

Jussi Sauna-aho  
Olavi H. Koskinen  
Pasi Sauna-aho  
Tapio Rivanti

## HCT- ja normaaliajoneuvojen energiankäyttö, hiilidioksidipäästöt ja tiekuormitus

### Loppuraportti





# HCT- ja normaaliajoneuvojen energiankäyttö, hiilidioksidi- päästöt ja tiekuormitus

Loppuraportti

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2018

Liikennevirasto  
Helsinki 2018

*Kannen kuva: Pasi Sauna-aho, Vemosim Oy*

Verkkajulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-317-616-4

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

**Jussi Sauna-aho, Olavi H. Koskinen, Pasi Sauna-aho ja Tapio Rivanti: HCT- ja normaaliajoneuvojen energiankäyttö, hiilidioksidipäästöt ja tiekuormitus.** Liikennevirasto, tekniikka- ja ympäristöosasto. Helsinki 2018. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2018. 66 sivua ja 9 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-616-4.

**Avainsanat:** HCT-yhdistelmät, ajoneuvot, mittaukset, energiakäyttö, hiilidioksidi, päästöt, kuormitus

## Tiivistelmä

Suomen ajoneuvolainsäädäntöä muutettiin vuonna 2013. Sallittu kokonaismassa nousi 60 tonnista 76 tonniin, kun akseleita on 9. Samalla auton telimassoja korotettiin. Suurin kokonaispituus säilyi 25,25 metrinä. Kuljetusyrietykset voivat saada anomusten perusteella kokeiluluvan nykysäädöksistä suuremmille yhdistelmäpituuksille ja -massoille, mutta joiden akseliryhmittäiset massat eivät ylitä säädöksissä sallittuja. Suomessa näitä ajoneuvoja kutsutaan nimellä suurkapasiteetti- eli HCT-yhdistelmiksi (= High Capacity Transport) ja nykysäädösten mukaisia yhdistelmiä normaali- eli nyky-yhdistelmiksi.

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on antanut noin 40 poikkeuslupaa kevääseen 2018 mennessä. Useissa tapauksissa HCT-ajoneuvossa on kaksi perävaunua. Molemmat perävaunut voivat olla puoliperävaunuja, jolloin puoliperävaunut on kytketty toisiinsa apuvaunulla. Toinen perävaunu voi olla myös varsinainen perävaunu. Myös sellaisia HCT-ajoneuvoja on, joiden pituus on 25.25 m, ja niissä on lisäakseleita, jolloin niiden kokonaismassa on suurempi kuin 76 t.

Liikenneviraston (LiVi) toimeksiannosta Vemosim Oy teki ajovastusmittauksia yhteensä seitsemälle normaali- ja HCT-ajoneuvoille. Polttoaineenkulutukset ja CO<sub>2</sub>-päästöt simuloitiin näiden tulosten ja muiden teknisten tietojen perusteella reitillä Helsingistä Ouluun. Lisäksi määritettiin laskennallisesti tiekuormitus perusteena ns. AASHO-teoria. Tiekuormitustarkastelu koskee suunnitteluohjeiden mukaan rakennettuja teitä. Ajovastusmittauksia tehtäessä käytettiin useita erilaisia yhdistelmiä, joissa massa, akselien lukumäärä sekä rengastus vaihtelivat. Vuonna 2017 ajovastusmittauksia täydennettiin suljetulla tieosalla, jolloin voitiin käyttää suurempia ajonopeuksia kuin 80 km/h. Tulosten mukaisesti vierintävastuskerroin riippuu yhdistelmän massasta, pyörien lukumäärästä ja nopeudesta.

Kun kuljetetaan sama tavaramäärä, HCT-ajoneuvot vähentävät polttoaineenkulutusta, CO<sub>2</sub>-päästöjä ja tiekuormitusta normaaliajoneuvoihin verrattuna. Esimerkiksi, jos tyypillinen 3+5-akselinen kappaletavarayhdistelmä korvataan 3+3+2+3-akselisella yhdistelmällä polttoaineen kulutus ja CO<sub>2</sub> -päästöt alenevat 13–15 % ja tiekuormitus jopa 45 %, kun kuormat ovat täysiä. Vastaavasti raakapuunkuljetuksessa 4+5-akselisen yhdistelmän korvaaminen 3+4+5-akselisella yhdistelmällä pienentää polttoaineen kulutusta ja CO<sub>2</sub> -päästöjä 14–16 % ja pienentää tiekuormitusta hiukan yli 20 %. HCT-ajoneuvoihin mahtuu enemmän tavaraa ja niitä käytettäessä ajokertojen määrä vähenee, jolloin tarvitaan myös vähemmän autoja ja kuljettajien työaika kuin normaaliajoneuvojen tapauksessa. Tämä säästö voi olla rahallisesti suurempi kuin polttoaineessa ja muissa muuttuvissa ajoneuvokustannuksissa saatava säästö. Kun ajoneuvojen suurimpia sallittuja akseliryhmittäisiä massoja ei ylitetä, HCT-ajoneuvoja voidaan käyttää suunnitteluohjeiden ja laatuvaatimusten mukaan rakennetulla tieverkolla, mikäli tilantarve (lähinnä liittymissä) ja pistemäiset kohteet (sillat) eivät estä niiden käyttöä.

**Jussi Sauna-aho, Olavi H. Koskinen, Pasi Sauna-aho och Tapio Rivanti: Bränsleåtgång, CO<sub>2</sub>-utsläpp och vägbelastning av HCT- och normalfordon i Finland.** Trafikverket, teknik och miljö. Helsingfors 2018. Trafikverkets undersökningar och utredningar 51/2018. 66 sidor och 9 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-616-4.

## Sammanfattning

Den finska fordonslagstiftningen förändrades år 2013. Enligt den nuvarande lagstiftningen är fordonskombinationens maximilängd 25,25 m och totalmassa 76 t. Förändringen berättigar transportföretag att erhålla testtillstånd för större än nuvarande fordonskombinationer, men deras axelgrupstryck skall förbli inom tillåtna gränser. I Finland kallas dessa kombinationer ”HCT-fordon” (= High Capacity Transport vehicle) och standardfordonen kallas ”normalfordonen” senare i detta forskningsprojekt.

Trafikmyndigheten har beviljat dispenstillstånd och deras antal är ungefär 40 (våren 2018). Normalvis har HCT-fordonet en dragbil och två påhängsvagnar eller en påhängsvagn och en släpvagn. I första fallet är påhängsvagnar kopplade ihop med dolly. Även finns det sådana HCT-fordon, vars längd är högst 25,25 m, men deras total massa kan vara större än 76 t.

På uppdrag av Trafikverket utförde Vemosim Ab en jämförelseforskning angående körmotstånd (rull- och luftmotståndet) av normal- och HCT-fordonens 2016. Bränsleåtgången och koldioxidmängderna simulerades på vägsträckan i riktningen Helsinki–Oulu, baserade på dessa resultat och övriga tekniska uppgifter. Ytterligare beräknades vägbelastningen baserade på AASHO road test och senare, motsvarande mätningar. Analysen berör vägar, som är byggda enligt vägplaneringsnormer. I mätningen av körmotstånden användes flera olika fordonskombinationer med varierande massor, axelantal och däck. År 2017 gjordes tilläggs-mätningar på en vägsträcka, som inte annu var i bruk. Därför kunde tillämpas hastigheter över 80 km/h. Rullmotståndkoefficienter beror på massan, däckantalet och hastigheten.

I transporten av en viss godsmängd, minskar HCT-kombinationer bränsleåtgången, koldioxidmängderna och vägbelastningen jämförda med normalkombinationer. Till exempel, om en typisk 3+5-axlad styckegodskombination ersätts med en 3+3+2+3-axlad kombination, minskar bränsleåtgången och koldioxidmängderna med 13–15 % och vägbelastningen även med 45 %, om lasterna motsvarar bärigheter. Ersättningen av en 4+5-axlad timmerkombination med en 3+4+5-axlad kombination minskar bränsleåtgången och koldioxidmängderna med 14–16 % och vägbelastningen över 20 %. HCT-kombinationerna kan ta mera last, varvid antalet av körningar och lastbilar samt arbetstiden av förarna minskar. Denna besparing kan vara större än besparingen i bränsle- och övriga varierande kostnader. Om fordonens största tillåtna axelgrupstryck enligt lagstiftningen inte överskrides, kan HCT-kombinationerna användas på vägar byggda enligt vägplaneringsnormerna, om utrymmeskravet i anslutningar och broarnas bärighet inte ställer begränsningar.

**Jussi Sauna-aho, Olavi H. Koskinen, Pasi Sauna-aho and Tapio Rivanti: Fuel consumption, CO<sub>2</sub> emissions and road wear of HCT vehicles and standard or normal vehicles in Finland.** Finnish Transport Agency, Engineering and Environment. Helsinki 2018. Research reports of the Finnish Transport Agency 51/2018. 66 pages and 9 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-317-616-4.

## Abstract

In Finland the legislation concerning vehicle was changed in 2013. Normally the maximum combination length of vehicle must not exceed 25.25 m and the gross mass 76 t. The change allows the transport enterprises to get test licenses for bigger vehicles whose axle group loads do not overpass the allowed axle group loads. In Finland these vehicles are called HCT vehicles (High Capacity Transport) and the current vehicles standard or normal vehicles.

Based on application the transportation authority may exempt dispensation to transport operators. Then both the length of 25.25 m and the mass of 76 t may be exceeded. The number of granted test licences is about 40 in spring 2018. The HCT vehicles are usually articulated vehicles, mainly composed of a truck and two semi-trailers connected with dolly together. Also, other configurations are possible. The gross mass and total length vary depending on vehicle configuration.

Based on the assignment of the Finnish transport agency Vemosim Ltd carried out a research about the drive resistances of HCT and normal vehicles in 2016. The fuel consumption and carbon dioxides were simulated on the main road from Helsinki to Oulu based on these results and other technical data. In addition, road wear impacts of normal and HCT vehicles were determined based on the results of AASHO road test and of later respective road tests. The road wear impacts concern roads planned and built according to extant road design norms. In the drive resistance measurements several vehicle combinations with different masses, numbers of axles and wheels were used. In 2017 additional measurements were carried out on a highway section, which was not yet opened for traffic. That is why it was possible to apply speeds more than 80 km/h. Rolling resistance coefficients depend on the mass, number of wheels and speeds.

When a certain amount of goods is transported, the HCT combinations reduce the fuel consumption, carbon dioxide emissions and road wear impact compared to the normal vehicle combinations. For instance, if a typical 3+5 axled piece goods combination is replaced by a 3+3+2+3 axled combination, the fuel consumption and carbon dioxide emissions are reduced by 13 to 15 per cent and road wear even 45 per cent. Replacing a 4+5 axled timber combination by a 3+4+5 axled combination causes a reduction of 14 to 16 per cent for the fuel and carbon dioxide emissions and the reduction about 20 per cent for the road wear impact. The HCT combinations can occupy more load, and thus the number of drives and vehicle combinations as well as working time of drivers will be reduced. These savings can be higher than savings in fuel and other variable vehicle costs. If the legal axle group loads are not exceeded, the HCT vehicles can be used on roads built according to the extant road design norms, when space in junctions and load-carrying capacity of bridges do not create restrictions for their use.

## Esipuhe

Tutkimuksen HCT- ja normaali ajoneuvojen vertailusta energiankäytöstä, CO<sub>2</sub>-päästöistä ja tiekuormituksesta teki Vemosim Oy Liikenneviraston tilauksesta. Ajovastusmittaukset on tehty kantatie 54:llä Hausjärven Oitissa syksyllä 2016 ja täydentävät mittaukset rakenteilla olevalla Hamina–Vaalimaa-moottoritieellä syksyllä 2017.

Syksyn 2016 mittauksiin vuokrattiin neljän kuljetusyrityksen (MEK-Kuljetus Oy, Kilon Osuus-Auto, Orpe Kuljetus Oy ja Speed Oy) ajoneuvoyhdistelmiä, joista osa oli HCT-yhdistelmiä ja osa normaaliyhdistelmiä. Lisäksi ajoneuvojen punnituksessa käytettiin Ekokem Oy:n, kuormauksessa Saint-Gobain Weber Oy:n (tekstin yhteydessä Leca Oy) ja tietojen keruussa Paetronics Oy:n palveluja.

Syksyn 2017 mittauksiin vuokrattiin ajoneuvot Orpe Kuljetus Oy:lta ja Kuljetusliike Wickström Oy:ltä. Ajoneuvojen punnitukset tehtiin UPM:n Kuusaankosken tehtaalla ja tietojen keruussa käytettiin Paetronics Oy:n palveluja. Ottaen huomioon, että Hamina–Vaalimaa-moottoritieellä olivat työt käynnissä, tarvittiin erityisjärjestelyjä ajovastusmittausten ajaksi. Rakentajan YIT:n edustaja Joonas-Petteri Kallonen hoiti järjestelyt ajovastusmittauksia varten moottoritietyömaalla erinomaisella tavalla niin, että ajovastusmittaukset voitiin suorittaa häiriöttä.

Vemosim Oy:ssä työn on tehnyt nelihenkinen asiantuntijaryhmä Jussi ja Pasi Sauna-aho, Olavi H. Koskinen ja Tapio Rivanti. Ajovastusmittauksiin ja niiden valmisteluun osallistuivat kaikki edellä mainitut. Olavi H. Koskinen ja Jussi Sauna-aho suunnittelivat sekä tekivät ajovastusmittaustiedostojen tarkistuksen ja jalostamisen analysointia varten.

Olavi H. Koskinen on tehnyt ajovastusten analysoinnin käyttäen aikaisemmin laatimiinsa tietojenkäsittelyohjelmia, ja tehnyt ajoneuvojen massa-mittapiirroksia sekä laatinut osan raportin liitteisiin sisältyvistä kuvista. Pasi Sauna-aho hoiti hankkeen käytännön järjestelyt toimien hankkeen yhteyshenkilönä tilaajaan, laati turvallisuussuunnitelmat mittauksia varten ja otti ajovastusmittauksiin liittyvät kuvat ja teki videonnit. Jussi Sauna-aho laati käsillä olevan raportin. Liitteet laadittiin pääasiassa Olavi H. Koskisen ja Jussi Sauna-ahon yhteistyönä. LiVi:n edustaja ja tutkimuksen yhteyshenkilö Kari Lehtonen avusti raportin laadinnassa varmistaen sen, että raportissa saadaan hyvin esiin niitä seikkoja, jotka ovat tärkeitä LiVi:n kannalta.

Kiitokset ajovastusmittauksiin osallistuville, edellä mainituille yhteistyökumppaneille ja niiden yhteyshenkilöille rakentavasta yhteistyöstä. Ilman yhteistyökumppanien panosta ajovastusmittauksia ei olisi voitu toteuttaa.

Tämä raportti ja sen liitteet sisältävät kuvauksen eri selvityksistä ja niiden tuloksista. Tilaaajan ohjeen mukaan raporttiin ei sisällytetä suosituksia ja johtopäätökset on supistettu lyhyiksi, teknisiksi johtopäätöksiksi.

Helsingissä lokakuussa 2018

Liikennevirasto  
Tekniikka- ja ympäristöosasto



# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO.....	11
1.1	HCT-yhdistelmät .....	11
1.2	Taustaa.....	11
1.3	Tutkimuksen tavoite .....	12
2	AJOVASTUSMITTAUKSET.....	14
2.1	Miksi tehdään ajovastusmittauksia? .....	14
2.2	Ajovastuskertoimet coast down -menetelmällä tehdyistä mittaustuloksista...14	
	2.2.1 Yleistä.....	14
	2.2.2 Ajovastusmittausten tarkoitus ja periaate .....	14
2.3	Ajovastusmittausten valmistelu .....	16
	2.3.1 Valmistelutehtävät.....	16
	2.3.2 Kuvauksia valmistelutehtävistä.....	16
	2.3.3 Ohjeet kuljetusyrityksille ja tiedonkeruulaitteisto.....	17
	2.3.4 Mittausajojen toteuttaminen.....	18
2.4	Ajovastusmittausten suorittaminen .....	18
	2.4.1 Ajovastusmittausten ajanjakso .....	18
	2.4.2 Ajovastusmittausten paikka.....	19
	2.4.3 Käytetyt ajoneuvot.....	19
	2.4.4 Haasteita mittauksissa.....	20
	2.4.5 Vuoden 2017 mittaukset .....	21
3	AJOVASTUSMITTAUSTEN ANALYSOINTI.....	22
3.1	Ajoneuvojen ajovastusten määrittäminen.....	22
	3.1.1 Periaatteet .....	22
	3.1.2 Mittaustiesien erot ja niiden vaikutukset mittausten ajosuuntiin .....	23
3.2	Ajovastuskertoimet .....	23
	3.2.1 Tulokset.....	23
	3.2.2 Saadut vierintä- ja ilmanvastuskertoimet .....	24
3.3	Ajoneuvoyhdistelmien tehontarve vierintä- ja ilmanvastuksen mukaan.....	26
4	HCT- JA NORMAALIAJONEUVOJEN POLTTOAINEENKULUTUS AJONEUVO- SIMULOINTIA KÄYTTÄEN .....	29
4.1	Simuloinnin toteutus .....	29
	4.1.1 Simuloinnin perusteet.....	29
	4.1.2 Simuloinnissa käytetty tie välillä Helsinki–Oulu.....	29
	4.1.3 Tutkitut ajoneuvoyhdistelmät.....	30
4.2	Polttoaineenkulutus.....	30
	4.2.1 Polttoaineen kulutusvertailussa käytettävät suureet ja yksiköt.....	30
	4.2.2 Yhdistelmän ominaisuuksien vaikutus polttoaineen kulutukseen.....	32
	4.2.3 Normaali- ja HCT-ajoneuvojen polttoaineen kulutuksen vertailu.....	34
4.3	Normaali- ja HCT-ajoneuvojen hiilidioksidipäästömäärät .....	39
4.4	Yksittäis- ja paripyörien vaikutus polttoaineenkulutukseen ja CO <sub>2</sub> -päästöihin.....	39
4.5	Simuloinnilla saadun kulutuksen vertailu ajoneuvosta mitattuun polttoaineen kulutukseen .....	42
4.6	Näkökohtia normaali- ja HCT-yhdistelmien ajokustannuksista.....	43

5	HCT- JA NORMAALIAJONEUVOJEN TIEKUORMITUS.....	45
5.1	Tiekuormituksen käsite ja merkitys .....	45
5.1.1	Tiekuormitus ja ekvivalenttiakseli AASHO-teorian mukaan.....	45
5.2	Tiekuormitustarkastelussa käytettävät ekvivalenttikertoimet.....	45
5.3	Mittauksissa käytettyjen ajoneuvojen mitat ja massat sekä tiekuormitus .....	46
5.3.1	Ajoneuvojen mitat ja massat.....	46
5.3.2	Ajoneuvojen ekvivalenttiakselimäärät.....	46
5.3.3	Ajoneuvojen kuormat ekvivalenttiakselia kohden.....	48
5.4	Paripyörien vaikutus tiekuormitukseen.....	50
5.5	Vaikutukset tienpitoon .....	50
5.5.1	Suunnitteluohjeiden mukaan rakennetut tiet .....	50
5.5.2	Muut tiet.....	50
5.5.3	Sillat.....	51
6	RAAKAPUUAJONEUVOJA KOSKEVA LISÄTARKASTELU .....	52
6.1	Tarkastelussa käytetyt normaali- ja HCT-ajoneuvoyhdistelmät ja niiden kuormitus .....	52
6.2	Tulokset.....	52
7.	HCT-AJONEUVOTYYPIT JA TARVE MÄÄRITTÄÄ NIILLE SOVELTUVAT TIEVERKOT .....	56
7.1	HCT-ajoneuvotyypit nykyisin .....	56
7.2	Tarve HCT-yhdistelmille soveltuvan tieverkon määrittämiselle ja HCT-yhdistelmien käytön vaikutuksia tieverkolla.....	58
7.2.1	HCT-yhdistelmien käyttöönoton tarpeen määrittävät tavarakuljetusten kasvu ja HCT-yhdistelmien tarjoama hyöty .....	58
7.2.2	HCT-yhdistelmien käytön vaikutuksia tieverkolla.....	58
7.3	Perusteita ja kriteereitä HCT-ajoneuvoille soveltuvan tieverkon määrittämiselle .....	59
7.4	HCT-ajoneuvoille soveltuvan tieverkon määrittämisestä ja informoinnista ....	61
8	SELVITYKSEN KULUESSA TEHTYJÄ HAVAINTOJA JA ESIIN TULLEITA SELVITYSTARPEITA .....	62
9	JOHTOPÄÄTÖKSIÄ .....	65
	LÄHDELUETTELO .....	66
	LIITTEET	
Liite 1	Ajovastusanalyysi	
Liite 2	Ajovastusmittausten analysointitulokset ajoneuvoittain	
Liite 3	Ote ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien ajosimulointituloksista Vt4:llä välillä Helsinki -> Oulu	
Liite 4	Polttoaineen kulutuksen vertailu mittausta ja anonevosimulointia käyttäen	
Liite 5	Ajovastusmittauksissa käytettyjen yhdistelmien massamittapiirroksat	
Liite 6	Ajonopeuden vaikutus yhdistelmien muotokertoimen (C <sub>d</sub> ) arvoihin	
Liite 7	Raakapuu yhdistelmiä koskeva lisätarkastelu	
Liite 8	Näkökohtia kuljetuskustannuksista ja niiden määrittämisestä sekä ehdotus tietotuotannon kehittämiseksi	
Liite 9	Selvityksessä käytetyt käsitteet	

## Kuvaluettelo

Kuva 1.	Esimerkki normaaliajoneuvon muuttamisesta HCT-ajoneuvoksi ja muutoksen vaihtuksista.....	12
Kuva 2.	Coast down-mittauksen periaate ajovastusmittauksissa, kun mittaus-tieosa on niin pitkä, että ajoneuvon nopeus laskee jokaisella alku-nopeuden arvolla lähelle pysähtymistä.....	15
Kuva 3.	Ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien vierintä- ja ilmanvastuksen vaatima teho kuormauksen ja vakionopeuden arvon mukaan tiellä, jossa pituuskaltevuus on 0 %.....	27
Kuva 4.	Ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien tehontarpeen jakauma vierintä- ja ilmanvastuksen kesken kuormauksen ja vakio-nopeuden arvon mukaan tiellä, jossa pituuskaltevuus on 0 %.....	27
Kuva 5.	Ajoneuvoyhdistelmien polttoaineenkulutuksen [l/100 km] riippuvuus massasta ja pyörien lukumäärästä.....	32
Kuva 6.	Ajoneuvoyhdistelmien polttoaineen kulutus [l/ 100 tkm] massan ja pyörämäärän mukaan .....	33
Kuva 7.	Ajoneuvoyhdistelmien polttoaineenkulutus [l/100 lavametrikm] massan ja pyörämäärän mukaan.....	33
Kuva 8.	HCT-yhdistelmien aiheuttama polttoaineenkulutuksen vähennys normaaliyhdistelmiin verrattuna kuormausasteen mukaan merkittäessä normaaliyhdistelmien polttoaineenkulutusta 100:lla.....	39
Kuva 9.	Kuormatun HCT-yhdistelmän polttoaineenkulutus kumulatiivisena ja hetkellinen nopeus mittauksen ja ajoneuvosimuloinnin mukaan reitillä Pori–Rauma.....	43
Kuva 10.	Esimerkki HCT-puutavarayhdistelmän massa-mittapiirroksista .....	47
Kuva 11.	Normaali- ja HCT-yhdistelmien keskimassa pyörää kohden .....	49
Kuva 12.	Kaksi tavallisinta tapaa muodostaa normaaliajoneuvoyhdistelmästä HCT-yhdistelmä .....	57

## Taulukkoluetelo

Taulukko 1.	Ajovastusmittauksissa käytetyt yhdistelmät, niiden käyttöalat ja eräät tekniset ominaisuudet. ....	19
Taulukko 2.	Perus- ja johdetut suureet yksiköineen määritettäessä ajoneuvojen polttoaineenkulutusta.....	31
Taulukko 3.	Normaali- ja HCT-yhdistelmien polttoaineenkulutus merikontti-kuljetuksissa kuormausasteen mukaan.....	35
Taulukko 4.	Normaali- ja HCT-yhdistelmien polttoaineenkulutus elintarvikkeille tarkoitetuissa umpikorikuljetuksissa kuormausasteen mukaan .....	36
Taulukko 5.	Normaali- ja HCT-yhdistelmien polttoaineenkulutus puutavarakuljetuksissa kuormausasteen mukaan .....	37
Taulukko 6.	HCT-yhdistelmän yksittäis- ja paripyöräperävaunujen vaikutus poltto-aineenkulutukseen massan mukaan, kun yhdistelmien massat ovat yhtä suuria .....	40
Taulukko 7.	HCT-yhdistelmän yksittäis- ja paripyöräperävaunujen vaikutus poltto-aineenkulutukseen kuormausasteen mukaan, kun paripyöräyhdistelmälle sallitaan noin 12 % suurempi kokonaismassa.....	41

Taulukko 8. Tiekuormituksen määräytyminen yhdistelmän ominaisuuksien mukaan tiesuunnitteluohjeiden ja laatuvaatimusten mukaan rakennetuilla teillä.....	48
Taulukko 9. HCT-yhdistelmän yksittäis- ja paripyöräperävaunujen vaikutus tiekuormitukseen.....	50
Taulukko 10. Raakapuukuljetuksissa käytettävien normaali- ja HCT-yhdistelmien tiekuormitus, polttoaineenkulutus ja muuttuvat ajoneuvokustannukset raakapuun irtotilavuusmassan arvolla 390 kg/m <sup>3</sup> .....	53
Taulukko 11. Raakapuukuljetuksissa käytettävien normaali- ja HCT-yhdistelmien tiekuormitus, polttoaineenkulutus ja muuttuvat ajoneuvokustannukset raakapuun irtotilavuusmassan arvolla 470 kg/m <sup>3</sup> .....	54
Taulukko 12. HCT- ja normaaliyhdistelmien muuttuvat ajoneuvokustannukset ja tiekuormitus sekä niiden erot raakapuun irtotilavuusmassan eri arvoilla.....	55
Taulukko 13. HCT-yhdistelmien ajosuorite on pienempi kuin normaaliyhdistelmien kuljetettaessa sama tavaramäärä.....	59

# 1 Johdanto

## 1.1 HCT-yhdistelmät

Ajoneuvojen mittoja ja massoja koskevan valtioneuvoston asetuksen mukaan Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi on voinut antaa poikkeuslupia noin viideksi vuodeksi kokeiluihin, joissa ajoneuvoyhdistelmien kokonaispituudet ja kokonaismassat ylittävät nykysäädösten mukaiset enimmäispituuden 25,25 m ja kokonaismassan 76 t. Samalla poikkeuslupan saaneet kuljetusyrietykset velvoitettiin tekemään seurantatutkimusta poikkeuslupa-ajoneuvojen käytön vaikutuksista. Lisäksi Trafi ja Liikennevirasto saivat oikeuden käyttää näitä yhdistelmiä omissa mittauksissaan 3 päivän aikana vuodessa.

Näitä nykysäädöksistä poikkeavia ajoneuvoja kutsutaan käsillä olevassa tutkimuksessa nimellä **HCT-ajoneuvot**<sup>1</sup> (= High Capacity Transport) ja nykysäädösten mukaisia ajoneuvoja kutsutaan nimellä **nyky-** eli **normaalijoneuvot**.

Kuvasta 1 ilmenee eräs periaate muutettaessa normaali ajoneuvo HCT-ajoneuvoksi. Periaatekuvasta ei ilmene se, että jossain tapauksessa, HCT-ajoneuvon siirryttäessä, vetoauto muuttuu, jolloin vetoauton ominaisuudet, kuten moottoriteho on suurempi, kun ajoneuvon lisätään toinen perävaunu.

## 1.2 Taustaa

Vuonna 2013 Suomessa tehtyjen muutosten jälkeen EU asetti energiankäytön tehostamista ja päästöjen vähentämistä koskevat tavoitteet vuodelle 2030. Suomen tapauksessa energiankäyttöä tulee vähentää noin 30 % ja päästöjä noin 39 % vuoteen 2005 verrattuna. Koska liikennesektori on päästökaupan ulkopuolella, sen tulee osaltaan tehostaa energiankäyttöä ja vähentää päästöjä vastaavasti.

Liikennevirasto rajasi täten tutkimuksen siten, että sen avulla tuotetaan vain lähtötiedot erikseen tehtävien laskelmien tekemiseen. Tämän vuoksi raporttiin ei sisällytetä arvioita, kuinka paljon siirtyminen normaalikalustosta HCT-kalustoon säästäisi energiaa ja vähentäisi hiilidioksidipäästöjä.

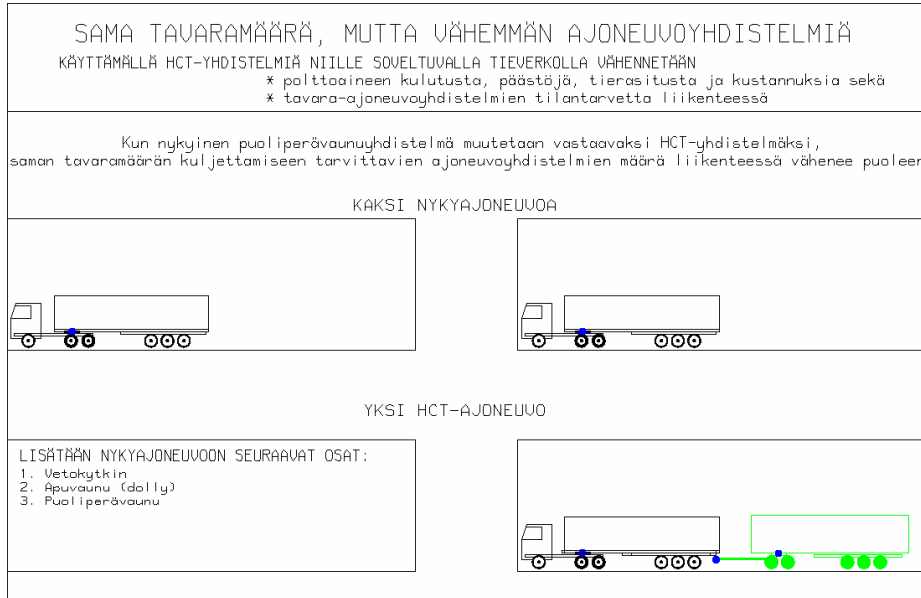
Alkuperäisen aikataulun mukaan tutkimuksen tuli valmistua kesäkuun 2017 loppuun mennessä. Liikennevirasto muutti aikataulua, koska ajovastusmittauksille ilmeni vuoden 2017 alussa uusi ja aikaisempaa paremmin soveltuva tieosa Hamina–Vaalimaa-moottoritieellä. Mittaukset suunniteltiin tehtävän alkaen 15.8.2017 eli aikana ja liikenneoloissa, jolloin moottoritien toinen ajorata on päällystetty, mutta moottoritietä ei ole avattu vielä ajovastusmittauksia häiritsevälle yleiselle liikenteelle. Mittaukset päästiin aloittamaan vasta lokakuun 2017 lopussa ja ne saatiin valmiiksi marraskuun puolivälissä 2017. Liikennevirasto pyysi tekemään vielä kaksi lisäselvitystä, joista

---

<sup>1</sup> Näistä ajoneuvoyhdistelmistä on alettu käyttää lyhennettä HCT-ajoneuvo (High Capacity Transport vehicle), Sujuvampi lyhenne olisi HC-ajoneuvo (High Capacity vehicle) eli suomenkielellä SK-ajoneuvo (Suurkapasiteettiajoneuvo). Kun mainittuja ajoneuvoja käytetään yksinomaan kuljetuksiin, ei ole tarpeen käyttää termiä suurkapasiteettikuljetusajoneuvo.

toinen sisälsi polttoaineenkulutuksen vertailun määrittämällä se ajoneuvon CAN-väylästä ja simuloimalla se, ja toinen sisälsi raakapuuajoneuvoja koskevan lisäselvityksen.

Käsillä oleva raportti on loppuraportti tutkimuksesta.



Kuva 1. Esimerkki normaaliajoneuvon muuttamisesta HCT-ajoneuvoksi ja muutoksen vaihtuksista

## 1.3 Tutkimuksen tavoite

Käsillä olevan tutkimuksen tavoite on tuottaa lähtötiedot laskelmiin, joiden tulosten perusteella voidaan vastata kysymykseen: Ovatko nyt kokeiluluvanvaraisesti käytössä olevat HCT-ajoneuvot edullisempia kuin nykysäädösten mukaiset ajoneuvot?

Kun nyt tuotettavien lähtötietojen perusteella tehdään myöhemmin laskelmat, voitaneen niiden tuloksia tulkita seuraavasti: Kannattaako Suomessa ottaa käyttöön kokeiluvaiheessa olevat HCT-ajoneuvot, jotta maamme tavarankuljetuksia voitaisiin tehostaa sekä vähentää tavarankuljetusten kustannuksia ja ympäristövaikutuksia, erityisesti hiilidioksidipäästöjä. Samalla saadaan tietoa HCT-ajoneuvojen vaikutuksesta tierasitukseen.

Tarkemmin sanottuna tutkimuksen tavoitteena on tuottaa sellaiset lähtötiedot, joista voidaan laskea HCT- ja normaaliajoneuvojen osalta:

1. ajoneuvojen polttoaineen kulutus kuljetussuoriteyksikköä kohden
2. hiilidioksidimäärä kuljetussuoriteyksikköä kohden, ja
3. ajoneuvojen tiekuormitus ekvivalenttiakseleina kuljettua tavaramäärää kohden.

Lisätavoitteena oli määrittää, miten paripyörien käyttö perävaunussa vaikuttaa näihin tunnuslukuihin.

Selvityksessä tuotetaan edellä mainitut tavoitteiksi määritetyt tiedot.

Lisätietoina tuotetaan informaatiota myös kuljetuskustannuksista, niiden määräytymisestä ja tietoja ajoneuvojen muuttuvien ajoneuvokustannusten ja kiinteiden kustannusten määrittämisestä.

Kuljetussuoritteiden yksikkö on

1. massatavaran tapauksessa tonnikilometri [tkm], mutta
2. tilavuustavaran tapauksessa lavametrikilometri [lm-km]

Massatavaran kuljetussuorite [tkm] tarkoittaa kuljetetun tavaramäärän massaa [t] kerrottuna kuljetusmatkan pituudella [km].

Tilavuustavaran tapauksessa kuljetussuorite [lm-km] tarkoittaa kuljetetun tavaramäärän varaamaa lavapituutta [lm] kerrottuna kuljetusmatkan pituudella [km].

Tilavuustavaran tapauksessa tavaran tilavuusyksikön [ $m^3$ ] käyttö ja sen pohjalta määritetyn kuljetussuoriteyksikön [ $m^3km$ ] ei ole käyttökelpoinen. Tilavuustavaran kuljetuksessa käytetään kuormaus- ja purkausvaiheessa yleensä lavakoita, joille tavara asetetaan tai tavara on erilaisina paketteina tai kolleina.

Tavoitteiksi valittujen tietojen tuottamista varten ajovastusmittauksissa määritettiin seuraavat lähtötiedot

- ajoneuvon ja kuorman massa
- ajoneuvon otsapinta-ala ja ilmanvastuksen muotokerroin
- akseleiden lukumäärä: kokonaismäärä ja yksittäispyöräakselien lukumäärä

Saatujen tietojen avulla voidaan laskea mm. polttoaineen kulutusta ja CO<sub>2</sub>-päästömääriä myös sellaisille yhdistelmille, jotka eivät olleet mukana ajovastusmittauksessa.

Ajovastusmittaukset ovat keskeinen osa kuljetustalouden (kuljetuskustannusten) määrittämistä ja samalla myös olennainen osa koko tutkimusta. Energiankäytön ja hiilidioksidipäästöjen ja muuttuvien ajoneuvokustannusten määrittämisessä käytetään ajoneuvodynamiikkaan perustuvaa simulointijärjestelmää, joka edellyttää tietoja mm. ajovastuskertoimista. Simulointi tuottaa mm. ajoajan ja polttoaineenkulutuksen, jonka perusteella voidaan laskea paitsi hiilidioksidimäärä ja muuttuvat kustannukset ajoneuvoittain.

## 2 Ajovastusmittaukset

### 2.1 Miksi tehdään ajovastusmittauksia?

Ajovastusmittaukset tehtiin tutkimushankkeen alkuvaiheessa, jotta niiden perusteella voitaisiin määrittää erilaisten ajoneuvoyhdistelmien (lyhyesti yhdistelmien), siis normaali- ja HCT-ajoneuvoyhdistelmien ajovastuskertoimet. Ajovastuskertoimien avulla määritettiin – ajoneuvosimulointijärjestelmää käyttäen – ajoneuvojen energiankäyttö valitulla tiejaksolla ja tämän jälkeen määritettiin laskennallisesti myös hiilidioksidipäästöt. Tutkimuksen kuluessa tehtiin erillinen vertailuselvitys polttoaineen kulutuksesta mittaamalla ja simuloimalla ja osoitettiin, että simuloinnin ja mittauksen antamat tulokset ovat yhtäpitävät.

### 2.2 Ajovastuskertoimet coast down -menetelmällä tehdyistä mittaustuloksista

#### 2.2.1 Yleistä

Ajoneuvon ajovastukset muodostuvat vierintä- ja ilmanvastuksesta sekä myös tien pituuskaltevuusvastuksesta ja mahdollista kiihdytyksistä. Vierintävastus syntyy pyörän ja väylän pinnan kosketuksesta siten, että joko pyörä (rengas) litistyy hiukan tai väylän pinta painautuu hiukan tai ilmenevät molemmat. Syntyy ”mikrokynnys”, jonka ylittäminen aiheuttaa vastusta. Mikäli päällyste on kova, kuten asfalttibetoni, pyörän painautuma on pieni, mutta pehmeän päällysteen tapauksessa painautuman arvo voi olla suuri. Asiaan vaikuttaa myös renkaan ilmanpaine. Mikrokynnyksen ylittäminen vaatii voimaa, joka määräytyy mikrokynnyksen korkeuden, ajoneuvon massan ja pyöräkoon sekä gravitaatiokiihtyvyyden  $g$  perusteella. Mikrokynnyksen vaikutus ilmenee vierintävastuksena.

Ajoneuvon vierintävastus määräytyy edellä sanotun mukaisesti ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän massan, pyörien lukumäärän ja nopeuden perusteella. Jäljempänä käytetään ajoneuvoyhdistelmästä lyhyiden vuoksi myös termiä yhdistelmä.

Ilmanvastus muodostuu ilman patopaineesta ja ajoneuvon ja sen osien otsapinta-alan tulosta, jota korjataan muotokertoimella  $C_d$ . Muotokerroin riippuu ajoneuvon kuormatilan tai tilojen pituuksista ja kuormatilojen välisistä aukoista, ym. tekijöistä. Ilmanvastusta voidaan mitata joko tuulitunnelissa tai ajoväylällä coast down-menetelmää käyttäen.

#### 2.2.2 Ajovastusmittausten tarkoitus ja periaate

Käsillä olevassa selvityksessä käytetään ajovastuskertoimien määrittämisessä coast down -menetelmää, ks. Liite 1.

Coast down-menetelmää sovellettaessa tarvitaan mahdollisimman pitkä mittaustieosa, jonka pituuskaltevuus on mahdollisimman pieni ja arvoltaan vakio. Ajoneuvo kiihdytetään valittuun nopeuteen saavuttaessa mittaustieosan alkuun, jonka jälkeen ajoneuvon annetaan kulkea (eli rullata) vaihde vapaalla ja mitataan ajoneuvon nopeus

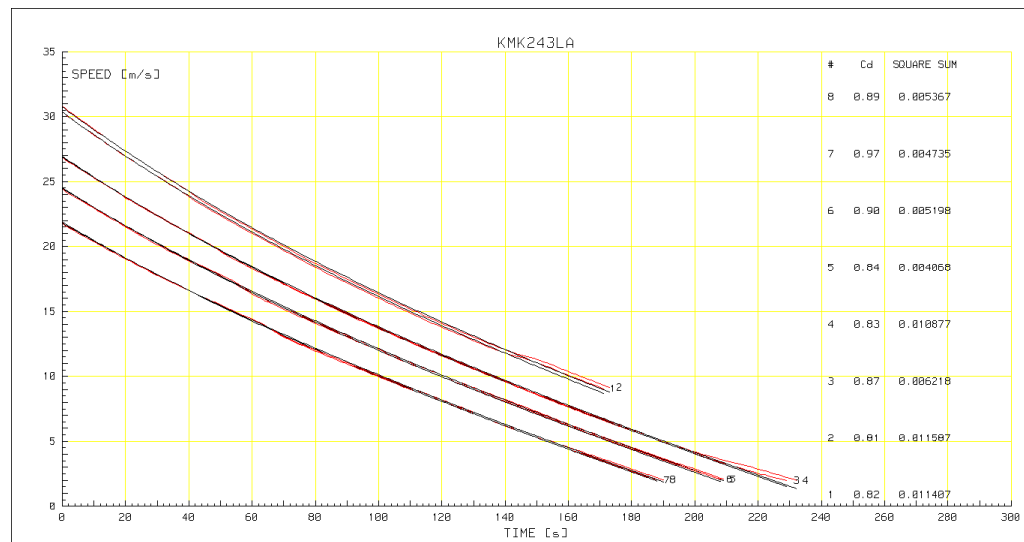


matkan tai ajan mukaan esimerkiksi 1 Hz:in taajuudella. Jos mittaustieosa on lyhyt, ajo toistetaan tarvittaessa alentamalla alkunopeutta niin monta kertaa, että ajoneuvo pysähtyy mittaustieosalla. Mikäli mittaustieosa on riittävän pitkä, ajoneuvo pysähtyy mittaustieosalla suurestakin alkunopeudesta.

Coast down -mittaukset tulisi tehdä niin pitkällä mittaustieosalla, että ajoneuvo pysähtyy. Siten minimoidaan virhemahdollisuuksia, koska lyhyellä mittaustieosalla tuuli- ja liikenneolot saattavat vaihdella mittausajosta toiseen, mikä aiheuttaa virheitä tuloksiin. Analysointia varten nopeustiedot kerätään matkan sijasta ajan mukaan.

Ajovastusmittaukset toistetaan kullakin ajoneuvolla useita kertoja ja vähintään neljästi, jotta voidaan varmistua tulosten oikeellisuudesta.

Sekä kuormaamattomalla että kuormatulla ajoneuvolla tehdään mittaukset erikseen molemmissa ajosuunnissa. Menettelyssä nähdään alamäen ja ylämäen aiheuttama ero. Jos eron suuruus ei vastaa tien pituusleikkauksen kaltevuutta, ajoihin on voinut vaikuttaa myös tuuli tai tekninen vika.



Kuva 2. Coast down-mittauksen periaate ajovastusmittauksissa, kun mittaustieosa on niin pitkä, että ajoneuvon nopeus laskee jokaisella alkunopeuden arvolla lähelle pysähtymistä

Kuvasta 2 ilmenee esimerkki nopeus-aikatiedostosta Hamina-Vaalimaa-moottoritieellä tehdyistä mittauksista, jossa mittaustieosan pituus on riittävä. Tällöin ajoneuvon nopeus laskee alkunopeudesta riippumatta lähes pysähdykseen eikä eri ajojen tietoja tarvitse yhdistää.

Tiedoista määritetään niitä analysoimalla ajovastuskertoimien arvot ja niiden riippuvuus eri tekijöistä, erityisesti ajoneuvojen teknisistä ominaisuuksista. Kuvaan 2, sen oikeaan reunaan on lisätty analysoinnin tuloksista kunkin mittausajon numero, ajoneuvon  $C_d$ -arvo ja tuloksen hyvyyttä osoittava, hajontaa ilmaiseva arvo.

## 2.3 Ajovastusmittausten valmistelu

Ajovastusmittauksiin sisältyy seuraavat osatehtävät:

- ajovastusmittausten valmistelu
- sopiminen kuljetusyritysten kanssa ajoneuvojen käytöstä ajovastusmittauksissa sekä aikataulujen ja ohjeiden laadinta ajovastusmittauksille
- ajovastusmittausten suorittaminen
- ajovastusmittaustulosten tarkistaminen ja jalostaminen analysointia varten
- ajovastusmittausten analysointia vierintä- ja ilmanvastuskertoimien määrittämiseksi

### 2.3.1 Valmistelutehtävät

Valmistelutehtävät sisältävät seuraavaa:

- Ajosuunnitelmien laadinta
- Mitta- ja tiedonkeruulaitteiden hankinta
  - tietokoneet ja adapterit ajoneuvon virtajännitteen muuttamiseksi tietokoneita varten
  - tiedonsiirtolaitteet ajoneuvon CAN-väylältä saatavien tietojen siirtämiseksi tietokoneille
  - tiedonkeruujärjestelmän toimivuuden tarkistaminen tietokoneissa
  - ilmanpaine-, lämpö- ja rengaspainemittarit
  - ajoneuvojen varoitusvalot ja liikennetutkimuslaatat
  - kamera(t) jalustoineen videointia varten
- Mittausten aikaisten liikennejärjestelyjen suunnittelu
- Ajoreitin ja kääntöpaikkojen selvittäminen HCT-ajoneuvoille
- Ajoneuvojen kuormaus- ja purkaustoiminnan sekä kuormaus- ja purkaupaikan/paikkojen selvittäminen
- Ajoneuvojen vaaituspaikan selvittäminen
- Pyyntö Trafille HCT-kokeilureittien laajentamisesta tilapäisesti niin, että kaikki yhdistelmät saavat tulla laillisesti koeosuudelle ja Liikenneviraston selvitys siltojen kantavuudesta
- Turvallisuussuunnitelman laadinta ajovastusmittauksia varten

### 2.3.2 Kuvauksia valmistelutehtävistä

Ajoreitti ajovastusmittauskohteessa noin 30 m:n pituisille HCT-ajoneuvoille suunniteltiin työryhmän paikallistuntemusta sekä Googlen-karttoja käyttäen alustavasti. Tämän jälkeen työryhmä ajoi reitin läpi sekä teki väylän leveysmittauksia reitin liittymissä. Lisäksi tehtiin simulointeja HCT-ajoneuvojen tilantarpeesta ahtaissa liittymissä. Simuloinnin yhteydessä käytettiin Googlen karttatiedostossa ja tiedostoaukeamaan merkittyä mittakaavatietoa.

Kaikkien ajoneuvojen mittaussajot tehtiin sekä kuormaamattomilla että kuormatuilla ajoneuvoilla. Vemosim Oy suunnitteli mittaussajoneuvoja vuokraavien yritysten kanssa ajoneuvojen kuormaus- ja purkaustoiminnan etukäteen ennen mittaussajojen alkamista. Kuormaus ja purkaus järjestettiin Leca Oy:n tehdasalueella Hausjärven Oitissa.

Raakapuuajoneuvot toimittava Orpen Kuljetus Oy tuotti kuormana käytettävän raakapuun Leca Oy:n varastointialueelle ja ajoneuvon kuljettajat hoitivat kuormauksen ja purkauksen raakapuuajoneuvon kuormauslaitteella.

Muiden ajoneuvojen kuormaus- ja purkaustoiminnan Vemosim Oy järjesti yhteistyössä Leca Oy:n kanssa sen tehtaan varastoalueella. Kuormana käytettiin Leca-harkkolavoja, joiden massa vaihteli välillä 600–1 000 kg. Kuormauksen ja purkauksen hoiti Leca Oy:ltä palkattu henkilöstö yhteistyössä Vemosim Oy:n henkilöiden kanssa.

Leca Oy:n yhteistoiminta ajovastusmittauksissa oli erittäin tärkeä tekijä ajovastusmittausten suorittamiselle. Kuormaus- ja purkaustoiminnan järjestyminen ja samalla tarvittavan kuorman saanti Leca Oy:ltä, mittausta paikan läheltä nopeutti merkittävästi ajovastusmittausten suorittamista, koska mittaajoneuvot saatiin vain rajatuksi ajaksi viikonvaihteissa.

Ajoneuvojen vaatukset kuormaamattomina ja kuormattuina tehtiin Ekokem Oy:n vaatuspaikalla Riihimäellä. Ajovastusmittausten valmistelutyöt laitehankintoihin tehtiin elokuussa 2016.

Mittaajot tehtiin viikonvaihteissa perjantai-illan ja sunnuntai-illan välisen aikana luukuun ottamatta raakapuuajoneuvoja, joilla mittaajot tehtiin ajanjaksolla tiistai-ilta–keskiviikon aamuyö.

### **2.3.3 Ohjeet kuljetusyrityksille ja tiedonkeruulaitteisto**

Vemosim Oy laati ja lähetti jokaiselle kuljetusyritykselle kuvauksen koko ajovastusmittausprosessista (ajovastusmittauksen reitti, ajoneuvon kuormaus- ja purkaustoiminta, kuormaus- ja purkausta paikka, ajoneuvon vaatuspaikka sekä aikataulusuunnite jokaista kuljetusyritystä varten). Myös laadittiin yksityiskohtainen kirjallinen ohje kuljettajalle ja tiedonkeruulaitteen käyttäjälle eli miten kuljettajan ja tiedonkeruulaitteen käyttäjän tulee toimia ajovastusmittausta tehtäessä. Näin haluttiin varmistaa mittausten onnistuminen.

Vemosim Oy:n ohjeessa kuljetusyrityksille todettiin, mistä ja milloin ja ketkä noutavat ajoneuvot, ovatko ajoneuvot kuormaamattomia vai kuormattuja, missä ja ketkä asentavat mittaustalaitteet, vilkkuvalot ja muun informaation ajoneuvoihin.

Ohjeessa korostettiin, että ajoneuvojen rengaspaineet tulee säätää normaaleiksi ja ajoneuvot tankata mittaajoja varten. Tiedonkeruulaitteiden sekä liikenneturvallisuutta varmistavien laitteiden asentaminen ajoneuvoihin sekä liikennemerkkien sijoitus mittaustalaitteen alku- ja loppupäähän tehtiin Vemosim-ryhmän toimesta.

Tiedonkeruulaitteina käytettiin Paetronics Oy:n ECONEN-tiedonkeruujärjestelmää. Se kytkettiin ajoneuvon CAN-väylään Paetronics Oy:n edustajan toimesta ja joskus Vemosim Oy:n edustaja suoritti kytkennät.

Ajovastusmittauksia varten laadittiin erillinen turvallisuussuunnitelma. Turvallisuutta varmistavina laitteina ajoneuvon etu- ja takaosaan asennettiin informaatiokilpi ”Liikennetutkimus” ja ajoneuvon perään varoitusvilku.

