Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Sami Niittymäki

Kuorma-auton päästöjen ja kulutuksen simulointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

30.4.2019

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Sami Niittymäki Kuorma-auton päästöjen ja kulutuksen simulointi 57 sivua + 4 liitettä 30.4.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine	Ajoneuvosuunnittelu
Ohjaajat	Suunnittelupäällikkö Olli Leinonen Lehtori Pasi Oikarinen

Opinnäytetyö tehtiin Oy Sisu Auto Ab:lle. Opinnäytetyön tavoitteena oli verrata tyyppihyväksynnässä käytettävän simulointiohjelman lopputuloksia, kun syöttötietoja muutetaan. Työssä muutettiin neljää syöttötietoa. Muutettavat syöttötiedot olivat perävälitys, renkaiden vierintävastuskerroin, ohjaamoiden virtauspoikkipinta-ala ja polttoainekulutuskartan muodostamisesta johtuvat virheet.

Opinnäytetyössä selvitettiin simulointiohjelmiston toimintaperiaate ja lain asettamat aikarajat simulointiohjelmiston käytöstä tyyppihyväksynnässä.

Työssä määritettiin syöttötietoja simulointiohjelmistolle. Syöttötietojen määrityksessä käytettiin komponenttitoimittajien dokumentteja, moottoriohjainlaitteen sisältämiä tietoja ja tutkimuksia. Laskentatyökaluja kehitettiin moottoriohjainlaitteen sisältämien tietojen muuntamiseksi syöttötiedoiksi.

Työ toteutettiin käyttämällä simulointiohjelmistoa, niin kuin sitä käytettäisiin tyyppihyväksynnässä. Jokaista muutettavaa syöttötietoa verrattiin perusajoneuvoon. Perusajoneuvoksi valittiin Oy Sisu Auto Ab:n yleisin ajoneuvomalli.

Opinnäytetyön tuloksilla saavutettiin tavoite. Syöttötietojen muutoksen vaikutus nähtiin lopputuloksissa ja suurimmat muutokset saatiin aikaan perävälityksillä. Ohjaamoiden virtauspoikkipinta-ala sen sijaan ei aiheuttanut muutosta lopputuloksissa. Työn tuloksista ilmeni, että määritettyjä syöttötietoja pitää tarkentaa, ja syöttötietojen tarkennukseen on annettu ehdotuksia. Käyttökokemusten perusteella voitiin todeta simulointiohjelmiston toimineen oikein.

Avainsanat	VECTO, simulointi, polttoaineenkulutus, hiilidioksidipäästöt

Author Title Number of Pages Date	Sami Niittymäki Consumption and Emission Simulation for Heavy Duty Vehicle 57 pages + 4 appendices 30 April 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive Engineering
Professional Major	Vehicle Design Engineering
Instructors	Olli Leinonen, Engineering Manager Pasi Oikarinen, Senior Lecturer

This thesis was commissioned by Oy Sisu Auto Ab. The objective was to compare input data variation to a simulation result. The input data which were variated included differential gear ratio, rolling resistance coefficient of tire, cross-sectional area of cabin and fuel consumption map errors. Simulations ware made with a software which is used for type approval.

The thesis was carried out as follows. Firstly, law requirements were studied, and operation principle of simulation software was researched and explained. Secondly, input data were made for simulation software from available data. Thirdly, simulations were conducted as they were in real type approval situation. Every variated input data was compared to basic-vehicle. Basic-vehicle was the most common vehicle model of Oy Sisu Auto Ab. Finally, simulation results were investigated and recommendations for future actions were suggested.

As a result, it was discovered that differential gear ratios made the biggest changes in the results. However, cross-sectional area of cabins did not make any change at all to the results. In conclusion, simulation software was working as expected, and input data needs to be defined to meet the law regulations. In the future, this thesis will work as a guide for the simulation software and it will give a baseline for analyzing which input data needs to be defined.

Keywords	VECTO, simulation, fuel consumption, carbon dioxide emissions

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto 1

2 Lainsäädäntö 1

3 VECTO-simulointiohjelmisto 3

3.1 VECTOn laskentamalli 4

3.1.1 Ajosyklien esikäsittelyvaihe 4

3.1.2 Kuljettajan esikäsittelyvaihe 6

3.1.3 Tehon laskentavaihe 9

3.1.4 Polttoaineenkulutuksen laskentavaihe 26

3.2 Toimintatilat 28

3.3 Syöttötiedot 30

3.3.1 Varsinaiset syöttötiedot 31

3.3.2 Oheissyöttötiedot 35

3.4 Käyttöliittymä 35

4 Simuloinnin lähtötiedot 42

4.1 Moottorin tiedot 43

4.2 Voimansiirron tiedot 44

4.3 Renkaiden tiedot 44

4.4 Ohjaamon tiedot 45

4.5 Ajoneuvon muut tiedot 46

5 Simuloinnin syöttötietomuuttujat 46

6 Simuloinnin tulokset 48

7 Yhteenveto ja jatkotoimenpiteet 53

Lähteet 56

Liitteet

Liite 1. Polttoaineenkulutuksen tulokset

Liite 2. Polttoaineenkulutuksen suhteelliset erot perusajoneuvoon

Liite 3. Hiilidioksidipäästöjen tulokset

Liite 4. Hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perusajoneuvoon

Lyhenteet

ECU	*Engine Control Unit*. Moottorin ohjainlaite, joka säätää polttomoottorin toimintaa.
EU	Euroopan unioni.
ISO	*International Organization for Standardization*. Kansainvälinen järjestö standardoinnille.
VECTO	*Vehicle Energy Consumption calculation TOol*. Ajoneuvon energian kulutuksen simulointiohjelmisto.
VDI	*Verein Deutscher Ingenieure*. Länsi-Euroopan suurin insinöörijärjestö.
WHTC	*World Harmonized Transient Cycle*. Moottorin päästöjen ja kulutuksen mittaamiseen tarkoitettu testisykli.

