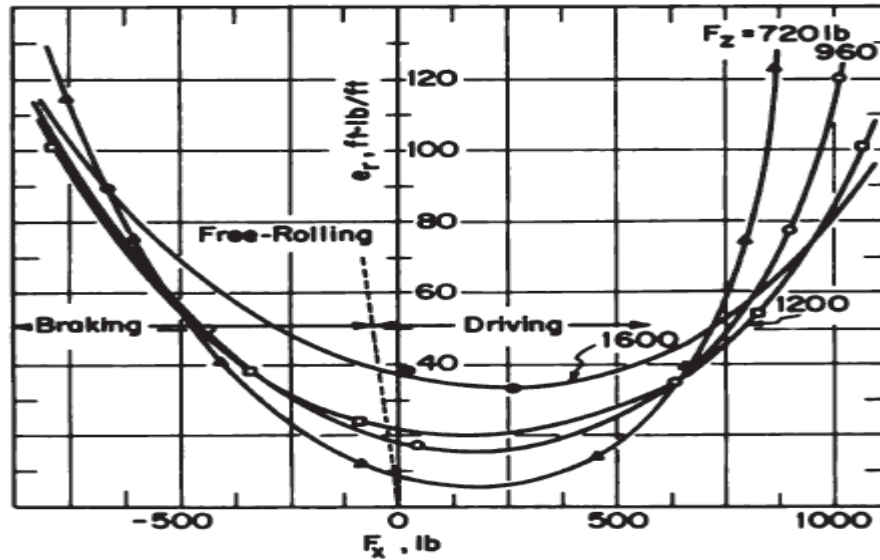


KUVA 35. Renkaan halkaisijan vaikutus vierintävastukseen eri tien kovuuksilla (7, s. 15)

Renkaan profiilisuhteen pienentäminen vähentää renkaan vierintävastusta, sillä rengas jäykistyy säteissuunnassa ja kulutuspinna pysyy tasaisempuna. Profiilisuhteen alentaminen jäykistää myös renkaan kehää, jolloin suurilla nopeuksilla keskeisvoiman aiheuttamat muodonmuutokset vähenevät. (12, s. 595–596.)

#### 4.1.8 Renkaaseen vaikuttava vääntö

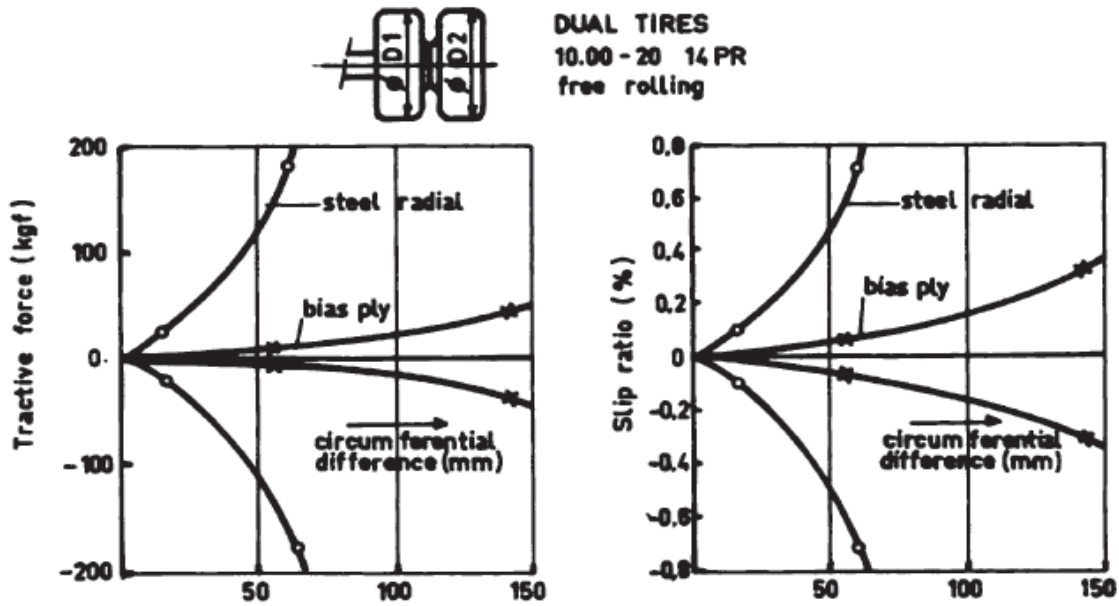
Vääntö vaikuttaa suoraan renkaan leikkausjännityksiin ja venymiin, joilla voi olla suuri vaikutus vierintävastukseen. Pienin vierintävastuksen arvo saavutetaan yleensä pienellä kiihdyttävällä tai jarruttavalla momentilla riippuen renkaan rakenteesta ja materiaalista (kuva 36). Pienen kiihdyttävän momentin on arveltu vähentävän renkaan pitkittäisluistoa enemmän kuin lisäävän hystereesihäviöitä, jolloin vierintävastus saa pienimmän arvonsa. (10, s. 496–498.)



KUVA 36. Väännön vaikutus renkaan vierintävastukseen. Braking ja Driving kuvaavat jarruttavaa ja kiihdyttävää voimaa renkaan eri pystykuormien suhteen (12, s. 597)

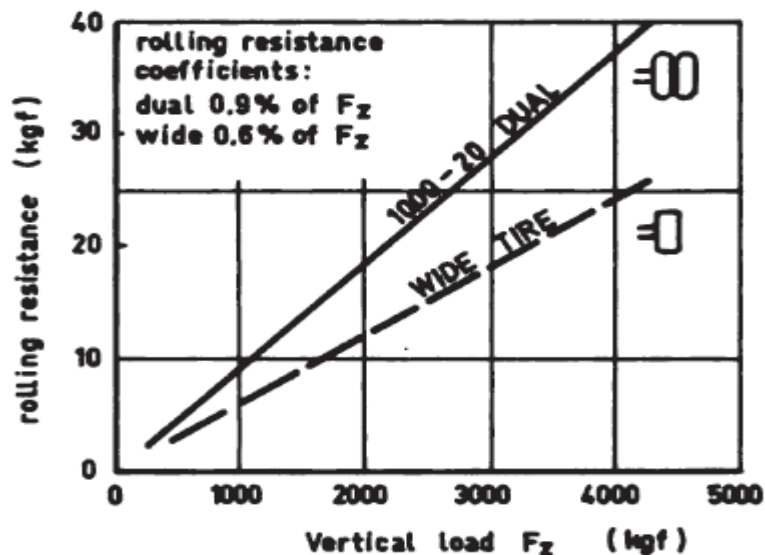
#### 4.1.9 Paripyörä asennus

Varsinkin raskaassa kalustossa käytettävällä renkaiden paripyöräasennuksella on pyritty kasvattamaan akselin kuormankantokykyä jakamalla kuorma suuremmalle pinta-alalle, jolloin tiehen kohdistuva pintapaine alenee. Paripyöräasennuksen haittana on sen herkkyys renkaiden kehäpituuksien eroille. Mikäli rengaspari ei ole kulunut tasaisesti tai on muuten erikokoinen, aiheutuu renkaiden välille luistoa. Tämä luisto lisää renkaiden vierintävastusta (kuva 37). (12, s. 599.)



KUVA 37. Paripyörärensikaiden kehäpituuksien eron aiheuttama vastusvoima kehäpituuden eron suhteen sekä renkaiden välinen luisto kehäpituuden eron suhteen (12, s. 600)

Yksikköpyörällä ei tapahdu luistoa tienpinnassa yhtä paljoa kuin paripyörillä. Lisäksi kapeampi yhteenlaskettu kulutuspinna, korkeampi rengaspaine ja pienempi massa parantavat yksikköpyörän vierintävastusta paripyöriin nähden (kuva 38). (12, s. 599–600.)

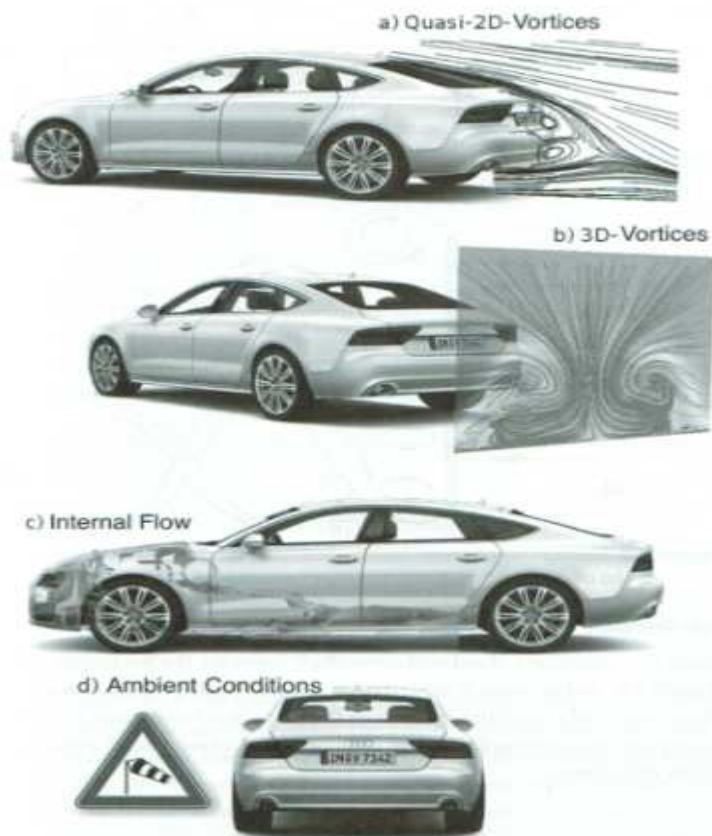


KUVA 38. Paripyörien ja single-pyörän vierintävastukset renkaan pystykuorman suhteen (12, s. 600)

## 4.2 Ilmanvastus

Jokainen kiinteäkappale, joka kulkee ilmavirrassa, kohtaa liikettä vastustavia voimia. Vastusvoimia syntyy ilmassan syrjäyttämisestä ja paineen muutoksesta ilmavirran kineettiseksi energiaksi. Ilmanvastus kuvaa näistä ilmiöistä syntyvää ajoneuvon liikesuunnanvastaista vastusvoimaa. Ajoneuvon etenemissuunnassa syntyvät paine-erot aiheuttavat ilmanvastuksesta >80 %. Ajoneuvon ulkopinnalla syntyvä kitkan aiheuttama leikkausvoima aiheuttaa <10 % ilmanvastuksesta. Ajoneuvon jäähdyttimen, moottoritilan ja ohjaamon läpi virtaava ilma aiheuttaa kevyellä kalustolla noin 10 % ilmanvastuksesta sekä raskaalla kalustolla 5-8 %. Ilmavirtauksen törmääminen ja irtoaminen ajoneuvonpinnasta aiheuttaa paine-eroja ja on suurin ilmanvastuksen aiheuttaja. (15, s. 201–206; 16, s. 156; 3, s. 751.)

Ilmavirran irtoaminen voi tapahtua kahdella tapaa. Virtausta vastaan poikkisuuntaiset reunat voivat aiheuttaa virtauksen irtoamisen. Irtautunut ilmavirta kehittää pyörteen, jonka pyörimisakseli on yleensä samansuuntaisen irtoamiseksi aiheuttaneen reunan kanssa. Ilmiön aiheuttama turbulenttinen virtaus aiheuttaa kineettistä energiahäviötä. Nämä pyörteet mielletään usein kaksitasoisiksi (kuva 39, kohta a). Toinen ilmavirtauksen irtoamistapa tapahtuu yleensä kulmissa, joissa ilma virtaa kulmassa, kuten henkilöautojen A- ja C-pilarit. Nämä virtaukset ovat luonnostaan kolmiulotteisia. Ilmavirtaus muodostaa näissä tapauksissa kartionmuotoisia ilma-pyörteitä, jotka kulkevat ilmavirran suuntaisesti (kuva 39, kohta b). Näiden pyörteiden aiheuttama energiahäviö on suurempi, kuin edellisen virtauksen irtoamistyyppiin. (15, s. 206.)



*KUVA 39. Ilmanvastusvoimaan vaikuttavia tekijöitä: ilmavirran kulkusuuntaan poikittain olevien reunojen aiheuttama pyörteily (a), kaltevien pintojen aiheuttama ilmavirran kartiomainen pyörteily (b), ajoneuvon sisäinen ilmanvastus (c), ulkoisten olosuhteiden vaikutus (d) (15, s. 207)*

Ajoneuvon sisäinen ilmanvastus aiheutuu enimmäkseen painehäviöistä ilmavirran kulkiessa jäähdyttimen ja moottoritilan lävitse. Sisäinen ilmavirta voidaan karkeasti ajatella olevan putkivirtaus, jossa on keinotekoisia painehäviöitä. Myös ympäristöllä on vaikutusta ajoneuvon ilmanvastukseen. Sivuttaistuulella voi olla suurikin vaikutus ajoneuvon ilmanvastukseen. Lisäksi ulkoilmanlämpötila ja -paine vaikuttavat ilman tiheyteen ja ilmanvastusvoiman suuruuteen. (15, s. 206–207.)

Ilmanvastus on merkittävä varsinkin ajettaessa suurilla nopeuksilla. Tämä havaitaan esimerkiksi ilmanvastusvoiman suhteesta ajoneuvon nopeuteen. Ajonopeuden kasvaessa ilmanvastusvoima kasvaa eksponentiaalisesti. Ajoneuvon ilmanvastusvoimaa määritettäessä on huomioitava, että vastusvoima riippuu enemmänkin ilmavirtauksen, kuin ajoneuvon nopeudesta. Täten ajoneuvoon vaikuttava

vasta- tai myötäsuintainen tuuli on otettava huomioon. Ilmanvastusvoima ilman sivutuulen vaikutusta voidaan määrittää kaavalla 7. (16, s. 156)

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A_x c_D v^2$$

KAAVA 7

$F_D$  = ilmanvastusvoima [N]

$\rho$  = ilmantiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$A_x$  = ajoneuvon otsapinta-ala [ $\text{m}^2$ ]

$c_D$  = ilmanvastuskerroin [–]

$v$  = ilmavirrannopeus [m/s]

Ilmantiheys muuttuu lämpötilan ja ilmanpaineen vaihdellessa. Ilmantiheys voidaan kaavalla 8 muuttaa vastaamaan ulkolämpötilan ja -paineen mukaista arvoa. (16, s. 156.)

$$\rho_L = 1,293 \frac{273,15}{T+273,15} * \frac{p}{1013}$$

KAAVA 8

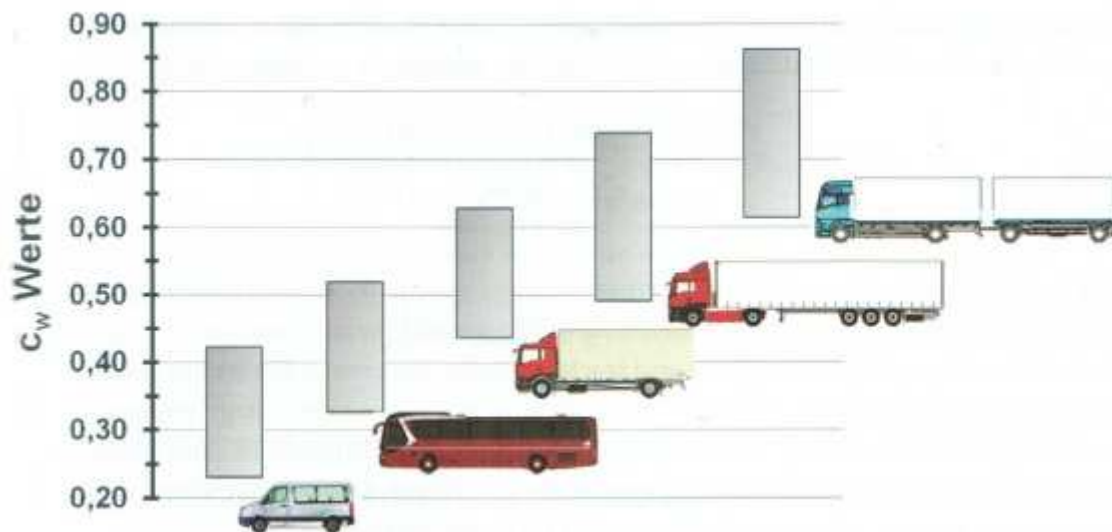
$\rho_L$  = korjattu ilmantiheys [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$T$  = ulkolämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$p$  = ulkoilmanpaine [mbar]

Ne ilmanvastuksen tekijät, joihin voidaan vaikuttaa ajoneuvon suunnittelu avulla, ovat ilmanvastuskerroin  $c_D$  ja ajoneuvon otsapinta-ala  $A_x$ . Molempien arvojen alentaminen pienentää ilmanvastuksesta aiheutuvaa voimaa  $F_D$ . Kuitenkin ajoneuvon otsapinta-alan pienentäminen raskaan kaluston näkökulmasta on hankalaa, sillä tällöin jouduttaisiin usein pienentämään korirakennetta ja siten kuormatilaa. Täten on hyödyllisempää perehtyä ilmanvastuskertoimen  $C_d$  muodostumisen ja keinoihin, joilla siihen voidaan vaikuttaa. Ajoneuvon rakenne ja muoto vaikuttavat merkittävästi ajoneuvon ilmanvastuskertoimeen (kuva 40). (3, s. 719–723.)



