



Juho Jolkkonen

Raskaan ajoneuvoyhdistelmän vaihtoehtoisen suorituskykytestin kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

1.12.2022

Tiivistelmä

Tekijä:	Juho Jolkkonen
Otsikko:	Raskaan ajoneuvoyhdistelmän vaihtoehtoisen suorituskykytestin raja-arvojen määrittäminen
Sivumäärä:	64 sivua + 4 liitettä
Aika:	1.12.2022
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Johtava asiantuntija Otto Lahti, Liikenne- ja viestintävirasto Traficom Lehtori Juho Vallivaara, Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööriyö toteutettiin Liikenne- ja viestintävirasto Traficomille ja sen aiheena oli raskaiden ajoneuvoyhdistelmien vaihtoehtoisten suorituskykytestien kehittäminen ja raja-arvojen määrittäminen. Raskaan kaluston valikoimassa yleistyvät sähkö- ja hybridivoimanlähteet tarjoavat erilaista suorituskykyä verrattuna perinteiseen polttomoottoriin, joten nykyinen tieliikennelaissa asetettu teho-painosuhteen vaatimus 5 kW/tonni riittävästä suorituskyvystä ei ole paras mahdollinen mittari vaatimuksen taustalla olevaan kiihtyvyyden ja mäennousukykyvaatimukseen. Sen takia tässä insinööriyössä pyrittiin määrittämään raja-arvot raskaan ajoneuvoyhdistelmän vaihtoehtoiselle suorituskykytestille ja suoralle laskentatavalle. Työssä perehdyttiin myös mm. muiden maiden lainsäädäntöön, suorituskykytesteihin, moderneihin voimansiirtoratkaisuihin, ajovastuksiin sekä älykkäisiin vakionopeudensäätimiin.

Insinööriyö laadittiin heinäkuun ja joulukuun välisenä aikana vuonna 2022, ja sen toteutukseen osallistui Traficom ja raskaan kaluston ajoneuvovalmistajien edustajia. Työ aloitettiin lainsäädännön, kehitystarpeiden sekä tekniikoiden kirjallisuusselvityksellä. Tietoa haettiin verkkomateriaaleista, oppikirjoista ja lehtiartikkeleista. Seuraavassa työvaiheessa laadittiin ajovastuslaskelmat, ajovastuskuvaajat sekä ajotilapiirrokset GNU Octave -laskentaohjelmistolla. Lopuksi haastateltiin ajoneuvovalmistajien edustajia ja suoritettiin käytännön mittaus todellisen ajotehtävän aikana.

Ensisijaista tavoitetta eli tarkkojen raja-arvojen määrittämistä ei saavutettu, sillä yhden testimittauksen perusteella ei saatu riittävän kattavasti tietoa lainsäädäntöuudistuksen tekemiseksi. Siitä huolimatta insinööriyössä onnistuttiin keräämään arvokasta tietoa mm. ajovastuksista, modernin dieselmoottorin suorituskyvystä täydellä kuormalla, suorituskykytesteistä ja ajoneuvomaahantuojaisten näkemyksistä sekä kokeista ja testausparametreista. Tätä insinööriyötä voidaan hyödyntää pohjana laajemmille suorituskykytesteille.

Avainsanat: Traficom, HCT, PBS, tieliikennelaki, suorituskyky, hybridiajoneuvo, täyssähköajoneuvo

Abstract

Author: Juho Jolkkonen
Title: Development of an Alternative Performance Test for High-Capacity Transport
Number of Pages: 64 pages + 4 appendices
Date: 1 December 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisors: Otto Lahti, Leading Expert, Finnish Transport and Communications Agency Traficom
Juho Vallivaara, Senior Lecturer, Metropolia University of Applied Sciences

This thesis was carried out for the Finnish Transport and Communication Agency Traficom. The objective of the thesis was to determine the limit values and develop a performance test for high-capacity transport vehicles. Electric and hybrid powertrains in heavy-duty vehicles, the number of which is increasing every year on the public roads, offer different kind of performance figures compared to the traditional combustion engine. Because the current requirement for sufficient performance, 5 kW/ton, does not correspond anymore to the modern technical capabilities, this thesis aims at determining the limit values of the alternative performance tests and direct calculation method for high-capacity transport. In addition, this thesis studies and discusses high-capacity transport legislation in other countries, driving resistance forces and intelligent cruise control systems.

This thesis was carried out during July and December in 2022 and representatives from Traficom and several different heavy-duty vehicle companies participated in this work. First the research of legislation development needs and technologies were studied. After that, information was gathered from online materials, news articles and schoolbooks. Next the calculations for driving resistance forces and composing the driving resistance graphs and tractive force/speed diagrams with GNU Octave software were created. Finally, the representatives of the vehicle manufacturers were interviewed, and a real-life test onboard a high-capacity transport was carried out.

The primary objective of the thesis, determining the exact limit values, was not achieved. The reason for this was that the data collected during one test measurement were not enough in order to make any changes in the current Road Traffic Act. Despite that, this thesis includes valuable information on driving resistance forces, performance of a modern diesel engine with maximum load, legislation of other countries and performance tests as well as vehicle manufacturers' opinions. This thesis can be used as a base or information source for larger and more comprehensive performance tests.

Keywords: Traficom, HCT, PBS, Road Traffic Act, performance, hybrid vehicle, electric vehicle

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lainsäädäntö	3
2.1	Nykytilanne Suomessa	3
2.2	Taustaa nykylainsäädännölle	4
2.3	Australian lainsäädäntö	6
2.4	Ruotsin lainsäädäntö	12
2.5	Lainsäädäntöä muista maista	14
3	Kehitystarpeet	16
3.1	Tunnistetut tarpeet uudelle määräykselle	16
3.2	Kehitystarpeiden kannalta muutamia esimerkkituotteita	17
3.2.1	ABB AMXE200 -sähkömoottori	17
3.2.2	Sisu Polar Hybrid	18
3.2.3	VAK E-akseli	20
4	Fysikaaliset laskemat	22
4.1	Ajovastukset	22
4.1.1	Taustatietoja laskemille	22
4.1.2	Nousuvastus	24
4.1.3	Vierinvastus	25
4.1.4	Ilmanvastus	28
4.2	Ajotilapiirros	34
5	Voimansiirtoratkaisut	41
6	Älykäs vakionopeudensäädin	45
6.1	Mihin älykkäiden vakionopeudensäädinten toiminta perustuu?	45
6.2	Volvo I-See	46
6.3	Mercedes-Benz Predictive Powertrain Control (PPC)	47
6.4	Scania Cruise Control with Active Prediction	49
7	Käytännön testi	50

7.1	Mittausjärjestelyt	50
7.2	Mittaustulokset	52
8	Mittaustulosten analysointi ja yhteenveto	55
8.1	Analyysi saaduista mittaustuloksista	55
8.2	Yhteenveto	58
	Lähteet	60

Liitteet

Liite 1: Auton ja perävaunun yhdistelmän suurin sallittu massa (122 §)

Liite 2: Australian PBS-standardit

Liite 3: ABB AMXE200 -data sheet

Liite 4: Vehicle envelopes

Lyhenteet

ETA	Euroopan talousalue. Yhteismarkkina-alue, jolla toteutetaan pääomien, työvoiman, palveluiden ja tavaroiden vapaata liikkuvuutta.
HCT	<i>High Capacity Transport</i> . Kansainvälisesti vakiintunut termi tieliikenteessä sallittua pidemmille tai raskaammille yhdistelmäajoneuvoille, joita ei kuitenkaan pidetä erikoiskuljetuksina.
GPS	<i>Global Positioning System</i> . Yhdysvaltain puolustushallinnon ylläpitämä maata kiertävien satelliittien järjestelmä, jota käytetään mm. paikannukseen.
GNU	GNU Octave. Numeerinen laskenta- ja mallinnusohjelmisto sekä siinä käytettävä ohjelmointikieli. Se on GNU-projektin kehittämä vapaa ohjelmisto.
PBS	<i>Performance Based Standards</i> . Kokoelma standardeja ja erilaisia suorituskyykyvaatimuksia HCT-ajoneuvojen luokitteluun, suunnitteluun ja tieliikennekelpoisuuteen liittyen.
E-akseli	VAK Oy:n tutkimushanke perävaunuun asennettavasta sähköakselista, joka toimii generaattorina jarrutusenergian talteenotossa ja avustavana sähkömoottorina ajotilanteissa.
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i> . Tietokonesimulointiohjelmisto, jonka avulla voidaan havainnollistaa ja laskea kappaleiden ilmavirtauksia, pyörrekohtia ja paine-eroja.
CVT	<i>Continuous variable transmission</i> . Lyhenteellä tarkoitetaan portaatonta vaihteistoa Kyseisessä konstruktiossa ei ole erillisiä vaihteita, ja sitä myöten voimantuotto ei katkea missään vaiheessa.

kW	Kilowatti. Watti on tehon yksikkö ja se kuvastaa tehtyä työtä sekunnin aikana. Yksi joule työtä sekunnin ajan vastaa yhtä wattia. Kilowatti on 10^3 W.
km/h	Nopeuden yksikkö. Ilmaisee, kuinka monta kilometriä tunnissa kuljetaan kyseisellä ajonopeudella.
Nm	Newtonmetri. SI-järjestelmässä momentin yksikkö. Tarkoittaa käytettyä voimaa tietyllä matkalla. Esimerkiksi 10 newtonmetrin momentti saadaan, kun metrin varrella väännetään 10 newtonin voimalla.
hp	<i>Horse power</i> eli hevosvoimat. Käytetään yleisesti arkikielessä moottorien tehon yksikkönä. Hevosvoimat eivät kuitenkaan ole SI-järjestelmän mukainen mittayksikkö. $1 \text{ kW} \approx 1,36 \text{ hp}$.
Rpm	<i>Rounds / revolutions per minute</i> eli kierrosta minuutissa. Ilmoittaa, kuinka monta täyttä 360 asteen kampiakselin kierrosta moottori pyörii minuutissa.
STRO	<i>The Scandinavian Tire&Rim Organization</i> . STRO suorittaa rengas-, vanne- ja pyöräteollisuuden teknisten normien julkaisemista, tiedottaa yleisesti renkaita ja vanteita koskevista teknisistä tiedoista sekä toimii yhteistyössä alan viranomaisten ja yritysten kanssa.
VTI	Ruotsin kansallinen tie- ja kuljetustutkimuslaitos.

1 Johdanto

Viime vuosina vaikuttavimpia tekijöitä ajoneuvolalla ovat olleet ajoneuvojen sähköistyminen ja päästöjen vähentäminen. Kaksi- ja kolmipyöräisten ajoneuvojen, nelipyöräisten sekä henkilöautojen yhteydessä uusia ratkaisuja on nähty mm. erilaisissa voimansiirtotavoissa, vaihtoehtoisissa polttoaineissa ja materiaalivalinnoissa. Vaikka edellä mainituissa ajoneuvoluokissa kehitys on ollut huomattavasti nopeampaa ja näkyvämpää, on myös raskaan kaluston tekniikassa tapahtunut runsaasti kehitystä. Tieliikenteessä sallittu suurin yhdistelmämassa on kasvanut viimeisen vuosikymmenen aikana, ja etenkin dieselmootoreiden tekniikassa on tapahtunut huomattavaa kehitystä. Samoihin teholumeneihin päästään entistä pienemmällä määrällä polttoainetta, moottorit ovat energiatehokkaampia, ja päästöt voidaan puhdistaa entistä huolellisemmin. Modernit yhdistelmäajoneuvot voidaan varustaa hybridivoimalinjalla, eli tehontuotosta vastaavat yhdessä esimerkiksi yksi diesel- ja yksi sähkömoottori. Lisäksi markkinoille on lähivuosina tulossa perävaunuja, joissa vähintään yhteen akseliin on integroitu sähkömoottori avustamaan varsinaista vetoautoa.

Nykyinen lainsäädäntö ja tieliikennelaissa määritelty riittävän suorituskyvyn määritelmä tehon ja massan suhteesta eivät enää vastaa täysin tekniikan kehitystä. Talven 2023 aikana Liikenne- ja Viestintävirasto Traficom suunnittelee uutta määräystä raskaille ajoneuvoyhdistelmille riittävän suorituskyvyn osoittamiseksi. Vaihtoehtoinen osoitustapa tulee perinteisen osoitustavan rinnalle.

Jotta vaihtoehtoinen osoitustapa riittävästä suorituskyvystä voidaan lain nojalla antaa, täytyy sille asettaa raja-arvot tietyissä ajotilanteissa. Tämän opinnäytetyön tavoitteena onkin siis tutkia raskaiden ajoneuvoyhdistelmien käytännön suorituskyvyn suhdetta tieliikennelaissa annettuun teho-painosuhteraajaan sekä tutustua mm. muiden maiden suorituskykyvaatimuksiin ja ajovastuksiin. Käytännön suorituskykyä tutkittiin täyteen kuormatulla yhdistelmäajoneuvolla tehtävällä testimatalla. Sen perusteella tarkoituksena oli muodostaa esitys sopivista raja-

arvoista kiihdytys- ja mäkipokeelle vaihtoehtoisena riittävän suorituskyvyn osoitustapana. Lisäksi pyrittiin määrittelemään tarkempi mittaustapa eli se, miten itse suorituskykytesti toteutetaan.

Opinnäytetyö tehtiin Liikenne- ja Viestintävirasto Traficomille vuoden 2022 kahden viimeisen vuosineljänneksen aikana, jotta uusi määräyshanke voidaan käynnistää tulevan talven aikana. Opinnäytetyön eri vaiheisiin osallistui henkilöstöä Traficomista sekä useita yhteistyökumppaneita ajoneuvomaahantuoja- ja -valmistajien toimesta. Aihe on hyvin ajankohtainen ja opinnäytetyöstä saatava tieto tärkeää, sillä kokonaisvaltaista selvitystyötä aiheesta ei ole julkaistu ja vaihtoehtoinen suorituskyvyn osoitustapa tarvitaan ripeällä aikataululla ajoneuvokannan jatkuvasti kehittyessä sekä mm. hybridivoimalinjojen yleistyessä yhdistelmäajoneuvoissa. Opinnäytetyön lopputuloksena pyritään saamaan suora laskentatapa hybridi- ja täyssähkövoimalinjoille sekä muodostamaan raja-arvot perinteiselle suorituskykymittaukselle mille tahansa voimalinjalle. Opinnäytetyönä toimiva esiselvitys tukee lainsäädäntöuudistuksen määräysvalmistelua.

Opinnäytetyö sisältää useita eri vaiheita ja toteutustapoja. Kirjallisuusselvitys, lainsäädäntö ja teorian tieto on koottu esimerkiksi verkkomateriaaleista, lehtijulkaisuista sekä oppikirjoista. Eri kuorma-autovalmistajien ja maahantuoja- ja -valmistajien kanssa järjestettiin haastatteluita liittyen mm. älykkäiden vakionopeusäädinten toimintaan ja siihen, miten vaihteistoa ohjataan erilaisissa ajotilanteissa ja -tehtävissä. Ajotilapiirros sekä käytännön testejä varten tehtävät laskelmat ajovastuksista laadittiin GNU Octave -laskentatyökalulla. Lopuksi varsinaiset käytännön mittaukset toteutettiin yhteistyössä jonkin raskaita ajoneuvoyhdistelmiä käyttävän logistiikkayrityksen kanssa. Esitys vaihtoehtoisien suorituskykytestin raja-arvoista ja suorasta laskentatavasta pyrittiin antamaan näiden testien sekä laskelmien perusteella.

2 Lainsäädäntö

2.1 Nykytilanne Suomessa

Vuonna 2020 voimaan tullut tieliikennelaki (2018) asettaa tieliikenteessä sallituille yhdistelmäajoneuvoille suorituskykyvaatimukset. Uusi tieliikennelaki kumosi entisen asetuksen ajoneuvojen käytöstä tiellä. Tieliikennelain pykälä 122 ja siinä annettu määräysvalta sekä liite 6.6 määrittävät ajoneuvoyhdistelmältä vaadittavan tehon sen kokonaismassan perusteella. Lain kohdat kuuluvat seuraavasti:

122 § - ETA-valtiossa rekisteröidyn tai käyttöön otetun auton ja perävaunun yhdistelmän suurin sallittu massa

ETA-valtiossa rekisteröidyn tai käyttöön otetun auton ja perävaunun tai perävaunujen muodostaman ajoneuvoyhdistelmän massa ei saa ylittää liitteessä 6.6 mainittuja arvoja eikä vetoajoneuvon ja hinattavan ajoneuvon tai hinattavien ajoneuvojen liikenneasioiden rekisteriin merkittyjen massojen summaa. Ajoneuvoyhdistelmän massa ei saa ylittää vetoajoneuvolle liikenneasioiden rekisteriin merkittyä suurinta sallittua yhdistelmämassaa eikä vetoajoneuvolle teknisesti sallittua ajoneuvoyhdistelmän massaa. [Tieliikennelaki 2018: § 122.]

Liite 6.6

Massaltaan yli 44 tonnin ajoneuvoyhdistelmän tehon on oltava vähintään 5 kilowattia jokaista yhdistelmämassan tonnia kohden. Liikenne- ja viestintäviraston antaa tarvittaessa määräyksiä vaihtoehtoisista tavoista osoittaa ajoneuvoyhdistelmän riittävä suorituskyky. [Tieliikennelaki 2018: § 122.]

Taulukko auton ja perävaunun yhdistelmän suurimmista sallituista massoista (122 §) on liitteessä 1.

2.2 Taustaa nykylainsäädännölle

Suurin sallittu yhdistelmämassa tieliikenteessä ilman poikkeuslupaa on annettu 2013 voimaan tulleessa valtioneuvoston asetuksessa ajoneuvojen käytöstä tiellä. Asetuksen 407/2013 pykälässä 23 § auton ja perävaunun yhdistelmän massa saa enintään olla 76 tonnia [Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 2013: § 23]. Ennen vuotta 2013 suurin sallittu massa oli 60 tonnia. Vaikka vuoden 2019 lainsäädäntömuutoksen myötä suurin sallittu massa pysyi edelleen 76 tonnissa, mahdollisti se kuljetusyrityksille suurempien perävaunutilavuuksien ja 76 tonnin kokonaispainon laajemman hyödyntämisen.

Edellä mainittu lainsäädäntömuutos on viimeisin raskasta kalustoa koskeva lakiuudistus. Muutos tuli voimaan 21.1.2019, kun yhdistelmien suurin sallittu pituus kasvoi lähes 10 metrillä, 25,25 metristä 34,5 metriin, ja tieliikenteeseen sallittiin uudenlaisia toteutustapoja pidemmille yhdistelmäajoneuvotyypeille [Lahti 2019]. Uusia yhdistelmätyyppejä olivat mm. kolminiveliset yhdistelmät, kuten ETT-yhdistelmä eli AB-tupla (kuva 1) ja B-tripla (kuva 2), sekä A-tupla (kuva 3) [Lahti 2020].



Kuva 1. ETT-yhdistelmä eli AB-tupla-yhdistelmäajoneuvo.



Kuva 2. B-tripla-yhdistelmäajoneuvo.



Kuva 3. A-tupla-yhdistelmäajoneuvo.

Lainsäädäntömuutoksessa tieliikenteessä sallittujen entistä pidempien, HCT-rekkojen, enimmäispituudet kasvoivat mutta niiden suorituskykyvaatimukset eivät muuttuneet. Nykyisellä lainsäädännöllä ajoneuvoyhdistelmän riittävän suorituskyvyn osoitustapa perustuu jatkuvan tehon ja yhdistelmämassan suhteeseen. Yhdistelmämassalla tarkoitetaan vetoauton, perävaunun tai -vaunujen sekä kuorman yhteismassaa. Jatkuva teho on rekisteriin merkitty yhtäjaksoisesti käytettävissä oleva teho.

Pitkiä yhdistelmäajoneuvoja on kuitenkin ollut liikenteessä poikkeusluvilla jo useita vuosia ja siinä ajassa niillä on ehditty ajaa lukemattomia testikilometrejä ja kokeiluja. Esimerkiksi vuonna 2013 entinen Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi myönsi kuljetusyhtiö Speed Oy:lle viideksi vuodeksi ensimmäisen kokeilu-

luvan yhtiön Ekorekkakokeiluun. Kokeilulupa koski suurikapasiteettista moduuliyhdistelmää, joka koostui vetoautosta, kahdesta puoliperävaunusta sekä yhdestä apuvaunusta eli dollystä, joka oli kytketty etummaisen vaunun vetokitaan. Pituutta yhdistelmällä oli 33,5 metriä ja kokonaismassa enimmillään 80 tonnia [Ketonen 2013].

2.3 Australian lainsäädäntö

Australia oli maailmassa yksi ensimmäisistä maista, joissa poikkeuksellisen raskaita yhdistelmäajoneuvoja alkoi liikennöidä. Muun muassa maan runsaan kairo- ja puuteollisuuden tarpeisiin oli kysyntää yhä suuremmille yhdistelmille. Niitä varten laadittiin erityinen lainsäädäntö, jonka avulla voidaan arvioida ja määrittää, onko ajoneuvoyhdistelmä tarpeeksi turvallinen ja riittävän tehokas tieliikenteeseen sekä tieliikenteessä se, millä kaikilla tieosuuksilla yhdistelmällä saa ajaa. 30. päivä heinäkuuta 2007 National Transport Commission esitteli niin sanotut PBS-standardit: 17 kappaletta erilaisia standardeja jaettuna viiteen eri kategoriaan, kuten voimansiirtostandardit, hitaan ajon suorituskyvyn standardit sekä ajoneuvon vakauden standardit [Performance Based Standards – An introduction for road managers 2019: 19]. Australian Transport Council hyväksyi standardit käyttöön 3. lokakuuta 2007 [Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules 2020: 2]. Opinnäytetyön kannalta oleellisimpia PBS-standardeja ovat voimansiirtoa koskevat standardit, jotka on merkitty liitteen 2 taulukkoon keltaisella värillä. Samassa liitteessä ovat myös kaikki muut standardit.

HCT-ajoneuvojen liikennekelpoisuuden määrittelyyn käytettävät PBS-standardit liittyvät suoraan taulukossa 1 esiteltyihin tasoihin. Tieliikennekelpoisuuden tasot (engl. *Road Access Level Classification*) määrittävät sen, missä ja millä tieosuuksilla tietyn kokoisella HCT-ajoneuvolla saadaan ajaa sekä sen, kuinka tiukat suorituskykyvaatimukset niillä on. Nämä vaatimukset tulevat aiemmin mainituista 17 PBS-standardista, ja vaikka taulukossa puhutaankin suorituskykyvaatimuksista, ne pitävät sisällään myös mm. turvallisuusvaatimuksia ja ajoneuvonhallinnan vaatimuksia. Kuten taulukosta 1 nähdään, tason 1 ajoneuvoilla on

kaikkein tiukimmat vaatimukset, koska niiden käyttöä tieosuuksilla ei ole rajoitettu. Tason 1 ajoneuvoilla saa siis ajaa kaupungeissa, taajamissa sekä kaikista syrjäisemmillä seuduilla. Samoja tieosuuksia käyttävät siten myös esimerkiksi henkilöautot, jalankulkijat sekä pyöräilijät, ja etenkin kaupungeissa kadut voivat olla ahtaita ja vaikeakulkuisia yhdistelmäajoneuvolle. Täten näiltä ajoneuvoilta vaaditaan turvallisuuden ja ajohallinnan osalta eniten. Tason 1 ajoneuvoja ovat mm. jakeluautot ja puoliperävaunuyhdistelmät. [High Capacity Transport – Towards Efficient, Safe and Sustainable Road Freight 2019: 46.]