Mittaustalaitteen alku- ja loppupäähän sijoitettiin liikennemerkit ”Liikennetutkimus” ja niihin yön ajaksi vilkkuvalot mittaustalaitteen alku- ja loppupäähän havaitsemiseksi mittaustalaitteen ajossa.

### 2.3.4 Mittausajojen toteuttaminen

Alkuperäinen suunnitelma oli se, että tehdään yhden ajoneuvon mittausajot kesällä (kesäkuussa) ja sen perusteella tehdään kaikki analysointiin tarvittavat, runsaasti aikaa vaativat toimenpiteet (tiedostojen tarkistus, jalostaminen analysointia varten sekä tarpeellisten ohjelmien käytön testaus) sekä varmistetaan niiden toimivuus.

Toisin sanoen oli tarkoitus varmistaa se, että ensimmäisen mittausajon jälkeen ehditään suunnitella mittaustietojen keruu täsmällisesti, raakatietojen jalostaminen analysointia varten (ohjelmallisesti - useita eri ohjelmia laatien - tietokonetta apuna käyttäen), jalostettujen tietojen tiedonkäsittelyohjelmien päivittäminen tai laadinta (useita ohjelmia), ensimmäisten mittausajojen analysointi ja samalla varmistaa se, että mittaustieosan alku- ja loppupaalujen sijoitus on oikea.

Alkuperäinen ajoitus suunnitelma kariutui, kun tutkimussopimus voitiin allekirjoittaa vasta elokuussa. Mittausten aloitus siirtyi syyskuulle valmistelutöiden vaatiman ajan vuoksi. Mittausten siirtyminen syksyyn aiheutti sen, että kaikki mittaukset jouduttiin tekemään yhtäjaksoisesti, jotta vältettäisiin syksyn epävakaiden sääolojen ja pimeiden öiden aiheuttamat mahdolliset esteet mittausten suorittamiselle. Yhtäjaksoisuudesta huolimatta – ottaen huomioon, että mittaukset voitiin tehdä vain viikon vaihteissa ja öisin - mittausjaksoksi muodostui pitkä, ajanjakson 9.9.–15.10.2016 viikonvaihteiden illat, yöt ja osittain päivät.

Mittaustulosten tarkistus ja jalostaminen analysointia varten aloitettiin mittausten jälkeen eli lokakuun lopussa 2016. Se, että mittaustieosan alku- ja loppupaalujen paikkoja jouduttiin siirtämään mittausten kuluessa, aiheutti haasteita jalostettaessa mittaustietoja analysointia varten.

Yritysten kuljettajille annettiin kirjallinen ohje ja lisäksi korostettiin mm. sitä, että tehtäessä mittausajo suurimmalla alkunopeudella (90 km/h), tulee lähestyä mittaosan alkupaalua ”talla pohjassa”. Jostakin syystä näin ei tapahtunut. Syy tähän oli se, että ajoneuvojen nopeusnäyttö oli asennettu ajoneuvon valmistajan toimesta näyttämään todellista nopeutta suurempaa nopeutta, noin 5 km/h. Tästä aiheutui haasteita ajovastusmittausten analysointiin, koska ajoneuvojen nopeusalueet muodostuivat erilaisiksi ajoneuvoittain.

## 2.4 Ajovastusmittausten suorittaminen

Ajovastusmittaukset tehtiin v. 2016, mutta v. 2017 tehtiin lisätutkimuksia, jotta saataisiin käsitys vaikuttaako nopeus ajoneuvon muotokertoimen  $C_d$ -arvoon.

### 2.4.1 Ajovastusmittausten ajanjakso

Vuoden 2016 ajovastusmittaukset suoritettiin ajanjaksolla 9.9.–15.10.2016.

Ajovastusmittaukset tehtiin viikonvaihteissa perjantai-illan ja sunnuntai-iltapäivän välisenä aikana lukuun ottamatta Orpe Kuljetus Oy:n ajoja. Ne tehtiin alkaen tiistai-iltana ja jatkettiin keskiviikkona sovittamalla ajot yrityksen normaaliin kuljetustoimintaan.

Viikonvaihteissa ja ilta- ja yöaikaan muu liikenne häiritsi vähiten mittausajoja. Yöaikaan tuulen voimakkuus on yleensä pienempi kuin päiväsaikaan.

### 2.4.2 Ajovastusmittausten paikka

Ajovastusmittaukset tehtiin Riihimäen ja Lahden välisellä kantatiellä 54 Hausjärven Oitissa. Valitulla kohdalla kantatie 54:llä on noin 1 400 m pitkä osa, jonka pituuskaltevuus on vakio ja itseisarvoltaan pieni, noin yksi (1) promille. Mittausosan pituus noin 1400 m on liian lyhyt. Mittaustieosan pituuskaltevuus on noin 1 % (+ 0.85 o/oo suunnassa Riihimäki → Lahti),

### 2.4.3 Käytetyt ajoneuvot

Ajovastusmittauksissa käytetyt ajoneuvot ominaisuuksineen ilmenevät taulukosta 1.

*Taulukko 1. Ajovastusmittauksissa käytetyt yhdistelmät, niiden käyttöalat ja eräät tekniset ominaisuudet.*

Ajoneuvo	Yhdistelmätyyppi	Yhdistelmän osien akseli-määrä	Yksittäis-rengastettujen akselien määrä	Kuormatila	Yhdistelmän pituus	Omassa ja kuormattu massa
Nro		kpl	Kpl		M	Kg
1	KA+PP	3+3	5	Konttirunko, 40 ft	15.92	18480 39340
2	KA+VP	3 + 5	7	Umpikori	25.34	27340 68940
3	KA+PP+AV+PP	3 + 3 + 2 + 3	10	Umpikori	31.51	31140 87400
4	KA + VP	4 + 5	2	Puutavara-pankot	24.43	26840 77320
75	KA+PP+VP	3 + 4 + 5	3	Puutavara-pankot	30.89	27180 95180
6	KA+PP+AV+PP	3 + 3 + 2 + 3	1	Konttirungot, 40 ft		33260 82740
7	KA+PP+AV+PP	3 + 3 + 2 + 3	9	Konttirungot, 40 ft	30.83	32380 81320

Liitteen 5 kuvissa on esitetty ajovastusmittauksissa käytettyjen yhdistelmien tyypit mittoineen ja massoineen.

Yhdistelmissä 6 ja 7 oli mittauksissa sama vetoauto, mutta puoliperävaunut ja apuvaunut erosivat rengastuksiltaan.

Lisäksi vertailtiin ajoneuvoja 6 ja 7 keskenään yksittäis- ja paripyörien vaikutuserojen selvittämiseksi. Vuoden 2017 mittauksessa oli ajoneuvoparin 4–5 lisäksi hakeajoneuvopari, josta toisen perävaunu oli varustettu yksittäispyörin ja toisen paripyörin.

#### 2.4.4 Haasteita mittauksissa

##### *Tiedonkeruulaitteiden toiminta*

Alkuperäisessä tutkimussuunnitelmassa oli 8 ajoneuvoa, jotka muodostivat neljä paria:

- MEK-Kuljetus Oy:n normaaliyhdistelmä ja vertailupareina Speed Oy:n jäljempänä mainitut kaksi HCT-yhdistelmää
- Kilon Osuus-Auton (KOA) normaaliyhdistelmä ja HCT-yhdistelmä
- Orpe Kuljetus Oy:n normaaliyhdistelmä ja HCT-yhdistelmä
- Speed Oy:n kaksi HCT-yhdistelmää, joista toisen molemmat puoliperävaunut olivat paripyörin ja toisen yhdistelmän yksittäispyörin

Tilauksessa varauduttiin kuitenkin siihen, että kaikkia ajoja ei pystytä ajamaan syksyn aikana, koska huono sää tai tekninen vika voivat estää ajon toteuttamisen, eikä syksyn aikana ehdittäisi löytää uutta soveltuvaan aikaa, jona kalusto olisi vapaana ja samanaikaisesti sää olisi riittävän tuuleton ja sateeton.

Tehtäessä ajovastusmittauksia MEK-Kuljetus Oy:n ajoneuvoilla ilmeni HCT-ajoneuvon osalta tiedonkeruuongelma. Kun lisäksi ajoneuvon ominaisuudet eivät vastanneet HCT-yhdistelmää, tämän ajoneuvon ajovastusmittauksista luovuttiin LiVin edustajan ehdotuksesta.

Tehtäessä mittauksia MEK-Kuljetus Oy:n normaaliajoneuvolla ajoneuvon nopeudessa havaittiin epäjohtonmukaisuuksia mittaustieosan Riihimäen puoleisessa päässä, koska tien pituuskaltevuus ei ollut vakio.

Seuraavia mittauksia varten tehtiin mittausosan vaaitus. Näiden perusteella mittausosuutta siirrettiin. Oikea mittauskohta alkaa 500 m:n päästä Oitin liittymästä Lahden suuntaan ja päättyy 1900 m:n päässä mainitusta liittymästä. Vakiokaltevouden omaavan, edellä mainitun paaluvälin tarkistus otettiin huomioon raakatietojen jalostamisessa varsinaista analysointia varten.

##### *Navakka tuuli häiritsi yhden ajoneuvon mittauksia*

Mittausajoneuvon vian vuoksi viikonvaihteen 30.9.–2.10.2016 mittaukset jouduttiin perumaan ja siirtämään ne seuraavaan eli viikonvaihteeseen 7.–8.10.2016. Tällöin tehtiin ajovastusmittauksia HCT-ajoneuvolla, jonka perävaunuissa oli paripyörät. Vallitsi navakka tuuli, joka häiritsi ajovastusmittauksia niin, että mittauksesta ei saatu luotettavia tuloksia ilmanvastuksen osalta.

##### *Mittausten nopeusalue jäi suppeaksi ilmanvastuksen määrittämisen kannalta*

Ajoneuvon ilmanvastukseen vaikuttavan ajoneuvon muotokertoimen ( $C_d$ ) arvo ei ole välttämättä vakio, vaan voi muuttua nopeuden mukaan virtauksen irtoamisen tai kiinnittymisen johdosta. Vaikka yleisesti kuorma-autojen maanopeus ei ylitä 90 km/h (nopeusrajoitinarvo), voi ilmanopeus (ajoneuvon nopeus ilmassaan nähden) vastatuulen ylittää 100 km/h. Esimerkkinä edellä olevasta ilmiöstä voidaan mainita tapaus eräällä linja-autolla, jossa nopeuden noustessa arvoon 100 km/h, muotokertoimen

$C_d$  -arvo väheni arvosta 0.49 arvoon 0.28. Tämä säilyi aina siihen saakka, kunnes nopeuden annettiin laskea nopeuteen 80 km/h, jolloin  $C_d$  saavutti virtauksen kiinnityssä perusarvon 0.49.

Nopeuden kasvaessa virtaus voi siis irrota, mikä tarkoittaa  $C_d$ -arvon pienenemistä. Kun nopeus laskee, *ao.* pienentynyt  $C_d$ -arvo voi pysyä pitkäänkin, ennen kuin virtaus jälleen kiinnittyy ja  $C_d$ -arvo kasvaa. Erityisesti tämä ilmenee kuormaamattomilla puutavara-yhdistelmillä.

Kuorma-autoilla yleinen ajonopeus on 80–90 km/h pitkämatkaisessa tavaraliikenteessä. Koska tuulen nopeus on yleensä 10–15 km/h, mutta vaihtelee ajoittain välillä 4–50 km/h (Ilmatieteenlaitos). Tämä merkinnee sitä, että suuruusluokkana neljäsosa ajosta tapahtuu Suomessa sellaisissa oloissa, joissa ajonopeus ilman suhteen on tai saattaa olla luokkaa 100–110 km/h.

Kuormaamattomilla ajoneuvoilla ilmanvastuksen suhteellinen osuus ajovastuksista on suurempi kuin kuormatuilla. Ajovastusmittausten nopeusalue jäi suppeaksi, koska lupaa nopeusrajoittimen arvon nostamiseen yleisellä tiellä ei voida antaa. Tästä aiheutui se, että syksyn 2016 ajovastusmittauksissa suurien nopeuksien vaikutusta ilmanvastukseen ei voitu selvittää.

Huomattakoon, että lain mukaan kuorma-autojen suurin sallittu nopeus on 80 km/h, mutta nopeusrajoittimen arvo on kuitenkin 90 km/h. Käytännössä siis sallitaan ajonopeus 90 km/h eli ajo ”nopeusrajoitinta vastaan”.

#### 2.4.5 Vuoden 2017 mittaukset

Mittaukset tehtiin kahta puutavara-ajoneuvoyhdistelmää ja kahta hakeajoneuvoyhdistelmää käyttäen. Puutavara-ajoneuvoyhdistelmät olivat varustettu paripyörin ja samat kuin vuoden 2016 mittauksissa. Molemmat hakeajoneuvoyhdistelmät olivat tyyppiä veoauto + varsinainen perävaunu, mutta toisessa perävaunu oli varustettu paripyörin.

Mittausten tarkoitus oli selvittää nopeuden vaikutusta ajoneuvojen ilmanvastustekijän eli muotokertoimien  $C_d$ -arvoihin. Mittauspaikkana oli yleiseltä liikenteeltä suljettu, vielä rakenteilla oleva moottoritie Hamina–Vaalimaa.

Tuloksena saatiin seuraavaa:

- Puutavara-ajoneuvoilla ajoneuvon muotokertoimen  $C_d$ -arvo riippuu puutavara-ajoneuvon ajonopeudesta ja on erilainen kuormaamattomalla ja kuormatulla ajoneuvolla.
- Hakeajoneuvolle  $C_d$ -arvo ei riipu ajonopeudesta eikä kuormauksesta, ts.  $C_d$ -arvo on likimain sama sekä kuormaamattomalla että kuormatulla ajoneuvolla

Tämä selvitys tuloksineen esitetään liitteessä 6. *Ajonopeuden vaikutus ajoneuvojen ilmanvastukseen* ja tuloksia käytetään tehtäessä raakapuuajoneuvoja koskeva lisätarkastelu *Liite 7. Raakapuuajoneuvoja koskeva lisätarkastelu.*

## 3 Ajovastusmittausten analysointi

### 3.1 Ajoneuvojen ajovastusten määrittäminen

#### 3.1.1 Periaatteet

Käsillä olevassa selvityksessä tarkastellaan myöhemmin vain kahta ajovastustekijää:

- ajoneuvon pyörien vierintävastus
- ajoneuvon ilmanvastus

Kun ajovastusanalysoinnin tuloksia sovelletaan myöhemmin ja määritetään eri ajoneuvojen energiankäyttöä ja hiilidioksidimääriä valitulla tai valituilla tiejaksoilla, tien pituuskaltevuus otetaan huomioon.

Ajoneuvon ajovastuksen jakaminen kahteen ja saatikka useampaan komponenttiin luotettavasti on haasteellista pelkästään siitä syystä, että tekijä voidaan jakaa kahteenkin osaan erittäin monella tavalla.

Ajovastusmittauksissa olosuhteet, erityisesti tuulen osalta vaihtelevat. Tuulta, sen nopeutta ja suuntaa ei voitu mitata (sopivien tuulimittareiden puutteen vuoksi). Kun HCT-ajoneuvojen tuulipinta on suuri, voidaan voimakkaan tuulen aikana saada mittaustuloksia, jotka eivät ole keskenään vertailukelpoisia. Joissakin mittaustuloksissa saattaa tuulella olla suuri vaikutus (joskus vastatuuli, joskus myötätuuli ja joskus sivumyötäinen tai -vastainen), mutta joissakin ei vaikutusta (tyyni sää).

Lisäksi vierintävastuskertoimien arvoon vaikuttavat myös mittausajoneuvojen kunto-tekijät. Niissä saattaa olla eroja eri ajoneuvojen kesken, mutta niitä ei voitu määrittää eikä ottaa huomioon mittauksissa. Vierintävastuskertoimeen vaikuttavat merkittävästi myös tieolot (päällysteen laatu ja kunto, akselien suuntaoikeamat, rengaspaine ja rengaskuvio), mutta näitä tekijöitä ei käsillä olevassa selvityksessä tarkastella. Syy tähän on se, että tarkastelussa keskitytään selvittämään ajoneuvon teknisten ominaisuuksien (mittojen ja massojen) vaikutusta ajovastuskertoimiin. Siksi ei paneuduta ajoneuvojen kunnon vaikutusten selvittämiseen. Yleensä kuljetusyrietykset tarkistavat renkaiden ilmanpaineet ohjearvoja vastaaviksi säästääkseen polttoaineenkulutusta ja kustannuksia. Todettakoon, että ajovastusmittauksissa käytettyjen tieosien päällysteiden kunto oli hyvä.

Analysointityön kuluessa käytiin keskusteluja myös Nokian Renkaiden tuotekehityksestä vastaavan johtajan Teppo Siltasen kanssa. (Neuvottelu kuorma-autojen renkaista LiVissä 14.12.2016, 2016). Tämän lisäksi haastateltiin Teppo Siltasta (Siltanen T. N., 2017) ja Heikki Jokelaa (Jokela, 2017).

Heikki Jokela, joka on paneutunut erityisesti puutavara-ajoneuvojen ilmanvastukseen kehittäessään puutavarapankkoja, esitti kokemukseensa perustuen seuraavia seikkoja: Vesi- tai lumisumu synnyttää erityisesti kuormaamatonta puutavara-autoa ohitettaessa vaaratilanteita, kun näkyvyys voi heiketä merkittävästi. Ajoneuvojen alustat ovat hähkejä, jotka imuvaikutuksensa vuoksi keräävät erilaista materiaalia (maa- ja kiviainesta sekä talvisin jäätyvää lunta) ajoneuvon alustaan. Lisämateriaalin massa voi ajoneuvoyhdistelmän tapauksessa olla jopa yli 2 000 kg. Tämä ylimääräinen massa lisää energiankäyttöä, hiilidioksidipäästöjä sekä kustannuksia.



Ajovastusmittaustulosten analysoinnissa edettiin vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa havaittiin tuloksissa suuria vaihteluja. Tämä aiheutti sen, että analysointityö tuotti aluksi ristiriitaisia tuloksia. Joidenkin ajoneuvojen tapauksessa tulokset vierintä- ja ilmanvastuskertoimien arvojen osalta olivat keskenään loogisia ja vastasivat tutkimuksen tekijöiden kokemusta vastaavia arvoja. Eräiden ajoneuvojen tapauksessa ajovastuskertoimien arvot olivat epäloogisia siten, että vierintävastuskertoimen arvo saattoi muodostua jopa negatiiviseksi. Tämä epäloogisuus aiheutuu mittaustulosten vaihteluista, koska tuulen suunta ja voimakkuus vaihtelevat ja vastaantulevista ajoneuvoyhdistelmistä syntyy pyörteitä.

Seuraavassa vaiheessa käsiteltiin useita vaihtoehtoisia analysointitapoja. Niiden perusteella päädyttiin menettelyihin, joiden antamat tulokset esitetään seuraavassa ottaen huomioon myös vuonna 2017 tehdyt ajovastusmittaukset Hamina–Vaalimaa-moottoritiellä.

Hamina–Vaalimaa-mittaukset toivat tarkennuksen vain puutavara-ajoneuvojen ajovastuskertoimiin ilmanvastuksen osalta. Asiaa selvitetään tarkemmin liitteessä 6.

### 3.1.2 Mittaustieosien erot ja niiden vaikutukset mittausten ajosuuntiin

KT 54:n ajovastusmittaukset tehtiin molemmissa ajosuunnissa erikseen, jossa pituuskaltevuuden itseisarvo oli noin 1 o/oo ja mittaustieosan pituus noin 1400 m. Hamina–Vaalimaa-moottoritiellä mittaukset tehtiin vain yhteen eli vastamäen suuntaan, koska pituuskaltevuuden itseisarvo oli 4 o/oo ja mittaustieosan pituus riittävän pitkä, noin 3100 m. Hamina–Vaalimaa-tiellä tehtiin vain muutamia mittauksia myötämäkeen, koska havaittiin, että coast down-mittauksessa ajoneuvo rullasi myötämäen suuntaan hidastumatta riittävästi, varsinkin kuormattujen ajoneuvojen tapauksessa.

## 3.2 Ajovastuskertoimet

### 3.2.1 Tulokset

Yhteenvedo analysoinnin tuloksista esitetään liitteen 1 taulukoissa 1 ja 2 sekä kuvissa 1 ja 2. Liitteen 1 taulukossa 1 esitetään ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvojen ominaisuudet ajovastusten määräytymisen kannalta. Liitteen 1 taulukossa 2 ovat ajovastuskertoimien arvot ajoneuvoittain erikseen kuormaamattomien ja kuormattujen ajoneuvojen osalta.

Analysointi antoi tulokseksi vierintävastuskertoimen perusosan  $a_0$  ajoneuvoyhdistelmän massan ja pyörämäärän perusteella (Liitteen 1 kuva 1, jossa  $a_0$ :n yhtälö on merkitty y:llä) ja nopeudesta riippuva osan  $a_1$  myös ajoneuvoyhdistelmän massan ja pyörämäärän perusteella. Teppo Siltanen toimitti työryhmälle laatimansa muistion, jossa tarkasteltiin myös nopeuden mahdollista vaikutusta vierintävastukseen (Siltanen T. , 2010). Tämän mukaisesti vierintävastus kasvaa lineaarisesti siten, että nopeudella 80 km/h vierintävastus on noin 30 % suuremp kuin ajoneuvon lähdettyä liikkeelle. (Liitteen 1 kuva 2, jossa  $a_1$ :n yhtälö on merkitty vastaavasti y:llä). Kuvaan 1 ja 2 on lisätty samanvärisinä +merkkeinä vastaavat havainnot kuormaamattomalla ja kuormatulla ajoneuvoilla.

Liitteen 1 kuvista 1 ja 2 nähdään myös se, että analysointi tuottaa tulokseksi mallit (eli yhtälöt), jotka sopivat hyvin mittaushavaintojen arvoihin. Mallien sopivuuden hyvyttä osoittavan korrelaatiokertoimen arvo on suuri ( $R = 0.93$ ) ja jäännöshajonnat ( $S = 0.00020$  ja  $S = 2.70E-6$ ) pieniä.

Seuraavassa esitetään saadut vierintä- ja ilmanvastuskertoimet sekä esimerkit vierintä- ja ilmanvastuksen määrittämisestä liitteen 1 tulosten perusteella.

### 3.2.2 Saadut vierintä- ja ilmanvastuskertoimet

Vierintävastuskertoimelle saatiin yhtenäinen kaikkiin yhdistelmiin soveltuva yleinen malli. Sen sijaan ilmanvastukselle ei voitu määrittää yleistä mallia. Se lienee mahdollista, mutta vaatii lisäselvitystä. Ajoneuvotyyppikohtaiset ilmanvastukset on esitetty liitteessä 1.

Vierintävastus määräytyy yhdistelmän kokonaismassan, pyörien lukumäärän ja ajonopeuden perusteella. Mallin mukaa vierintävastus kasvaa saman verran, tulevatko lisäpyörät lisäakselista tai muuttamalla yksittäispyöräkseli paripyöräkseliksi.

Vierintävastuskerroin muodostuu kahdesta osasta  $C_0$  ja  $C_1$ .

$C_0$  on vakio-osa ja  $C_1$  nopeuskerroin, joka ottaa huomioon nopeuden vaikutuksen vierintävastukseen.

$$C_0 = A_0 + A_1(m+100)^p + A_2 n - A_3 m n$$

$$C_1 = B_0 + B_1(m+100)^p + B_2 n - B_3 m n$$

jossa

$A_0, A_1, A_2$  ja  $A_3$  sekä  $B_0, B_1, B_2$  ja  $B_3$  ovat kertoimia

$m$  = ajoneuvon massa [t]

$n$  = ajoneuvon pyörien lukumäärä

Ajoneuvon liikettä vastustava vierintävastusvoima  $F_r$  määritetään vierintävastuskertoimien avulla käyttäen seuraavaa yhtälöä:

$$F_r = m g (C_0 + C_1 v)$$

jossa

$F_r$  = vierintävastusvoima [kN]

$m, C_0$  ja  $C_1$  kuten yllä

$g$  = maan vetovoiman kiihtyvyys (= 9.81 m/s)

$v$  = ajonopeus [m/s]

Kertoimien arvoiksi saatiin seuraavat

$A_0 = 4.0718E-3$	$B_0 = 5.4969E-5$
$A_1 = 3.9899E25$	$B_1 = 5.3864E23$
$A_2 = 5.4863E-5$	$B_2 = 7.4065E-7$
$A_3 = -4.3728E-7$	$B_3 = -5.9033E-9$
$p = -13.972$	$p = -13.972$

**Esimerkki vierintävastuskertoimien ja vierintävastusvoimien määrittämisestä**, kun ajoneuvon massa ja pyörämäärä sekä ajonopeus ovat seuraavat:

- Ajoneuvon (ajoneuvoyhdistelmän) massa on  $m = 90 \text{ t}$
- Ajoneuvoyhdistelmän pyörämäärä  $n = 42 \text{ kpl}$
- Ajonopeus  $80 \text{ km/h}$  ( $v = 22.22 \text{ m/s}$ )

$$\begin{aligned} C_0 &= A_0 + A_1(m+100)^p + A_2 n - A_3 m n \text{ saa seuraavan arvon} \\ &= 4.0718\text{E-}3 + 3.9899\text{E}25 (90+100)^{(-13.972)} + 5.4863\text{E-}5 \times 42 \\ &\quad - (-4.3728\text{E-}7) \times 90 \times 42 \\ &= 0.004724 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= B_0 + B_1(m+100)^p + B_2 n - B_3 m n \\ &= 5.4969\text{E-}5 + 5.3864\text{E}23 \times (90 + 100)^{(-13.972)} + 7.4065\text{E-}7 \times 42 \\ &\quad - (-5.9033\text{E-}9) \times 90 \times 42 \\ &= 0.000063769 \end{aligned}$$

**Vierintävastusvoima:**

$$\begin{aligned} F_r &= m g (C_0 + C_1 v) \\ &= 90.0 \times 9.81 \times (0.0047237 + 0.0000637 \times 22.22) \\ &= 4.17 \text{ kN} \end{aligned}$$

**Ilmanvastus:**

Ilmanvastus määräytyy ajoneuvon otsapinta-alan, ilmantiheyden, ajonopeuden ja ajoneuvon muotokerroimen  $C_d$  perusteella.

$$\text{Ilmanvastus} = 0.5 A_f I_t C_d v^2,$$

jossa

- $A_f$  = ajoneuvon otsapinta-ala [ $\text{m}^2$ ]
- $I_t$  = ilman tiheys =  $1.25 \text{ kg/m}^3$
- $C_d$  = ajoneuvon ilmanvastuksen muotokerroin
- $v$  = ajonopeus [ $\text{m/s}$ ]

Ilmanvastukselle ei määritetty yleistä mallia. Se lienee mahdollista, mutta vaatii lisäselvitystä, kuten edellä todettiin.

**Esimerkki ilmanvastuksen määrittämisestä**, kun ajoneuvon otsapinta-ala, muotokerroin, ilmantiheys ja ajonopeus ovat seuraavat:

- Ajoneuvon otsapinta-ala  $A_f = 10.5 \text{ m}^2$
- Ilman tiheys  $I_t = 1.25 \text{ kg/m}^3$
- Ajoneuvon ilmanvastuksen muotokerroin  $C_d = 0.8$
- Ajonopeus on  $80 \text{ km/h}$  (eli  $v = 22.22 \text{ m/s}$ )

**Ilmanvastusvoima:**

$$\begin{aligned} &= 0.5 A_f I_t C_d v^2 \\ &= 0.5 \times 10.5 \times 1.25 \times 0.8 \times 22.22^2 \\ &= 2592 \text{ N} \\ &= 2.59 \text{ kN} \end{aligned}$$

Myöhemmin tehtiin Hamina–Vaalimaa-moottoritietäyömaalla lisää ajovastusmittauksia ja määritettiin ajovastuskertoimet hakeajoneuvoille ja puutavara-ajoneuvoille.

Tuloksena saatiin seuraavaa:

- Puutavara-ajoneuvoilla ajoneuvon muotokertoimen  $C_d$ -arvo riippuu puutavara-ajoneuvon ajonopeudesta ja on erilainen kuormaamattomalla ja kuormatulla ajoneuvolla.
- Hakeajoneuvolla ei ilmene samanlaista riippuvuutta nopeudesta kuin puutavara-ajoneuvoilla, ts.  $C_d$ -arvo on sama sekä kuormaamattomalla että kuormatulla ajoneuvolla

Liitteessä 1 (*Ajovastusanalyysi*) esitetään ajovastusten määrittämismenettely ja liitteessä 2 (*Ajovastusmittausten analysointitulokset ajoneuvoittain*) esitetään tuloksia. Liitteessä 6 (*Ajonopeuden vaikutus ajoneuvojen ilmanvastuksiin*) esitetään tarkastelu nopeuden vaikutuksesta ajovastuksiin ja Liitteessä 7 (*Raakapuuajoneuvoja koskeva lisätarkastelu*) esitetään ao. tarkastelu.

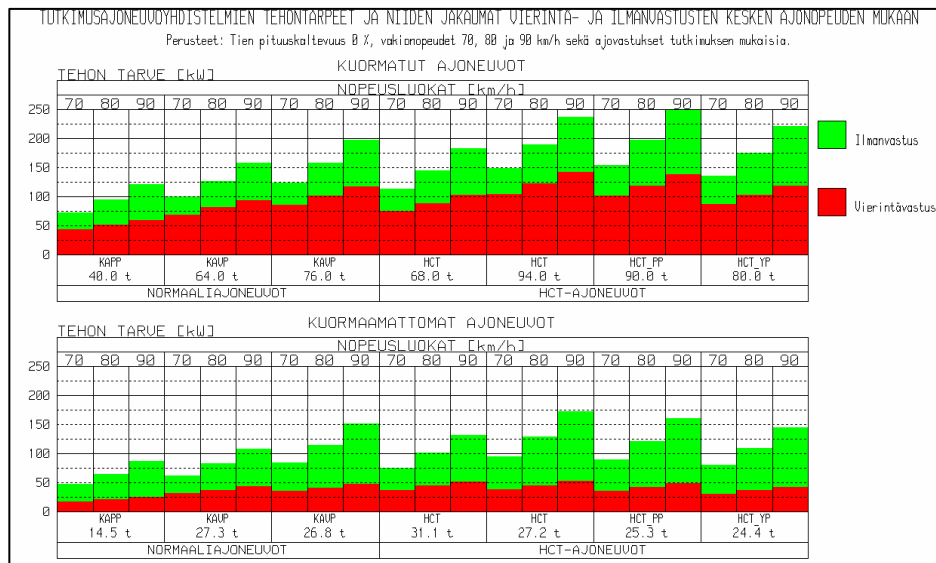
Liitteen 1 kuvasta 1 nähdään, että kuormaamattomalla ajoneuvolla 3 (massa 27.3 t) ja ajoneuvolla 5 (31.1 t) saatu havainto on suurempi kuin mallin tuottama. Koska havainnot poikkeavat muille ajoneuvoille saadusta mallista, nämä havainnot, jotka on osoitettu kuvassa merkillä (+), on jätetty huomioon ottamatta kaavan 5 mallia laadittaessa. Vastaava poikkeama on osoitettu myös liitteen 1 kuvassa 2, joka koskee vierintävastuksen nopeuskerrointa. Tuloksissa on hajontaa, mikä aiheutuu useista tekijöistä, kuten mittausosan lyhydestä ja tuuli- ja liikenneoloista.

Vuoden 2017 ajovastusmittausten avulla tarkennettiin ilmanvastuskertoimien arvot ottamalla huomioon myös tilanne, jossa nopeus on yli 80 km/h.

### 3.3 Ajoneuvoyhdistelmien tehontarve vierintä- ja ilmanvastuksen mukaan

Yhdistelmien tehontarpeet ja luvun 4 laskelmat on tehty käyttäen yleisestä mallista saatuja vierintävastuskertoimia, mutta ilmanvastus on määritetty kunkin ajoneuvon ominaisuuksien perusteella.

Tehon tarpeeseen eri ajo-oloissa vaikuttavat ajovastukset. Kuvista 3 ja 4 nähdään ajoneuvojen moottoritehon tarve absoluuttisena (kuva 3) ja suhteellisena (kuva 4) vierintä- ja ilmanvastuksen osalta kuormauksen mukaan vakionopeuden eri arvoilla, kun tien pituuskaltevuus on 0 %.

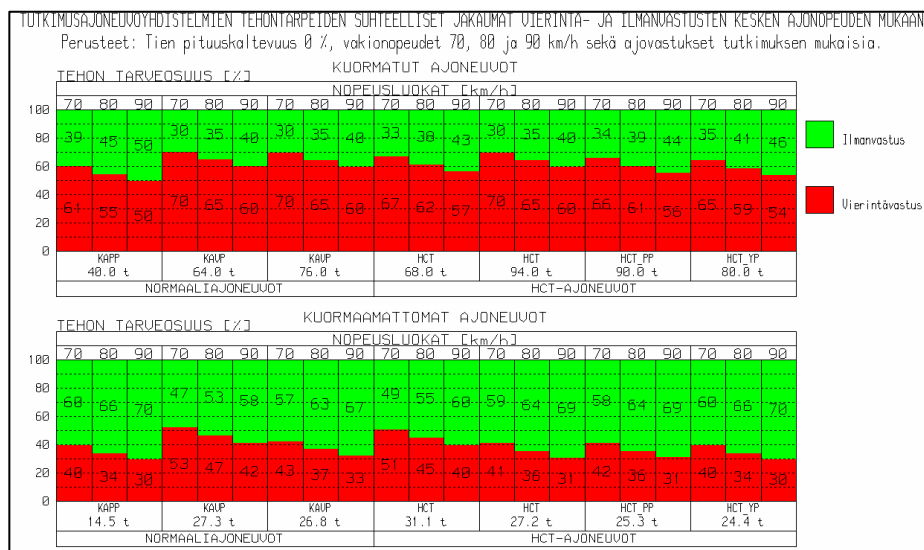


Kuva 3. Ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien vierintä- ja ilmanvastuksen vaatima teho kuormauksen ja vakionopeuden arvon mukaan tiellä, jossa pituuskaltevuus on 0 %

Kuvasta 3 havaitaan:

- Kun tien pituuskaltevuus on 0 %, on tehontarve vähäinen ja määräytyy massan ja ajonopeuden mukaan.
- Tehontarve riippuu voimakkaasti yhdistelmän massasta ja ajonopeudesta.
- Kuormatuilla ajoneuvoyhdistelmillä tehontarve vaihtelee yhdistelmästä toiseen ja on välillä 75–150 kW ajonopeudella 70 km/h ja välillä 125–250 kW ajonopeudella 90 km/h.
- Kuormaamattomilla ajoneuvoyhdistelmillä tehontarve on välillä 50–100 kW ajonopeudella 70 km/h ja välillä 85–175 kW ajonopeudella 90 km/h.

Kun ajetaan vastamäkeen pituuskaltevuuden ollessa 1 %, pituuskaltevuus- eli mäki-  
vastuksen osuus on samaa luokkaa kuin vierintä- ja ilmanvastuksen yhteensä.



Kuva 4. Ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien tehontarpeen jakauma vierintä- ja ilmanvastuksen kesken kuormauksen ja vakionopeuden arvon mukaan tiellä, jossa pituuskaltevuus on 0 %

Kuvasta 4 havaitaan:

- Tien pituuskaltevuuden ollessa 0 % kuormatuilla yhdistelmillä vierintävastuksen osuus tehontarpeeseen on vallitseva eli 55–70 % ajonopeusalueilla 70–80 km/h
- Ajonopeudella 90 km/h ilmanvastuksen osuus on 40–50 % eli se lähestyy vierintävastuksen osuutta.
- Kuormaamattomilla yhdistelmillä ilmanvastuksen osuus tehontarpeesta on vallitseva eli 53–70 % ajonopeuksilla 80–90 km/h, mutta ajonopeudella 70 km/h vierintävastuksen osuus on eräillä yhdistelmillä jopa suurempi kuin ilmanvastuksen.

Ilmanvastuksen osuus on suhteellisen suuri kuormaamattomilla yhdistelmillä ja siihen vaikuttaa ajoneuvojen kuormatila ja alustarakenteet, joita voidaan muuttaa. Tämän vuoksi olisi tarpeen tehdä selvityksiä, miten ilmanvastusta voitaisiin vähentää ajoneuvoyhdistelmien kuormatiloja ja alustarakenteita kehittämällä. Samalla saataisiin parannusta myös liikenneturvallisuuden kannalta, koska ajoneuvoyhdistelmät synnyttävät näkyvyyttä heikentävää vesi- ja lumisumua kelioloista riippuen ja siten aiheuttavat riskitilanteita niitä ohitettaessa.

## 4 HCT- ja normaaliajoneuvojen polttoaineenkulutus ajoneuvosimulointia käyttäen

### 4.1 Simuloinnin toteutus

#### 4.1.1 Simuloinnin perusteet

Vemosim Oy:n käyttämän ajoneuvosimulointijärjestelmän avulla voidaan laskea energiankäyttö ja päästöt sekä ajonopeudet ja ajoajat

- erilaisille, olemassa oleville tai suunnitelluille ajoneuvoille
- eri kuormitusasteilla
- erilaisilla teillä

Myös nopeusrajoitukset ja esimerkiksi kiertoliittymien aiheuttamat pakolliset hidastukset ja kiihdytykset voidaan ottaa huomioon, mikäli niistä on käytettävissä tarvittavat tiedot.

Tehtäessä simulointeja polttoaineenkulutuksen määrittämiseksi Vt 4 reitillä välillä Helsinki–Oulu oli käytettävissä tiedot tien pituusprofiilista (pituuskaltevuus). Ajotapana käytettiin raskaan kaluston sallittua maksiminopeutta 80 km/h. Myötämässä on käytetty gravitaation avulla saavutettavaa myötämäkilisää (schwung) enintään 10 km/h.

Helsinki–Oulu-välin simuloinneissa käytetyt vierintävastuskertoimet ovat kohdassa 3.2.2 esitetyn yleisen mallin mukaisia ja ilmanvastukset liitteen 1 mukaisia ajoneuvotyyppikohtaisia.

#### 4.1.2 Simuloinnissa käytetty tie välillä Helsinki–Oulu

Simulointi tehtiin Vt 4:llä välillä Helsinki–Oulu. Tiejakso edustaa likimäärin keskimääräistä Suomen pääteiden topografiaa.

Menettely varmistasi sen, että polttoaineenkulutukseen vaikuttavat keskeiset tekijät eli tien ominaisuudet, tavoitenopeus ja ajotapaominaisuudet olivat samat paitsi kaikille ajoneuvoille myös molemmille ajoneuvoille ajoneuvoparittaisessa (normaali- vs. HCT-ajoneuvo) vertailussa.

Todettakoon kuitenkin, että väli Helsinki–Oulu ei tietenkään edusta normaalia raakapuun kuljetusta. Normaalisissa raakapuun kuljetuksissa normaaliajoneuvo hakee kuorman metsävarastolta ajaen osan matkasta metsäauto- tai tilustietä. Sen sijaan HCT-ajoneuvolle Helsinki–Oulu-välin mäkisyys voi olla tyypillinen, sillä se ottaa kuorman puutavaraterminaalista ajaen koko matkan korkealuokkaisempaa tietä. Vertailtavuuden vuoksi normaaliajoneuvo on tässä laitettu ajamaan samaa reittiä kuin HCT-ajoneuvo.

Ajoneuvosimuloinnin keskeisen edellytyksenä ovat moottorikartat. Tutkimukseen sisällytetyistä ajoneuvoista ei ole käytettävissä moottorikarttoja, mutta simuloinnissa on käytetty vertailukelpoisia moottorikarttoja.

Samalla reitin välillä Helsinki–Oulu on määritetty simulointia käyttäen ennen tämän tutkimuksen tekemistä kymmenien muiden nykyisten ajoneuvojen polttoaineen kulutus ja päästöt käyttäen vuonna 2011 mitattuja ajovastuksia, jolloin kokonaisuudessa oli 60 t. Tässä tutkimuksessa laskettuja tuloksia voidaan siten – tarvittaessa ja erikseen – verrata vanhoihin tuloksiin. Vertailua haittaa jonkin verran se, että tässä tutkimuksessa käytetään nykyaikaisempia moottoreita kuin aikaisemmissa simuloinneissa. Ajoneuvotekniikassa on tapahtunut kehitystä: esimerkiksi automaattinen rullaustoiminto poistaa alamäessä moottorin aiheuttaman vastuksen parantaen rullausta ja vähentäen siten myös polttoaineen kulutusta.

Edellä mainitun kehityksen aiheuttamat muutokset eivät kuitenkaan muuta käsillä olevan selvityksen vertailutuloksia normaali- ja HCT-ajoneuvojen kesken. Simulointeja voidaan tarvittaessa tehdä muillakin tiejaksoilla, joiden pystygeometria tunnetaan riittävän tarkasti.

#### **4.1.3 Tutkitut ajoneuvoyhdistelmät**

Reitin Helsinki–Oulu-simuloinneissa käytettiin aluksi kaikkia ajovastustutkimukseen sisällytettyjä seitsemää ajoneuvoyhdistelmää. Kun tehtiin lisäselvitys raakapuuajoneuvoista (Liite 7), tehtiin lisäksi simuloinnit erikseen suunnitelluilla kahdella raakapuu yhdistelmällä muuttamalla kuormausastetta ja raakapuun irtotilavuusmassan arvoa. Ajovastuksina simuloinneissa käytettiin yleisen mallin mukaisia vierintävastuskertoimia ja ajoneuvokohtaisia ilmanvastuskertoimia. Raakapuuajoneuvoja koskevassa lisäselvityksessä ilmanvastuskertoimina käytettiin tarkistettuja ilmanvastuskertoimia ( $C_d$ ) Liitteen 4 tulosten mukaisesti.

## **4.2 Polttoaineenkulutus**

### **4.2.1 Polttoaineen kulutusvertailussa käytettävät suureet ja yksiköt**

Tehtäessä tarkasteluja eri ajoneuvojen polttoaineenkulutuksesta ja myös päästömääristä liikenteessä ja tavarakuljetuksissa käytetään tarkasteluissa SI-järjestelmän mukaisesti suureita oikeine nimineen. Näin saadaan vertailut johdonmukaisiksi ja keskenään soveltuviksi. Ajoneuvon liikuttaminen paikasta toiseen on suureena ajo- tai liikennesuorite. Kuorman ja liikennesuoritteen tulo on kuljetussuorite. Ajoneuvon liikuttaminen on työtä ja vaatii energiaa. Työllä ja energialla on samat yksiköt. Taulukossa 2 esitetään käytettävät suureet ja niiden yksiköt.



Taulukko 2. Perus- ja johdetut suureet yksiköineen määritettäessä ajoneuvojen polttoaineenkulutusta

Perussuure			Johdettu suure		
Suure	Yksikkö	Lyhennys	Suure	Yksikkö	Käyttö
Polttoaineenkulutus <sup>2</sup>	Litra	[l]	Kulutus	[l]	Polttoaineen kokonaiskulutus
Ajosuorite*)	ajoneuvokilometri	[km]	Kulutus ajosuoritetta kohden	[l/100 km]	Polttoaineenkulutus yhtä ajoneuvoa kohden
Liikennesuorite**)	ajoneuvokilometri	[km]	Kulutus liikennesuoritetta kohden	[l/100 km]	Polttoaineenkulutus liikenteessä
Kuljetusuorite	tonnikilometri	[tkm]	Kulutus kuljetussuoritetta kohden	[l/100 tkm]	Polttoaineenkulutus raskaan tavaran kuljetuksessa
	lavametrikilometri	[lavmetrikm]	Kulutus kuljetussuoritetta kohden	[l/100 lavametrikm]	Polttoaineenkulutus kevyen tavaran kuljetuksessa
	kuutiometrikilometri	[m <sup>3</sup> km]	Kulutus kuljetussuoritetta kohden	[l/m <sup>3</sup> km]	Polttoaineenkulutus kevyen tavaran kuljetuksessa
	konttikilometri <sup>3,4</sup>	[konttikm]	Kulutus kuljetussuoritetta kohden	[l/konttikm]	Polttoaineenkulutus konttien kuljetuksessa

Huom! Käsitteet vaihtelevat:

\*) ajosuoritetta käytetään, kun on kysymyksessä yksi ajoneuvo

\*\*\*) liikennesuoritetta käytetään, kun on kysymyksessä koko liikenne

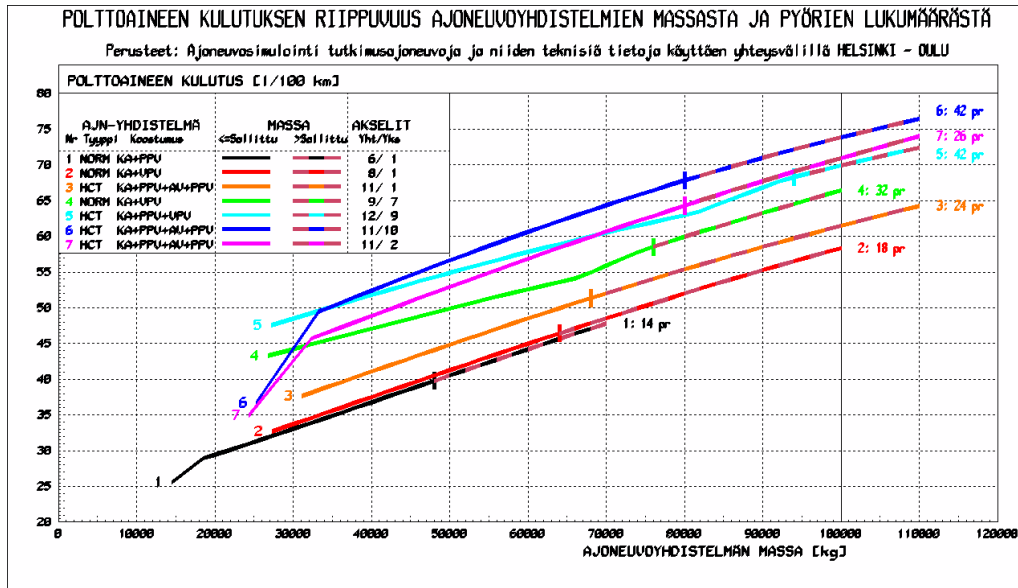
<sup>2</sup> Sähkökäyttöisten ajoneuvojen tapauksessa käytetään polttoaineen sijasta suuretta energia ja sen yksikönä kilowattituntia [kWh]. Tällöin suureiden yksiköt ovat [kWh/km], [kWh/tkm], [kWh/lm-km] ja [kWh/m<sup>3</sup>km].

<sup>3</sup> Kontin pituus (12, 20, 40 jalkaa, jne.) määrittää kuljetustyön määrän

<sup>4</sup> Myös muita yksiköitä voidaan käyttää kuljetettavan tavaran ominaisuuksien mukaan

#### 4.2.2 Yhdistelmän ominaisuuksien vaikutus polttoaineen kulutukseen

Kuvasta 5 ilmenee polttoaineen kulutus 100 ajokilometriä kohti [l/100 km] kohden ajoneuvoyhdistelmän massan, pyörien lukumäärän ja ajoneuvon muodon mukaan.



Kuva 5. Ajoneuvoyhdistelmien polttoaineenkulutuksen [l/100 km] riippuvuus massasta ja pyörien lukumäärästä

Ajoneuvoyhdistelmien koostumusta koskevat lyhennelmät kuvissa 5, 6 ja 7 ovat:

KA = kuorma-auto (vetoauto), PPV = puoliperävaunu, VPV = varsinainen perävaunu, AV = apuvaunu

Polttoaineenkulutus kasvaa 0,27...0,38 l/100 km, kun kuormaa lisätään 1 tonni. Asiaa on kuvattu tarkemmin alla olevassa laskelmassa.

Yhden lisätönin aiheuttama lisäkulutus riippuu kokonaismassasta seuraavasti:

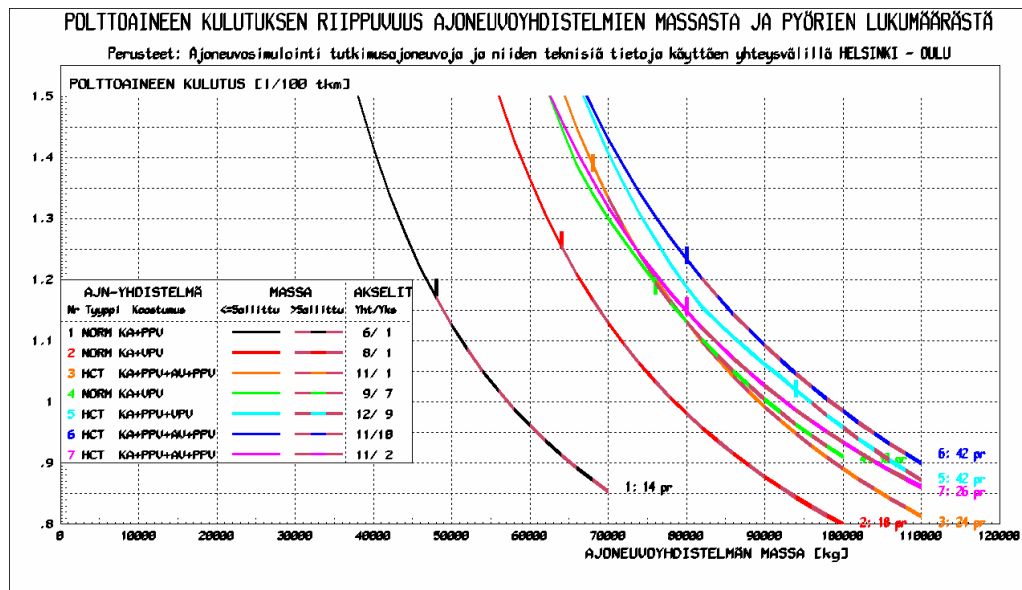
- massan arvolla 32 t 0,38 l/100 km ja t
- massan arvolla 60 t 0,36 -"-
- massan arvolla 100 t 0,28 -"-

Kohdassa 4.4 on laskettu, että kahden pyörän lisääminen (yksi yksittäispyöräinen lisäakseli tai yhden yksittäispyöräisen akselin muuttaminen paripyöräiseksi) lisää polttoaineen kulutusta 0,22...0,40 l/100 km. Suurin kasvu toteutuu, kun kokonaismassa on suuri.

Ajoneuvojen 6 ja 7 osalta kuvaajissa on taite alle 35 tonnin kokonaismassan kohdalla. Ajoneuvojen 1, 6 ja 7 kohdalla polttoaineen kulutus ilman tyhjien merikonttien massoja on merkitty soikiolla.