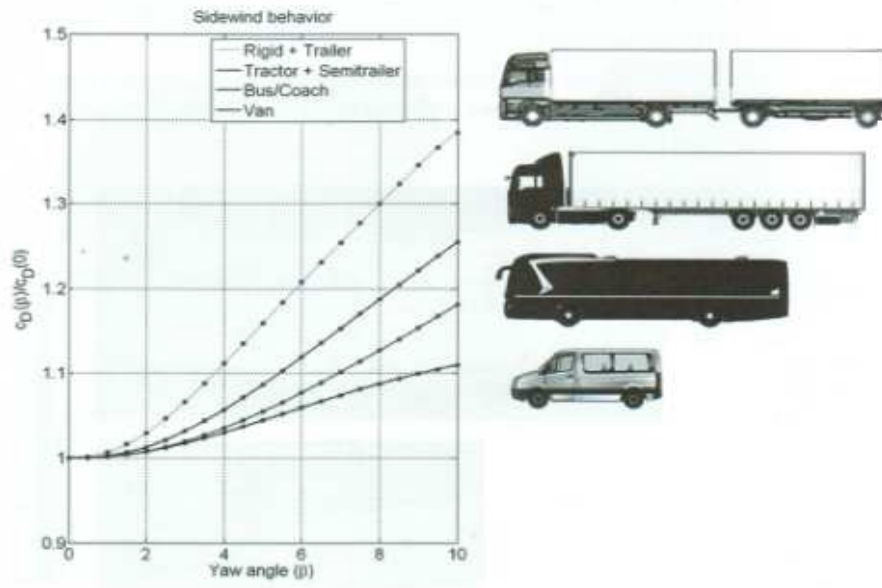


KUVA 40. Eri hyötyajoneuvojen ilmanvastuskertoimia (3, s. 723)

#### 4.2.1 Epäsuoran ilmavirtauksen vaikutus ilmanvastukseen

Sivutuuli on erittäin merkittävä ilmanvastuksen osatekijä raskaan kaluston ajoneuvoille. Merkitys korostuu etenkin ajoneuvoille, joissa on umpimallinen korirakenne, sillä ajoneuvon sivun pinta-ala on tällöin suuri. Sivutuulen vaikutus ilmanvastuskertoimeen riippuu kulmasta ja ilmavirtausnopeudesta, jolla sivutuuli vaikuttaa. Sivutuulen ja ajoneuvon keskilinjan suuntaisen ilmavirtauksen resultantista käytetään nimeä epäsuora ilmavirtaus. (3, s. 723–724.)

Maavara, välit korirakenteiden ja ajoneuvojen välillä sekä rakenteiden muodot vaikuttavat epäsuoran ilmavirtauksen aiheuttamaan ilmanvastuksen kasvuun. Suurilla korirakenteilla epäsuoravirtaus aiheuttaa ilmavirtauksen korirakenteiden väleissä ja ilmavirtauksen irtoamista suojapuolen pinnalla. Epäsuora ilmavirtaus vaikuttaa myös ajoneuvon alustaan, sillä ilmavirtaus alustassa ja sen ympärillä on turbulენტista. Yhtenäinen korirakenne, pyöreät kulmat ja matala maavara pienentävät sivutuulen aiheuttaman epäsuoran ilmavirtauksen vaikutusta (kuva 41). (3, s. 723–724.)



KUVA 41. Epäsuoran ilmapvirran vaikutus eri vaikutuskulmilla eri ajoneuvoille, kuva esittää ilmanvastuskertoimen kasvua verrattuna tilanteeseen, jossa sivutuulta ei ilmene (3, s. 724)

Sivutuulenvaikutuskulma ja -nopeus ovat geometrisin termein suhteellisia toisiinsa ja ne voidaan määrittää yhtälöillä 9 ja 10. Sivutuulen aiheuttama epäsuoran ilmapirrannopeuden resultantti voidaan määrittää kaavalla 9. (3, s. 724.)

$$v_{\infty}^2 = (v_F + v_W \cos \varnothing)^2 + (v_W \sin \varnothing)^2 \quad \text{KAAVA 9}$$

$v_{\infty}$  = ilmapirrannopeuden resultantti [m/s]

$v_F$  = ilmapirtauksennopeus ajoneuvon keskilinjan suunnassa [m/s]

$v_W$  = sivutuulen ilmapirrannopeus [m/s]

$\varnothing$  = sivutuulen vaikutuskulma ajoneuvon keskilinjaan nähden [deg]

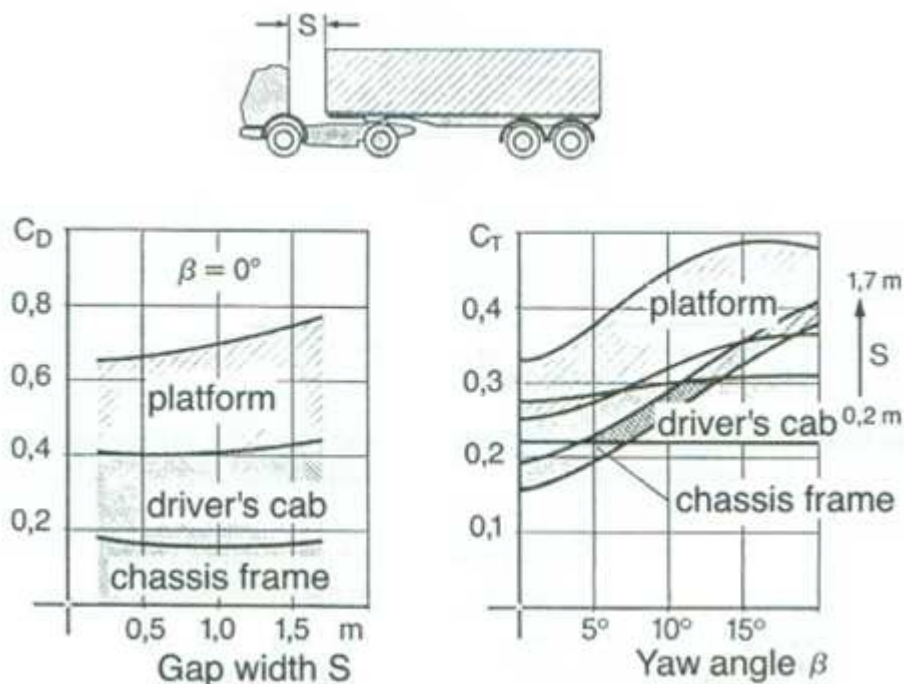
Epäsuoran ilmapirtausnopeuden resultantin vaikutuskulma voidaan määrittää kaavalla 10 (3, s. 724).

$$\beta = \arctan \frac{v_W \sin \varnothing}{v_F + v_W \cos \varnothing} \quad \text{KAAVA 10}$$

$\beta$  = epäsuoran ilmapirtauksen vaikutuskulma [deg]

## 4.2.2 Ajoneuvoyhdistelmän ilmanvastus

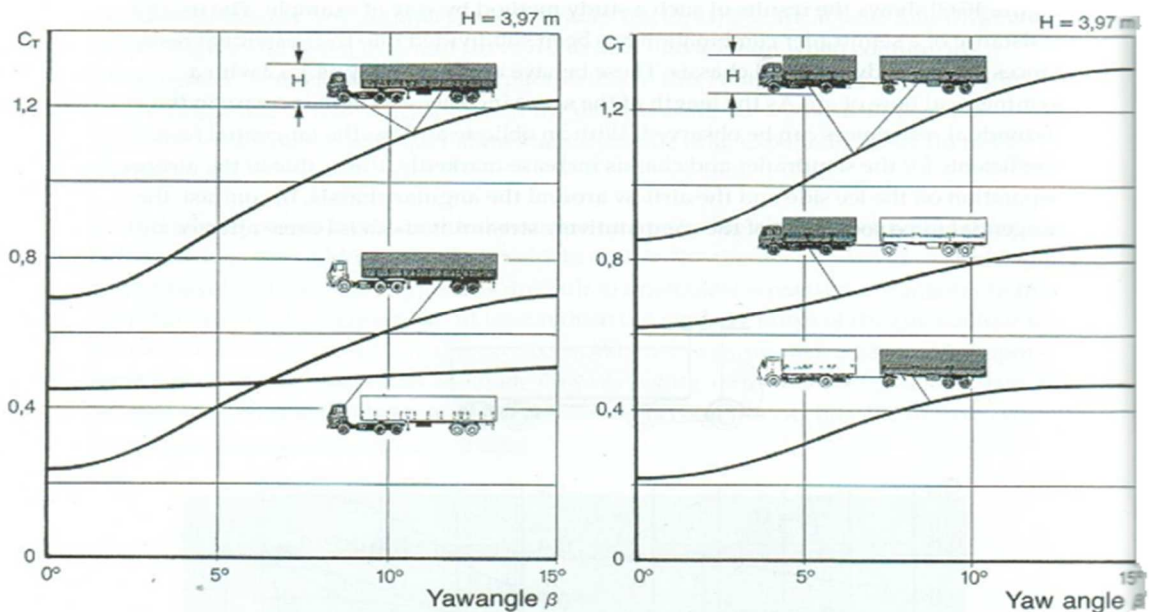
Ajoneuvoyhdistelmän aerodynaamisia ominaisuuksia tutkittaessa ja optimoitaessa tulee ajoneuvoyhdistelmää käsitellä kokonaisuutena. Kokonaisuuden eri osa-alueet voidaan kuitenkin pilkkoa osiin ja arvioida niiden vaikutusta. Esimerkiksi puoliperävaunun ja kuorma-auton väliin jäävän tilan kasvattaminen huonontaa yhdistelmän aerodynaamisia ominaisuuksia (kuva 42). Mikäli yhdistelmään lisäksi kohdistuu epäsuoraa ilmavirtausta, kasvaa aerodynaamisesti huonojen yhdistelmänosien ilmanvastuskerroin optimoituja alueita enemmän. Kuten kuvasta 42 havaitaan, epäsuora ilmavirta ei juurikaan vaikuta yhdistelmän vetoauton virtaviivaiseen ohjaamoon. Alustan sivusuojien ja perävaunun kulmien säteen merkitys korostuu kohdatessa epäsuoraa ilmavirtaa. Näiden osien ilmanvastuskerroin kasvaa merkittävästi epäsuoran ilmavirran vaikutuskulman kasvaessa. (3, s. 758–759.)



KUVA 42. Tyhjän tilan  $S$  kasvattamisen ja sivutuulen vaikutus eri kohtiin puoliperävaunuyhdistelmää: perävaunun kuormatila (platform), kuorma-auton hytti (driver's cab), ajoneuvon alusta (chassis frame) (3, s. 759)

Epäsuoralla ilmavirtauksella puoliperävaunun ilmanvastus kasvaa ajoneuvojen välissä kasvaneen ilmavirtauksen takia. Lisääntynyt ilmavirtaus aiheuttaa varsinkin suojapuolen kulmien läheisyyteen ilmavirtauksen irtoamista ja paine-eroja,

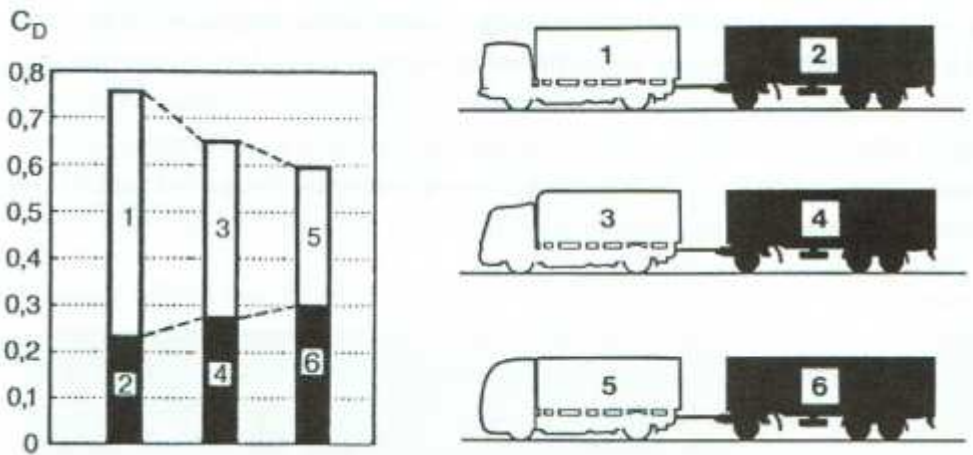
jotka kasvattavat ilmanvastusta. Ajoneuvon alustan ilmanvastus kasvaa myös huomattavasti epäsuoran ilmavirtauksen vaikutuskulman kasvaessa ilman sivusuojien käyttöä. Epäsuora ilmavirtaus vaikuttaa lisäksi perävaunun takana tapahtuvaan pyörteilyyn ja kasvattaa syntyvää turbulenttista aluetta. Puoliperävaunun ja vetoauton ilmanvastuskertoimet voidaan esittää myös omina vastusarvoinaan (kuva 43). (3, s. 759.)



*KUVA 43. Ajoneuvojen osuudet eri ajoneuvoyhdistelmien ilmanvastuskertoimista epäsuoran ilmavirran vaikutuskulman suhteen (3, s. 760)*

Ilmanvastusvoimat kuorma-auton ja varsinaisen perävaunun suhteen jakautuvat suoralla ilmavirralla karkeasti 70 ja 30 %. Epäsuoran ilmavirran vaikutuskulman muuttuessa tämä suhde ei juurikaan muutu. Epäsuoran ilmavirran vaikutuskulman kasvaessa ilmavirta alkaa kulkea ajoneuvon suoja puolelle yhdistelmässä olevien rakojen, kuten hytin ja korirakenteen sekä kuorma-auton ja perävaunun välistä. Tämä lisää ilmavirran irtoamista ajoneuvon suojanpuoleisella kyljellä varsinkin ajoneuvon edessä. Perävaunun takana tapahtuvaan ilmavirran pyörteilyyn muutos vaikuttaa samoin kuin puoliperävaunussa. Lisääntynyt turbulenttinen ilmavirtaus ajoneuvon alustassa vaikuttaa hieman suuremmin varsinaiseen ajoneuvoyhdistelmään suuremman pituuden takia. (3, s. 760.)

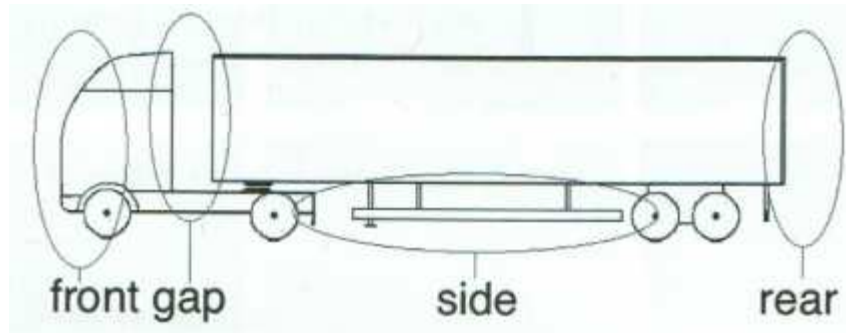
Arvioitaessa eri ajoneuvojen ja yhdistelmien ilmanvastuksen arvoja on huomioitava, että kuorma-auton ohjaamon ja keulan muotoilulla on suuri vaikutus koko yhdistelmän ilmanvastukseen. Virtaviivainen hytti ei ainoastaan vähennä ilmanvastusta, vaan jakaa sitä tasaisemmin koko yhdistelmään (kuva 44). Virtaviivaisella kuorma-autolla perävaunun aerodynaamisuus siis korostuu. (3, s. 760–761.)