1 Johdanto

Opinnäytetyö tehtiin Oy Sisu Auto Ab:lle. Oy Sisu Auto Ab:n liiketoiminta koostuu siviilikuorma-autojen valmistuksesta, sotilas- ja erikoisajoneuvojen valmistuksesta ja suunnittelupalveluista.

Opinnäytetyön tavoitteena oli verrata kuorma-auton polttoaineenkulutusta ja hiilidioksidipäästöjä simuloivan ohjelmiston syöttötietojen muutosten vaikutusta lopputulokseen. Opinnäytetyössä valittiin neljä muutettavaa syöttötietoa, joiden vaikutuksia verrattiin perusajoneuvon tuloksiin.

Siviilikuorma-autojen suunnittelulla oli tarve saada kokemuksia simulointiohjelmiston toiminnasta, sillä se tulisi pakolliseksi työkaluksi ajoneuvon tyyppihyväksynnässä lain velvoittamana. Simulointiohjelmistoa varten oli tarve saada määritettyä Sisulle ominaiset syöttötiedot ja saada selville lisätietoa tarvitsevat syöttötiedot.

Työssä selvitettiin simulointiohjelmiston toimintaperiaate ja määritettiin Sisulle ominaisia syöttötietoja saatavilla olevien tietojen perusteella. Syöttötietojen muuttamisella tutkittiin eri syöttötietojen vaikutusta lopputulokseen. Tulosten avulla tilaajayritys voi keskittää resurssit tärkeimpien syöttötietojen määrittämiseen. Simulointiohjelmiston toimintaperiaatteen selvitys toimii tilaajayritykselle oppaana myöhempää käyttöä ajatellen.

2 Lainsäädäntö

Lainsäädännöllä säädetään tieliikennekäyttöön hyväksyttyjen ajoneuvojen varusteista, haitallisista päästöistä ja energiankulutuksesta. Suomessa ajoneuvojen varusteista ja ympäristötekijöistä säädetään ajoneuvolaissa 1090/2002 ja tarkemmin liikenne- ja viestintäministeriön määräyksessä. Liikenne- ja viestintäministeriön määräys määrää että, tieliikennekäyttöön hyväksyttyjen raskaiden ajoneuvojen tulee täyttää päästöjen osalta EU:n asetus 595/2009 [1, s. 20]. Euroopan komission asetuksessa 2017/2400 säädetään Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen 595/2009 täytäntöönpanosta. Ase-

tuksessa 2017/2400 mahdollistetaan Euroopan komission tuottaman simulointiohjelmiston käyttö määriteltäessä polttoaineenkulutusta ja hiilidioksidipäästöjä EU:n markkinoille tarkoitetuissa raskaissa ajoneuvoissa. [2, s. 1.]

Simulointiohjelmiston käytöstä säädetään asetuksessa 2017/2400. Asetus antaa käyttäjille yksiselitteiset ohjeet, miten ohjelmistoa tulee käyttää määriteltäessä virallisia hiilidioksidipäästö- ja polttoaineenkulutuslukuja, joita käytetään ajoneuvon tyyppihyväksynnässä. Simulointiohjelmiston käyttö tyyppihyväksynnässä tulee pakolliseksi portaittain ajoneuvoryhmille seuraavasti:

- 1. heinäkuuta 2019 ajoneuvoryhmille 4, 5, 9 ja 10
- 1. tammikuuta 2020 ajoneuvoryhmille 1, 2 ja 3
- 1. heinäkuuta 2020 ajoneuvoryhmille 11, 12 ja 16.

Taulukossa 1 on esitetty ajoneuvoryhmä jaottelu asetuksen 2017/2400 mukaan. Ajoneuvot ryhmitellään akseleiden lukumäärän, vetotavan, alustakonfiguraation sekä massan mukaan. [2, s. 5 s. 17–18.] Akselikonfiguraatiossa ensimmäinen luku tarkoittaa pyörien kokonaismäärää ja jälkimmäinen luku vetävienpyörien lukumäärää. Akselissa on aina kaksi pyörää. Alustakonfiguraatiossa vetoajoneuvo on tarkoitettu puoliperävaunun vetämiseen ja jäykkä ajoneuvo erilaisille päälirakenteille esimerkiksi sora-auto. Suurimmalla teknisesti sallitulla massalla tarkoitetaan ajoneuvon massaa, joka koostuu ajoneuvon omamassasta ja kantavuudesta.

Taulukko 1. Ajoneuvoryhmittely asetuksen 2017/2400 mukaan [2, s. 17–18].