Taulukko 1. Tieliikennekelpoisuuden tasot PBS-ajoneuvoille Australiassa. [High Capacity Transport – Towards Efficient, Safe and Sustainable Road Freight 2019: 47]

Tieliikennekelpoisuuden tasot	Ajoneuvon sallittu pituus	Sallitut tieosuudet	Suorituskykyvaatimukset
Taso 1	≤ 20 m	Ei rajoituksia	Kaikkein tiukimmat
Taso 2	≤ 30 m	Merkittävät kuljetusreitit	
Taso 3	≤ 42 m	Suurimmat kuljetusreitit	
Taso 4	≤ 60 m	Syrjäiset seudut	Kaikkein löyhimmät

Edetessä tasoa ylemmäs yhdistelmien suurin sallittu pituus kasvaa ja suorituskykyvaatimukset löyhentyvät mutta HCT-ajoneuvoille sallitut tieosuudet vähenevät. Lopulta tasoa 4 vastaavat yhdistelmät ovat niin sanottuja maantiejunia, joiden pituudet voivat ylittää jopa 53 metriin, ne voivat koostua neljästä perävauhasta, ja yhdistelmän kokonaismassa voi nousta 130 tonniin saakka. Kuvassa 4 on esimerkki vastaavasta HCT-yhdistelmästä. Tason 4 ajoneuvoilla saa ajaa käytännössä vain syrjäisimmillä alueilla ja Australian takamailla, joissa välimatkat ovat pitkiä, liikennettä on vähän ja ajo-olosuhteet otolliset. [High Capacity Transport – Towards Efficient, Safe and Sustainable Road Freight 2019: 46; 93.]



Kuva 4. Maantiejuna Australian takamailla [Ruokojärvi 2020: 21].

PBS-standardeissa voimansiirron osuus on jaettu neljään alaluokkaan: kiihtyvyys (acceleration capability), liikkeellelähtökyky ylämäessä (startability), miniminuousukulmassa ajoliikkeen ylläpito (gradeability, A) ja miniminopeuden ylläpito mäessä (gradeability, B) [National Heavy Vehicle Regulator 2019: 20]. Taulukoissa 2 - 5 on esitelty nämä neljä standardia, PBS-standardin tasot, minimivaatimus sekä standardia varten laaditun mittauksen suorittaminen ja ehdot. Jokaisen neljän standardin kohdalla testissä käytetty massa on HCT-ajoneuvon maksimikokonaismassa. Testit on mahdollista suorittaa joko käytännön kokein tai matemaattisella mallinnuksella eli simuloimalla. [Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules 2020: 24 - 30.]

Taulukko 2. Kiihtyvyys. Vähimmäisaika, jona HCT-ajoneuvon on suoritettava 100 metrin matka tasaisella alustalla lähdettäessä liikkeelle paikaltaan. [Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules 2020: 29.]

PBS-taso	Standardin minimivaatimus	Mittaussuoritus
Taso 1	20 sekuntia	Mittausaika pyöristetään 0,1 sekunnin tarkkuuteen. Jokaisessa yhdistelmän renkaassa on oltava uraa jäljellä koko renkaan pinta-alalla vähintään 90 % alkuperäisestä arvosta ja rengaspaineiden on oltava ajoneuvo- tai rengasvalmistajan ohjeistamissa arvoissa. Testipaikan päällysteen on oltava laadultaan yhtenäistä, kuivaa, kovaa ja sileää. Renkaan ja tienpinnan kitkakertoimen maksimi on 0,80. Ajanotto alkaa, kun ajoneuvo liikaahtaa. Testin aikana vaihteita saa tarvittaessa vaihtaa.
Taso 2	23 sekuntia	
Taso 3	26 sekuntia	
Taso 4	29 sekuntia	

Taulukko 3. Liikkeellelähtökyky ylämäessä. HCT-ajoneuvon kyky liikkeellelähtöön paikaltaan tietyllä ylämäen vähimmäisnousukulmalla. [Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules 2020: 24.]

PBS-tasot	Standardin minimivaatimus	Mittaussuoritus
Taso 1	Vähintään 15 %:n nousu	Ajoneuvon on pystyttävä pitämään yllä tasaista ajoliikettä eteenpäin, mutta hetkellinen peruutusliike sallitaan esimerkiksi jarrujen vapautuksen yhteydessä. Renkasvaatimukset samat kuin kiihtyvyyden standardissa (taulukko 2) samoin kuin päällyste- ja kitkakerroinvaatimukset. Tasainen ajoliike eteenpäin katsotaan saavutetuksi, kun yhdistelmän nopeus on joko tasainen tai kasvaa vähintään 5 metrin matkalla.
Taso 2	Vähintään 12 %:n nousu	
Taso 3	Vähintään 10 %:n nousu	
Taso 4	Vähintään 5 %:n nousu	

Taulukko 4. Miniminousukulmassa ajoliikkeen ylläpito. HCT-ajoneuvon kyky ylläpitää ajoliikettä eteenpäin tietyllä ylämäen vähimmäisnousukulmalla. [Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules 2020: 26.]

PBS-tasot	Standardin minimivaatimus	Mittaussuoritus
Taso 1	Vähintään 20 %:n nousu	Nopeudenmuutos mäen alun ja nousukohtan välillä sallitaan, kunhan tasainen jatkuva liike eteenpäin on taattu. Rengas-, päällyste- ja kitkakerroinvaatimukset samat kuin aiemmissa testeissä (taulukko 2). Ylämäkiosuuden, jossa nousukulma on vähintään kyseisen tason minimin, on oltava riittävän pitkä, jotta tasainen ajoliike eteenpäin voidaan saavuttaa. Tasainen ajoliike eteenpäin katsotaan saavutetuksi, kun yhdistelmän nopeus on joko tasainen tai kasvaa vähintään 5 metrin matkalla.
Taso 2	Vähintään 15 %:n nousu	
Taso 3	Vähintään 12 %:n nousu	
Taso 4	Vähintään 8 %:n nousu	

Taulukko 5. Miniminopeuden ylläpito mäessä. HCT-ajoneuvon kyky ylläpitää vähimmäisajonopeutta tietyssä ylämäen nousukulmassa. [Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules 2020: 28.]

PBS-tasot	Standardin minimivaatimus	Mittaussuoritus
Taso 1	Vähintään 80 km/h	Mittauksessa käytetty mäen vähimmäisnousukulma on 1 %. Nopeudenmuutos mäen alun ja nousukohtan välillä sallitaan, kunhan asetettu miniminopeus ei alitu missään vaiheessa. Rengas-, päällyste- ja kitkakerroinvaatimukset samat kuin aiemmissa testeissä (taulukko 2). Tasainen ajoliike eteenpäin vähimmäisnopeudella katsotaan saavutetuksi, kun yhdistelmän nopeus on joko tasainen tai kasvaa vähintään 5 sekunnin ajan. Mitattu ajonopeus pyöristetään aina lähimpään kokonaislukuun.
Taso 2	Vähintään 70 km/h	
Taso 3	Vähintään 70 km/h	
Taso 4	Vähintään 60 km/h	

Liitteessä 2 on havainnollistava kuva kaikista neljästä testistä ja tärkeimmistä lukuarvoista.

2.4 Ruotsin lainsäädäntö

Australian lisäksi Ruotsin katsotaan yleisesti olevan edelläkävijä HCT-ajoneuvojen saralla sekä PBS-standardien käytössä. Australia ja Ruotsi ovat tehneet tiivistä yhteistyötä vuodesta 2011 lähtien mm. pilottihankkeissa sekä käytännön

kehityksessä [High Capacity Transport – Towards Efficient, Safe and Sustainable Road Freight 2019: 18]. Australian keskittyessä PBS-standardien kehittämiseen ja arviointiin Ruotsissa asiaa on tutkittu enemmän vuodenaikojen ja olosuhteiden kannalta. Maantieteellisen sijainnin takia tutkimuksissa on keskitytty erityisesti ajo-olosuhteisiin talvella sekä HCT-ajoneuvojen kykyyn operoida erityisesti lumisilla, jäisillä ja liukkailla tieosuuksilla [Kharrazi ym. 2015: 18]. Tästä syystä myös Suomeen suunniteltavan lainsäädäntöuudistuksen kannalta naapurimaa Ruotsin havainnot ovat tärkeitä.

Vuoden 2013 lopussa Ruotsissa käynnistyi tutkimusprojekti ”PBS-standardit HCT-ajoneuvoille Ruotsissa” (engl. *Performance based standards for high capacity transport in Sweden*), jossa tarkoituksena oli selvittää olemassa olevien standardien soveltuvuus Ruotsiin sekä laatia ehdotus lainsäädännön viitekehystä pohjautuen Ruotsin olosuhteiden kannalta oleellisiin PBS-standardeihin. Jokaista standardin osa-alueita tutkittiin, mutta pääpaino niissä oli kuitenkin turvallisuuden ja ajonhallinnan osissa. [Kharrazi 2017: 5.] Tämän tutkimuksen ja Suomen lainsäädäntöuudistuksen kannalta Ruotsin tutkimustuloksista merkille pantavia osa-alueita ovat samat kuin Australian vastaavat eli kiihtyvyyden, liikkeellelähtö sekä nopeuden ylläpito ylämäessä. Tulokset projektista julkaistiin VTI:n loppuraporteissa 859A sekä 948A [Kharrazi 2017: 10].

Tutkimusprojektin pohjana hyödynnetyt Australian PBS-standardit osoittautuivat varsin kelvollisiksi myös pohjoisiin olosuhteisiin muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Poikkeukset liittyivät talvi- ja kesäolosuhteissa ajotien kitkaeroihin, joten tutkimusprojektiryhmä teki pieniä muutoksia PBS-järjestelmän ehdotukseen kiihtyvyyden, liikkeellelähdön ja ylämäessä nopeuden ylläpidon suorituskykyarvoihin. Loppuraportin 948A taulukossa 14 on listattu nämä muutokset. Liikkeellelähdön osalta todetaan, että perinteisen ajoneuvonkin on hankala lähteä liikkeelle liukkaissa talviolosuhteissa 12 %:n ylämäessä. Ratkaisuna tähän ehdotetaan, että säilytetään 12 %:n nousukulman arvo, mutta mittauksessa sallitaan hetkellinen massansiirto tai -lisäys vetäville akseleille pidon lisäämiseksi. Nopeuden ylläpidon testissä talvella matalammalla kitkan arvolla ei nähty olevan

suurta merkitystä, joten itse mittaukseen ei muutoksia, mutta Ruotsin kuljetushallituksen toimesta yhtenäiseksi nopeuden arvoksi ehdotettiin 70 km/h 1 %:n nousussa. Myöskään kiihtyvyyden testissä talviolosuhteissa matalammalla kitkan arvolla ei nähty olevan merkittävää vaikutusta. Riittävän kiihtyvyyden määrittämiseen käytettyjen aika-arvojen sijaan projektiryhmä ehdotti kuitenkin EU-säännösten mukaisen 5 kW/tonni teho-painosuhteen käyttämistä arviointikriteerinä. [Kharrazi ym. 2017: 58.]

Vuonna 2018 Ruotsin kuljetushallituksen esityksestä tuli voimaan tieliikenneasetus, joka määrittää Ruotsissa raskaan kaluston suorituskykyvaatimuksen tieliikenteessä. Asetuksen TSFS 2018:40 pykälässä 13 määrätään, että ajoneuvon, jonka suurin tekninen kokonaismassa on 44 tonnia, teho-painosuhteen on oltava vähintään 5 kW/tonni. Ajoneuvo, jonka tekninen kokonaismassa ylittää 44 tonnia, mutta ei 64:ää tonnia, teho-painosuhteen vaatimus on 5 kW/tonni 44 tonniin asti ja 2 kW/tonni siitä ylimenevän massan osalta 64 tonniin saakka. 64 tonnista Ruotsin tieliikenteessä suurimpaan sallittuun massaan, 74 tonniin, asti teho-painosuhteen vaatimus nousee takaisin 5 kW/tonni [TSFS 2018: 4]. Näin ollen Suomessa raskaan kaluston teho-painosuhteen vaatimustaso on korkeampi kuin Ruotsissa, keskimäärin noin 17 %.

2.5 Lainsäädäntöä muista maista

Australian ja Ruotsin lisäksi Kanadassa, Uudessa-Seelannissa ja Etelä-Afrikassa on käytössä PBS-standardit tai niitä vastaavaa maakohtaista lainsäädäntöä HCT-ajoneuvoille. Suurin osa Uuden-Seelannin PBS-standardeista pohjautuu suoraan Australian laatimiin standardeihin mukaan lukien kiihtyvyyden, liikkeellelähden sekä ylämäessä nopeuden ylläpidon standardit. [Kharrazi ym. 2015: 33.]

Etelä-Afrikassa on käytössä niin sanottu RTMS-järjestelmä (engl. *Road Transport Management System*). Se on teollisuusalan johtama vapaaehtoinen itsesääntelyelin, joka kannustaa mm. kuljetusyhtiöitä käyttämään turvallisuutta, tuottavuutta sekä kestävästä kehityksestä edistäviä ajoneuvon hallintajärjestelmiä.

RTMS-järjestelmän taustalla vaikuttavat Australian PBS-standardit ja muutama maakohtainen suositus suorituskykyarvoista. [Kharrazi ym. 2015: 23.] PBS-tasoa on muutettu hieman Australian vastaavista sopimaan paremmin Etelä-Afrikan tieverkostoon. Tason 1 HCT-ajoneuvot saavat operoida kaikilla teillä, ja niillä saavutetaan tyypillisesti 30 %:n lisäkuorma. Tason 2 ajoneuvoilta vaaditaan yksityiskohtainen ajoreitin analyysi, ja ne saavat operoida vain ennaltamäärätyillä tieosuuksilla. Tason 2 HCT-ajoneuvoilla voidaan saavuttaa noin 60 %:n lisäkuorma. Tason 3 ja 4 HCT-ajoneuvoja käytetään vain yksityisillä teillä sekä hyvin syrjäisillä seuduilla, missä muun liikenteen määrä on vähäinen tai olematon, esimerkiksi kaivosalueilla ja suurilla maatiloilla. Tason 3 ja 4 yhdistelmäajoneuvoilla voidaan saavuttaa lisäkuormia 60 %:sta aina jopa 280 %:iin asti normaaleihin tieliikenteessä sallittuihin yhdistelmiin verrattuna. [Performance Based Standards (PBS) and Smart Trucks in Africa 2020.]

Kanadassa PBS-standardeja lähestytään eri näkökulmasta kuin Australiassa. Kanadan PBS-standardit painottavat enemmän ajoneuvon mittoja, massoja, ajoneuvon hallintaa sekä mm. vaikutusta infrastruktuuriin. Standardit ovat provinssikohtaisia. Kaikista raskaimmat ja kookkaimmat yhdistelmät arvioidaan standardien mukaan, mutta suurin osa HCT-ajoneuvoista arvioidaan niin sanottujen ajoneuvokuorien tai -kehysten mukaan (engl. *vehicle envelopes*), jotka mahdollistavat kuljetusyhtiöille erilaisia tapoja konfiguroida yhdistelmät mm. maksimipituuksien ja -massojen, akselien lukumäärän sekä kääntösäteiden mukaan. [High Capacity Transport – Towards Efficient, Safe and Sustainable Road Freight 2019: 46; Woodrooffe 2012: 6.] Liitteessä 4 taulukoituna nämä ajoneuvokehukset.

3 Kehitystarpeet

3.1 Tunnistetut tarpeet uudelle määräykselle

Liikenne- ja viestintävirasto Traficomissa on tunnistettu neljä kehitystarvetta siihen, miksi tulisi kehittää vaihtoehtoiset suorituskykytestit sekä muodostaa raja-arvot vastaamaan moderneja voimansiirtototeutuksia perinteisen tehon ja massan suhteen rinnalle:

1. Nykypäivän kuorma-autot on usein varustettu niin sanotuilla älykkäillä vakionopeudensäätimillä, jotka tuntevat tieverkoston ja -profiilin, ja sitä kautta pystyvät optimoimaan polttoaineenkulutusta ja tehontuottoa. Älykkäillä vakionopeudensäätimillä ajetaan etenkin maanteilla sekä moottoriteilla, jolloin ajonopeus pysyy enintään 20 km/h päässä tavoitenoudesta ja ajoneuvon automatiikka ohjaa moottoria taloudellisimmalle pyörimisnopeudelle. Tällöin vetäville akseleille kohdistuva maksimiteho ei ole enää oleellinen parametri. Ratkaisevampi suure silloin on se vääntö, joka moottorista voidaan hyödyntää kaikissa muissa ajotilanteissa paitsi jyrkimmissä mäissä ja kiihdytyksissä, eli maksimivääntömomenttialue on mahdollisimman laaja. Älykkäistä vakionopeudensäätimistä ja niiden toiminnasta kerrotaan tarkemmin luvussa 6.
2. Täyssähkövoimansiirroissa käytettävien sähkömoottorien hetkellinen huipputeho ja jatkuva teho eroavat huomattavasti toisistaan. Tieverkosto Suomessa on suhteellisen tasaista ja loivamäistä. Pitkiä, jyrkkiä tai vaikeamaastoisia mäkiosuuksia on harvassa, joten maksimiteholla ajaminen kahden minuutin ajan ja sitä pidempään on hyvin harvinaista. Näiden seikkojen takia rekisteritietoihin olisi kannattavampaa merkitä esimerkiksi kahden minuutin ajan käytössä oleva maksimiteho, jolla mm. jyrkimät mäet ja liikkeellelähdet suoritettaisiin.
3. Hybridivoimansiirrolla varustetuille ajoneuvoille ei toistaiseksi ole määritetty niiden todellista suorituskykyä vastaava tehon arvoa. Kuten täys-

sähkövoimalinjojen kohdalla hybridien hetkellisellä huipputeholla ja jatkuvalla teholla on merkittävä ero. Pääosa ajoista suoritetaan polttomootorin avulla, joka on mitoitettu teholtaan riittämään kaikista raskaimpia ajotilanteita lukuun ottamatta muuhun ajoon. Jyrkän ylämäen, kiihdytyksen tai liikkeelle lähdön yhteydessä sähkömoottori avustaisi polttomoottoria korkeintaan muutaman minuutin ajan, kunnes raskain osuus on suoritettu. Ajoneuvon kiihtyvyyden ja mäennousukyvyn ilmaisemiseen olisi siis kannattavampaa käyttää joko moottorien yhteenlaskettua teholumkaa tai esimerkiksi kahden minuutin ajan käytössä olevaa maksimitehoa.

4. Markkinoille lähivuosina saapuvat sähköakselilla varustetut perävaunut ovat kolmas kohderyhmä, joiden todellista suorituskykyä vastaavaa tehon arvoa ei ole määritetty. Sähköavusteisia perävaunuja voitaisiin käyttää etenkin kaasukäyttöisten vetoautojen kanssa, joiden suorituskyky yksinään ei riitä raskaimpien tieliikenteessä sallittujen yhdistelmäkuormien vetämiseen kaikissa ajotilanteissa. Sähkö- ja kaasumootorin yhdistelmällä tehoa olisi kuitenkin riittävästi. Sähköavusteisia perävaunuja voitaisiin lisäksi hyödyntää alitehoisten vetoautojen yhteydessä.

3.2 Kehitystarpeiden kannalta muutamia esimerkkituotteita

3.2.1 ABB AMXE200 -sähkömoottori

Sveitsiläinen teollisuuskonserni ABB on valmistanut nimenomaan raskasta kalustoa varten AMXE200 -kestomagneettitahtimoottorin. AMXE200 on rakenteeltaan hyvin kompakti ja mitoiltaan konfiguroitavissa, joten sitä voidaan käyttää joko pelkästään suoraan akselilla päämoottorina tai apumoottorina esimerkiksi polttomootorin yhteydessä. Lisäksi sen rakenne ja kotelointi on suunniteltu kestämään runsasta kosteutta, tärinää, värinää sekä likaa. Sähkölaitteiden ja laitekoteloiden tiiveyden määrittävä IP-luokitus on IP6K9K, ja rakenteen hetkelliseksi kuormakestoksi on ilmoitettu 50 G. AMXE200-moottorin huipputeho 2000 kierroksella minuutissa on noin 525 kilowattia, kun taas jatkuva teho samalla kierrosalueella on noin 175 kilowattia. Näiden kahden teholumkaan ero on siis

jopa kolminkertainen. [Motors for heavy electrical vehicles 2022: 2; Liite 3.] Kahden tai useamman sähkömoottorin yhteistehon ja väännön avulla yli 44-tonniset yhdistelmät kykenisivät operoimaan tieliikenteessä vaivatta ainakin suorituskyvyn puolesta. On kuitenkin syytä mainita, että muitakin hyviä vaihtoehtoja löytyy eri valmistajilta, joita voidaan hyödyntää raskaan kaluston sähköistymisessä. ABB:n AMXE200 on vain yksi esimerkki siitä, miten hyvin jo nykyteknologian sähkömoottorit soveltuvat ajoneuvoyhdistelmien voimanlähteeksi.