KUVA 44. Virtaviivaisen kuorma-auton keulan ja ohjaamon merkitys ajoneuvoyhdistelmän ja perävaunun ilmanvastuskertoimeen (3, s. 761)

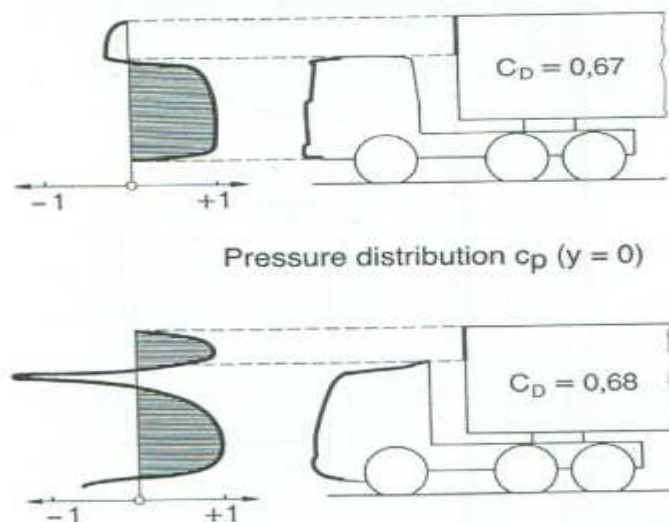
#### 4.2.3 Ilmanvastuksen vähentäminen

Ilmanvastuksen parantaminen nykyaikaisessa kuljetuskalustossa voi olla varsin hankalaa. Usein keinot, joilla ilmanvastusta voidaan pienentää, vaikuttavat ajoneuvon kuljetustilavuuteen. Suuret pyöritykset ja aerodynaamiset muodot usein pienentävät korirakennetta tai kasvattavat ajoneuvon mittoja sallittujen ulkopuolelle. Tärkeimmät alueet ilmanvastuksen pienentämisessä puoliperävaunuyhdistelmässä ovat ajoneuvon keula, ohjaamon ja perävaunun väli, kuormatilan alapuoleiset ajoneuvon sivut sekä perävaunun takaosa (kuva 45). Aerodynaamisia ilmvirranohjaimia tutkittaessa on huomattu, että jatkokappaleiden käytöllä perävaunun takaosassa on kaksi kertaa enemmän parannuspotentiaalia kuin ajoneuvon edessä. (3, s. 727.)



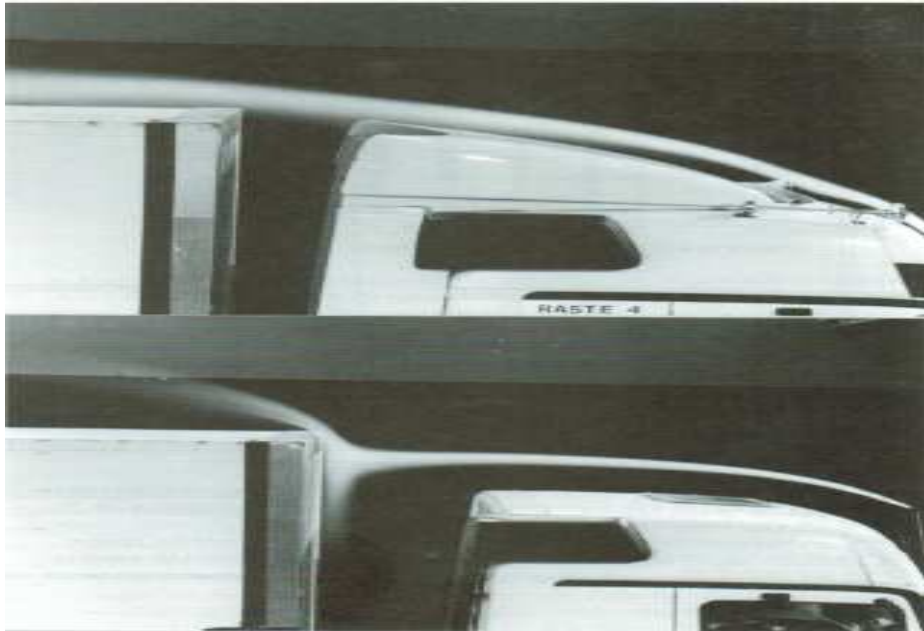
KUVA 45. Alueet joissa ilmanvastuksen parantamisen potentiaali on suurin puoliperävaunuyhdistelmille (3, s. 761)

Ajoneuvoyhdistelmän ilmanvastus on pitkälti riippuvainen kuorma-auton ohjaamon ja keulan muotoilusta. Kuitenkin on muistettava, että pelkkä ohjaamon virtaviivainen suunnittelu ei välttämättä paranna ilmanvastusta, vaan ilmanvastuksen parantamista on käsiteltävä koko ajoneuvon osalta. Esimerkiksi suoralla ilmavirtauksella virtaviivaisella ja kulmikkaalla keulan ja ohjaamon muotoilulla ilmanvastuskertoimen ero voi olla erittäin pieni. Kulmikas muotoilu ottaa vastaan kaiken ilmavirran aiheuttaman dynaamisen paineen. Terävien kulmien ja suuren paineen takia ohjaamo aiheuttaa niin suuren ilmavirran irtoamisen, että ilmavirta ohittaa perävaunun etuseinän eikä törmää siihen. Ilman ilmavirranohjainta virtaviivainen ohjaamo ohjaa ilmavirran suoraan perävaunun etuseinään, jolloin hytin muotoilulla saatu aerodynaaminen parannus voidaan menettää (kuva 46). (3, s. 742–743.)



KUVA 46. Kulmikkaan ja virtaviivaisen kuorma-auton ohjaamon muotoilun vaikutus suoraan ilmavirtaukseen (3, s. 743)

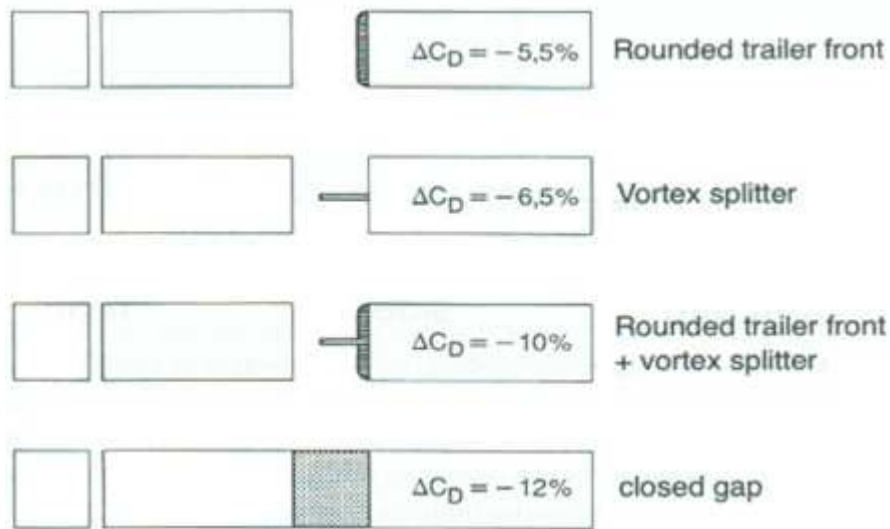
Ohjaamon katolle ja sivuille asennettavilla ilmavirranohjaimella voidaan helposti ja edullisesti parantaa kuorma-auton aerodynamiikkaa. Ohjaamon, perävaunun ja korirakenteen kokojen eroista riippuen ilmanvastus voi kasvaa jopa 30 %, mikäli ajoneuvossa ei käytetä ilmavirranohjaimia (kuva 47). (3, s. 745.)



*KUVA 47. Ilmavirranohjaimien vaikutus suoraviivaiseen ilmavirtaan ohjaamon katolla ja perävaunun etuosassa (3, s. 746)*

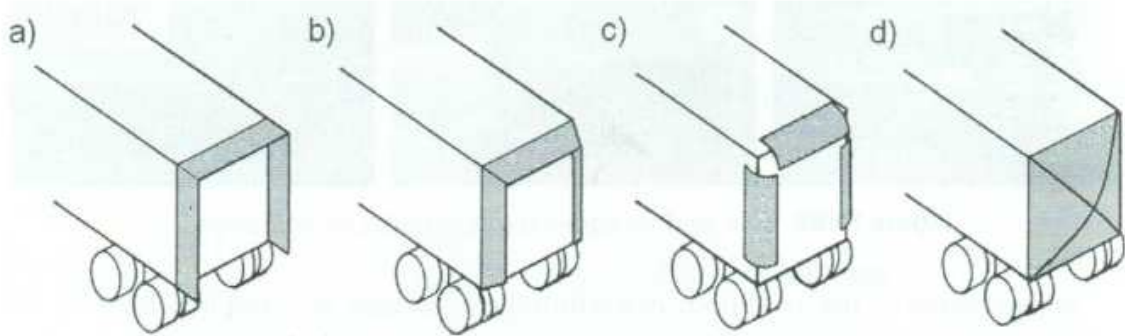
Perinteiset suorakulmaiset korirakenteet tarjoavat paljon parannettavaa rakenteen muodossa. Teräväkulmainen laatikkomuoto aiheuttaa helposti ilmavirran irtautumisen ajoneuvon pinnasta. Kulmien pyöristämisellä varsinkin kuorma-auton ohjaamon ylittävissä kohdissa voidaan alentaa yhdistelmän ilmanvastuskerrointa, niin suoralla kuin epäsuorallakin ilmavirtauksella. Myös varsinaisen perävaunun etukulmien pyöristäminen alentaa ilmanvastusta, samoin kuin ilmavirranpyörteiden ohjaimet. Näillä parannuksilla voidaan päästä liki yhtä hyvään lopputulokseen, kuin sulkemalla kuorma-auton ja perävaunun välinen aukko (kuva 48). (3, s. 761.)





KUVA 48. Varsinaisen perävaunun etuosan ja kuorma-auton takaosan muotoilun vaikutus ilmanvastuskertoimeen (3, s. 476)

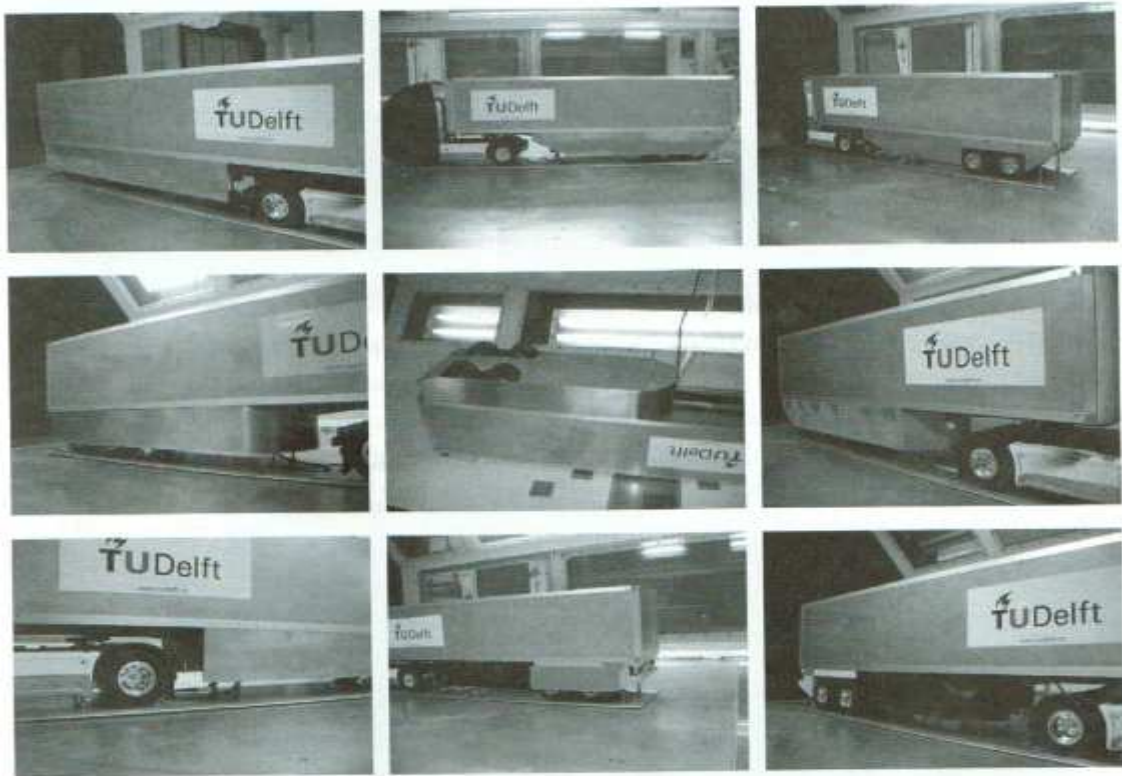
Perävaunujen takaosa tarjoaa suuren potentiaalisen ajovastuksen alentamiseen. Perävaunun taakse syntyy suuri matalapaineinen alue, joka syntyy ilmavirran irrotessa perävaunun katosta ja sivuilta. Erilaisia perävaunun takaosan muotoja on kokeiltu tämän alueen parantamiseksi. Tavoitteena on nostaa perävaunun takaosaan kohdistuvaa painetta ohjaamalla ilmavirtaa kohti matalapaineen keskustaa. Kuvan 49 kohdan b mukaisella muotoilulla voidaan saavuttaa noin 7 % alennus ilmanvastuksessa, jos kulmat ovat 0,4 m pituudella ajoneuvon pituussuunnassa. (3, s. 764.)



KUVA 49. Erilaisia perävaunun takaosan muotoiluja aerodynamiikan parantamiseksi (3, s. 764)



Ajoneuvon sivuille asennettavat sivusuojat ovat tehokas keino ajoneuvon ilmanvastuksen alentamiseksi. Erityisesti sivusuojien alareunan ja maanpinnan välisen etäisyyden pienentäminen parantaa ilmanvastusta huomattavasti. Rajoitteita sivusuojien mataluudelle aiheuttaa tiestö, jolla ajoneuvolla ajetaan. Delft University of Technologyn suorittamissa tuulitunnelikokeissa ilmanvastuskerrointa saatiin mädallettua erilaisilla sivusuoja ratkaisulla jopa  $\Delta C_D=0,061$  (kuva 50). Eri puoliperävaunuvalmistajien tarjoamat sivusuojat voivat laskea ilmanvastusta jopa 8 %. Sivusuojina voivat toimia myös oikein sijoitetut tankit ja tarvikelaatikat, jos ne muodostavat tarpeeksi yhtenäisen pinnan. Sivusuojien käyttöä ei kuitenkaan suositella ainoastaan ilmanvastuksen alentamisen takia, vaan ne myös parantavat turvallisuutta. Sivusuoja toimii myös alleajosuojana sekä vähentää melua ja renkaiden vesiroiskeita. (3, s. 756–763.)