Kuvissa 5–7 on merkitty pystysuorakulmiolla polttoaineen kulutuksen arvot, kun ajoneuvoyhdistelmän massa ylittää sille sallitun arvon.

Kuvassa 6 on esitetty polttoaineen kulutus jaettuna kuorman massalla.

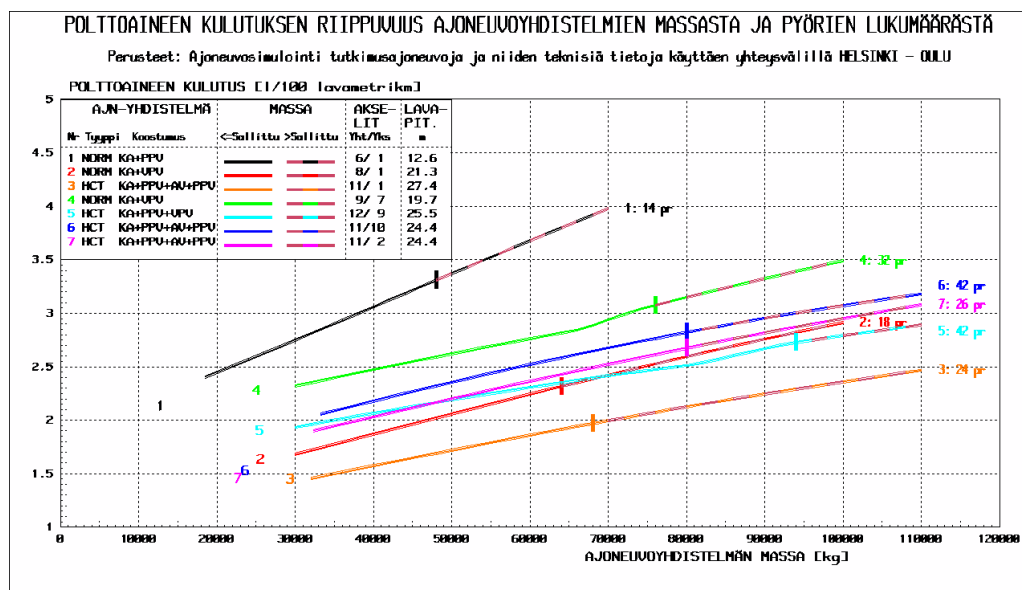


Kuva 6. Ajoneuvoyhdistelmien polttoaineen kulutus [l/ 100 tkm] massan ja pyörämäärän mukaan

Kuvasta 6 havaitaan mm. seuraavaa:

- kuorman ja kokonaismassan kasvaessa polttoaineen kulutus kuljetussuoriteyksikköä [tkm] kohti pienenee
- ajoneuvon pyörämäärän kasvaessa polttoaineen kulutus kasvaa.

Kuvassa 7 on esitetty polttoaineen kulutus jaettuna 100 ajokilometrillä ja yhdistelmän lavapituudella [l/100 lavametrikm] kohden.



Kuva 7. Ajoneuvoyhdistelmien polttoaineenkulutus [l/100 lavametrikm] massan ja pyörämäärän mukaan

Kuvasta 7 ilmenee, että yhdistelmien polttoaineen kulutus [l/100 lavametrikm] on sitä pienempi, mitä suurempi lavapituus yhdistelmällä on.

Huom! Tavarakuljetuksissa käytetään kuormalavoja ja rullakoita. Kuormalavan koko vaihtelee: EUR-lava [800 x 1200 mm] , FIN-lava [1000 x 1200 mm] ja myös on erikoismittaisia kuormalavoja.

Rullakoiden mitat vaihtelevat [400 x 300 mm, 600 x 400 mm, 600 x 800 mm, jne].

#### 4.2.3 Normaali- ja HCT-ajoneuvojen polttoaineen kulutuksen vertailu

Taulukoissa 3...5 on vertailtu ensin tyhjää HCT-yhdistelmää vastaavaan normaaliyhdistelmään jakamatta kulutusta kuorman massalla tai tilavuudella ( $l/100\text{ km}$ ), koska kuormaa ei ole. Vastaava luku on annettu taulukoissa 3...5 myös kuormatuille ajoneuvoille. Niiden osalta polttoaineen kulutus liikennesuoriteyksikköä [ $l/100\text{ km}$ ] kohti ei kuitenkaan kuvaa kuljetustaloutta eli sitä, paljonko polttoainetta kuluu kuljettaessa tietty määrä tietyn matkan. On huomattava, että isompia yhdistelmiä tarvitaan paljon pienempi määrä kuljettamaan sama tavaramäärä kuin pieniä. Siksi polttoaineen kulutus pitää jakaa myös kerralla kuljetetulla tavaramäärällä. Raskaan tavarankuljetuksessa kulutus jaetaan kuorman massalla ( $l/100\text{ tkm}$ ), ja kevyen tavarankuljetuksissa kuormatilan tilavuudella tai pituudella ( $l/m^3\text{km}$  tai  $l/\text{kuormalavakm}$ ).

Taulukoissa 3...5 on verrattu HCT-yhdistelmää kuormatilaltaan lähinnä vastaavaan nykykalustoa edustavaan yhdistelmään. Kuormitusvaihtoehtoina on kolme tapausta:

- 0: Kuormaamaton
- $\frac{1}{2}$ : Kantavuuskuorma/2 (menomatka kuormattuna ja paluumatka kuormaamattomana)
- 1: Kantavuuskuorma

Kuormitustapauksessa  $\frac{1}{2}$  polttoaineenkulutus [ $l/100\text{ tkm}$  tai  $l/100\text{ lm-km}$ ] on molempien ajosuuntien kulutusten summa jaettuna menomatkan kuljetussuoritteella (= menomatka x menomatkan kuorma).

Taulukko 3. Normaali- ja HCT-yhdistelmien polttoaineenkulutus merikonttikuljetuksissa kuormausasteen mukaan

Ajoneuvo 1 on 3+3-akselinen puoliperävaunuyhdistelmä, ajoneuvo 6 ja 7 ovat 3+3+2+3-akselisia HCT-yhdistelmiä. Ajoneuvon 6 perävaunut on varustettu paripyörin, muut yksittäispyörin.

Ajn	Pyörät	Kuor- mitus	Oma massa	Kuor- ma	Kokonais- massa	Lava- pituus	Polttoaineen- kulutus		
	kpl		T	t	t	m	l/100 km	l/100 tkm	l/100 lm-km
1	14	0	14,50	0,00	14,50	12,64	25,59	-	-
6	42	0	25,30	0,00	25,30	24,38	36,68	-	-
6/1		0	1,74	-	1,74	1,93	1,43	-	-
1	14	½	4,50	17,50	32,00	12,64	33,79	1,93	2,67
6	42	½	25,30	32,70	58,00	24,38	59,85	1,83	2,45
6/1		½	1,74	1,87	1,81	1,93	1,77	0,95	0,92
1	14	1	14,50	33,50	48,00	12,64	39,78	1,19	3,15
6	42	1	25,30	64,70	90,00	24,38	71,00	1,10	2,91
6/1		1	1,74	1,93	1,88	1,93	1,79	0,92	0,90
1	14	0	14,50	0,00	14,50	12,64	25,59	-	-
7	26	0	24,40	0,00	24,40	24,40	34,95	-	-
7/1		0	1,68	-	1,68	1,93	1,37	-	-
1	14	½	14,50	17,50	32,00	12,64	33,79	1,93	2,67
7	26	½	24,40	27,60	52,00	24,40	53,73	1,95	2,20
7/1		½	1,68	1,58	1,63	1,93	1,59	1,01	0,82
1	14	1	14,50	33,50	48,00	12,64	39,78	1,19	3,15
7	26	1	24,40	55,60	80,00	24,40	64,30	1,16	2,64
7/1		1	1,68	1,66	1,67	1,93	1,62	0,97	0,84

Taulukosta 3 nähdään, että

- HCT-yhdistelmien 6 ja 7 polttoaineen kulutus (l/100 km) on kuormausasteesta riippuen 1,37...1,79 kertainen vertailuajoneuvoon 1 verrattuna.
- HCT-yhdistelmien kuormatilan pituus ja sallittu kuorman massa on täyden kuorman tapauksessa kuitenkin 1,63...1,93 kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna.
- HCT-yhdistelmien polttoaineen kulutus lavapituutta (tai tavarantoimituksen tilavuutta) kohti on kuitenkin täyden kuorman tapauksessa 0,84 tai 0,90-kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna, eli polttoainetta säästyy 16...10 %.
- Tapauksessa ½ meno ajetaan täytenä ja paluu tyhjänä. Ajoneuvon 7 (perävaunut yksittäispyörin) kulutus [l/lm-km] on 0,82-kertainen, mutta ajoneuvon 6 (perävaunut paripyörin) kulutus on 0,92-kertainen vertailuajoneuvoon 1 verrattuna ja molemmilla polttoaineen säästö on hiukan pienempi, kuin täytenä ajettaessa.

Taulukko 4. Normaali- ja HCT-yhdistelmien polttoaineenkulutus elintarvikkeille tarkoitetuissa umpikorikuljetuksissa kuormausasteen mukaan

Ajoneuvo 2 on 3+5-akselinen ja ajoneuvo 3+3+3+2+3-akselinen.

Ajn	Pyörät	Kuormitus	Oma massa	Kuorma	Kokonais-massa	Lava-pituus	Polttoaineenkulutus		
							l/100 km	l/100 tkm	l/100 lm-km
Nro	Kpl		t	t	t	m			
2	24	0	27,3	0	27,3	21,27	32,71	-	-
3	32	0	31,1	0	31,1	27,62	37,67	-	-
3/2		0	1,14	-	1,14	1,3	1,15	-	-
2	24	½	27,3	18,7	46	21,27	39,78	2,13	1,87
3	32	½	31,1	18,9	50	27,62	44,84	2,37	1,62
3/2		½	1,14	1,01	1,09	1,3	1,13	1,12	0,87
2	24	1	27,3	36,7	64	21,27	46,42	1,26	2,18
3	32	1	31,1	36,9	68	27,62	51,34	1,39	1,86
3/2		1	1,14	1,01	1,06	1,3	1,11	1,1	0,85

Taulukosta 4 nähdään, että

- HCT-yhdistelmän 3 polttoaineen kulutus (l/100 km) on kuormausasteesta riippuen 1,11...1,15-kertainen vertailuajoneuvoon 2 verrattuna.
- HCT-yhdistelmän kuormatilan pituus ja sallittu massa on täyden kuorman tapauksessa kuitenkin 1,30 ja 1,06-kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna.
- HCT-yhdistelmän polttoaineen kulutus [l/lm-km] kohti on kuitenkin täyden kuorma tapauksessa 0,85-kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna, eli polttoainetta säästyy kevyen tavaran kuljetuksissa 15 %.
- HCT-yhdistelmien polttoaineen kulutus kuljetussuoriteyksikköä [tkm] kohti on täyden kuorma tapauksessa 1,1-kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna, eli raskaan tavaran kuljetuksissa polttoainetta kuluu 10 % enemmän.
- Tapauksessa ½ meno ajetaan täytenä ja paluu tyhjänä, jolloin yhteenlaskettu polttoaineen säästö on hiukan pienempi, kuin täytenä ajettaessa.

Taulukossa 4 pieni säästöprosentti johtuu siitä, että 3+5-akselinen täysperävaunuyhdistelmä on hyvin taloudellinen yhdistelmätyyppi. Jos vertailuajoneuvoksi olisi valittu ajoneuvotyyppi 1 eli 3+3-akselinen puoliperävaunuyhdistelmä, säästö olisi ollut selvästi suurempi.

Taulukko 5. Normaali- ja HCT-yhdistelmien polttoaineenkulutus puutavarakuljetuksissa kuormausasteen mukaan

Ajoneuvo 4 on 4+5-akselinen ja ajoneuvo 5 on 3+4+5-akselinen.

Ajn	Pyö- rät	Kuormi- tus	Oma massa	Kuor- ma	Koko- nais- massa	Lava- pituus	Polttoaineenkulutus		
Nro	Kpl		T	t	t	m	l/100 km	l/100 tkm	l/100 lm-km
4	32	0	26,8	0	26,8	19,7	43,29	-	
5	42	0	27,2	0	27,2	25,53	47,56	-	-
5/4		0	1,01	-	1,01	1,3	1,1	-	-
4	32	½	6,8	25,2	52	19,7	50,44	2	-
5	42	½	27,2	34,8	62	25,53	58,37	1,68	-
5/4		½	1,01	1,38	1,19	1,3	1,16	0,84	-
4	32	1	26,8	49,2	76	19,7	58,53	1,19	-
5	42	1	27,2	66,8	94	25,53	68,29	1,02	-
5/4		1	1 01	1,36	1,24	1,3	1,17	0,86	-

Taulukosta 5 nähdään, että

- HCT-yhdistelmän 5 polttoaineen kulutus [l/100 km] on kuormausasteesta riippuen 1,10...1,17-kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna.
- HCT-yhdistelmien kuormatilan pituus ja sallittu kuorman massa on täyden kuorman tapauksessa kuitenkin 1,30 ja 1,24-kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna.
- HCT-yhdistelmien polttoaineen kulutus kuljetussuoriteyksikköä [tkm] kohti on täyden kuorma tapauksessa 0,86-kertainen vertailuajoneuvoon verrattuna, eli raskaan tavaran kuljetuksissa polttoainetta säästyy 14 %.
- Tapauksessa ½ meno ajetaan täytenä ja paluu tyhjänä, jolloin yhteenlaskettu polttoaineen säästö on hiukan suurempi, kuin täytenä ajattaessa.

Olettaen, että kaikilla tutkimukseen sisällytetyillä ajoneuvoilla kuljetettaisiin massatavaraa ja kuormasuuruutena käytettäisiin niiden suurimpia sallittuja kuormia, saataisiin polttoaineenkulutukset [l/100 tkm] kuormatuilla ajoneuvoilla taulukkojen 2, 3 ja 4 mukaisiksi..

Liitteessä 7 on tarkasteltu samaa asiaa eli puutavarakuljetuksia kuin taulukossa 5, mutta siinä kuorman tilavuuspaino (kg/m<sup>3</sup>) on asetettu HCT- ja vertailuajoneuvolle samaksi. Näin saadaan selvästi suurempia, 18 %, polttoainekustannusten säästöjä kuljettua tonnikilometriä kohti.

On huomattava, että tutkituista ajoneuvoista vain puutavara-ajoneuvoissa hyödynnetään täysin sallittuja akseli- ja telimassoja. Puutavaraa kuljettavan normaaliajoneuvon perävaunussa paripyörät ja massaa on akselia kohti laskennallisesti 8,44 t ja HCT-ajoneuvossa 7,83 t. Kappaletavaraa kuljettavassa normaaliajoneuvossa on perävaunussa yksittäispyörät ja massaa on akselia kohti 8 t (64/8) ja HCT-ajoneuvossa 6,2 t (68/11). HCT-ajoneuvojen suhteellinen kulutus [l/100 tkm] paransi, jos niille sallittaisiin sama akseleiden kuormausaste. Se lisäisi kuitenkin tierasitusta kohdan 5.3 luvusta. Kun otetaan huomioon, että HCT-kalustossa tarvitaan enemmän moniakselisia telejä ja kääntyviä pyöriä, HCT-ajoneuvoissa pitäisi aina olla hiukan pienempi massa akselia kohti kuin vähempiakselisissa ajoneuvoissa.

Kuormattuna-ajo-osuus vaihtelee kuljetusaloitain 50 %:sta lähes 100 %:iin ja vaikuttaa merkittävästi polttoaineen kulutukseen. Kun kuormaamattomana-ajon osuus vähenee, vähenee polttoaineen kulutus. Kuormaamattomana-ajon osuutta on erityisjärjestelyin voitu vähentää eräissä tapauksissa noin 10 %:iin, ja siten parannettu ratkaisevasti polttoainetehokkuutta.

Simulointituloksia esitetään laajemmin eri massan arvoilla ajoneuvoittain liitteessä 4 (*Polttoaineen kulutuksen vertailu mittauksista ja ajoneuvosimulointia käyttäen*). Siitä ilmenevät ajovastuskertoimien arvot, ajoneuvojen massat ja kuormat sekä energiankäyttö polttoaineen kulutuksena ja CO<sub>2</sub>-päästömäärät liikenne- ja kuljetussuoriteyksikköjä kohden.

Liitteessä 3 (*Ote ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien ajosimulointituloksista tiejaksolla Helsinki -> Oulu*) arvot on määritetty paitsi kuormaamattomien ja sallittujen kuormien mukaisille ajoneuvomassoille myös näiden väliarvoille sekä sallittuja kuormia suuremmille massoille.

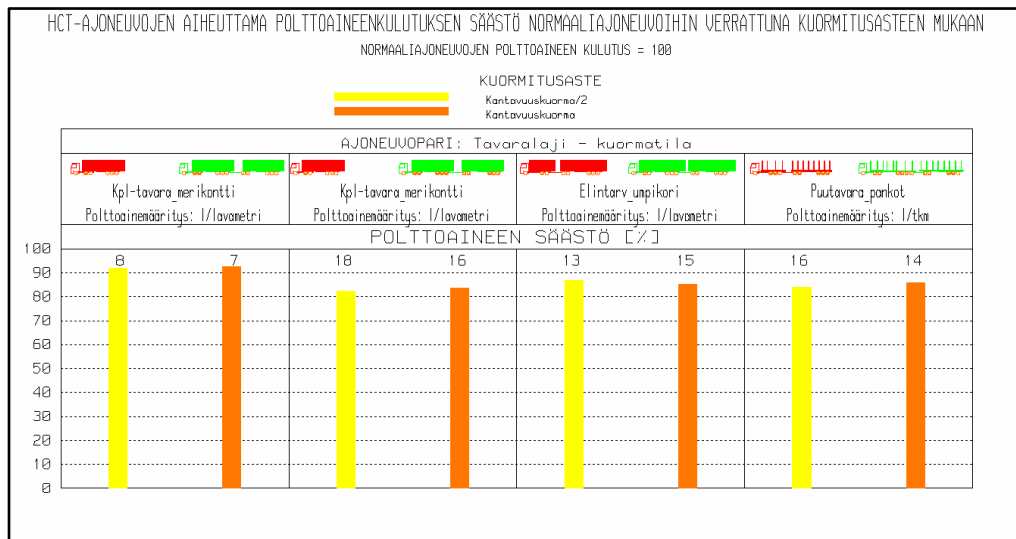
Sallittuja kuormia suuremmat massat osoittavat sen, kuinka paljon energiatehokkuus [l/100 tkm] paranisi ja vastaavasti CO<sub>2</sub>-päästömäärät [kg/100 tkm] vähenisivät ajoneuvon massojen suuretessa. Sama asia ilmenee myös edellä esitetystä kuvasta 6. Päinvastaiseen tulokseen päästään, jos tavara ei ole raskasta ja HCT-ajoneuvoon ja vertailuajoneuvoon kuormataan tavaraa, joilla on sama tilavuuspaino (kg/m<sup>3</sup>). Silloin HCT-yhdistelmällä saatava energiatehokkuus voi pienetä, kun tavaraa muutetaan raskaammaksi.

Kuormattuna-ajo-osuuden kasvattaminen (tavalla tai toisella) olisi tehokas tapa parantaa kuljetusten energiankäyttöä ja vähentää päästöjä.

Liitteen 7 kuvassa 3 esitetään muuttuva ajoneuvokustannus ajoneuvon massan mukaan.

Kuvasta 8 ilmenevät HCT-ajoneuvojen aiheuttamat polttoaineenkulutuksen vähennykset normaaliajoneuvoihin verrattuna kuormausasteen mukaan merkittäessä normaaliajoneuvojen polttoaineenkulutusta 100:lla.





Kuva 8. HCT-yhdistelmien aiheuttama polttoainekulutuksen vähennys normaaliyhdistelmiin verrattuna kuormausasteen mukaan merkittäessä normaaliyhdistelmien polttoainekulutusta 100:lla

Kuvasta 8 havaitaan, että HCT-yhdistelmät vähentävät polttoainekulutusta 7–18 % normaaliajoneuvoihin verrattuna riippuen kuljetuslajista (ja sen mukaan määräytyvästä kuormatilasta) sekä kuormausasteesta.

### 4.3 Normaali- ja HCT-ajoneuvojen hiilidioksidipäästö määrät

Hiilidioksidipäästöt vähenevät samassa suhteessa kuin polttoaineen kulutus, koska hiilidioksidimäärä määräytyy suoraviivaisesti polttoainekulutuksesta. Yhdestä kilogrammasta dieselpolttoainetta syntyy noin 3,17 kg hiilidioksidia, kun häkää ja hiilivetyä syntyy vain vähän.

### 4.4 Yksittäis- ja paripyörien vaikutus polttoainekulutukseen ja CO<sub>2</sub>-päästöihin

Vertailun perusteet: Paripyörien vaikutusta polttoaineen kulutukseen tarkastellaan vertaamalla HCT-yhdistelmiä 6 ja 7, joissa vetoautot ovat ominaisuuksiltaan samat, mutta toisen (yhdistelmä 6) perävaunut on varustettu paripyörin ja toisen (yhdistelmä 7) yksittäispyörin. Vertailu tehdään ajoneuvosimulointijärjestelmää käyttäen tiejak-solla Helsinki-Oulu.

Vierintävastukset määritetään käyttäen kohdassa 3.2.2 esitettyä yleistä mallia (ks. myös Liitteen 1 kappale 4). Simuloinnissa käytettiin ajonopeutta 80 km/h ja schwungin eli alamäkikilisen arvona enintään 10 km/h. Ilmanvastuksen määrittämisessä käytetään yhdistelmäkohtaisia C<sub>d</sub>-kertoimen arvoja. Tulokset ilmenevät taulukoista 6 ja 7.

Taulukossa 6 yhdistelmien kokonaismassa on asetettu samaksi, mutta taulukossa 7 yksittäispyöräyhdistelmälle sallitaan 10 tonnia pienempi kokonaismassa (80 t) kuin paripyörin varustetulle (90 t).

Taulukko 6. HCT-yhdistelmän yksittäis- ja paripyöräperävaunujen vaikutus polttoaineenkulutukseen massan mukaan, kun yhdistelmien massat ovat yhtä suuria

Ajn	Pyörät	Oma massa	Kuorma	Kokonais-massa	Lavapituus	Polttoaineenkulutus		
Nro	Kpl	T	T	T	m	l/100 km	l/100 tkm	l/100 km
6	42	25,3	0	25,3	24,38	36,68	0	1,5
7	26	24,4	0	24,4	24,4	34,95	0	1,43
7/6		,96	-	,96	1,00	,95	0	,95
6	42	25,3	14,7	40	24,38	52,43	3,57	2,15
7	26	24,4	15,6	40	24,4	48,87	3,13	2
7/6		,96	1,06	1,00	1,00	,93	,88	,93
6	42	25,3	34,7	60	24,38	60,63	1,75	2,49
7	26	24,4	35,6	60	24,4	56,88	1,6	2,33
7/6		,96	1,03	1,00	1,00	,94	,91	,94
6	42	25,3	54,7	80	24,38	67,85	1,24	2,78
7	26	24,4	55,6	80	24,4	64,3	1,16	2,64
7/6		,96	1,02	1,00	1,00	,95	,93	,95
6	42	25,3	64,7	90	24,38	71	1,1	2,91
7	26	24,4	65,6	90	24,4	67,74	1,03	2,78
7/6		,96	1,01	1,00	1,00	,95	,94	,95

Taulukosta 6 nähdään, että

- yksittäispyörin varustetun yhdistelmän 7 polttoaineen kulutus [l/100 km] on kuormausasteesta riippuen 0,93...0,95-kertainen vertailuajoneuvon 6 verrattuna eli yhdistelmä 7 (perävaunut yksittäispyörin) säästää polttoainetta 5–7 % verrattuna yhdistelmään 6 (perävaunut paripyörin).
- HCT-yhdistelmien 6 ja 7 kuormatilojen pituudet ja sallitut kuorman massat ovat käytännössä samat.
- yksittäispyöräisen HCT-yhdistelmän polttoaineen kulutus lavapituutta (tai tavaratilan tilavuutta) kohti on kuitenkin 0,94...0,95-kertainen vertailuajoneuvon verrattuna, eli polttoainetta säästyy kevyen tavaratilan kuljetuksissa 5...6 %.
- yksittäispyöräisen HCT-yhdistelmän 7 polttoaineen kulutus [l/100 tkm] on 90 tonnin kokonaismassalla 0,94-kertainen vertailuajoneuvon 6 verrattuna ja 60 tonnin kokonaismassalla 0,91-kertainen eli raskaan tavaratilan kuljetuksissa polttoainetta säästyy 5...6 %.

Pyörien lisäyksen vaikutus polttoaineenkulutukseen.

Kun taulukossa 6 polttoaineenkulutus on määritetty ajoneuvojen 6 ja 7 samansuuruisilla kokonaismassoilla, saadaan tuloksista esiin pyörämäärän muutoksen vaikutus.

Havaitaan alla olevasta asetelmasta, että massan kasvaessa muuttuu polttoaineenkulutus yhtä pyörää kohden seuraavasti:

- Pienillä massan arvoilla (kuormaamattomat ajoneuvot (massat 25,3 ja 24,4 t) on polttoaineenkulutuksen muutos 0,11 l/100 km ja pyörä
- Massan kasvaessa arvoon 40 t on polttoaineenkulutuksen muutos 0,22 l/100 km ja pyörä
- Massan kasvaessa arvoon 90 t on polttoaineenkulutuksen muutos 0,20 l/100 km ja pyörä

Käytetyssä yleisessä mallissa kahden lisäpyörän vaikutus on sama lisättiinpä pyörät osana lisäakselia tai muuttamalla yksittäispyöräakseli paripyöräakseliksi.

Taulukon 6 tulokset eivät ole kuitenkaan kovin käyttökelpoisia, koska tierakenteiden säästämiseksi yksittäispyöräisille yhdistelmille sallitaan pienemmät kokonaismassat kuin paripyöräisille. Tätä on yritetty ottaa huomioon taulukossa 7.

*Taulukko 7. HCT-yhdistelmän yksittäis- ja paripyöräperävaunujen vaikutus polttoaineenkulutukseen kuormausasteen mukaan, kun paripyöräyhdistelmälle sallitaan noin 12 % suurempi kokonaismassa*

Molemmissa ajoneuvoissa on 11 akselia, mutta niistä on 10 paripyöräakselia yhdistelmässä 6 ja 2 yhdistelmässä 7.

Ajn	Pyörät	Kuormitus	Omassa	Kuorma	Kokonaismassa	Lavapituus	Polttoaineenkulutus		
	Kpl		T	t	T	m	l/100 km	l/100 tkm	l/lava-m
6		½	25,3	32,7	58	24,38	59,85	1,83	2,45
7	42	½	24,4	27,6	52	24,4	53,73	1,95	2,2
6/7	26	½	,96	,84	,90	1,00	,90	1,06	,90
6		1	25,3	64,7	90	24,38	71	1,1	2,91
7	42	1	24,4	55,6	80	24,4	64,3	1,16	2,64
6/7	26	1	,96	,86	,89	1,00	,91	1,05	,91

Taulukosta 7 nähdään, että

- HCT-yhdistelmän 7 (perävaunuissa yksittäispyörät) polttoaineen kulutus (l/100 km) on kuormausasteesta riippuen 0.90–0.95-kertainen vertailuajoneuvoon (perävaunuissa paripyörät) verrattuna. Tämä sama suhde on myös määritettäessä polttoaineenkulutus lavapituutta kohden, koska lavapituudet ovat samat.
- Yhdistelmän 7 sallittu kuorman massa on täyden kuorman tapauksessa vain 0.86-kertainen vertailuajoneuvoon 6 verrattuna
- HCT-yhdistelmän 7 polttoaineen kulutus tonnikilometriä kohti on täyden kuorma tapauksessa 1.05-kertainen vertailuajoneuvoon 6 verrattuna, eli raskaan tavaran kuljetuksissa yhdistelmä 7 kuluttaa polttoainetta 5 % enemmän.
- Tapauksessa ½ meno ajetaan täytenä ja paluu tyhjänä säästää yhdistelmä 7 yhdistelmäbn 6 verrattuna hiukan vähemmän polttoainetta kuin täytenä ajetaessa.

Yksittäispyörien aiheuttama tierasitus on suurempi kuin paripyörien, kuten luvun 5 yhteydessä todetaan.

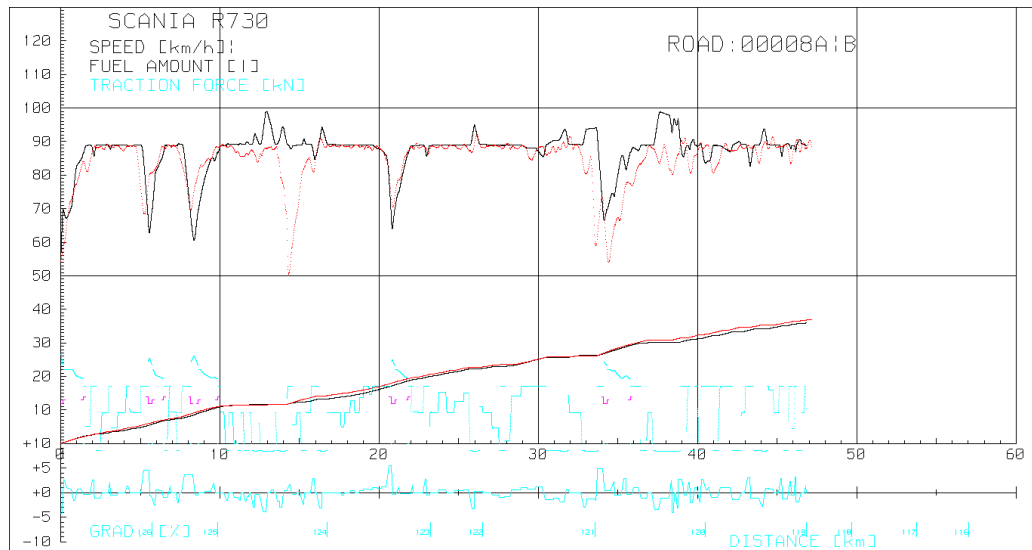
## 4.5 Simuloinnilla saadun kulutuksen vertailu ajoneuvosta mitattuun polttoaineen kulutukseen

Tutkimukseen lisättiin osa, jossa varmistettiin, saadaanko autosta mittaamalla sama polttoaineen kulutus kuin simuloimalla, ks. Liite 4.

Vertailuselvityksessä mitattiin valittujen ajoneuvojen polttoaineenkulutus valituilla reiteillä ja tämän jälkeen ajoneuvojen polttoaineenkulutus määritettiin ajoneuvosimulointia käyttäen saman reitin pituusprofiilia. Tutkittuja reittejä oli kaksi. Kummallakin käytettiin kahta ajoneuvoyhdistelmää. Varsinainen vertailu tehtiin kuitenkin vain niistä yhdistelmistä, joiden auton moottorista oli riittävän tarkka moottorikartta. Simuloinneissa käytettiin yleiseen malliin perustuvia vierintävastuskertoimia eli samoja kuin simuloinneissa tiejaksolla Helsinki–Oulu, mutta ilmanvastukseen vaikuttavat tekijät ajoneuvon otsapinta-ala ja muotokertoimen  $C_d$ -arvo olivat vertailussa käytettyjen yhdistelmien ko. arvoja.

Polttoaineenkulutus mitattiin ajoneuvojen CAN-väylästä. Polttoaineenkulutus simulointia käyttäen määritettiin siten, että lähtötiedoiksi annettiin valittujen ajoneuvojen tekniset tiedot ja niiden käyttämien tiereittien tekniset tiedot, joista olennainen on tiereitin pituuskaltevuus.

Liitteen 4 kuvasta 4 nähdään, että simuloinnissa pyrittiin valitsemaan sama tavoite-nopeus, jota kuljettaja käytti matkan eri vaiheissa. Simuloinnissa ei kuitenkaan voitu arvioida häiriötekijöiden aiheuttamaa nopeuden alennusta mittalinjan kohdilla 34...40, jossa koeajon aikana häiriöt hidastivat ajamista. Tähän poikkeamaan asti simulointi tuotti täsmälleen saman polttoaineen kulutuksen kuin ajon aikana mitattiin.



Kuva 9. Kuormatun HCT-yhdistelmän polttoaineenkulutus kumulatiivisena ja hetkellinen nopeus mittauksen ja ajoneuvosimuloinnin mukaan reitillä Pori–Rauma

- Selitys:
- 1) Keskimäinen viivapari esittää polttoaineen kumulatiivista kertymää osoittavat käyrät (simulointi punaisella viivalla ja mittaus mustalla viivalla) yhtyvät; ts. polttoaineen kulutus on sama mittauksen ja simuloinnin mukaan.
  - 2) Ylin viivapari esittää ajoneuvojen nopeutta (simulointi musta viiva ja mittaus punainen viiva) on käytännössä sama mittauksen ja simuloinnin mukaan, mutta mittauksen aikana on ollut nopeutta laskeva häiriö kohdassa 14. 5–15.0 km. Lisäksi kohdassa noin 34 km vastamäessä ajonopeus on laskenut hiukan alemmaksi kuin simuloinnin antama nopeus. Muut ”nopeuskuopat” ovat vastamäkien aiheuttamia.
  - 3) Alin viiva esittää tien pituuskaltevuutta, ja positiivinen luku tarkoittaa ylämäkeä.

Liitteessä 4 selostetaan muita ajoja ja esitetään mahdollisia virhelähteitä.

## 4.6 Näkökohtia normaali- ja HCT-yhdistelmien ajokustannuksista

Ajokustannusten määrittäminen ei kuulunut selvitykseen. Selvitys tuotti kuitenkin tietoa ajokustannusten osatekijästä *muuttuvat ajoneuvokustannukset*, koska ne määräytyvät suurelta osin polttoaineenkulutuksen perusteella. Tämän vuoksi tarkastellaan yleisesti ajokustannusten muodostumista (Liite 8. *Näkökohtia HCT- ja normaali ajoneuvojen vertailusta kuljetuskustannusten osalta sekä ehdotus tietotuotannon kehittämiseksi*) ja tarkemmin muuttuvia ajoneuvokustannuksia.

Ajokustannukset koostuvat ajoneuvokustannuksista, ajoneuvojen pääomakustannuksista ja kuljettajan aikakustannuksista. Muuttuvat ajoneuvokustannukset sisältävät polttoainekustannuksen ja ajamisesta aiheutuvat renkaiden ja muiden osien kulumisen. Muuttuvat ajoneuvokustannukset ovat suuruusluokaltaan 1.37–1.45 kertaa polttoainekustannus, kun polttoaineen veroton hinta on 1,05 euroa litralta. (Lähde: Koskinen Olavi, H., Raakapuukuljetukset, julkaisematon muistio, 18.5.2018).

Ajoneuvojen pääomakustannuksia voidaan arvioida laskemalla, montako HCT-ajoneuvoa tarvitaan kuljettamaan sama määrä tavaraa ja saman matkan kuin tietty määrä nykyaajoneuvoja pystyy kuljettamaan. Karkeasti ajoneuvojen määrä riippuu yhdistelmien kuormasta: kevyellä tavaralla kuormatilan pituuden tai tilavuuden perusteella ja raskaan tavaran kuljetuksissa kuorman sallitun massan perusteella. Esimerkiksi taulukon 2 HCT-yhdistelmään mahtuu 1,93-kertaa niin paljon tavaraa kuin vertailuajoneuvoon. Jos kuormaamiseen, purkamiseen ja vastaavaan ei kuluisi aikaa, HCT-yhdistelmiä tarvittaisiin vain  $(1/1,93)$  0,52-kertainen määrä. Autojen määrä olisi 0,52-kertainen, mutta puoliperävaunuja tarvittaisiin entinen määrä, koska kussakin HCT-yhdistelmässä niitä on kaksi ja vertailuajoneuvossa yksi. Myös kuljettajien määrä tai työaika olisi 0,52-kertainen, jos ajonopeus olisi sama. Todellisuudessa säästö on pienempi, koska terminaalitoimintoihin kuluu aikaa.

Liitteen 8 taulukon 3 tapauksessa pääomakustannussäästöt ja aikakustannussäästöt ovat suuremmat kuin taulukossa esitetyt ajoneuvokustannussäästöt.

## 5 HCT- ja normaaliajoneuvojen tiekuormitus

### 5.1 Tiekuormituksen käsite ja merkitys

#### 5.1.1 Tiekuormitus ja ekvivalenttiakseli AASHO-teorian mukaan

Tiekuormitus ja sen mittaustapa kehitettiin USA:ssa vuosina 1958–60 tehdyssä laajassa AASHO-testin yhteydessä. (Transportation Research Circular Number E-C118, July 2007, Pavement Lessons Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate Highway System., 2007).

Tiekuormitusta mitataan ns. ekvivalenttiakseliluvulla. Yksi ekvivalenttiakseli tarkoittaa tiekuormitusta, jonka ns. yksikköakseli eli yksi paripyörin varustettu akseli, jonka massa on 10 t, aiheuttaa tiehen. Ajoneuvon muiden akseleiden tai akseliryhmien ekvivalenttiakseliluvut määritetään suhteessa yksikköakselin aiheuttamaan tiekuormitukseen ottamalla huomioon akseliryhmän rakenne ja massa sekä jousitus, kuten jäljempänä esitetään.

Ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän tiekuormitus määritetään ajoneuvon akseliryhmien ekvivalenttiakselilukujen summana. Mitä suurempi ekvivalenttiakseliluku on, sitä suurempi on tiekuormitus. Tien päällysrakennetta mitoitettaessa on perinteisesti laskettu ajokaistalla 20 vuoden kuluessa kulkevien raskaiden ajoneuvojen yhteenlaskettu ekvivalenttiluku eli kuormituskertaluku. Päällysteen ja muun päällysrakenteen paksuus määräytyy sen ja tien leveyden mukaan. On eduksi, jos kaikkien ajoneuvojen kaikki pyörät eivät aina kulje täsmälleen samoissa kohdissa tien poikkileikkausta.

### 5.2 Tiekuormitustarkastelussa käytettävät ekvivalenttikertoimet

Kun ajoneuvon paripyöräakselin massa on P, on vastaava ekvivalenttikerroin E alla esitetyn mukainen (Olavi H. Koskisen asiaa koskeva julkaisemattoman selvitys, Koskinen 2001).

$$E = (P/10)^4$$

## 5.3 Mittauksissa käytettyjen ajoneuvojen mitat ja massat sekä tiekuormitus

### 5.3.1 Ajoneuvojen mitat ja massat

Tiekuormitustarkastelua varten ajovastusmittauksissa käytetyistä ajoneuvoista tehtiin massa- ja mittapiirroksia.

Työn yhteydessä havaittiin runsaasti virheitä ajoneuvorekisterin tiedoissa, jotka koskevat perävaunuja. Havaittiin puutteita käsitteissä ja ilmeisesti siitä aiheutuen virheitä mittatiedoissa. Tietojen puutteellisuus ja virheellisyys oli niin huomattava, ettei massa- ja mittapiirroksia voitu tehdä ilman, että tiedot hankittiin eri tahoilta (valmistajat, kuljetusyritykset tai kaluston vuokrausyritykset). Oikeiden tietojen hankinta massa- ja mittapiirrosten tekemiseksi aiheutti merkittävästi lisätyötä.

Liitteessä 5 esitetään yhteenveto ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien ominaisuuksista (taulukko 1) ja jokaisesta ajoneuvoyhdistelmästä massa- ja mittapiirros. Tiekuormitukset esitetään erikseen eriteltyinä akseliryhmittäin ja koko ajoneuvoyhdistelmän osalta.

Ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän tiekuormitusta osoittavat ekvivalenttikertoimien arvot määräytyvät seuraavien tekijöiden mukaan (Koskinen 2001): akseliryhmän akseliluku (yksi, kaksi tai useampi akseli), pyörätyyppi (yksittäis- tai paripyörä) sekä jousitus (lehti- tai ilmajousitus). Myös pyörän leveydellä on vaikutusta.

Liitteen 5 piirroksissa on esitetty ajoneuvoyhdistelmien ekvivalenttiakselien lukumäärät sekä suhteellista tiekuormitusta kuvaava suure, jossa määritetään kuorma (hyötykuorma) ekvivalenttiakselia kohden. Tällä otetaan huomioon se, että kuormituskerrat vähenevät kuorman suureudessa.

Piirroksista nähdään muun muassa seuraavat tiedot:

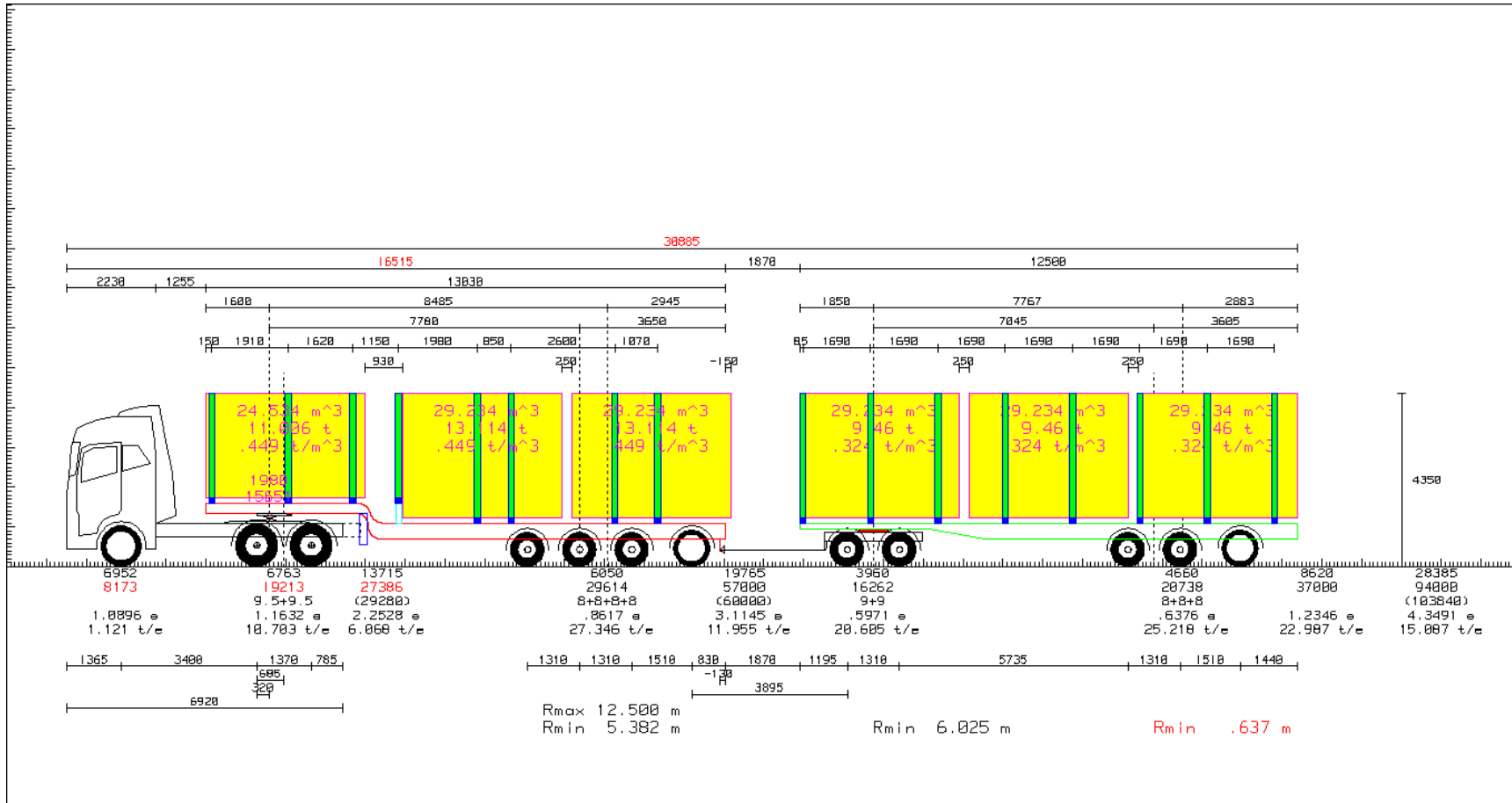
- ajoneuvoyhdistelmän täsmälliset mitat
- ajoneuvoyhdistelmän massat ajovastusmittauksissa ja massojen jakauma akseliryhmittäin
- ajoneuvoyhdistelmän tiekuormitusta osoittava suure määritettynä tekijällä ajoneuvoyhdistelmän mahdollistama kuorma ekvivalenttiakselia kohden  $[t/e]$

### 5.3.2 Ajoneuvojen ekvivalenttiakselimäärät

Tiekuormitusta määritettäessä kuormitus on oletettu jakaantuvan tasaisesti kuormatilan pituussuunnassa. Käytännössä kuormitus ei aina jakaannu tasaisesti kuormatilan pituussuunnassa ja siksi tiekuormitusarvot voivat poiketa tasaisen jakauman mukaan lasketuista.

Ajoneuvokohtaiset ekvivalenttiakselien määrät on esitetty liitteen 5 taulukossa 1. Siitä nähdään mm. että, raakapuuajoneuvojen osalta normaaliajoneuvon ja HCT-ajoneuvon ekvivalenttiakselimäärä on suunnilleen sama, vaikka kokonaismassoissa on suuri ero. Tämä johtuu siitä, että kokeiluajoneuvolle on sallittu kokonaismassaa keskimäärin vain 7,83 t/akseli, kun normaaliajoneuvolle sallitaan 8,4 t/akseli. Kokonaismassaa on enemmän, mutta se jakautuu useammalle akselille.





Kuva 10. Esimerkki HCT-puutavarayhdistelmän massamittapiirroksesta

Muilla HCT-ajoneuvoilla ekvivalenttiakselien määrä voi olla pienempi tai suurempi kuin vastaavalla normaaliajoneuvolla riippuen siitä, kuinka paljon HCT-ajoneuvolle on sallittu massaa akselia kohti.

Edellä kohdasta 4.2.2 ilmenee, että tarvitaan vain 73...77 HCT-ajoneuvoa (nro 3 tai 5) kuljettamaan sama määrä tavaraa, kuin 100 normaaliajoneuvoa (nro 2 tai 4) pystyy kuljettamaan. Siksi tierasitusta ei saa arvioida pelkästään ajoneuvokohtaisten ekvivalenttiakselimäärien perusteella, vaan huomioon on otettava myös se, montako ajoneuvoa tarvitaan saman tavaramäärän kuljettamiseen.

### 5.3.3 Ajoneuvojen kuormat ekvivalenttiakselia kohden

Tiekuormitus tulee suhteuttaa ajoneuvon kuljettaman kuorman suuruuteen. Tämä ilmenee esimerkiksi siitä, että aikaisemmin tarvittiin 100 kpl 7-akselisia 60 t yhdistelmiä kuljettamaan sama määrä tavaraa kuin 78 kpl 9-akselisia 76 t yhdistelmiä pystyy nykyisin kuljettamaan. 76 t yhdistelmän ekvivalenttiakselimäärä on 1,2 kertaa niin suuri kuin 60 t yhdistelmällä, mutta autoja tarvitaan vain 0,78-kertainen määrä. Kokonaisrasitus pienenee (1,2 x 0,78 eli) 0,93-kertaiseksi.

Tästä syystä on otettu käyttöön käsite kuorma ekvivalenttiakselia kohti (t/e). Mitä suurempi arvo saadaan, sitä pienempi tierakenteelle tuleva rasitus on, kun kuljetetaan sama matka ja yhteensä sama määrä samaa tavaraa. Käsite ei toimi määritettäessä siltojen kuormitusta.

Ajovastusmittauksissa käytettyjen kuormattujen ajoneuvoyhdistelmien kuorma akseli-ekvivalenttimäärää kohden on esitetty ajoneuvotyypeittäin taulukossa 8.

*Taulukko 8. Tiekuormituksen määräytyminen yhdistelmän ominaisuuksien mukaan tiesuunnitteluohjeiden ja laatuvaatimusten mukaan rakennetuilla teillä*

Ajoneuvo	Kokonais- massa	Omamassa	Akseli- ryhmät	Akselit yht.	Yksittäis- rengastetut akselit	Pyörä- määrä	Ekvival, akselit	Kuorma per ekv. ak- seli akseli
#	Kg	kg	kpl	kpl	kpl	kpl	kpl	t/ekv. akseli
1 (norm-aj)	38340	15881	3	6	5	14	1,84	12,77
2 (norm-aj)	68000	25499	4	8	7	18	6,65	6,39
3 (HCT-aj)	87400	31140	5	11	10	24	7,40	7,61
4 (norm-aj)	77000	25269	4	9	2	32	4,61	11,23
5 (HCT-aj)	94000	28385	5	12	3	42	4,35	15,09
6 (HCT-aj)	82740	26027	5	11	1	42	2,87	19,76
7 (HCT-aj)	81320	24337	5	11	9	26	5,54	10,28

Taulukosta 8 nähdään seuraavaa:

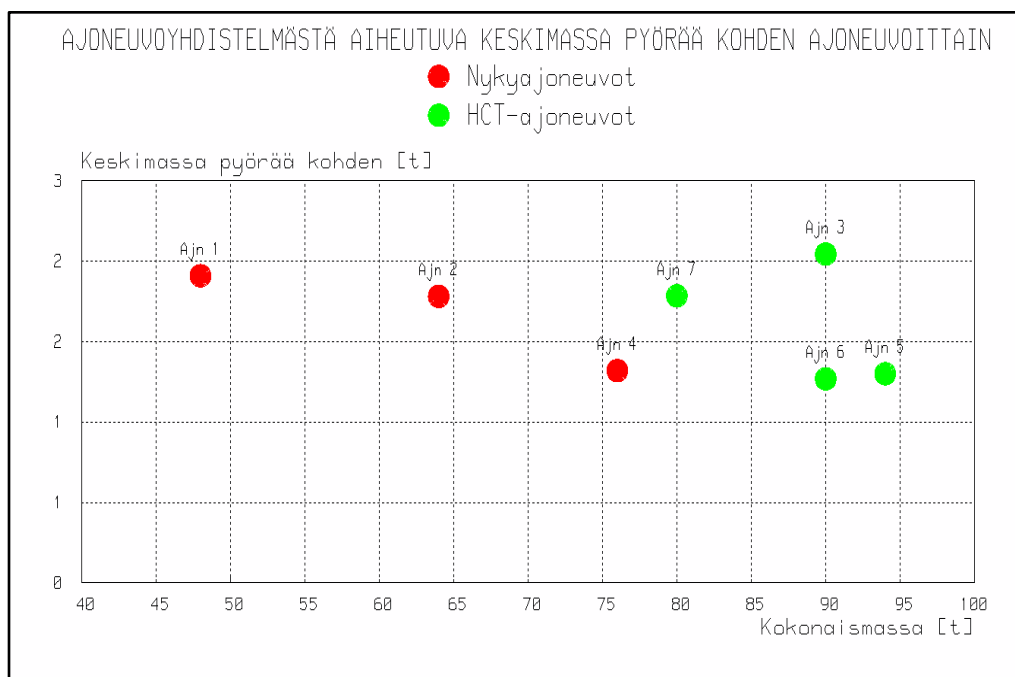
- HCT-ajoneuvojen ekvivalenttiakselimäärät ovat 7,40 - 4,35 - 2,87 ja 5,54 ja normaaliajoneuvojen 1,84– 6,65 ja 4,61
- paripyörällisen HCT-ajoneuvon 6 ekvivalenttiakselimäärä 2,87 on selvästi pienempi kuin yksittäispyöräisen ajoneuvon 7, jolla arvo on 5,54.