Akselikonfiguraatio	Alustakonfiguraatio	Suurin teknisesti sallittu massa kuormitettuna [t]	Ajoneuvoryhmä
4 x 2	Jäykkä	> 3,5 – < 7,5	(0)
	Jäykkä (* vetoajoneuvo)	7,5 – 10	1
	Jäykkä (* vetoajoneuvo)	> 10 – 12	2
	Jäykkä (* vetoajoneuvo)	> 12 – 16	3
	Jäykkä	> 16	4
	Vetoajoneuvo	> 16	5
4 x 4	Jäykkä	7,5 – 16	(6)
	Jäykkä	> 16	(7)
	Vetoajoneuvo	> 16	(8)
6 x 2	Jäykkä	Kaikki painoluokat	9
	Vetoajoneuvo	Kaikki painoluokat	10
6 x 4	Jäykkä	Kaikki painoluokat	11
	Vetoajoneuvo	Kaikki painoluokat	12
6 x 6	Jäykkä	Kaikki painoluokat	(13)
	Vetoajoneuvo	Kaikki painoluokat	(14)
8 x 2	Jäykkä	Kaikki painoluokat	(15)
8 x 4	Jäykkä	Kaikki painoluokat	16
8 x 6 8 x 8	Jäykkä	Kaikki painoluokat	(17)

* näissä ajoneuvoluokissa vetoajoneuvot katsotaan jäykiksi ajoneuvoiksi, mutta niillä on tietty vetoajoneuvon ajokuntoinen paino

Taulukossa sulkein esitetyille ajoneuvoryhmille ei ole kaavailtu virallisten arvojen ilmoitusvelvoitetta tällä hetkellä.

3 VECTO-simulointiohjelmisto

VECTO (Vehicle Energy Consumption calculation Tool) on Euroopan komission toimesta kehitetty simulointiohjelmisto, jolla voidaan määrittää tyyppihyväksynnässä tarvittavat hiilidioksidipäästöjen ja polttoaineenkulutuksen arvot. VECTO mahdollistaa ajoneu-

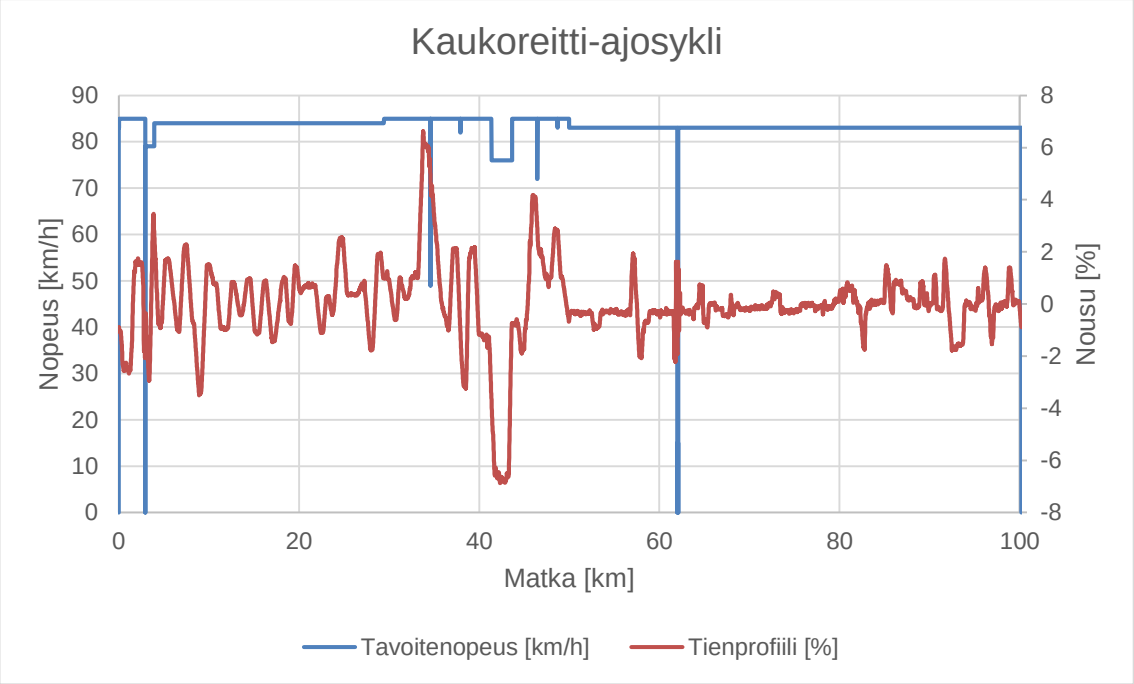
vokokonaisuuksien hiilidioksidipäästöjen ja polttoaineenkulutuksen laskemisen. Euroopan unionin tavoitteena on laskea raskaankaluston hiilidioksidipäästöjä 40 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Hiilidioksidipäästöjen pienentämisessä VECTO asettuu keskeiseen rooliin, koska ajoneuvovalmistajilla on raportointivelvollisuus komissiolle. Komissiolle raportoiduista tiedoista luodaan julkinen tietoportaali, josta kuka vaan voi tarkastella polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen arvoja. Ohjelman toiminta perustuu käyttäjän määrittelemiin syöttötietoihin, joita hyödynnetään laskennassa. [2; 3; 4.]

3.1 VECTOn laskentamalli

Simulointiohjelmiston laskentamalliin perehdyttiin, jotta saataisiin käsitys, miten erilaisia syöttötietoja hyödynnetään lopputuloksen saavuttamiseksi. VECTOn toiminta perustuu neljään laskentavaiheeseen. Ensimmäisessä laskentavaiheessa ajosyklille tehdään esikäsittely, jossa luodaan aikapisteet ja lasketaan maksimihidastumiskäyrät. Toisessa laskentavaiheessa mallinnetaan kuljettajan tekemiä ratkaisuja ajosyklin aikana. Kolmannessa laskentavaiheessa lasketaan ajoneuvon tehontarve jokaisessa ajosyklin aikapisteessä. Neljännessä laskentavaiheessa lasketaan ajoneuvon polttoaineenkulutus ajosyklin aikana. [5, s. 100–101.]