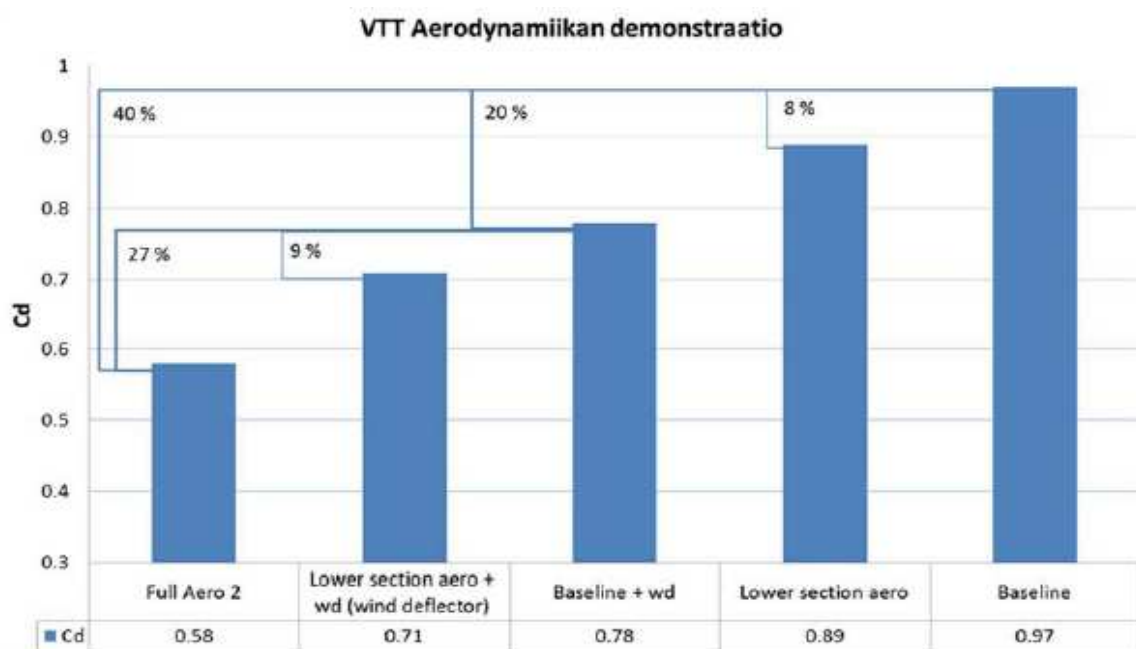


*KUVA 50. Erilaisia sivusuoja ratkaisuja puoliperävaunulle (3, s. 763)*

Ajoneuvojen alle asennettavia suojalevyjä ei ole vielä käytetty muissa kuin prototyyppi ajoneuvoissa. Ilmanvastusta voitaisiin näillä suojilla alentaa noin 2 %. Ajo-

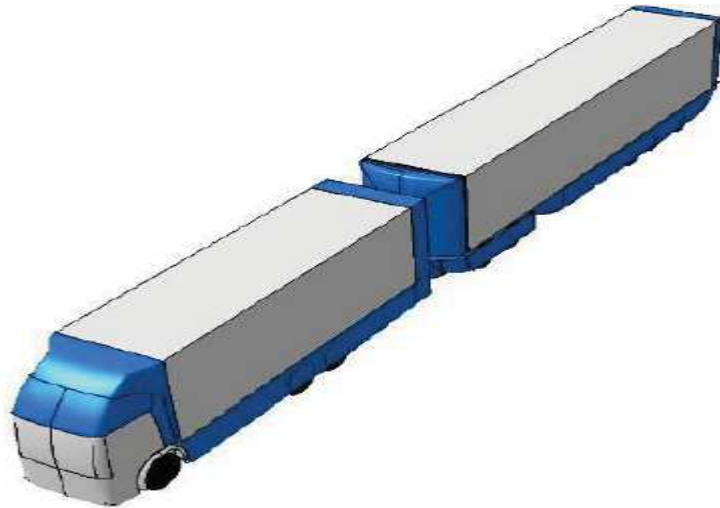
neuvon alla kulkeva ilmavirta on syytä huomioida tarvike- ja työkalulaatikoita, jär-  
 räjärjestelmiä ja ilmasäiliöitä asennettaessa. Ajoneuvon alustan osien oikeanlai-  
 nen sijoittelu vähentää ajoneuvon alla syntyvää turbulenttista virtausta. (3, s. 763.)

VTT on tutkinut varsinaisen ajoneuvoyhdistelmän aerodynamiikkaa ja sen suorit-  
 tamissa kokeissa on havaittu, että perinteisen ajoneuvoyhdistelmän ilmanvastus-  
 kerrointa voidaan potentiaalisesti pienentää jopa 40 %. Vertailun kohteena ol-  
 leessa ajoneuvoyhdistelmässä ei ollut minkäänlaisia ilmavirranohjaimia (kuva 51).  
 (17, s. 11.)



*KUVA 51. Varsinaisen perävaunuyhdistelmän ilmanvastuskertoimen parannuspo-  
 tentiaali (17, s. 11)*

Ilmanvastuskerrointa pystyttiin parantamaan 27 % verrattuna ajoneuvoyhdistel-  
 mään, jossa oli perinteinen ohjaamon katolla sijaitseva ilmavirranohjain. Sivusuojilla todettiin olevan noin 9 % parantava vaikutus. Yhdistelmän CAD-suunnitteluku-  
 vasta nähdään parhaiten yhdistelmään tehdyt muutokset (kuva 52). (17, s. 11.)



*KUVA 52. VTT:n aerodynaamisesti paranneltu ajoneuvoyhdistelmä, kuvaan on merkitty sinisellä alueet, joita on aerodynaamisesti paranneltu (17, s. 8)*

### 4.3 Muut vastusvoimat

Muita ajoneuvon liikettä vastustavia voimia ovat aiemmin mainitut kiihdytys- ja mäennousuvastus. Näitä vastusvoimia ei ole tai niiden vaikutus on vähäinen ajettaessa tasaisella tiellä ja tasaisella nopeudella (kuva 16). Niiden vaikutus korostuu mäkisessä ja vaikeakulkuisessa tiestössä, jossa ajoneuvoa joudutaan tiheään kiihdyttämään ja hidastamaan. Mäennousuvastus on yksinkertaisuudessaan potentiaalienergiaa, jota varataan ajoneuvoon mäkeä noustessa ja joka saadaan takaisin tultaessa mäkeä alas. Mäennousuvastus voidaan määrittää kaavalla 11. (16, s. 154–159.)

$$F_G = mg \sin \alpha$$

KAAVA 11

$F_G$  = mäennousuvastus [N]

$m$  = ajoneuvon massa [kg]

$g$  = maanvetovoiman kiihtyvyyys [ $9,81\text{m/s}^2$ ]

$\alpha$  = mäennousukulma [deg]

Kiihdytysvastus syntyy ajoneuvoa kiihdytettäessä. Sen suuruus riippuu ajoneuvon massasta, kiihdytyksen suuruudesta ja pyörivien ajoneuvonosien hitaudesta. Kiihdytysvastus voidaan määrittää kaavalla 12. (18; 16, s. 154–159.)

$$F_{acc} = \psi ma$$

KAAVA 12

$F_{acc}$  = kiihdytysvastusvoima [N]

$\psi$  = pyörivien osien hitauskerroin [–]

$a$  = ajoneuvon kiihtyvyys [ $m/s^2$ ]

Hitauskerroin kuvaa kuinka suuri ajoneuvon massan olisi oltava, jotta se aiheuttaisi yksistään yhtä suuren hitauden, kuin ajoneuvon massa ja pyörivien osien hitaus yhdessä. Kertoimelle löytyy kirjallisuudesta arvoja ja se voidaan myös määrittää ajoneuvosta kaavalla 13. (18.)

$$\psi = 1 + \frac{J_p + i_o^2 J_k + i_o^2 i_v^2 J_m}{m R_d^2}$$

KAAVA 13

$J_p$  = renkaiden nopeudella pyörivien osien hitausmomentti [ $kgm^2/s^2$ ]

$i_o$  = vetopyörästön välityssuhde [–]

$J_k$  = vaihteiston nopeudella pyörivien osien hitausmomentti [ $kgm^2/s^2$ ]

$i_v$  = vaihteiston välityssuhde [–]

$J_m$  = moottorin nopeudella pyörivien osien hitausmomentti [ $kgm^2/s^2$ ]

$R_d$  = renkaiden dynaaminen vierintäsäde [m]

Hitauskerrointa kasvattavat suuret pyörivien osien hitausmomentit, suuret välityssuhteet, pienet renkaat sekä alhainen ajoneuvon massa (18). Yksinkertaisimmillaan raskaassa kalustossa hitauskerroin voidaan ottaa huomioon lisäämällä renkaiden massa uudelleen ajoneuvoyhdistelmän massaan kaavan 14 mukaisesti (19, s. 14).

$$F_{acc} = (m_{rot} + m) \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

KAAVA 14

$m_{rot}$  = renkaiden yhteenlaskettu massa [kg]

$t$  = aika [s]

$v$  = nopeus [m/s]

## 5 MITTAUSMENETELMÄT

Ajovastusten mittaamiseen on olemassa useita menetelmiä. Vastusvoimat voidaan mitata kokonaisuutena tai osa-alueittain. Eri osa-alueiden, kuten ilmanvastuksen tai vierintävastuksen mittaaminen vaatii kuitenkin yleensä laboratoriokohteita. Toinen vaihtoehto vastusvoimien osa-alueiden arviointiin on tietokonemallinnus. Ajovastusvoimien yhteisvaikutus ajoneuvoon voidaan mitata tiekokeiden avulla. Käytettyjä tiekokeita ovat tasanopeus- ja rullauskoe. Tiekoekiden etuna on niiden suhteellinen edullisuus ja heikkoutena tulosten huono toistettavuus ja ulkoisten olosuhteiden vaikutus. (3, s. 728–737.)

### 5.1 Tiekoeket

Ajovastusten selvittämiseksi tehdyt tiekoeket voidaan jakaa kahteen ryhmään, rullaus- ja tasanopeuskokeet. Rullauskoeketssa ajoneuvo kiihdytetään tavoitenopeuteen ja nopeuden tasoituttua ajoneuvon moottori kytketään irti voimansiirrosta yleensä vaihtamalla vaihde vapaalle tai vapauttamalla kytkin. Ajoneuvon hidastuvuus ilmaisee ajovastusten suuruuden ja ajoneuvolla rullataan joko pysähdykseen tai tavoitenopeuteen asti. Rullauskoeketn aikana mitatuista kiihtyvyyden, nopeuden, matkan ja ajan arvoista voidaan määrittää ajovastus. Rullauskoeketssa tulee myös huomioida pyörivistä massoista, kuten renkaista ja voimansiirrosta aiheutuva inertia. (7, s. 224.)

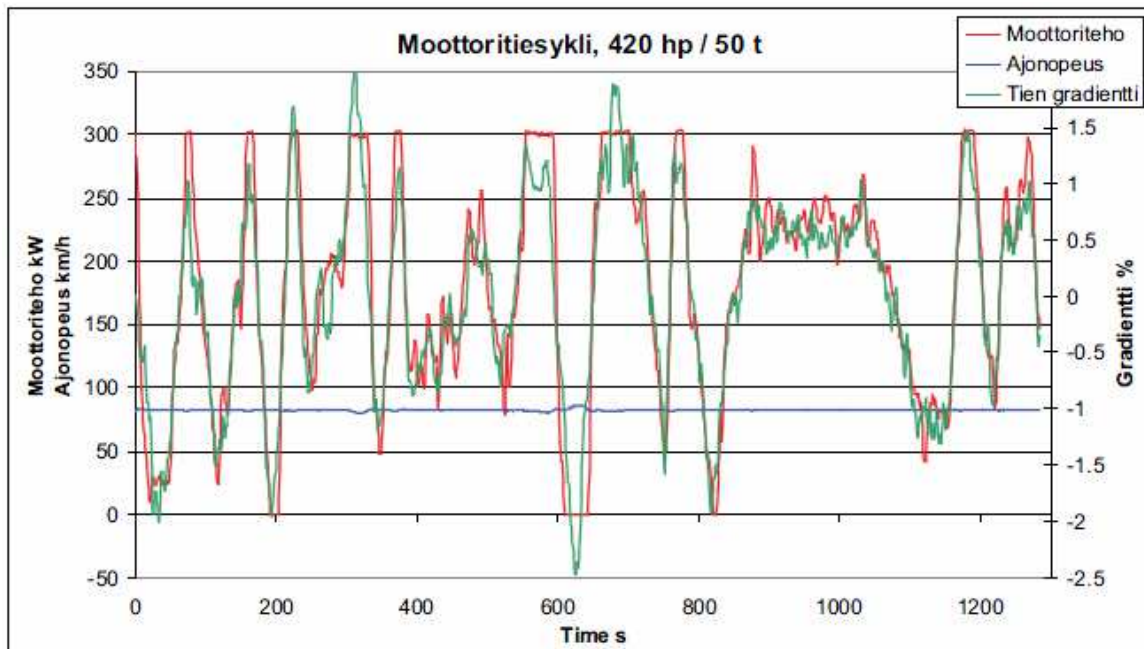
Tasanopeuskokeissa ajoneuvoa ajetaan tasanopeudella ja samalla mitataan ajoneuvon polttoaineenkulutusta. Polttoaineen energiasisällön ja matkatietojen avulla voidaan määrittää vastusvoimat. Menetelmä vaatii moottorin hyötysuhtetn tuntemista eri kierros- ja kuormitusalueilla sekä voimansiirron ja lisälaitteiden aiheuttamien häviöiden tuntemista. Ongelmia tuottaa varsinkin hyvin hitaalla nopeudella ja kevyellä kuormalla tehdyt mittaukset. Luotettavampia tuloksia voidaan saavuttaa, jos ajoneuvon vetäville pyörille asennetaan vääntöä mittaavat anturit. Tällöin voidaan vähentää mittaustuloksiin vaikuttavia epävarmuustekijöitä. (19, s. 21–28.)

Erityisen mielenkiinnon kohteena on ajovastuksen vaikutus polttoaineenkulutukseen eri ajoneuvojen ja rakenneratkaisujen välillä. Tiekoeketilla pyritään selvittä-

mään ajovastusten suuruus ja mahdollisesti erottamaan vierintä- ja ilmanvastuksen osuudet ajovastuksesta. Eri ajoneuvoyhdistelmillä ja rakenneratkaisuilla saatuja ajovastustuloksia voidaan hyödyntää dynamometri- ja tietokonesimulaatioissa. Simulaatiossa tutkitaan ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutusta halutulla ajosyklillä. Suorittamalla sama ajosykli eri ajoneuvoyhdistelmille tai rakenneratkaisuille saadaan vertailukelpoisia tuloksia. (19, s. 4–5; 17, s. 72–74.)

### 5.1.1 Tien pituuskaltevuus

Kokeet tulisi suorittaa mahdollisimman suoralla ja tasaisella tiellä, jonka suurin pituuskaltevuus saa olla 0,5 % ajetulla testimatalla (7, s. 224). Tien pituuskaltevuuden vaikutus voidaan huomioida joko laskennallisesti tai ajamalla koe molempiin ajosuuntiin, jolloin tulos keskiarvoistuu. Suurin hankaluus pituuskaltevuuden huomioimisessa on kaltevuuden ja ajoneuvon sijainnin määrittämisessä. Varsinkin tasanopeudella suoritettavissa kokeissa on otettava huomioon tien pituuskaltevuuden muutokset, sillä ne vaikuttavat moottorin tuottamaan tehoon (kuva 53). (21, s. 15–16; 17, s. 72.)



KUVA 53. VTT:n mittaama tien kaltevuuden vaikutus moottorin antamaan tehoon ajettaessa tasanopeudella (21, s. 16)

### 5.1.2 Tuulen vaikutus

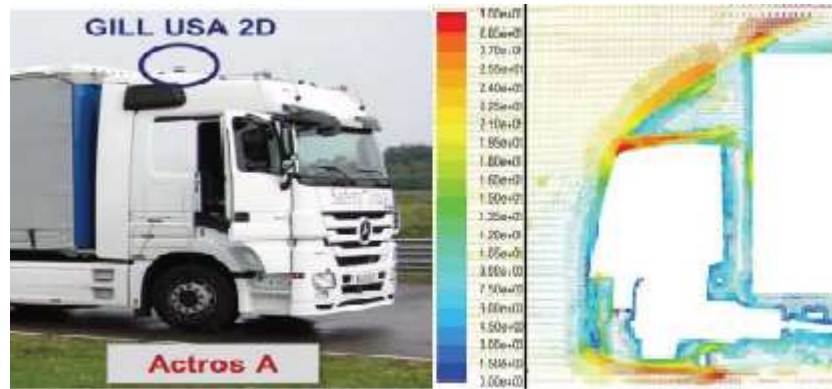
Tuulen vaikutuksen huomioiminen tiekokeissa on haastavaa. Suositeltavinta on suorittaa kokeet hetkenä, jolloin tuulta ei ole tai tuulennopeus on alle 1 m/s. Tuulenvaihteluiden takia ainoa toimiva menetelmä tuulennopeuden ja suunnan mittaamiseksi on ajoneuvoon asennettava tuulianturi. Mittalaite tulisi sijoittaa sellaiseen kohtaan, jossa ajoneuvo ei aiheuta häiriötä tuloksiin. Suositeltavin kohta on tarpeeksi kaukana ajoneuvon edessä (kuva 54). (17, s. 72–73; 19, s. 9.)



*KUVA 54. Tuulianturin sijoitus optimaaliseen kohtaan ajoneuvon eteen (17, s. 73)*

CFD-mallinuksella voidaan myös pyrkiä selvittämään optimaalinen kohta tuulianturille, mikäli mittalaitetta ei käytännöllisistä syistä haluta sijoittaa ajoneuvon etupuo-  
lulle (kuva 55). Tällaisessa tapauksessa ajoneuvo ohjaa tuloksia vääristävän ilma-  
virran mittalaitteen ohi ja mittaustuloksissa päästään lähelle vapaassa ilmassa ole-  
via tuulen nopeuksia. Ajoneuvoon asennetun mittalaitteen ilmoittamien tulosten  
varmistamiseksi tien viereen suositellaan asennettavaksi ylimääräinen tuulianturi.  
(19, s. 9–10.)