Taulukosta 8 nähdään myös seuraavaa:

- tierasitusta kuvaava suure hyötykuorma/ekvivalenttiakseli on normaaliajoneuvoilla luokkaa 6.39–12,77 t/ekvivalenttiakseli, mutta HCT-ajoneuvoilla 7,61–19.76 t/ekvivalenttiakseli. Näin HCT-ajoneuvot rasittavat teitä vain 0,64–0,84 kertaa (12.77/19.76 ja 6.39/7.61) niin paljon kuin normaaliajoneuvot, kun kuljetetaan sama määrä tavaraa
- raakapuukuljetuksissa HCT-ajoneuvo 5 rasittaa tietä 0,74 kertaa (11,23/15,09) kertaa niin paljon kuin normaaliajoneuvo 4, kun kuljetetaan sama määrä tavaraa

Korostetaan, että yhdistelmien ekvivalenttiakselien määrä on erittäin herkkä sille, miten kuormitus jakautuu akseliryhmittäin.

Kuvassa 11 esitetään ajoneuvoista suure *kuorma jaettuna pyörämäärällä* [ $t/pyörämäärä$ ] sekä normaali- että HCT-ajoneuvoilla. Havaitaan, että vaikka ajoneuvoyhdistelmän kokonaismassa kasvaa, säilyy suureen *massa per pyörämäärä* arvo käytännössä muuttumana. Samalla nähdään, että HCT-ajoneuvojen keskikuorma pyörää kohden on samaa luokkaa tai hiukan pienempi kuin normaaliajoneuvoilla.



Kuva 11. Normaali- ja HCT-yhdistelmien keskimassa pyörää kohden

## 5.4 Paripyörien vaikutus tiekuormitukseen

Taulukosta 9 ilmenee pari- ja yksittäispyörien vaikutusten ero tiekuormitukseen. Yhdistelmässä 6 on perävaunusissa paripyörrät ja yhdistelmässä 7 yksittäispyörrät.

Taulukko 9. HCT-yhdistelmän yksittäis- ja paripyörräperävaunujen vaikutus tiekuormitukseen

Ajoneuvo	Kokonais- massa	Oma- massa	Akseli- ryhmät	Akselit yht.	Yksittäisren- gastetut akse- lit	Pyörä- määrä	Ekvival, akselit	Kuorma per ekv. akseli akseli
#	kg	kg	kpl	Kpl	kpl	kpl	Kpl	t/ekv. ak- seli
6 (HCT-ajin)	82740	26027	5	11	1	42	2,870	19,763
7 (HCT-ajin)	81320	24337	5	11	9	26	5,542	10,282

Taulukosta 9 havaitaan:

- Yhdistelmiä 6 ja 7 tarkasteltaessa ilmenee perävaunujen pari- ja yksittäispyörien vaikutusten ero tiekuormitukseen; siirryttäessä paripyöristä yksittäispyöriin ekvivalenttiakselimäärä nousee 2,87 arvoon 5,54, kun yhdistelmien kokonaismassat ovat samaa suuruusluokkaa (82,7 ja 81,3 t).
- Parempi käsitys tierasituksesta saadaan käyttämällä suuretta *kuorma ekvivalenttiakselia* kohti. Se saa ajoneuvolla 6 arvon 19,76 [t/ekv. akseli], kun se on 10,28 [t/ekv. akseli] ajoneuvolla 7. Saman tavaramäärän kuljettaminen paripyöriin varustetulla ajoneuvolla 6 rasittaa tietä vain 0,52 kertaa (10,28/19,76) niin paljon kuin kuljettaminen ajoneuvolla 7.

Korostetaan, kuten edellä taulukossa 8 todettiin, että yhdistelmien ekvivalenttiakselien määrä on erittäin herkkä sille, miten kuormitus jakautuu akseliryhmittäin.

## 5.5 Vaikutukset tienpitoon

Tässä selvityksessä ei ole arvioitu HCT-ajoneuvojen yleistymisen aiheuttamia kustannuksia tienpitoon. Seuraavassa kuvataan yleisesti, miten ajoneuvomassat ja ekvivalenttiakselia kohti laskettu kuorma (= hyötykuorma) vaikuttavat tienpitoon.

### 5.5.1 Suunnitteluohjeiden mukaan rakennetut tiet

Edellä kuvattu AASHO-teorian mukainen tarkastelu koskee teitä, jotka on mitoitettu ja materiaalit valittu nykyisten suunnitteluohjeiden mukaan sekä rakentaminen tehty nykyisten laatuvaatimusten mukaan ja päällysteen kunnosta on pidetty huolta normaalisti.

### 5.5.2 Muut tiet

Uusimpien tutkimustulosten mukaan AASHO-teoria ei pidä paikkaansa teillä, jotka ovat rakennettu ohuita rakennekerroksia käyttäen pehmeälle pohjamaalle, kuten turve, pehmeä savi ja siltti. Nämä tiet ovat tavallisesti sorateitä tai niistä kevyesti parannettuja ohutpäällysteisiä teitä. Liikenneviraston teettämän tutkimuksen mukaan

5 kpl 14-akselisen yhdistelmän ylityksiä tunnin välein aiheuttaa suuremman urasyvyyden kasvun kuin 10 kpl 7-akselisen yhdistelmän ylityksiä puolen tunnin välein. Tutkimuksessa 14-akselista yhdistelmää edusti kaksi peräkkäin ajettavaa 7-akselista yhdistelmää.

Jos osoittautuu, että 14-akselinen yhdistelmä rasittaa ohutrakenteista tietä enemmän kuin kaksi 7-akselista, voidaan todeta, että myös 11- tai 12-akselinen HCT-yhdistelmä rasittaa tietä suhteellisesti enemmän kuin 7...9-akselinen normaalikalusto, jos ylitysten lukumäärä valitaan niin, että kaikilla yhdistelmillä kuljetetaan päivässä sama määrä hyötykuormaa.

Kohdassa 5.4.1 mainittujen suunnitteluohjeiden mukaan tehtyjen tierakenteiden ja edellä kuvattujen ohutrakenteisten teiden väliin jää paljon ohutrakenteisia teitä hyvin kantavilla pohjamailla ja paksurakenteisempia teitä pehmeällä pohjamaalla. Näiden teiden tutkiminen on vaikeampaa, koska yksinkertaisella kokeella ei saa riittäviä eroja urautumisen nopeuteen.

Ohutrakenteisillakin teillä yksittäispyörät rasittavat tietä 2,5 kertaa niin paljon kuin pari-pyörät, kun ajoneuvon massa on sama.

### 5.5.3 Sillat

Sillat voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään:

1. Pitkät sillat. Sillan kestävyys kannalta tärkeimmät tekijät ovat yhdistelmän kokonaismassa ja sillalla yhtä aikaa olevien yhdistelmien kokonaismassa.
2. Keskipitkät sillat. Sillan kestävyys kannalta tärkeintä on yksittäisen ajoneuvon kokonaismassa ja pituus tai auton viimeisen ja perävaunun ensimmäisen akseliryhmän välimatka ja yhteismassa
3. Lyhyet sillat. Sillan kestävyys kannalta tärkeimpiä ovat yksittäisten akseliryhmien massat.

Akseliryhmäksi lasketaan teli ja aivan sen lähellä olevat yksittäisakselit. Myös kaksi lähemmäs olevaa yksittäisakselia muodostaa akseliryhmän. Lyhyen sillan kannalta hankala on esimerkiksi perävaunun kolmeakselinen 24 tonnin teli, jonka lähellä on 8 tonnin yksittäisakseli. Se vastaa 32 tonnin teliä, mutta se jakaantuu jonkin verran pidemmälle matkalle kuin kolmeakselinen tai neliakselinen teli.

Pitkillä silloilla on voitu sallia kokeilulupia myös yli 76 t:n HCT-yhdistelmille, kun on laskettu, että silta kestää raskaankin HCT-ajoneuvon ja samanaikaisesti joitakin enintään 76 t normaaliajoneuvoja. Silta ei silti välttämättä kestä yli 76 t HCT-yhdistelmien täydellistä vapauttamista, koska silloin sillalla voisi olla yhtä aikaa useita yli 76 t:n yhdistelmiä, ja tilanne voisi toistua niin usein, että silta ei kestäisi. Kokeilulupavaiheessa kahden yli 76 t:n yhdistelmän toistuvaa kohtaamista on pidetty epätodennäköisenä tai ne oli kielletty.

Enintään 76 t:n HCT-yhdistelmät eivät aiheuta ongelmia silloilla, jotka kestävät 76 t:n normaaliajoneuvot.

Muilla kuin pitkillä silloilla HCT-yhdistelmistä ei ehkä aiheudu erityisiä ongelmia. Poikkeuksena voi olla 4-akselinen teli, jos sille sallitaan yli 27-tonnin massa.

## 6 Raakapuuajoneuvoja koskeva lisätarkastelu

### 6.1 Tarkastelussa käytetyt normaali- ja HCT-ajoneuvoyhdistelmät ja niiden kuormitus

Luvussa 4 saatuihin polttoaineenkulutusta koskeviin tunnuslukuihin ja vertailuihin vaikuttaa voimakkaasti se, mikä kokonaismassa HCT- tai nykykalustolle on satuttu valitsemaan kokeiluluvassa, säädöksissä tai muulla tavalla niin, että vertailuajoneuvossa ei voida välttämättä käyttää samanpainoista ( $\text{kg/m}^3$ ) tavaraa kuin vertailtavassa HCT-ajoneuvossa. Tässä tarkastelussa kummankin vertailtavan ajoneuvon kuorman irtotilavuusmassassa pakotettiin samaksi, ja kuormatilan koko määräsi kuorman massan ja siten myös yhdistelmän kokonaismassan. Tarkastelulla on suurin merkitys raakapuun kuljetuksissa.

Tarkastelua varten Olavi H. Koskinen suunnitteli ja mitoitti nykysäännösten mukaisen eli normaaliajoneuvoyhdistelmän ja nykysäännöistä poikkeavan HCT-ajoneuvoyhdistelmän (*Raakapuukuljetukset*, Olavi H. Koskinen, julkaisematon muistio, 18.5.2018). Näin määritettiin ajoneuvoyhdistelmien mitat, akselirakenteet akseliryhmittäin, pyörätyypit ja -määrät sekä massajakaumat akseliryhmittäin.

Ajoneuvoyhdistelmien kuormitus määritettiin siten, että muutettiin raakapuun irtotilavuusmassaa (=kehysmassan) suurella alueella eli arvosta  $200 \text{ kg/m}^3$  arvoon  $800 \text{ kg/m}^3$ . Arvo  $200 \text{ kg/m}^3$  vastaa kuivaa raakapuuta ja arvo  $800 \text{ kg/m}^3$  märkää ja painavaa raakapuuta.

Näitä kuormitusarvoja käyttäen määritettiin ajoneuvoyhdistelmien kokonaismassat ja niiden jakaumat paitsi akseliryhmittäin myös ajoneuvoyhdistelmien eri osille (vetoauto ja perävaunut). Massajakaumien avulla määritettiin tiekuormitusta osoittavat suureet ekvivalenttiakselien lukumäärät ja kuormasuuruudet per ekvivalenttiakseli molemmille ajoneuvoyhdistelmille raakapuun irtotilavuusmassan mukaan.

Liitteessä 7 on tietoa selvityksestä mukaan lukien molempien ajoneuvoyhdistelmien massa-mittapiirroksat sekä kuvat tiekuormituksesta ja muuttuvista ajoneuvokustannuksista raakapuun irtotilavuusmassan vaihtelun mukaan.

Simuloinneissa ajoreittinä on Helsinki–Oulu ja ilmanvastus määräytyy ajoneuvon ulkomittojen ja vierintävastus kokonaismassan, pyörien lukumäärän ja ajonopeuden perusteella.

### 6.2 Tulokset

Tehtäessä johtopäätöksiä selvityksen tuloksista on tarpeen käsitellä kuormasuuruuksia kahdella tavalla, jotta saadaan esiin irtotilavuusmassan vaikutus tuloksiin:

- käytetään molemmille samaa raakapuun irtotilavuusmassaa ("otetaan kuorma samasta pinosta") ja
- käytetään kummallekin sitä irtotilavuusmassan arvoa, joka mahdollistaa valitun maksimikuorman ("otetaan kuorma eri pinosta")

Yhteenvedo tuloksista eli tiedot tiekuormituksesta, polttoaineenkulutuksesta ja muuttuvista ajoneuvokustannuksista ilmenevät taulukoista 10, 11 ja 12.

Raakapuun irtotilavuusmassan arvolla on vaikutusta normaali- ja HCT-ajoneuvo-yhdistelmien keskinäiseen edullisuuteen, mutta se riippuu edullisuuskriteerinä käytetystä suureesta, tosin sanoen onko se tiekuormitus, polttoaineenkulutus vai muuttuvat ajoneuvokustannukset.

Taulukossa 10 on tuloksia, kun raakapuun irtotilavuusmassana on 390 kg/m<sup>3</sup> ja taulukossa 11, kun irtotilavuusmassana on 470 kg/m<sup>3</sup>.

*Taulukko 10. Raakapuukuljetuksissa käytettävien normaali- ja HCT-yhdistelmien tiekuormitus, polttoaineenkulutus ja muuttuvat ajoneuvokustannukset raakapuun irtotilavuusmassan arvolla 390 kg/m<sup>3</sup>*

AJN #	RAAKAPUUN IRTO- TILAVUUSMASSA kg/m <sup>3</sup>	OMAMASSA T	KUORMA t	KOKMASA T	TIEUORKMITUS t/ekvi- val. akseli	POLTTOAINEENKULUTUS		MUUTTUVAT AJONEU- VOKUSTANNUKSET	
						l/100 km	l/100 tkm	€/km	€/tkm
10 (norm)	390*)	22,4	44,1	66,5	16,1	66,92	1,52	0,97	0,022
<b>11 (HCT)</b>	<b>390</b>	<b>30,5</b>	<b>69</b>	<b>99,5</b>	<b>14,1</b>	<b>81,53</b>	<b>1,18</b>	<b>1,24</b>	<b>0,018</b>
11/10		1,36	1,56	1,50	0,88	1,22	0,78	1,28	0,82

\*) kuormamassa jää vajaaksi, koska kuormatila täyttyy ennen kuin saavutetaan kantavuusmassa.

Taulukosta 10 havaitaan:

- HCT-yhdistelmän kokonaismassa on 99,5 t (massaksi valittiin suunnitteluvaiheessa 100 t) ja vertailuyhdistelmän 66,5 t, koska kuormatila täyttyy ennen kokonaismassaa 76 t.
- HCT-yhdistelmän kuorman massa 1,56-kertainen (69/44,1), jolloin ajettavien kilometrien määrä on 0,64-kertainen. Ajettuja matkoja, autoja ja kuljettajien työaikoja tarvitaan vastaavasti vähemmän.
- HCT-yhdistelmän polttoaineen kulutus, ajoneuvokustannus ja CO<sub>2</sub> päästöt kuljetussuoriteyksikköä [tkm] kohti on 0,78 kertaa niin suuri kuin normaalilyhdistelmällä.
- HCT-yhdistelmän aiheuttama tierasitus on 1,14 kertaa (16,1/14,1) kertaa niin suuri kuin normaalilyhdistelmällä, kun kuljetetaan sama määrä tavaraa.

Taulukko 11. Raakapuukuljetuksissa käytettävien normaali- ja HCT-yhdistelmien tiekuormitus, polttoaineenkulutus ja muuttuvat ajoneuvokustannukset raakapuun irtotilavuusmassan arvolla 470 kg/m<sup>3</sup>

AJN	RAAKAPUUN IRTO- TILAVUUSMASSA	OMAMASSA	KUORMA	KOKMASA	TIEJORKMITUS	POLTTOAINEENKULUTUS		MUUTTUVAT AJONEU- VOKUSTANNUKSET	
#	kg/m <sup>3</sup>	T	T	T	t/ekvi- val. akseli	l/100 km	l/100 tkm	€/km	€/tkm
<b>10 (norm)</b>	<b>470</b>	<b>22,4</b>	<b>53,5</b>	<b>75,9</b>	<b>12,2</b>	<b>70,08</b>	<b>1,31</b>	<b>1,02</b>	<b>0,019</b>
11 (HCT)	470*)	30,5	69	99,5	14,1	81,53	1,18	1,24	0,018
11/10		1,36	1,29	1,31	1,16	1,16	0,90	1,22	0,95

\*) kuormatila jää vajaaksi, koska kuormamassa saavuttaa kantavuusarvon, ennen kuin kuormatila täyttyy

Taulukosta 11 havaitaan:

- HCT-yhdistelmän kokonaismassa on 99,5 t (massaksi valittiin suunnitteluvaiheessa 100 t) ja vertailuyhdistelmän 75,9 t, koska HCT-yhdistelmän kuormatila täyttyy ennen kokonaismassaa 99,5 t.
- HCT-yhdistelmän kuorman massa on 1,29-kertainen (69/53,5), jolloin ajettavien kilometrien määrä on 0,78-kertainen. Ajettuja matkoja, autoja ja kuljettajien aikoja tarvitaan vastaavasti vähemmän.
- HCT-yhdistelmän polttoaineen kulutus, ajoneuvokustannus ja CO<sub>2</sub>-päästöt tonnikilometriä kohti on 0,90 kertaa niin suuri kuin normaaliyhdistelmällä.
- HCT-yhdistelmän aiheuttama tierasitus on 0,87 kertaa (12,2/14,1) niin suuri kuin normaaliyhdistelmällä, kun kuljetetaan sama määrä tavaraa.

Taulukosta 12 ilmenee, kuinka muuttuvat ajoneuvokustannukset ja tiekuormitus muuttuvat siirryttäessä normaaliajoneuvoyhdistelmästä HCT-ajoneuvoyhdistelmään raakapuun irtotilavuusmassan eri arvoilla.



*Taulukko 12. HCT- ja normaaliyhdistelmien muuttuvat ajoneuvokustannukset ja tiekuormitus sekä niiden erot raakapuun irtotilavuusmassan eri arvoilla*

Raaka- puun irto- tila- vuus- massa kg/m <sup>3</sup>	Muuttuvat ajoneuvokus- tannukset			Tiekuormitus		
	Ajoneuvotyyppi			Ajoneuvotyyppi		
	HCT- ajo- neuvo <sup>5</sup> EUR/t	Nor- maali- ajoneuvo <sup>6</sup> EUR/t	Muu- tos %	HCT- ajoneuvo t/ekv.aks	Normaali- ajoneuvo t/ekv.aks	Muu- tos %
*)	11.41	10.77	-5.6	12.13	14.18	+16.9
200	22.54	18.34	-18.6	23.58	28.93	+22.6
240	19.38	15.83	-18.3	22.98	25.77	+12.2
290	16.62	13.63	-18.0	21.09	21.41	+1.5
300	16.18	13.27	-18.0	20.62	20.56	-.3
310	15.77	12.94	-18.0	20.14	19.74	-2.0
360	14.03	11.52	-18.0	17.62	16.01	-9.1
380	13.46	11.04	-18.0	16.61	14.72	-11.4
400	12.94	10.62	-18.0	15.63	13.53	-13.5
440	12.05	9.86	-18.2	13.79	11.45	-16.9
470	11.48	9.37	-18.3	12.52	10.14	-19.0
500	10.960	8.93	-18.5	11.36	9.00	-20.8

\*) rivin tuloksia määritettäessä on HCT-ajoneuvolle käytetty irtotilavuusmassan arvoa 390 kg/m<sup>3</sup> ja normaaliajoneuvolle 470 kg/m<sup>3</sup>.

Taulukosta 12 havaitaan, että

- HCT-ajoneuvon tiekuormitus on epäedullisempi kuin normaaliajoneuvon raakapuun irtotilavuusmassan arvoilla 200 – 300 kg/m<sup>3</sup>, mutta irtotilavuusarvon kasvaessa tulee HCT-ajoneuvo normaaliajoneuvoa edullisemmaksi, kts. myös liitteen 7 kuva 3,
- HCT-yhdistelmän käytöllä saatava polttoaineen kulutuksen suhteellinen vähenemä (l/tkm) on suunnilleen vakio (18 %) kuorman irtotilavuusarvosta riippumatta, mutta kulutusten erotus pienenee, kun irtotilavuus suurenee.

On huomattava, että edellä esitetyt tulokset koskevat vain tarkasteltuja ajoneuvomittoja ja akselimääriä.

<sup>5</sup> HC-yhdistelmä (100 t 12 akselia)

<sup>6</sup> Nykytilanteen mukainen ajoneuvoyhdistelmä (76 t 9 akselia)

## 7 HCT-ajoneuvotyypit ja tarve määrittää niille soveltuvat tieverkot

### 7.1 HCT-ajoneuvotyypit nykyisin

Tähän mennessä Trafi on myöntänyt ajoneuvojen massoja ja mittoja koskevan asetuksen perusteella lupia vain sellaisille HCT-ajoneuvoille, joiden käyttöönotto on erityisesti kehittänyt ajoneuvotekniikkaa. Jos HCT-kalusto sallitaan yleiseen liikenteeseen, kaikkia HCT-ajoneuvoja ei tarvitse rakentaa erikseen, vaan ne saadaan muuttamalla normaaliajoneuvot HCT-ajoneuvoiksi käyttämällä pääsääntöisesti standardilaitteita. Tämä vähentää kustannuksia.

Normaaliajoneuvoista HCT-ajoneuvoihin voidaan siirtyä muuttamalla kalustoa eri tavoin. Normaali muodostamisperiaate on se, että vetoautoon yhdistetään kaksi perävaunua. Molemmat perävaunut voivat olla puoliperävaunuja tai ensimmäinen perävaunu on puoliperävaunu ja toinen varsinainen perävaunu.

Seuraavassa tarkastellaan HCT-ajoneuvojen muodostamistapaa tarkemmin ja nimeämällä ne tyypeittäin.

Tyypissä A puoliperävaunuyhdistelmän perävaunuun lisätään vetokytkin ja sen perään apuvaunu (dolly), johon kytketään toinen puoliperävaunu. Tyypistä A voidaan käyttää useilla kuljetusaloilla. Useimmat tällä hetkellä kokeiluluvan saaneista HCT-ajoneuvoista ovat tyyppin A mukaisia.

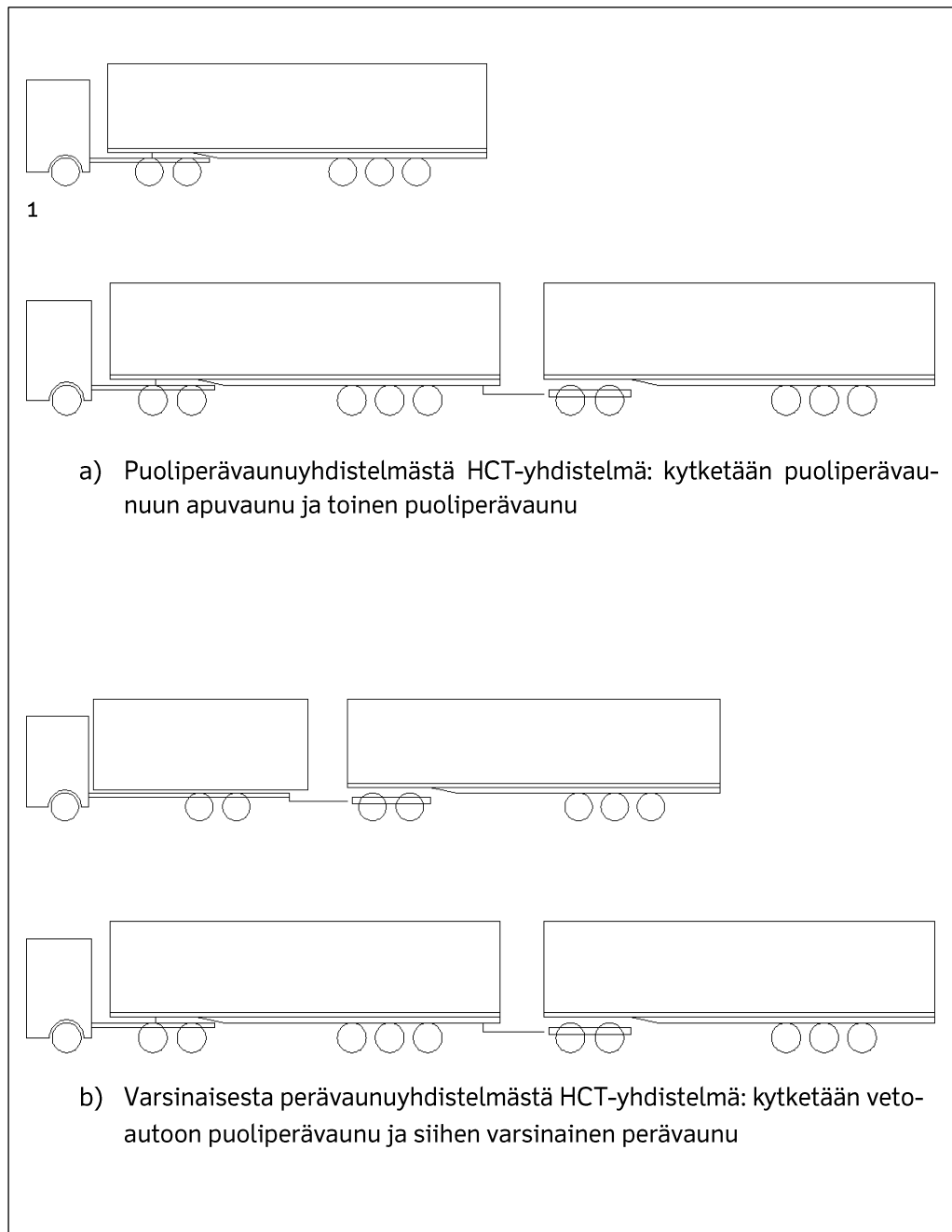
Tyyppin A etuja ovat lisäksi seuraavat: kuormatilana tai kuorman kantajana voidaan käyttää standardipuoliperävaunuja, siis markkinoilla olevia. Lisälaitteina ovat vain vetolaitteet ja apuvaunu. Lisäksi apuvaunuyhdistelmä varmistaa turvallisen liikennöinnin talvioloissa ja ahtaissa purkaus- ja kuormauspaikoissa, koska yhdistelmä voidaan jakaa kahdeksi puoliperävaunuyhdistelmäksi. Raskaan tavaran kuljetuksissa, puoliperävaunun telin massa ylittää herkästi sallitun, jos kuormaa ei tehdä etupainoiseksi.

Tyypissä B ensimmäisen puoliperävaunun perään asennetaan vetopöytä, johon toinen puoliperävaunu kytketään. Tällaista yhdistelmää kutsutaan nimellä B-linkki. B-linkkiyhdistelmän pituus on yleensä alle 25,25 m, mutta se voi olla myös yli 25,25 m, jolloin se on myös HCT-ajoneuvo. Tyypin B etuna on myös se, että mahdollistuu turvallinen liikennöinti talvioloissa ja ahtaissa purkaus- ja kuormauspaikoissa, koska yhdistelmä voidaan jakaa kahdeksi puoliperävaunuyhdistelmäksi.

Tyypissä C ensimmäisen puoliperävaunuun lisätään vetokytkin, johon kytketään varsinainen perävaunu. Tätä tyyppiä käytetään mm. raakapuuajoneuvoissa.

Tyypissä D kuorma-autoon ja varsinaiseen perävaunuun lisätään akseleita ja pyöriä, jolloin yhdistelmän kantavuus kasvaa, mutta tiekuormitus saadaan pysymään sallituissa puitteissa. Tällainen ratkaisu on vakaa ja joustava käännettäväksi ahtaissa paikoissa, kuten metsäautoteillä.

Kuvassa 12 on edellä sanotun mukaisesti kaaviokuvat tavallisimpien eli A ja C mukaisista tavoista muodostaa normaaliyhdistelmistä HCT-yhdistelmiä.



Kuva 12. Kaksi tavallista tapaa muodostaa normaaliajoneuvoyhdistelmästä HCT-yhdistelmä

Huom! Periaatekuvassa apuvaunun ja puoliperävaunun ero varsinaiseen perävaunuun ei näy.

## 7.2 Tarve HCT-yhdistelmille soveltuvan tieverkon määrittämiselle ja HCT-yhdistelmien käytön vaikutuksia tieverkolla

### 7.2.1 HCT-yhdistelmien käyttöönoton tarpeen määrittävät tavarakuljetusten kasvu ja HCT-yhdistelmien tarjoama hyöty

Tavarakuljetukset jatkavat kasvuaan talouden yleisen kehityksen mukaan. Kasvua vahvistavana tekijänä ovat metsäteollisuuden laajennus- ja uusinvestoinnit ja niiden aiheuttama lisääntyvä raakapuun ja tuotteiden kuljettaminen. Metsäteollisuuden lisääntyvät kuljetukset suuntautunevat edelleen tiekuljetuksiin, koska raakapuu kuljetetaan pääsääntöisesti tiekuljetuksina ja niillä on rooli myös metsäteollisuuden tuotteiden kuljetuksissa. Myös muilla, kuten esimerkiksi kaupan, maarakennuksen ja rakentamisen aloilla tiekuljetuksilla näyttää olevan pysyvä ja vahvistuva rooli tulevaisuudessa.

HCT-yhdistelmät tarjoavat – edellä luvuissa 4 ja 5 esitettyjen tulosten perusteella – merkittävän hyödyn nykysäädösten mukaisiin yhdistelmiin verrattuna. Hyötyhän ilmenee polttoaineenkulutuksen, CO<sub>2</sub>-päästöjen ja tiekuormituksen vähentymisenä.

On Suomen kansantalouden edun ja EU:n asettamien energiankäytön ja päästöjen vähentämistavoitteiden toteuttamisen kannalta järkevää tehostaa kuljetusjärjestelmää. Yksi tapa on ottaa käyttöön HCT-yhdistelmiä sellaisella tieverkolla, jossa se on mahdollista.

### 7.2.2 HCT-yhdistelmien käytön vaikutuksia tieverkolla

Suomen tieverkolla, varsinkin kaupunkien välisillä väylillä, liikennemäärät ovat pieniä väyläkapasiteettiin nähden. Tämän vuoksi HCT-ajoneuvojen liikennesuoritetta vähentävällä vaikutuksella ei ole Suomessa sitä merkitystä, mikä sillä olisi suurten liikennemäärien tapauksessa, kuten esimerkiksi Keski- ja Etelä-Euroopan liikenneverkkoilla.

HCT-ajoneuvojen suuri moottoriteho (yli 520 kW) aiheuttaa sen, että HCT-ajoneuvot eivät ole ”tien tukkona” muulle liikenteelle. Niiden keskinopeus säilyy suurillakin massoilla nopeusalueella 75–80 km/h. Tosin pitkissä mäissä niiden nopeus laskee, kuten normaaliin kuormattujen ajoneuvoyhdistelmien.

On kuitenkin tarpeen kiinnittää huomiota seuraavaan: HCT-ajoneuvot ja niiden kokonaispituudet sekä kuormatilat väliaukkoineen aiheuttavat normaalia enemmän ilmapyörteitä. Nämä synnyttävät säästä ja kelistä riippuen lumi- ja vesisumua, joka heikentää kohtaamis- ja ohitustilanteissa näkyvyyttä ja voi heikentää liikenneturvallisuutta.

Taulukossa 13 on esitetty HCT- ja normaaliyhdistelmien kuorman koko massana ja laavapituutena sekä tarvittavien ajomatkojen, autojen ja kuljettajien ajamiseen tarvitsemien ajoaikojen suhteellinen määrä.

Taulukko 13. HCT-yhdistelmien ajosuorite on pienempi kuin normaaliyhdistelmien kuljetettaessa sama tavaramäärä

AJN Nro	Ajn-tyyppi	Kuorma- Massa t	Lava- pituus m	Liikennesuoritteiden suhde normaali- vs. HCT- ajoneuvo			
				Perusteena kuormamassa Normaali	HCT	Perusteena lavapituus normaali	HCT
1	Normaali	33,5	12,64				
6	HCT	64,7	24,38				
6 vs. 1		1,93	1,93	1,00	0,52	1,00	0,52
1	Normaali	33,5	12,64				
7	HCT	55,6	24,4				
7 vs. 1		1,66	1,93	1,00	0,60	1,00	0,52
2	Normaali	36,7	21,27				
3	HCT	36,9	27,62				
3 vs. 2		1,01	1,3	1,00	0,99	1,00	0,77
4	Normaali	49,2	19,7				
5	HCT	66,8	25,53				
5 vs. 4		1,36	1,3	1,00	0,74	1,00	0,77

Nähdään, että raskaan tavarankuljetuksissa HCT-yhdistelmillä on tarpeen ajaa 0,52...0,99 kertaa niin monta kilometriä kuin normaaliyhdistelmillä, kun kuormatila täytetään täyteen kokonaismassaan. Kevyen tavarankuljetuksissa lavapituus on määrävä ja HCT-yhdistelmillä on tarpeen ajaa 0,55...0,77 kertainen matka, kun kuormatila täytetään täyteen lavapituuteen. Sama suhde toteutuu tyhjänä ajettavilla paluumatkoilla. Jos lastaustoimintoja ei oteta huomioon, autojen määrää ja kuljettajien työaikaa voidaan vähentää vastaavasti.

## 7.3 Perusteita ja kriteereitä HCT-ajoneuvoille soveltuvan tieverkon määrittämiseksi

HCT-ajoneuvojen kulkua koko tieverkolla rajoittavat:

- liittymien ahtaus. Useimmissa maanteiden ja katuverkon liittymissä HCT-yhdistelmä ei mahdu kääntymään käyttämättä kääntymisessä vastaantulijan ajokaistaa tai purkamatta osa liittymän saarekkeista. Liittymien avartaminen koko verkolla olisi hyvin kallista ja avartaminen nostaa henkilöautojen nopeuksia, pidentää suojateiden pituuksia ja heikentää näin turvallisuutta. Liittymien avartaminen on kannattavaa vain siellä, missä muutaman liittymän avartamisella voidaan poistaa pullonkaula pidemmällä reitillä. HCT-yhdistelmien kääntymisominaisuuksia voidaan parantaa jonkin verran siirtämällä puoliperävaunun akseleita eteenpäin ja muuttamalla osa perävaunun pyöristä ohjauspyörällä käännettäviksi. Tämä lisää tierasitusta ja lisää ajoneuvojen hankinta ja korjauskustannuksia.
- tilantarve kuormauspaikoilla
- pitkien siltojen kestävyys, jos kokonaismassa ylittää 76 tonnia tai lyhyiden siltojen kestävyys, jos käytetään yli 27 tonnin akseliryhmiä (esim 24 tonnin kolmiakselinen teli ja sen lähellä 10 tonnin akseli). Siltojen vahvistaminen on kannattavaa vain siellä, missä yhden sillan avartamisella voidaan poistaa pullonkaula pidemmällä reitillä.

- alemman asteisten kevyesti rakennettujen, heikolla pohjamaalla olevien teiden rakennekerrosten kuormituskestävyys, koska 14 akselinen yhdistelmä voi aiheuttaa suuremman uran kuin kaksi 20...30 minuutin välein ajavaa 7-akselista, kun akselimassat ovat keskimäärin samanlaiset.

Tieverkko, kuten myös katuverkko on kuitenkin suunniteltu aikaisemmin tehtyjen säädösten mukaisille ajoneuvoille ja yhdistelmille, joiden mitat ja massat ovat pienempiä kuin HCT-yhdistelmien. Tämän vuoksi HCT-yhdistelmien käytölle on yllä esitettyjä rajoituksia,

HCT-ajoneuvojen, kuten muidenkin ajoneuvojen ja yhdistelmien käytölle on aikaisemmin asetettu yksi yleisrajoitus: ajoneuvon tai yhdistelmän akseliryhmittäisiä, voimassa olevassa olevan lainsäädännön mukaisia maksimimassoja ei saa ylittää.

**Väylien päällysrakenteen kantavuus:** Kun edellä mainitusta yleisrajoituksesta pidetään kiinni ja lisäksi otetaan huomioon, että väylän päällysrakenne on ”kestokulutus-hyödyke”, aiheutuu tästä seuraavaa:

- HCT-ajoneuvot kuten muutkin ajoneuvot ja yhdistelmät voivat käyttää niitä väyliä, joiden päällysrakenne on mitoitettu ja toteutettu suunnitteluohjeiden ja laatuvaatimusten mukaisesti.
- HCT-yhdistelmiä, kuten muitakin ajoneuvoja ja yhdistelmiä käyttävien väylien päällysrakenteen kesto-aika määräytyy edellä mainittujen kaikkien ajoneuvojen käyttökertojen yhteenlasketun summan perusteella

Kun päällysrakenteen kantavuus käsitellään HCT-yhdistelmien tapauksessa yllä esitetyn mukaisesti, jää HCT-yhdistelmien käyttöä rajoittaviksi tekijöiksi

- tilantarve, erityisesti liittymissä ja
- siltojen kantavuus

**Ajoneuvon tilantarve** määräytyy HCT-ajoneuvojen kääntyvyyden mukaan ja se voi aiheuttaa käytön rajoituksia liittymissä, mikäli niiden mitoitus ei ole riittävä.

**Siltojen ja erityisesti pitkien siltojen kantavuus** voi aiheuttaa HCT-, kuten myös nykyaikojen käytölle rajoituksia riippuen akseliryhmien välisistä etäisyyksistä (vrt. Siltasääntö).

Lisäseikkana mainittakoon seuraavaa: HCT-ajoneuvojen kääntyvyysominaisuudet vastaavat normaaliajoneuvojen kääntyvyysominaisuuksia normaaliajossa, mutta niiden kääntäminen vaatii enemmän tilaa kuin normaaliajoneuvot.

HCT-ajoneuvojen kääntymistä koskevat vaatimukset ja rajoitukset (vaikea peruuttaa) asettavat vaatimuksia kuljettajien ajotaidoille silloin, kun kääntöpaikoilla on vähän tilaa. Hyvä kääntöpaikka ja terminaali HCT-ajoneuvoille on sellainen, jossa HCT-ajoneuvon voi kääntyä eteenpäin ajamalla. HCT-ajoneuvoilla on vaikea noutaa kuormaa metsästä, joissa kääntöpaikat ovat toistaiseksi ahtaita. Muun muassa tämän vuoksi puutavarakuljetuksia varten on alettu rakentaa erityisiä puutavaraterminaaleja, jonne raakapuu kuljetetaan metsästä normaaliajoneuvoilla tai traktoreilla, ja joista jatkokuljetukset voisivat tapahtua HCT-ajoneuvoilla.

Tavarankuljetuksia synnyttävää toimintaa on kuitenkin myös HCT-tieverkon ulkopuolella. Tällainen toiminta sijoittuu joko välittömästi HCT-tieverkon läheisyyteen tai kauemmaksi.

Mikäli toiminta vaatii ja/tai synnyttää suuria tavaravirtoja, tulisi selvittää, voidaanko tällaisten kohteiden tiet parantaa HCT-ajoneuvoille sopiviksi. Parannustarpeet koskevat tai saattavat koskea joko liittymiä tai väylää tai molempia.

## 7.4 HCT-ajoneuvoille soveltuvan tieverkon määrittämisestä ja informoinnista

Mikäli HCT-ajoneuvojen käyttö sallitaan, tulee liikenneviranomaisten määrittää se väyläverkko (tiet ja kadut), joilla HCT-yhdistelmien käyttö sallitaan.

Määrittäminen edellyttää selvitystyötä ja tarvittaessa tutkimustakin riippuen siitä, eriytetäänkö HCT-yhdistelmät ominaisuuksiensa (kokonaismassat, akseliryhmittäiset massat, pituudet, ym. tekijät) mukaan eri ryhmiin, joille kullekin määritetään soveltuva väyläverkko.

Lisäksi liikenneviranomaisten tulee osoittaa HCT-yhdistelmille soveltuva väyläverkko (tai verkot) esimerkiksi seuraavasti:

- tiedot HCT-yhdistelmien verkosta (verkoista) ovat avoimesti saatavilla digitaalisessa, helppo- ja selväkäyttöisessä muodossa
- HCT-yhdistelmien verkosta (verkoista) informoidaan ja verkko (verkot) osoitetaan selkeästi liikennemerkein liikenneverkon käyttäjille

## 8 Selvityksen kuluessa tehtyjä havaintoja ja esiin tulleita selvitystarpeita

Seuraavaassa todetaan selvityksen aikana tehdyt havainnot ja ehdotus niitä koskeviksi toimenpiteiksi; ks. myös Liite 8.

### 1. Valtakunnallisen DIGIROAD-järjestelmän kehittäminen lisäämällä siihen pituuskaltevuustiedot

Ajoneuvosimulointijärjestelmän käyttöä rajoittaa kuitenkin *väylätiedoston puutteellisuus*. Tie- ja katuverkkotiedosto DIGIROA:sta puuttuu väylien mäkyisyys- eli pituuskaltevuustieto. DIGIROAD:ssä väylät kuvataan tasaisina kuin järven jäät. Aikaisemmin kehitettyyn tierekisteritiedostoon tiedot pituuskaltevuuksien määrittämiseksi sisältyvät valta- ja kanta- sekä seututeiden osalta, mutta osittain puutteellisena ja paikoin epätarkkana. Tästä aiheutuu, että ajoneuvodynamiikkaan perustuvaa ajoneuvosimulointia ei voida soveltaa DIGIROAD-tiedoston tapauksessa ollenkaan ja Tierekisterin tapauksessa vain osittain.

Pituuskaltevuustiedot ovat kuitenkin olennaisia, koska mäet, niiden jyrkkyys ja pituus vaikuttavat merkittävästi ajoneuvojen energiankäyttöön ja päästöihin sekä liikenneturvallisuuteen, varsinkin liukkailla keleillä sekä myös raskaiden ajoneuvoyhdistelmien kulun sujuvuuteen.

DIGIROADin täydentäminen pituuskaltevuustiedoilla tulisi suunnitella ja toteuttaa liikennemäärät ja liikenteen rakenne huomioon ottaen (raskaalla tavaraliikenteellä painottaen) seuraavasti:

- valta- ja kantatiet
- seututiet ja katuverkot,
- yhdystiet
- yksityistiet tarpeen mukaan ja tiedon tuottamiseen tarjolle tulevan teknologian tarjoamien uusien mahdollisuuksien mukaan

### 2. Liikenteen sujuvuustietojen tuottaminen kaupunkien sisääntulo-/ulosmenoväylillä

Liikenne keskittyy kaupungistumisen myötä kaupunkien sisääntulo-/ulosmenoväylille enenevässä määrin sekä henkilö- että tavaraliikenteen osalta. Niiden sujuvuuden heikentyminen ja ruuhkautuminen lisää energiankäyttöä ja siten päästöjä sekä liikenteessä kuluvaa aikaa ja näiden seurauksena liikenne- ja kuljetuskustannuksia. Huonon sujuvuuden (ja ilmiön ”stop and go”) ansiosta energiankäyttö ja päästömäärät voivat jopa yli kaksinkertaistua ja samoin ajantarve sekä liikenne- ja kuljetuskustannukset kuin myös kuljettajien stressi, koska aikataulujen ennakoitavuus heikkenee.

Olisi erittäin hyödyllistä tuottaa tietoa liikenteen sujuvuudesta ko. reiteillä, jolloin voitaisiin määrittää huonon sujuvuuden aiheuttamat haitat ja suunnitella sujuvuuden parantamistoimenpiteitä haittojen vähentämiseksi. Asia on tärkeä liikenteen päästöjen vähentämisen, mutta myös liikkumisen ja kuljetusten tehostamisen kannalta, varsinkin kun liikenne keskittyy enenevässä määrin kaupunkeihin ja tavarakuljetusajoneuvot käyttävät pääliikennereittejä.



Tietotuotanto tulee suunnitella ja toteuttaa liikennemäärät ja liikenteen rakenne huomioon ottaen (raskaalla tavaraliikenteellä painottaen) seuraavasti:

- Pääkaupunkiseudun sisääntulo-/ulosmenoväylät
- Muiden suurten kaupunkien sisääntulo-/ulosmenoväylät tapauskohtaisesti

### 3. Moottorikarttojen teettäminen uusista, aikaisempaa tehokkaimmista ja eri energialajeja (ml. biopolttoaineet) käyttävistä moottoreista

Simulointijärjestelmän yksi keskeinen syöttötiedosto eli tyyppiajoneuvojen moottorikarttatiedosto ei ole ajan tasalla, koska moottoreita kehitetään jatkuvasti eikä HCT-ajoneuvojen suuritehoisista moottoreista ole saatavilla riittävästi moottorikarttoja. Ensisijaisesti tarvitaan moottorikarttoja HCT-ajoneuvojen sellaisista suuritehoisista moottoreista, jotka voivat käyttää biopolttoainetta tai normaalia dieselpolttoainetta. Nämä moottorikartat mahdollistaisivat mainittujen HCT-ajoneuvojen kulun simuloinnin eri oloissa eri polttoainetyypeillä sekä energiankäyttö- ja päästötietojen tuottamisen monipuolisesti ja tehokkaasti. Samalla saataisiin tärkeää lisätietoa biopolttoaineiden vaikutuksesta tiekuljetusten päästömääriin.

Tulisi teettää vähintään kaksi (2) moottorikarttaa HCT-ajoneuvojen moottoreista ja kolme (3) moottorikarttaa henkilöautojen uusista moottoreista.

### 4. Muut kehittämistoimenpiteet

#### **Ajoneuvojen ja yhdistelmien ilmanvastuksia koskeva selvitys:**

Ajoneuvojen ja yhdistelmien ilmanvastuksen merkitys on suuri, mutta tiedot puutteellisia ilmanvastuksen määräytymisestä. Ilmanvastus vaikuttaa ajoneuvojen ja yhdistelmien energian käyttöön, ajokustannuksiin, päästöihin ja jopa liikenneturvallisuuteen huonoilla keleillä. Ilmanvastukseen vaikuttaa varsinkin ajoneuvojen ja yhdistelmien kuormatilat ja myös vetoauton sekä perävaunujen ja kuormatilojen alustat.

Käsillä olevan selvityksen kuluessa syntyi runsaasti tietoa yhdistelmien ilmanvastukseen liittyvistä seikoista, mutta tietoa ei ollut mahdollisuus analysoida kuin pieneltä osin.

***Olisi hyödyllistä käynnistää jatkoselvitys yhdistelmien ilmanvastuksen muodostumisesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä.*** Selvitys antaisi perusteita ajoneuvoyhdistelmien kuormatilojen ja alustarakenteiden kehittämiseksi, jolloin energiankäyttöä, kustannuksia ja päästöjä voitaisiin vähentää. Samalla saataisiin parannusta myös liikenneturvallisuuden kannalta, koska ajoneuvoyhdistelmät synnyttävät näkyvyyttä heikentävää vesi- ja lumisumua kelioloista riippuen ja siten aiheuttavat riskitilanteita niitä kohdatessa tai ohitettaessa.

#### **Lainsäädännön puutteet:**

Lainsäädäntöön tarvitaan poikkeusmahdollisuus tutkimus- ja kehitystyötä varten. Kehitettäessä kuljetuskalustoa syntyy joskus tarvetta tehdä myös mittauksia ja kokeita normaalitieverkolla siten, että poiketaan lainsäädännön määrittämistä ajonopeuksista tai muista seikoista tarkoin rajatuissa mittaus- tai kokeiluoloissa. Viranomaiset eivät nykyisin voi kuitenkaan antaa lainsäädännöstä poikkeavia lupia esimerkiksi sallittujen nopeuksien ylittämiseksi. Näin estetään tarpeellinen mittaus- ja kokeilutoiminta, kuten ilmeni käsillä olevan hankkeen ajovastusmittauksissa. Mikäli lainsäädännössä

annettaisiin ao. viranomaiselle lupa antaa poikkeuksia, se edistäisi mm. kuljetuskaluston kehittämistä uusia ratkaisuja kokeilemalla käytännön oloissa eli tieverkolla.

***Lainsäädäntöön tulee sisällyttää mahdollisuus tehdä mm. kaluston tutkimus- ja kehitystyötä palvelevia koeajoja "ylinopeudella" valvotuissa oloissa.***

Tulisi myös selvittää, olisiko tarvetta saada tutkimuksessa käytetylle ajoneuvon 3-tyyppisille HCT-yhdistelmälle enemmän kuormaa massalla mitattuna.

**Puutteita ajoneuvorekisterin tiedoissa:** Ajoneuvorekisterin perävaunutiedoissa on virheitä, erityisesti mittatiedoissa.

***Ajoneuvorekisterin tietojen tulisi tarkistaa, erityisesti perävaunujen osalta.***

## 9 Johtopäätöksiä

Johtopäätökset ovat

1. HCT-yhdistelmä kuluttaa polttoainetta kuljetettua tavaramäärää kohti vähemmän kuin normaaliyhdistelmä, kun HCT-yhdistelmä ja normaaliyhdistelmä voidaan kuormata täyteen tilavuuteen tai massaan. Polttoaineen kulutus vähenee tyypillisesti 10...25 %. CO<sub>2</sub>-päästöt pienenevät saman verran.
2. HCT-yhdistelmään mahtuu tavallisesti 1,5...2 kertaa niin suuri tilavuus- tai massatavaraa kuin normaaliyhdistelmiin. Saman tavaramäärän kuljettamiseen tarvitaan silloin 0,5...0,67-kertainen määrä ajomatkaa, autoja ja kuljettajien työaika, jos kuormaustoimintoja ei oteta huomioon.
3. HCT-yhdistelmä rasittaa tietä vähemmän kuin normaalikalusto, jossa paripyörien osuus on sama, ja kummallakin kuljetetaan sama kokonaismäärä tavaraa. Eroon vaikuttaa merkittävästi se, millaista täyttöastetta yhdistelmille käytetään.