3.1.1 Ajosyklien esikäsittelyvaihe

Ajosyklien esikäsittelyvaiheessa ajosyklit muutetaan 1 Hz:n taajuudella oleviin aikapisteisiin. Ajosyklit koostuvat tavoitenopeudesta, tienprofiilista ja kokonaismatkasta. Aikapisteet ovat samat jokaisessa laskentavaiheessa. Samojen aikapisteiden käyttö mahdollistaa laskennan jakamisen neljään vaiheeseen. Jokainen laskentavaihe suoritetaan kaikille aikapisteille ennen kuin siirrytään seuraavaan laskentavaiheeseen. Ajosyklissä tienprofiililla tarkoitetaan nousukulmaa prosentteina. Negatiivinen nousuprosentti merkitsee alamäkeä ja positiivinen nousuprosentti ylämäkeä. [5, s. 101–102.] Kuvassa 1 on esitetty VECTOn kaukoreitti-ajosykli. Ajosykli on noin 100 kilometrin pituinen ja tienprofiili vaihtelee –7…7 prosentin välillä. Ajosyklissä tavoitenopeus pysyy lähes koko ajan yli 80 kilometriä tunnissa.



Kuva 1. Havainnekuva kaukoreitti-ajosyklistä.

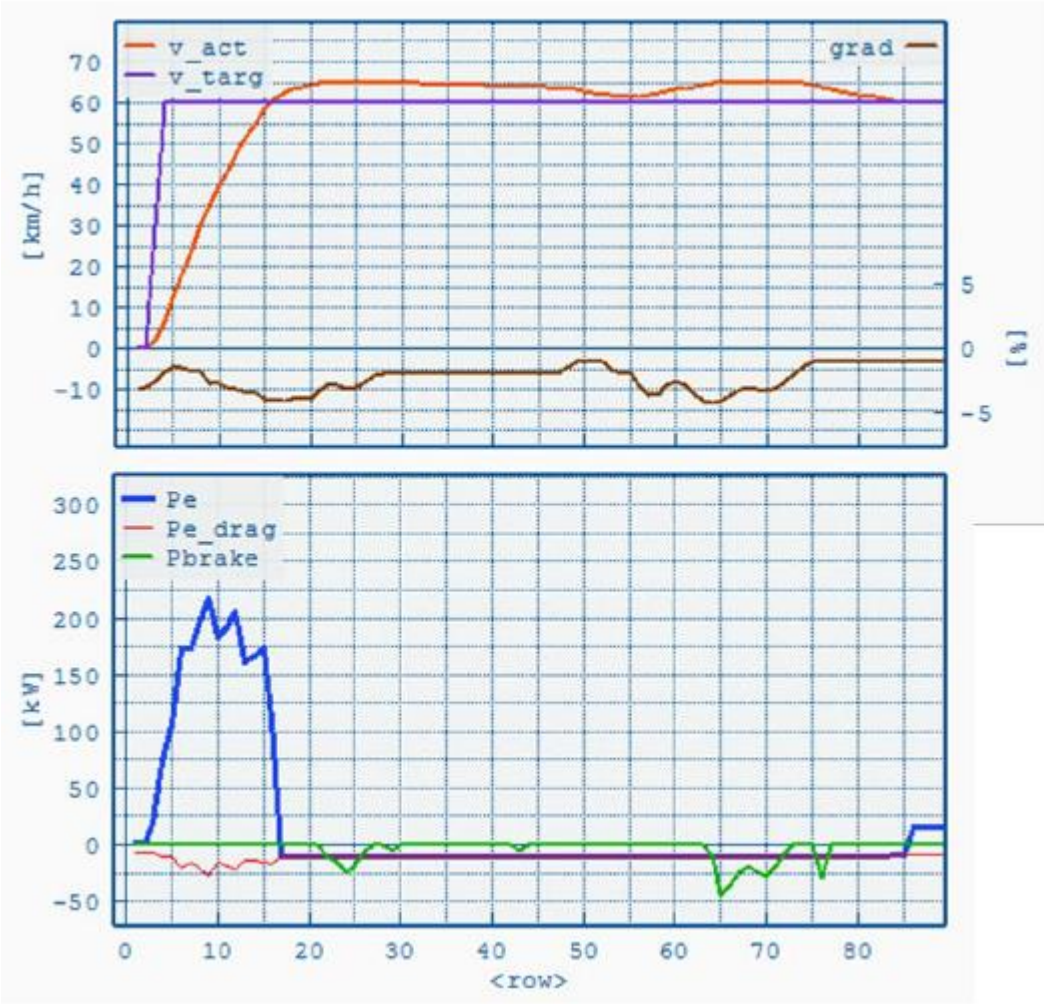
Hidastumiskäyrät lasketaan ajosyklien esikäsittelyvaiheessa tavoitenopeuden vaihteluille. VECTOssa on määritelty ajoneuvoryhmäkohtaisesti maksimihidastumisenarvot. Maksimihidastumisen arvoja käytetään laskettaessa kohdat, joissa ajoneuvoa pitää alkaa hidastamaan, että saavutetaan seuraava tavoitenopeus. [5, s. 101.] Kuvassa 2 on esitetty ajosyklin tavoitenopeuden vaihteluille lasketut hidastumiskäyrät. Sininen käyrä esittää ajosyklin tavoitenopeutta ja punainen käyrä tavoitenopeutta hidastumiskäyrien kanssa. Punaisessa käyrässä nähdään selkeästi kohdat, joissa ajoneuvoa pitää alkaa hidastaa ennen seuraavaa tavoitenopeutta.