KUVA 55. Tuulianturin sijoitus CFD-mallinnuksella havaittuun optimi kohtaan (19, s. 10)

Ajoneuvon keskilinjän suunnassa vaikuttavan tuulen huomioiminen on verrattain helppoa. Yksinkertaisimmillaan tuulensuunnasta riippuen tuulennopeus joko lisätään tai vähennetään ajoneuvonnopeudesta. Kuitenkin on huomioitavaa, ettei edestakaisella rullauskokeella välttämättä saada samanlaisia keskimääräisiä myötä- ja vastatuulennopeuksia. Tällä voi olla vaikutusta tulosten hajontaan. (19, s. 23–24; 17, s. 72.)

Sivutuulen vaikutuksen huomioiminen on keskilinjansuuntaista tuulta vaikeampaa. Sivutuuli vaikuttaa jokaiseen ajoneuvoon ja yhdistelmään yksilöllisesti. Suuntaa antavilla arvoilla, kuten kuvissa 41 ja 43, voidaan arvioida sivutuulen vaikutusta ajoneuvojen ilmanvastukseen. Virheen minimoimiseksi tiekokeita ei suositella suoritettavaksi yli 3°:n epäsuorilla ilmavirran vaikutuskulmilla. Lisäksi erityistä huomiota tulee käyttää koealueen valinnassa. Puut, pensaat, rakennukset ja muut tuulta ohjaavat kappaleet ja esteet voivat vaikuttaa testituloksiin. (3, s. 737.)

Graz University of Technologyn tekemissä ajovastuskokeissa käytettiin tasanopeus- ja rullauskokeita. Kokeissa havaittiin, että tasanopeudella mitatut ilmanvastuksen arvot olivat yhtenäisempiä ja vähemmän herkkiä tuulenvaihteluille, kuin rullauskokeella tehdyt mittaukset, Rullauskokeiden määrää lisäämällä voidaan parantaa tulosten luotettavuutta. (19, s. 21–25.)

## 5.2 Ilmanvastus

Ilmanvastuksen mittaamiseen tiekokeiden lisäksi on mahdollista käyttää CFD-mallinnusta sekä tuulitunnelikokeita 1:1 ja pienoismalli koossa. Tuulitunnelikokeiden



suorittaminen 1:1 koossa on varsin vaikeaa raskaiden ajoneuvojen koon takia. Maailmassa on tällä hetkellä ainoastaan kolme tuulitunnelia, joihin puoliperävänuyhdistelmä mahtuu. Kyseiset tuulitunnelit ovat DNW Alankomaissa, NRC Kanadassa ja NFAC Kaliforniassa. (3, s. 728, 732–734.)

Käytännöllisistä syistä tuulitunnelikokeissa käytetään yleensä pienoismallia. Pienoismalleja käytettäessä tulee huomioida pienoismallin koon suhde alkuperäiseen ajoneuvoon sekä mitattavan ilmavirran nopeus. Esimerkiksi käytettäessä 1:4 pienoismallia tulee ilmanvirtausnopeutta kasvattaa nelinkertaiseksi. Tästä syystä yleensä pienoismalleja 1:2,5 käytetään ajoneuvojen muotojen aerodynaamisuu-den selvityksessä. Saatujen ilmanvastuskertoimien on todettu olevan melko yhteneviä 1:1 ajoneuvojen kanssa. Ajoneuvoyhdistelmiä tarkasteltaessa käytetään usein pienempiä kuin 1:4 malleja. Yleensä ajoneuvoyhdistelmiä tutkittaessa halutaan tietää ilmavirran käyttäytyminen kuorma-auton ja perävaunun ympärillä, eikä yksityiskohdilla ole niinkään merkitystä. (3, s. 728–732.)

CFD-mallinnus on yleistymässä myös raskaan kaluston ilmanvastuksen tutkimisessa. Tuulitunnelikokeisiin verrattuna mallinnus tarjoaa helpomman ja halvemmän ratkaisun. Mallinnus tarjoaa myös mahdollisuuden kokeilla eri muotoratkaisuja verrattain nopeasti. Moottoritilan läpi virtaavalla ilmalla on suuri merkitys ajoneuvon ympärillä olevan ilman käyttäytymiseen, eikä sitä saa jättää huomioimatta. Sama koskee myös pienoismalleilla suoritettavia kokeita. (3, s. 735–736.)

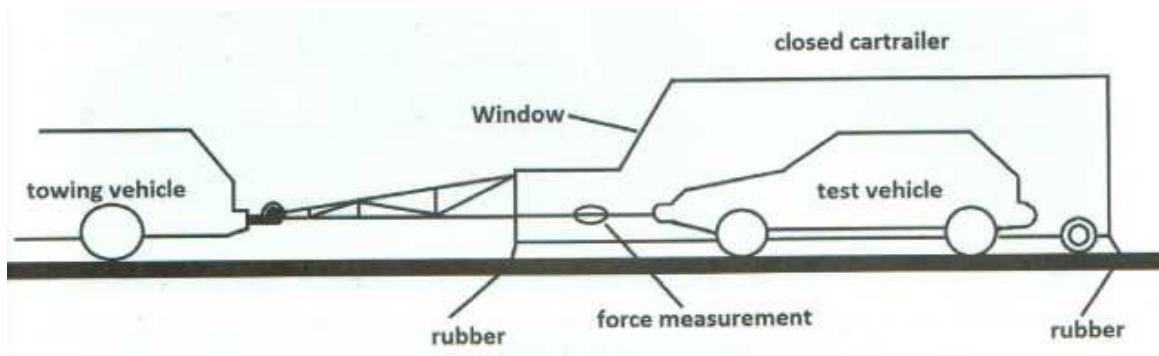
### **5.3 Vierintävastus**

Renkaan erittäin muuttuvien ominaisuuksien takia renkaille on ollut hankala kehittää laskenta- ja mittausmenetelmää, joka huomioisi renkaan vierimisvastuksen muutokset eri muuttujien suhteen. Osittain tämän johdosta tiekokeissa vierintävastus usein ajatellaan muuttumattomaksi ajonopeuden suhteen. Tämä oletamus kuitenkin luo virhettä ilmanvastus- ja vierintävastusvoiman suhteelle. Virhe vääristää kokeista saatavia ilmanvastus- ja vierintävastuskertoimia. (3, s. 737.)

Tämän virheen syntymistä on pyritty ehkäisemään suorittamalla renkaille vierintävastuskokeita laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriokokeissa on pyritty selvittämään renkaiden ominaisuuksia nopeuden, kuorman, lämpötilan ja rengaspaineen suhteen. Eroja on kuitenkin ilmennyt laboratoriokokeiden ja tiekokeiden tulosten

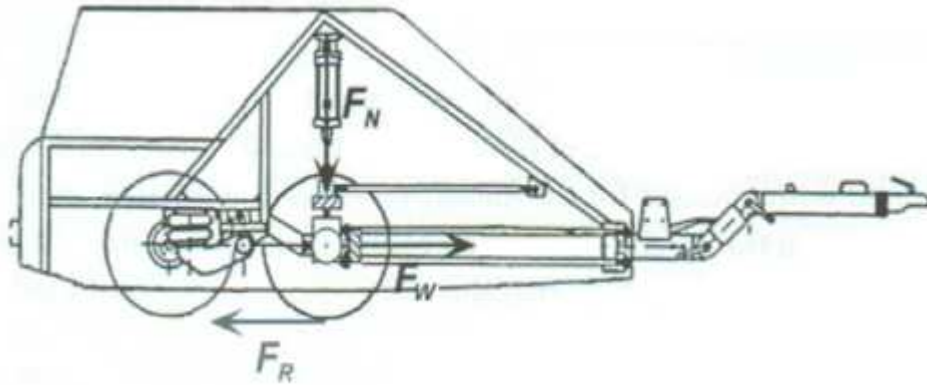
välillä. Usein laboratoriokokeissa rengasta pyöritetään pyöreällä rummulla, jolloin renkaan kosketusala ja muodonmuutos eivät vastaa tasaisella tiellä tapahtuvaa muodonmuutosta. Lisäksi on huomioitava mahdollisten pyöränkulmien aiheuttama vastus. (22, s. 1022.)

Henkilöautoille on kehitetty menetelmä, jossa ajoneuvo asetetaan hinattavan suojakuvun sisään (kuva 56). Tällöin tutkittavasta ajoneuvosta voidaan poistaa ilmanvastuksen aiheuttama vastusvoima ja jäljelle jää tasaisella tiellä ja nopeudella ainoastaan todellinen renkaiden vierimisvastus sekä voimansiirron häviöt. Jonkin verran syntyy häviöitä mitattavan ajoneuvon kuljettajan ohjausliikkeiden takia mutta nämä katsotaan vähäisiksi. Tällainen menetelmä on kuitenkin sopimaton raskaille ajoneuvoille. (22, s. 1023.)



*KUVA 56. Vierintävastuksen ja voimansiirron häviöiden mittaaminen tiekokeilla ilman ilmanvastuksen vaikutusta (22, s. 1023)*

FKFS on kehittänyt henkilöauton renkaiden vierintävastuksen mittaamiseen tarkoitetun perävaunun (kuva 57). Tämän tyyppisellä perävaunulla voidaan mitata renkaiden vierintävastus ilman voimansiirron tai ihmisen aiheuttamaa häviötä. Saatua vierintävastus on erittäin lähellä ajoneuvon vapaasti pyörivän renkaan vierintävastusta. (22, s. 1023.)



*KUVA 57. FKFS:n kehittämä renkaiden vierintävastuksen mittausperävaunu. Suurin rengaskoko, joka perävaunulla voidaan mitata on 275/35 R20 (22, s. 1024)*

Vierintävastusta voidaan arvioida myös mallinnuksen avulla. Aikaisemmin renkaiden vierintävastuksen ennustamiseen on käytetty empiirisiä ja semi-empiirisiä malleja. Vaikka näillä malleilla saadaankin hyviä tuloksia, vaativat ne paljon kokeellisia mittauksia ja niiden käytettävyys on rajattu mitattujen renkaiden rakenteeseen. Empiiristen ja semi-empiiristen menetelmien rinnalle onkin ilmestynyt tietokonepohjaisia mallinnusmenetelmiä. (10, s. 509.)

Varsinkin FEA-menetelmä on kasvattanut suosiota (Finite Element Analysis). FEA-menetelmä tarjoaa nopean keinon renkaan ominaisuuksien ja rakenteen muutosten arviointiin. Vierintävastuksen arviointi menetelmällä perustuu enimmäkseen renkaan muodonmuutoksen aiheuttaman lämpenemisen ennustamiseen. Koska renkaan hystereesin aiheuttamat häviöt muuttuvat lämmöksi ja renkaan vierintävastuksesta noin 90 % johtuu kumin hystereesistä, voidaan menetelmällä saada kohtuullisen luotettavia arvioita. (10, s. 509–510.)

#### **5.4 Ajovastusvoimien vaikutus polttoaineenkulutukseen**

Ajovastusvoimien vaikutusta ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutukseen voidaan karkeasti arvioida vastustavien voimien, moottorin sisäisten häviöiden, voimansiirron häviöiden sekä polttoaineen alemman lämpöarvon avulla. Kaavalla 15 voidaan arvioida moottorin kampiakselille tuottamaa energiaa. (10, s. 524 – 529.)

$$E_m = (E_{av}/\varepsilon) + P_{al}T$$

KAAVA 15

$E_m$  = moottorin kampiakselille tuottama energia [J]

$E_{av}$  = tarvittava energia ajovastusvoimien voittamiseksi [J]

$\varepsilon$  = voimansiirron hyötysuhde [–]

$P_{al}$  = apulaitteiden keskimääräinen tehontarve [W]

$T$  = ajosyklin kesto [s]

Moottorin kuluttaman polttoaineen sisältämä energia voidaan määrittää kaavalla 16, jos tunnetaan moottorin keskimääräinen polttoaineenkulutus ajosyklin aikana, kuljettu matka sekä polttoaineen alempi lämpöarvo (10, s. 524).

$$E_{pa} = C_{kk}DH_0$$

KAAVA 16

$E_{pa}$  = polttoaineen sisältämä energia [J]

$C_{kk}$  = polttoaineenkeskikulutus ajettulla matkalla [kg/m]

$D$  = ajosyklin aikana kuljettu matka [m]

$H_0$  = polttoaineen tilavuuden alempi lämpöarvo [J/kg]

Moottorin tehtävä on muuttaa polttoaineen sisältämä lämpöenergia mekaaniseksi tehoksi kampiakselilla. Kaikkea polttoaineen sisältämää energiaa ei kuitenkaan moottorin sisäisten häviöiden takia voida hyödyntää. Moottorin tuottama ja polttoaineen sisältämä energia ovat toisiinsa suhteellisia ja voidaan määrittää kaavalla 17. (10, s. 525.)

$$E_{pa} = aN + E_m/\eta$$

KAAVA 17

$a$  = moottorin kitkahäviökerroin [–]

$N$  = moottorin pyörimät kierrokset ajosyklin aikana [–]

$\eta$  = moottorin terminen hyötysuhde ( $1 - \eta_{mek.}$ ) [–]

$\eta_{mek.}$  = moottorin mekaaninen hyötysuhde [–]

Kaavan 17 mukainen moottorin tuottaman ja polttoaineen sisältämän energian välinen suhde on todettu olevan kohtuullisen luotettava, jos ajetaan normaaleissa ajo-olosuhteissa sekä moottorin tuottaman tehon ollessa alle 2/3 täydestä mootto-

rin tuottamasta tehosta. Moottorin termisen hyötysuhteen sekä kitkahäviökertoimen on havaittu olevan melkoisen yhtäläiset monille eri moottoreille. Yhdistämällä kaavat 15 ja 17 saadaan yhtälö, josta selviää moottorin keskikulutus ajetulle matkalle ja ajovastusten voittamiseksi tarvittavalle energialle. Keskikulutus voidaan määrittää kaavalla 18. (10, s. 525.)

$$C_{kk} = \left( aN + \frac{E_{av}}{\varepsilon\eta} + \frac{P_{al}T}{\eta} \right) / (DH_0) \quad \text{KAAVA 18}$$

Ajovastus koostuu vierintävastuksesta, mäennousuvastuksesta, ilmanvastuksesta sekä inertian aiheuttamasta kiihdytysvastuksesta. Summaamalla osavastukset yhteen saadaan ajovastusten voittamiseksi tarvittava energia (kaava 19). (10, s. 526.)

$$E_{av} = E_r + E_g + E_a + E_i \quad \text{KAAVA 19}$$

$E_r$  = vierintävastuksen energia [J]

$E_g$  = mäennousuvastuksen energia [J]

$E_a$  = ilmanvastuksen energia [J]

$E_i$  = inertian aiheuttama energia [J]

Jokainen ajovastusenergian tekijöistä on määritetty integroimalla kunkin vastusvoima ajetun matkan suhteen. Kaavan yksinkertaisuuden vuoksi ei huomioida jarrutustilanteiden vaikutusta ajovastusenergiaan. Yhdistämällä kaavat 18 ja 19 saadaan yhdistettyä vastusvoimat polttoaineenkulutukseen kuljetulla matkalla (kaava 20). (10, s. 526.)

$$C_{kk} = \left( aN + \frac{E_r + E_g + E_a + E_i}{\varepsilon\eta} + \frac{P_{al}T}{\eta} \right) / (DH_0) \quad \text{KAAVA 20}$$

Koska vierintävastus on tämän tutkimuksen mielenkiinnon kohteena, eristetään se muista vastusvoimista, kaava 21 (10, s. 526).

$$E_r = F_{rka}D \quad \text{KAAVA 21}$$

$F_{rka}$  = kaikkien ajoneuvoyhdistelmän pyörien keskimääräisten vierintävastusvoimien summa kuljetulla matkalla [N]

Vierintävastuksen osuus ajoneuvon polttoaineenkulutuksesta voidaan määrittää kaavalla 22 (10, s. 526).

$$\frac{C_r}{C_{kk}} = \frac{F_{rka}}{\eta \varepsilon H_0 C_{kk}} = \frac{f_r m g}{\eta \varepsilon H_0 C_{kk}} \quad \text{KAAVA 22}$$

$C_r$  = vierintävastuksen osuus polttoaineenkeskikulutuksesta ajotulla matkalla [kg/m]

Vierintävastusvoiman muutoksen vaikutusta polttoaineenkulutukseen voidaan arvioida kaavalla 23. Oletetaan, ettei vierintävastusvoiman muutos vaikuta muihin ajovastuksiin. (10, s. 526.)

$$\Delta C_{kk} = \frac{\Delta F_{rka}}{\eta \varepsilon H_0} = \frac{\Delta f_r m g}{\eta \varepsilon H_0} \quad \text{KAAVA 23}$$

Mikäli moottorin ja voimansiirron hyötysuhteen kertoimia ei ole tiedossa, voidaan kevyellä kalustolla käyttää arvoja  $\eta=0,408$  sekä  $\varepsilon=0,90$ . Nykyaikaisissa ajoneuvoissa nämä arvot ovat melkoisen yhteneviä. Kuitenkin tämän arvion sisältämien oletuksien takia tuloksissa on karkeasti 10–20 % virhettä. Mikäli moottorin ominaiskulutuksen ja hyötysuhteen arvot ovat tiedossa, voidaan arvion tuloksien luotettavuutta parantaa huomattavasti. (10, s. 525, 527, 529.)