## Lähdeluettelo

Ilmatieteenlaitos. (ei pvm). Säähavainnot. Suomi, Saatavissa  
(<http://saa.hylli.org/havainnot.html>).

Jokela, H. (7. 3 2017). (J. Sauna-aho, haastattelija)

Koskinen, O. H. (2001). Julkaisematon muistio. Road wear effect of the number of axles and their types in vehicle combination, 29.11.2001

Koskinen Olavi, H., Raakapuukuljetukset, julkaisematon muistio, 18.5.2018

Neuvottelu kuorma-autojen renkaista LiVissä 14.12.2016. (14. 12 2016).

Siltanen, T. (3. 2 2010). Truck Tyre Rolling Resistance and Fuel Economy and Safety,  
Muistio

Siltanen, T. N. (13. 1 2017). (J. Sauna-aho, haastattelija)

Transportation Research Circular Number E-C118, July 2007, Pavement Lessons  
Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate  
Highway System. (7 2007).

Valtioneuvosto. (ei pvm). *Asetus 407/2013 (Muutos asetukseen koskien ajoneuvon  
käyttöä tiellä)*. Valtioneuvosto.

# Ajovastusanalyysi

Olavi H. Koskinen

## 1. Johdanto

Kun ajoneuvo liikkuu, sen liikettä vastustavat ajovastusvoimat. Nämä voimat muodostuvat vierintävastuksesta ja ilmanvastuksesta sekä lisäksi nousuvastuksesta, jonka aiheuttaa tien pituuskaltevuus. Jos ajoneuvon liiketila muuttuu, esiintyy myös kiihdytysvastus.

## 2. Menetelmä

Vierintä- ja ilmanvastus ovat oleelliset määritettäessä ajoneuvon liikettä. Niiden suuruudet voidaan laskea coastdown-menetelmällä, missä ajoneuvon annetaan "rantautua" tieosalla, jonka pituuskaltevuus on vakio pitkällä matkalla. Ajoneuvo kiihdytetään sopivaan alkunopeuteen, josta sen annetaan vieriä vaihte vapaalla, jolloin siihen ei vaikuta mikään vetovoima. Silloin ainoat siihen vaikuttavat voimat ovat vierintävastus ja ilmanvastus kuten myös mahdollinen tien pituuskaltevuusvastus. Coastdown-ajossa ajoneuvon liikettä voidaan kuvata seuraavalla differentiaaliyhtälöllä:

$$m \, dv/dt = -m \, g \, (a_0 + q + a_1 v) - a_2 (v-w)^2 \quad (1)$$

missä:  $m$  = ajoneuvon massa [kg]

$t$  = aika [s]

$v$  = nopeus [m/s]

$g$  = gravitaatiokiihtyvyyys [9.80665 m/s<sup>2</sup>]

$a_0$  = vierintävastuksen peruskerroin

$a_1$  = vierintävastuksen nopeuskerroin [s/m]

$a_2$  = ilmanvastuskerroin [kg/m]

$q$  = tien pituuskaltevuus

$w$  = tuulen nopeus [m/s]

Lisäksi

$$a_2 = 0.5 D_a C_d A_f$$

missä:  $D_a$  = ilman tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$A_f$  = ajoneuvon otsapinta-ala [m<sup>2</sup>]

$C_d$  = ajoneuvon muotokerroin

Seuraavilla sijoituksilla

$$C_0 = g \, (a_0 + q)$$

$$C_1 = g \, a_1$$

$$C_2 = a_2/m$$

$$D = \sqrt{4 C_0 C_2 - C_1^2}$$

sekä asettamalla  $w = 0$ , yhtälö (1) voidaan muuntaa muotoon

$$dv/dt = -(C_0 + C_1 v + C_2 v^2) \quad (2)$$

Differentiaaliyhtälön (2) ratkaisu on  $s$

$$t = -2/D \arctan [(2 C_2 v + C_1)/D] \quad (3)$$

Yhtälön (3) käänteisfunktio on

$$v = -C_1/C_2/2 + D/C_2/2 \tan[-D/2(t - t_0)] \quad (4)$$

missä:  $t_0$  = aika [s], kun  $v$  = alkunopeus [m/s]

Yhtälöt (3) and (4) sovitetaan mittaustietoihin ja parhaat funktiokertoimet etsitään korrelaatiokertoimien ja jäännöshajontojen perusteella. Yhtälöä (3) aika vs. nopeus sanotaan moodiksi 0 ja yhtälöä (4) nopeus vs. aika sanotaan moodiksi 1.

### 3. Tarkasteltavat tapaukset

Yhteensä seitsemän (7) eri ajoneuvoyhdistelmää testattiin kantatiellä 54 tieosalla 14, missä mittaamatka on noin 1400 m ja pituuskaltevuuden arvo on 0.085 prosenttia. Testit suoritettiin sekä kuormattuina että kuormaamattomina molemmissa ajosuunnissa. Lyhyen mittaamatkan vuoksi coastdown-ajoja toistettiin vaihtamalla nopeusalueita niin, että nämä alueet peittivät toisensa. Lopputulokset saatiin yhdistämällä yksittäiset testiajot ja etsimällä niistä parhaimmat matemaattiset mallit.

Yksittäisten tutkimusajojen määrä on esitetty seuraavassa asetelmassa

Ajoneuvo #	Kuormaamaton		Kuormattu		Yhteensä
	Itään	Länteen	Itään	Länteen	
1	10	9	5	6	30
2	8	7	7	7	29
3	8	7	6	7	28
4	5	5	6	6	22
5	4	4	7	7	22
6	5	7	9	9	30
7	3	4	7	7	21

Tutkimusajoneuvojen tekniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

### 4. Tulokset

Kuten edellä on mainittu, mittaukset tehtiin molemmissa ajosuunnissa. Täten alkuperäinen havaintojen lukumäärä on 28 eikä 14. Kuitenkin, koska ei ole mitään järkevää syytä, miksi vastuskertoimien pitäisi olla erilaiset ajosuunnittain, on määritetty suuntien keskiarvo. Niinpä lopullinen havaintojen lukumäärä on 14.

Näille 14:lle tapaukselle ajovastuskertoimien arvot ovat taulukossa 2.

Kuten taulukosta 2 ilmenee, on ilmeistä, että ajoneuvon massalla on myös vaikutusta vierintävastuskertoimiin.

Tämän vuoksi taulukon 2 arvoja voi käyttää vain, jos ajoneuvon massa on täsmälleen sama kuin vastaavan testiajoneuvon. Yleistä tarkoitusta varten voidaan määrittää yhdistetyt yhteiset mallit vierintävastuskertoimille  $a_0$  ja  $a_1$  mittaustuloksista. Parhaiten sopivan mallin muoto on seuraava:

$$y = A_0 + A_1 (x_1 - p_0)^p + A_2 x_2 + A_3 x_1 x_2 \quad (5)$$

missä:  $y$  = vierintävastuskerroin

$x_1$  = ajoneuvon massa [t]

$x_2$  = pyörien lukumäärä [kpl]

$A_0, A_1, A_2, A_3, p$  ja  $p_0$  ovat regressioanalyysin antamat kertoimet

Vakioiden arvot ovat seuraavat:

	$a_0$	$a_1$
$A_0$	0.0040717888	5.4969149E-5
$A_1$	3.9899238E25	5.3863971E23
$A_2$	5.4863036E-5	7.4065099E-7
$A_3$	-4.3728343E-7	-5.9033263E-9
$p$	-13.972	-13.972
$p_0$	-100	

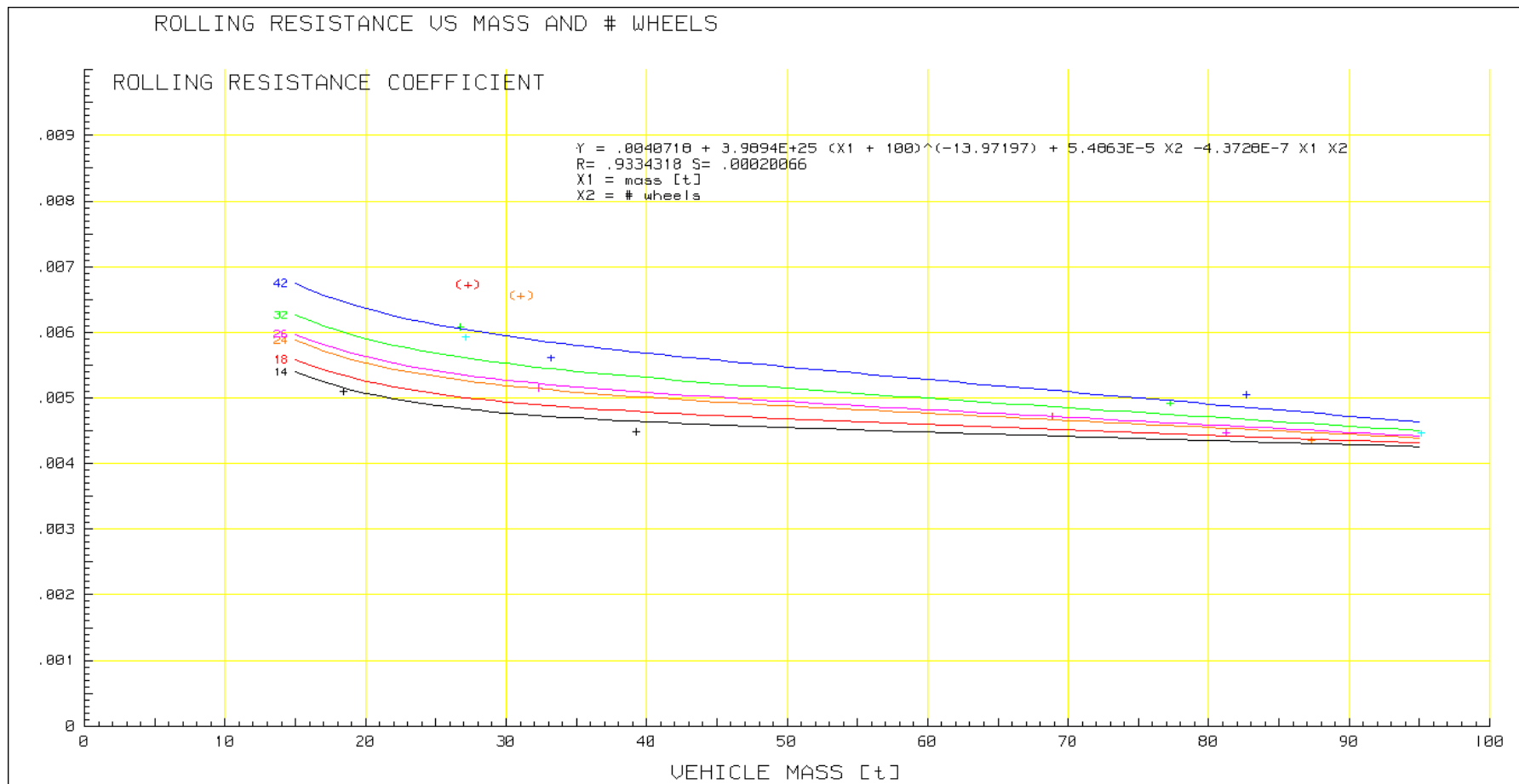
Taulukko 1. Ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvojen tekniset ominaisuudet ajovastusmittausten kannalta

Hav.	Ajn	Massa	Akselit		Pyörät	Ilman- tiheys	Otsa- pinta- ala	Yhdis- telmä- pituus	Kuorma-tila
			Yht.	Yksitt. pyörin					
#	#	kg	kpl	kpl	kpl	kg/m <sup>3</sup>	m <sup>2</sup>	m	
1	1	18480	6	5	14	1.222	8.855	15.919	Kontti 40 jalkaa
2	1	39340	6	5	14	1.222	8.855	15.919	Kontti 40 jalkaa
3	2	27340	8	7	18	1.208	9.614	25.335	Umpikori
4	2	68940	8	7	18	1.234	9.614	25.335	Umpikori
5	3	31140	11	10	24	1.234	9.614	31.505	Umpikori
6	3	87400	11	10	24	1.234	9.614	31.505	Umpikori
7	4	26840	9	2	32	1.235	8.602	24.425	Puutavara- pankot
8	4	77320	9	2	32	1.245	9.994	24.425	Puutavara- pankot
9	5	27180	12	3	42	1.235	8.602	30.885	Puutavara- pankot
10	5	95180	12	3	42	1.245	9.994	30.885	Puutavara- pankot
11	6	33260	11	1	42	1.271	8.855	30.830	Kontti 40 jalkaa
12	6	82740	11	1	42	1.280	8.855	30.830	Kontti 40 jalkaa
13	7	32380	11	9	26	1.286	8.855	30.925	Kontti 40 jalkaa
14	7	81320	11	9	26	1.280	8.855	30.925	Kontti 40 jalkaa

Taulukko 2. Ajoastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvojen ajoastuskertoimet

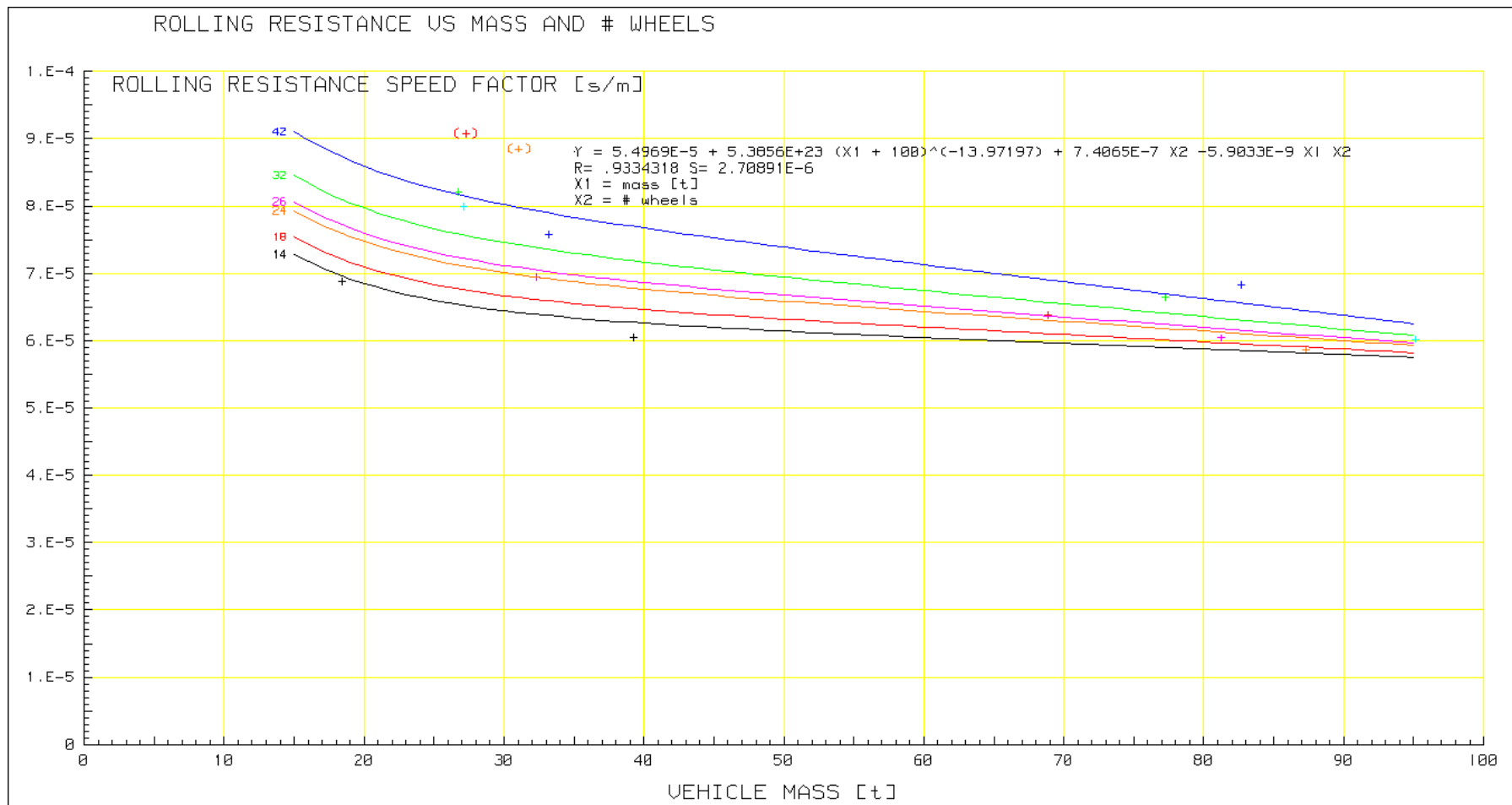
Hav.	Ajo- neuo- vo	Kuormaus	Vierintävastus		Ilm.- vas- tus	Muo- to- ker- roin
			Perusosa	Nopeus- kerroin		
			$a_0$	$a_1$	$a_2$	$C_d$
#	#		-	s/m	kg/m	
1	1	Kuormaamaton	5.0915E-03	6.8735E-05	3.817	.705
2	1	Kuormattu	4.4817E-03	6.0503E-05	3.817	.705
3	2	Kuormaamaton	6.7208E-03	9.0731E-05	3.875	.667
4	2	Kuormattu	4.7220E-03	6.3747E-05	3.958	.667
5	3	Kuormaamaton	6.5536E-03	8.8473E-05	4.973	.838
6	3	Kuormattu	4.3465E-03	5.8677E-05	4.973	.838
7	4	Kuormaamaton	6.0770E-03	8.2039E-05	6.475	1.219
8	4	Kuormattu	4.9245E-03	6.6480E-05	5.041	.810
9	5	Kuormaamaton	5.9230E-03	7.9960E-05	7.493	1.410
10	5	Kuormattu	4.4604E-03	6.0215E-05	6.019	.967
11	6	Kuormaamaton	5.6088E-03	7.5718E-05	7.190	1.278
12	6	Kuormattu	5.0557E-03	6.8252E-05	7.242	1.278
13	7	Kuormaamaton	5.1468E-03	6.9482E-05	6.706	1.177
14	7	Kuormattu	4.4737E-03	6.0395E-05	6.674	1.177





Kuva 1. Vierintävastuksen riippuvuus massasta ja pyörien lukumäärästä – perusosa

Huom! Suluissa olevat havaintomerkinnot (+) on jätetty pois mallia määrittäessä



Kuva 2. Vierintävastuksen riippuvuus massasta ja pyörien lukumäärästä – nopeuskerroin

Huom! Sulussa olevat havaintomerkinnot (+) on jätetty pois mallia määritettäessä.

# Ajovastusmittausten analysointitulokset ajoneuvoittain

Olavi H. Koskinen

Tässä liitteessä on seitsemän neljän kuvan asetelmaa eli yksi asetelma jokaisesta seitsemästä ajoneuvosta.

Asetelman yksittäinen kuva esittää, kuinka hyvin ajovastusmittaustiedoista analyysin avulla saatu malli sopii yhteen ajovastusmittauksissa kerättyjen mittaushavaintojen kanssa, kun havaintotietoina ovat ajoneuvon nopeus ja aika.

Tiedot kuvassa ovat

- piirros nopeus vs. aikariippuvuuksista ja
- tilastokäsittelyn tuottamat suureet

Nopeus vs. aikariippuvuus osoittaa

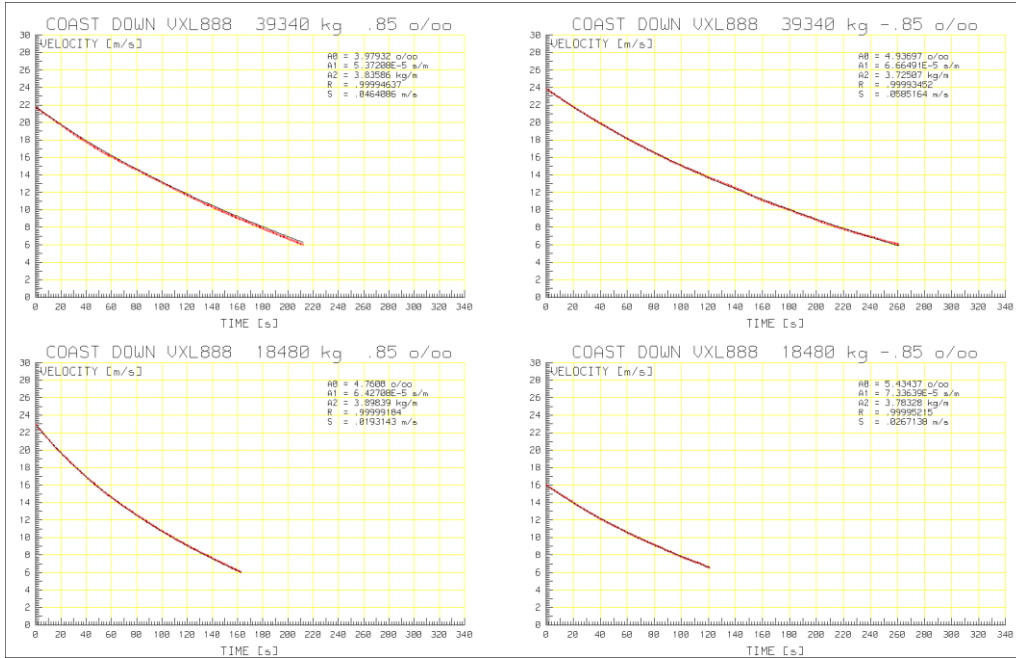
- analysoinnin tuottaman mallin antaman nopeus vs. aikariippuvuuden (yhtenäinen punainen viiva)
- mittaushavaintojen mukaisen nopeus vs. aikariippuvuuden (vihreät pisteet punaista viivaa mukaillen)

Analysoinnin tuottamat suureet ovat:

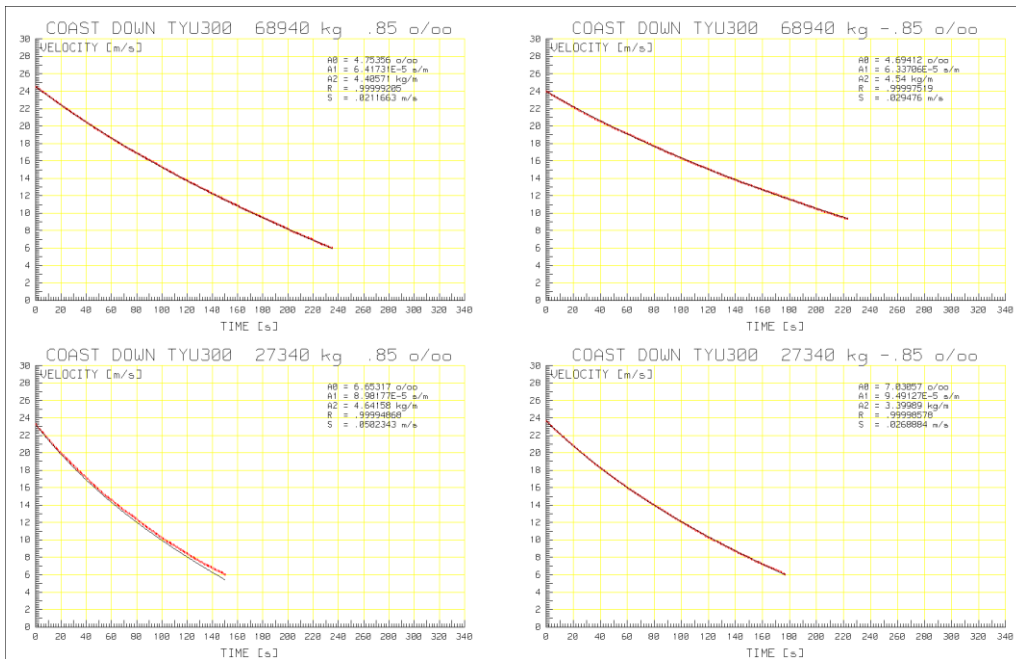
$A_0$ = vierintävastuskertoimen vakio-osa	[-]
$A_1$ = vierintävastuskertoimen nopeuskerroin	[s/m]
$A_2$ = ilmanvastuskerroin	[kg/m]
$R$ = mallin ja havaintojen yhteensopivuutta osoittava korrelaatiokerroin	[-]
$S$ = jäännöshajonta	[m/s]

Mitä suurempi on korrelaatiokerroimen  $R$  arvo, sitä parempi on mallin yhteensopivuus havaintojen kanssa.  $R$ :n arvo 1.00 osoittaa täydellistä yhteensopivuutta.

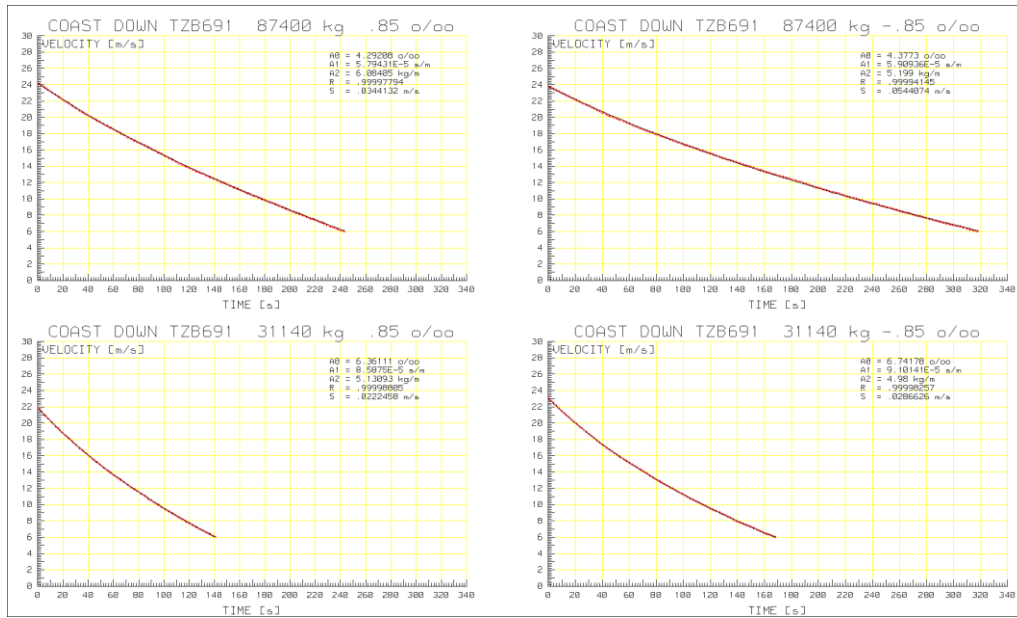
Mitä pienempi on jäännöshajonnan  $S$  arvo, sitä paremmin malli selittää havaintoja. Jos  $S = 0$ , niin malli sopii täydellisesti havaintoihin.



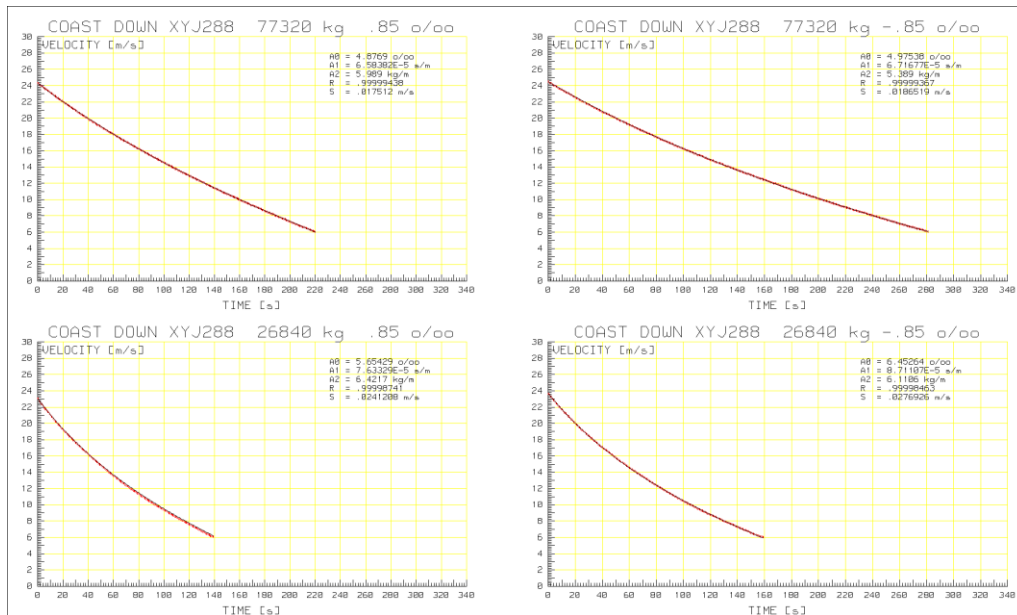
Kuva 1. Ajoneuvon 1 (VXL888, MEK) liikehtälön sovitus mittaushavaintoihin



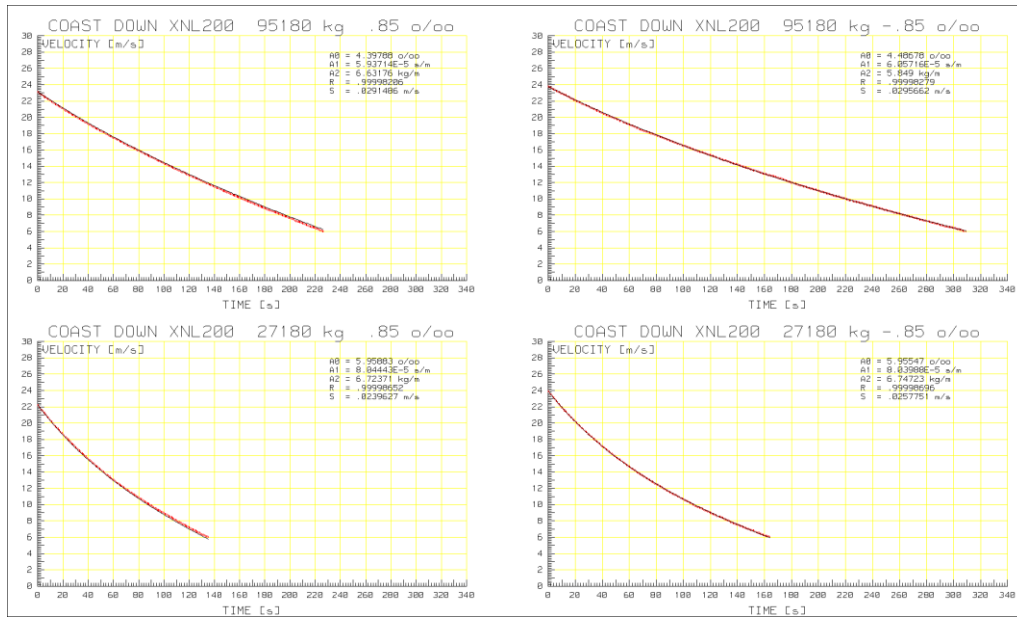
Kuva 2. Ajoneuvon 2 (TYU300, KOA) liikehtälön sovitus mittaushavaintoihin



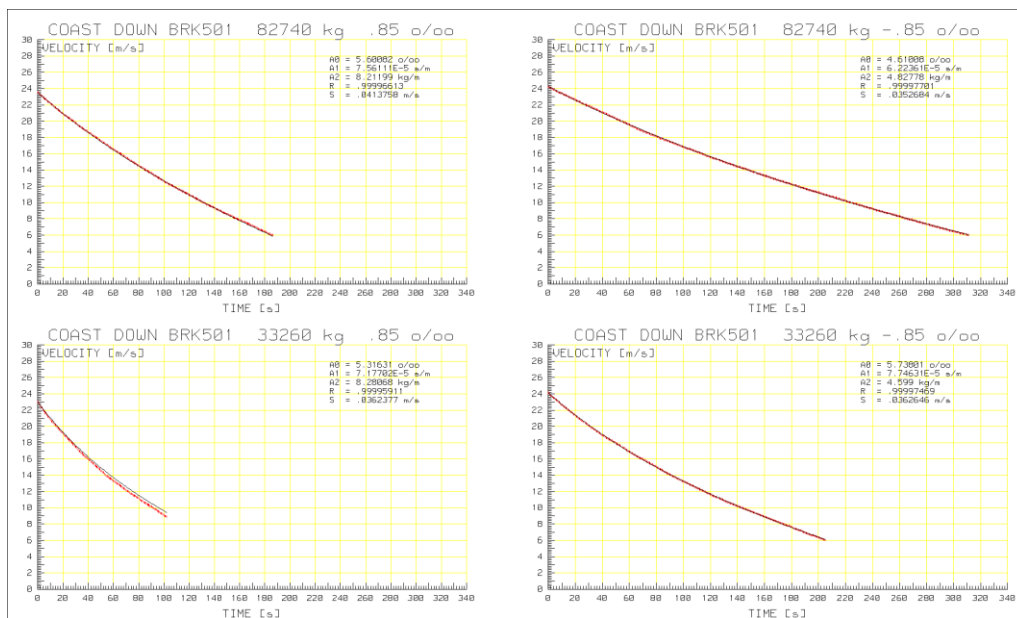
Kuva 3. Ajoneuvon 3 (TZB691, KOA) liikeyhtälön sovitus mittaushavaintoihin



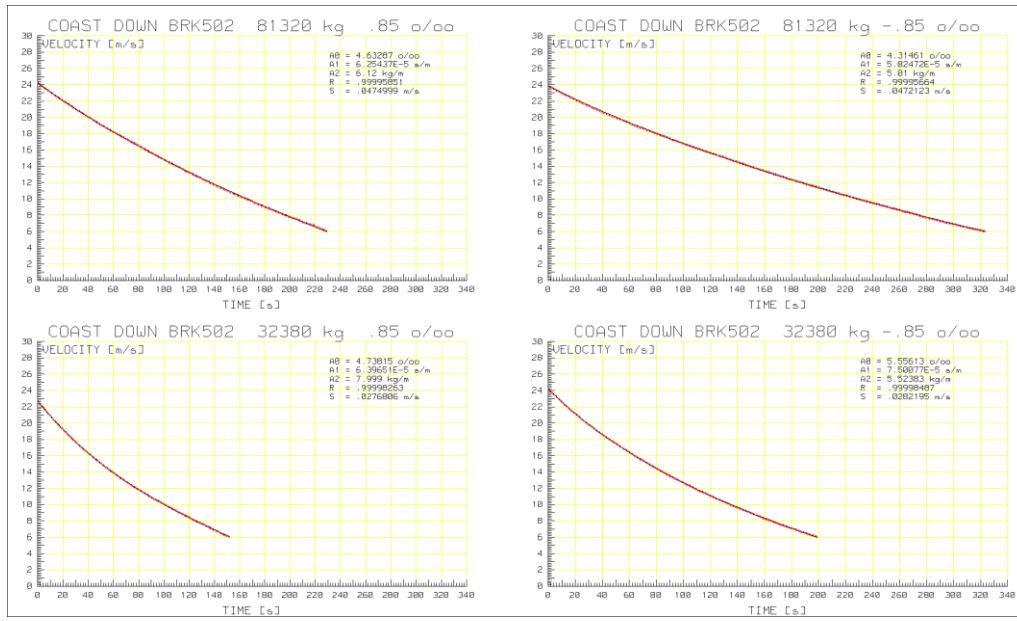
Kuva 4. Ajoneuvon 4 (XYJ288, Orpe Kuljetus Oy) liikeyhtälön sovitus mittaushavaintoihin



Kuva 5. Ajoneuvon 5 (XNL200, Orpe Kuljetus Oy) liikeyhtälön sovitus mittaushavaintoihin



Kuva 6. Ajoneuvon 6 (BRK501, Speed Oy) liikeyhtälön sovitus mittaushavaintoihin; puoliperävaunuissa ja apuvaunussa paripyörät



Kuva 7. Ajoneuvon 7 (BRK502, Speed Oy) liikeyhtälön sovitus mittaushavaintoihin; puoliperävaunuissa ja apuvaunussa yksittäispyörät

# Ote ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvo-yhdistelmien ajosimulointituloksista Vt4:llä välillä Helsinki -> Oulu

Jussi Sauna-aho ja Olavi H. Koskinen

#	VIERINTÄVASTUS		ILMANVASTUS	MASSA	KUORMA	POLTTOAIN. KULUTUS		CO2-PÄÄSTÖT	
	-	s/m	kg/m	kg	kg	l/100 km	l/100 tkm	kg/100 km	kg/100 tkm
AJN: 1									
1	5.43554E-03	7.33798E-05	3.238	14500	0	25.59	*	67.92	*
3	5.07277E-03	6.84824E-05	3.902	20000	5500	29.44	5.35	78.15	14.21
8	4.77234E-03	6.44266E-05	3.902	30000	15500	33.05	2.13	87.72	5.66
13	4.63623E-03	6.25891E-05	3.902	40000	25500	36.78	1.44	97.64	3.83
17	4.56499E-03	6.16273E-05	3.902	48000	33500	39.78	1.19	105.58	3.15
18	4.54950E-03	6.14182E-05	3.902	50000	35500	40.53	1.14	107.57	3.03
23	4.47894E-03	6.04656E-05	3.902	60000	45500	44.21	.97	117.35	2.58
28	4.41407E-03	5.95899E-05	3.902	70000	55500	47.79	.86	126.84	2.29
AJN: 2									
1	5.00015E-03	6.75020E-05	4.008	27300	0	32.71	*	86.83	*
2	4.93932E-03	6.66808E-05	4.008	30000	2700	33.72	12.49	89.51	33.15
7	4.78571E-03	6.46071E-05	4.008	40000	12700	37.51	2.95	99.58	7.84
12	4.68149E-03	6.32002E-05	4.008	50000	22700	41.29	1.82	109.60	4.83
17	4.59344E-03	6.20114E-05	4.008	60000	32700	44.99	1.38	119.41	3.65
19	4.56009E-03	6.15613E-05	4.008	64000	36700	46.42	1.26	123.23	3.36
22	4.51108E-03	6.08996E-05	4.008	70000	42700	48.55	1.14	128.88	3.02
27	4.43087E-03	5.98167E-05	4.008	80000	52700	52.00	.99	138.03	2.62
32	4.35150E-03	5.87453E-05	4.008	90000	62700	55.28	.88	146.72	2.34
37	4.27250E-03	5.76787E-05	4.008	100000	72700	58.36	.80	154.90	2.13
AJN: 3									
1	5.16535E-03	6.97322E-05	5.035	31100	0	37.67	*	99.99	*
6	5.00994E-03	6.76342E-05	5.035	40000	8900	41.08	4.62	109.06	12.25
11	4.87949E-03	6.58731E-05	5.035	50000	18900	44.84	2.37	119.04	6.30
16	4.76520E-03	6.43301E-05	5.035	60000	28900	48.52	1.68	128.79	4.46
20	4.67808E-03	6.31541E-05	5.035	68000	36900	51.34	1.39	136.28	3.69
21	4.65660E-03	6.28641E-05	5.035	70000	38900	52.02	1.34	138.09	3.55
26	4.55015E-03	6.14270E-05	5.035	80000	48900	55.40	1.13	147.06	3.01
31	4.44455E-03	6.00014E-05	5.035	90000	58900	58.53	.99	155.3	2.64
36	4.33930E-03	5.85806E-05	5.035	100000	68900	61.45	.89	163.11	2.37
41	4.23422E-03	5.71619E-05	5.035	110000	78900	64.26	.81	170.56	2.16



# Polttoaineen kulutuksen vertailu mittausta ja ajoneuvosimulointia käyttäen

Jussi Sauna-aho ja Olavi H. Koskinen, 5.2.2018

## 1 Yhteenvedo ja johtopäätökset

**Yhteenvedo:** Liikenneviraston toimeksiannon perusteella selvitettiin ajoneuvoyhdistelmien polttoaineen kulutusta kahdella eri tavalla.

Polttoaineen kulutus määritettiin mittauksella ja ajoneuvosimuloinnilla kuormaamattomien ja kuormattujen ajoneuvoyhdistelmien tapauksessa.

Ajoneuvoyhdistelmien määrä oli neljä ja reittien määrä kaksi. Reitteinä käytettiin valtatiellä 8 (VT8) välillä Rauma–Pori ja valtatiellä 13 (VT13) välillä Ristiina–Lappeenranta. Koska tierekisterin sisältämät tiedot VT13:sta ovat virheellisiä, tehtiin VT13:n tiemittaus oikean pystygeometrian määrittämiseksi ajoneuvosimulointia varten.

Selvityksen tulos ositti, että molemmilla tavoilla määritetty polttoaineen kulutus (sen määrä) on sama. Sama koskee nopeutta ja sen seurauksena ajoaikaa.

### Johtopäätökset ovat

1. Ajoneuvosimulointi on luotettava tapa arvioida polttoaineen kulutusta edellyttäen, että simuloinnin lähtötiedot ovat oikeita.
2. Ajoneuvosimuloinnin avulla voidaan määrittää paitsi polttoaineen kulutus myös muut muuttuvat ajoneuvokustannukset (voiteluaine-, korjaus & huolto- ja rengaskustannukset) sekä hiilidioksidimäärät, koska ne ovat lineaarisessa suhteessa polttoaineen kulutukseen.
3. Ajoneuvosimulointi soveltuu myös ajoajan ja siitä aiheutuvien aikakustannusten määrittämiseen.

## 2 Tehtävä ja vertailun periaate

Vertailu tehtiin ajoneuvoyhdistelmien polttoaineen kulutuksesta sekä mittaamalla että ajoneuvosimulointia käyttäen.

Vertailukelpoisuuden varmistamiseksi pyrittiin valitsemaa ajoneuvot ja väylät niin, että niistä on saatavissa kaikki tarpeelliset tiedot molemmista. Työn kuluessa tosin ilmeni, että alun perin neljästä ajoneuvosta vain kahden ajoneuvon osalta saatiin riittävät tiedot myös ajoneuvosimulointia varten.

Ajovastukset simuloinnissa määritettiin seuraavasti: Vierintävastukset määritettiin käyttäen pääraportin kohdassa 3.3.1 ja 3.3.2 esitettyä yleistä mallia (kts. myös Liitteen 1 kappale 4). Sen mukaan vierintävastus määräytyy yhdistelmän massan, pyörämäärän ja ajonopeuden mukaan. Ilmanvastuksen määrittämisessä käytettiin yhdistelmäkohtaisia  $C_d$ -kertoimen arvoja ja ajoneuvojen otsapinta-aloja sekä ilman tiheysarvona  $1,25 \text{ kg/m}^3$ . Simuloinnissa käytettiin tavoitenopeutta  $80 \text{ km/h}$  ja schwungin eli alamäkikilisen arvona enintään  $10 \text{ km/h}$ .

## 2.1 Polttoaineenkulutuksen määrittämistavat ja niissä tarvittavat kerättävät) tiedot

### *Polttoaineen kulutuksen määrittämistavat*

*Polttoaineen kulutus mittaamalla* on tehty keräämällä ajoneuvon CAN-väylältä 1 Hz:in taajuudella aika, matka, nopeus, polttoainevirtaama ja moottorin pyörimisnopeus. Lisätietoina saatiin satelliittien avulla määritetyt ajoneuvon paikkakoordinaatit.

*Ajoneuvosimulointia* käyttäen on määritetty ajoneuvojen ja väylän teknisten ominaisuuksien perusteella samat tekijät kuin mittaamalla.

## 2.2 Tarvittavat tiedot

Tarvittavat tiedot ilmenevät taulukosta 1.

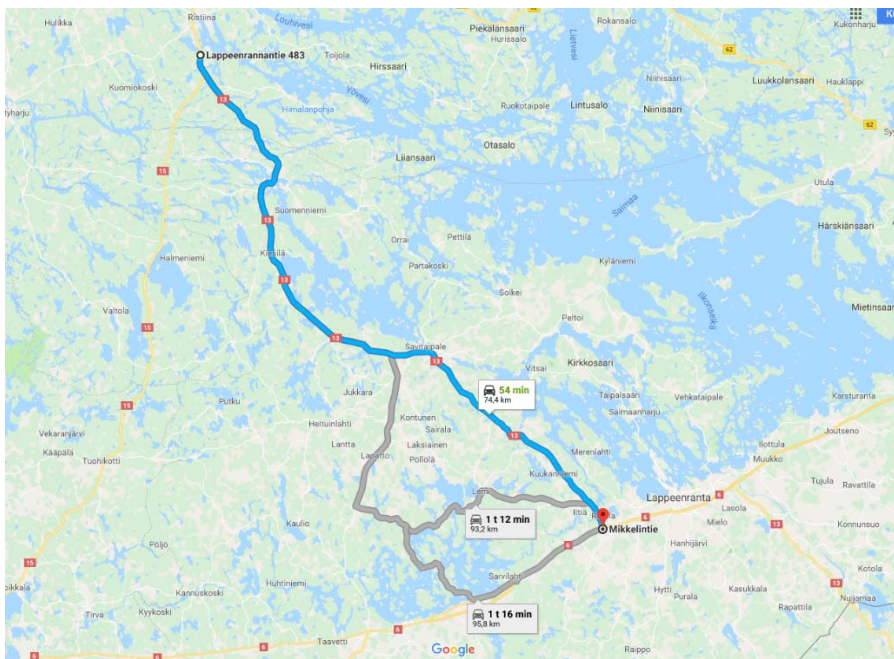
### 2.2.1 Tiedonkeruussa mukana olleet kuljetusyrietykset sekä ajoreitit

Tutkimukseen osallistuneet kuljetusyrietykset ja niiden ajoneuvotyytit sekä ajoreitit:

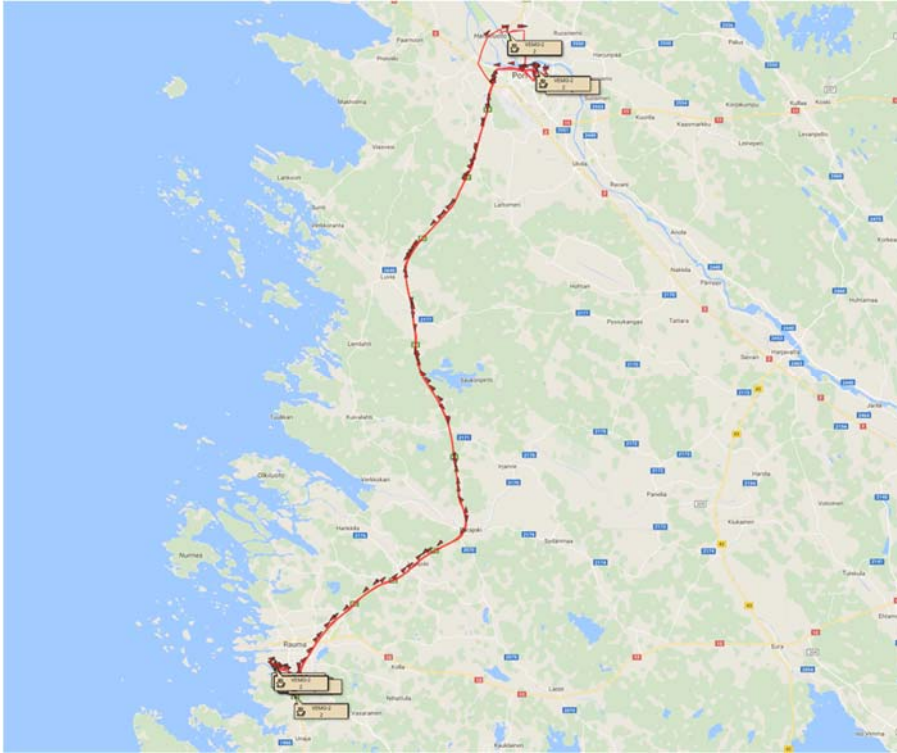
- *Kuljetusliike Wickström Oy*, Ristiina: Normaali- ja HCT-hakeajoneuvo;  
Reitit: Ristiina–Lappeenranta, kuva 1
- *Kuljetusliike Kalevi Huhtala*, Pori: kaksi HCT-hakeajoneuvoa  
Reitti: Rauma–Pori, kuva 2

Tien VT 8:n osalta on käytetty tierekisteritietoja, mutta VT 13:n osalta tie on mitattu, koska tierekisteritiedot korkeuden ja pituuskaltevuuden osalta ovat virheelliset.

Kuvista 1 ja 2 ilmenee reitit, joita käytäviltä ajoneuvoilta tiedot kerättiin.



Kuva 1. *Kuljetusliike Wickström Oy:n ajoneuvojen reitit*



Kuva 2. Kuljetusliike Kalevi Huhtala Oy ajoneuvojen reitit

#### Tiedonkeruulaitteisto ja kerätyt tiedot

Laitteistona käytettiin Paetronics Oy:n laitteistoa, jonka ohjelmiston ko. yritys kehitti tarkoitukseen sopivaksi.

**Taulukossa 1** on esimerkki tiedonkeruusta määrittettäessä polttoaineen kulutus mittauksella ajoneuvon CAN-väylästä.

## 3 Tulokset polttoaineen kulutusvertailusta mittauksista ja ajoneuvosimulointia käyttäen

### 3.1 Reitti Pori -> Rauma

Tulokset ilmenevät kuvasta 3. Simulointi antaa saman kulutuksen kuin mittaus. Simuloinnin antama polttoaineen kumulatiivista kertymää osoittava kuvaaja (eheä punainen viiva) on yhteensopiva mittauksen antaman kertymän kanssa (musta ja keltainen viiva) kanssa.

Kerättyihin tietoihin sisältyi myös ajoja, joissa muu liikenne tai jokin muu seikka aiheuttivat nopeuden muutosta (laskua normaali- eli tavoitenopeudesta ja nousua takaisin tavoitenopeuteen). Käytetty automaattinen tiedonkeruujärjestelmä ei mahdollistanut häiriötietojen keräämistä (määrittämistä) riittävän hyvin, jotta ne voitaisiin syöttää tarpeellisen tarkkoina simulointijärjestelmään. Siksi häiritettyjen ajoneuvojen simulointia ei sisällytetä käsillä olevaan raporttiin.

### 3.2 Reitti Ristiina–Lappeenranta

Tulokset ilmenevät kuvasta 4. Simulointi antaa myös saman kulutuksen kuin mittaus. Simuloinnin antama polttoaineen kumulatiivista kertymää osoittava kuvaaja (eheä punainen viiva) on yhteensopiva kahden mittauksen antamien kumulatiivisten kertymien (musta ja keltainen viiva) kanssa.

Häiriötekijöitä esiintyi samoin kuin reitillä Pori–Rauma, ja tiedonkeruuseen ja simulointiin pätevät samat periaatteet kuten Pori–Rauma-reitillä.