Kuva 2. Tavoitenopeuden vaihteluille lasketut hidastumiskäyrät [5, s. 102].

3.1.2 Kuljettajan esikäsittelyvaihe

Kuljettajan esikäsittelyvaiheessa ajosykliin mallinnetaan kuljettajan käytöstä sallimalla ylinopeutta ja rullaamalla ajoneuvoa ennakoivasti. Ylinopeutta sallitaan tilanteissa, joissa ajoneuvon energiantarve renkaalla laskee alle nollan. Yleisin tilanne on alamäki, jossa ajoneuvon potentiaalienergia kiihdyttää ajoneuvoa. VECTOssa sallitaan oletusarvoisesti ylinopeutta 2,5 km/h. Ylinopeuden noustessa asetetun rajan yli käytetään ajoneuvon mekaanisia jarruja hillitsemään kiihtyvyyttä. [5, s. 104.]

Kuvassa 3 on esitetty tilanne, jossa ajoneuvolla sallitaan ylinopeutta 5 km/h. Kuvassa ylemmässä kaaviossa purppuralla esitetään tavoitenopeutta, oranssilla esitetään laskettua nopeutta ja ruskealla esitetään tienprofiilia. Ylemmästä kaaviosta nähdään ajoneuvon kiihtyminen nopeuden kasvuna, kun tienprofiili muuttuu enemmän negatiiviseksi. Alemmassa kaaviossa sinisellä esitetään moottoritehoa, punaisella moottorijarrutustehoa ja vihreällä jarrutehoa. Alemmasta kaaviosta nähdään, milloin jarruja on käytetty ajoneuvon nopeuden kasvua estämään. Jarrutehon arvo muuttuu negatiiviseksi silloin kun jarruja käytetään. Kuvasta nähdään myös, että moottori on jarrutustilassa, kun nopeus nousee yli tavoitenopeuden.



Kuva 3. Ylinopeus alamäessä [5, s. 104].

VECTOssa ennakoivaa rullausta sovelletaan tilanteissa, joissa tavoitenopeus pienenee. Ennakoiva rullaus ennakoi nopeuden pienentymisiä ja maaston muutoksia. Rullauksessa ajoneuvo hidastuu moottorijarrutuksen myötä. Päätös moottorijarrutuksen hyödyntämisestä perustuu energiatasojen vertailuun tulevassa tavoitenopeudessa ja vallitsevassa tavoitenopeudessa. Energiatasojen erosta lasketaan keskimääräinen hidastumisvoima, joka tarvitaan seuraavan tavoitenopeuden saavuttamiseksi. Rullaus alkaa, jos ajoneuvon keskimääräiset vastusvoimat rullauksessa kerrottuna päätöskertoimella ovat pienemmät kuin keskimääräinen hidastumisvoima. Päätöskerroin lasketaan kaavan 1 mukaan. [6.]

$$päätöskerroin = 2{,}5 - 1{,}5 * PK_n * PK_{nmu} \quad (1)$$

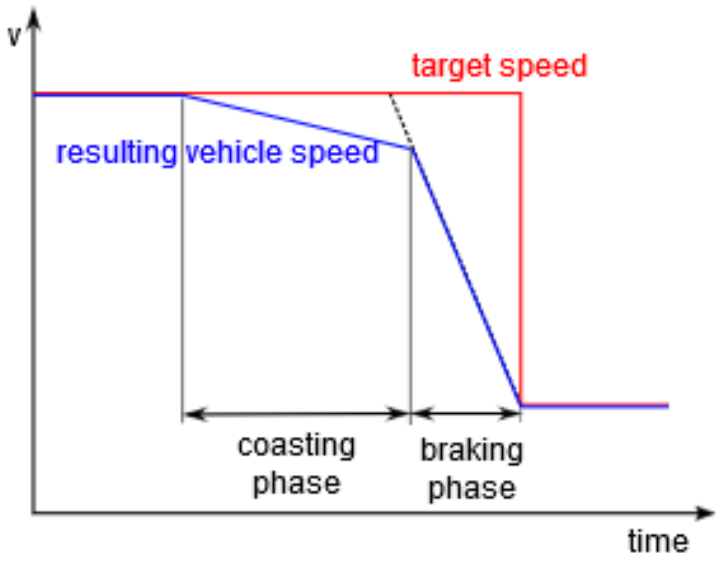
PK_n on päätöskerroin tavoitenopeudelle
PK_{nmu} on päätöskerroin nopeuden muutokselle.

Tavoitenopeuden ja nopeuden muutoksen päätöskertoimet saavat arvon 0 tai 1. Arvot ovat nopeudesta riippuvaisia. Tavoitenopeuden päätöskerroin saa arvon 1, kun tavoitenopeus on suurempi kuin 52 km/h, muulloin arvo on 0. Nopeuden muutoksen päätöskerroin saa arvon 1, kun ajoneuvon nopeuden ja uuden tavoitenopeuden erotus on pienempi kuin 9 km/h:ssa muulloin arvo on 0. [6.]