3.2.2 Sisu Polar Hybrid

Vuonna 2017 esitelty suomalainen Oy Sisu Auto Ab:n Sisu Polar Hybrid (kuva 5) on hyvä esimerkki hybridivoimansiirrolla varustetusta kuorma-autosta. Siinä on kuusisylinterinen Mercedes-Benzin dieselpolttomoottori sekä Visedon kestopolttomagneettitahtimoottori. Sähkömoottori on sijoitettu polttomoottorin ja vaihteiston väliin, jolloin kyseinen järjestelmä on konstruktioltaan niin sanottu rinnakkaishybridi. Rinnakkaishybridillä ajotila voidaan valita kolmen vaihtoehdon joukosta sen mukaan, kuinka paljon tehoa tarvitaan sillä hetkellä. Ensimmäinen vaihtoehto on pelkän polttomoottorin käyttö. Silloin sähkömoottori ei avusta ajamista, mutta jarrutuksissa ja rullaustilanteissa se toimii generaattorina lataamaan akustoa. Toinen vaihtoehto on pelkän sähkömoottorin käyttö. Silloin polttomoottori on kytketty irti ja/tai sammutettu ja sähkömoottori saa käyttövoiman akustosta. Kolmas vaihtoehto on polttomoottorin ja sähkömoottorin yhteiskäyttö, jolloin ne tuottavat yhdessä tarvittavan tehon. Tämä ajotila on etenkin raskaita ajotilanteita varten ideaalinen. Kuvassa 6 rinnakkaishybridin sähköjärjestelmäarkkitehtuuri pääpiirteittäin, merkkikohtaiset erot ovat mahdollisia. [Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics 2007: 367.]. Komponenttien numerointi Sisin tapauksessa menee seuraavalla tavalla:

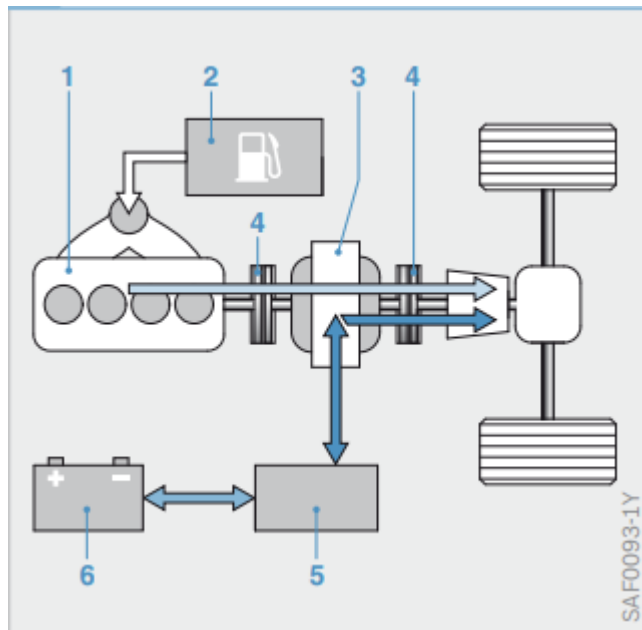
1. Mercedes-Benzin dieselpolttomoottori
2. Polttoainetankki
3. Visedon kestopolttomagneettitahtimoottori

4. KytKentä/kytkimet
5. Invertteri eli vaihtosuuntaaja
6. Superkondensaattorien muodostama akusto.

Polttomoottorivaihtoehdon mukaan tehoa on tarjolla 310 kilowatista 460 kilowattiin saakka. Vaativia ja raskaita ajotilanteita varten sähkömoottorista saadaan kuitenkin lisätehoa polttomoottorin tueksi peräti 200 kilowattia 20 sekunnin ajan [Sisu: first hybrid truck with Mercedes and Visedo 2018.]. Laki edellyttää tällä hetkellä 76-tonniselta yhdistelmältä vähintään 380 kilowatin jatkuvaa tehoa, mutta malliston pienin Sisu Polar Hybrid mitä todennäköisimmin olisi varsin kykenevä tälle kuormalle vetoautoksi, koska 200 kilowatin sähkömoottorin avustuksella yhdistelmä voitaisiin kiihdyttää ajonopeuteen sekä ajaa jyrkimmät mäet.



Kuva 5. Sisu Polar Hybrid -kuorma-auto [Sisu: first hybrid truck with Mercedes and Visedo 2018].

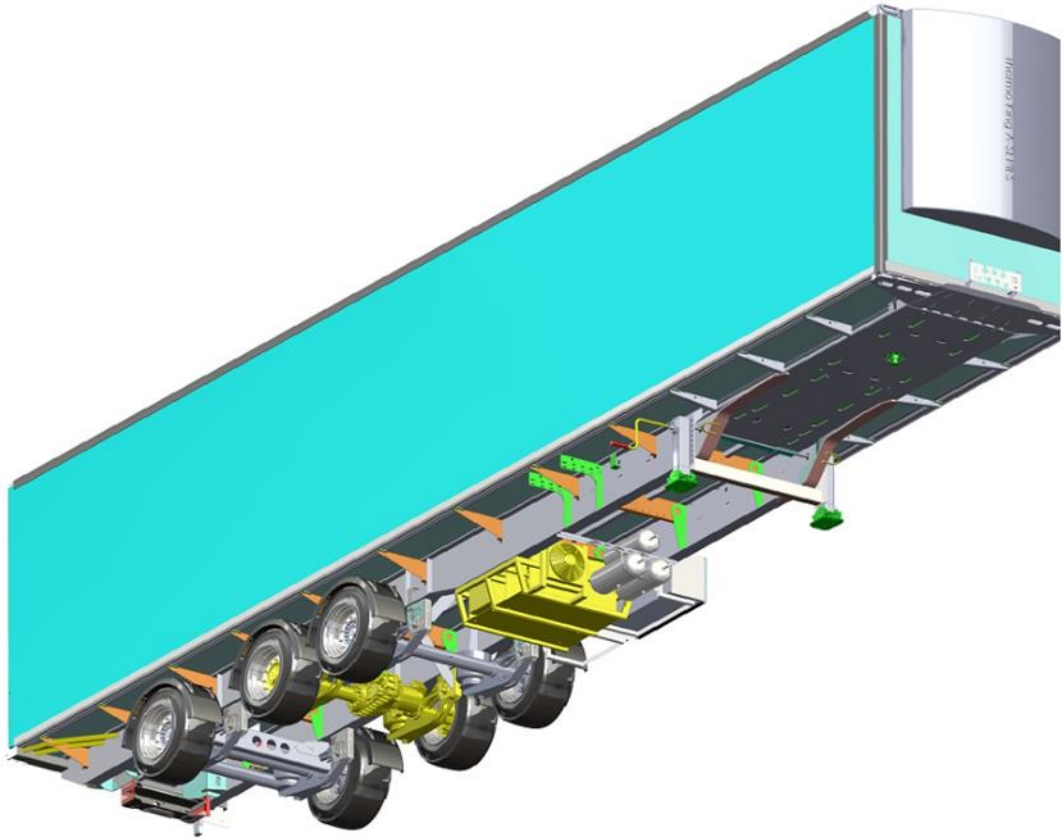


Kuva 6. Rinnakkaishybridin sähköjärjestelmäarkkitehtuuri [Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics 2007: 367].

3.2.3 VAK E-akseli

Suomalaisen perävaunuvalmistaja VAK Oy:n kesän 2022 aikana valmistuneessa "E-akseli" -tuotekehityshankkeessa puoliperävaunun keskimmäiseen akseliin on integroitu sähkömoottori. Jarrutus- ja rullaustilanteissa sähkömoottori toimii generaattorina ja varastoi liike-energiasta saatavan sähkön akustoon. Talteen otettua sähköenergiaa voidaan myöhemmin hyödyntää esimerkiksi kiihdytyksissä, ylämäissä ajettaessa sekä muissa raskaissa ajotilanteissa. [Puoli vuosisataa ja liki 20 000 tuotetta - VAK juhlistaa 50-vuotistaivaltaan 2022.] Lopputuloksena vetoauton moottorin kokoa voidaan optimoida, polttoaineenkulutus laskee ja päästöt vähenevät. Myöhemmin tarkoituksena on, että perävaunua voitaisiin myös liikuttaa lyhyitä siirtoajoja omavaraisesti mm. logistiikkakeskuksissa. Kuvassa 7 keltaisella värillä on nähtävissä E-akseli-järjestelmän muodostavat komponentit: sähköakseli, akustopaketti, jäähdytysjärjestelmä ja ohjausjärjestelmä. Komponentit on sijoitettu perävaunun painojakauman kannalta parhaimpaan kohtaan, mahdollisimman alas ja keskelle. Näin vaunun kuormaaminen ei muutu, järjestelmästä ei aiheudu muutoksia yhdistelmän ajokäyttäytymisi-

seen ja vetäville akseleille saadaan hyvät pito-ominaisuudet. Alustavien suunnitelmien mukaan E-akselin valmistus aloitetaan vuoden 2023 aikana. [Suominen 2022.]



Kuva 7. VAK Oy:n E-akseli-tutkimushankkeen puoliperävaunu [Puoli vuosisataa ja liki 20 000 tuotetta - VAK juhlistaa 50-vuotistaivaltaan 2022].

E-akselista aiheutuva lisämassa ei vaikuta ajoneuvoyhdistelmän suurimpaan sallittuun kokonaismassaan, koska kuten tieliikennelaissa [2018; Liite 2] mainitaan, vaihtoehtoisesta käytötavasta koituva massan lisäys 1000 kilogrammaan saakka sallitaan. Lisämassa johtuu mm. akustosta, johtimista sekä jäähdyttimistä. E-akselista arvioidaan aiheutuvan noin 500 - 1000 kilogramman lisäys. [Suominen 2022.]

4 Fysikaaliset laskemat

4.1 Ajovastukset

4.1.1 Taustatietoja laskemille

Oli kyseessä sitten henkilöauto, jakeluauto, raskas ajoneuvoyhdistelmä tai linja-auto, ajotehtäviin vaadittavan riittävän suorituskyvyn selvittämiseksi on tiedettävä ajoneuvon vaikuttavat ajovastukset. Ne ovat ajosuunnassa vaikuttavia fyysikaalisia vastusvoimia, jotka aiheutuvat mm. kitkasta, tieprofiilin muodoista sekä ajoneuvon massasta ja pinta-alasta. Ajoneuvon liiketila määräytyy kahden voiman keskinäisestä suhteesta, jotka esitetään ajovastusten perusyhtälössä (kaava 1):

$$F_k = \sum F_w \quad (1)$$

F_k on eteenpäin vievä voima ajoneuvon pyörän kehällä
 $\sum F_w$ on ajovastusten summa.

$\sum F_w$ voidaan vielä jakaa yksittäisiin vastuslajeihin kaavan 2 mukaisesti:

$$\sum F_w = F_r \pm F_i \pm F_n \pm F_a \pm F_p (+F_v) \quad (2)$$

F_r on vierinvastus

F_i on ilmanvastus

F_n on nousuvastus

F_a on kiihdytysvastus

F_p on vetovastus esimerkiksi perävaunun takia

F_v on voimansiirtovastus.

Voimansiirtovastus on merkitty kaavaan suluissa, koska se otetaan huomioon laskuissa tyypillisesti häviötekijänä eli yksiköttömänä lukuarvona edustaen voimansiirron hyötysuhdetta. Plus-miinus-merkintä kaavassa tarkoittaa, että vastusvoimien vaikutus voi joissain tilanteissa olla myös positiivinen eli eteenpäin vievä. Tällainen tilanne yhdistelmäajoneuvon kohdalla voi syntyä esimerkiksi

tyynellä säällä alamäkeen ajettaessa ja täysperävaunun ollessa täyteen kuormattu. Jokainen ajovastus voidaan esittää laskuissa joko osana pyörän vääntömomenttia, osana moottorin vääntömomenttia tai osana pyörätehosta, mutta yleensä ne esitetään voimana pyörällä. [Oikarinen 2019: 2.]

Jotta esitys vaihtoehtoisesta suorituskyvyn osoitustavasta sekä suorasta laskentakaavasta voidaan antaa, on järkevää tehdä karkea laskennallinen selvitys siitä, millaisella nopeudella teho-painosuhteella 5 kW/tonni oleva yhdistelmä kykenee nousemaan ylämäkiä eri nousukulmilla ja miten nopeasti se kiihtyy maantienopeuteen. Tätä varten esimerkkiajoneuvosta laadittiin nousuvastus-, vierinvastus- ja ilmanvastuslaskelmat sekä -kuvaajat, joiden yhteenlasketuista vastusvoimista voidaan muodostaa ajotilapiirros. Ajotilapiirros laadittiin GNU Octavella ja lopputuloksena siitä saatiin havainnollistava kuvaaja, josta selviää mm. vastusvoimat eri nousukulmalla, maksimitehontuotto jokaisella vaihteella ja ajonopeus tietyllä kuormalla ja nousukulmalla. Ajotilapiirros esitetään luvussa 4.2.

Ajovastuslaskelmia varten malliajoneuvoksi valittiin Volvon FH13 Globetrotter, jossa on 12,8-litrainen D13K500 Turbo-TC -dieselmoottori sekä AT2812-automattinen ja 12-portainen I-shift-vaihteisto ryömintävaihteella. Malliajoneuvo on kuvan 3 tapainen A-tupla 16 + 13,6 m -yhdistelmäajoneuvo, jossa paino jakaantuu 12 akselille. Moottorivalintaan päädyttiin sen laajan käyttäjämäärän ja suorituskyvyn takia sekä siksi, että kyseinen moottori on suunniteltu nimenomaan raskaisiin maantiekuljetuksiin [Fact Sheet – Engine D1K500 2019: 1]. AT2812-vaihteisto valittiin, koska se on suunniteltu käytettäväksi D13K500TC-moottorin kanssa yhdessä. Asia varmistettiin Volvo Finlandin tuotepäällikkö Antti Heinoselta sähköpostitse. AT2812 on mitoitettu 2800 newtonmetriin, samaan mikä on D13-moottorin maksimivääntömomentti. Lisäksi AT2812-vaihteisto on tarkoitettu käytettäväksi mm. kaukokuljetuksissa ja raskaassa maansiirtoajossa [Tekniset tiedot – vaihteisto AT2812 Automaattinen I-shift -vaihteisto 2022: 1]. Koska tarkoituksena oli laskea suuntaa antavia lukemia teho-painosuhteella 5 kW/tonni olevasta yhdistelmästä ja D13K500TC-moottorin maksimiteho on 375 kilowattia, kaikissa laskuissa käytettiin kokonaismassana 75:tä tonnia.

4.1.2 Nousuvastus

Nousuvastuksen F_n muodostavat ajoneuvon kokonaismassa ja mäen nousukulma. Ylämäkien nousukulmat ilmoitetaan tieosuuksilla yleensä prosentteina, mutta laskuja varten ne muutetaan asteiksi kaavan 3 mukaan [Oikarinen 2019: 19]:

$$p = \frac{h}{l} = \tan \alpha \quad (3)$$

p on mäen nousuprosentti
 h on kuljettu pystysuuntainen matka
 l on kuljettu vaakasuuntainen matka.

Esimerkiksi 20 % nousukulmalla oleva ylämäki muutetaan asteiksi seuraavalla tavalla:

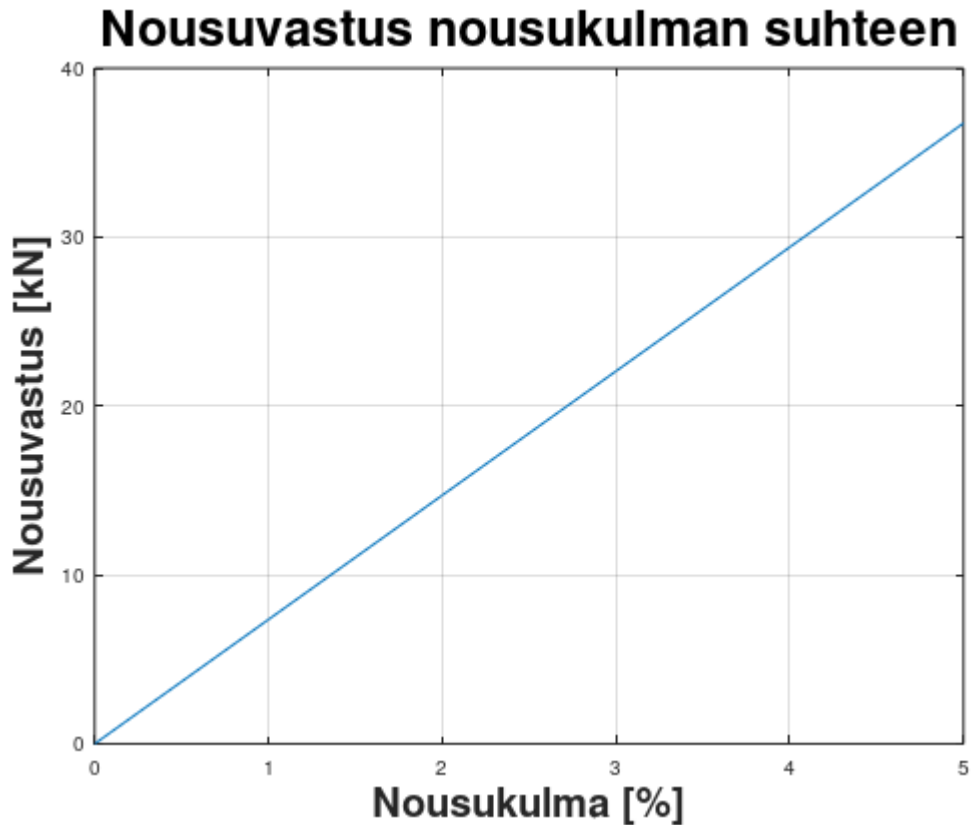
$$\tan \alpha = 0,20 = \arctan \frac{20\%}{100} = 11,3099 \approx 11,3^\circ$$

Nousuvastusvoima on painovoimavektorin mäensuuntaisesta osasta eli komponentista koostuva voima. Nousuvastus F_n lasketaan kaavan 4 mukaisesti [Automotive Handbook 2018: 943]:

$$F_n = G \sin \alpha = m \times g \times \sin \alpha \quad (4)$$

G on painovoimavektori, pyöränkuorma
 $\sin \alpha$ on mäen nousukulma asteina
 m on ajoneuvon kokonaismassa
 g on putoamiskiihtyvyys (= 9,81 m/s²).

Kuvaajassa 1 on nähtävissä ylämäen nousukulmasta johtuva nousuvastuksen suuruus malliajoneuvolla. Maksiminousukulmaksi on merkitty 5 prosenttia, mikä vastaa noin 3 asteen ylämäkeä. Nousuvastuksia jyrkemmille ylämäille ei ole syytä laskea, koska raskaan kaluston käyttämällä maantieosuuksilla tuota jyrkemmät mäet ovat varsin harvassa.



Kuvaaja 1. Nousuvastus ylämäen nousukulman mukaan.

Kuvaaja on täysin lineaarinen nousukulman alkupään lukemissa, mutta mikäli jyrkemmille kulmille laskettaisiin nousuvastuksia, kuvaaja tasaantuisi hieman. Siitäkin huolimatta kuvaajasta voidaan havaita, että malliajoneuvon nousuvastus jo esimerkiksi 4 %:n nousukulmalla on noin 30 kilonewtonia. Nousuvastus muodostaakin suurimman ajovastusvoiman ajettaessa mäkisellä tieosuudella.

4.1.3 Vierinvastus

Vierinvastus F_r aiheutuu renkaan ja tienpinnan kosketuksessa renkaan muodonmuutosilmiöstä. Osa kineettisestä energiasta kuluu pyöränkuorman ja renkaan sisäisen kitkan eli hystereesin seurauksena renkaan muokkautumiseen. Pyöränkuorman lisäksi vierinvastukseen vaikuttaa vierinvastuskerroin; se on yksikötön lukuarvo, joka kuvastaa erilaisten renkaiden vierintäkykyä erilaisilla alustoilla. Mitä suurempi vierinvastuskerroin, sitä enemmän rengas vastustaa

vierimisliikettä. Vierinvastuskerroin on suoraan verrannollinen muodonmuutosilmiöön, mutta kääntäen verrannollinen renkaan säteeseen. Vierinvastuskerroin siis kasvaa, mikäli pyöränkuorma lisääntyy, nopeus kasvaa tai rengaspaine laskee. Pneumaattisen raskaan kaluston renkaan vierinvastuskerroin asvaltilla ja betonilla on tyypillisesti välillä 0,006 - 0,01. Kuten nousuvastuksen kohdalla myös vierinvastuksen laskennassa otetaan huomioon mahdollinen tien nousukulma, mutta nyt huomioitava komponentti on painovoimanvektorin tienpintaan kohtisuoraan vaikuttava voima. Vierinvastus F_r lasketaan kaavan 5 mukaisesti [Automotive Handbook 2018: 941]:

$$F_r = f_r \times G \cos \alpha = f_r \times m \times g \times \cos \alpha \quad (5)$$

f_r on vierinvastuskerroin
 G on painovoimavektori, pyöränkuorma
 $\cos \alpha$ on mäen nousukulma asteina
 m on ajoneuvon kokonaismassa
 g on putoamiskihtiävyys (= 9,81 m/s²).

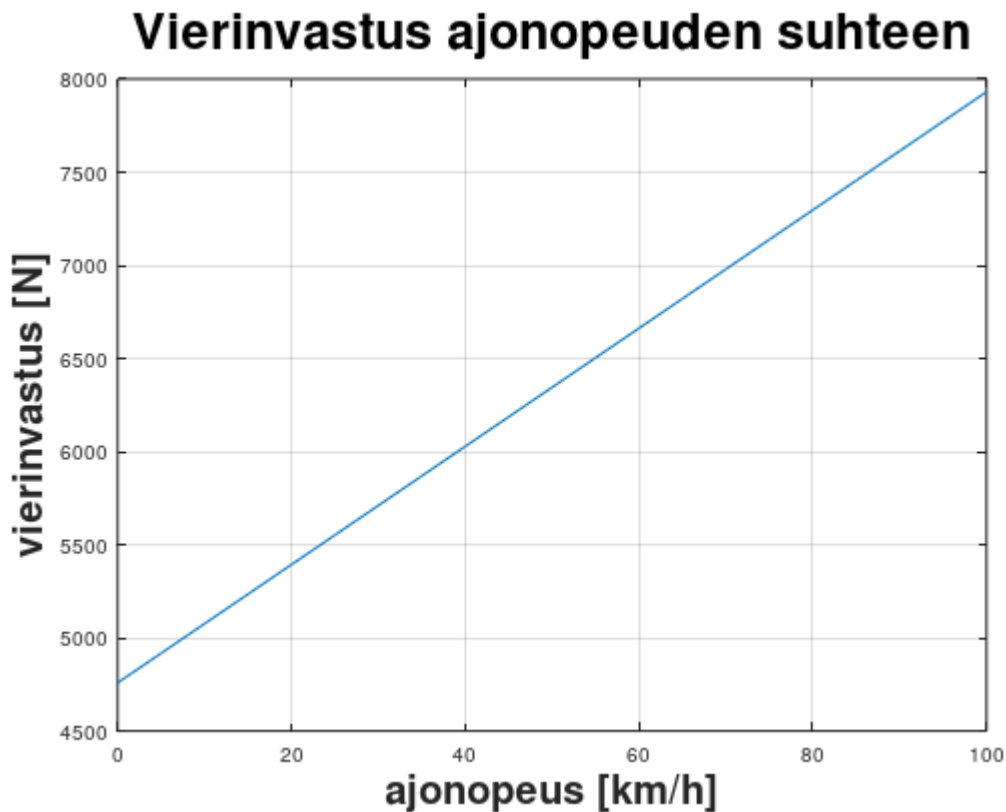
Koska vierinvastuskertoimeen vaikuttavat rengaspaineet, pyöränkuorma sekä renkaan nimelliskantavuudet, täytyy kaavaa 5 varten laskea ensin todellinen vierinvastuskerroin korjausyhtälön avulla. Korjausyhtälö menee kaavan 6 mukaan [Oikarinen 2019: 15]:

$$F_r = f_r \times \left(1,3 - 0,3 \times \frac{p}{p_r}\right) \times \left(1,3 - 0,3 \times \frac{N_R}{G_r}\right) \quad (6)$$

F_r on todellinen vierinvastuskerroin
 f_r on vierinvastuskerroin
 p on todellinen rengaspaine
 p_r on renkaan nimellispaine
 N_R on renkaan nimelliskantavuus
 G_r on todellinen pyöränkuorma.