### 3.3 Vuonna 2002 tehty vertailu

Vuonna 2002 tehtiin polttoaineen kulutuksen vertailu mittausta ja simulointia käyttäen. Vertailu tehtiin raakapuuajoneuvolla VT 9:llä välillä Jämsä–Jyväskylä-välillä. Tulokset ilmenevät kuvassa 5. Havaitaan, että mittaus- ja simulointi antavat käytännössä saman tulokset.

Vuonna 2002 tehty polttoaineen vertailuselvitys on perusteiltaan ja tiedoiltaan tarkempi kuin nyt tehty mittaus lähinnä kahden tekijän osalta:

- Nyt käsillä olevassa vv. 2017–2018 selvityksessä tiedonkeruu tapahtui automaattisesti, minkä vuoksi ei voitu määrittää täsmällisesti ajotapaa (tavoitenopeus ja vaihtostrategiaa). Vuoden 2002 mittauksessa ajotapa määritettiin tarkasti ajon aikana.
- Vuonna 2002 tehty vertailu simuloinnin ja mittauksen välillä on tarkempi kuin nykyisissä myös siksi, että siinä moottorikartta on yksityiskohtaisempi kuin nykyisissä.

## 4 Johtopäätökset mittausten ja ajoneuvo-simuloinnin antamista tuloksista

1. Simuloinnilla voidaan polttoaineen kulutusarvot määrittää, kun lähtötiedot sekä ajoneuvosta, väylästä ja myös ajotavasta ovat selvillä.
2. Sama koskee hiilidioksidia, joka on suhteessa polttoaineen määrään.

Tulos on johdonmukainen, koska ajoneuvo ja simulointijärjestelmä toimivat samojen luonnonlakien eli ajoneuvodynamiikan lakien mukaisesti.

## 5 Mahdollisia virheitä määritettäessä polttoaineen kulutus mittaamalla ja ajoneuvosimulointia käyttäen

Kun tehdään polttoaineen kulutuksen vertailu mittaamalla ja simuloimalla, tulee tiedostaa molempiin tapoihin sisältyvät mahdolliset virheet ja niiden vaikutukset tuloksiin.

Kun ajoneuvoa, ajoväylää tai ajotapaa koskevat tiedot tai jotkut niistä mittauksesta ovat epätarkkoja ja erilaisia kuin syöttötiedot ajoneuvosimulointijärjestelmään, syntyy polttoaineen kulutustietoon eroja mittauksen ja simuloinnin kesken. Sama koskee ajonopeutta. Virheitä voi aiheutua useasta syystä. Seuraavassa luetellaan muutamia ja todetaan niiden syitä.

### 5.1 Mahdollisia virheitä ja niiden syitä mitattaessa polttoaineen kulutus CAN-väylältä

Tiedot CAN-väylältä saadut tiedot ovat sähköisiä. Niihin saattaa sisältyä virheitä, joiden suuruus määräytyy CAN-väylän asetusten ja ajoneuvon teknisten ominaisuuksien mukaan. Asetukset ovat ajoneuvokohtaisia.

Polttoainevirtaaman arvo aikayksikössä vaihtelee moottorin pyörimisnopeuden ja kuormituksen mukaan. Mitä suurempia pyörimisnopeus ja kuormitus ovat, sitä suurempi on polttoainevirtaama, ja päinvastoin. Virtaaman suhteellinen virhe on pieni virtaaman ollessa suuri, mutta suuri virtaaman ollessa pieni. Asiasta ei ole saatavilla kuitenkaan riittävää tietoa.

Ajoneuvon nopeuden mittaukseen sisältyvä virhe riippuu paitsi edellä mainituista mahdollisista asetusvirheistä myös matkamittauksen virheestä.

Asetusvirhe nopeuden osalta ilmenee käytännössä siten, että ajoneuvon omalle nopeusmittarille ja CAN-väylältä tiedonkeruulaitteelle saatu nopeusarvo voivat olla erilaisia ja todellista suurempia. Tämä on ilmennyt ajovastusmittausten tietoja analysoitaessa. Eräiden ajoneuvojen tapauksessa kuljettajanäytölle saatu nopeus on ollut noin 5 km/h suurempi kuin CAN-väylältä tiedonkeruulaitteelle saatu nopeus.

Matkamittauksen virhettä selvitettiin vertaamalla CAN-väylän matkatietoja tierekisteritietoihin. Lisäksi laskettiin pituudet satelliittien määrittämien karttakoordinaattien perusteella. Havaittiin, että Ristiina–Lappeenranta-välillä tierekisterin mukaisen ja CAN-väylältä määritetyn matkapituuden ero on noin 5 %. Polttoainevirtaaman mittaustarkkuudesta ei ole tietoa.

### 5.2 Mahdollisia virheitä ja niiden syitä määritettäessä polttoaineenkulutus ajoneuvosimulointia käyttäen

Tarkasteltavat ajoneuvoyhdistelmät ja väylät pyrittiin valitsemaan niin, että ajoneuvoista ja väylistä olisi ollut käytettävissä riittävän tarkat tiedot.

Mittauksissa olevien kahden ajoneuvon moottorikartoista oli saatavilla tiedot tai ne voitiin määrittää riittävän hyvin saatavilla olevien moottoreiden ominaisuuksien perusteella.

Ajoneuvojen massatiedot saatiin tarkkoina vaaituksista. Kuljetusyrittäjiä pyydettiin varmistamaan rengaspaineet rengasvalmistajien suositusten mukaisiksi. Tietiedot otettiin tierekisteristä (DIGIROAD-tiedostoon ei sisälly väylien pituuskaltevuuksien määrittämiseen tarvittavia tietoja. Keliolot mittauksissa olivat normaalit muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta, jolloin mittausten aikana oli loskaa tiellä ja tuuli vaihteli.

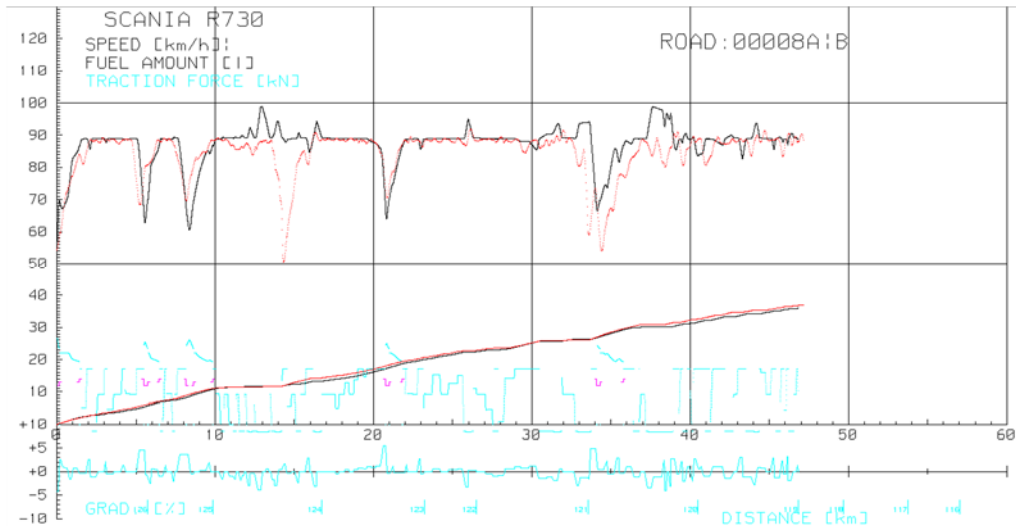
Yleisesti ottaen ajoneuvosimuloinnin antamien tulosten mahdolliset erot mitattuihin aiheutuvat epätarkoista tai puutteellisista lähtötiedoista. Niitä voi sisältyä sekä ajoneuvo-, väylä- ja ajotapatietoihin.

Ajoneuvotietojen virheitä voivat olla muun muassa epätarkat moottoritiedot, voimalinjatiedot, vastustiedot sekä massatiedot.

Tietiedoista pystygeometriatieto on tärkeä kaikkien ajoneuvojen, mutta erityisen tärkeä raskaiden ajoneuvojen tapauksessa. Pystygeometriatiedon epätarkkuus tai virheellisyys vaikuttaa raskaiden ajoneuvojen polttoaineen kulutukseen ja sen seurauksena päästömääriin, ja myös ajoaikaan sekä täten ajokustannuksiin.

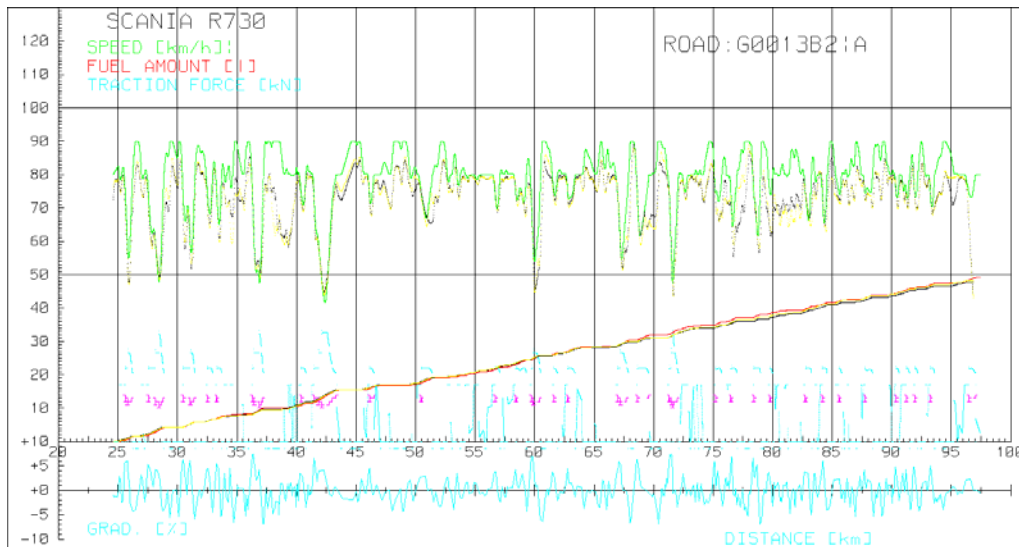
Erilaisilla ajotavoilla (rauhallinen vs. aggressiivinen ajo) voi olla suuri vaikutus varsinkin polttoaineen kulutukseen. Myös liikenteenohjaustiedoilla (nopeusrajoitukset sekä liittymien liikennevalo-ohjaus) on vaikutusta sekä polttoaineen kulutukseen, päästömääriin ja ajoaikaan.

Käsillä olevassa selvityksessä toimeksiantoon ei kuulunut eri tekijöiden mahdollisten virheiden vaikutusten selvittäminen.



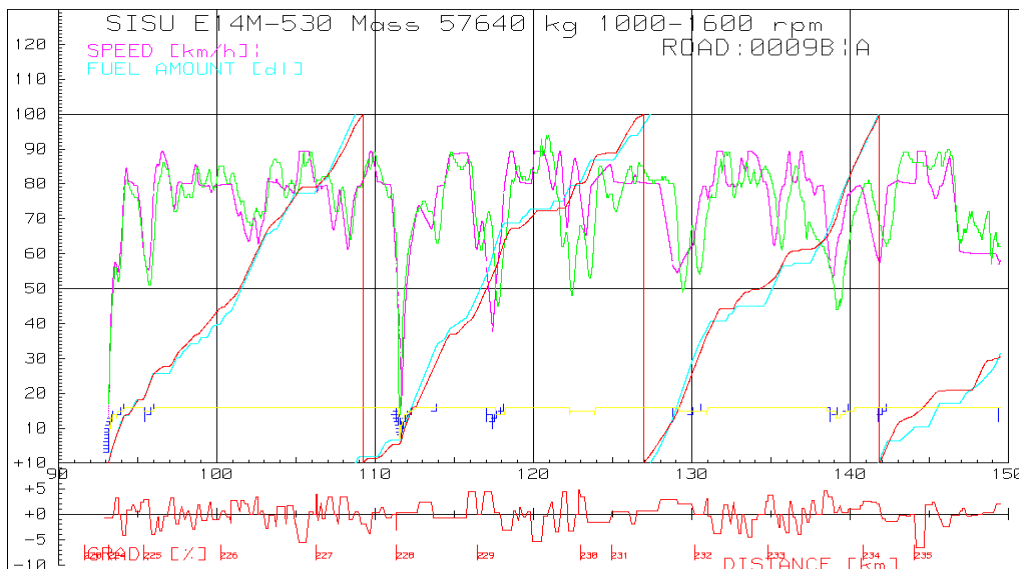
Kuva 3. Kuormatun HCT-ajoneuvon polttoaineen kulutus kumulatiivisena mittauksen (punainen viiva) ja ajoneuvosimuloinnin (musta viiva) mukaan sekä hetkellinen ajonopeus reitillä Pori → Rauma.

- Selitys:
- 1) Polttoaineen kumulatiivista kertymää osoittavat käyrät (simulointi punaisella viivalla ja mittaus musta viiva) yhtyvät; ts. polttoaineen kulutus on sama mittauksen ja simuloinnin mukaan.
  - 2) Ajoneuvojen nopeus (simulointi musta viiva ja mittaus punainen viiva) on käytännössä sama mittauksen ja simuloinnin mukaan, mutta mittauksen aikana on ollut nopeutta laskeva häiriö kohdassa 14. 5–15.0 km. Lisäksi kohdassa noin 34 km vastamässä ajonopeus on laskenut hiukan alemmaksi kuin simuloinnin antama nopeus. Muut ”nopeuskuopat” ovat vastamäkien aiheuttamia.
  - 3) Alin viiva (magenta) osoittaa tien pituuskaltevuutta, kuten myös jäljempänä kuvissa 4 ja 5 sekä 6. Alimman eli pituuskaltevuusviivan yläpuolella oleva viiva osoittaa vetovoimaa.



Kuva 4. Kuormatun HCT-ajoneuvon polttoaineen kulutus kumulatiivisena mittauksen (punainen viiva) ja ajoneuvosimuloinnin (musta viiva) mukaan sekä hetkellinen ajonopeus VT13.

- Selitys:
- 1) Polttoaineen kumulatiivista kertymää osoittavat käyrät yhtyvät; ts. polttoaineen kulutus on sama mittauksen ja simuloinnin mukaan
  - 2) Ajoneuvojen nopeus (vihreä viiva on simulointi ja musta viiva mittaus) on käytännössä sama mittauksen ja simuloinnin mukaan paaluvälillä 25–78, mutta sen jälkeen loppumatkalla mittauksen aikana nopeus on - ilmeisesti ajotavasta aiheutuen - simulointia alempi eli 60–80 km/h. Toisin sanoen kuljettaja ei ole säilyttänyt tavoitenopeutta 80 km/h. Muut ”nopeuskuopat” ovat vastamäkien aiheuttamia



Kuva 5. Puutavara-ajoneuvon polttoaineen kulutus mittausta ja ajoneuvosimulointia käyttäen välillä Jämsä–Jyväskylä v. 2002 tehdyssä vertailussa

- Selitys:
- Kumulatiivinen polttoainekertymä on osoitettu simuloinnissa punaisella viivalla ja mittauksessa magenta-viivalla.  
Ajonopeus simuloinnissa on esitetty vihreällä viivalla ja mittauksessa punaisella viivalla.  
Alin punainen viiva esittää tien pituuskaltevuutta.

**Taulukko 1. Esimerkki tiedonkeruusta määritettäessä polttoaineen kulutus mittauksella ajoneuvon CAN-väylästä**

<b>Row</b>	<b>Time</b>	<b>Distance/s [m]</b>	<b>Distance [m]</b>	<b>Fuel/s [ml]</b>	<b>RPM</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>
	2018-01-05						
1	04:16:41	0.000	0.000	0.797	494	61.470815	27.256262
2	04:16:41	0.000	0.000	0.818	497	61.470815	27.256262
3	04:16:42	0.000	0.000	0.875	500	61.470815	27.256262
4	04:16:43	0.000	0.000	0.885	502	61.470815	27.256262
.							
.							
215	04:20:14	0.016	0.016	1.268	504	61.470802	27.256217
216	04:20:15	0.064	0.080	1.289	517	61.470802	27.256217
217	04:20:16	0.112	0.192	1.988	486	61.470802	27.256217
.							
.							
1827	04:47:06	22.640	29270.896	0.422	495	61.267645	27.414463
1828	04:47:07	22.528	29293.424	0.449	499	61.267465	27.414633
1829	04:47:08	22.416	29315.840	1.001	1422	61.267290	27.414797
1830	04:47:09	22.304	29338.144	3.712	1415	61.267117	27.414958



# Ajovastusmittauksissa käytettyjen yhdistelmien massamittapiirroukset

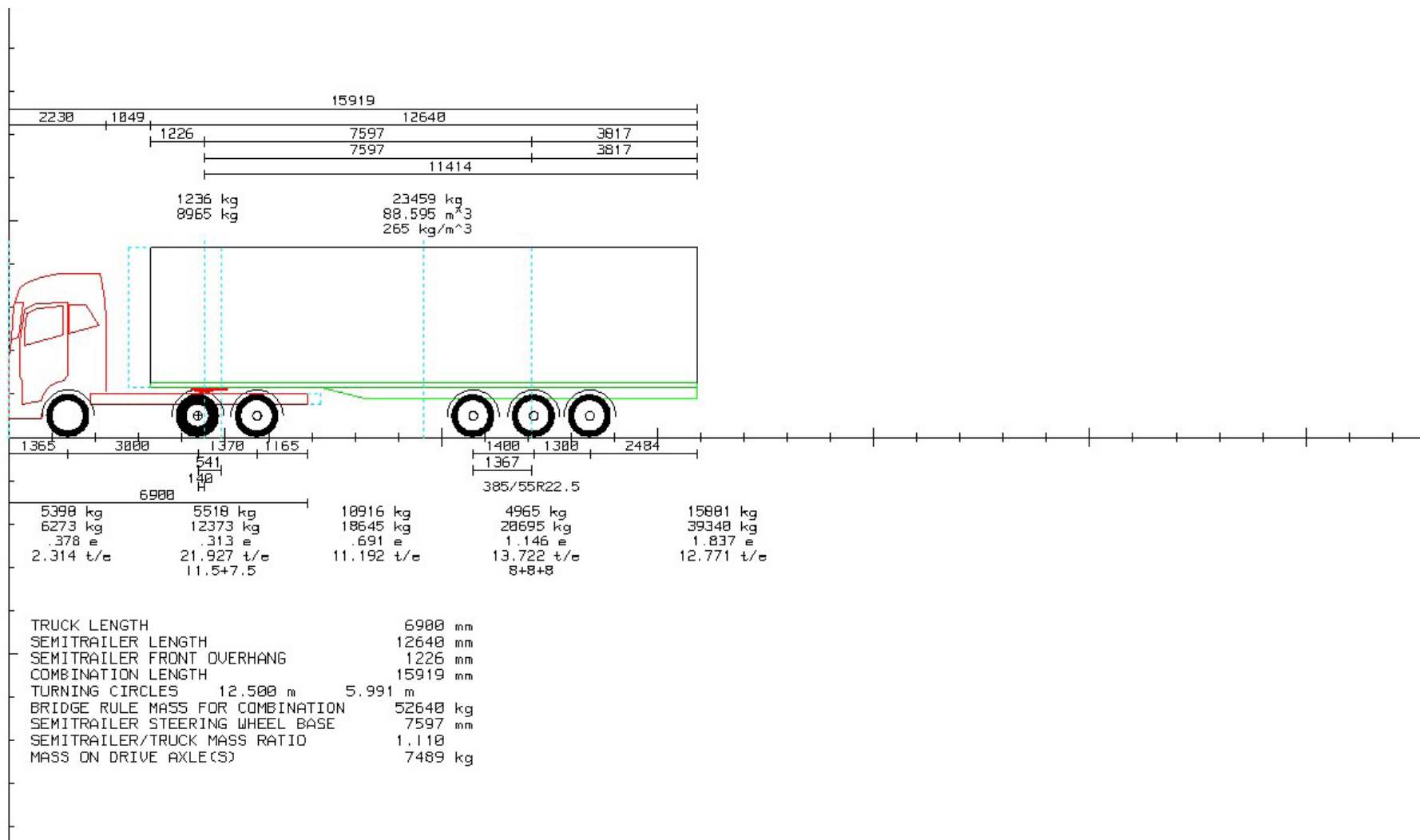
Olavi H. Koskinen

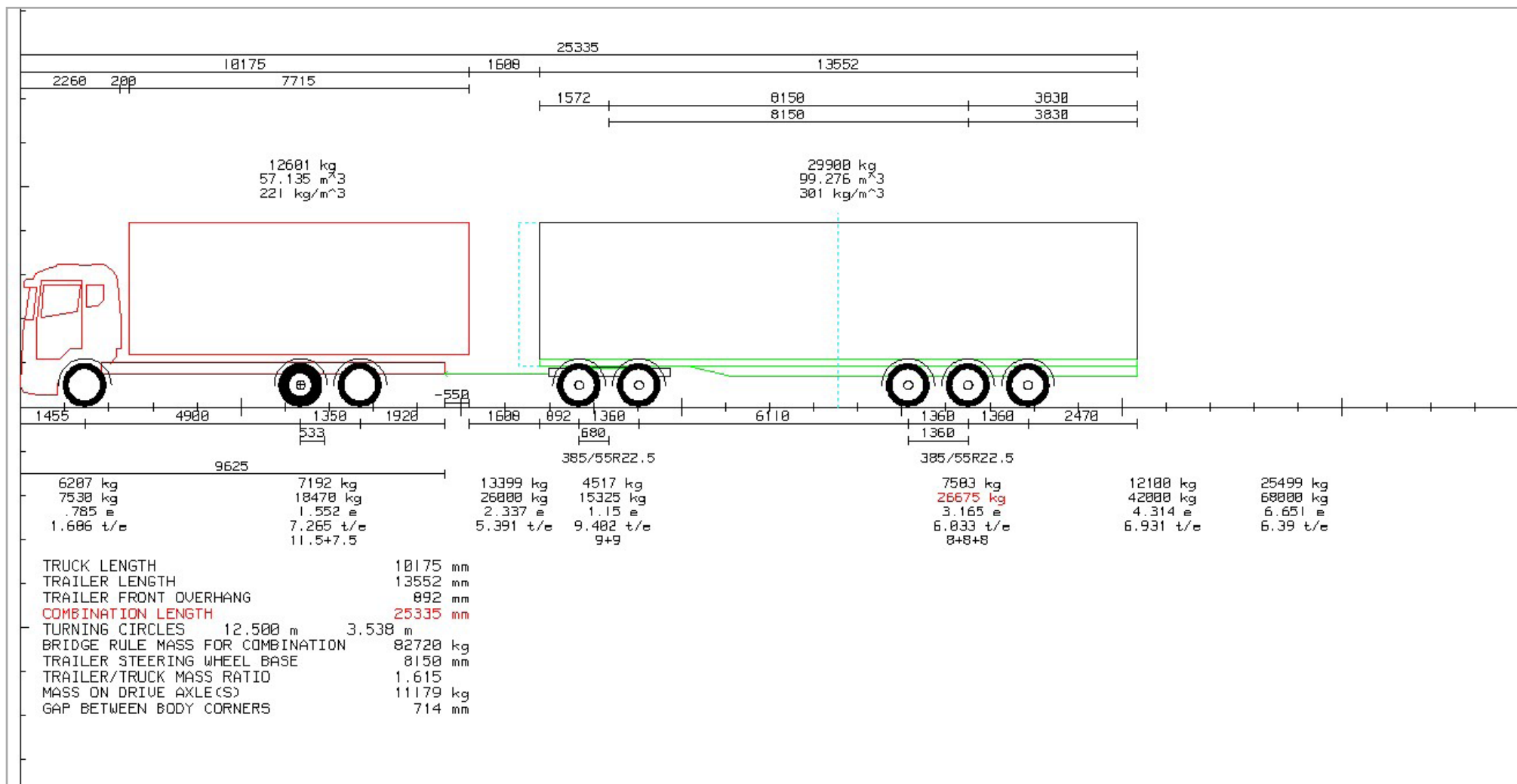
Oheisessa taulukossa 1 on yhteenveto ajovastusmittauksissa käytettyjen yhdistelmien ominaisuuksista.

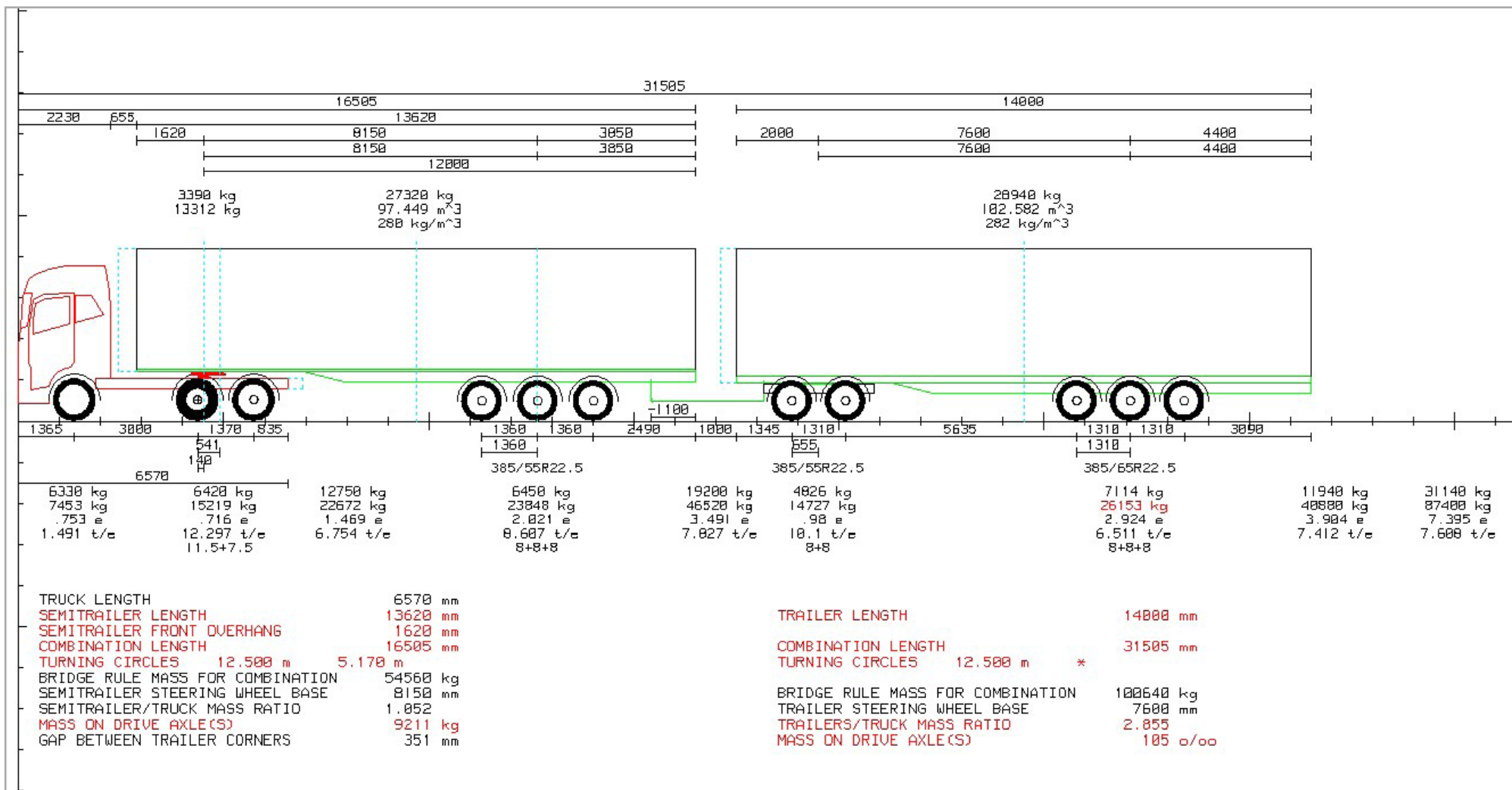
Kuvien numerot ovat samat kuin tutkimuksessa käytettyjen yhdistelmien numerot (Fig 1:ssä on ajoneuvo 1, Fig 2 ajoneuvo 2, jne.)

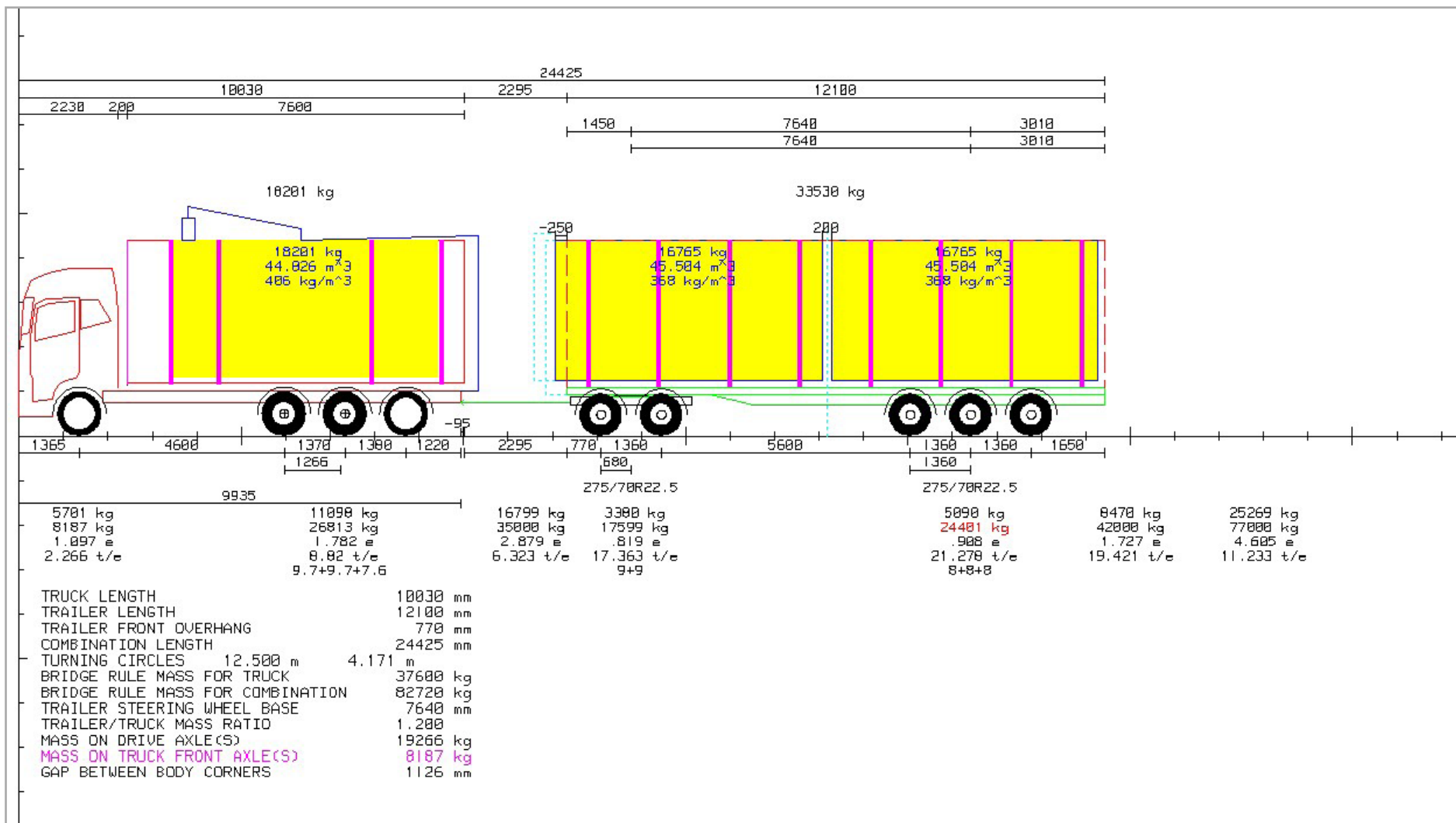
Taulukko 1 Yhteenveto ajovastusmittauksissa käytettyjen ajoneuvojen ominaisuuksista

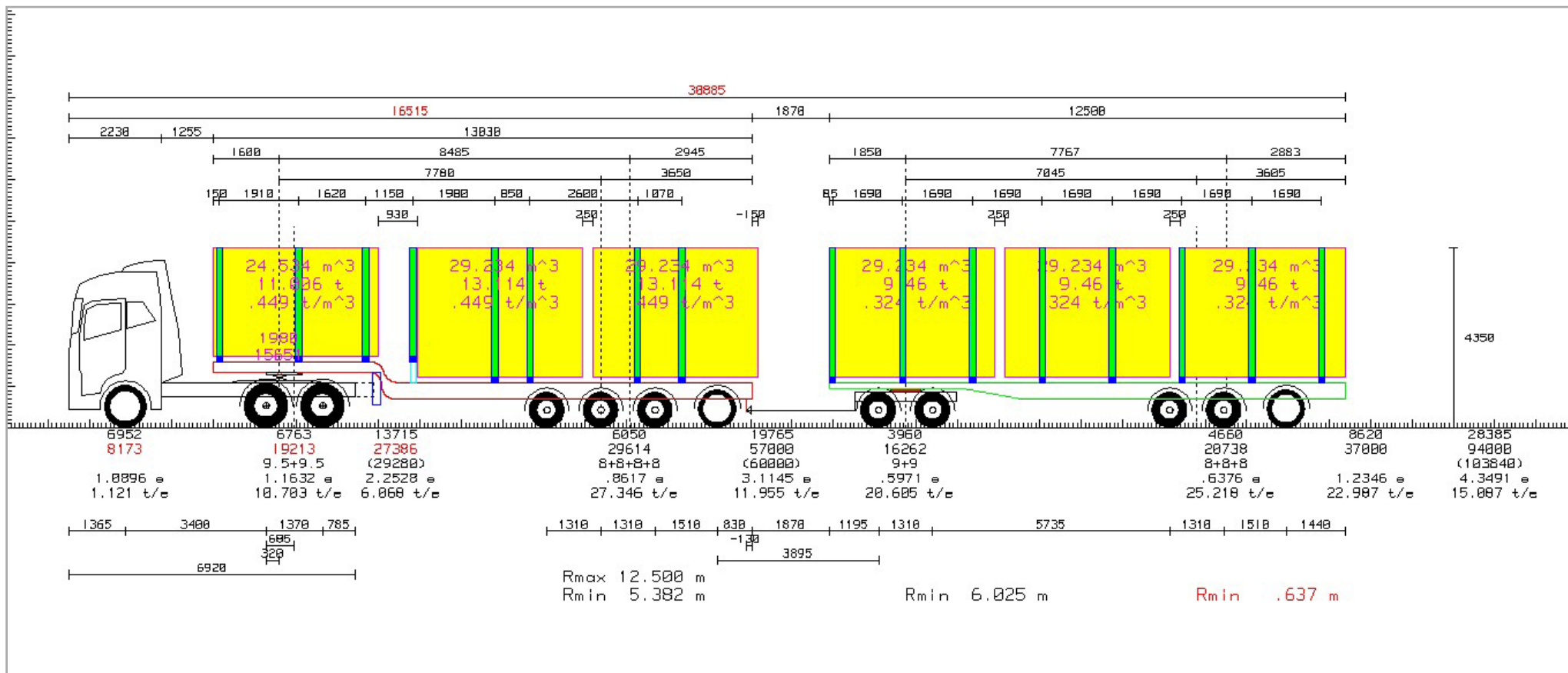
Ajoneuvon numero	Kuljetusyritys	Ajoneuvotyyppi	Aksetiluku [kpl]	Yksittäispyörä- akseleita [kpl]	Pyörämäärä [kpl]	Massa [t]	Ajoneuvon akseliekvi- valenttiluku [e]	Hyötykuorma ekvivalentti- akselia kohden [t/e]
1	MEK Oy	KAPP	6	5	14	39.3	1.837	13.25
2	KOA	KAVP	8	7	18	68.0	6.651	6.39
3	KOA	HCT	11	10	24	87.4	7.395	7.60
4	Orpe Kulje- tus Oy	KAVP	9	2	32	77.0	4.605	11.12
5	Orpe Kulje- tus Oy	HCT	12	3	42	94.0	4.349	15.09
6	Speed Oy	HCT perävaunut paripyörin	11	1	42	82.7	2.87	19.76
7	Speed Oy	HCT perävaunut yksittäis- pyörin	11	9	26	81.3	5.542	10.28

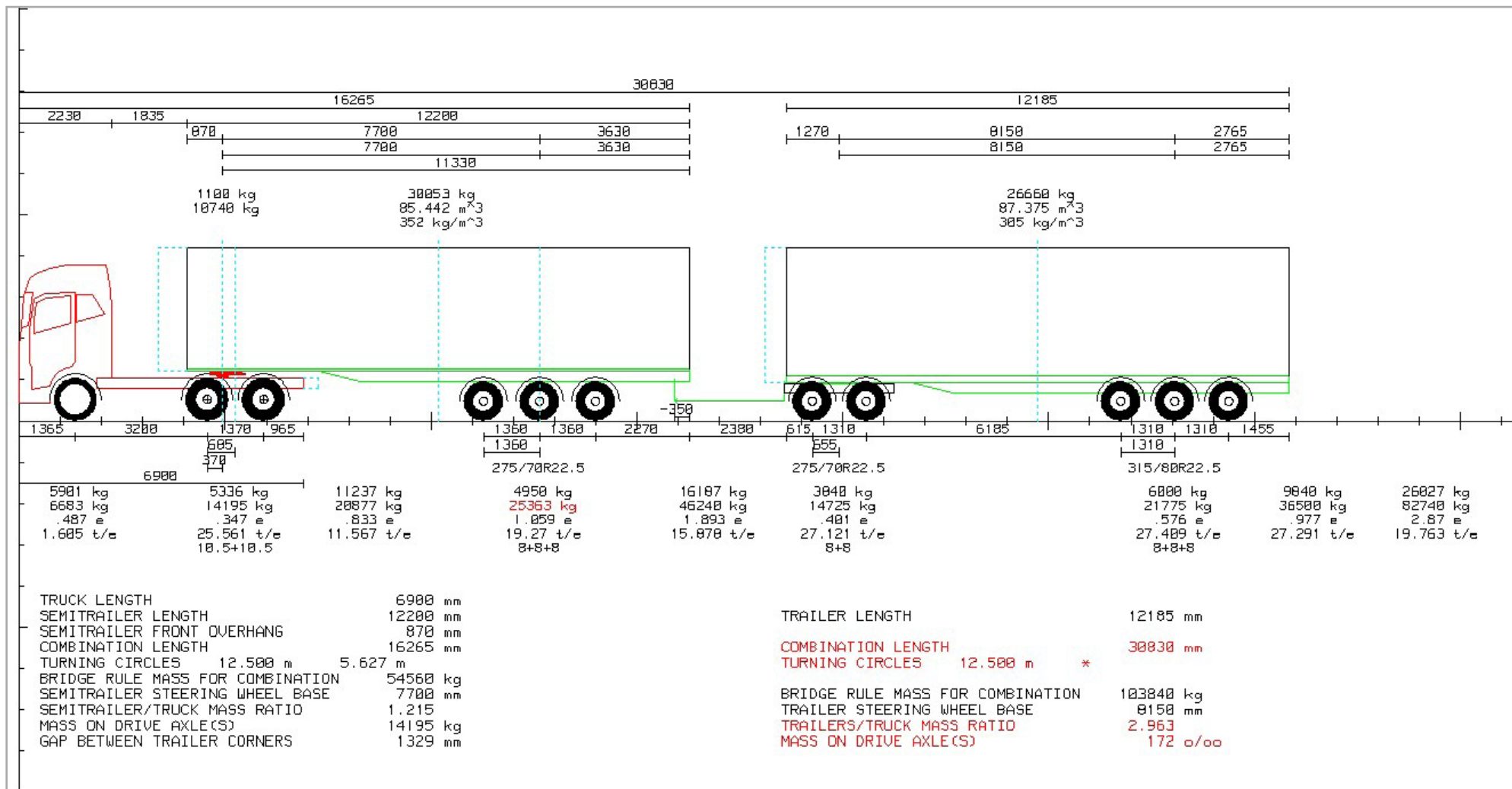


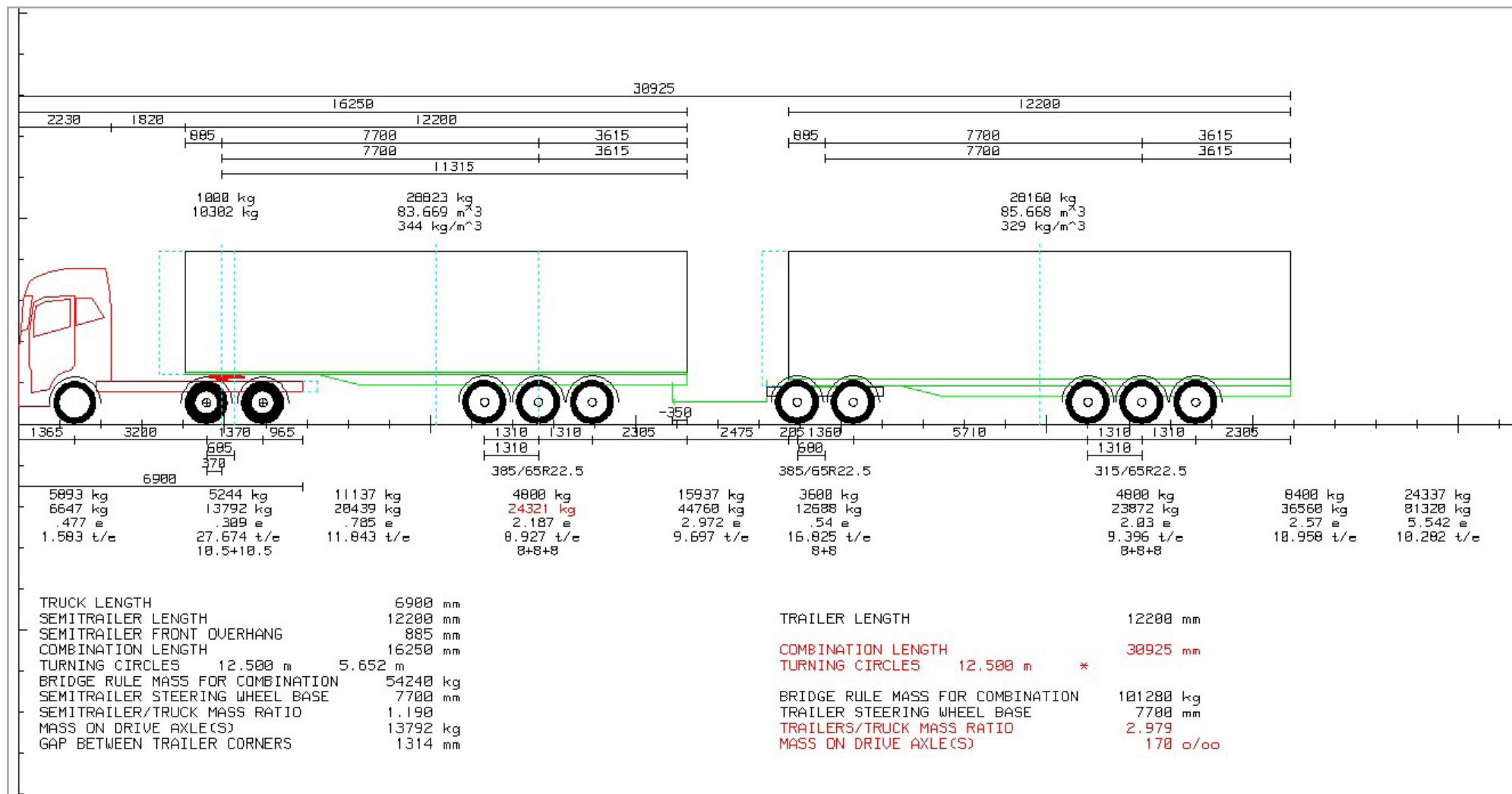














# Ajonopeuden vaikutus yhdistelmien muotokertoimen ( $C_d$ ) arvoihin

Jussi Sauna-aho ja Olavi H. Koskinen, 17.5.2018

## 1. Nopeusmittaukset

Syksyllä 2017 tehtiin lisämittauksia nopeuden vaikutuksesta yhdistelmien muotokertoimien ( $C_d$ ) määrittämiseksi Hamina-Vaalimaa-moottoritiellä, jota ei ollut vielä avattu liikenteelle. Tämä mahdollisti ajonopeuden, joka oli yli 80 km/h. Vierinnän alkunopeudet olivat välillä 120 – 80 km/h porrastuksella 10 km/h. Tiellä on mittauksiin sopiva matka, jonka pituuskaltevuus on vakio 4 o/oo ja pituus 3 100 m, mikä mahdollistaa pysähtymisen tai lähes pysähtymisen yhdellä ajokerralla.

Coast down-mittaukset tehtiin neljällä yhdistelmällä, joiden tekniset tiedot ilmenevät taulukosta 1. Mittaukset tehtiin useita vierinnän aloitusnopeuksia käyttäen vastamäkeen. Näin saatiin nopeustiedosto suuresta nopeudesta 0-nopeuteen eli pysähdykseen asti. Mittausten määrä oli 7 – 10 mittausta kutakin yhdistelmää ja sen kuormausvaihtoehtoa kohden. Mittausmäärät ilmenevät taulukosta 1 ja sääolot taulukosta 2.

*Taulukko 1. Ajovastusmittauksissa käytetyt yhdistelmät ja niiden kuormausvaihtoehdot Hamina-Vaalimaa-moottoritiellä*

Nro	Ajn- tyyppi	Pyörä- määrä	Massat		Ajosuunta ylämäkeen	
			kuormausvaihtoehdoittain		Kuormaa- maton	Kuormattu
			Kuormaa- maton [kg]	Kuormattu [kg]	Kuormaa- maton	Kuormattu
1	Puutavarayhdis- telmä 1	32	27020	78020	7	7
2	Puutavarayhdis- telmä 2	42	28000	95320	8	8
3	Hakeyhdistelmä 1	20	23900	66400	8	7
4	Hakeyhdistelmä 2	30	25220	70400	10	8

Taulukko 2. Ajoavastusmittauksissa vallinneet lämpötilat ja ilmanpaineet Hamina-Vaalimaa-moottoritiellä

Ajn	Mittausajankohta		Lämpötila	Ilmapaine	Muuta
	Päivä	Klo			
Puutavara-yhdistelmä 1	30.10.2017	12 – 17	+ 0.7 C°	993.40 hPa	Sää tyyni ja pouta
Puutavara-yhdistelmä 2	30.10.2017	19 – 21	+ 0.7 C°	993.40 hPa	Sää tyyni ja pouta
Hakeyhdistelmä 1	9.11.2017	11 – 14	+ 5.0 C°	1016.06 hPa	Sää tyyni ja tihkusade
Hakeyhdistelmä 2	9.11.2017	18 – 21	+ 6.0 C°	1009.57 hPa	Sää tyyni ja tihkusade

## 2. Mittausten analysointi ja tulokset

Selvityksen tarkoituksena oli määrittää ilmanvastukseen vaikuttavan muotokertoimen mahdollinen riippuvuus nopeudesta. Analysoitaessa voitiin käyttää hyväksi jo aiemmin määritettyjä vierintävastuskertoimia (kts. Liite 1 ja Liite 2), joten sovitettaessa funktiota mittaustuloksiin oli tarpeen kiinnittää huomiota vain muotokertoimeen.

Tulokset (kuvat 1 – 4 ja 5 -8) osoittavat, että hakeyhdistelmiin voidaan soveltaa yhtä vakio- $C_d$ -arvoa koko nopeusalueelle (kuvat 5 – 8), mutta puutavarayhdistelmien ilmanvastusta kuvaa vähintään kahden nopeusalueen mukaan määräytyvät  $C_d$ -arvot. Pienimmän neliösumman menetelmällä on optimoitu rajakohdat, jotka on osoitettu kuvissa 1 - 4 +-symbolilla.

Ylänopeusalue on merkityksellinen, koska se kattaa normaalin ajoalueen. Alanopeusalueella ei ole oleellista merkitystä, mutta se osoittaa kuitenkin selkeästi sen, että  $C_d$ -arvo ei ole vakio nopeuden suhteen.

### Nopeuden vaikutus

Tulokset kuvaajina ilmenevät kuormaamattomille ja kuormatuille raakapuu-yhdistelmille kuvista 1 - 4 ja hakeyhdistelmille kuvista 5 - 8. Kuvista ilmenevät suurten ja pienten nopeusalueiden  $C_d$ -arvot ja kunkin mittauksen rajanopeus merkittynä nopeus-aikakäyrään +-symbolilla.

Kuvista 1 – 4 havaitaan, että raakapuu-yhdistelmän  $C_d$ -arvo ei ole vakio, vaan riippuu nopeudesta. Hakeyhdistelmillä nopeudella ei näytä olevan juuri vaikutusta  $C_d$ -arvoihin, kuvat 5 - 8.

Taulukossa 3 on yhteenveto tuloksista määritettynä siten, että  $C_d$ -arvojen keskiarvot on laskettu vierinnän ylemmältä nopeusalueelta. Yhdistelmien normaali nopeusalue maantiejossa asettuu tarkastelun ylemmälle nopeusalueelle. Alempi nopeusalue tulee kysymykseen yhdistelmillä harvoin. Siksi sitä tarkastellaan vain yleispiirteisesti kuvien yhteydessä.

Taulukko 3. Yhteenveto raakapuu- ja hakeyhdistelmien  $C_d$ -arvoista Hamina-Vaalimaa-tiellä tehtyjen mittausten mukaan ylempällä nopeusalueella

Yhdistelmä		$C_d$ -arvot			
Ajoneuvo	Kuormaus	Keskiarvo	Normaali-poikkeama	Minimi	Maksimi
Puutavarayhdistelmä 1	kuormaamaton	1.47	0.0715	1.35	1.58
	kuormattu	1.40	0.0842	1.30	1.54
Puutavarayhdistelmä 2	kuormaamaton	1.32	0.0518	1.23	1.39
	kuormattu	1.49	0.1340	1.32	1.73
Hakeyhdistelmä 1	kuormaamaton	0.83	0.0453	0.76	0.90
	kuormattu	0.79	0.0693	0.70	0.93
Hakeyhdistelmä 2	kuormaamaton	0.93	0.0728	0.85	1.07
	kuormattu	0.87	0.0532	0.81	0.97

Taulukosta 3 havaitaan johtopäätöksiä:

- $C_d$ -arvot vaihtelevat tietyissä rajoissa sekä puutavara- että hakeyhdistelmillä, mutta hakeyhdistelmien  $C_d$ -arvot ovat oleellisesti pienempiä kuin puutavarayhdistelmien  $C_d$ -arvot. Tämä johtuu kuormatilarakenteesta.