Hiilidioksidipäästöt voidaan määrittää käyttämällä muunnoskerrointa  $c_{hd}$ . Kerroin kuvaa polttoaineen palamisesta syntyvän hiilidioksidin massaa suhteessa poltetun polttoaineen massaan. Diesel-polttoaineelle  $c_{hd} = 3,2317$ . Hiilidioksidipäästöt voidaan määrittää grammoina tonnikipometriä kohden kertomalla kuljetustehokkuus hiilidioksidin muunnoskerroimella (kaava 24). (16, s. 169.)

$$C_{CO_2} = c_{hd} C_{kt} \quad \text{KAAVA 24}$$

$C_{CO_2}$  = hiilidioksidipäästöt [g/tkm]

$c_{hd}$  = hiilidioksidin muunnoskerroin [3,2317]

$C_{kt}$  = kuljetustehokkuus [g/tkm]

## 6 PERÄVAUNUJEN VERTAILU

Tutkimuksessa selvitettiin kolmen erilaisen perävaunun vierintävastusta ja niiden vaikutusta ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutukseen. Eroja perävaunuissa oli akseleiden määrässä sekä akseleilla olevissa renkaissa. Perävaunujen vierintävastusten välille eroja aiheuttaa renkaiden yksikkö- ja paripyöräasennus sekä akseleihin kohdistuva pystykuorma. Liitteestä 1 nähdään perävaunujen rakenne sekä akseleiden pystykuormat kuormattuna ja tyhjänä (23, s. 1–3). Kolmas varsinainen perävaunu, jota ei ole liitteissä, oli 5-akselinen, jossa kaikilla akseleilla on paripyöräasennus. 5-akselisien perävaunujen suurin sallittu yhdistelmämassa on 76 t ja 6-akselisen perävaunun suurin sallittu yhdistelmämassa on 74 t.

### 6.1 Vierintävastuskertoimet ja -voimat

Perävaunujen suurin kokonaismassa oli kaikille perävaunuille 42 000 kg. Pystysuuntaisen normaalivoiman suuruus saatiin kertomalla perävaunun massa maanvetovoiman kiihtyvyydellä  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Pyöräasennus otettiin huomioon käyttämällä paripyörille kuvan 37 mukaista vierintävastuskerrointa 0,009 sekä yksikköpyörille vierintävastusta 0,006. Lisäksi oletettiin, että kaikki renkaat ovat vyörakenteisia ja että ajoneuvoyhdistelmällä ajetaan tasaisella tiellä. Tällöin vierintävastuksen määrittämisessä ei ole tarvetta huomioida mäennousukulmaa, sillä kaavassa 3 oleva  $\cos(\alpha)$  saa tasaisella tiellä arvon 1.

Ensimmäiseksi määritettiin vierintävastusvoima 5-akseliselle perävaunulle, jossa oli pari- ja yksikköpyörillä varustettuja akseleita. Vierintävastusvoima määritettiin kertomalla kunkin akselin pystysuuntainen voima, akselille asennettujen pyörien mukaisella vierintävastuskertoimella soveltamalla kaavaa 3. Saadut akselikohtaiset vierintävastusvoimat summattiin yhteen perävaunun vierintävastusvoiman selvittämiseksi.

$$F_r = (f_{r1}m_1 + f_{r2}m_2 + \dots + f_{r6}m_6)g$$

$$F_r = (0,009 * 9000kg + 0,009 * 9000kg + \dots + 0,006 * 7250kg) * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$F_r = 3281,45 \text{ N}$$

Vierintävastuskerroin 5-akseliselle sekarengastetulle perävaunulle voitiin määrittää jakamalla saatu vierintävastusvoima perävaunun massan aiheuttamalla normaalivoimalla. Jälleen sovellettiin kaavaa 3.

$$f_r = F_r / F_z$$

$$f_r = 3281,45 \text{ N} / (42000 \text{ kg} * 9,81 \text{ m/s}^2)$$

$$f_r = 0,00796$$

Perävaunujen vierintävastuskerroin eri ajonopeuksilla määritettiin kaavalla 1 ja muuttamalla kaavan alkuosaa vastaamaan perävaunun vierintävastuskerrointa. Excel-ohjelmalla tehtiin kuvaajat vierintävastuskertoimille ajonopeuksille 0-125 km/h (kuva 58). Esimerkkitapaukset on määritetty ajonopeudella 80 km/h.

Vierintävastuskerroin 6-akseliselle perävaunulle, jossa käytetään yksittäispyöräasennusta ajonopeudella 80 km/h, on määritetty kaavalla 1 (liite 1/3).

$$f_r = 0,006 + 0,23 * 10^{-6} V^2$$

$$f_r = 0,006 + 0,23 * 10^{-6} 80^2$$

$$f_r = 0,007472$$

Vierintävastuskerroin 5-akseliselle perävaunulle, jossa käytetään pariipyöräasennusta 80 km/h, on määritetty soveltamalla kaavaa 1.

$$f_r = 0,009 + 0,23 * 10^{-6} V^2$$

$$f_r = 0,009 + 0,23 * 10^{-6} 80^2$$

$$f_r = 0,010472$$

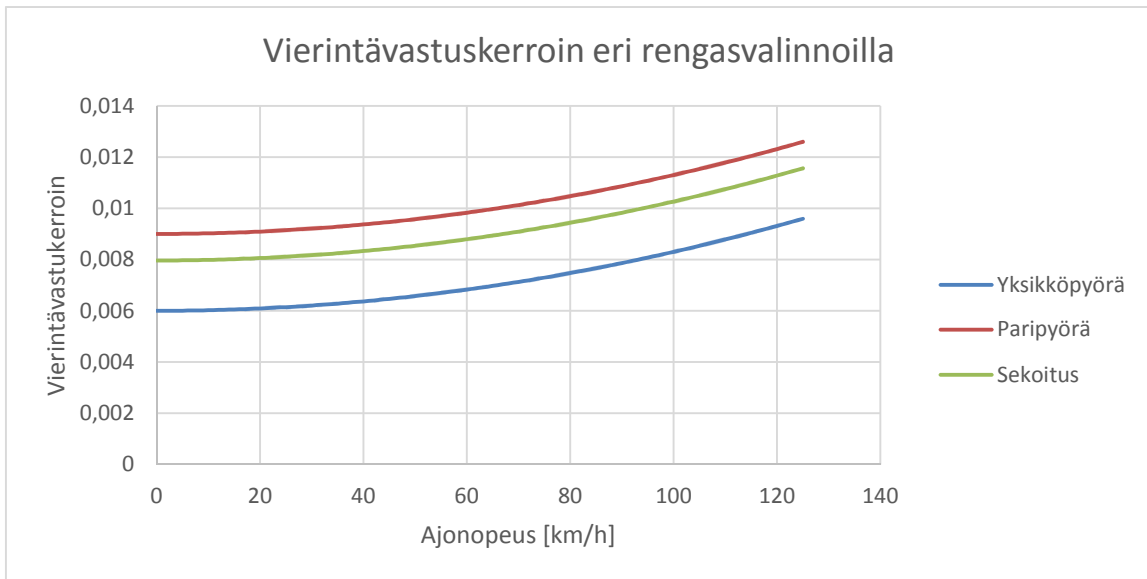
Vierintävastuskerroin 5-akseliselle perävaunulle, jossa käytetään molempia rengas asennuksia, ajonopeudella 80 km/h, on määritetty soveltamalla kaavaa 1 (liite 1/2).

$$f_r = 0,00796 + 0,23 * 10^{-6} V^2$$

$$f_r = 0,00796 + 0,23 * 10^{-6} 80^2$$

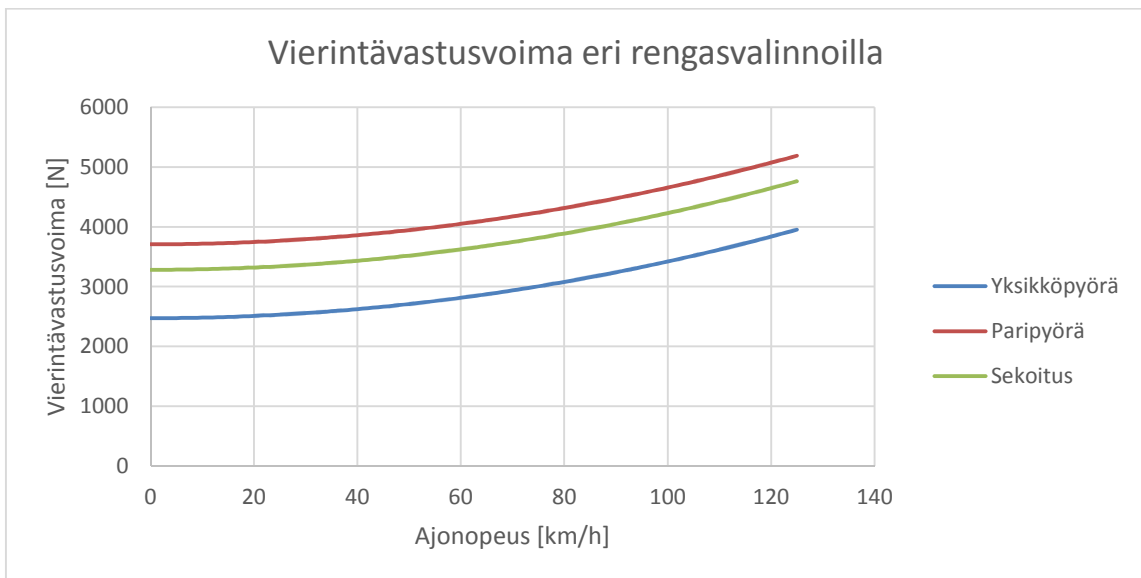
$$f_r = 0,00944$$





*KUVA 58. Vierintävastuskerroin eri rengasvalinnoilla ajonopeuden suhteen*

Kun vierintävastuskertoimet ovat tiedossa eri ajonopeuksilla ja rengasvalinnoilla, voidaan määrittää vierintävastusvoimat samankaltaiseen kuvaajaan käyttämällä kaavaa 3 (kuva 59).



*KUVA 59. Vierintävastusvoima eri rengasvalinnoilla ajonopeuden suhteen*

## 6.2 Vierintävastuksen vaikutus polttoaineenkulutukseen

Vierintävastusvoiman vaikutusta polttoaineenkulutukseen arvioitiin kohdan 5.4 mukaisella menetelmällä. Perävaunuihin kytkettävän kuorma-auton tietojen puuttumisen vuoksi käytettiin kuvan 17 mukaisia Euro 5 -tason moottorin hyötysuhteen arvoja. Moottorin termiselle hyötysuhteelle saatiin täten arvo  $\eta = 0,551$  ja voimansiirron hyötysuhteelle arvo  $\varepsilon = 0,973$ . Vertailukohteena käytettiin 5-akselista perävaunua, jossa kaikilla akseleilla on paripyörät. Vierintävastusvoiman muutoksen vaikutus polttoaineenkulutukseen määritettiin kaavalla 23, jossa arvona  $\Delta F_{rka}$  käytettiin vertailtavien perävaunujen vierintävastusvoiman erotusta. Polttoaineen  $H_0$  arvona käytettiin dieselin alempaa lämpöarvoa suhteessa tilavuuteen,  $H_0 = 35,178 \text{ MJ/l} = 35,178 * 10^9 \text{ J/m}^3$ . (24, s. 316.)

Oletetaan, että kaikkien perävaunujen kokonaismassa on 42 000 kg ja että muut ajovastukset eivät muutu vierintävastuksen muuttuessa. Lisäksi oletetaan, että renkaiden ominaisuudet ovat yhtäläiset, jolloin kaikki ulkoiset ja sisäiset tekijät vaikuttavat samalla tapaa kaikkiin renkaisiin. Oletetaan myös renkaiden sorto- ja Camber-kulmien olevan  $0^\circ$  ja että ajetaan tasaisella tiellä kaikkien renkaiden ollessa täysin vapaasti pyörivässä tilassa.

Ensimmäiseksi verrattiin 5-akselista perävaunua, jossa kaikki pyörät olivat paripyörällisiä, toiseen 5-akseliseen perävaunuun, jossa kaksi akselia oli varustettu yksikköpyörillä ja kolme akselia paripyörillä (liite 1/2).

$$\Delta C_{kk} = \frac{\Delta F_{rkok}}{\eta \varepsilon H_0}$$

$$\Delta C_{kk} = \frac{3708,18\text{N} - 3281,45\text{N}}{0,973 * 0,551 * 37,178 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} * 10^9}$$

$$\Delta C_{kk} = 2,26 * 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$$

Muutetaan saatu tulos muotoon l/100 km, jolla ajoneuvojen keskikulutus yleensä ilmoitetaan.

$$\Delta C_{kk} = 2,26 \frac{l}{100 \text{ km}}$$

Seuraavaksi verrattiin 6-akselista yksikköpyörillä varustettua perävaunua 5-akseliseen paripyörillä varustettuun perävaunuun (liite 1/3).

$$\Delta C_{kk} = \frac{\Delta F_{rkok}}{\eta \varepsilon H_0}$$

$$\Delta C_{kk} = \frac{3708,18\text{N} - 2472,12\text{N}}{0,973 * 0,551 * 37,178 \frac{\text{J}}{\text{m}^3} * 10^9}$$

$$\Delta C_{kk} = 6,55 * 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$$

Muutetaan saatu tulos muotoon l/100 km, jolla ajoneuvojen keskipaino yleensä ilmoitetaan.

$$\Delta C_{kk} = 6,55 \frac{l}{100 \text{ km}}$$

Ainoa ulkoinen tekijä, joka vaikuttaa ajoneuvoyhdistelmien vierintävastukseen, on ajonopeus. Kuten kohdassa 6.1 havaitaan, vierintävastuskertoimen ajonopeuden huomioiva osa on kaikille renkaan asennustavoille sama. Täten sillä ei ole vaikutusta polttoainekulutuksen alenemiseen, sillä vierintävastusvoimien erotus pysyy vakiona (kuva 59).