Renkaan nimelliskantavuus ja nimellispaine saadaan rengasnormeista, joita STRO ylläpitää. Volvo Finlandin tuotepäällikkö Antti Heinosen mukaan malliajoneuvon tapauksessa paras rengasvalinta on 315/70 R22,5. STRO:n Rengasnormit 2020 -kirjasta [2020: 161] saadaan tieto, että näillä renkailla nimelliskantavuus per rengas on 3750 kilogrammaa ja nimellispaine 9 bar per rengas.

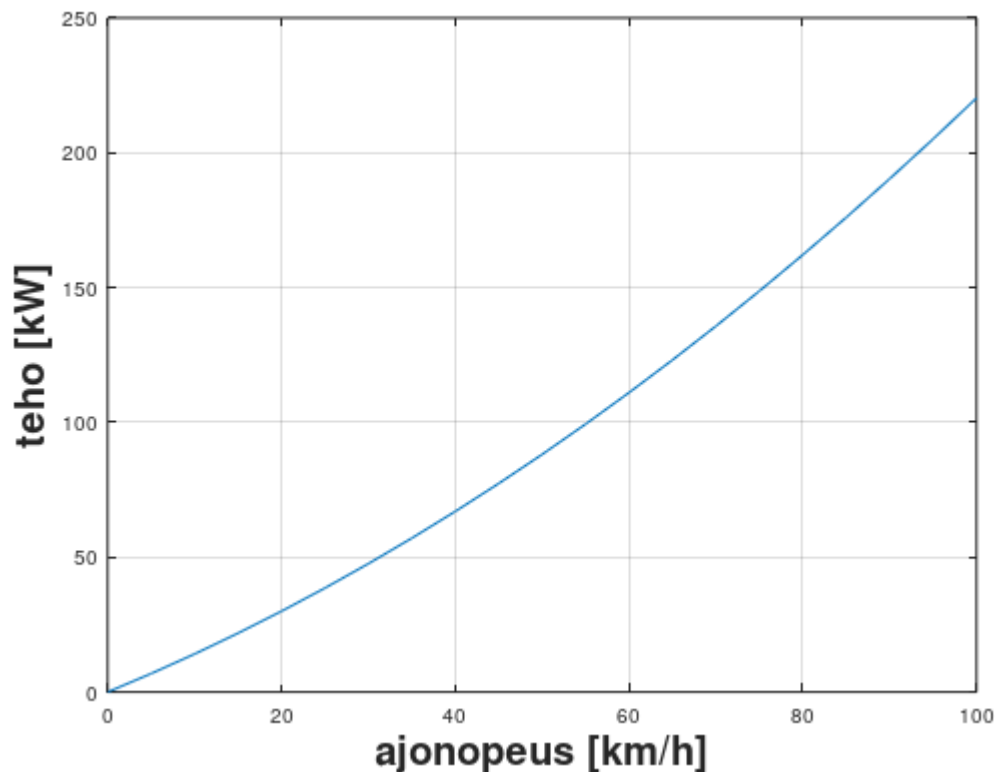
Tarkkoja vierintävastuksia laskettaessa jokaiselle akselille laskettaisiin oma voimansa, mutta koska kyseessä on suuntaa antava laskelma kokonaisajovastuksista, riittävän tarkka lukuarvo saadaan, kun lasketaan vetoauton ja perävaunujen vierintävastukset yhteensä. Kuvaajassa 2 on havainnollistettu vierinvastuksen suuruutta ajonopeuden suhteen.



Kuvaaja 2. Vierinvastuksen määrä eri ajonopeuksilla.

Kuten aiemmin jo todettiin, ajonopeuden kasvaessa myös vierinvastus kasvaa samassa suhteessa. Täysin lineaarinen vastuskäyrä tukee teoriaa ja laskelmia. Laskuissa käytettävän malliajoneuvon ja kokonaiskuorman tapauksessa jo pelkästään liikkeellelähdössä vierinvastus on noin 4750 newtonia. Toisin sanoen voimasiirron on voitettava vähintään tuo vierinvastusmomentti, jotta yhdistelmä edes liikahdaa. Maantienopeuksissa vierinvastus on 8000 newtonin luokkaa. Koska iso osa moottorin tuottamasta vääntömomentista kuluu vierinvastuksen voittamiseen, sen minimoimiseksi on tehty paljon apukeinoja. Osaksi vierinvastuksia laskettavat laakerihäviöt pyritään minimoimaan mahdollisimman alhaisen

kitkahäviön laakereilla. Renkaiden kehitystyön eteen nähdään vaivaa ja niiden muodonmuutos tien kosketuspinnassa pyritään optimoimaan parhaan pidon sekä vierintää vastustavan liikkeen suhteen. Lisäksi tyhjänä ajettaessa osa akseleista voidaan nostaa ylös turhien rengas-tie-kontaktien ehkäisemiseksi. Kuvaajassa 3 on vielä esitetty jokaisella ajonopeudella senhetkisen vierinvastuksen voittamiseen kuluva teho.



Kuvaaja 3. Vierinvastukseen kuluva teho suhteessa ajonopeuteen.

4.1.4 Ilmanvastus

Ilmanvastus F_i aiheutuu aerodynaamisista voimista, jotka muodostuvat kappaaleen eli ajoneuvon ja vallitsevan ilman vuorovaikutuksesta. Ilmanvastukseen vaikuttavat sen hetkinen patopaine, ilman tiheys, suhteellinen nopeus eli ajoneuvon ja tuulen nopeuden summa, ilmanvastuskerroin sekä ajoneuvon virtauspoikkipinta-ala eli niin sanottu otsapinta. Ilmanvastuskerroin kuvastaa ajoneu-

von aerodynaamisuutta ja sitä, miten suuri vuorovaikutusilmiö ajoneuvon ja ilman välille syntyy. Kerroin on ajoneuvokohtainen yksikötön lukuarvo, joka voidaan selvittää joko tuulitunnelissa tai coast down -testillä eli rullauskokeella. Otsapinnalla tarkoitetaan, sitä pinta-alaa ajoneuvosta, joka nähdään ajoneuvoa edestäpäin katsottaessa. Kaavasta 7 saadaan laskettua ilmanvastus F_i [Oikarinen 2019: 33]:

$$F_i = p \times c_w \times A \quad (7)$$

Kaavaa voidaan muokata vielä hieman, sillä patopaine p jaetaan tekijöihinsä kaavan 8 mukaisesti [Oikarinen 2019: 33]:

$$F_i = \frac{\rho}{2} \times c_w \times A \times v^2 \quad (8)$$

p on patopaine ($= 0,5 \cdot \rho \cdot v^2$)
 c_w on ilmanvastuskerroin
 A on otsapinta
 ρ on ilman tiheys
 v on suhteellinen nopeus.

Koska ρ eli ilman tiheys on riippuvainen vallitsevista olosuhteista, sen laskemiseen on olemassa myös oma kaava. Kuitenkin yleensä laskuissa ja testeissä käytetään ns. normiolosuhteiden mitta-arvoja. Kaavan 9 avulla lasketaan ilman tiheys [Oikarinen 2019: 33]:

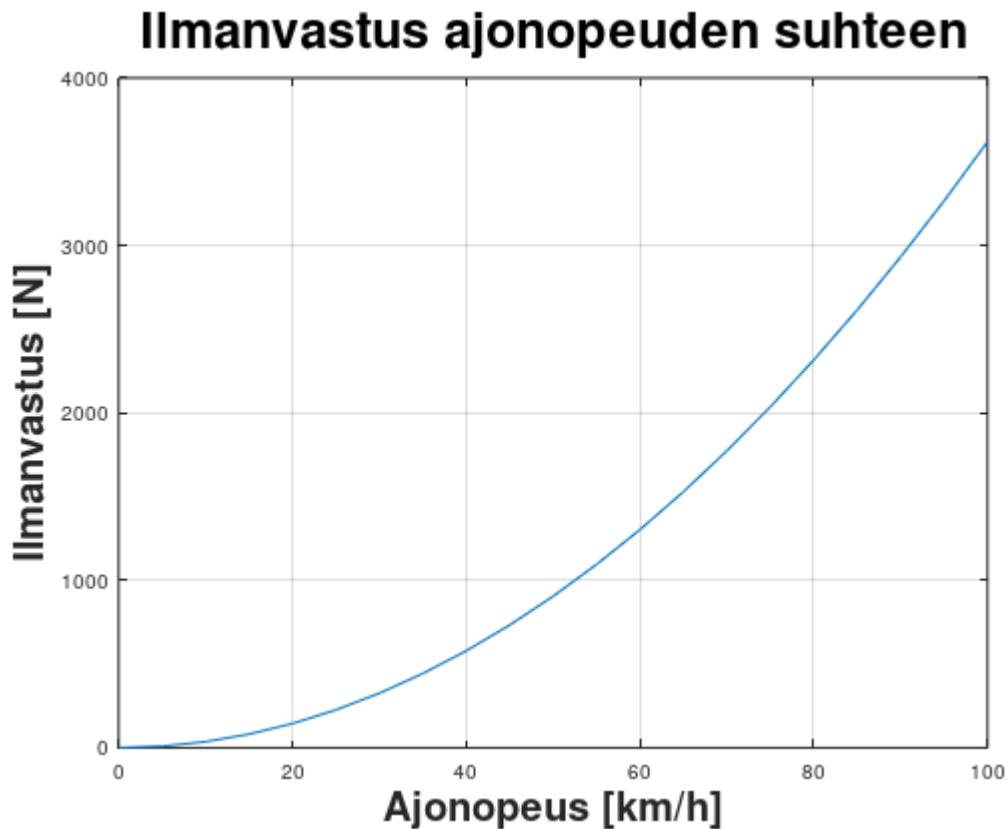
$$\rho = \frac{p \times M}{R \times T} \quad (9)$$

p on ilmanpaine, normiolosuhteissa 100 kPa = 1 bar
 M on ilman moolimassa = 0,02896 kg/mol
 R on yleiskaasuvakio = 8,31 J/(mol·K)
 T on ilman lämpötila, normiolosuhteissa 293 K = 20 °C.

Eli laskuissa ja testeissä käytettävä ilman tiheyden arvo ρ on

$$\rho = \frac{100 \text{ kPa} \times 0,02896 \text{ kg/mol}}{8,31 \frac{\text{J}}{\text{mol} \times \text{K}} \times 293 \text{ K}} = 1,19 \text{ kg/m}^3$$

Malliajoneuvon ilmanvastuksen ja siihen kuluvan tehon laskemiseksi täytyy vielä selvittää ajoneuvon virtauspoikkipinta-ala ja ilmanvastuskerroin. Virtauspoikkipinta-ala saadaan yksinkertaisella laskutoimituksella kertomalla yhdistelmän korkeus sen leveydellä edestäpäin katsottuna. Vaikka Globetrotter (CAB-HSLP) -nupin korkeus maasta on 3,72 metriä [Cab specifications for Volvo FH 2022], todellisen tilanteen simuloimiseksi laskuissa käytetään korkeuden arvona neljää metriä, koska perävaunun yläreuna ylittää siihen lukemaan. Leveyden arvona laskuissa käytetään 2,55:tä metriä, sillä malliajoneuvon leveys on 2,495 metriä [Cab specifications for Volvo FH 2022], mutta perävaunujen tyypillinen leveys on 2,55 metriä. Näin pinta-alan arvoksi saadaan 10 m^2 [Cab specifications for Volvo FH 2022]. Koska virallista ilmanvastuskertoimen lukuarvoa ei löydetty uudelle FH13 Globetrotterille, laskelmissa päädyttiin käyttämään viitearvona vuonna 2016 tehtyä tutkimusta raskaan kaluston ilmanvastuskertoimista. Bayindirlin, Akansun ja Salmanin [2016] tutkimuksessa ilmanvastuskertoimen arvoksi saatiin 0,704. Lopullisena lukuarvona käytettiin 0,85-kerrointa, koska tutkimuksessa käytössä oli vain yksi perävaunu ja näiden laskelmien malliajoneuvossa niitä on kaksi. Kuvaajat 4 ja 5 havainnollistavat ilmanvastusvoiman määrää suhteessa ajonopeuteen sekä ilmanvastuksen voittamiseen kuluvaan tehoon.

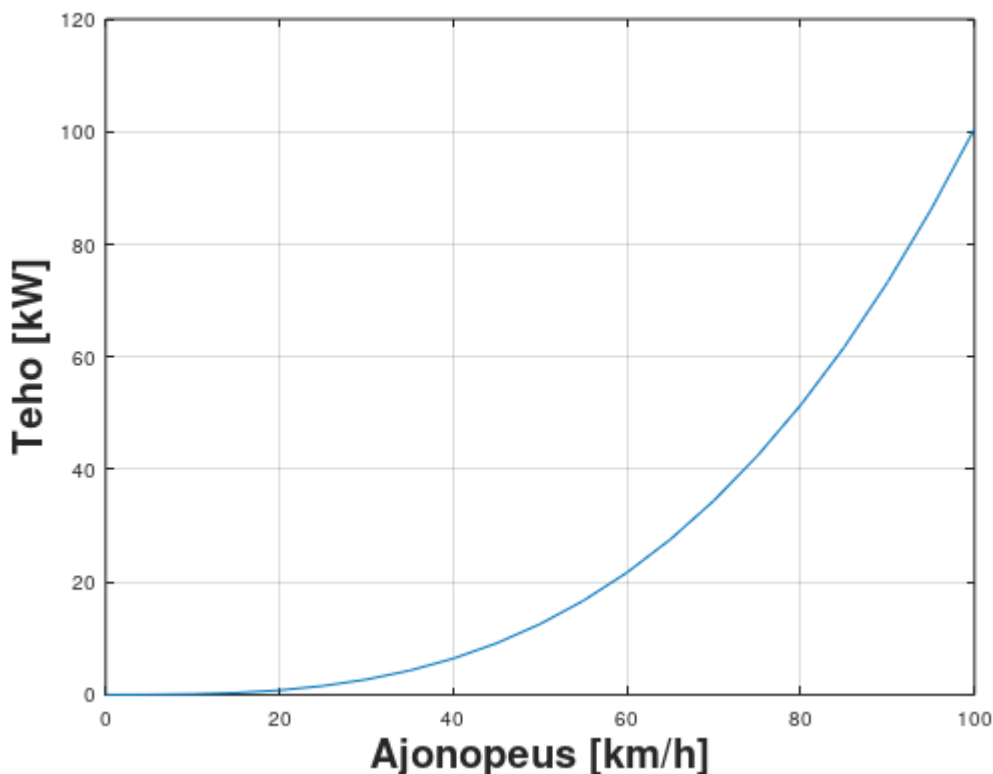


Kuvaaja 4. Ilmanvastusvoima eri ajonopeuksilla.

Kaavasta 8 nähdään, että aerodynaamisista voimista aiheutuva ilmanvastus kasvaa nopeuden neliössä eli nopeuden kasvaessa kaksinkertaiseksi, ajoneuvon kohdistuva ilmanvastusvoima nelinkertaistuu. Kuvaaja 4 tukee erittäin hyvin teoriaa ja laskukaavan yhteyttä käytäntöön, sillä ilmavastuksen viiva kasvaa selkeästi eksponentiaalisesti. Ilmanvastusvoiman lisäksi teho, joka vaaditaan vastusvoiman voittamiseksi, kasvaa jyrkästi ajonopeuden noustessa. Itseasiassa vaadittava teho kasvaa nopeuden kuutiossa eli nopeuden kaksinkertaistuksessa, vaadittava teho nousee kahdeksankertaiseksi. Tämä voidaan todeta alla olevasta kuvaajasta 5 sekä kaavasta 10 [Oikarinen 2019: 33]:

$$P_i = F \times v^3 \quad (10)$$

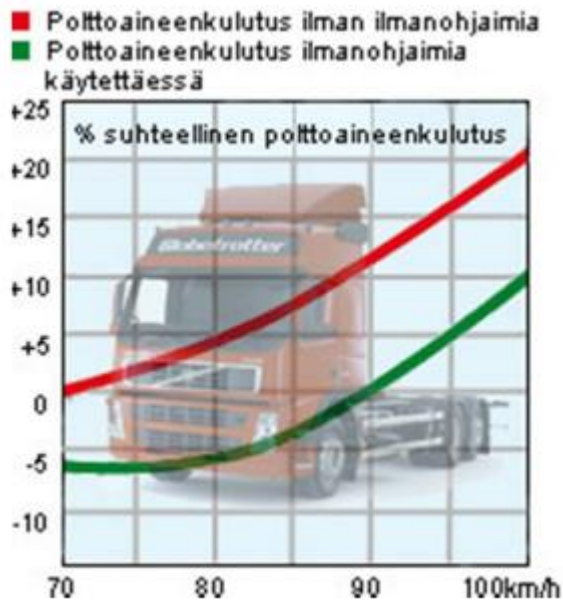
P_i on ilmanvastuksen voittamiseen vaadittava teho
 F on ilmanvastusvoima
 v on ajonopeus.



Kuvaaja 5. Ilmanvastukseen kuluva teho eri ajonopeuksilla.

Näiden seikkojen takia polttoainetaloudellisuuden ja päästöjen vähentämisen näkökulmasta ilmanvastuksen pienentäminen on tärkein kehityskohde. Tehokkaimpia tapoja pienentää raskaan kaluston ilmanvastusta on mm. käyttää erilaisia ilmanohjaimia esimerkiksi hytin etukulmissa sekä katolla, suunnitteluvaiheessa muotoilla hytti mahdollisimman virtaviivaiseksi ja karsia kaikki ulokkeet sekä mahdollisuuksien mukaan käyttää umpikärryjä tai edes joitain peitteitä sellaisissa kohdissa, joihin ilmavirtaus voisi jäädä pyörimään. Koska ilmanvastus ja sen voittamiseen vaadittava teho kasvavat hyvin nopeasti ajonopeuden noustessa, etenkin HCT-yhdistelmien kohdalla aerodynaaminen muotoilu ja ilmanvastuksen minimointi ovat erityisen tärkeitä. HCT-yhdistelmillä ajetaan pääsääntöisesti valtaväylillä maantienopeuksilla, jolloin ajoneuvoon kohdistuvat ilmanvastusvoimat ovat huomattavan suuria. Volvo tutki jo aiempien Globetrotter-mallien yhteydessä ilmanohjainten vaikutusta polttoaineenkulutukseen ja tulokset olivat melko yksiselitteisiä. 80 km/h -nopeudella polttoaineenkulutus oli noin

10 prosenttia pienempi sellaisella ajoneuvolla, jossa ilmanohjaimet olivat asennettuna [Oikarinen 2019: 35]. Verrokkina oli ajoneuvo, jossa ei ollut ilmanohjaimia. Kuvassa 8 Volvon analyysi ilmanohjainten vaikutuksesta polttoainetaloudellisuuteen.



Kuva 8. Suhteellinen polttoaineenkulutus ilmanohjaimilla sekä ilman [Oikarinen 2019: 35].

Lokakuun ensimmäisenä päivänä vuonna 2017 alkaneessa ja syyskuun 28. päivänä vuonna 2021 päättyneessä projektissa, AEROFLEXissä, tavoitteena oli kehittää ja esitellä uusia teknologioita ja konsepteja erityisesti HCT-yhdistelmien parissa. Uusia ratkaisuja ja konsepteja esiteltiin mm. voimansiirtoon, verkottuneisiin järjestelmiin, turvallisuusjärjestelmiin sekä aerodynamiikkaan. Projektin havaintojen ja lopputulosten avulla tarkoituksena oli edistää raskaan kaluston energiatehokkuutta, turvallisuutta sekä tarjota valmistajille ja alan toimijoille lisätietoja ajoneuvojen optimaalisesta käytöstä. Tehtyjen havaintojen perusteella HCT-yhdistelmien tehokkuutta voitaisiin parantaa jopa 33 prosenttia. Projektin osallistujakunta oli varsin laaja, sillä sen toteutukseen osallistui ympäri Eurooppaa mm. ajoneuvo-, rengas- ja perävaunuvalmistajia, tutkimuslaitoksia, korkeakouluja ja yhdistyksiä. Projektille myönnettiin EU:n tukirahoitusta. [Aerodynamic

and Flexible Trucks for Next Generation of Long Distance Road Transport 2021 a.]

Projekti jakaantui yhteensä kahdeksaan osa-alueeseen, joista kolmas oli yhdistelmän aerodynamiikan edistäminen. Aerodynamiikan osalta keskityttiin siihen, kuinka saada yhdistelmän ilmanvastuskerrointa pienennettyä, virtauspoikkipinta-ala mahdollisimman pieneksi, koko yhdistelmän ulkokuori virtaviivaisemmaksi ja miten voidaan välttää ilmanvirtausten pakkaantumisen rakenteisiin. Testit suoritettiin tuulitunnelissa pienoismallien avulla ja CFD-simuloinnilla. Niin sanottu aerodynaaminen paketti eli kokonaisuus toimista, joiden avulla ilmanvastusvoimia pyrittiin minimoimaan, sisälsi yhteensä 14 erilaista toimenpidettä. Osa aktiivisia eli ne mukautuivat esimerkiksi kuorman ja nopeuden mukaan ja niitä ohjattiin toimilaitteiden avulla ja osa passiivisia eli täysin kiinteitä ratkaisuja. Kehitettyjä toimenpiteitä olivat mm. pohjalevyt koko yhdistelmän matkalle, perävaunun diffuusori, aktiivinen ajokorkeudensäätö, perävaunun ilmanohjainsiivekkeet sekä välivaunun ja akselistojen helmapaneelit. Simuloinnit ja tuulitunnelit testit osoittautuivat erittäin onnistuneiksi, sillä aerodynaamisten toimenpiteiden lukumäärän mukaan, ilmanvastusta onnistuttiin pienentämään 17 prosentista jopa 27 prosenttiin. Parhaat tulokset saavutettiin, kun 14 toimenpiteestä vähintään 11 hyödynnettiin. Tulokset voivat toki hieman muuttua tosielämän tilanteissa, mutta suuntaa antavina lukuina 27 prosentin lasku ilmanvastukseen toisi merkittävät säästöt polttoaineenkulutukseen ja sitä kautta käyttökuluihin. On myös hyvä ottaa huomioon, että yksikään aerodynaamisista toimenpiteistä ei rajoita kuormatilavuutta, joten niistä olisi vain ja ainoastaan hyötyä kuljetusyrityksille. [Aerodynamic and Flexible Trucks for Next Generation of Long Distance Road Transport 2021 b: 5 - 7.]