Lisäseikkana tuulen vaikutuksesta todetaan seuraavaa:

Tuulen voimakkuudella (nopeudella) ja suunnalla on vaikutusta kuorma-auton ilmanvastukseen. Jos kuorma-auton maanopeus on 80 km/h ja kulkusuuntaa vastaan kohtisuoran tuulen nopeus olisi 4 m/s (noin 15 km/h) ja  $C_d$ -arvo ei muutu, voidaan vastatuulen aiheuttama ilmanvastuslisä määrittää esimerkiksi seuraavasti, kun  $C_d = 0.8$ , otsapinta-ala = 10 m<sup>2</sup> ja ilman tiheys = 1,25 kg/m<sup>3</sup>.

Vastusvoima ilman tuulta =  $0.5 \times 1,25 \times 0,8 \times 10 \times 22,22^2 = 2469$  N.

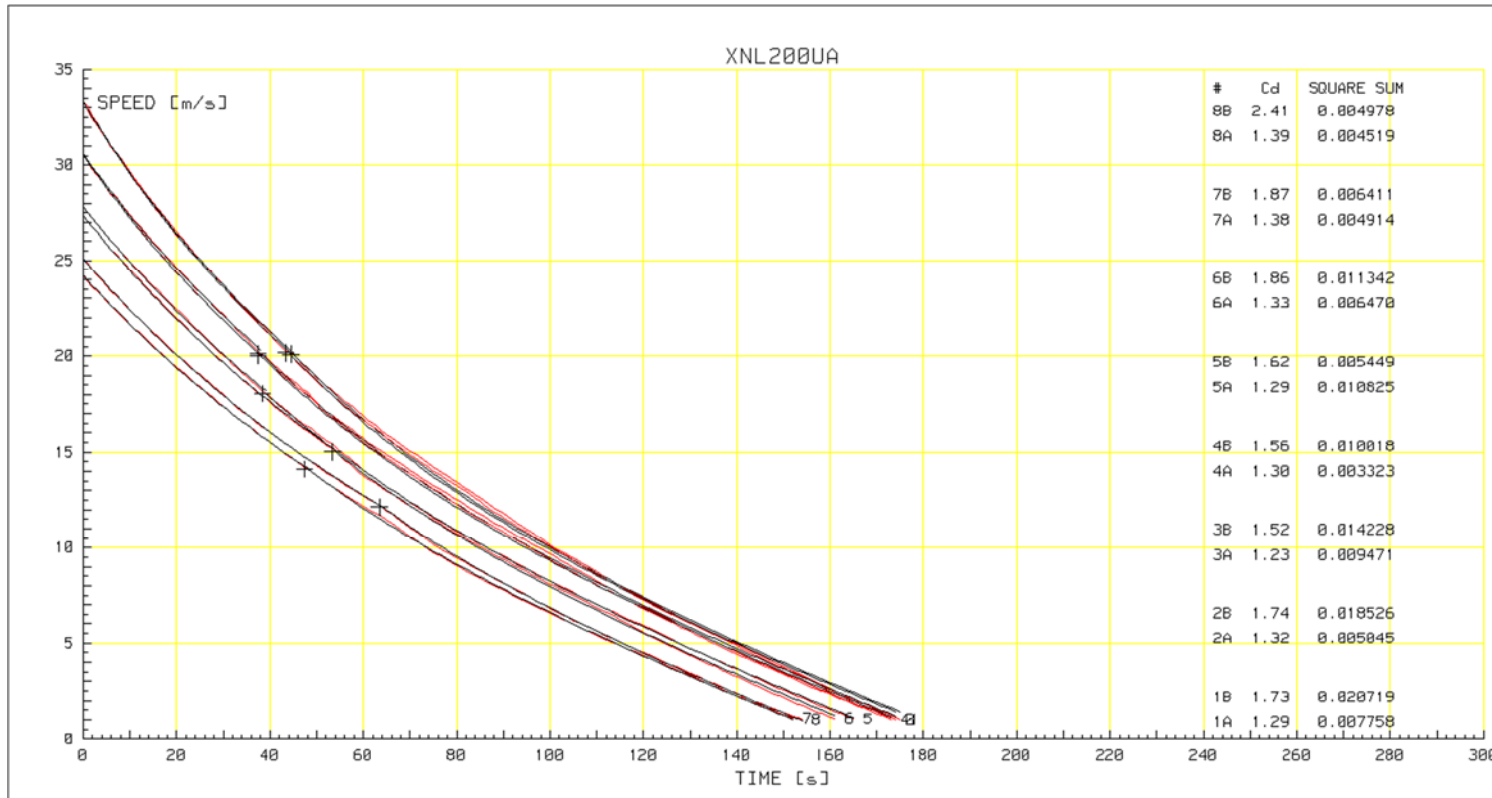
Vastusvoima, kun vastatuuli otetaan huomioon =  $0.5 \times 1,25 \times 0,8 \times 10 \times (22,22+4)^2 = 3438$  N.

Vastusvoiman lisäys on 969 N.

Vastatuulen aiheuttaman ilmanvastusvoiman lisäys (969 N) vastaa tehona 21,5 kW:n lisäystä (on noin 4 % HCT-yhdistelmien maksitehosta).

Kuten kaikkien vastusten myös ilmanvastuksen pienentäminen vaikuttaa omalta osaltaan

- energiankäytön vähenemiseen ja sen seurauksena CO<sub>2</sub>-päästöjen vähenemiseen.

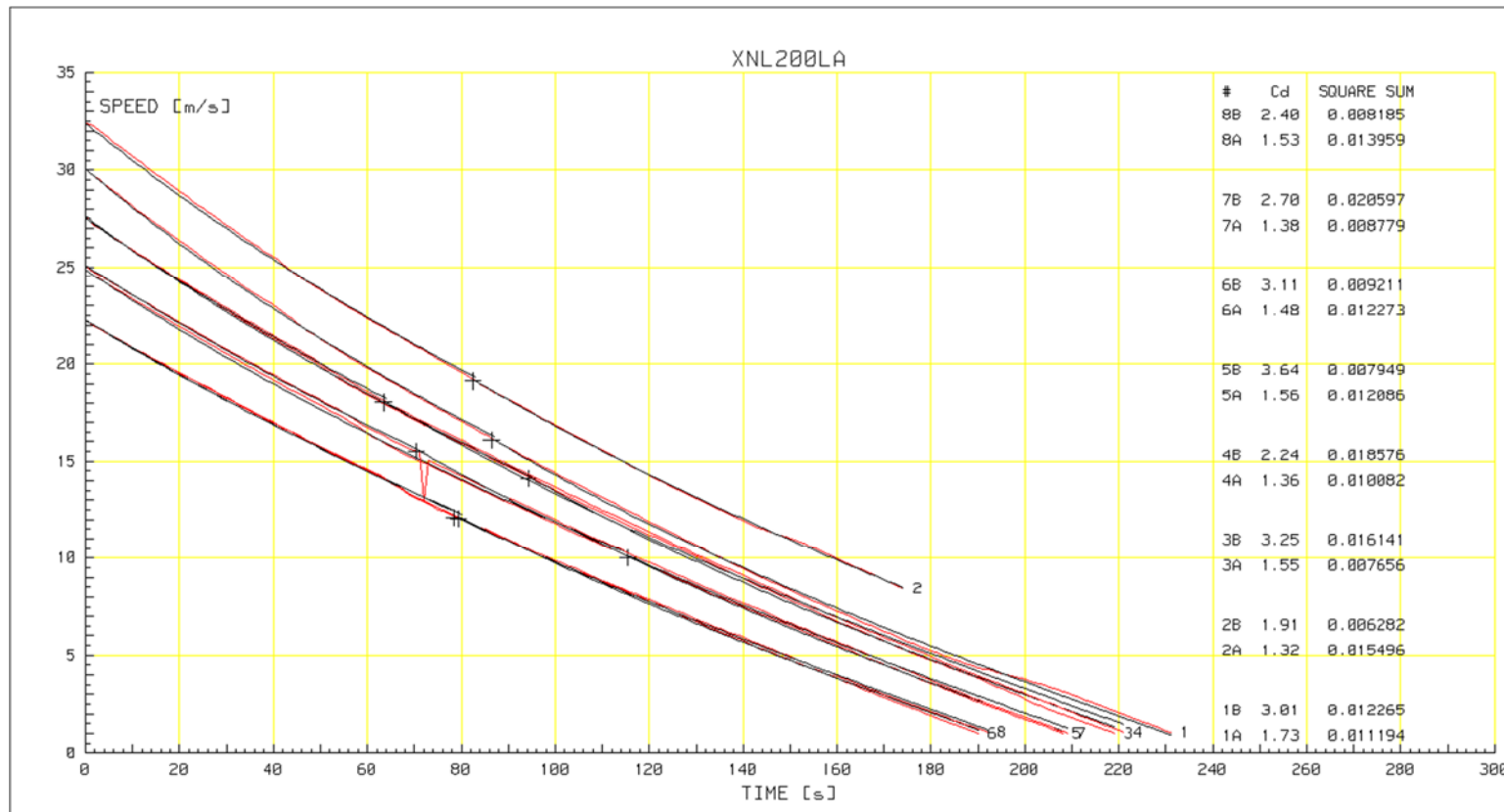


Kuva 1. Kuormaamattoman raakapuu-HCT-yhdistelmän muotokertoimen  $C_d$ -arvon riippuvuus nopeudesta mittausajoittain

Selitys: Mittausten avulla määritetyt käyrät punaisella ja mallinnuksen avulla saadut käyrät mustalla mittausajoittain ja rajanopeus plus-symbolilla +.

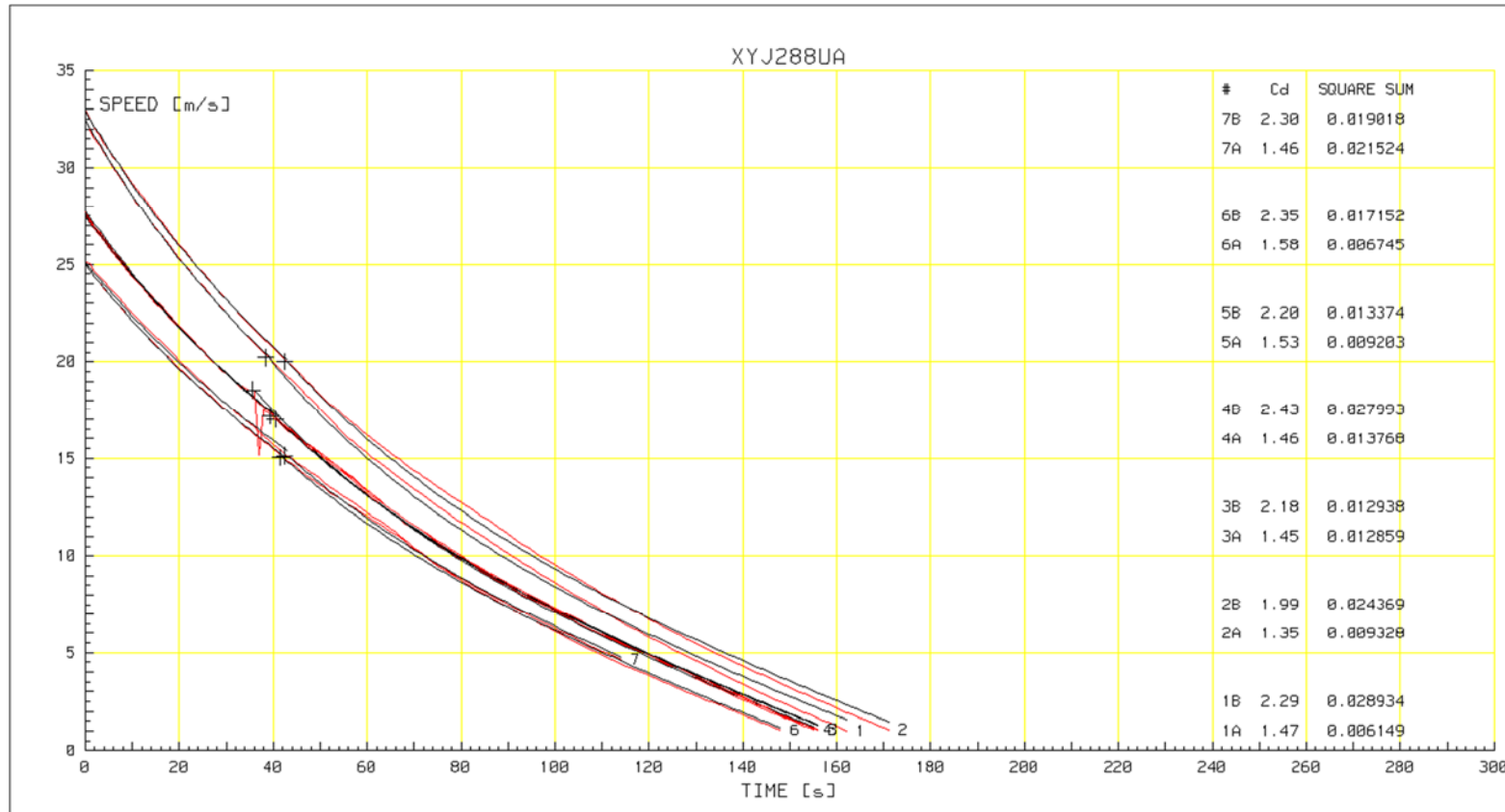
Käyrä-parien yhteensopivuus ilmenee niiden päällekkäisyydestä ja oikeassa reunassa esitetystä neliösumma (square sum)-arvoista. Kun musta ja punainen käyrä ovat päällekkäisiä, on neliösumma pieni ja yhteensopivuus hyvä.

Kuvan oikeassa reunassa sarakkeen ensimmäinen numero osoittaa mittausajon numeroa. Mittausajon  $C_d$ -arvoista A on suuren nopeusalueen  $C_d$ -arvo ja B pienen nopeusalueen arvo. Havaitaan, että raakapuu-yhdistelmillä  $C_d$ -arvo on pieni (1,23 – 1,39) suurella nopeusalueella, mutta kasvaa (1,52 – 2,41) siirryttäessä alemmalle nopeusalueelle.



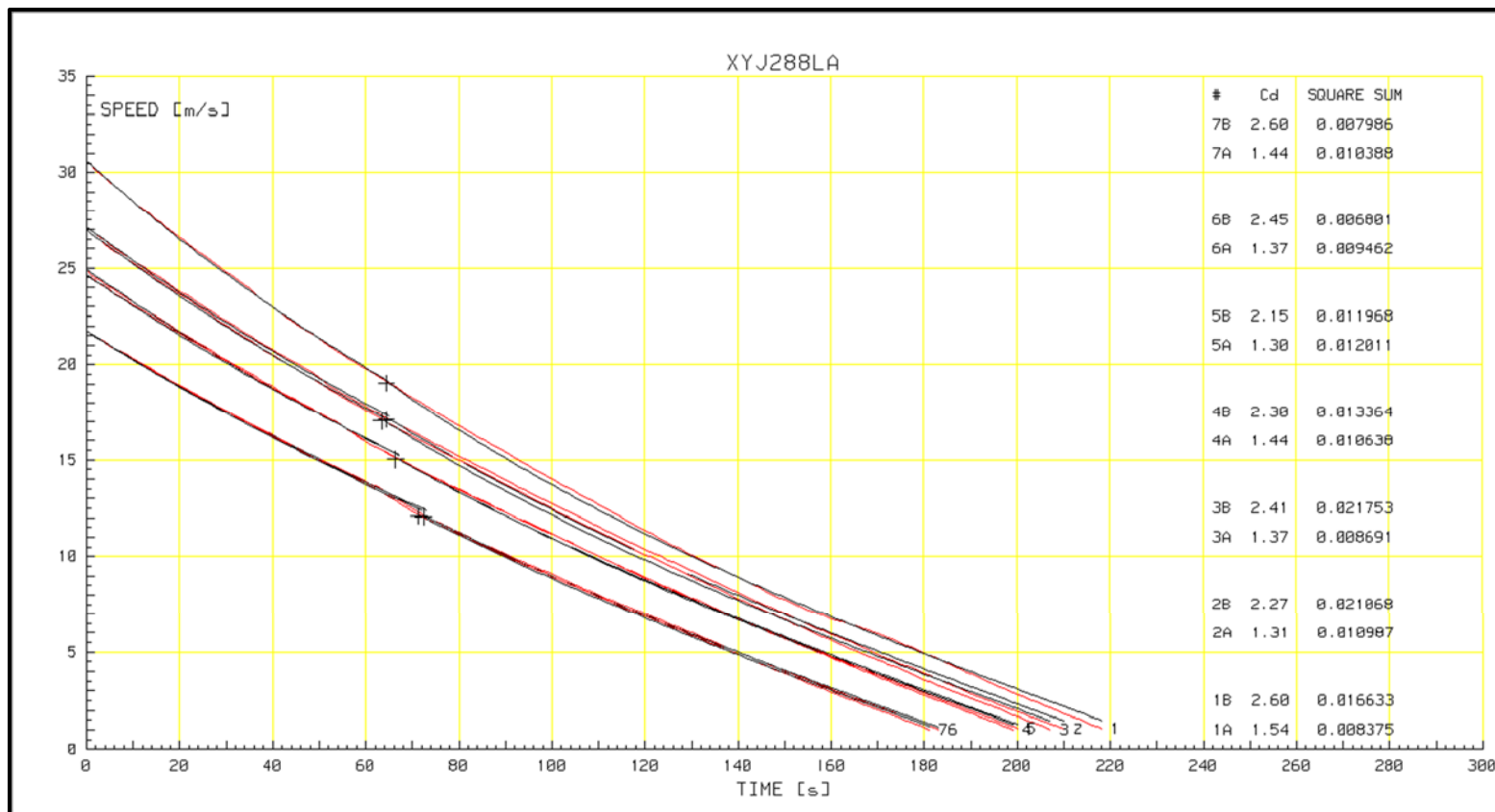
Kuva 2. Kuormatun HCT-raakapuu yhdistelmän muotokertoimen  $C_d$ -arvon riippuvuus nopeudesta mittausajoittain

Selitys: Kts. myös kuvan 1 selitys: Havaitaan, että HCT-raakapuu yhdistelmän  $C_d$ -arvo on pieni (1.32 – 1.73) suurella nopeudella, mutta kasvaa (1.91 – 3.64) siirryttäessä alemmalle nopeustasolle



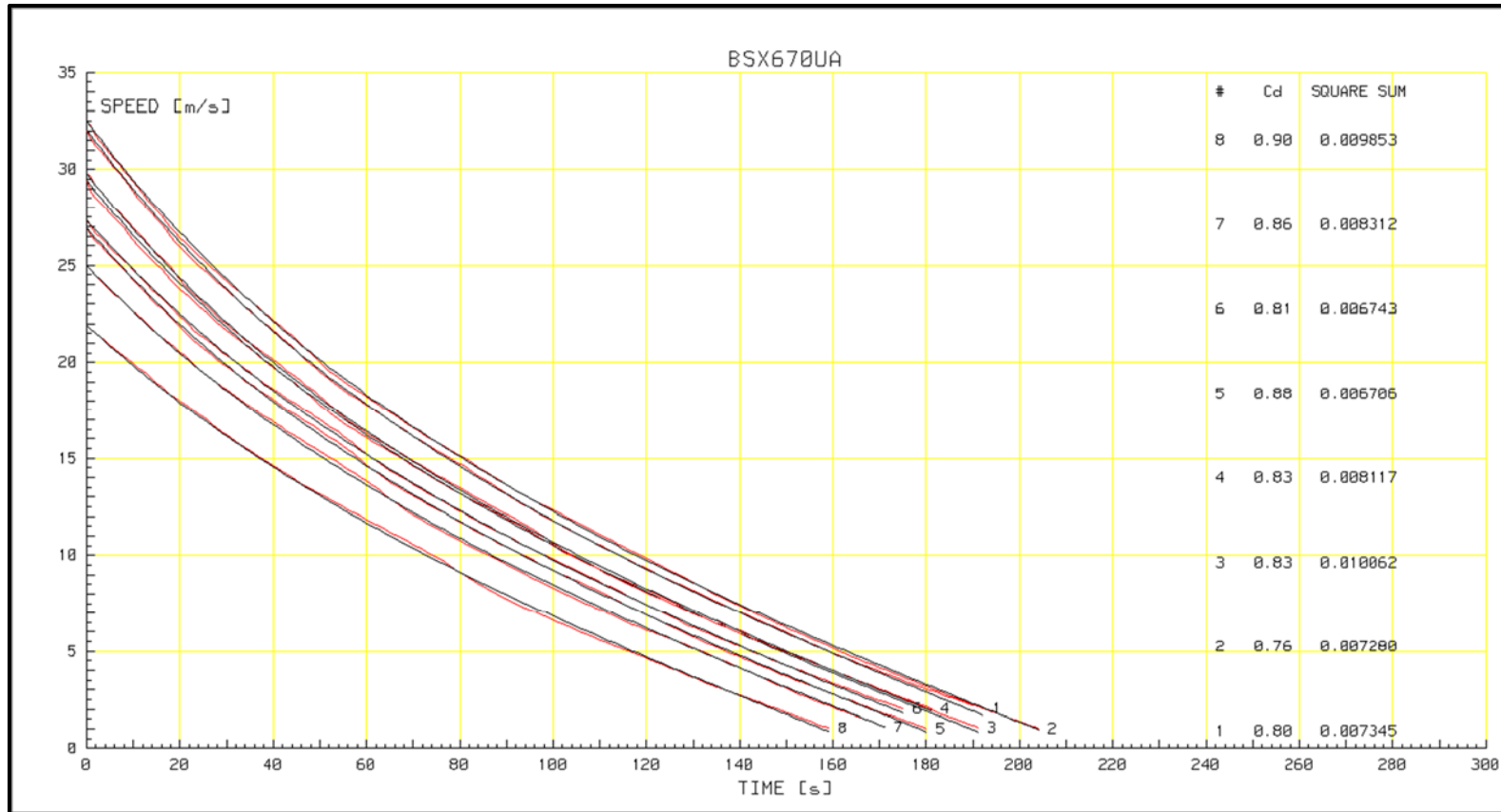
Kuva 3. Kuormaamattoman normaaliraakapuu yhdistelmän muotokertoimen  $C_d$ -arvon riippuvuus nopeudesta mittausajoin

Selitys: Kts. myös kuvan 1 selitys: Havaitaan, että normaaliraakapuu yhdistelmän  $C_d$ -arvo on pieni (1.35 – 1.58) suurella nopeudella, mutta kasvaa (1.99 – 2.45) siirryttäessä alemmalle nopeustasolle



Kuva 4. Kuormatun normaaliraakapuu yhdistelmän muotokertoimen  $C_d$ -arvon riippuvuus nopeudesta mittausajoittain

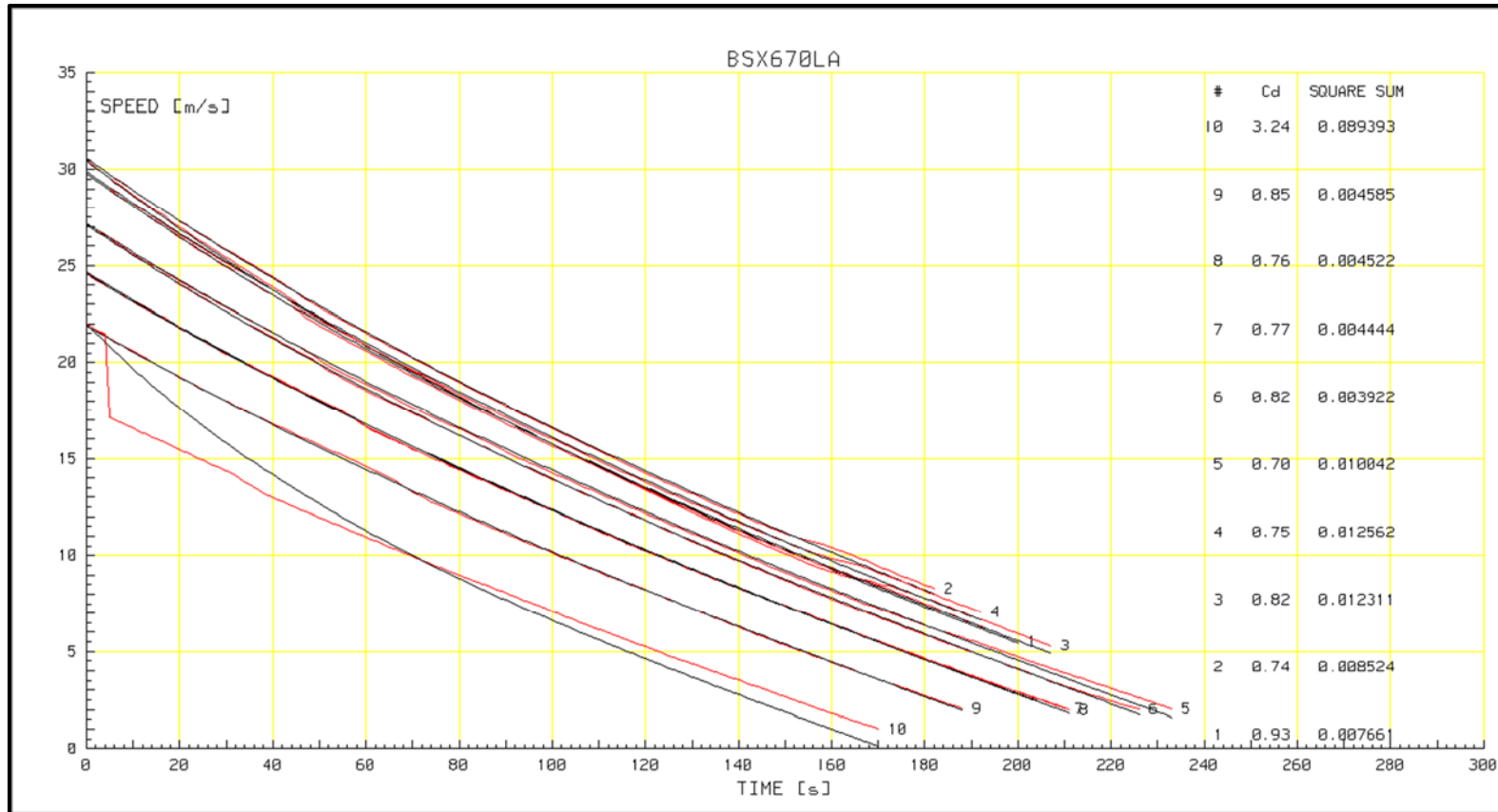
Selitys: Kts. myös kuvan 1 selitys: Havaitaan, että normaaliraakapuu yhdistelmän  $C_d$ -arvo on pieni (1.30 – 1.54) suurella nopeudella, mutta kasvaa (2.15 - 2.60) siirryttäessä alemmalle nopeustasolle



Kuva 5. Kuormaamattoman normaalihakeyhdistelmän (perävaunu yksittäispyörin) muotokertoimen  $C_d$ -arvo mittausajoittain

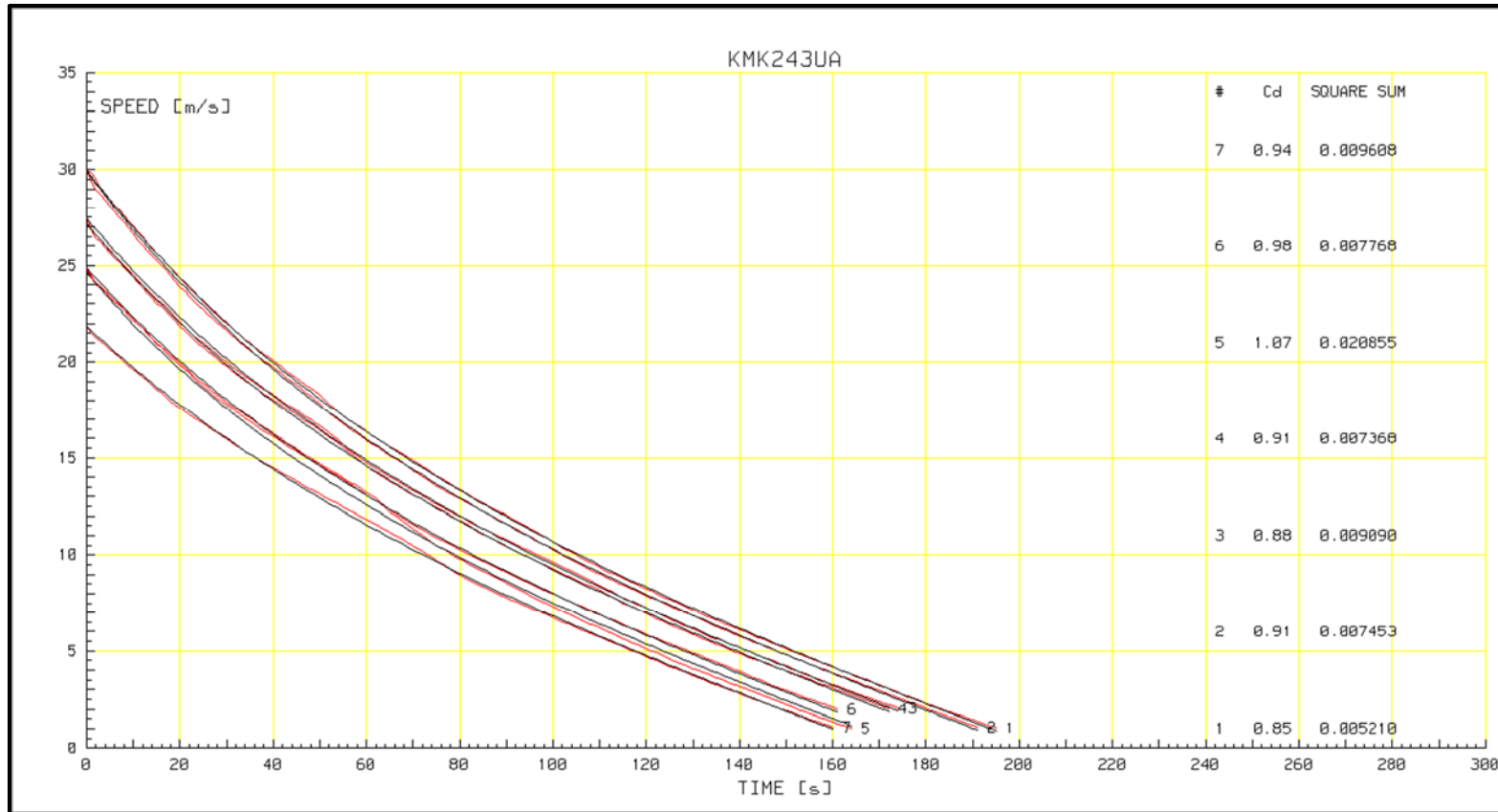
Selitys: Kts. myös kuvan 1 selitys: Havaitaan, että normaalihakeyhdistelmän  $C_d$ -arvo on pieni (0.76 – 0.90).  $C_d$ -arvo ei riipu nopeudesta.  $C_d$ -arvon vaihtelu mittauksesta toiseen aiheutuu ajo-olojen (tuulen) vaihtelusta mittausajojen välillä.





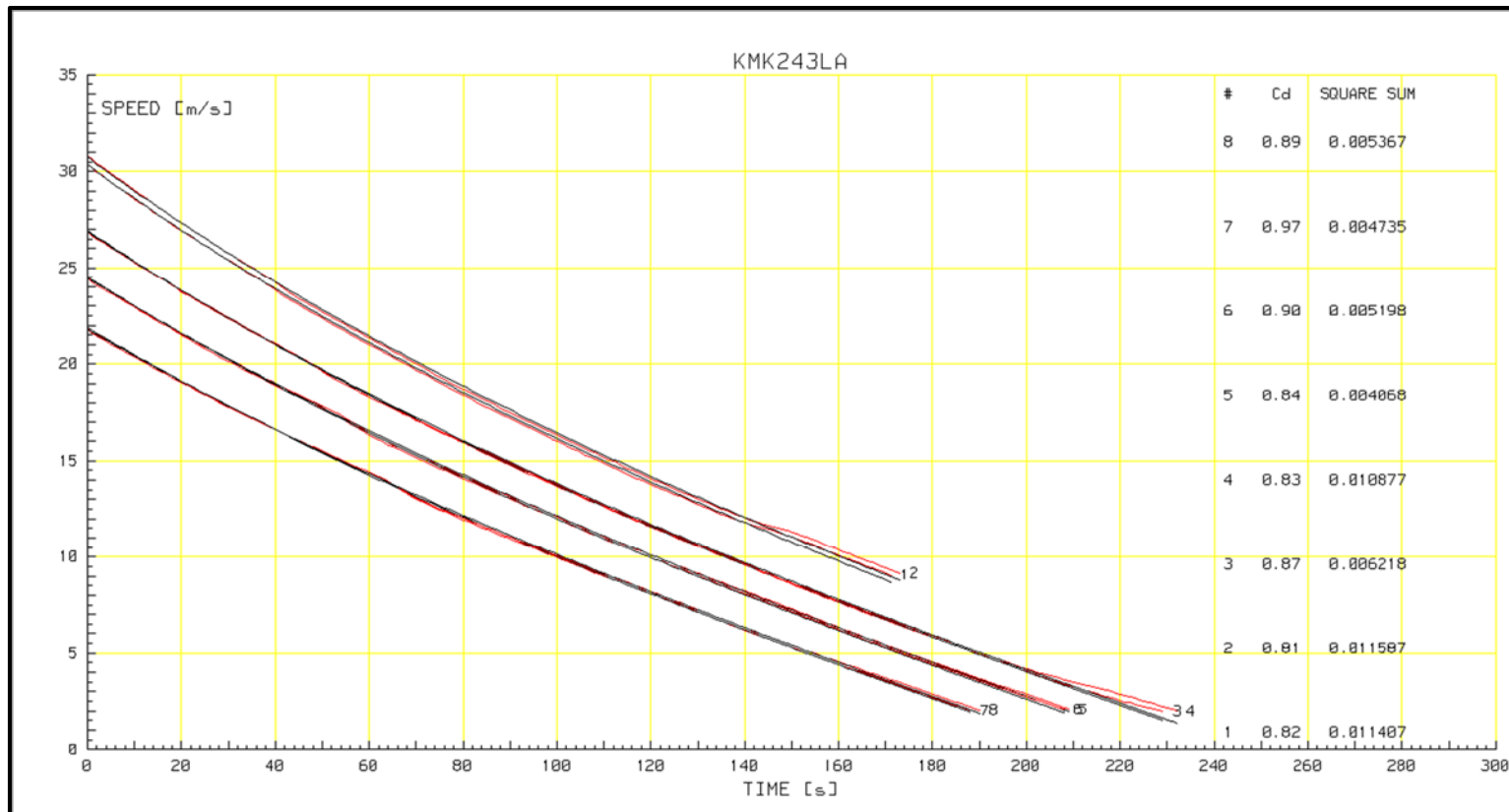
Kuva 6. Kuormatun normaalihakeyhdistelmän (perävaunu yksittäispyörin) muotokertoimen  $C_d$ -arvo mittausajoittain

Selitys: Kts. myös kuvan 1 selitys: Havaitaan, että normaalihakeyhdistelmän  $C_d$ -arvo on pieni (0.76 – 0.90).  $C_d$ -arvo ei riipu nopeudesta.  $C_d$ -arvon vaihtelu mittauksesta toiseen aiheutuu ajo-olojen (tuulen) vaihtelusta mittausajojen välillä.



Kuva 7. Kuormaamattoman normaalihakeyhdistelmän (perävaunu paripyörin) muutokertoimen  $C_d$ -arvo mittausajoittain

Selitys: Kts. myös kuvan 1 selitys: Havaitaan, että normaalihakeyhdistelmän  $C_d$ -arvo on pieni (0.76 – 0.90).  $C_d$ -arvo ei riipu nopeudesta.  $C_d$ -arvon vaihtelu mittauksesta toiseen aiheutuu ajo-olojen (tuulen) vaihtelusta mittausajojen välillä.



Kuva 8. Kuormatun normaalihakeyhdistelmän (perävaunu paripyörin) muotokertoimen  $C_d$ -arvo mittausajoittain

Selitys: Kts. myös kuvan 1 selitys: Havaitaan, että normaalihakeyhdistelmän  $C_d$ -arvo on pieni (0.76 – 0.90).  $C_d$ -arvo ei riipu nopeudesta.  $C_d$ -arvon vaihtelu mittauksesta toiseen aiheutuu ajo-olojen (tuulen) vaihtelusta mittausajojen välillä.

# Raakapuuyhdistelmiä koskeva lisätarkastelu

Olavi H. Koskinen ja Jussi Sauna-aho, 18.5.2018

Käsillä oleva raakapuujoneuvoja koskeva lisätarkastelu eli Liite 7 tehtiin koko selvitystyön loppuvaiheessa ja perustuu Olavi H. Koskisen LIVille laatimaan selvitykseen **Raakapuukuljetukset**, Olavi H. Koskinen, julkaisematon muistio, 18.5.2018.

## Ajoneuvoyhdistelmät

Raakapuukuljetuksia varten suunniteltiin ja mitoitettiin kaksi ajoneuvoyhdistelmää:

- nykytilanteen (= nykysäännösten) mukainen eli normaaliajoneuvoyhdistelmä ja
- nykysäännöistä poikkeava, tulevaisuuden HCT-ajoneuvoyhdistelmä.

Nykytilanteen mukainen tyyppiajoneuvoyhdistelmä on esitetty kuvassa 1. Auto on 4-akselinen ja perävaunu 5-akselinen. Auton kuomatilan pituus on 7 m ja perävaunun 10.5 m.

Tulevaisuuden HCT-yhdistelmää edustaa kuvassa 2 esitetty yhdistelmä. Vetoauto on tyyppiä 6x4 ja siihen on kytketty puoliperävaunu, jonka pituus on 13.59 m. Puoliperävaunussa on 4-akselinen teli. Puoliperävaunuun on kytketty 5-akselinen (2 + 3) varsinainen perävaunu, jonka pituus on myös 13.59 m.

Kuvien 1 ja 2 massa-mittapiirroksista ilmenevät ajoneuvoyhdistelmien mitat, akselirakenteet akseliryhmittäin, pyörätyypit ja -määrät sekä massajakaumat akseliryhmittäin.

## Kuormitus

Kuormitus määritettiin raakapuusta valitsemalla sopiva nippupituus ja muuttamalla sen irtotilavuusmassaa eli -painoa.

Puutavarannippujen koko vaihtelee käytännössä paljonkin, mutta yleisimpiä pituuksia ovat 3, 4 ja 6 m. Kombinaatioita näistä saadaan lukuisia, mutta vertailussa nykytilanteen ja HCT:n välillä on valittu nipun pituudeksi 3 m. Nykytilanteen tapauksessa nippuja mahtuu vetoautoon kaksi ja perävaunuun kolme. HCT:n tapauksessa nippuja mahtuu kumpaankin perävaunuun neljä eli yhdistelmään yhteensä kahdeksan.

Ajoneuvoyhdistelmien kuormitus määritettiin tämän jälkeen siten, että edellä mainittujen nippujen irtotilavuusmassaa muutettiin arvosta 200 kg/m<sup>3</sup> arvoon 800 kg/m<sup>3</sup>. Arvo 200 kg/m<sup>3</sup> vastaa kuivaa raakapuuta ja arvo 800 kg/m<sup>3</sup> märkää ja painavaa raakapuuta.

Edellä mainittuja kuormitusarvoja käyttäen määritettiin ajoneuvoyhdistelmien kokonaismassat ja niiden jakaumat paitsi akseliryhmittäin myös ajoneuvoyhdistelmien eri osille (vetoauto ja perävaunut). Massajakaumien avulla määritettiin tiekuormitusta osoittavat suureet ekvivalentti-akselien lukumäärät ja kuormasuuruudet per ekvivalenttiakseli molemmille ajoneuvoyhdistelmille raakapuun irtotilavuusmassan mukaan.

Nykytilanteen mukaisen yhdistelmän suurin sallittu massa on 76 t. Auton sallittu massa on 35 t ja perävaunun 42 t, mutta yhdistelmämassa on kuitenkin rajoitettu 76 tonniin, jolloin perävaunulle jää 41 t. HCT:n tapauksessa on oletettu, että ensimmäisen (puoli)perävaunun 4-akseliselle ryhmälle sallittaisiin 30 t, joten auton ja puoliperävaunun muodostamalle yhdistelmälle saataisiin 58 t. Kun varsinaiselle perävaunulle voitaisiin sallia 42 t (18 t + 24 t), saadaan koko yhdistelmän massaksi tasan 100 t.

## Yhteenvedo tuloksista

Tiedot tiekuormituksesta, polttoaineenkulutuksesta ja muuttuvista ajoneuvokustannuksista raakapuun irtotilavuusmassalla 200, 390 ja 470 kg/m<sup>3</sup> ilmenevät taulukosta 1.

Taulukosta 1 havaitaan seuraavaa:

HC-ajoneuvon kokonaismassa 100 t saavutetaan irtotilavuusmassan arvolla 390 kg/m<sup>3</sup>, mutta normaaliajoneuvo kokonaismassan arvolla 76 t irtotilavuusmassan arvolla 470 kg/m<sup>3</sup>

Irtotilavuusmassan arvolla 390 kg/m<sup>3</sup> normaaliajoneuvon kokonaismassa on 66.5 t ja HC:n 99.5 t

- tiekuormitustekijä saa arvon
  - 16.1 t/ekvivalenttiakseli normaaliajoneuvolla ja
  - 14.1 t/ ekvivalenttiakseli HCT-ajoneuvolla eli
  - normaaliajoneuvo on HCT-ajoneuvoa edullisempi
- polttoaineenkulutus on
  - 1,52 l/100 tkm normaaliajoneuvolla ja
  - 1,18 l/100 tkm HCT-ajoneuvolla eli
  - HCT-ajoneuvo vähentää polttoaineenkulutusta 22 %
- muuttuvat ajoneuvokustannukset ovat
  - 1,9 c/tkm normaaliajoneuvolla ja
  - 1,8 c/tkm HCT-ajoneuvolla eli
  - HCT-ajoneuvo vähentää muuttuvia ajoneuvokustannuksia 18 %
- HCT-ajoneuvon liikennesuorite (ajnkm) on vain 0.64-kertainen normaaliajoneuvon verrattuna, kun molemmat kuljettavat saman tavaramäärän; tosin sanoen HCT-ajoneuvon aiheuttaa 36 %:n vähennyksen

Irtotilavuusmassan arvolla 470 kg/m<sup>3</sup> normaaliajoneuvon kokonaismassa on 75.5 t ja HCT:n olisi 113,7 t eli siinä olisi ylikuormaa 13.7 t

- tiekuormitustekijä saa arvon
  - 12.2.1 t/ekvivalenttiakseli normaaliajoneuvolla ja
  - 10.1 t/ ekvivalenttiakseli HCT-ajoneuvoyhdistelmällä eli
  - normaaliajoneuvo on HCT-ajoneuvoa edullisempi

- polttoaineenkulutus on
  - 1,31 l/100 tkm normaaliajoneuvolla ja
  - 1,02 l/100 tkm HCT-ajoneuvolla eli
  - HCT-ajoneuvo vähentää polttoaineenkulutusta 22 %
- muuttuvat ajoneuvokustannukset ovat
  - 1,9 c/tkm normaaliajoneuvolla ja
  - 1,6 c/tkm HC-ajoneuvolla eli
  - HCT-ajoneuvo vähentää muuttuvia ajoneuvokustannuksia 18 %
- HCT-ajoneuvon liikennesuorite (ajnkm) on vain 0.64-kertainen normaaliajoneuvoon verrattuna, kun molemmat kuljettavat saman tavaramäärän; tosin sanoen HC-ajoneuvon aiheuttaa 36 %:n vähennyksen

Taulukko 1. Raakapuukuljetuksissa käytettävien normaali- ja HCT-ajoneuvojen tiekuormitus, polttoaineen kulutus ja muuttuvat ajoneuvokustannukset raakapuun irtotilavuusmassan mukaan

AJN	RAAKAPUUN IRTO- TILAVUUSMASSA	OMAMASSA	KUORMA	KOKMASA	TIEUORKMITUS	POLTTOAINEENKUL UTUS		Muuttuvat ajoneuvokustannuk set	
#	kg/m <sup>3</sup>	t	t	T	t/ekvival. akseli	l/100 km	l/100 tkm	€/km	€/tkm
10	200	22,4	22,7	45,1	23,6	58,82	2,59	0,85	0,037
11	200	30,5	34,4	64,9	28,9	71,19	2,07	1,08	0,031
11/10	200	1,36	1,52	1,44	1,22	1,21	0,80	1,27	0,84
10	390	22,4	44,1	66,5	16,1	66,92	1,52	0,97	0,022
<b>11</b>	<b>390</b>	<b>30,5</b>	<b>69</b>	<b>99,5</b>	<b>14,1</b>	<b>81,53</b>	<b>1,18</b>	<b>1,24</b>	<b>0,018</b>
11/10	390	1,36	1,56	1,50	0,88	1,22	0,78	1,28	0,82
<b>10</b>	<b>470</b>	<b>22,4</b>	<b>53,5</b>	<b>75,9</b>	<b>12,2</b>	<b>70,08</b>	<b>1,31</b>	<b>1,02</b>	<b>0,019</b>
11	470	30,5	83,2	113,7	10,1	84,90	1,02	1,30	0,016
11/10	470	1,36	1,56	1,50	0,83	1,21	0,78	1,28	0,82

Metsätehon selvityksen /1/ mukaan raakapuun irtotilavuus- eli kehysmassa riippuu puulajista, vuodenajasta ja myös alueesta. Selvityksen mukaan keskiarvot vaihtelevat välillä 500–530 kg/m<sup>3</sup>.

Taulukosta 1 havaitaan, että

- nykyaoneuvolla sallittu kokonaismassa saavutetaan jo irtotiheyden arvolla  $470 \text{ kg/m}^3$ .
- HC-ajoneuvolla sallittu kokonaismassa saavutetaan jo irtotiheyden arvolla  $390 \text{ kg/m}^3$ .

Saatujen taulukossa 1 esitettyjen tulosten perusteella massoja, polttoaineenkulutusta ja tiekuormitusta ei tarkastella erikseen irtotiheyttä  $470 \text{ kg/m}^3$  suuremmilla irtotiheyden arvoilla.

Taulukosta 2 ilmenee kuinka muuttuvat ajoneuvokustannukset ja tiekuormitus muuttuvat siirryttäessä normaaliajoneuvoyhdistelmästä HC-ajoneuvoyhdistelmään, kun raakapuun irtotilavuusmassa muuttuu.

*Taulukko 2. Muuttuvien ajoneuvokustannusten ja tiekuormituksen muutos siirryttäessä normaaliajoneuvoyhdistelmästä HC-ajoneuvoyhdistelmään raakapuun irtotilavuusmassan mukaan*

Raakapuun irtotila- vuusmassa Kg/m <sup>3</sup>	Ajoneuvotyyppi		Muutos	Tiekuormitus		Muutos
	HCT- ajo- neuvo <sup>1</sup> EUR/t	Normaali- ajoneuvo <sup>2</sup> EUR/t	%	HCT- ajoneuvo t/eq.axle	Normaali- ajoneuvo t/eq.axle	%
*	11.409	10.768	-5.6	12.127	14.176	+16.9
200	22.537	18.338	-18.6	23.584	28.925	+22.6
240	19.378	15.827	-18.3	22.977	25.772	+12.2
290	16.623	13.627	-18.0	21.086	21.407	+1.5
300	16.181	13.272	-18.0	20.621	20.564	-.3
310	15.768	12.935	-18.0	20.139	19.741	-2.0
360	14.034	11.515	-18.0	17.620	16.013	-9.1
380	13.460	11.041	-18.0	16.614	14.715	-11.4
400	12.942	10.616	-18.0	15.633	13.526	-13.5
440	12.054	9.864	-18.2	13.786	11.454	-16.9
470	11.475	9.370	-18.3	12.520	10.138	-19.0
500	10.960	8.928	-18.5	11.363	8.998	-20.8

<sup>1</sup> HCT-yhdistelmä (100 t 12 akselia)

<sup>2</sup> Nykytilanteen mukainen ajoneuvoyhdistelmä (76 t 9 akselia)

Taulukosta 2 havaitaan, että

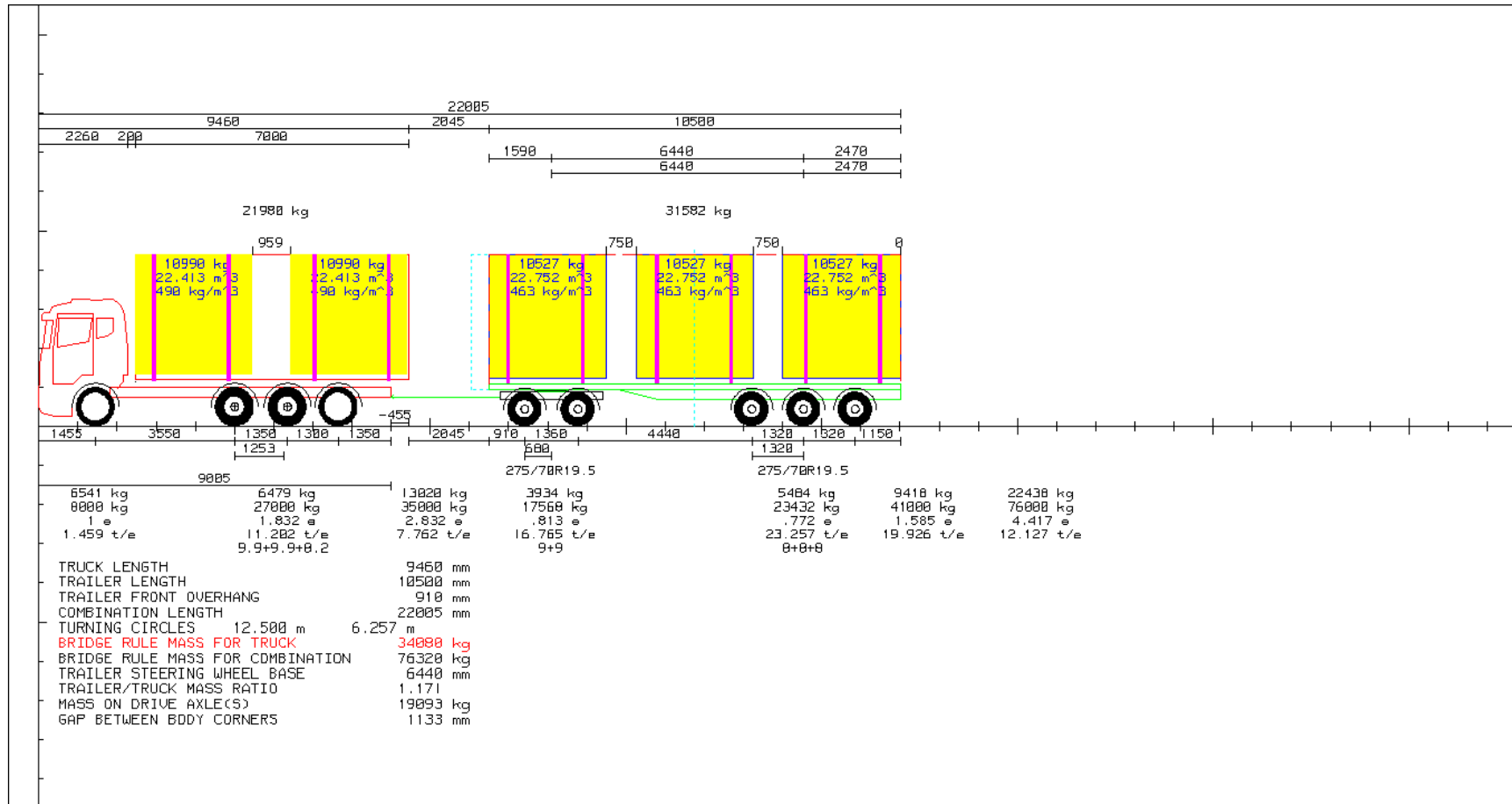
- HCT-ajoneuvon muuttuvat kustannukset ovat vajaa 20 % alhaisemmat kuin normaali-ajoneuvon, ks. myös kuva 4.
- HCT-ajoneuvon tiekuormitus on epäedullisempi kuin normaaliajoneuvon raakapuun irtotilavuusmassan arvoilla 200–300 kg/m<sup>3</sup>, mutta irtotilavuusarvon kasvaessa tulee HCT-ajoneuvo normaaliajoneuvoa edullisemmaksi, ks. myös kuva 3.