Maaston ja tavoitenopeuden muutoksia ennakoidaan kaavan 2 mukaan lasketun etäisyyden päästä. Kaavasta 2 nähdään, että ennakointimatka on riippuvainen ajoneuvon nopeudesta. Virallisten arvojen määritystilassa ajoneuvon nopeutta kerrotaan vakioarvolla kymmenen. [6.]

$$ennakointietäisyys\ [m] = 10 * ajoneuvon\ nopeus\ \left[\frac{km}{h}\right] \quad (2)$$

Kuvassa 4 on havainnollistettu ennakointia tavoitenopeuden pienentymisestä. Kuvasta nähdään mustalla katkoviivalla ajosyklien esikäsittelyvaiheessa laskettu hidastumiskäyrä. Ajoneuvon nopeus alkaa pienenemään ennen hidastumiskäyrää. Tässä vaiheessa ajoneuvon annetaan rullata. Ajoneuvon saavuttaessa hidastumiskäyrä, niin ajoneuvoa hidastetaan käyttämällä mekaanisia jarruja ja moottorijarrutusta.



Kuva 4. Ennakoiva rullaus esimerkki [6].

3.1.3 Tehon laskentavaihe

Tehon laskenta on VECTOn kolmas laskentavaihe. Tehon laskennassa lasketaan moottorin toimintapisteet jokaiselle ajosyklin aikapisteelle. Moottorin toimintapiste muodostuu moottoritehosta ja kierrosnopeudesta. Kuljettajan vaikutusta mallinnetaan myös tehon laskennassa. Vaihteiden vaihtostrategia ja ajoneuvon kiihtyvyyden rajoittaminen lukeutuvat kuljettajan mallinnukseen. Kiihtyvyyden rajoittamisella saavutetaan realistinen kiihtyvyys alamäkiosuuksille sekä suuritehoisille ajoneuvoille, joiden hyötykuorma on pieni. Vaihteiden vaihtostrategialla matkitaan tavallisen kuljettajan toimintaa esimerkiksi tilanteessa, jossa ajetaan ilman kuormaa. Vaihteiden vaihtostrategia mahdollistaa ilman kuormaa ajettaessa hyppäämisen useamman vaihteen yli. [5, s.107–108.]

Tehontarvetta renkaalla tarvitaan määriteltäessä moottoritehoa. Tehontarve renkaalla muodostuu ajoneuvon vastusvoimista, jotka ovat ilmanvastus, vierinvastus, kiihdytysvastus ja nousuvastus. Tehontarve renkaalla lasketaan kaavan 3 mukaan. Kaavassa vastusvoimat lasketaan yhteen ja kerrotaan ajoneuvon nopeudella. P_{rengas} eli tehontarve renkaalla ilmoitetaan watteina. Vastusvoimien laskentaan perehdytään tässä luvussa seuraavaksi. [5, s. 108.]

$$P_{rengas} = v * \left(F_{ilma} + F_{vierintä} + F_{kiihdytys} + F_{nousu}\right) \quad (3)$$

F_{ilma} on ilmanvastus [N]
$F_{vierintä}$ on vierintävastus [N]
$F_{kiihdytys}$ on kiihdytysvastus [N]
F_{nousu} on nousuvastus [N]
v on ajoneuvon nopeus [m/s].

Vierintävastus on yksi vastusvoima, mikä vastustaa ajoneuvon liikettä. Vierintävastusta syntyy, kun rengas muuttaa muotoaan pyöriessään. Pyöriessään rengas tasoittuu alaosastaan tietä vasten ja muodostaa adheesiokitkaa. Renkaan tasoittuessa tukivoimaresultantin katsotaan vaikuttavan akselilinjan etu- tai takapuolelle riippuen liikesuunnasta. Tukivoimaresultantti vaikuttaa aina renkaaseen epäedullisesti aiheuttaen vastustavan momentin. [7, s.890; 8, s.12]. VECTOssa vierintävastus lasketaan käyttäen vierintävastuksen kertoimena painotettua keskiarvoa, koska raskaissa ajoneuvoissa on yleensä erilaiset renkaat eri akseleilla. Ohjaavissa akseleissa käytetään yksikköpyöräasennusta kuin vetävissä akseleissa käytetään paripyöräasennusta. Asennustapa aiheuttaa renkaiden erilaisuuden, sillä yksikköpyöräasennuksessa renkaat ovat leveämpiä kuin paripyöräasennuksessa. Vierintävastuksen painotettu keskiarvo lasketaan kaavan 4 mukaan, jossa *RRC* (Rolling Resistance Coefficient) tarkoittaa vierintävastuksen painotettua keskiarvoa. [5, s. 109.]

$$RRC = \sum_{i=1}^{n} s_{(i)} * RRC_{ISO(i)} * \left(\frac{s_{(i)} * m * g}{w_{(i)} * F_{zISO(i)}}\right)^{0,1} \quad (4)$$

i viittaa jokaiseen yksittäiseen akseliin
n on akseleiden kokonaislukumäärä
$s_{(i)}$ on suhteellinen akselikuorma
$RRC_{ISO(i)}$ on renkaan vierintävastuskerroin standardin ISO 28580 mukaan
m on ajoneuvon massa kuorma mukaan lukien [kg]
g on normaaliputoamiskiihtyvyys [m/s^2]
$w_{(i)}$ on renkaiden lukumäärä akselilla
$F_{zISO(i)}$ on renkaan testauskuormitus standardin ISO 28580 mukaan [N].

Kaavan 4 mukaan lasketun vierintävastuskertoimen arvoa käytetään kaavassa 5, josta voidaan laskea vierintävastusvoima. Vierintävastusvoima lasketaan seuraavasti kaavan 5 mukaan. [5, s. 108.]

$$F_{vierintä} = RRC * m * g * \cos(\alpha_s) \quad (5)$$

RRC on vierintävastuksen painotettu keskiarvo
m on ajoneuvon kokonaismassa [kg]
g on normaaliputoamiskiihtyvyys [m/s^2]
α_s on tien nousukulma [rad].