4.2 Ajotilapiirros

Kuten luvussa 4.1.1 todettiin, ajotilapiirros on kuvaaja, josta selviää mm. vastusvoimat eri nousukulmalla, maksimitehontuotto jokaisella vaihteella ja ajonopeus tietyllä kuormalla ja nousukulmalla. Ajotilapiirros laaditaan aina ajoneuvo kohtai-

sesti ja ajovastukset sekä suorituskvyn arvot esitetään samassa koordinaatis-
tossa. Ajotilapiirrosta varten malliajoneuvosta on kerätty taulukoissa 6 ja 7 lista-
tut tiedot ja ominaisuudet:

Taulukko 6. Mittasuhteita ja massoja.

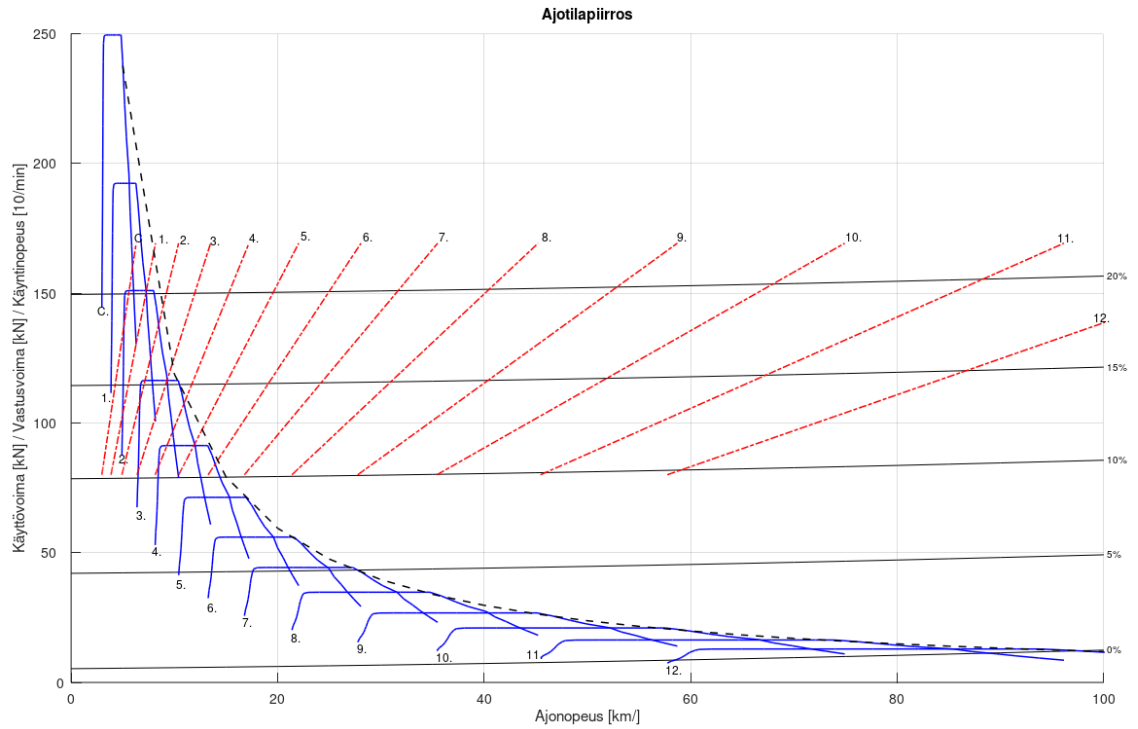
Korkeus	4,0 m	Painojakauma	55 % / 45 %
Pituus	34,5 m	Renkaat	315/70R22,5
Akseliväli	30,6 m	Ilmanvastuskerroin	0,85
Massa	75 ja 80 tonnia	Virtauspoikkipinta-ala	10 m ²

Taulukko 7. Voimansiirto.

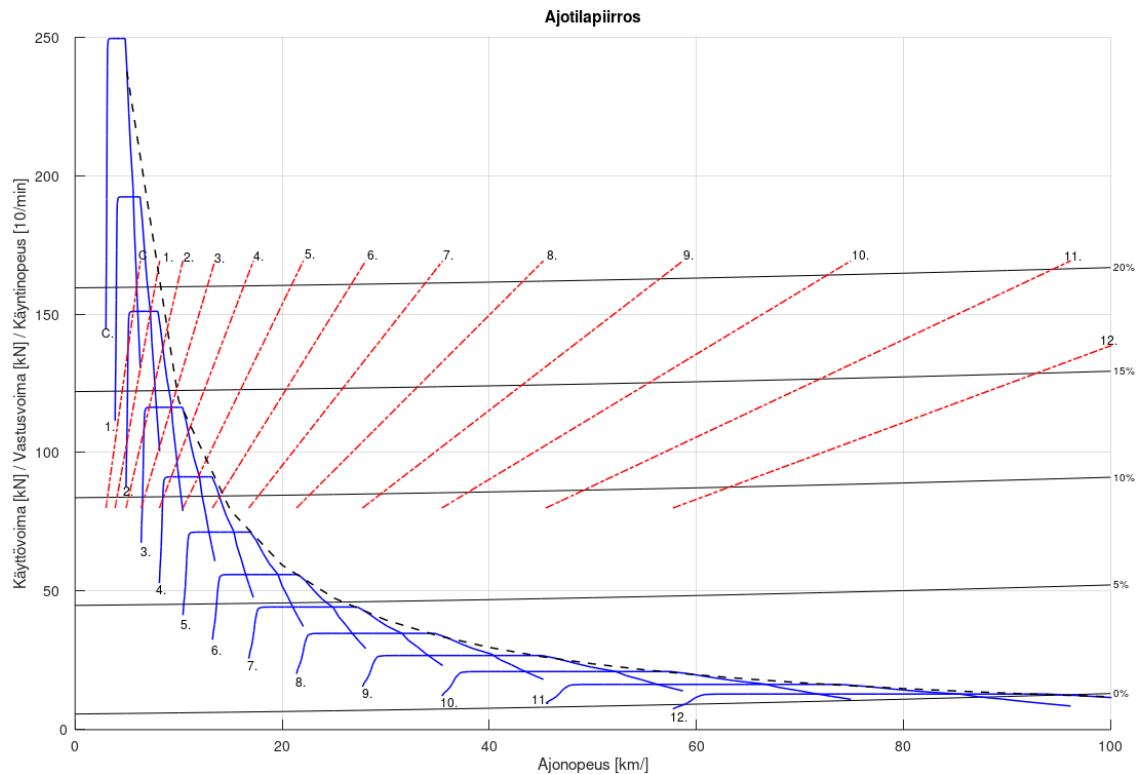
Maksimiteho	375 kW / 510 hp	Vaihteiston välityssuhteet C-vaihde: 19,38:1,00 1. vaihde: 14,94:1,00 2. vaihde: 11,73:1,00 3. vaihde: 9,04:1,00 4. vaihde: 7,09:1,00 5. vaihde: 5,54:1,00 6. vaihde: 4,35:1,00 7. vaihde: 3,44:1,00 8. vaihde: 2,70:1,00 9. vaihde: 2,08:1,00 10. vaihde: 1,63:1,00 11. vaihde: 1,27:1,00 12. vaihde: 1,00:1,00
Maksimivääntömomentti	2800 Nm, 900-1300 rpm	
Maksimikierros-luku	1900 rpm	
Perävälitys	RAT2,57:1,00	

Taulukossa C-vaihteella tarkoitetaan ryömintävaihdetta (engl. *crawling*). Käytännön mittauksia varten ajotilapiirroksia laaditaan kaksi kappaletta. Tämä siitä syystä, että ennen mittauksia olisi karkea tieto siitä, miten teho-painosuhte 5

kW/tonni vaikuttaa HCT-ajoneuvon suorituskykyyn. Toisin sanoen ajotilapiirrosten avulla tehdään mittaushypoteesi. Ensimmäinen ajotilapiirros (kuva 9) havainnollistaa teho-painosuhdetta 5 kW/tonni, mutta toiseen piirrokseen (kuva 10) kokonaisuutta lisätään 5 tonnia eli yhteensä 80 tonniin, jolloin teho-painosuhte laskee alle lain vaatiman 5 kW/tonni.



Kuva 9. Ajotilapiirros 75 tonnin massalla.



Kuva 10. Ajotilapiirros 80 tonnin massalla.

Ajotilapiirroksissa siniset yhtenäiset kuvaajat ovat käyttövoimakuvaaja eli ne havainnollistavat kyseisellä vaihteella käytettävissä olevan voiman määrän sekä silloisen ajonopeuden. Ensimmäisten vaihteiden kuvaajien lukemat toteutuvat teoriassa, mutta eivät käytännön ajotilanteissa, sillä vääntömomentinrajoitus estää noin suurien käyttövoimien ulosoton. Voimansiirron komponentit eivät kestä vastaavien lukemien voimia.

Musta katkoviiva on CVT-hyperbeli, joka kuvastaa voimansiirron teoreettista käyttövoimakuvaajaa. CVT-hyperbeli havainnollistaa voimansiirron ihannetilannetta, koska kuvaajan tapauksessa maksimiteho on koko ajan käytössä eli esimerkiksi vaihteiden vaihdosta ei aiheudu voiman katkosta [Oikarinen 2019: 85]. Voimansiirron toteutuksessa pyritään pääsemään mahdollisimman lähelle CVT-hyperbelin muotoa ja sen hyötysuhde sekä tehokkuus on sitä parempi, mitä pienempi pinta-ala sinisten käyttövoimakuvaajien ja hyperbelin väliin jää.

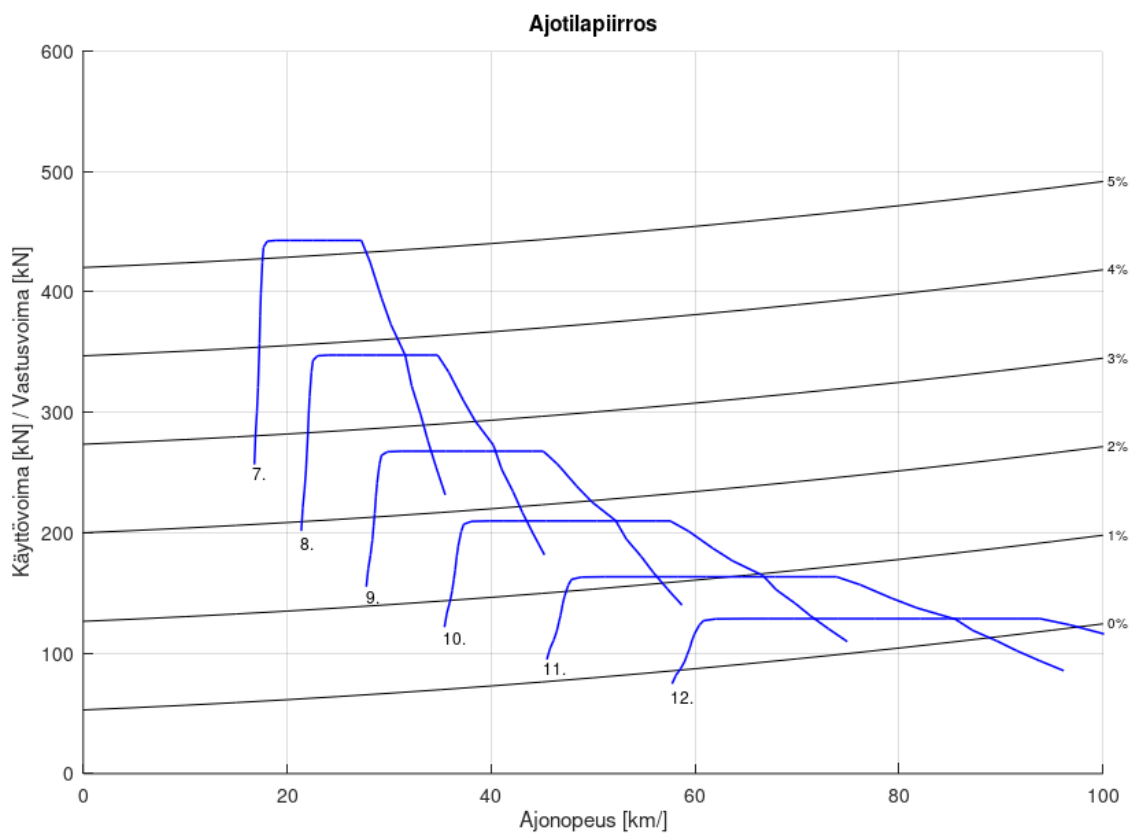
Mustat yhtenäiset viivat edustavat kokonaisajovastusvoimia ajonopeuden ja ylämäen nousukulman mukaan. Nousuprosentit on laskettu 5 %:n välein 20 %:iin saakka samaan tapaan kuin pelkän nousuvastuksen laskennan yhteydessä. Jotta ajoneuvon ajosuunta eteenpäin olisi mahdollista, täytyy sinisen käyttövoimakuvaajan olla kokonaisajovastuskuvaajan yläpuolella kyseisellä ajonopeudella ja nousuprosentilla. Muutoin kokonaisajovastusvoimat ovat liian suuria ja ne hidastavat ajonopeutta ja lopulta pysäyttävät ajoliikkeen.

Punaiset katkoviivalla esitetyt kuvaajat havainnollistavat yksinkertaisuudessaan moottorin pyörimisnopeutta eli kierroslukua eri vaihteiden osalta ja ajonopeuden mukaan. Lisäksi punaisten kuvaajien avulla voidaan ikään kuin visuaalisesti esittää vaihteiston välityssuhteet, sillä mitä tiiviimmät välit kuvaajien välillä on, sitä tiheämmät välityssuhteet vaihteistoon on rakennettu. Laskujen malliajoneuvon tapauksessa esimerkiksi 50 km/h -nopeutta tasamaalla ajettaessaärkevin vaihtoehto on ajaa 10. vaihteella, jolloin kierrosluku on noin 1150 - 1200 rpm. Näin moottorista saadaan paras vääntömomentti ulos ja polttoainetaloudellisuuden kannalta kierrosalue on edullisin.

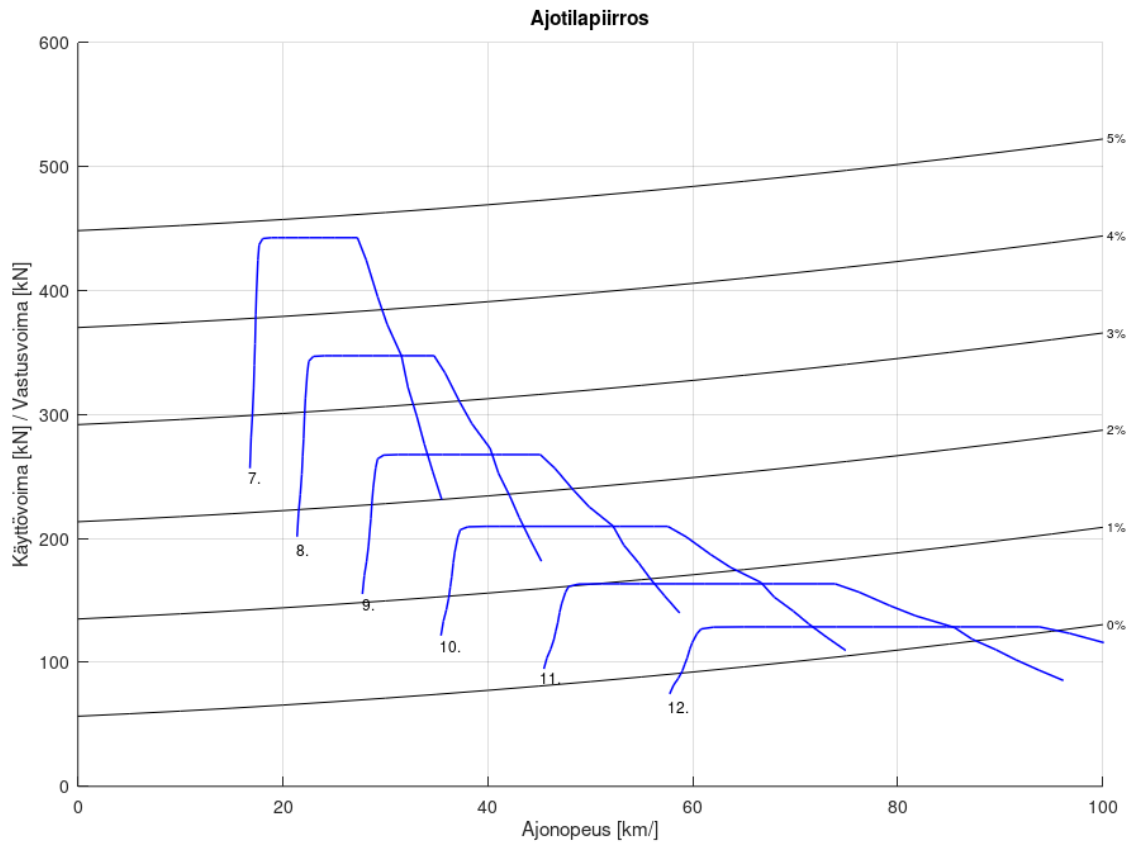
75 tonnin ja 80 tonnin ajotilapiirroksissa ainoa selkeä ero on havaittavissa vaihteiden C, 1, 2 ja 3 kohdalla. 75 tonnin kuormalla näillä vaihteilla voidaan ajaa jyrkempiä nousukulmia kuin 80 tonnin kuormalla. Esimerkiksi 75 tonnin yhdistelmä voi ajaa 15 %:n mäkeä 3. vaihteella, mutta 80 tonnin yhdistelmä ei. 3. vaihteesta eteenpäin eroa ei kuitenkaan ole juuri laisinkaan. Käytännön testin osalta tämä eroavaisuus huomataan kiihtyvyyden mittauksissa, mutta muuten sillä on hyvin vähän vaikutusta testeihin.

Käytännön testin kannalta oleellista tietoa on etenkin maantienopeuksilla ajettaessa vastusvoimien suuruus ja suurimmilla vaihteilla tarjolla oleva käyttövoima. Koska varsinaisissa ajotilapiirroksissa voimien suuruusluokat ovat erittäin suuria, on järkevää tarkentaa kuvaajia vaihteiden 7 - 12 kohdalta. Kuvissa 11 ja 12 näin on tehty, ja kuten varsinaisissa ajotilapiirroksissakin, ensimmäisessä tarkennuksessa kokonaismassana on 75 tonnia ja toisessa tarkennuksessa 80 tonnia.

Tarkennetuissa kuvaajissa käyttövoimien arvoja on selkeämpää tulkita ja eroavaisuudet 75 ja 80 tonnin välillä on helpompi havaita. Myös asteikot mukautuvat paremmin vaihteille 7 - 12. Kuvia 11 ja 12 vertailemalla huomataan, että esimerkiksi vaihteella 11 voidaan ajaa 1 %:n ylämäkeä 75 tonnin kuormalla nopeutta 60 km/h, mutta 80 tonnin kuormalla se ei onnistu. 80 tonnin kuormalla joko ajonopeutta täytyy laskea tai vaihtaa yhden pienemmälle vaihteelle. Valtavia eroja kuvaajien välillä ei ole, joten käytännön testissä nykyisen lainsäädännön edellyttämää teho-painosuhdetta kannattaa tutkia.



Kuva 11. Käyttövoimat suurimmilla vaihteilla 75 tonnin kuormalla.



Kuva 12. Käyttövoimat suurimmilla vaihteilla 80 tonnin kuormalla.

5 Voimansiirtoratkaisut

Työn seuraava vaihe on toteutettu merkittävimpien Suomessa toimivien ajoneuvomaahantuojaan haastatteluiden avulla. Haastatteluun vastasivat Volvon, Scania ja Mercedes-Benzin edustajat. Haastattelut suoritettiin välimatka- ja aikataulusyistä sähköpostin välityksellä. Haastatteluiden tarkoituksena on selvittää mm. tulevien ajoneuvomallien suorituskykyä, ajoneuvojen käyttötarkoituksia sekä valmistajien suhtautumista nykyiseen 5 kW/tonni teho-painosuhteen lakiin. Kaikille vastaajille esitettiin samat kysymykset ja saatiin seuraavat vastaukset:

1. Minkälaisissa kuljetustehtävissä teho-painosuhte on 5 kW/tonni?
 - ”Yleisin kuljetustehtävä on kappaletavarakuuljetus 76 t HCT, missä osittain mennään ”rajaa hipoen”, eli konetehto on aika usein 530hv (390kW). Tosin pystyvät harvemmin kuormaamaan kappaletavarayhdistelmää niin että saadaan 76 t täyteen. Puuautot ovat yleensä täydessä kuormassa,

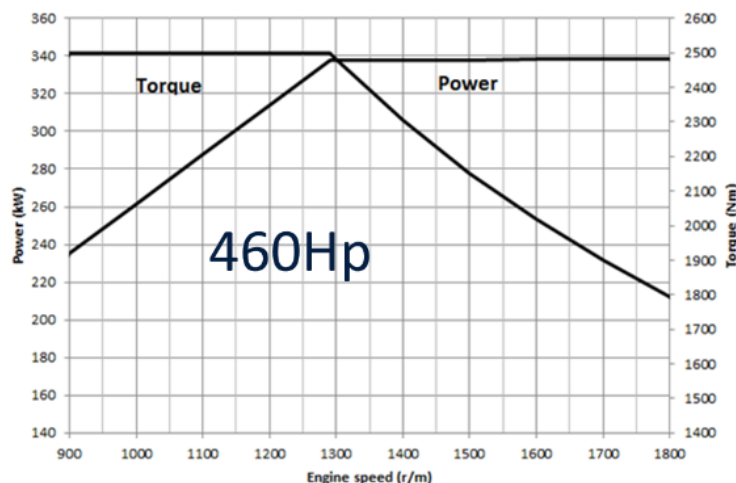
mutta niissä usein miten isommat koneet, jolloin 5kW raja ei tuota ongelmia.” Näin totesi Veho Hyötyajoneuvojen tuotepäällikkö Staffan Nyberg.