Kuvien 3 ja 4 mukaiset tarkastelut soveltuvat vain sellaisten tavaroiden kustannustarkasteluun, joissa kuorma määräytyy massan mukaan, kuten raakapuuyhdistelmien 4 ja 5 kustannusten tarkasteluun. Kuvan 3 tiedot eivät sovellu kevyiden tavaroiden (tilavuustavaran) tarkasteluun, kuten ajoneuvojen 2 ja 3 kustannustarkasteluun, vaikkakin ko. tarkastelu on sisällytetty kuvaan 3. Tilavuustavaran kuormamassoista ei ollut edellä sanotun mukaisesti saatavilla riittävästi tietoja, jotta ko. tarkastelu olisi mahdollista.

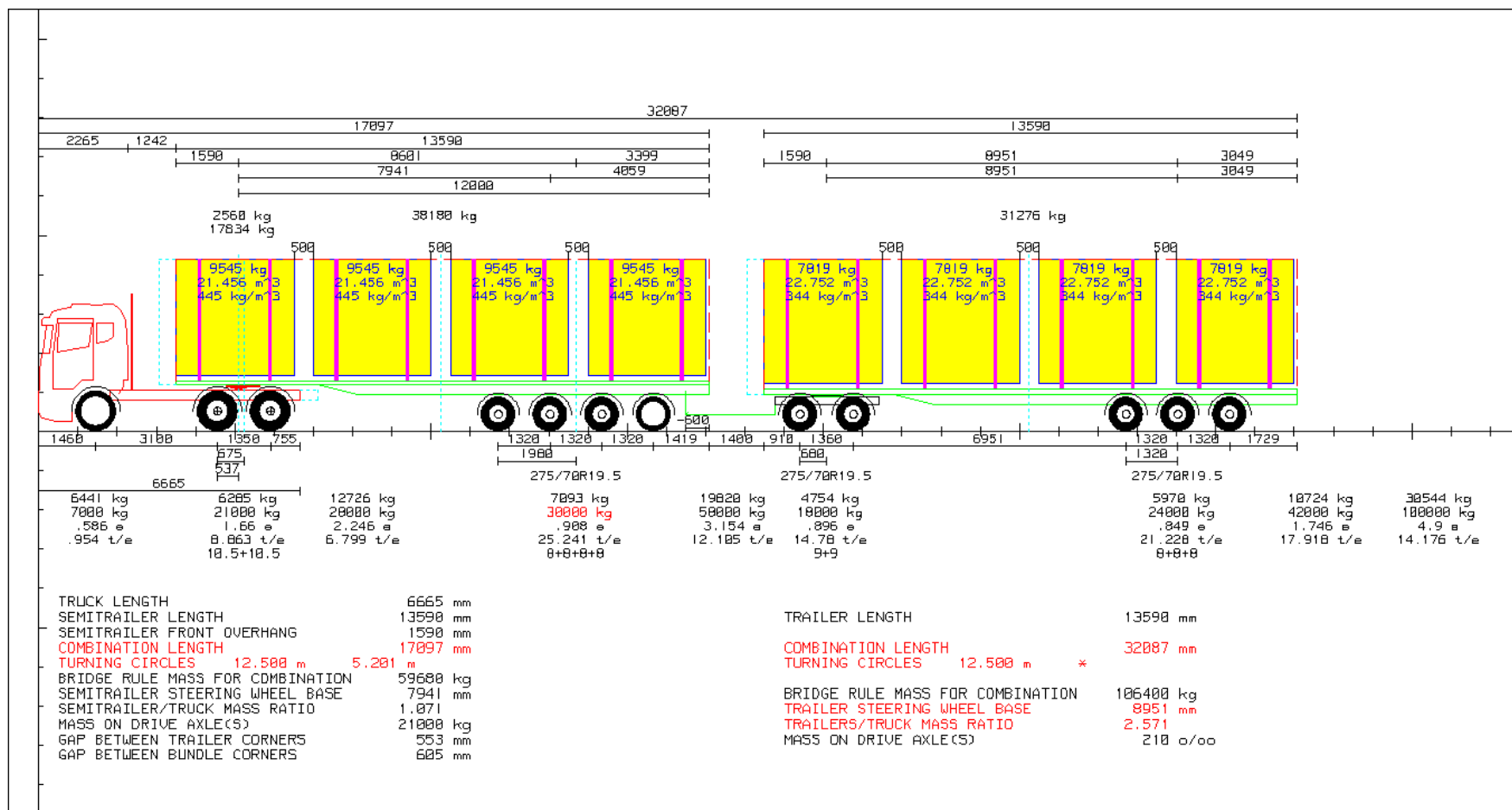
## Lähteet

- /1/ Uusien mittojen ja massojen puutavara-autot, LVM:n 17.12.2012 julkistaman ajoneuvojen käyttöasetuksen muutosluonnoksen ajoneuvot, Metsäteho, 18.1.2013, Antti Korpilahti ja Olavi H. Koskinen

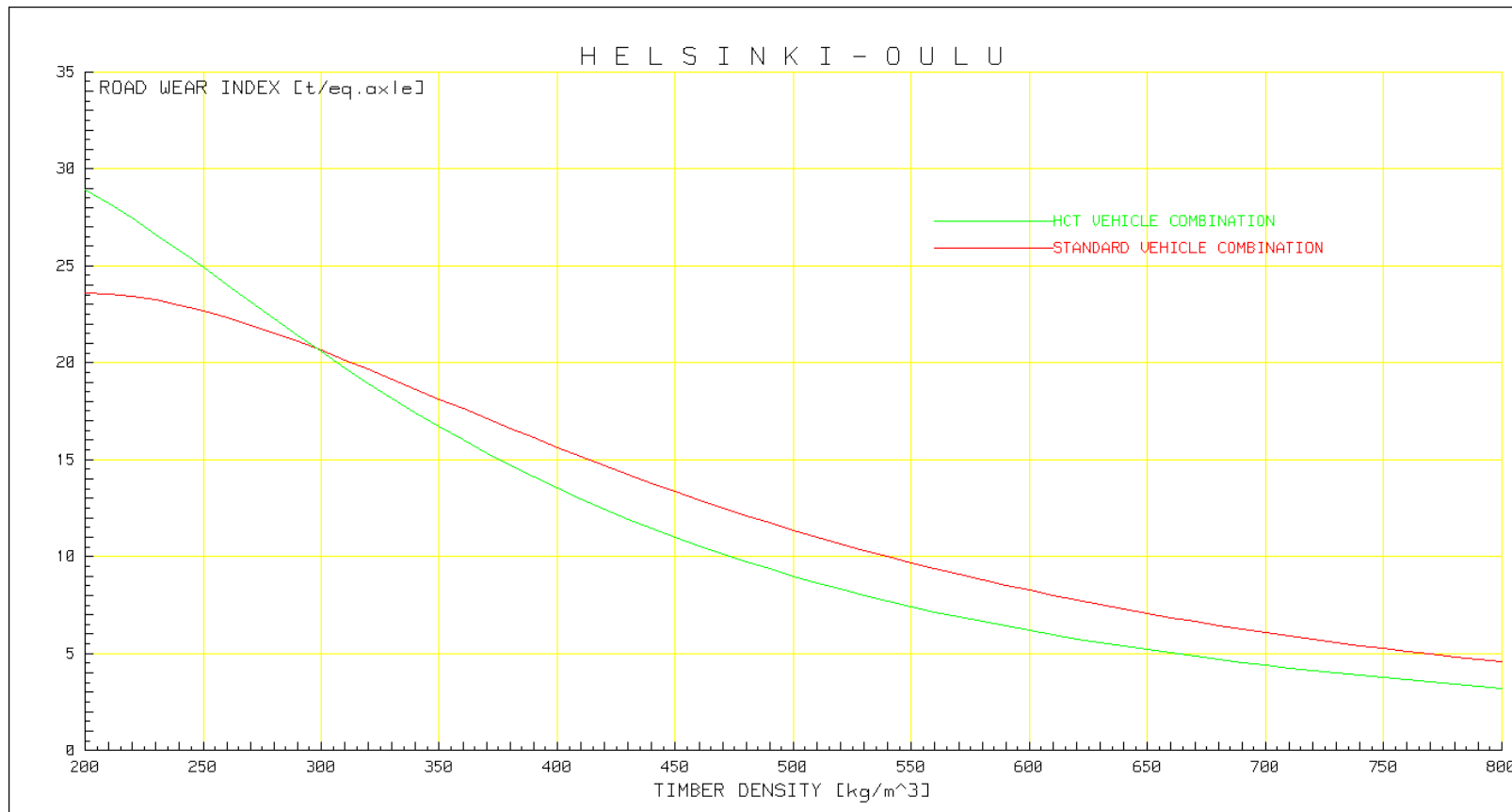




Kuva 1. Esimerkki nykysääntöjen mukaisesta 9-akselisen 76 t:n raakapuukuljetusten ajoneuvoyhdistelmän massa-mittapiirroksesta

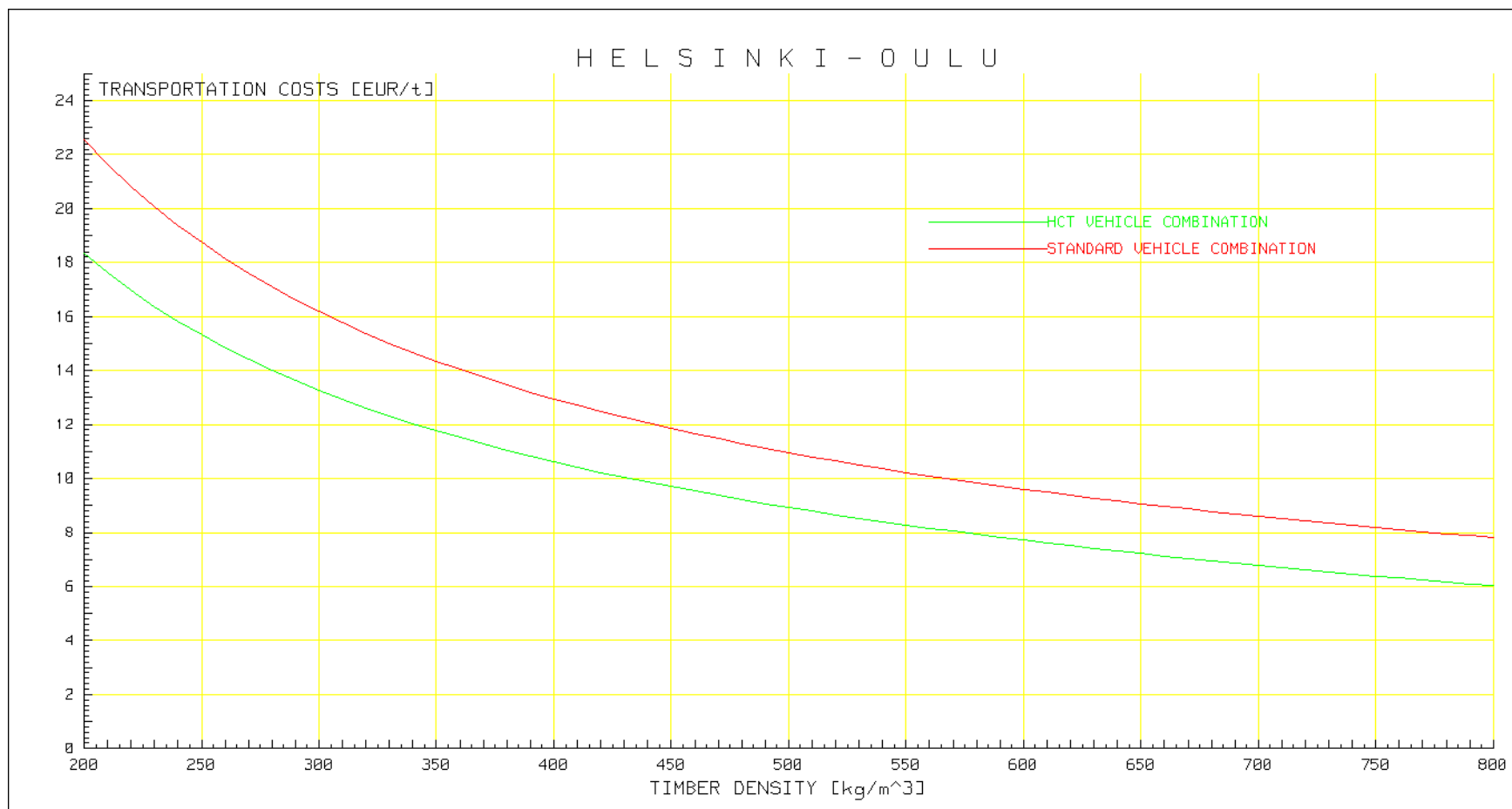


Kuva 2. Esimerkki 12-akselisesta 100 t:n raakapuukuljetusten HCT-ajoneuvoyhdistelmän massa-mittapiirroksesta



Kuva 3. Nykysäännösten mukaisen ja HCT-ajoneuvoyhdistelmän tiekuormitus raakapuun irtotilavuusmassan mukaan

Selitys: HCT-raakapuujoneuvo on tiekuormituksen osalta normaaliajoneuvoa edullisempi vain, kun raakapuun irtotilavuusmassa on alle 300 kg/m<sup>3</sup>, sillä HCT-ajoneuvon voi ottaa suuremman kuorman aiheuttamaansa ekvivalenttiakselia kohden kuin normaaliajoneuvo.



Kuva 4. HCT-ajoneuvoyhdistelmän muuttuvat ajoneuvokustannukset ovat pienemmät kuin normaaliajoneuvon kaikilla raakapuun irtotilavuusmassan arvoilla

# Näkökohtia kuljetuskustannuksista ja niiden määrittämisestä sekä ehdotus tietotuotannon kehittämiseksi

Jussi Sauna-aho sekä Olavi H. Koskinen ja Tapio Rivanti, 29.3.2018

## 1 Perusteet tietotuotannon kehittämisestä kuljetuskustannusten määrittämiseksi

Käsillä olevaan selvitykseen ei sisälly kuljetuskustannusten määrittäminen HCT- ja normaali-ajoneuvojen kesken. Käsillä olevan selvityksen kuluessa on muodostunut kuitenkin tietoa ja käsitystä kuljetuskustannuksiin vaikuttavista tekijöistä ja kustannusten määrittämisestä myös reittikohtaisesti. Siksi seuraavassa esitetään asiasta eräitä seikkoja. Näin, varsinkin kun kuljetuskustannusten määrittämisessä tarvitaan monenlaista tietoa riippumatta siitä, määritetäänkö kustannukset suorite- ja kustannusseurannan tuottamien tietojen tai kustannusmallin avulla.

HCT- ja normaali-ajoneuvojen kustannusvertailu – ollakseen realistinen ja ottaakseen huomioon tie- ja liikenneolot ja niiden erilaisuus kuljetusalan mukaan – vaatii myös sellaista lisätietoa, jota ei ole saatavilla toistaiseksi. Siksi jäljempänä tuodaan esiin myös tietotuotannon kehittämistarpeita. Kuljetukset ovat kuljetusalan, tavaralajin, lähtö- ja määränpään mukaan reittikohtaisia. Kuljetuksen kuormaus- ja purkaustoiminnot ja paikat vaihtelevat. Metsävarasto, sorakuoppa, teollisuuslaitoksen tontti, satama, jne. ovat erilaisia ja vaikuttavat kuormaustoimintoihin ja sama koskee purkausta ja purkauspaikkoja. Lisäksi niissä paikoissa, joissa kuormaus tai purkaus ovat osa kuljetusketjua ja liittyvät muuhun kuljetukseen, kuten satamissa, aiheutuu aikatauluhaasteita, mistä aiheutuu viipeitä kuormaus- ja purkaustoimintoihin.

## 2 Kuljetuskustannusten rakenne

Kuljetuskustannukset muodostuvat muuttuvista ja kiinteistä ajoneuvokustannuksista. Muuttuvia ovat polttoaine-, voiteluaine-, korjaus ja huolto- ja rengaskustannukset.

Kiinteitä ovat ajoneuvon pääomakustannukset poisluettuna renkaat, sekä kiinteät käyttökustannukset (henkilötyökustannukset sivukuluineen, ajoneuvon vakuutusmaksut, kiinteät verot) sekä hallintokustannukset.

Ajoneuvon pääomakustannukset, vakuutusmaksut ja käyttövoimavero ovat aikasidonnaisia ja ne määritetään tavallisesti aikayksikköä kohden. Henkilöiden palkkakustannukset ovat myös aikasidonnaisia ja ne määräytyvät työajan perusteella.

**Ajoneuvon pääomakustannukset** määräytyvät ajoneuvon ja sen varusteiden hankintahinnan, poistoajan ja korkokannan mukaan. Ajoneuvojen käyttöikä määräytyy usean tekijän mukaan. Näitä ovat mm.: ajovuorojen määrä vuorokaudessa (1-, 2- vai 3-vuoroajo), työpäivien määrä viikossa (5, 6 vai 7 vrk) ja kuljetusala, joka määrittää ajo-olot ja niiden rasittavuuden kaluston kannalta.

**Vakuutusmaksuja** ovat pakollinen liikennevakuutus ja vapaaehtoinen kaskovakuutus. Liikennevakuutuksen maksut määräytyvät ajoneuvoyhdistelmän osien (vetoauto, perävaunut ja apuvaunu sekä niiden varustus) ominaisuuksien, kaluston hintojen ja ajoneuvon rekisteröinti- paikkakunnan perusteella.

Kaskovakuutus muodostuu perusosasta ja laajennusosasta. Sekä perus- että laajennusosan vakuutusmaksut määräytyvät myös ajoneuvoyhdistelmän osien (vetoauto, perävaunut ja apuvaunu sekä niiden varustus) ominaisuuksien ja hintojen perusteella. Kaskovakuutus voi sisältää useita osia, kuten törmäys-, ojaanajo-, ilkivalta-, palo-, oikeusturva-, keskeytys- ym. osia. Siksi kaskovakuutuksen maksut vaihtelevat suuresti niiden sisällöstä riippuen.

**Käyttövoimaver** koskee vetoautoa ja määräytyy vetoauton akseliluvun ja perävaunun liittämistavan (vetopöytä, vetokoukku) sekä kokonaismassan mukaan rekisterissä oloaikaan kohden, kun aikayksikkönä on vuorokausi. Rekisterissä oloaika vuodessa vaikuttaa käyttövoimaveron määrään.

**Palkka henkilösivukuluineen** määräytyy kuljettajan työajan ja aikayksikköä kohden määritetyn palkan ja henkilösivukulujen mukaan. HC-ajoneuvon kuljettajille maksetaan palkan lisäksi.

## 3 Kuljetuskustannusten määrittäminen

### 3.1 Yleistä

Kuljetuskustannukset määräytyvät kuljetusreitillä mukaan ajoneuvokustannuksista ajon aikana, ajoneuvon kuormauksesta ja purkauksesta terminaaleissa sekä muista kiinteistä kustannuksista.

Ajoneuvon kuormauksesta ja purkauksesta syntyvät kustannukset määräytyvät erilaisissa kuormaus- ja purkauspaikoissa mukaan lukien tavaraterminaalit satamista teollisuuslaitoksiin, rautatieasemiin, lentokenttiin ym. Niissä olosuhteet vaihtelevat suuresti ja vaikuttavat paitsi kuormaus- ja purkausnopeuksiin myös lisäaikaan, joka aiheutuu purkaus- ja kuormausasiakirjojen hoitamisesta, odotuksista tai muista viiveistä.

Reittikohtaisten kuljetuskustannusten määrittäminen edellyttää siis tietoja paitsi reitistä, sen geometriasta ja liikenneoloista myös reittiin liittyvistä kuormaus- ja purkauspaikoista ja niihin vaikuttavista seikoista.

### 3.2 Näkökohtia kuljetuskustannusten määrittämisestä

Seuraavassa esitetään muutamia seikkoja

- vain ajon aikana syntyvistä muuttuvista ja kiinteistä kustannuksista, ja
- tiedoista, joita tarvitaan kuljetuskustannuksia määrittäessä

#### 3.2.1 Muuttuvat ajoneuvokustannukset

Muuttuvat ajoneuvokustannukset, kuten myös kiinteät kustannukset, voidaan määrittää

- kuljetusyrittäjän kustannusten ja suoritteiden seuranta- ja seuranta- ja seuranta-
- kustannusmallinnuksen (suoritemallinnuksen ja yksikköhintojen) avulla

Kuljetusyritys saa ajoneuvojen muuttuvia kustannuksia koskevat tiedot seurantajärjestelmästä. Kustannusmallinnus tarjoaa mahdollisuuden arvioida muuttuvia kustannuksia muuttuvien tekijöiden mukaan eli eri ajoneuvojen sekä väylän ja liikenneolojen mukaan. Kustannusmallinnus on kaksiosainen, jossa osa 1 tarkoittaa kustannuksia synnyttävien tekijöiden eli suoritteiden määrittämistä (määrinä) ja osa 2 suoritteiden hinnoittelua eli yksikköhintojen määrittämistä suoritteille eli arvottamista. Silloin, kun muuttuvien kustannusten riippuvuutta tarkastellaan ajoneuvojen sekä väylän ja liikenneolojen ominaisuuksien mukaan, tarvitaan mallinnusta.

Kustannus = suoritemäärä x yksikköhinta ja kokonaiskustannukset saadaan summaamalla yli kaikkien suoritteiden.

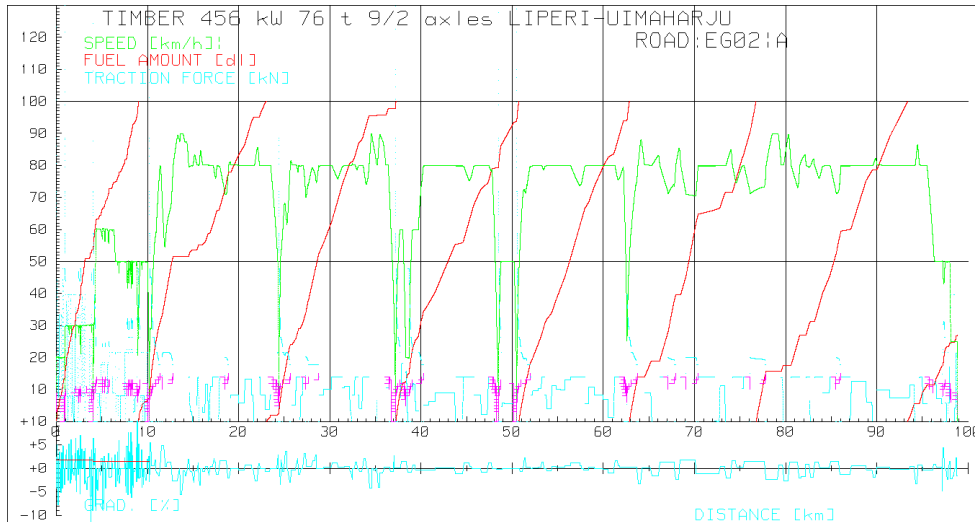
Seuraavassa tarkastellaan vain kustannusten määrittämistä kustannusmallinnuksen avulla ja tapauksessa, jossa käytetään hyväksi ajoneuvosimulointia.

Energiankäyttötiedot ovat perusteena paitsi hiilidioksidipäästöjen myös ajoneuvojen muuttuvien ajoneuvokustannusten määräytymiselle. Aikaisemmin määritettiin muuttuvat ajoneuvokustannukset ns. Wehnerin periaatteen mukaan, jonka mukaan myös muut muuttuvat ajoneuvokustannukset (korjaus- ja huolto, voiteluaine- ja rengaskustannukset) määritetään siten, että tie- ja liikenneolojen vaikutus niihin määräytyy polttoaineenkulutuksen mukaan suoraviivaisesti.

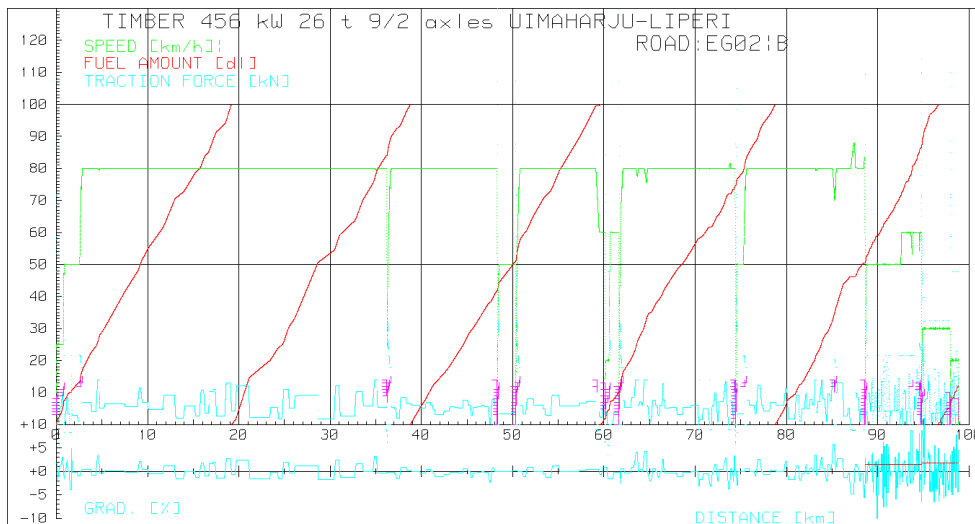
Käsillä olevassa selvityksessä poiketaan Wehnerin periaatteesta, koska ajoneuvosimuloinnin tuottaman monipuolisen tiedon perusteella saadaan perusteet paitsi polttoaineenkulutuksesta myös muiden muuttuvien kustannusten määräytymisestä. Ajoneuvosimuloinnin perusteella määritetään ajoneuvon liikuttamisessa syntyvät eri työkomponentit ja käytetään niiden yhteyttä muiden muuttuviin ajoneuvokustannusten määräytymisessä.

Kuorma-autojen ja ajoneuvoyhdistelmien muuttuvat kustannukset määräytyvät olosuhteiden mukaan ja vaihtelevat erittäin suuresti kuljetusalan mukaan. Esimerkiksi puutavara-ajoneuvon tapauksessa ajetaan osa matkasta metsäautotietä tai tilustietä, jolloin muuttuvat ajoneuvokustannukset metsävarastolta tehtaalle ja takaisin poikkeavat merkittävästi päätteillä ajamisen kustannuksista, kuten esimerkit kuvissa 1 ja 2 osoittavat.

Ajoneuvosimuloinnin avulla voidaan määrittää ajoneuvon liikuttamisessa syntyvät eri työkomponentit eli moottori- ja liiketyö. Näillä työkomponenteilla on yhteys muiden muuttuviin ajoneuvokustannusten määräytymiseen alla olevan taulukon 1 mukaisesti. Jäljempänä käytetäänkin tätä uutta tapaa ja esitetään esimerkin avulla muuttuvien ajoneuvokustannusten tuottaminen uutta tapaa ja ajoneuvosimulointia käyttäen, kts. kuva 3.



Kuva 1. Kuormatun puutavara-ajoneuvon polttoaineenkulutus ja ajonopeus sekä niiden vaihtelu metsävarastolta tehtaalle välillä Liperi-Uimaharju



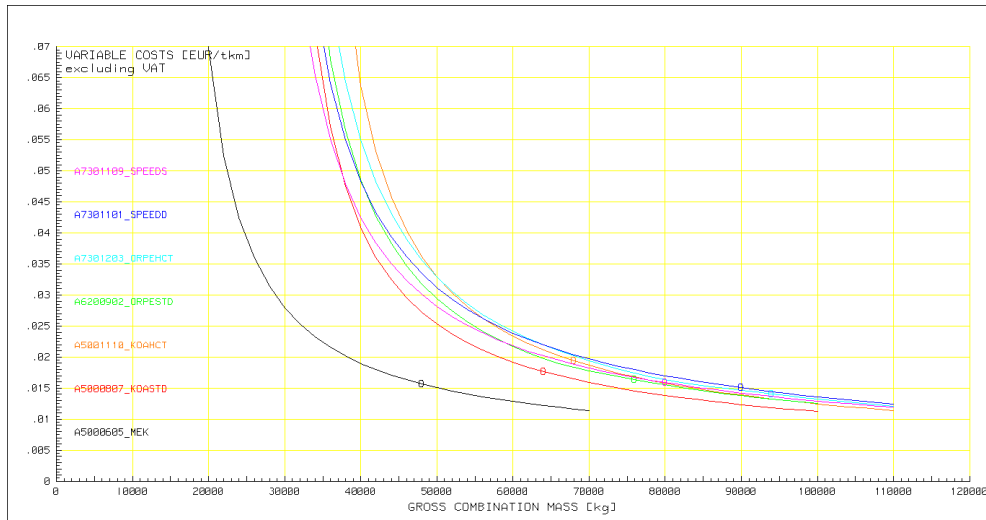
Kuva 2. Kuormaamattoman puutavara-ajoneuvon polttoaineenkulutus ja ajonopeus sekä niiden vaihtelu tehtaalta metsävarastolle välillä Uimaharju-Liperi

Taulukko 1. Muuttuvien ajoneuvokustannusten määräytymiseen vaikuttavat tekijät

Työkomponentti	Muuttuvat ajoneuvokustannukset ja niiden määräytyminen			
	Polttoaine	Korjaus- ja huolto	Voitelu	Renkaat
Moottorityö	x		x	
Vetovoima- ja jarrutus		x		x

Kuvan 3 muuttuvien ajoneuvokustannusten määrittäminen perustuu ajoneuvosimulointiin VT4:n tiejaksolla Helsinki-Oulu ja koskevat vain mainittua kohdetta. Esimerkiksi puutavara-ajoneuvon tapauksessa ajetaan osa matkasta metsäautotietä tai tilustietä, jolloin muuttuvat kustannukset metsävarastolta tehtaalle poikkeavat merkittävästi päteillä ajamisen kustannuksista.





Kuva 3. Tutkimuksessa käytettyjen ajoneuvoyhdistelmien muuttuvat ajoneuvokustannukset ajoneuvoyhdistelmän massan mukaan

Selitys: Kuvaan on merkitty pienillä ympyröillä kunkin ajoneuvoyhdistelmän kantavuuskuormaa vastaava kokonaisuus. Jos kuormasuuruutta muutetaan pienempään tai suurempaan päin, nähdään miten muuttuvat ajoneuvokustannukset muuttuvat eri ajoneuvoilla.

### 3.2.2 Kiinteät kustannukset

#### Ajoneuvojen pääomakustannukset

Ajoneuvon pääomakustannuksia tarkastellaan vain suuntaa-antavina. Taulukossa 2 esitetään ajoneuvoittain ajoneuvoyhdistelmien hankintahinnat sekä vuotuiset poisto- ja korkokustannukset, kun kaluston pääomakustannukset on kohdistettu viiden vuoden ajanjaksolle, ja korkokantana käytetään 5 %.

Taulukko 2. Suuntaa-antavia tietoja ajoneuvojen hankintahinnoista ja vuotuisista pääomakustannuksista

Ajo- neuvo #	Yhdistelmän hankintahinta*)	Vuotuinen pääomakustannus ja sen jakautuminen poisto- ja korkokustannusten kesken		
		Poisto-kustannus	Korko-kustannus	Pääoma-kustannus
	[k€]	[€/a]	[€/a]	[€/a]
1	268	31433	6287	37720
2	328	39202	7848	47050
3	368	43983	8797	52780
4	333**)	39800	7960	47760
5	310	37051	7410	44461
6	298	35616	7123	42739
7	288	34421	6884	41305

\*) Hankintahinnat vaihtelevat kuljetusyrityksen koon mukaan, koska suurissa ostomäärissä on mahdollista saada alennusta.

\*\*\*) kuormain mukana

### Käyttövoimavero ja vakuutusmaksut

Taulukossa 3 esitetään käyttövoimavero ja sen määräytyminen tutkimuksessa käytettyjen ajoneuvojen osalta sekä taulukossa 4 esimerkkejä vakuutusmaksuista ja niiden määräytymisestä.

Taulukko 3. Käyttövoimavero ajoneuvoittain vetoauton teknisten ominaisuuksien mukaan

Ajo- neuvo	Vetoauton kokonais- massa	Vetoauton akseli- määrä	Perävaunun vetolaite		Käyttövoimavero
			Vetopöytä	Vetokytkin	
#	kg	kpl	-	-	€
1	26000	3	X		1234
2	26000	3		x	1329
3	26000	3	X		1234
4	35000	4		x	1329
5	26000	3	X		1234
6	26000	3	X		1234
7	26000	3			1234

Taulukko 4. Esimerkkejä vakuutusmaksuista

Ajoneuvo- yhdistelmän osa	Varustus	Akseli- luku	Kokonais- massa	Hinta	Liikenne- vakuutus	Kaskovakuutus	
						Perus	Laaja
			T	k€	k€/a		
Vetoauto		3		160	700	1600	2000
Apuvaunu					130	500	
Konttityhdistelmä					130	600	800
Puoliperävaunu*)	Umpikori	3		110	130	1500	2000
Yhdistelmä (KAVP)			76				
* Vetoauto	Umpikori	4		250	1000	2500	
*Varsinainen perävaunu	Umpikori	5		140	130	2000	2500

\*) FNA+kylmäkori

## 4 Tietotarpeet ja ehdotus tietotuotannon kehittämiseksi

### 4.1 Tarvittavat tiedot määritettäessä reittikohtaisia kuljetuskustannuksia

Kuljetukset tapahtuvat reiteillä, joiden väylä- ja liikenne- sekä terminaaliolosuhteet ovat lähes poikkeuksetta erilaiset reitistä toiseen joko reitin tai terminaaliolojen osalta.

Reittikohtaiset kustannukset muodostuvat kolmesta pääryhmästä

- ajokustannukset reitillä
- terminaali- eli kuormaus- ja purkaukustannukset odotusaikoihin
- kiinteät aikaan sidotut kustannukset

Kiinteät aikaan sidotut kustannukset eivät yleensä poikkea reitistä toiseen, ja ne määritetään normaalia kustannuslaskentaa käyttäen. Tämän vuoksi seuraavassa tarkastellaan vain ajo- ja terminaalikustannuksia.

Ajokustannuksista muuttuvat ajoneuvokustannukset voidaan määrittää ajoneuvosimulointia käyttäen.

Terminaalikustannukset määräytyvät kuljetusalan mukaisten kuormaus- ja purkausmenetelmien ja terminaalioloista riippuvien odotusaikojen mukaan.

**Muuttuvat ajoneuvokustannukset:** Ajoneuvosimuloinnin avulla voidaan tuottaa vain suoritteiden eli polttoaineen ja ajoajan määrätiedot, siis polttoaineen kulutusmäärä ja ajoaika sekä lisäksi moottori- sekä veto- ja jarrutyöt. Polttoainemäärän perusteella määritetään laskennallisesti CO<sub>2</sub>-päästö määrä.

Ajokustannuksiin vaikuttavien tekijöiden määräytymistä muuttuvissa oloissa havainnollistaa kuormatun puutavara-ajoneuvon liikkeen simulointi metsävarastolta tehtaalle ja kuormaamattomana takaisin. Ajonopeudessa ja polttoaineen kulutuksessa on suurta vaihtelua ajomatkan eri osilla (kts. kuvat 1 ja 2), koska puutavara-ajoneuvojen reitit koostuvat metsäpään osalta yksityisteistä (metsäauto- tai tilusteistä) ja muilta osin yleisistä teistä (yhdys-, seutu-, kanta- tai valateistä).

Muiden kuljetusalojen reitit koostuvat yleensä pääasiassa yleisistä, mutta taajamien ja varsinkin kaupunkien alueella liikenteen sujuvuus laskee alhaisten nopeuksien ja suuren nopeusvaihtelun vuoksi. Katuverkon liittymätiheys liikennevaloihin laskee nopeutta ja lisää sen vaihtelua. Tällöin polttoaineen kulutus ja ajoaika kasvavat merkittävästi verrattuna ajoon yleisillä teillä.

Kuljetusaloittain ja myös saman kuljetusalan tapauksessa reitit ovat erilaisia joko väylän teknisten ominaisuuksien (lähinnä pituuskaltevuus) tai liikenteen sujuvuuden vuoksi.

**Ajoneuvosimuloinnissa tarvittavat tiedot:** Reittien erilaisuus ja sen vaikutukset voidaan ottaa huomioon ajoneuvosimulointia käytettäessä edellyttäen, että seuraavat tiedot sekä ajoneuvosta että väylästä ja liikenteen sujuvuudesta ovat käytettävissä:

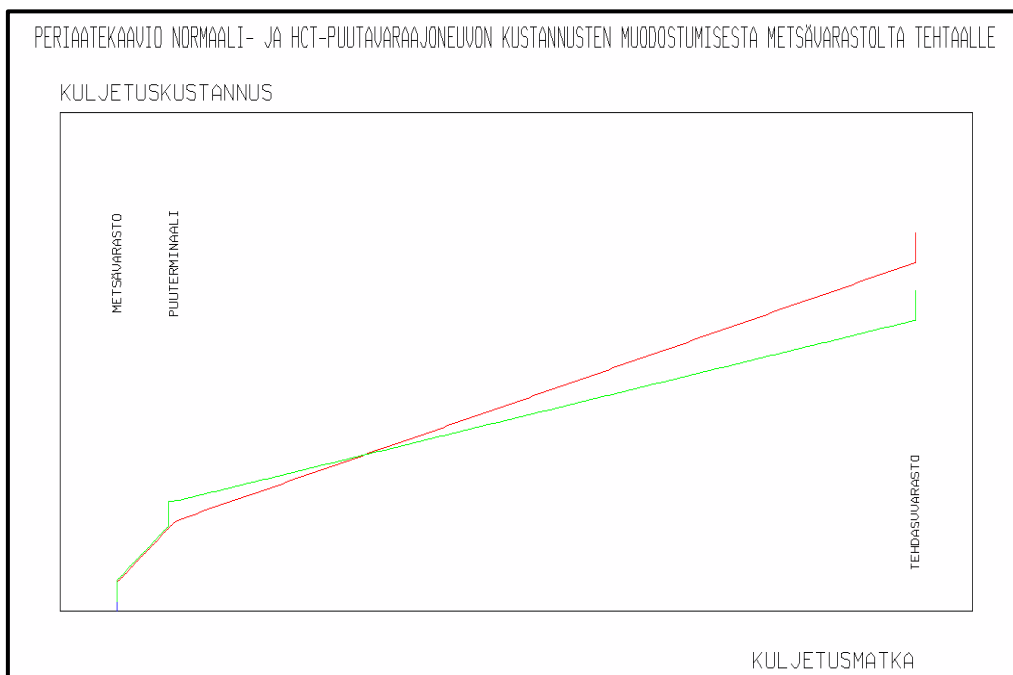
- ajoneuvon tekniset tiedot
- väylän tekniset tiedot (pituuskaltevuus ja tarvittaessa myös vaakalinjaustietoja, mikäli reitillä on nopeutta hidastavia pienisäteisiä kaarteita, kuten on yksityisteillä tai liittymissä, ja tarvittaessa tieto päällysteestä, jos se poikkeaa asfalttikonkreetista ja on pehmeä)
- ajotapa: tviitenopeus ja sen vaihtelu sekä vaihtostrategia

**Terminaalikustannukset:** terminaalikustannukset määräytyvät kuljetusalan mukaisten kuormaus- ja purkausmenetelmien ja terminaaliohjelmien mukaisten odotusaikojen mukaan ja siksi terminaalikustannukset vaihtelevat suuresti.

Mikäli terminaalin toiminta kuormauksen ja purkauksen osalta on hyvin suunniteltu ja toteutettu, voidaan terminaalikustannukset määrittää asiaa koskevien (kuormaus ja purkaus) mallien avulla.

Mikäli terminaalin toiminta on vaihtelevaa niin, että syntyy odotuksia, joiden pituuksia ei osata ennakoita, on turvaututtava erityisselvityksiin ja arvioitava kuormaus- ja purkausajat sekä odotusajat sen mukaisesti.

Kuva 4 osoittaa kustannusten muodostumista puutavarakuljetuksissa.



Kuva 4. Periaatekaavio kustannusten muodostumisesta puutavarakuljetuksista normaali- ja HC-ajoneuvojen tapauksessa

#### 4.2 Ehdotus tietotuotannon kehittämiseksi

Ehdotus koskee kolmea asiaa ja on seuraava:

1. **Valtakunnallisen DIGIROAD-järjestelmän kehittäminen**, jotta sitä voitaisiin käyttää myös ajoneuvosimuloinnin perusteena: DIGIROAD-järjestelmään tulisi sisällyttää ensisijaisesti yleisten teiden ja katujen tiedot niiden pituuskaltevuuksien määrittämiseksi

DIGIROADissa ei ole väylien korkeustietoja väylien pituuskaltevuuksien eli mäkisyyden määrittämiseksi. Mainitut tiedot ovat kuitenkin olennaisia, koska mäet, niiden jyrkkyys ja pituus vaikuttavat merkittävästi ajoneuvojen energiankäyttöön ja päästöihin sekä liikenneturvallisuuteen, varsinkin liukkailla keleillä sekä myös raskaiden ajoneuvojen sujuvuuteen.

Tietotuotanto tulisi suunnitella ja toteuttaa liikennemäärät ja liikenteen rakenne huomioon ottaen (raskaalla tavaraliikenteellä painottaen) seuraavasti:

- valta- ja kantatiet
- seututiet ja katuverkot,
- yhdystiet
- yksityistiet tarpeen mukaan ja tiedon tuottamiseen tarjolle tulevan teknologian tarjoamien uusien mahdollisuuksien mukaan

#### 2. **Liikenteen sujuvuustietojen tuottaminen kaupunkien sisääntulo-/ulosmenoväylillä**

Liikenne keskittyy kaupungistumisen myötä kaupunkien sisääntulo-/ulosmenoväylille enenevässä määrin sekä henkilö- että tavaraliikenteen osalta. Niiden sujuvuuden heikentyminen ja ruuhkautuminen lisää energiankäyttöä ja siten päästöjä sekä liikenteessä kuluva aikaa ja näiden seurauksena liikenne- ja kuljetuskustannuksia. Huonon sujuvuuden ansiosta energiankäyttö ja päästömäärät voivat jopa kaksinkertaistua ja samoin ajantarve sekä liikenne- ja kuljetuskustannukset.

Tietotuotanto tulee suunnitella ja toteuttaa liikennemäärät ja liikenteen rakenne huomioon ottaen (raskaalla tavaraliikenteellä painottaen) seuraavasti:

- Pääkaupunkiseudun sisääntulo-/ulosmenoväylät sekä väylät satamiin ja muihin tavaraterminaaleihin
- Muiden suurten kaupunkien sisääntulo-/ulosmenoväylät sekä väylät satamiin ja muihin tavaraterminaaleihin tapauskohtaisesti

HCT-ajoneuvoja ei voida käyttää katuverkossa. Huomattakoon myös, että monissa kaupungeissa tavaraterminaalit on sijoitettu kaupunkien laitamille tai ulkopuolelle, Väylät satamiin, joissa HCT-ajoneuvoja käytetään, kiertävät kaupunkikeskustat pääsääntöisesti.

3. **Moottorikarttojen teettäminen uusista, aikaisempaa tehokkaimmista ja eri energialajeja (ml. biopolttoaineet) käyttävistä moottoreista** ja ensisijaisesti HCT-ajoneuvojen käyttämisestä suuritehoisista moottoreista.

Moottorikartat ovat ajoneuvosimuloinnin keskeinen ja välttämätön osa. Moottoreita kehitetään jatkuvasti, joten myös moottorikarttoja tulisi tuottaa, jotta ajoneuvosimuloinnissa voidaan ottaa huomioon kehitys ja sen muutokset, jotta voitaisiin määrittää polttoaineen lisäksi myös päästömäärät.

# Selvityksessä käytetyt käsitteet

Jussi Sauna-aho, 15.5.2018

AASHO	= <b>AASHO Road Test</b> on USA:n tieviranomaisten (the American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)) tekemä tutkimus, jossa määritettiin erilaisten ajoneuvojen aiheuttama tiekuormitus sekä sitä koskeva käsitteistö ja mittausmenetelmät vv. 1958–1962.
Ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän	
Ekvivalenttiakselien määrä	= ajoneuvon akseliryhmien ekvivalenttiakselilukujen summa
Ajoneuvon tiekuormitus	= ajoneuvon kuorma jaettuna ajoneuvon ekvivalenttiakselien määrällä [t/ekvivalenttiakseli]
Ajosuorite	= yksittäisen ajoneuvon kulkema matka
Ajovastus	= ajoneuvon liikettä vastustava voima
Ajovastuskertoimet	= vierintä- ja ilmanvastuskertoimet
COAST DOWN-menetelmä	= menetelmä, jossa mitataan ajoneuvon nopeus ajan tai matkan mukaan
Ekvivalenttiakseli	= ekvivalenttiakseli tarkoittaa tiekuormitusta, jonka ns. yksikköakseli eli yksi paripyörin varustettu akseli, jonka massa on 10 t, aiheuttaa tiehen. Ajoneuvon muiden akselien tai akseliryhmien ekvivalenttiakseliluvut määritetään suhteessa yksikköakselin aiheuttamaan tiekuormitukseen ottamalla huomioon akseliryhmän rakenne ja massa
ESAL	= lyhenne sanoista Equivalent Single Axel Load. ESAL on käsite, joka määriteltiin USA:n AASHO-Road Testin yhteydessä. Se osoittaa erilaisten akseliryhmien ja niihin kohdistuvien massojen aiheuttamaa tiekuormitusta suhteessa yhden paripyöräakselin aiheuttamaan tiekuormitukseen, kun paripyöräakseliin kohdistuva massa on 10 t.
HCT-ajoneuvo	= HCT (High Capacity Transport) -ajoneuvo on nykyäänöistä poikkeava ajoneuvoyhdistelmä, jonka kokonaismassa tai pituus tai molemmat ylittävät nykyäänösten mukaiset arvot massan osalta 76 t ja kokonaispituuden osalta 25,25 m. (Olisi sujuvampaa käyttää nimeä HC-ajoneuvo ja suomeksi SK-ajoneuvo eli Suurkapasiteetti-ajoneuvo. HCT-ajoneuvohan on sananmukaisesti Suurkapasiteettikuljetusajoneuvo).
Ilmanvastusvoima	= patopaineen, ajoneuvon otsapinta-alan $A_f$ ja muotokertoimen $C_d$ tulo (= patopaine $A_f C_d$ )

Ilmanvastuskerroin	= ilmanvastusvoima jaettuna nopeuden neliöllä
Muotokerroin	= muotokerroin $C_d$ määräytyy ajoneuvon pituuden, osien lukumäärän, niiden otsapinta-alojen, keskinäisten välimatkojen ja pinnan ominaisuuksien perusteella. Muotokerroin vaikuttaa suoraviivaisesti ajoneuvon ilmanvastukseen.
Kuljetussuorite	= ajoneuvon kuljetussuorite on kuormasuuruuden ja ajo- tai liikennesuoritteen tulo.
Kuorma	= kuorma on kuljetettava henkilö- tai tavaramäärä ja se määritetään kuormana olevan tavarankäsittelyn ominaisuuksien mukaan. Kuormaa voidaan mitata massana, pituutena, pinta-alana, tilavuutena, lukumääränä.
Kuormalava	= kuormalavaa käytetään kuljetuksissa tavarankäsittelyn helpottamiseksi. Kuormalavan koko vaihtelee: EUR-lava [800 x 1200 mm], FIN-lava [1000 x 1200 mm] ja rullakko [600 x 800 mm] sekä lisäksi on erikoismittaisia lavoja
Liikennesuorite	= ajoneuvojen kulkema matka
Massa-mittapiirros	= piirros, joka osoittaa ajoneuvon (tai ajoneuvoyhdistelmän) sivuprofiilikuvan ja mitat sekä massat ja tiekuormitusta osoittavat kuormat ekvivalenttiakseleina akseleittain, akseliryhmittäin ja koko ajoneuvon osalta
Nykyajoneuvo	= voimassa olevien säädösten mukainen ajoneuvo, jonka maksimipituus on 25,25 m ja maksimimassa 76 t
Patopaine	= ilmantiheyden ja nopeuden neliön tulo jaettuna kahdella
Rullakko	= rullakkoa käytetään kuljetuksissa tavarankäsittelyn helpottamiseksi. Rullakoiden mitat vaihtelevat [400 x 300 mm, 600 x 400 mm, 600 x 800 mm, jne].
SK-ajoneuvo	= HC-ajoneuvon suomenkielinen vastine (Suurkapasiteetti-ajoneuvo)
Vierintävastusvoima	= ajoneuvon massan $M$ , gravitaatiokiihtyvyyden $g$ ja vierintävastuskertoimen tulo
Vierintävastuskerroin	= kerroin, jonka arvo määräytyy ajoneuvon massan, rengasmäärän ja nopeuden perusteella

ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-317-616-4  
[www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi)

Liik  
enne  
vira  
sto