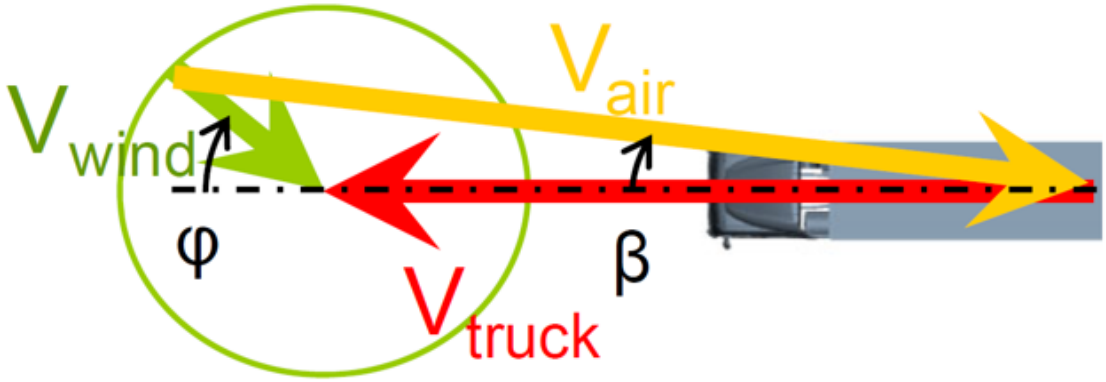
Ilmanvastus on vastusvoima, joka muodostuu, kun ilma virtaa ajoneuvon ympärillä. Ilmanvastus koostuu rajakerroksen hankausvastuksesta ja ajoneuvon muodon aiheuttamasta painevaihtelusta eli muotovastuksesta. Rajakerroksen hankausvastuksella tarkoitetaan ilmavirran aiheuttamaa kitkaa, kun se kulkee ajoneuvon pinnalla. Rajakerroksessa ilmavirran nopeus tippuu ja ajoneuvon pinnalla virtauksen nopeus on nolla eli ilma kulkee ajoneuvon mukana. Virtausnopeuden hidastuessa rajakerroksen paksuus kasvaa ja se pyrkii irtautumaan pinnasta. Virtauksen irrottua paine putoaa ympäröivää painetta pienemmäksi, jolloin muodostuu alipainetta. Muotovastus muodostuu kahdesta painealueesta. Ajoneuvon eteen syntyy ylipainealue ja taakse muodostuu alipainealue, koska ajoneuvon edessä on ylipainetta ja takana alipainetta, niin näiden paine erojen summa vastustaa ajoneuvon liikettä. Ajoneuvon eteen syntyvä ylipainealue johtuu patopaineesta, kun ajoneuvo syrjäyttää ilmaa virtauspoikkipinta-alan verran. Virtauspoikkipinta-ala määritellään aina kohtisuorassa ajoneuvon pituusakseliin nähden. Ajoneuvon taakse muodostuva alipainealue johtuu hankausvastuksesta ja ajoneuvon muotoilusta. Ajoneuvon takana virtaus irtoaa pinnasta viimeistään, kun pinta loppuu. Ajoneuvon taakse syntyy virtauksen irrotessa turbulenttinen alipainealue. [7, s. 804–805; 9, s. 83–101 s. 536–545.]

VECTOssa ilmanvastus F_{ilma} lasketaan kaavan 6 mukaan. Ilmanvastuksen laskennassa tuuliolosuhteet huomioidaan riippuvuutena ajoneuvon nopeuteen. VECTOssa on kolme eri mallia, joilla pystytään laskemaan tuuliolosuhteiden vaikutus ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tuloon. [5, s. 109; 6.]

$$F_{ilma} = \frac{1}{2} * \rho * \left(c_d A_{(v_{veh})}\right) * {v_{veh}}^2 \quad (6)$$

$c_d A_{(v_{veh})}$ on ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo [m^2]
ρ on ilman tiheys [kg/m^2]
v_{veh} on ajoneuvon nopeus [m/s].

Kuvassa 5 on esitetty tuuliolosuhteiden laskennassa käytettävät nopeusvektorit ja kulmat. Kulman φ arvo asettuu ajoneuvon pituusakselin ja tuulen nopeusvektorin välille. Kulman β arvo asettuu ajoneuvon pituusakselin ja ilman nopeusvektorin välille. [5, s. 110.]



Kuva 5. Tuuliolosuhteessa vaikuttavat nopeusvektorit ja kulmat [6].

Virallisten arvojen määritystilassa tuuliolosuhteiden vaikutus lasketaan kaavan 7 mukaan. Kaavan 7 tulos sijoitetaan kaavaan 6, jolloin voidaan laskea virallisten arvojen määritys tilassa ilmanvastuksen arvo. Kaavalla 7 määritellään ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo nopeudesta riippuvaiseksi. [6.]

$$c_d A_{(v_{veh})} = \frac{1}{2\pi * {v_{veh}}^2 * h_{veh}} \int_{\varphi=0}^{\varphi=360} \int_{h=0}^{h=h_{veh}} c_d A_{(\beta)} * v_{air}(h,\varphi)^2 dh\, d\varphi \quad (7)$$

v_{veh} on ajoneuvon nopeus [m/s]
h_{veh} on ajoneuvon korkeus [m]
φ on tuulen suunta suhteessa ajoneuvon pituusakseliin [°]
h on korkeus tienpinnasta [m]
$c_d A_{(\beta)}$ on ilmavirran suunnasta riippuva ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo [m^2]
v_{air} on ilmavirran nopeus [m/s].