- ”Tämän ollessa lakivaatimuksena niin heijastaa useissa kuljetustehtävissä moottoritehon mitoittamista ja varsinkin nykypäivänä, kun on siirrytty moduulikäyttöihin ja mietitään mahdollisimman monipuolista kaluston hyödyntämistä eri käyttötehtävissä”, kertoi Volvo Finland AB:n tuotepäällikkö Antti Heinonen.
 - ”5kW/tonni säädös on voimassa kaikissa kuljetuksissa. Moottorin tehon tulee olla vähintään 5 kW/tonni. Näin ollen 76 tonnin yhdistelmä vaatii vähintään 517 hv (516,8hv), 68 tonnin yhdistelmä vaatii vähintään 462 hv (462,4 hv) ja 60 tonnin yhdistelmä vaatii vähintään 408 hv. (kW -> hv kerroin 1,36) Tarkka kerroin 1,359 621 617 303 9.” Näin vastasi Scania Suomi Oy:n tuotepäällikkö Mika Jukkara.
2. Minkälaisissa ajosuoritteissa olisi mielenkiintoa kokeilla nykyisellä lain-säädännöllä alitehoisia ajoneuvoja?
- ”En kiinnittäisi tällaista testausta johonkin ajotehtävään vaan ennemmin ympäristöön missä topografia olisi riittävän tasainen ja/tai riittävästi ohi-tuspaikkoja kevyelle kalustolle.” (Nyberg)
 - ”Maantieverkolla tapahtuvassa liikenteessä esimerkiksi hakkeen ja kierätysmateriaalien kuljetuksissa. Moottoritekniikan kehitettyä voidaan saavuttaa parempi suorituskyky laajemmalla vääntöalueella kuin aavistuksen korkeammalla kilowatti teholla, tästä esimerkkinä Volvolla D13 500TC vs D13 540.” (Heinonen)
 - ”Perus rahtiliikenne ja erityisesti vaihtoehtoisten polttoaineiden kyseessä ollessa ja 68 ja 76 tonnin kokonaisuudessa.” (Jukkara)
3. Miten usein teho-painosuhte vaihtelee siten, että paino on ”ylärajalalla” eli tehoa on juuri ja juuri 5 kilowattia tonnia kohti?
- ”Kts. kohta 1.” (Nyberg)
 - ”Polttoaineen kulutuksen merkitys kuljetusalalla on kasvanut huomattavasti viimeisien vuosien aikana, tämä johtuen mm. kallistuneen polttoaineen johdosta. Moottoritekniikan kehittyessä nähdään myös huomattavia parannuksia siirryttäessä joissain tapauksissa vanhasta poiketen aavistuksen pienempään vaihtoehtoon, mutta kuitenkin ilman että tehdään käytännön suorituskyvylle kompromisseja. Toki poikkeuksena esimerkiksi erittäin raskaissa käyttötehtävissä alemmalla tieverkolla esimerkiksi

puuautoissa tarvitaan vielä useammassa tapauksissa korkeampaa moottoritehoa.” (Heinonen)

- ”Useimmiten käytettäessä vaihtoehtoisia käyttövoimia ja niistä erityisesti kaasu ja kaasumoottorit (Metaani. LBG/LNG ja CBG/CNG).” (Jukkara)
4. Mitä sellaisia tuotteita teillä on mallistossa, jotka riittäisivät omasta mielestänne asiakkaille, mutta nykyainsäädännöllä eivät?
- ”Ei noin nopeasti tule mieleen tällainen tarve, paitsi ehkä Unimog raide/maantieversiona.” (Nyberg)
 - ”Tämän hetkessä mallistossa erityisesti D13 500TC -moottori kärsii tällä hetkellä. Ja kuten aiemmin mainitsin, niin kyseisellä moottorilla pystytään saavuttamaan korkeampi käytännön suorituskyky kuin lain täyttävällä D13 540 – moottorilla. Nykyisellä lainsäädännöllä eroa maksimiin jää 1 tonnin yhdistelmämassassa, mutta tämän 1 tonnin vaikutukset voivat olla asiakkaalle erittäin merkittävät niin taloudellisesti kuin joissa tapauksissa ajamista ei sallita tilaajapuolelta tällaisella yhdistelmällä.” (Heinonen)
 - ”Kaasukäyttöiset moottorit.” (Jukkara)
5. Rajoittaako nykyainsäädäntö mallistonne kaasumoottoristen ajoneuvojen käyttöä jollain tapaa?
- ”Daimler Truck on päättänyt lopettaa kaasumoottorien käytön ja siirtyä suoran sähköön.” (Nyberg)
 - ”Tällä hetkellä ei niin merkittävästi, mutta tulevaisuudessa tämän vaihtoehtoisen menetelmän tuoman mahdollisuuden soveltaminen olisi hyvä huomioida. Kuten myös muiden vaihtoehtoisten käyttövoimien osalta.” (Heinonen)
 - ”Kyllä. Hevosvoimamäärä (kW) eri autonvalmistajien välillä vaihtelee. Nykyaikaisen kuorma-auton mäen nousukykyyn vaikuttaa eniten moottorin tuottama vääntö (Nm) eikä niinkään hevosvoimat. Nykyaikaista kuorma-autoa on käyttötaloudellisista syistä järkevintä ajaa moottorin tuottaman maksimi vääntömomentin alueella, joka nykyaikaisissa moottoreissa on useimmiten 900 – 1300 rpm alueella. Moottorin tuottama suurin teho alkaa yleensä vasta tämän jälkeen ja samalla moottorin tuottama vääntömomentti laskee jyrkästi. Moottoreiden tuottamat vääntömomentit ovat kasvaneet hurjasti vuosien saatossa ja kW/tonni lainsäädäntö alkaa tässä suhteessa olla hieman vanhentunut. Eri valmistajien ilmoitetut

moottoreiden tehokemat saattavat vaihdella, vaikka moottoreiden tuottama vääntö on täsmälleen sama. Näkemykseni mukaan teho-paino pitäisi liittyä enemmänkin moottorin tuottamaan vääntöön eikä hevosvoimamäärään. Moottorin tuottama vääntö vaikuttaa ensisijaisesti mäen nousukykyyn. Alla esimerkki 460 hevosvoimaisen dieselmootorin vääntö-/tehokuvaajasta. Kaasumootoreilla kuvaajat ovat vastaavanlaisia.” (Jukkara)



6. Minkälaisilla tehokemilla raskaita täyssähkökuorma-autoja teiltä on tulossa ja rajaako tuo teho suurinta sallittua yhdistelmäpainoa?
- ”Pitkän matkan puoliperävaununveturi eActros on tulossa (2024 - 2025), jossa jatkuva teho 400 kW ja hetkellinen teho 600 kW. On vielä epäselvää rajoittaako valmistaja kokonaismassan vai ei.” (Nyberg)
 - Tämän hetkessä mallistossa meillä on FH/FM/FMX Electric malleihin saatavilla 490kW tehoilla oleva voimalinja, joten tässä vaiheessa tämä ei muodosta rajaavaa tekijää. Suurin sallittu yhdistelmämassa tämän hetkiseen mallistoon on 44 t, näin sarjatuotannon alkuvaiheessa.” (Heinonen)
 - ”Scaniaalta on tulossa 450 kW tehoinen sähköversio ja alemman tehon sähkömoottoreilla varustettuja malleja on jo käytössäkin muutamia kappaleita. 450 kW (=612 hv) teho ei rajoita maksimi kokonaismassaa, mutta valmistajien tekniset rajat tulevat eteen sähköautojen kohdalla. Tosin voisi tulevaisuudessa olla mielenkiintoista ja järkevää kokeilla myös sähköautojen tehojen ja vääntömomenttien vaikutusta mäen nousukykyyn. Erityisesti lataushybridien kanssa. Tällä hetkellä sähköisten ajoneuvojen kohdalla ei ole olemassa selkeää määritelmää tehon ja tonnien suhteesta.” (Jukkara)

6 Älykäs vakionopeudensäädin

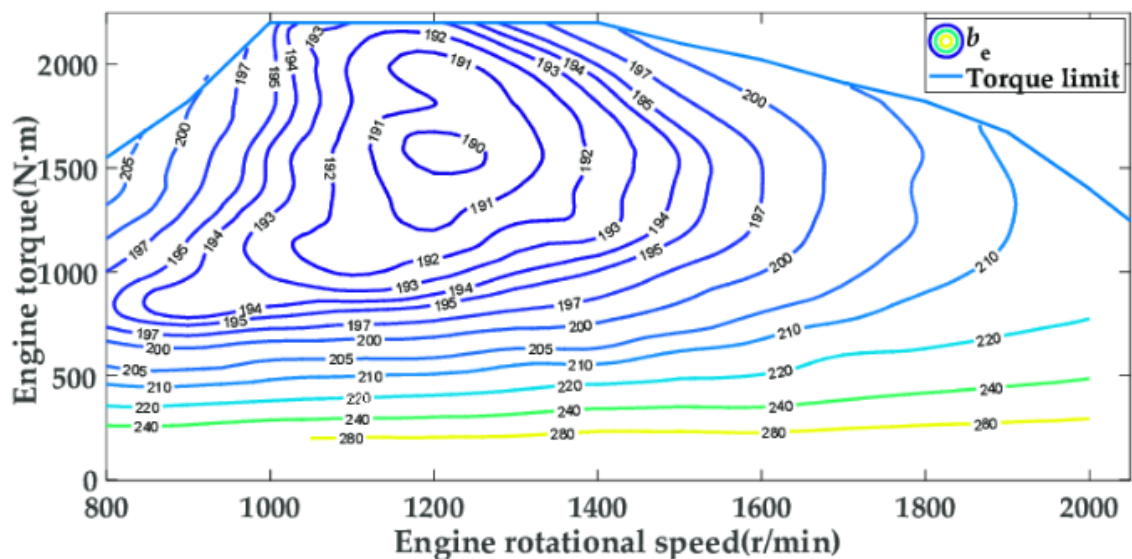
6.1 Mihin älykkäiden vakionopeudensäädinten toiminta perustuu?

Raskaan kaluston ajoneuvot voidaan varustaa niin sanotulla älykkäällä vakionopeudensäätimellä. Perustoimintaperiaate järjestelmässä on sama kuin perinteisissä vakionopeudensäätimissä, mitä löytää henkilöautoistakin eli kuljettaja voi halutessaan kytkeä järjestelmän päälle, jolloin moottorinohjaus yhdessä vakionopeudensäätimen automatiikan kanssa pitää yllä kytkentähetken ajonopeutta tai erikseen asetettua ajonopeutta. Näin ajoneuvon nopeus pysyy tasaisena ja kuljettaja vapautuu nopeudensäätelystä.

Järjestelmästä tekee älykkään sen ominaisuus verkottua karttasovelluksiin ja kaupallisiin topografisiin karttoihin sekä ennakoida hyvissä ajoin tulevia reitin korkeuseroja. Valmistajakohtaisia eroja järjestelmien toteutuksessa on, mutta pääpiirteittäin älykäs vakionopeudensäädin toimii niin, että tasamaalla ajattaessa ajotietokone ylläpitää ajonopeutta, käyttää polttoainetaloudellisinta vaihdetta ja kuormittaa moottoria tasaisesti. Samalla ajoneuvo ennakoii jatkuvasti tulevia tien muotoja, jotta se voi valmistautua mahdollisiin ajonvastusvoimien muutoksiin. Valmistautuminen voi tarkoittaa esimerkiksi lähestyvän ylämäen tilanteessa sitä, että moottorinohjainlaite nostaa kierroksia ennen mäkeä, kytkeään pienempi vaihde tai ajonopeutta kasvatetaan hetkellisesti. Alamäkitilanteessa valmistautuminen tarkoittaa esimerkiksi vaihteen vaihtamista vapaalle, rullaamista ja sähkömoottoreiden ohjaaminen regenerointitilaan eli jarrutusenergian talteenottoon.

Älykkäiden vakionopeudensäädinten toimintaan liittyy vahvasti polttoaineenkulutuksen ominaiskartasto eli niin sanottu simpukkadiagrammi. Riippuen simpukkadiagrammista siitä voidaan selvittää mm. moottorin tehollinen keskipaine, optimikulutus, kiihdytysreservi, kokonaisajonvastusvoima tietyllä välityssuhteella sekä ominaiskulutus yksikössä grammaa per kilowattitunti [Oikarinen 2019: 95]. Simpukkadiagrammi koostuu eri ominaiskulutuskäyristä, jotka muodostavat

ikään kuin alueita kuvastamaan moottorin taloudellisuutta ja suorituskykyä tietyllä kierroslukemalla. Kuvassa 13 on esimerkki raskaan dieselmoottorilla varustetun ajoneuvon simpukkadiagrammista. Kuvan pienin lukema, 190 g/kWh, on moottorin optimikulutuksen lukema ja ideaaltilanteessa tuolla alueella haluttaiisiin pysyä ajon aikana. Alueen pinta-ala on kuitenkin varsin pieni eli kulutuksella 190 g/kWh pystytään operoimaan vain tietyn tyypisessä kuormitustilanteessa. 190 - 195 g/kWh -alue toisaalta onkin jo varsin suuri ja kulutus on edelleen mallillisella tasolla verrattuna suurimpiin lukemiin. 190 - 195 g/kWh -alue muodostaa laajemman toiminta-alueen, jolloin moottorista saadaan ulos paras mahdollinen teho mahdollisimman alhaisella polttoainekulutuksella. Raskaan kaluston moottoritekniikankehitys onkin viime vuosina keskittynyt erityisesti kasvattamaan tuota pienimmän ominaiskulutuksen käyrän ympäröimää pinta-ala. Älykäätkäät vakionopeudensäätimet pyrkivät ajamaan pienimmän ominaiskulutuksen alueella.



Kuva 13. Raskaan dieselmoottorilla varustetun ajoneuvon simpukkadiagrammi [Zhang ym. 2020: 4].

6.2 Volvo I-See

Volvon älykäs vakionopeudensäädin tunnetaan nimellä I-See. Järjestelmän toiminta perustuu jatkuvaan karttojen käyttöön ja korkeuserojen analysointiin. I-

See -järjestelmällä on kolme eri vaihtoehtoa tarjolla, joiden avulla se voi käyttää karttojen tietoja ajon ennakkointiin. Ensisijainen vaihtoehto on aina hyödyntää verkkoyhteyttä sekä GPS:ää ja käyttää kaupallisia korkeuserot tuntevia karttasovelluksia. Mikäli esimerkiksi käytettävä karttasovellus ei vielä tunne tietä, toisena vaihtoehtona on hyödyntää jaettua tietoa, joka on tallennettu pilvipalveluihin esimerkiksi aiemmin kyseisestä kohdasta ajaneen ajoneuvon toimesta. Kolmas ja viimeinen vaihtoehto on käyttää paikallisesti tallennettua tietoa eli ajoneuvon omia paikkatietoja. Kartta- ja topografiatiedot voidaan päivittää järjestelmään joko huollon yhteydessä tai etäyhteyden avulla. [Volvo Trucksin I-See -toiminto 2022.]

I-See jakaa lähestyvän ylämäkiosuuden kuuteen eri osaan. Ensimmäisessä osassa se alkaa valmistautua ylämäkeen lisäämällä ajonopeutta ja pitämällä vaihteen suuremmalla pitempään. Toisessa osassa ajoneuvo on jo ylämäessä, jolloin vakionopeudensäädin pyrkii välttämään turhia vaihtenvaihtoja ja sitä myöten tehonkatkoksia. Kolmannessa vaiheessa ylämäen huippu on saavutettu ja I-See hillitsee hyvissä ajoissa kiihdyttämistä. Kun alamäki alkaa, järjestelmä on siirtynyt ajotilanteeseen neljä, ja se kytkee hetkellisesti voimansiirtojärjestelmän sekä moottorijarrutuksen pois käytöstä energian säästämiseksi. Viidennessä vaiheessa ajoneuvo on alamäessä, jonka aikana järjestelmä operoi itsenäisesti mekaanisia jarruja sen mukaan onko edessä uusi ylämäki vai jatkuuko tieosuus tasaisena. Kuudenteen ja viimeiseen osaan siirtyään vain, jos tieosuus jatkuu mäkisenä. Tällöin I-See antaa ajoneuvon rullata ajonopeuden ja liikemäärän kasvattamiseksi seuraavaa nousua varten. Osissa yksi, kaksi ja kuusi käytössä voi olla myös lisävarusteena saatava I-Torque-järjestelmä, joka optimoi moottorin vääntömomentin ylämäkiä varten hyödyntämällä I-See:n tietoja. [Volvo Trucksin I-See -toiminto 2022.]

6.3 Mercedes-Benz Predictive Powertrain Control (PPC)

Mercedes-Benzin älykäs vakionopeudensäädin, PPC, luo valmistajan kutsuman mukaan "digitaalisen horisontin" ajoneuvoon ladattujen 3D-karttojen, reaaliai-

kaisten GPS-tietojen sekä liikennemerkkien tunnistuksen avulla. Digitaalista horisonttia luodaan jatkuvasti kahden kilometrin päähän ajoneuvon sen hetkisestä sijainnista katsottuna. Digitaalisen horisontin avulla ajoneuvo tunnistaa mm. lähestyvät ylä- ja alamäet, tarpeen lisätä tai tiputtaa ajonopeutta, oikeat vaihteenvaihtohetket sekä risteykset ja tiukat mutkat ennen kuin kuljettaja on niistä edes tietoinen. Valmistajan mukaan ajoneuvon ohjelmiston uusin versio tuntee jopa 95 % kaikista Euroopan maanteistä ja raskaan kaluston tieverkostosta. [Predictive Powertrain Control (PPC) – 10 questions and answers about the predictive cruise control from Mercedes-Benz Trucks 2020.]

PPC voi hetkellisesti sekä ylittää että alittaa kuljettajan asettaman vakionopeuden, mikäli järjestelmä laskee nopeuden muutoksen edesauttavan polttoainetaloudellisuutta ja yleisesti matkantekoa. Esimerkiksi ylämäen loppuvaiheessa järjestelmä voi alittaa asetetut nopeuden, jos se tulkitsee, että ajoneuvon nykyinen liike-energian määrä riittää rullaamaan ajoneuvon mäen päälle turvallisesti. Ylämäkeä lähestyttäessä PPC voi nostaa ajonopeutta liike-energian kasvattamiseksi ja ehkäisemään turhia vaihteenvaihtoja kesken ylämäen. Kuljettaja voi halutessaan muokata PPC:n marginaaleja nopeuden ylityksiin ja alituksiin. [Predictive Powertrain Control (PPC) – 10 questions and answers about the predictive cruise control from Mercedes-Benz Trucks 2020.]

Älykkään vakionopeudensäätimen yhteyteen on integroitu muutamia lisäjärjestelmiä tuottamaan lisätietoja vallitsevasta ajotilanteesta. Edellä mainittu rullausominaisuus ja voimansiirron hetkellinen poiskytkentä ovat osa EcoRoll-toimintoa, joka siis maksimoi ajoneuvon liike-energian ja -määrän ylämäissä ja tarpeen tullen myös alamäissä. Jos edessä on uusi nousu, EcoRoll antaa ajoneuvon rullata vapaammin pitempään, jotta liike-energiaa olisi mahdollisimman paljon seuraavaa mäkeä varten ja liiallisilta kiihdytyksiltä polttomoottorin kustannuksella vältyttäisiin. Toinen ajonavustinjärjestelmä PPC:n tueksi on PCA eli Proximity Control Assist. PCA on etäisyydentunnistusjärjestelmä, joka tarkkailee tutkien avulla välimatkaa edessä ajavaan ajoneuvoon. PCA:n tarjoaman informaation avulla vakionopeudensäädin osaa kasvattaa etäisyyttä edessä ajavaan

ajoneuvon ennen alamäkeä, jotta alamäessä välttyttäisiin ylimääräisiltä jarrutuksilta ja ajoneuvon oma liike-energia voitaisiin käyttää kaikkein tehokkaimmin. Etäisydentunnistusjärjestelmää käytetään myös apuna tunnistamaan sopivat vaihtenvaihtohetket. [Predictive Powertrain Control (PPC) – 10 questions and answers about the predictive cruise control from Mercedes-Benz Trucks 2020; What is Predictive Powertrain Control (PPC)? New Mercedes-Benz Actros/Arocs 2018.]

HCT-kaluston kannalta oleellinen tieto on se, että Mercedes-Benzin älykäs vakionopeudensäädin voidaan varustaa myös erittäin suuriin kuormiin erikoistuviin malleihin. PPC:tä voidaan käyttää jopa 120 tonnin kokonaiskuorman yhteydessä. [Predictive Powertrain Control (PPC) – 10 questions and answers about the predictive cruise control from Mercedes-Benz Trucks 2020.]

6.4 Scania Cruise Control with Active Prediction

Scanian älykäs vakionopeudensäädin CCAP (Cruise Control with Active Prediction) toimii lähes samaan tapaan kuin Mercedes-Benzin ja Volvon vastaavat järjestelmät. CCAP hyödyntää myös reaaliaikaista GPS-paikannusdataa ja topografisia karttasovelluksia ennakoidakseen mm. vaihteiden valintaa, moottorin kuormitusastetta, nopeutta ja rullaustilanteita. Mercedes-Benzin vakionopeudensäätimen ennakoidessa maastoa kahden kilometrin päähän, ennakoi Scanian vastaava järjestelmä maastoa kolmen kilometrin päähän. Lisäominaisuutena Scanian CCAP-järjestelmässä on Pulse & Glide -toiminto, joka maksimoi ajoneuvon rullausajan pienilläkin alamäkiosuuksilla ja -jyrkkyyksillä. Pulse & Glide -toiminto antaa ajoneuvolle pienen sysäyksen, jonka voimin rullaus jatkuu pitempään. HCT-kaluston osalta Scanian älykäs vakionopeudensäädin ei ole paras mahdollinen, sillä sen toiminta on optimaalisinta 20 - 40 tonnin kuormilla. [How to use the truck's kinetic energy to save fuel 2018.]

7 Käytännön testi

7.1 Mittausjärjestelyt

Käytännön testi suoritettiin keskiviikkona 16.11.2022 Powder-Trans Oy:n kuljetuksen aikana. Mittausajoneuvoksi onnistuttiin saamaan samalla voimansiirrolla eli moottorilla D13K500 TC ja automaattivaihteistolla AT2812 varustettu Volvo FH 500 (kuva 14), jota käytettiin malliajoneuvona luvun 4 laskelmissa. Yhdistelmän tyyppi oli malliltaan B-linkki, jossa vetoautoon oli kytketty kaksi jauhesäiliöpuoliperävaunua. Lisäksi ajoneuvossa oli Volvon älykäs vakionopeudensäädin I-See, josta kerrottiin tarkemmin luvussa 6.2. Testien reitti kulki Espoosta Turveradantie 20:stä tietä E18 eli Turuntietä pitkin Kaarinaan, josta käännettiin tiellä 180 Paraisiin. Sieltä kyytiin lastattiin noin 54 tonnia kalkkimineraalia, jolloin yhdistelmän kokonaispainoksi tuli noin 76 tonnia. Kalkkikaivokselta palattiin samaa reittiä takaisin Espooseen purkamaan kuorma, jonne myös testimittaukset päättyivät.