### 6.3 Kuljetustehokkuuden arviointi

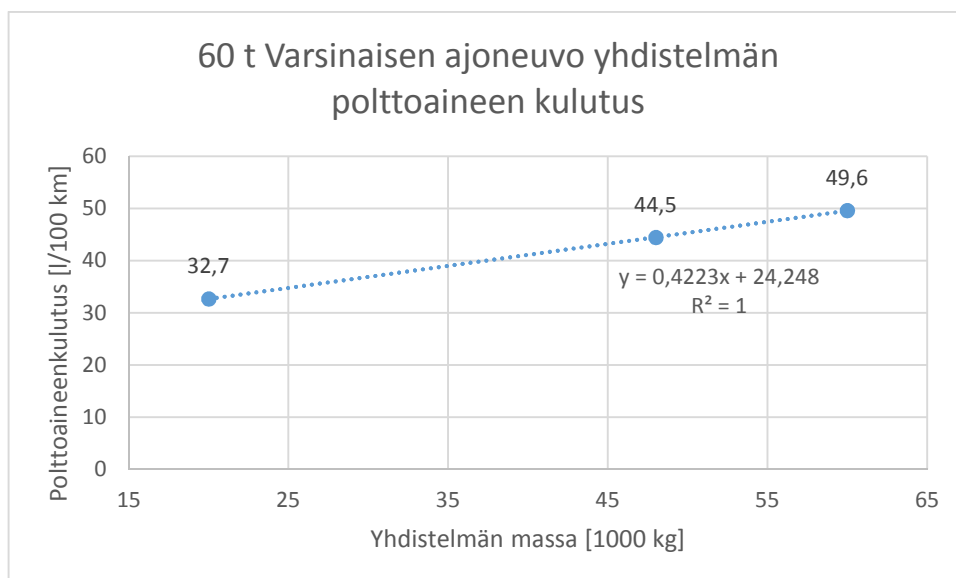
Ajoneuvojen kuljetustehokkuutta pyrittiin arvioimaan kulutetun polttoaineen ja kuljetetun hyötykuorman näkökulmasta. Arvioitaessa pienentyneiden vierintävastuksien aiheuttaman polttoainesäästön vaikutusta kuljetustehokkuuteen tarvitaan ajoneuvoyhdistelmän keskipaino. Keskipainotieto päädyttiin hakemaan VTT:n LIPASTO-laskentajärjestelmän tuloksista. LIPASTO on Suomen liikenteen pakokaasupäästöjen ja energiankulutuksen laskentajärjestelmä. Järjestelmästä on löydettävissä tiellä kuljetettavan tavaraliikenteen päästöjen ja energian- ja polttoainekulutuksen tietoja. Käytettäväksi keskipainon arvoksi päätettiin valita Euro 5 - tason moottorin vuosimallista 2009 eteenpäin laskettu keskipaino 60 t ajoneuvoyhdistelmälle maantieajossa. Järjestelmään ei ollut vielä ilmestynyt korotettujen massojen mukaisia arvoja. Tietokannasta oli saatavissa keskipainon arvot tyhjälle, 70 % kuormalle ja täydelle kuormalle (taulukko 2). (25, linkit Yksikköpäästöt -

pääsivu - Liikenteen yksikköpäästöt -> Tieliikenne (Tavaraliikenne kohdasta) -> Täysperävaunuyhdistelmät, Maantieajo.)

*TAULUKKO 2. 60 t varsinaisen ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkeskikulutuksia eri päästötasoisille ajoneuvoille ja kuormituksille. (25, linkit Yksikköpäästöt - pääsivu - Liikenteen yksikköpäästöt -> Tieliikenne [Tavaraliikenne kohdasta] -> Täysperävaunuyhdistelmät, Maantieajo)*

Päästötaso	Kulutus [l/100 km]		
	tyhjä	(70 %:n kuorma)	täysi (40 t kuorma)
--> 1993	31.7	43.1	48.0
EURO 1 (1994 - 1996)	32.2	43.8	48.8
EURO 2 (1997 - 2000)	32.7	44.5	49.6
EURO 3 (2001 - 2006)	33.5	45.7	50.9
EURO 4 (2007 - 2008)	32.7	44.5	49.6
EURO 5 (2009 --> )	32.7	44.5	49.6
EURO 6			
keskimäärin v. 2011	33.0	45.0	50.1

Taulukossa 2 olevat kulutusarvot syötettiin Excel-ohjelman pistekuvaajaan ja pisteiden välille luotiin lineaarinen trendisuora (kuva 60). Kuvaajaan saatiin myös näkyviin trendisuoran yhtälö ja R<sup>2</sup>-arvo. Lineaarista trendikäyrää päädyttiin käyttämään, koska ajovastuksien kaavoissa ajoneuvon massalla ei ole eksponentiaalista vaikutusta.



*KUVA 60. 60 t varsinaisen ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutuksen kasvu yhdistelmän massan kasvaessa*

Kuvaajasta saadun trendisuoran yhtälön avulla voitiin arvioida ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkeskikulutus yhdistelmän painoille 74 t ja 76 t. Suoran yhtälöä on käytetty kaavassa 25.

$$C_{kk} = 0,4223m_y + 24,248$$

KAAVA 25

$m_y$  = ajoneuvoyhdistelmän massa

Polttoaineenkeskikulutus 76 t ajoneuvoyhdistelmille määritettiin kaavan 25 mukaisesti.

$$C_{kk} = 0,4223 * 76 + 24,248$$

$$C_{kk} = 56,34 \text{ l/100 km}$$

Samalla tavalla määritettiin 74 t ajoneuvoyhdistelmälle keskikulutukseksi 55,50 l/100 km.

Polttoaineenkulutuksen lisäksi kuljetustehokkuuden selvittämiseksi tarvittiin ajoneuvoyhdistelmien omamassa. Koska yhdistelmän vetoautoa ei ollut erikseen määritelty, päädyttiin käyttämään yleismallista 4-akselista kuorma-autoa (liite 2). Ajoneuvojen omamassa saatiin TrailerWin-ohjelman ilmoittamista arvoista. Ajoneuvojen omapainoissa ei huomioida yksikkö- ja paripyörärenkaiden massojen eroja. Oletetaan, että kaikkia perävaunuja vetävä kuorma-auto on liitteen 2 mukainen. Taulukossa 3 on lueteltu ajoneuvojen massat kuormattuna ja tyhjänä.

*TAULUKKO 3. Eri ajoneuvojen ja ajoneuvoyhdistelmien massat sekä hyötykuorman massa*

Käytetty perävaunu ja rengastus	Vetoauton massa	Perävau- nun massa	Yhdistelmän massa	Hyötykuorman massa
6-akselinen perävaunu yksikköpyörillä	10 950 kg	10 770 kg	74 000 kg	52 280 kg
5-akselinen perävaunu paripyörillä	10 950 kg	9 410 kg	76 000 kg	55 640 kg
5-akselinen perävaunu sekarengastuksella	10 950 kg	9 410 kg	76 000 kg	55 640 kg

Kuljetustehokkuuden määrittämiseen käytettiin yksikkömuunnoksista johdettua kaavaa 26. Yhtälöllä saadaan tulokseksi kulutettu polttoaineenmassa yksikössä g/tkm. Polttoaineentiheytenä  $\rho_f$  käytettiin arvoa 0,820 kg/l. (23, s. 316.)

$$C_{kt} = (C_{kk}\rho_f * 10)/m_{hk} \quad \text{KAAVA 26}$$

$\rho_f$  = polttoaineen tiheys [kg/l]

$m_{hk}$  = ajoneuvoyhdistelmän hyötykuorma [t]

5-akselisen paripyörillä varustetun perävaunun ajoneuvoyhdistelmän kuljetustehokkuus määritettiin kaavalla 26. Keskikulutukselle käytettiin aiemmin määritettyä arvoa 56,34 l/100 km.

$$C_{kt} = \frac{56,34 \frac{l}{100km} * 0,820 \frac{kg}{l} * 10}{55,64t}$$

$$C_{kt} = 8,30 \text{ g/tkm}$$

6-akselisen perävaunun ajoneuvoyhdistelmälle kuljetustehokkuus määritettiin vähentämällä aikaisemmin lasketusta keskikulutuksesta vierintävastuksen alentamisella saavutettu keskikulutuksen lasku. Kuljetustehokkuus määritettiin soveltamalla kaavaa 26.

$$C_{kt} = ((C_{kk} - \Delta C_{kk})\rho_f * 10)/m_{hk}$$

$$C_{kt} = \frac{(55,50 - 6,55) \frac{l}{100km} * 0,820 \frac{kg}{l} * 10}{52,28t}$$

$$C_{kt} = 7,68 \text{ g/tkm}$$

5-akselisen sekarengastetun perävaunun ajoneuvoyhdistelmän kuljetustehokkuus määritettiin samalla tavoin kuin 6-akselisen perävaunun.

$$C_{kt} = \frac{(56,34 - 2,30) \frac{l}{100km} * 0,820 \frac{kg}{l} * 10}{55,64t}$$

$$C_{kt} = 7,97 \text{ g/tkm}$$

Hiilidioksidipäästöt tonnikipometriä kohden määritettiin kaavalla 24. Esimerkkita-paukseksi määritettiin 5-akselisen paripyörillä varustetun perävaunun ajoneuvoyh-distelmän CO<sub>2</sub>-päästöt.

$$C_{CO_2} = c_{hd}C_{kt}$$

$$C_{CO_2} = 3,2317 * 8,30 \text{ g/tkm}$$

$$C_{CO_2} = 26,83 \text{ g/tkm}$$

Hiilidioksidipäästöt 6-akselisen perävaunun ajoneuvoyhdistelmälle olivat 24,81 g/tkm ja 5-akselisen sekarengastuksella olevan perävaunun ajoneuvoyhdistel-mälle 25,76 g/tkm.

#### 6.4 Tulokset

Kuljetustehokkuus suurimmalla sallitulla yhdistelmämassalla eri perävaunuilla ajo-neuvoyhdistelmässä sekä CO<sub>2</sub>-päästöt tonnikipometriä kohden on esitetty taulu-kossa 4. Virheen arviointi on suoritettu olettamalla, että kaavan 23 tuloksessa on ±10 % virhettä. Polttoaineenkeskikulutuksen laskemiseen käytetty trendisuora sai R<sup>2</sup> arvon 1, joten keskikulutuksen arvoissa ei oletettu olevan merkittävää virhettä.

*TAULUKKO 4. Eri perävaunujen kuljetustehokkuus polttoaineenkulutuksen näkö-kulmasta sekä CO<sub>2</sub> päästöt tonnikipometriä kohden suurimmalla sallitulla ajoneu-von massalla*

Käytetty perävaunu ja yhdistelmän massa	Kuljetustehokkuus [g/tkm]	CO <sub>2</sub> päästöt [g/tkm]	Parannus verrattuna huonoimpaan [%]
5-akselinen, paripyörä, 76 t	8,30	26,83	-
5-akselinen, sekarengastus, 76 t	7,97 ± 0,42 %	25,76 ± 0,42 %	4,02 ± 0,40 %
6-akselinen, Ykkös-pyörät, 74 t	7,68 ± 1,36 %	24,81 ± 1,36 %	7,54 ± 1,24 %

Perävaunujen vierintävastuksen vaikutus ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkeskikulutukseen on ilmoitettu taulukossa 5.

*TAULUKKO 5. Perävaunujen vierintävastuksen vaikutus ajoneuvoyhdistelmien polttoaineen kulutukseen*

Käytetty perävaunu	Polttoaineen- keskikulutuksen lasku [l/100 km]	Parannus verrattuna 5-aks. pari- pyörillä varustetun perävaunun yhdistelmän keskikulutukseen [%]
5-akselinen, paripyörä	-	-
5-akselinen, sekarengastus	2,26 ±10 %	4,02 ± 0,40 %
6-akselinen, yksittäispyörä	6,55 ± 10 %	11,63 ± 1,16 %



## 7 YHTEENVETO

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää erilaisten rengasratkaisujen vaikutusta ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutukseen ja hiilidioksidipäästöjen muodostumiseen. Eroja eri ratkaisujen välille löydettiin mutta tulokset ovat varsin karkeita ja suuntaa antavia. Tuloksiin vaikuttavat suuresti myös yhdistelmän kuorma-auton moottori ja voimansiirto, sillä mitä huonommat hyötysuhteet niillä on, sitä suuremaksi vierintävastuksen pienenemisen tuoma etu kasvaa.

Tuloksista havaitaan, että kahden yksikköpyörillä varustetun akselin käyttäminen 5-akselisessa perävaunussa voi parantaa yhdistelmän polttoaineenkeskikulutusta noin 2,3 l/100 km ajettaessa täydellä yhdistelmän massalla. Polttoaineenkulutus suhteessa ajettuihin tonnikilometreihin paranee tällöin noin 4 %. Yksikköpyörillä varustetun perävaunun yhdistelmämassaa rajoittaa pyörien suurempi tiehen kohdistuva rasitus. Pienemmästä hyötykuormasta huolimatta yksikköpyörillä varustetulla perävaunulla on mahdollista parantaa yhdistelmän kuljetustehokkuutta jopa 7,54 %. Ajoneuvoyhdistelmän keskikulutuksessa tämä tarkoittaa noin 6,5 l:n pudotusta 100 km:n matkalla.

Perävaunujen väliset erot on saatu määritettyä olettamalla, että paripyörällisten renkaiden kehien pituudet samalla akselinnavalla poikkeavat toisistaan ja aiheuttavat siten renkaiden välille pituussuuntaista luistoa. Mikäli paripyörien kehien pituudet ovat todellisuudessa yhtä suuret tai hyvin lähellä toisiaan, ei niiden vierintävastus ole välttämättä yksikköpyöriä huonompi. Kuitenkin vajaapaineisista renkaista raskaan kaluston ajoneuvoyhdistelmissä yleisin on paripyörien sisempi rengas. Alhainen rengaspaine kasvattaa renkaan vierintävastusta ja aiheuttaa rengaspariin epätasaista kulumista.

Eri rengasvalmistajien ja -mallien ominaisuudet poikkeavat toisistaan suuresti niissä käytettyjen runko- ja materiaaliratkaisujen mukaan. Siksi on erittäin hankala arvioida eri akselisto- ja rengasratkaisujen vaikutusta ajoneuvoyhdistelmään ilman mittaustuloksia renkaiden ominaisuuksista. Valitsemalla alhaisen vierintävastuksen omaavia rengasmalleja voidaan ajoneuvoyhdistelmän polttoaineenkulutusta alentaa jopa 10 %. Täytyy kuitenkin muistaa, että renkaan pito ja vierintävastus

ovat usein kilpailevia ominaisuuksia ja toisen parantaminen voi johtaa toisen heikkenemiseen. Renkaiden pito-ominaisuuksia ei pidä uhrata liikaa alhaista polttoainenkulutusta tavoiteltaessa.

Luotettavampien tulosten saavuttamiseksi olisi suositeltavaa suorittaa tiekokeita ajoneuvoyhdistelmien ajovastusten selvittämiseksi. Kokeiden tulosten luotettavuuden varmistamiseksi, varsinkin suoritettaessa rullauskokeita, tulee ottaa huomioon luvussa 5 mainitut kohdat. Perävaunujen ominaisuuksien vertailtavuuden tähden olisi suositeltavaa, että rullauskokeet voitaisiin suorittaa samalla kuorma-autolla ja samankaltaisissa olosuhteissa. Alustadynamometrillä tai tietokonesimulaatiolla voitaisiin kyseisen ajoneuvoyhdistelmän ajovastus- ja ajosykli-tietoja hyödyntää ja saada hyvinkin luotettavia tuloksia.