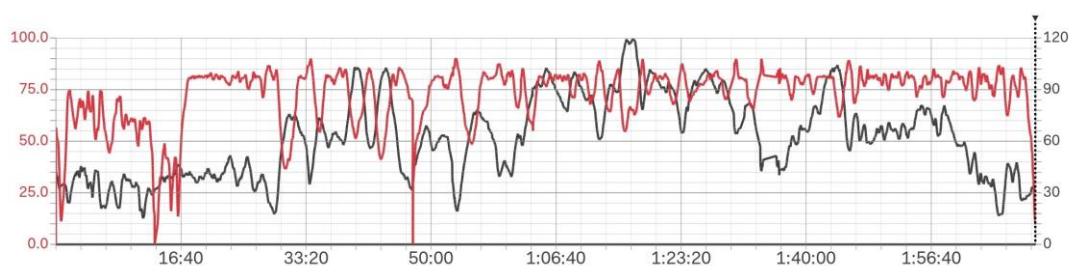
Kuva 14. Volvo FH 500 -testiajoneuvo.

Ajodataa kerättiin puhelimeen ja tietokoneeseen ladatun paikkatietosovelluksen avulla, joka tallensi jatkuvasti ajoneuvon nopeutta, sijaintia sekä maaston korkeutta. Lisäksi tietojenkeruussa hyödynnettiin ajoneuvon omaa ajotietokonetta ja digitaalimittaristoa. Niiden avulla kirjattiin ylös mm. vaihtenvaihtopisteet ja -nopeudet kaikkein jyrkimmissä mäissä. Testeissä oleellisinta dataa olivat nuo jyrkimmissä mäissä tapahtuvat ajoneuvon nopeuden hyytymiset suhteessa ylämäen pituuteen ja jyrkkyyteen. Paikkatietosovelluksen avulla tuloksista saatiin aikaiseksi havainnollistava ajonopeus-korkeuskuvaaja, joka on esitetty luvussa 7.2. Vaihtenvaihtopisteiden ja ajonopeuden hyytymisen lisäksi testillä kerättiin tietoa mm. älykkään vakionopeudensäätimen toiminnasta sekä ajoneuvon, jonka teho-painosuhte on aivan tieliikennelain edellyttämän minimivaatimuksen tasolla, kulkemisesta.

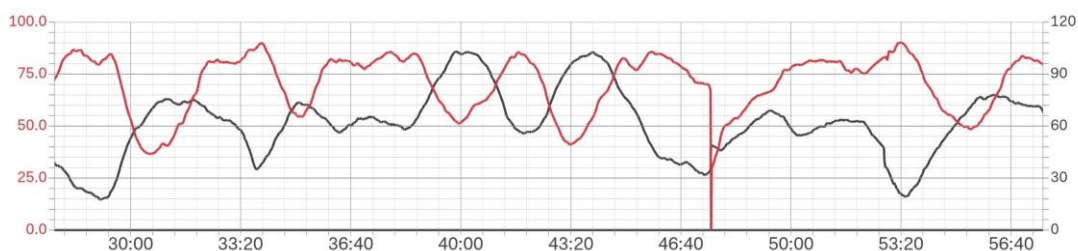
Paluumatkalla yhdistelmä kuormattuna tien E18 Turku–Espoo-välin kolmesta jyrkimmästä mäestä taltioitiin vaihtenvaihtopisteet. Nämä kolme mäkeä olivat Turusta päin ajettaessa Paimion, Hajalan ja Piihovin mäet.

7.2 Mittaustulokset

Mittaustuloksia havainnollistavat parhaiten paikkatietosovelluksen avulla luodut ajonopeus- ja korkeuskuvaajat. Punainen viiva edustaa ajonopeutta ja musta viiva tien korkeuseroa merenpinnasta. Kuvaajissa 6 ja 7 asteikko vasemmalla tarkoittaa ajonopeutta, asteikko oikealla korkeuseroa meren pinnasta ja alhaalla ajoaika lähtöpisteestä. Tuloksia ja kuvaajien dataa analysoidaan tarkemmin seuraavassa luvussa.



Kuvaaja 6. Kokonaismatkan ajonopeus- ja korkeusvaihtelut.

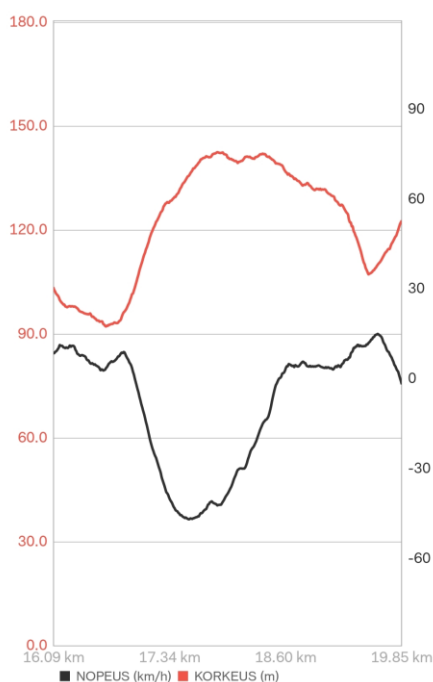


Kuvaaja 7. Tarkennus testimatkan mäkisimpään osuuteen.

Kuvaajassa 7 jyrkkää Paimion ylämäkeä lähdetään ajamaan noin 29 minuutin kohdalla, Hajalan ylämäkeä 37 minuutin kohdalla, Piihovin ylämäkeä 42 minuutin kohdalla. 47 minuutin kohdalla tapahtunut romahdus ilmaisee kuljettajan lakisäätteistä pysähdystä.

Kuvaajan 6 alkumatkan, aikaväli 0 - 17 minuuttia, alhaisempaa ajonopeuden tasoa ja nopeusvaihteluita selittää Paraisten saaristotien 180 matalammat nopeusrajoitukset, mutkainen tieosuus sekä risteykset.

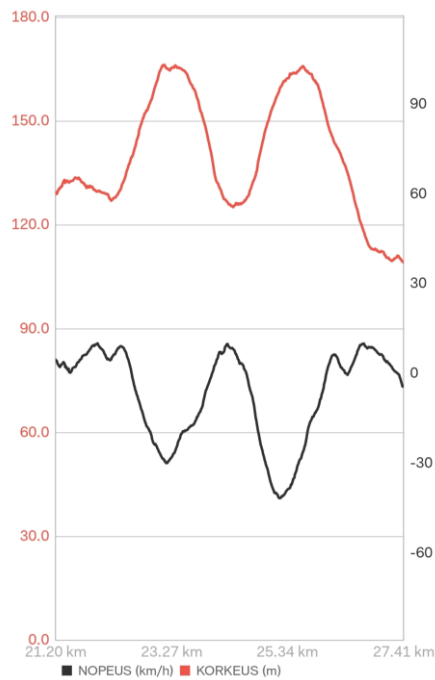
Kuvaajissa 8 ja 9 kuvaajien asteikot menivät tuntemattomasta syystä hieman sekaisin. Vasemmanpuolen punainen asteikko ilmaisee ajonopeutta eikä korkeuseroa, kun taas oikeanpuolen asteikko ilmaisee korkeuseroa merenpinnasta. Kuvaajien värit vastaavat kuitenkin alalaitaan kirjattuja suureita.



Kuvaaja 8. Paimion ylämäessä nopeuden ja korkeuden muutokset.

Paimion ylämäki, havainnollistettu yllä olevassa kuvaajassa 8, oli matkan raskain mäki nousta. Mäkeen tultaessa teimme kuljettajan kanssa yhteistyötä siten, että hän ilmoitti nopeuden mittaristosta, kun vaihteisto vaihtoi pienemmälle vaihteelle ja apukuljettajana kirjasin nuo nopeudet ylös. Näin saatiin taltioitua vaihtevaihtopisteet mäestä. Paimion ylämäessä nopeus putosi alhaisimmillaan jopa 38 km/h ja vaihteelle kahdeksan, kun ylämäkeen lähdettiin nousemaan nopeudesta 87 km/h vaihteella 12. Tästä syystä mäkeen on tehty erillinen raskaan kaluston ajokaista. Vaihtevaihtonopeudet olivat seuraavat:

- 12. vaihde → 11. vaihde = 76 km/h
- 11. vaihde → 10. vaihde = 61 km/h
- 10. vaihde → 9. vaihde = 48 km/h
- 9. vaihde → 8. vaihde = 40 km/h.



Kuvaaja 9. Hajalan ja Piihovin ylämäissä nopeuden ja korkeuden muutokset.

Samat toimenpiteet toteutettiin kuljettajan kanssa myös Hajalan ja Piihovin ylämäissä kuin Paimion ylämäessä. Molempien mäkien data on kuvaajassa 9 siten, että ensimmäinen nousu on Hajalan ylämäki ja toinen Piihovin. Vaihteenvaihtonopeudet Hajalan mäessä:

- 12. vaihde → 11. vaihde = 67 km/h
- 11. vaihde → 10. vaihde = 60 km/h
- 10. vaihde → 9. vaihde = 48 km/h.

Vaihteenvaihtonopeudet Piihovin ylämäkeen:

- 12. vaihde → 11. vaihde = 77 km/h
- 11. vaihde → 10. vaihde = 61 km/h.

8 Mittaustulosten analysointi ja yhteenveto

8.1 Analyysi saaduista mittaustuloksista

Ensimmäinen havainto mittaustuloksista, joka voidaan todeta sekä kuvaajien 6 - 9 että vaihteenvaihtopisteiden avulla, on että täydellä kuormalla ajettaessa yhdistelmän nopeus alenee merkittävästi mäissä. Vaikka lähes tasaisella tieosuudella reilun 80 km/h -ajonopeutta voidaan ylläpitää vaivatta, kohtalaisen ylämäen alaosassa ajonopeus putoaa selvästi. Voimansiirto ei siis jaksaa ylläpitää ajonopeutta normaalilla tasolla kovinkaan pitkiä aikoja mäkisellä tieosuudella. Kuvaajien äkilliset pudotukset nopeuskäyrissä ja suuri hajonta lukemien välillä tukevat tätä tietoa. Tästä voidaan tulla siihen johtopäätökseen, jota jo ajovastuslaskelmien yhteydessä ennakoitiin, että nousuvastus on täydellä kuormalla yhdistelmäajoneuvon suurin ajovastus ja eniten suorituskykyä vaativa osa-alue.

Positiivinen havainto tämän kyseisen voimansiirron ja ajoneuvomallin kohdalla oli se, että vääntömomenttia oli varsin runsaasti käytettävissä ja maksimi vääntömomentin käyttöalue oli sekin laaja. Taulukossa 7 ilmoitettu 900 - 1300 rpm:n kierrosalue tarjosi maksimivääntömomentin, ja sen myös huomasi erittäin hyvin ajossa. Vaikka ajonopeus putosi hetkittäin jopa alle 40 km:iin/h, alin vaihde, jota tarvitsi käyttää maantieajossa, oli 8. vaihde. D13K500 TC -moottorin Turbo Compound -tekniikan eli kahden eri turbon avulla toteutetun ahtamisen ansiosta moottorin vääntömomenttialue on hyvin laaja, ja se alkaa matalilta kierroksilta. Näin säästytään turhilta vaihteenvaihdolta, joiden aikana veto katkeaa ja ylämäen kiipeämisestä tulee entistä raskaampaa. TC-tekniikan avulla yhdistelmä jaksoi nousta useamman prosentin nousukulmalla olevia mäkiä vaikkakin matalammilla nopeuksilla.

Testin kokonaismatkan kuvaajasta 6 nähdään, että jyrkimpiä ylämäkiä lukuun ottamatta ajonopeus pysyy melko tasaisesti välillä 70 - 85 km/h noin 30 minuutin ajon jälkeen. Punainen ajonopeuden käyrä noudattelee pääpiirteittäin tuota nopeuden tasoa. Tämä indikoi sitä, että ajoneuvon vääntömomentti ja vetokyky riittävät oikein hyvin tieliikenteessä sallitun maksimikuorman kuljettamisen eikä 5 kW/tonni ole rajoittavana tekijänä. Jos jyrkimmät mäet ja tieosuuksien ääriesimerkit jätetään huomioimatta, yhdistelmästä ei ole juurikaan haittaa liikenteen sujuvalle kulkemiselle. Tasaisemmalla tieosuudella ajonopeuden kuvaajassa olisi vieläkin vähemmän heilahtelua ja ajoneuvon kulku liikenteen parissa entistäkin sujuvampaa. Tällaisesta tieosuudesta esimerkkinä, vaikka tie numero 4 välillä Helsinki–Lahti, jossa tieprofiili on tasaisempi kuin testimatalla ja jota väliä raskaan liikenteen parissa ajetaan runsaasti.

Volvon älykäs vakionopeudensäädin oli käytössä koko testimatkan maantieosuuden ajan. Jopa apukuljettajana järjestelmän toiminnan huomasi selkeästi, kun ajoneuvo alkoi kiihdyttämään tasaisesti jo kauan ennen seuraavan ylämäen tuloa eli se valmistautui siihen ajoissa GPS-tietoja hyödyntämällä. Alamäen alkaessa I-See kytki voimansiirron pois, jolloin polttoainetta säästy ja yhdistelmän oma liike-energia vei ajoneuvoa eteenpäin painovoiman kanssa. Mikäli edessä oli seuraava mäki, aiemmasta mäestä saatiin kaikki hyöty irti jarruttamalla mahdollisimman vähän, vaikkakin täydellä kuormalla seuraavan mäen alkuvaiheessa tuo rullauksesta saatu liike-energia oli jo kulunut. Pienoiseksi ongelmaksi aiheutui vakionopeudensäätimen ajoittainen liian runsas tehon säätely mäen yläosassa. Järjestelmä ryhtyi vähentämään tehontuottoa jo ennen mäen huippua, koska yhdistelmän oma liike-energia riittäisi kuljettamaan sen mäen päälle, mutta nopeus laskisi huomattavasti. Kuljettajan täytyi muutamaan kertaan puuttua ajamiseen ja antaa lisää kaasua, jotta loivissakin mäissä nopeus ei laskisi niin rajusti ja hidastaisi muuta liikennettä. Älykkään vakionopeudensäätimen toiminnasta jäi osittain sellainen mielikuva, että sen toiminta on optimaalisinta kevyemmällä kuormilla ja että se pyrkii säästämään polttoainetta välillä liikaa sujuvan ja turvallisen liikennevirran kustannuksella.

Testimittauksen tulosten perusteella voidaan todeta, että vastaavia suorituskykytestejä olisi ehdottomasti syytä toteuttaa lisää ja isommassa mittakaavassa. Yhden testimittauksen perusteella ei voida vielä antaa esitystä suorasta laskukaavasta tai muusta vaihtoehtoisesta osoitustavasta riittävän suorituskyvyn toteamiseksi. Volvo Säätiön mukaan ainakin yksi laajempi tutkimusprojekti on parhaillaan käynnissä tästä samaisesta aiheesta, mutta tarkempia tietoja niistä ei annettu. Australian PBS-standardien implementointia Suomen tieliikenteeseen ja kuljetuskalustolle sopivaksi olisi erittäin kannattavaa tutkia, koska niissä suorituskykytestien raja-arvot ja mittausjärjestelyt on määritelty selkeästi, mutta Australian erilaisen ilmaston takia esimerkiksi talviolosuhteita ei ole huomioitu.

Niin mittausdatan mukaan kuin kuljettajan sekä eri ajoneuvomaahantuoja tuotepäälliköiden mukaan tarvetta ja halua testata ajoneuvoja, jotka eivät täytä nykyistä tieliikennelain edellyttämää teho-painosuhteen vaatimusta, olisi paljon. Kuten mittausdatasta ja kuvaajasta 6 nähdään, yhdistelmä jaksaa vetää maksimikuormaa ja ylläpitää riittävää ajonopeutta suurimman osan matkasta varsin hyvin. Jos teho-painosuhteen vaatimusta muutettaisiin esimerkiksi 4,5 kW/tonni, suurimpaan tieliikenteessä sallittuun yhdistelmän kokonaispainoon 76 tonniin päästäisiin nykyisen 380 kilowatin / 517 hevosvoiman tehon sijaan 342 kilowattilla / 465 hevosvoimalla. Etenkin sähkö- ja hybridirekkojen yleistyessä asia konkretisoituisi, sillä sähkömoottoreiden jatkuvan ja huipputehon ero voi olla kaksin- tai jopa kolminkertainen ja huipputeholla sähkömoottoreita voidaan kuormittaa tyypillisesti muutaman minuutin ajan, riittävästi raskaimpienkin mäkien nousemiseen. Nämä mäet kyettäisiin ajamaan sähkö- ja polttomoottorin yhteisvoimin, jolloin huomattavaa pudotusta ajonopeuteen tuskin edes tulisi. Lisäksi tällä hetkellä alitehoisiksi jäävät kaasumoottorilla varustetut ajoneuvot voisivat yleistyä todennäköisemmin.

Käytännön testin jälkeen tehtiin vielä erittäin tärkeä havainto liittyen raja-arvoihin ja nimenomaan mittaukseen. Ennen kuin mitään raja-arvoja voidaan asettaa, täytyy määritellä hyvin tarkasti, miten mittaus tulee suorittaa, esimerkiksi millä vauhdilla mäkeä lähdetään nousemaan, onko vakionopeudensäädin aktii-

visena vai ei ja minkälaisella rengastuksella mittauksen saa suorittaa. Testimitauksessa todettu ajonopeuden huomattava pudotus ylämäen loppuvaiheessa vakionopeudensäätimen ollessa aktiivisena on yksi esimerkki siitä, miksi mitaustapa tulee ensin määritellä tarkasti. Testaustavan on oltava kaikille selkeä ja ehdoton, jotta raja-arvot olisivat kaikille yhtäläillä saavutettavissa.

8.2 Yhteenveto

Tässä opinnäytetyössä tarkoituksena oli tutkia nykyisessä tieliikennelaisissa asetettua raskaan kaluston suorituskykyvaatimusta, teho-painosuhdetta 5 kW/tonni. Samalla tutustuttiin muiden maiden asiaa koskevaan lainsäädäntöön, markkinoilta hankittaviin suorituskykyä parantaviin tuotteisiin, ajamiseen vaikuttaviin ajovastusvoimiin sekä voimansiirron ja vaihteiston ohjaukseen. Tavoitteena oli muodostaa esitys vaihtoehtoisen osoitustavan ja suoran laskentakaavan raja-arvoista riittävän suorituskyvyn toteamiseksi. Opinnäytetyö tehtiin Liikenne- ja viestintävirasto Traficomille, ja se toimii osana esiselvitystä talven 2023 aikana suunnitteilla olevaa raskaan kaluston lainsäädäntöuudista.

Opinnäytetyön vaiheet toteutettiin eri tavoin. Nykylainsäädäntöön, muiden maiden raskaan kaluston lainsäädäntöön, kehitystarpeisiin, moderneihin teknologioihin sekä älykkäisiin vakionopeudensäätimiin perehdyttiin kirjallisuusselvitysten avulla ja lähteitä poimittiin mm. videomateriaaleista, oppikirjoista, lehtijulkaisuista ja verkkosivuilta. Vaihteiston ohjaukseen ja raskaan kaluston ajoneuvovalmistajien näkemyksiin aiheesta kerättiin tietoa kuuden kysymyksen haastattelulla. Haastatteluun vastasivat Volvon, Scanian ja Mercedes-Benzin edustajat sähköpostin välityksellä ja heidän vastauksensa on liitetty suoraan lainauksin tähän työhön. Ajovastuslaskelmat, vastuskuvaajat ja ajotilapiirroksiset laadittiin käyttämällä GNU Octave -laskentaohjelmistoa. Kuvaajista ja ajotilapiirroksista otettiin kuvakaappaukset ja ne liitettiin työhön sellaisenaan. Loppuun vielä suoritettu käytännön mittaus tehtiin todellisen ajotehtävän aikana lähes 76-tonnisen yhdistelmän kyydissä. Dataa mittauksesta kerättiin muistiinpanoilla ja GPS:ää hyödyntävän mobiilisovelluksen avulla.

Opinnäytetyön päätavoitetta raja-arvojen määrittämisestä suoralle laskentatavalle tai vaihtoehtoiselle suorituskyvyn osoitustavalle ei onnistuttu muodostamaan. Yksien testimittausten perusteella kerätty data ei riitä tarpeeksi perusteellisten raja-arvojen määrittämiseen. Siitä huolimatta työstä saatiin runsaasti hyödyllistä tietoa mm. Ruotsin ja Australian raskaiden ajoneuvoyhdistelmien PBS-standardeista, raja-arvoista ja testausjärjestelyistä. Ajovastuslaskelmista sekä kaikista kuvaajista saadut lukuarvot ovat erittäin hyödyllisiä ja oleellista tietoa esimerkiksi mahdollisia jatkomittauksia ajatellen. Lisäksi käytännön mittauksessa päästiin itse havainnoimaan täyteen kuormatun yhdistelmän hyytyminen teho-painosuhteen ollessa nykyisen vaatimuksen lukemissa. Ajoneuvomaahan-tuojien edustajien mietteet teho-painosuhteesta, tulevista ajoneuvomalleista ja raskaan kaluston kehityksestä on myös syytä ottaa huomioon lainsäädäntömuutosta suunniteltaessa, koska heidän toiminnassaan lainsäädäntöä koskevat asiat konkretisoituvat.

Jatkotoimenpiteinä olisivat ehdottomasti kattavammat testit ja erilaisilla kalustoilla mukaan lukien sähkö- ja hybridiajoneuvoilla. Tämän opinnäytetyön taustatiedot esimerkiksi PBS-standardeista ja ajovastuksista sekä testimittaus täyskuormatulla yhdistelmällä toimivat hyvänä pohjana laajemman mittakaavan testaukselle. Näissä laajemmissa testeissä olisi kannattavaa myös vertailla ajotilapiiroksia ja ajovastuskuvaajia varsinaisiin käytännön mittauksista saatuihin tuloksiin sekä kuvaajiin. Näin nähtäisiin, miten hyvin laskennalliset arvot vastaavat tosielämän tilanteita ja kuinka tarkkaan laskujen avulla voidaan ennakoida ajoneuvon suorituskkyä. Lähitulevaisuudessa sähkö- ja hybridiyhdistelmäajoneuvojen yleistyessä testimittausten tarve korostuu entisestään. Sillä aikaa Liikenne- ja viestintävirasto Traficomilla jatketaan mahdollisen lainsäädäntöuudistuksen suunnittelua.

Lähteet

Aerodynamic and Flexible Trucks for Next Generation of Long Distance Road Transport. 2021 a. Verkkoaineisto. AEROFLEX. <<https://aeroflex-project.eu>>. Luettu 13.9.2022.

Aerodynamic and Flexible Trucks for Next Generation of Long Distance Road Transport. 2021 b. Verkkoaineisto. AEROFLEX. <https://aeroflex-project.eu/wp-content/uploads/2021/05/AEROFLEX-D3.6-Final-report-WP3_PubSum.pdf>. Luettu 13.9.2022.

Automotive Handbook. 2018. Robert Bosch GmbH. 10.painos. Karlsruhe, Germany: John Wiley & Sons Ltd.