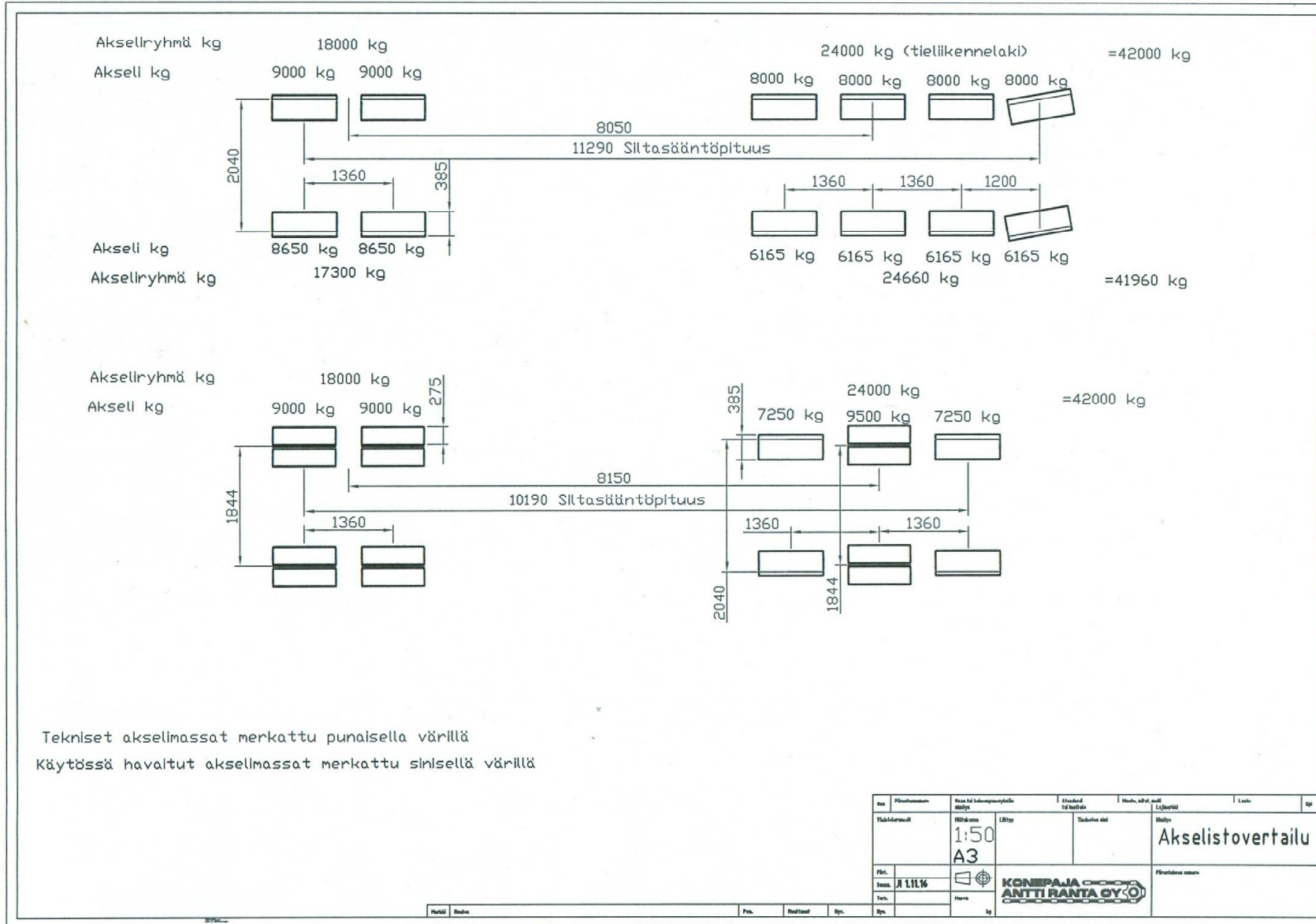
## LÄHTEET

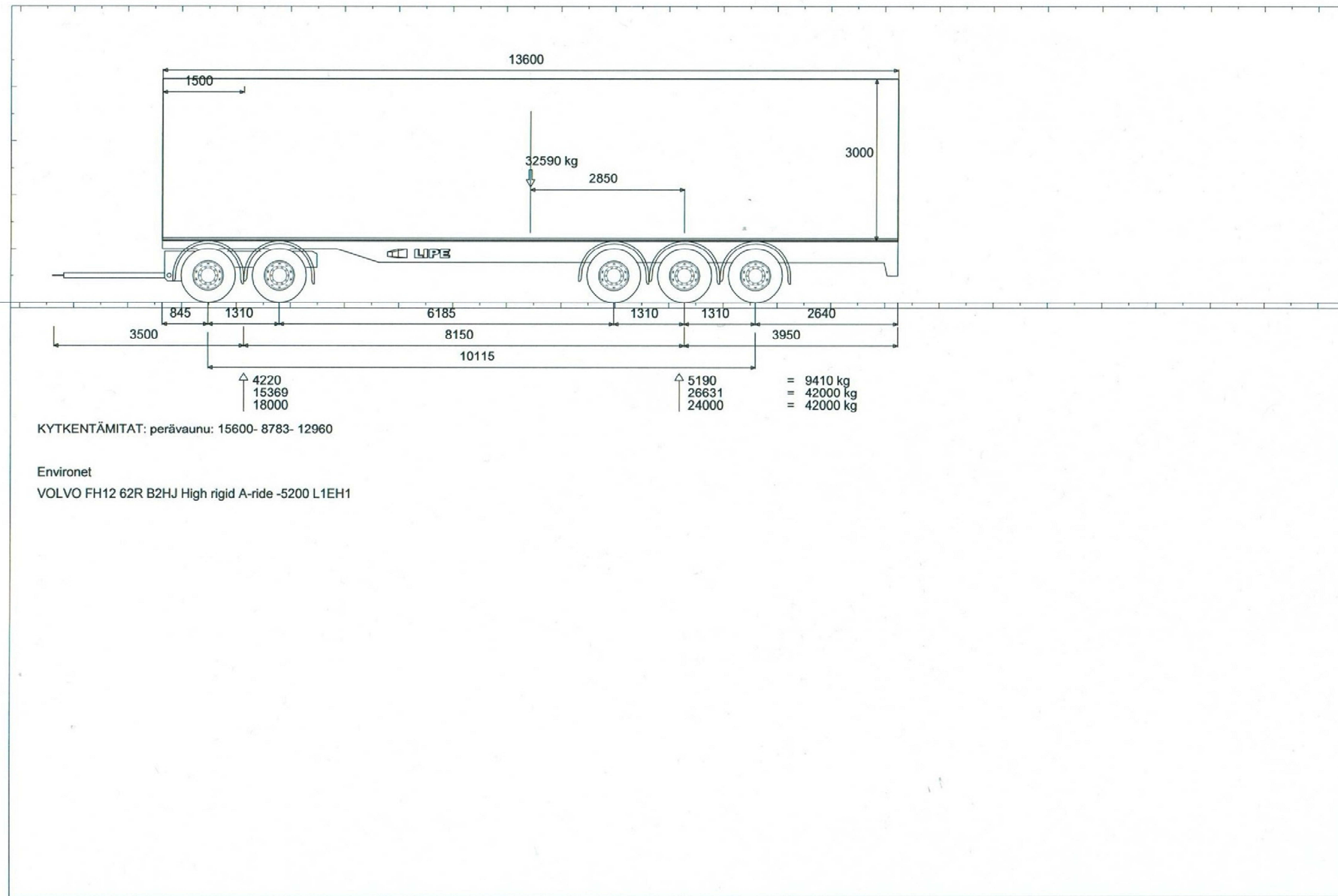
1. Karhunen, Jouni – Pouri, Reijo – Santala Jouko 2008. Kuljetukset ja varastointi. Saarijärvi: Saarijärven Offset Oy.
2. Tilastokeskus. Saatavissa: <http://www.stat.fi>. Hakupäivä 27.4.2017.
3. Kopp, Stephan – Frank, Stephan 2016. Commercial Vehicles. Teoksessa Schuetz, Thomas (toim.) 2016. Aerodynamics of Road Vehicles, 5.th edition. Warrendale: SAE International. S. 711–794.
4. A19.12.2002/1248. Liikenne- ja viestintäministeriön asetus autojen ja perävai-  
nujen rakenteesta ja varusteista. Saatavissa: [http://www.finlex.fi/fi/laki/ajan-  
tasa/2002/20021248#L2P11](http://www.finlex.fi/fi/laki/ajan-<br/>tasa/2002/20021248#L2P11). Hakupäivä 28.4.2017.
5. Technologies and Approaches to Reducing the Fuel Consumption of Medium-  
and Heavy-Duty Vehicles. Washington D.C: The National Academic Press.  
Saatavissa: [https://www.nap.edu/catalog/12845/technologies-and-ap-  
proaches-to-reducing-the-fuel-consumption-of-medium-and-heavy-duty-vehi-  
cles](https://www.nap.edu/catalog/12845/technologies-and-ap-<br/>proaches-to-reducing-the-fuel-consumption-of-medium-and-heavy-duty-vehi-<br/>cles). Hakupäivä 18.5.2017.
6. Puurunen, Juhani 2013. Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä  
annetun Valtioneuvoston asetuksen muuttamisesta. Muistio 27.3.2013. Li-  
kenne- ja viestintäministeriö. Saatavissa: [https://www.lvm.fi/lvm-mahti-port-  
let/download?did=97022](https://www.lvm.fi/lvm-mahti-port-<br/>let/download?did=97022). Hakupäivä 11.5.2017.
7. Wong, Jo Yung 2008. Theory of ground vehicles, 4.th edition. New Jersey: John  
Wiley and sons Inc.
8. Vincken, Dirk – Müller, Reimund – Balcke, Thilo 2014. Tires. Teoksessa Reif,  
Konrad – Dietsche, Karl-Heiz 2014. Bosch Automotive Handbook 9th edition.  
Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

9. Tuononen, Ari – Koisaari, Tapio 2014. Ajoneuvojen dynamiikka. Autoalan koulutuskeskus.
10. LaClair, T.J. Rolling Resistance. Teoksessa Brewer, Keith H (toim.) 2006. The Pneumatic Tire 2006 (DOT HS 810 561). S. 475–532. Saatavissa: <https://www.nhtsa.gov/document/pneumatictirehs-810-561pdf>. Hakupäivä 10.5.2017.
11. Birk, Marc – Dragon, Ludger – Niethammer, Rupert – Boros, Imre – Wüst, Klaus 2014. Motor-vehicle dynamics. Teoksessa Reif, Konrad – Dietsche, Karl-Heinz 2014. Bosch Automotive Handbook 9th edition. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH. S. 774–803.
12. Thieme, H. van Eldik – Dijks, A.J – Bobo, Stephen. Measurement of tire properties. Teoksessa Clark, Samuel K. (toim.) 1981. Mechanics of Pneumatic Tires. Washington D.C: U.S Department of Transportation. S. 587–600. Saatavissa Googlen teoskirjastossa: <https://books.google.fi/books?id=zcZ-TAAAAMAAJ&hl=fi&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>. Hakupäivä 22.5.2017.
13. Naskali, Timo 2010. Renkaiden epätasapainon, ilmanpaineen ja muotovirheidän vaikutus raskaan kaluston energian kulutukseen. Teoksessa Erkkilä, Kimmo (laatija). Energiatehokas ja älykäs raskas ajoneuvo - HDENIQ, Loppuraportti 2012. VTT:n julkaisuja. Sarja VTT Technology. S. 110–112.
14. Thieme, H. van Eldik – Pacejka, H.B. The Tire as a Vehicle Component. Teoksessa Clark, Samuel K. (toim.) 1971. Mechanics of Pneumatic Tires, NBS Monograph 122. National Bureau of Standards. S. 545–763. Saatavissa: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/MONO/nbsmonograph122.pdf>. Hakupäivä 11.5.2017.
15. Schuetz, Thomas – Krüger, Lothar – Lentzen, Manfred 2016. Aerodynamic Forces and Their Influence on Passenger Vehicles. Teoksessa Schuetz,

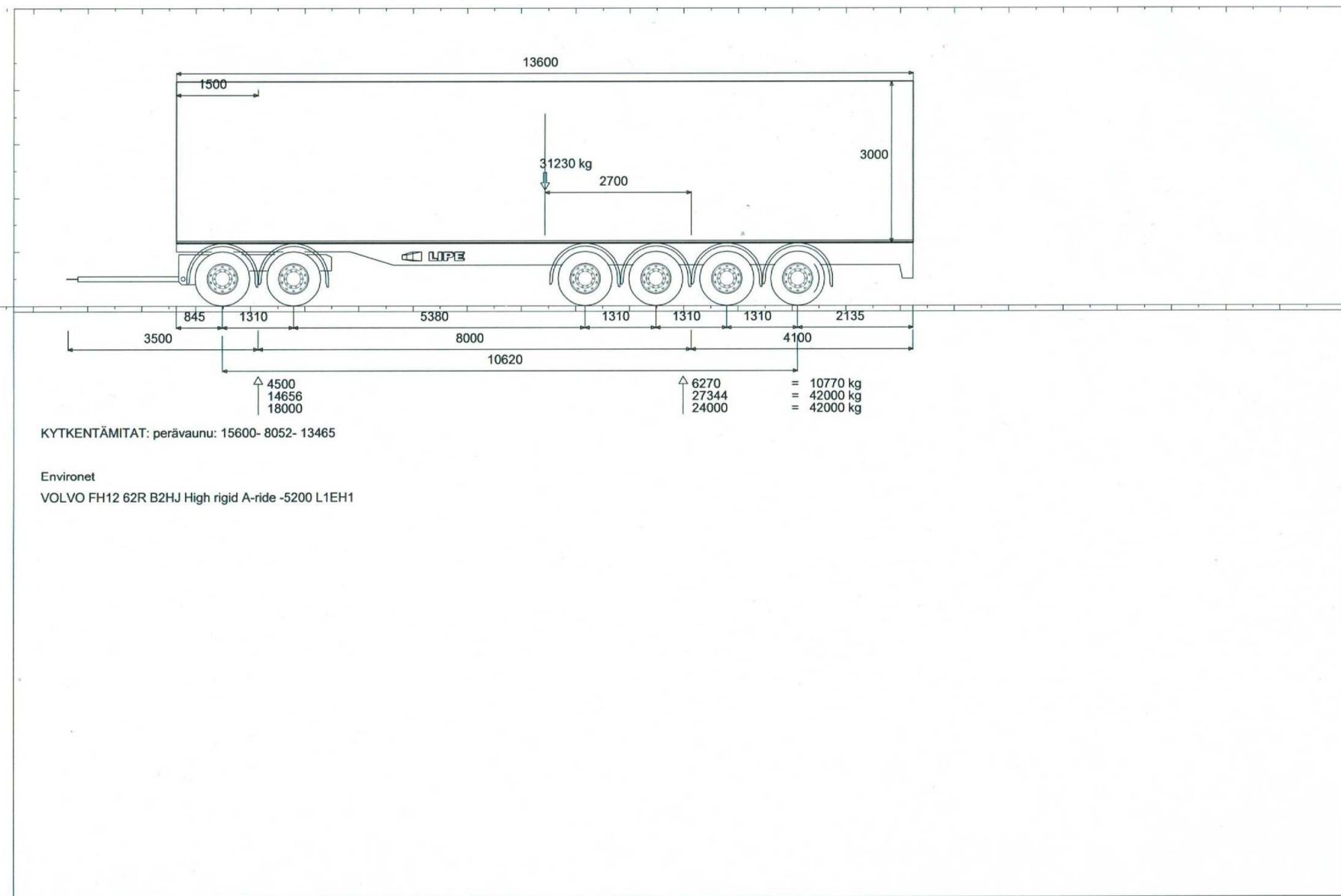
- Thomas (toim.) 2016. Aerodynamics of Road Vehicles, 5.th edition. Warrendale: SAE International. S. 197–412.
16. Woll, Teddy 2016. Consumption and Performance. Teoksessa Schuetz, Thomas (toim.) 2016. Aerodynamics of Road Vehicles, 5.th edition. Warrendale: SAE International. S. 151–196.
17. Ajoneuvotekniikka. Teoksessa Erkkilä, Kimmo (laatija). Energiatehokas ja älykäs raskas ajoneuvo - HDENIQ, Loppuraportti 2012. VTT:n julkaisuja. Sarja VTT Technology. S. 8–82.
18. Ilomäki, Janne. 2014. T331005 Autotekniikan perusteet 5 op. Opintojakson luennot syksy 2014. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, kone- ja tuotantotekniikan yksikkö.
19. Hausberger, Stefan – Rexeis, Martin – Blassnegger, Jürgen – Silberholz, Gérard – Eichseder, Helmut 2011. Evaluation of fuel efficiency improvements in the Heavy-Duty Vehicle (HDV) sector from improved trailer and tire designs by application of a new test procedure. Graz: Graz University of Technology, Institute for internal combustion engines and thermodynamics. Saatavissa: <http://www.theicct.org/evaluation-fuel-efficiency-improvements-hdv-sector-improved-trailer-and-tire-designs>. Hakupäivä 11.5.2017.
20. Ritola, Henri – Lehessaari, Mikko, – Kaijalainen, Osku – Hangasmaa, Tommi – Laine, Petri. Ajoneuvotekninen Kehitystyö. Teoksessa Kytö, Matti – Erkkilä, Kimmo – Nylund, Nils-Olof (toim.) 2009. Yhteenvetoraportti 2006-2008, Raskas Ajoneuvokalusto: Turvallisuus, Ympäristöominaisuudet ja Uusi tekniikka ”RASTU”. VTT:n julkaisuja. Sarja VTT Technology. S. 38–55.
21. Esimerkkejä alaprojektien tuloksista. Teoksessa Nylund, Nils-Olof (toim.) 2006. Yhteenvetoraportti 2003-2005, Raskaan ajoneuvokaluston energiankäytön tehostaminen ”HDEnergia”. VTT:n julkaisuja. Sarja VTT Technology. S. 12–64.

22. Blumrich, Reinhard – Mecker, Edzard – Michelbach, Armin – Vagt, Jorg-Dieter – Widdecke, Nils – Wiedemann, Jochen. Wind Tunnels and Measurement Technique. Teoksessa Schuetz, Thomas (toim.) 2016. Aerodynamics of Road Vehicles, 5.th edition. Warrendale: SAE International. S. 913–1063.
23. Perävaunujen mitat, akselistot ja massat. Sisäinen dokumentti. Konepaja Antti Ranta Oy.
24. Ullman, Jörg 2014. Fuels. Teoksessa Reif, Konrad - Dietsche, Karl-Heiz 2014. Bosch Automotive Handbook 9th edition. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH. S. 300–317.
25. LIPASTO Liikenteen päästöt. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/>. Hakupäivä 11.5.2017.









KYTKENTÄMITAT: perävaunu: 15600- 8052- 13465

Environet

VOLVO FH12 62R B2HJ High rigid A-ride -5200 L1EH1