Bayindirli, Cihan; Akansu, Yahya & Salman, M. Sahir. 2016. The determination of aerodynamic drag coefficient of truck and trailer model by wind tunnel tests. Verkkoaineisto. <https://www.researchgate.net/publication/304710643_The_Determination_Of_Aerodynamic_Drag_Coefficient_Of_Truck_and_Trailer_Model_By_Wind_Tunnel_Tests>. Heinäkuu 2016. Luettu 19.9.2022.

Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics. 2007. Robert Bosch GmbH. 5.painos. Plochingen, Germany: Springer Vieweg.

Cab specifications for Volvo FH. 2022. Verkkoaineisto. Volvo Trucks. <<https://www.volvotrucks.co.uk/en-gb/trucks/trucks/volvo-fh/specifications/cab.html>>. Luettu 8.9.2022.

Fact Sheet – Engine D1K500, Turbo-TC. 2019. Tekninen tuoteseloste. Volvo Truck Corporation. <https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/D13%20500T,%20EU6HT_Eng_01_310999630.pdf>. 8.3.2019. Luettu 5.9.2022.

High Capacity Transport – Towards Efficient, Safe and Sustainable Road Freight. 2019. Verkkoaineisto. International Transport Forum. <<https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/high-capacity-transport.pdf>>. Helmikuu 2019. Luettu 23.8.2022.

How to use the truck's kinetic energy to save fuel. 2018. Verkkoaineisto. Scania Oy. <<https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2018/how-to-use-the-trucks-kinetic-energy-to-save-fuel.html>>. 16.8.2018. Luettu 19.10.2022.

Ketonen, Tapio. 2013. Ekorekalla päästösäästöä. Artikkelit. <www.apu.fi/artikkelit/ekorekalla-paastosaastoa>. Apu 20.11.2013. Luettu 25.7.2022.

Kharrazi, Sogol. 2017. Performance based standards for high capacity transports in Sweden. Tutkimusraportti. <<https://www.vinnova.se/en/p/performance-based-standards-for-high-capacity-transports-in-sweden/>>. FFI 25.10.2017. Luettu 24.8.2022.

Kharrazi, Sogol; Bruzelius, Fredrik & Sandberg, Ulf. 2017. Performance based standards for high capacity transports in Sweden – Final report. Loppuraportti. <<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1168835/FULLTEXT03.pdf>>. VTI 2017. Luettu 26.8.2022.

Kharrazi, Sogol; Karlsson, Robert; Sandin, Jesper & Aurell, John. 2015. Performance based standards for high capacity transports in Sweden. Tutkimusraportti. <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/219097/local_219097.pdf>. VTI 2015. Luettu 24.8.2022.

Lahti, Otto. 2019. Pitkät HCT-rekat yleistyvät. Verkkajulkaisu. <www.traficom.fi/fi/tilastot-ja-julkaisut/blogit/pitkat-hct-rekat-yleistyvat>. 13.6.2019. Luettu 26.7.2022.

Lahti, Otto. 2020. Different EMS2 trucks in Finland. Verkkoaineisto. <www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Different%20EMS2%20Trucks%20in%20Finland.pdf>. 21.1.2020. Luettu 26.7.2022.

Motors for heavy electrical vehicles. 2022. Verkkoaineisto. ABB Oy. <<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AAU00000000021&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 28.7.2022.

Oikarinen, Pasi. 2019. Auton ajodynamiikka. Luentomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Luettu 1.9.2022.

Performance Based Standards – An introduction for road managers. 2019. Verkkoaineisto. National Heavy Vehicle Regulator. <<https://www.nhvr.gov.au/files/201810-0924-pbs-a-guide-for-road-managers.pdf>>. Toukokuu 2019. Luettu 24.8.2022.

Performance-Based Standards Scheme – the Standards and Vehicle Assessment Rules. 2020. Verkkoaineisto. National Transport Commission. <<https://www.nhvr.gov.au/files/0020-pbsstdsvehassrules.pdf>>. Tammikuu 2020. Luettu 22.8.2022.

Performance Based Standards (PBS) and Smart Trucks in Africa. 2020. Verkkoaineisto. Unitrans Africa. <<https://www.unitrans.africa/performance-based-standards-pbs-and-smart-trucks-in-africa/>>. Unitrans Africa 14.9.2020. Luettu 29.8.2022.

Predictive Powertrain Control (PPC) – 10 questions and answers about the predictive cruise control from Mercedes-Benz Trucks. 2020. Verkkoaineisto. Automotive World. <<https://www.automotiveworld.com/news-releases/predictive-powertrain-control-ppc-10-questions-and-answers-about-the-predictive-cruise-control-from-mercedes-benz-trucks/>>. Automotive World 26.6.2020. Luettu 19.10.2022.

Puoli vuosisataa ja liki 20 000 tuotetta - VAK juhlistaa 50-vuotistaivaltaan. 2022. Verkkoaineisto. VAK Oy. <<https://vak.fi/fi/ajankohtaista/puoli-vuosisataa-ja-lik-20-000-tuotetta-vak-juhlistaa-50-vuotistaivaltaan/>>. 10.1.2022. Luettu 3.8.2022.

Rengasnormit 2020. 2020. Tekninen opas. Scandinavian Tire & Rim Organization. Öregrund, Ruotsi.

Ruokojärvi, Harri. 2020. High Capacity Transport vehicles in long distance transport of forest energy wood. Maisterintutkielma. <<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/316364/High%20Capacity%20Transport%20vehicles%20in%20long%20distance%20transportation%20of%20forest%20energy%20wood.pdf?sequence=3&isAllowed=y>>. Toukokuu 2020. Luettu 23.8.2022.

Sisu: first hybrid truck with Mercedes and Visedo. 2018. Verkkoaineisto. Diesel-International. <<https://www.diesel-international.com/automotive/sisu-first-hybrid-truck-with-mercedes-and-visedo/>>. Diesel-international 12.5.2018. Luettu 28.7.2022.

Suominen, Esa. 2022. 50 vuotta täyteen ja E-akseli-hankeen esittely - VAK Oy. Verkkojulkaisu. <<https://koneporssi.com/kuljetuskalusto/50-vuotta-tayteen-ja-e-akseli-hankkeen-esittely-vak-oy/>>. Koneporssi 17.2.2022. Luettu 3.8.2022.

Tekniset tiedot – vaihteisto AT2812 Automaattinen I-shift -vaihteisto. 2022. Tekninen tuoteseloste. Volvo Truck Corporation. 20.6.2022. Luettu 5.9.2022.

Tieliikennelaki. 2018. 729/10.8.2018

Transport Styrelsen. 2018. TSFS 2018:40/23.03.2018

Valtioneuvoston asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta. 2013. 407/6.6.2013.

Volvo Trucksin I-See -toiminto. 2022. Verkkoaineisto. Volvo Trucks. <<https://www.volvotrucks.fi/fi-fi/trucks/features/i-see.html>>. Luettu 18.10.2022.

What is Predictive Powertrain Control (PPC)? New Mercedes-Benz Actros/Arocs. 2018. Verkkoaineisto. Mercedes-Benz Trucks UK.

<https://www.youtube.com/watch?v=IX0iOZVN_L0>. Youtube 4.10.2018.
Katsottu 19.10.2022.

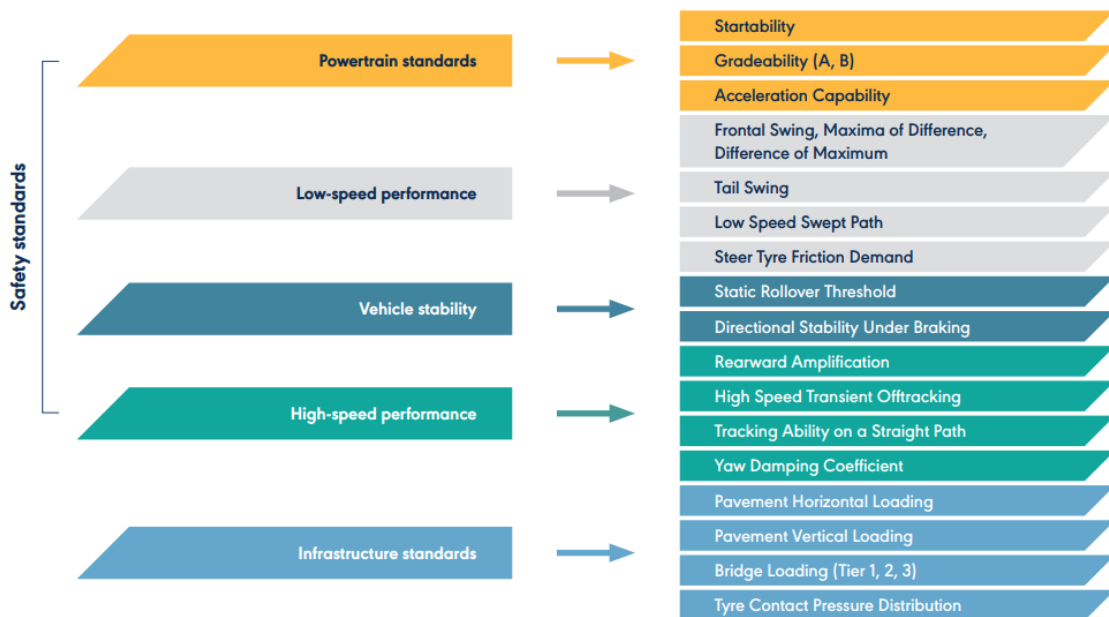
Woodrooffe, John. 2012. Performance-Based Standards and Indicators for Sustainable Commercial Vehicle Transport. Tieteellinen raportti.
<https://www.acea.auto/files/SAG_18.pdf>. ACEA joulukuu 2012. Luettu 29.8.2022.

Zhang, Pei; Wu, Xianpan; Du, Changqing & Xu, Hongming. 2020. Adaptive Equivalent Consumption Minimization Strategy for Hybrid Heavy-Duty Truck Based on Driving Condition Recognition and Parameter Optimization. Tutkimusraportti. <https://www.researchgate.net/publication/346258319_Adaptive_Equivalent_Consumption_Minimization_Strategy_for_Hybrid_Heavy-Duty_Truck_Based_on_Driving_Condition_Recognition_and_Parameter_Optimization>. ResearchGate lokakuu 2020. Luettu 18.10.2022.

Auton ja perävaunun yhdistelmän suurin sallittu massa (122 §)

Yhdistelmä	tonnia
a Auton ja keskiakseliperävaunun yhdistelmä	50
b Auton ja puoliperävaunun, auton ja varsinaisen perävaunun tai auton ja useamman perävaunun yhdistelmä	
b.1 - neliakselisena	36
b.2 - viisiakselisena	44
b.3 - kuusiakselisena	53
b.4 - seitsemänakselisena	60
b.5 - kahdeksanakselisena	64
b.6 - kahdeksanakselisena, jos vähintään 65 prosenttia perävaunun massasta tai perävaunujen massasta yhteensä kohdistuu akseleille, jotka on varustettu paripyörin	68
b.7 - yhdeksänakselisena	69
b.8 - vähintään yhdeksänakselisena, jos vähintään 65 prosenttia perävaunun massasta tai perävaunujen massasta yhteensä kohdistuu akseleille, jotka on varustettu paripyörin	76
b.9 - 10-akselisena	74
b.10 - vähintään 11-akselisena	76

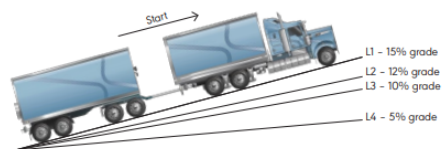
Australian PBS-standardit



Startability

The primary purpose of this standard is to manage safety risks associated with starting on grades by ensuring a PBS vehicle has adequate starting capability on grades.

This means that a PBS vehicle has been assessed as capable of starting on the steepest grade it has to negotiate on the nominated route when operating at its maximum allowed gross mass. This is to ensure it does not become a safety risk or inconvenience to other road users.



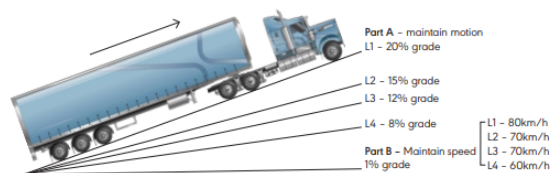
Gradeability (A, B)

Gradeability is the ability of the vehicle to maintain forward motion on a specified upgrade.

The primary purpose of this standard is to manage safety risks associated with travel on grades by ensuring a PBS vehicle has the capability to maintain acceptable speeds on upgrades.

Part A is the ability of a vehicle to maintain forward motion on a specified upgrade.

Part B is the ability of a vehicle to maintain minimum speed on a 1% upgrade.



Acceleration Capability

Acceleration Capability is the ability of the vehicle to either accelerate from rest on a road with no grade.

The primary purpose of this standard is to manage safety risks associated with travel through intersections and rail crossings by specifying minimum times for a PBS vehicle to accelerate from rest, increase speed and travel specified distances. The PBS vehicle must be able to accelerate from rest and travel 100m on a road with no grade within a specified time.

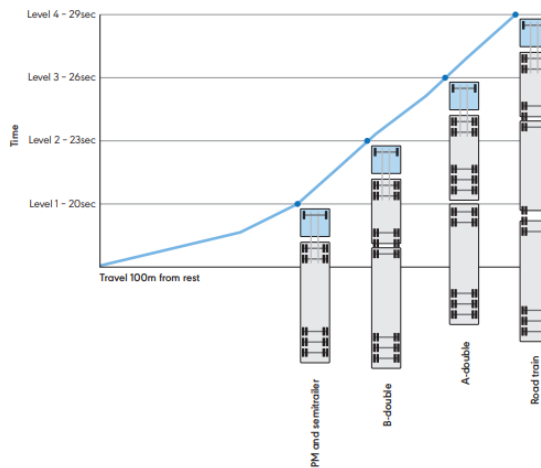
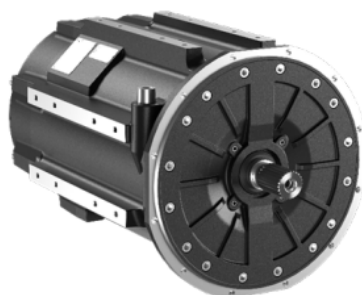


ABB AMXE200 -tekniset tiedot



DATA SHEET

Motors for heavy electrical vehicles AMXE200



Designed to meet your targets and your customers' demands

Partnering with ABB you will gain a trusted partner that offers proven e-powertrain products. This allows you to efficiently meet all the most important market demands, such as improved productivity, reduced TCO, increased uptime and improved operator environment.

Your electric vehicle partner

Efficient motors require a deep insight into design, manufacturing and integration. Motors are very different from internal combustion engines, and it is easy to underestimate the development challenges. In ABB, you have an experienced partner that will assist you from early simulations to aftermarket support. Manufacturing, service and support is always close at hand thanks to ABB's global presence.

Optimized for your application

Each motor must be adapted to the actual drive cycle. ABB's platform is based on proven parts that are combined into task-specific solutions. This ensures fast delivery and customization to your needs. Common to all motors are low energy losses throughout the drive cycle.

Motor expertise at play

We know what it takes to make e-mobility work optimally. Torque and speed are adapted to the vehicle type and its duty cycle. Low inertia motors ensure fast control. Compact design and torque density reduce the motor's outer dimensions. Different IP classes and surface treatments enable reliable use in aggressive atmospheres. These factors are considered and configurable in ABB's motors.

Safe and easy to install and operate

ABB simplicity gives you a competitive edge. Our motors' flanges and shafts are standard or customized on your request. All motors are compact and easy to install. When it comes to vehicle reliability, our century-long experience of combining motor and inverter into packaged solutions is solid proof of our capabilities.

Why ABB?

- Customer centric culture
- Technology pioneer
- Life-cycle support with extensive manufacturing and service footprint
- System design expertise and development support

Features

- Compact and robust design for harsh environments
- Power levels from 90 kW up to 600 kW
- Torque levels up to 2800 Nm
- Liquid cooling with up to 65°C coolant temperature
- Up to IP6K9K and 50 g shock loads

Technical data

Motor type		Peak torque Nm	Peak power kW	Peak current A	Max speed rpm	Continuous torque Nm	Continuous power kW	Continuous current A	Nominal speed rpm
AMXE2005	3GLX203183-BFA	1828	287	600	3810	590	93	180	1500
	3GLX203184-BFA	1634	342	600	4130	571	120	191	2000
	3GLX203185-BFA	1365	357	600	4500	516	135	191	2500
	3GLX203186-BFA	1205	379	600	4960	484	152	200	3000
AMXE200L	3GLX203583-BFA	2813	442	900	3670	811	127	241	1500
	3GLX203584-BFA	2503	524	900	4130	843	177	283	2000
	3GLX203585-BFA	2174	569	900	4720	803	210	308	2500
	3GLX203586-BFA	1961	616	900	5000	741	233	338	3000

Specifications are valid with 750 Vdc, coolant at 65 °C (Inlet) and 50%/50% water and glycol mixture, 20 lpm and in 40 °C ambient temperature unless stated otherwise. Actual performance will vary with drive cycle, cooling and installation details.

Motor specification

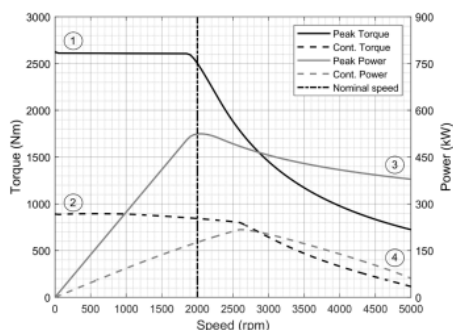
	Specification	AMXE2005	AMX200L
Operating conditions	Coolant mixture	Water with glycol (40-60%)	
	Coolant temperature	≤ 65 °C	
	Volume flow rate	5-30 lpm (nominal 20 lpm)	
	Pressure drop	250 mbar ¹	370 mbar ¹
	Operating ambient temperature	-20 °C to +40 °C	
	Max coolant pressure	3 bar	
Electrical and physical properties	Machine type	3-phase Permanent Magnet Synchronous Motor	
	Weight	229 kg	287 kg
	Inertia	0.283 kg·m ²	0.417 kg·m ²
	Max speed	5000 rpm	
	IP class	Up to IP6K9K	
	Shock loads	Up to 50 g (ISO 16750-3 4.2.2)	
	Color	RAL 9005	
Interfaces	HV connection	Amphenol PowerLok IPOS X-coded	
	LV connection	Amphenol M12 receptacles	
	Flange	SAE 3 (SAE J617) (or acc. to customer specification)	
	Shaft	W50 x 2 x 24 x 9g (DIN 5480) (or acc. to customer specification)	
Options	Cooling connection	2 x G1/2" internal thread ports ISO 1179-1	
	External earthing bolt	Variant code 67	
	Routine test report	Variant code 148	
	Non-standard voltage	Variant code 209	
	Additional lifting lugs	Variant code 305	
	Heating element, 100-120V	Variant code 450	
	Heating element, 200-240V	Variant code 451	
	Sea freight packing	Variant code 531	
	Shaft grounding device	Variant code 588	
	Insulated bearing, N-end	Variant code 701	
	Insulated bearings at both ends	Variant code 702	
	Power connector with HVIL	Variant code 847	
	Heavy duty resolver	Variant code 848	
	Pt100 2-wire in bearing, NDE side	Variant code 853	
	Encoded power connector	Variant code 854	

1) At 20 lpm, 65 °C (Inlet) and 50%/50% water and glycol mixture.

abb.com/motors&generators

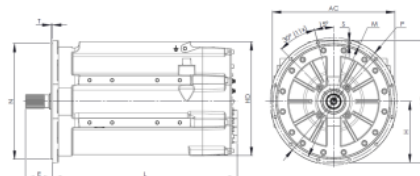
We reserve the right to make technical changes or modify the contents of this document without prior notice. With regard to purchase orders, the agreed particulars shall prevail. ABB does not accept any responsibility whatsoever for potential errors or possible lack of information in this document.

Performance



1. Instantaneous peak torque at 65 °C coolant temperature, drawn at reference temperatures according to IEC 60349-4.
2. Continuous torque (S1 duty) at 65 °C coolant temperature.
3. Instantaneous peak power at 65 °C coolant temperature, drawn at reference temperatures according to IEC 60349-4.
4. Continuous power (S1 duty) at 65 °C coolant temperature.

Main dimensions



Motor type	AC	E	H	HD	L	M	N	P	S	T
AMXE2005	434	96	217	404	550	428.62	409.58	451	11.2	6.4
AMXE200L	434	96	217	404	655	428.62	409.58	451	11.2	6.4

We reserve all rights in this document and in the subject matter and illustrations contained therein. Any reproduction, disclosure to third parties or utilization of its contents – in whole or in parts – is forbidden without prior written consent of ABB. Copyright © 2022 ABB. All rights reserved.

Vehicle envelopes

Dimension	Limit
Overall Length	Maximum 25 m
Overall Width	Maximum 2.6 m
Overall Height	Maximum 4.15 m
Box Length	Maximum 20.0 m
Tractor:	
Wheelbase	Maximum 6.2 m
Tandem Axle Spread	Minimum 1.2 m/Maximum 1.85 m
Lead Semitrailer	
Wheelbase	Minimum 6.25 m
Kingpin Setback	Maximum 2.0 m radius
Tandem Axle Spread	Minimum 1.2 m/Maximum 1.85 m
Tridem Axle Spread	Minimum 2.4 m/Maximum 3.1 m
Track Width (extreme outer width)	Minimum 2.5 m/Maximum 2.6 m
Fifth Wheel Position	No more than 0.3 m behind the centre of the rearmost axle on the semitrailer
Second Semitrailer	
Wheelbase	Minimum 6.25 m
Kingpin Setback	Maximum 2.0 m radius
Tandem Axle Spread	Minimum 1.2 m/Maximum 1.85 m
Tridem Axle Spread	Minimum 2.4 m/Maximum 3.1 m
Track Width	Minimum 2.5 m/Maximum 2.6 m
* Sum of Semitrailer Wheelbases	Maximum 17.0 m
Inter-axle Spacings	
Single Axle to Single or Tandem Axle	Minimum 3.0 m
Tandem Axle to Tandem Axle	Minimum 5.0 m
Tandem Axle to Tridem Axle	Minimum 5.5 m
Tridem Axle to Tridem Axle	Minimum 6.0 m

Weight	Limit
Axle Weight Limits:	
Steering Axle	Maximum 5 500 kg
Single Axle (dual tyres)	Maximum 9 100 kg
Tandem Axle:	
Axle Spread 1.2 m - 1.85 m	Maximum 17 000 kg
Tridem Axle:	
Axle Spread 2.4 m to less than 3.0 m	Maximum 21 000 kg
Axle Spread 3.0 m to 3.1 m	Maximum 23 000 kg
Gross Vehicle Weight Limits:	
Five Axles	Maximum 40 700 kg
Six Axles	Maximum 48 600 kg
Seven Axles	Maximum 56 500 kg
Eight Axles	Maximum 62 500 kg