Kaavassa 7 esiintyvä v_{air} lasketaan kaavan 8 mukaan käyttäen muuttujien h ja α arvoina kaavassa 7 esiintyviä arvoja. Kaavassa 8 lasketaan ilmavirran nopeus eri korkeuksille. Ilmavirran nopeuden laskennassa otetaan huomioon tuulen nopeus ja tuulen suunta sekä ajoneuvon nopeus. [6.]

$$v_{air}(h) = \sqrt{(v_{wind}(h) * \cos\varphi + v_{veh})^2 + (v_{wind}(h) * \sin\varphi)^2} \quad (8)$$

v_{wind} on tuulen nopeus [m/s]
φ on tuulen suunta suhteessa ajoneuvon pituusakseliin
h on korkeus tienpinnasta [m]
v_{veh} on ajoneuvon nopeus [m/s].

Kaavassa 8 on muuttuja v_{wind}, joka lasketaan kaavan 9 mukaan. Kaavassa 9 lasketaan tuulen nopeus muuttujan h määräämälle korkeudelle. Laskenta perustuu ensimmäiseen reunaehtoon, mikä on käsitelty seuraavassa kappaleessa. [6.]

$$v_{wind}(h) = v_{wind}(h_{ref}) * \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^2 \quad (9)$$

$v_{wind}(h_{ref})$ on reunaehdossa määritetty tuulen nopeus [m/s]
h_{ref} on reunaehdossa määritetty korkeus [m]
h on korkeus tienpinnasta [m].

Tuuliolosuhteiden määritys ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tuloon perustuu kahteen reunaehtoon. Ensimmäisessä reunaehdossa määritetään keskimääräinen tuuliolosuhde. Tuuliolosuhde määritetään seuraavasti: tuulen nopeus on kolme metriä sekunnissa neljän metrin korkeudessa ja se puhaltaa tasaisesti joka suunnasta. Ensimmäistä reunaehtoa sovelletaan kaavassa 9, jonka avulla tuulen nopeus voidaan laskea eri korkeuksille. Toinen reunaehto määrittää ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan riippuvuuden ajoneuvon pituusakselin ja ilmavirran suunnan välille, kun kierrytään ajoneuvon pystyakselin ympäri. Ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulon riippuvuus ilmavirran suunnasta saadaan laskettua kaavan 10 mukaan. Kaavasta 10 saatu arvo muutetaan kaavassa 7 nopeudesta riippuvaiseksi. [6.]

$$c_d A_{(\beta)} = a_1\beta^3 + a_2\beta^2 + a_3\beta + c_d A_{(0)} \tag{10}$$

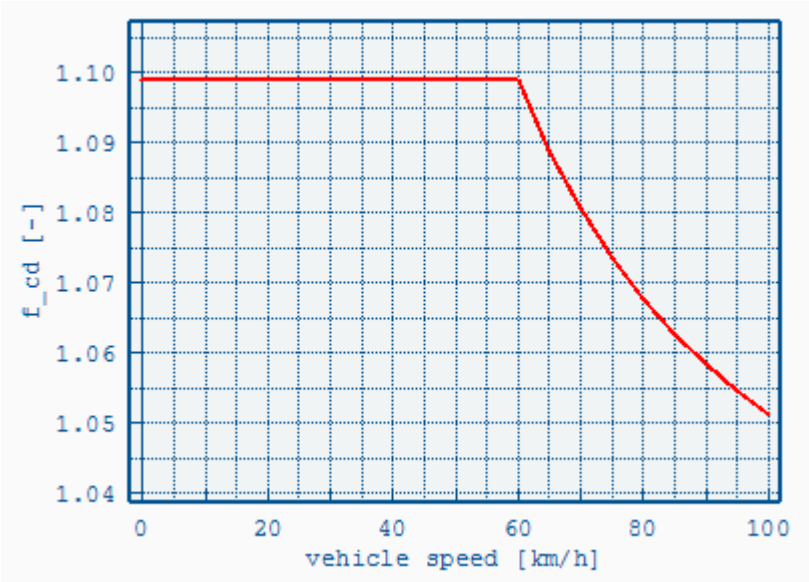
$c_d A_{(0)}$ on ajoneuvon ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo [m^2]
β on ajoneuvon pituusakselin ja ilmavirran välinen kulma
a_1, a_2, a_3 ovat ajoneuvotyyppi kohtaiset kertoimet.

VECTOn toinen tuuliolosuhteiden laskentamalli on nopeuden mukaan muuttuva skaalauskerroin ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulolle. Skaalauskertoimen arvot voi itse määrittää tai käyttää VECTOon valmiiksi määritettyjä arvoja. Nopeuden mukaan muuttuvaa skaalauskerrointa voi käyttää vain VECTOn suunnittelutilassa. Ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tuloa skaalataan kaavan 11 mukaan. Ilmanvastus saadaan laskettua sijoittamalla kaavasta 11 saatu arvo kaavaan 6.

$$c_d A_{(v_{veh})} = c_d A * F_{c_d}(v_{veh}) \tag{11}$$

$c_d A$ on ajoneuvon ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo [m^2]
$F_{c_d}(v_{veh})$ on nopeuden mukaan muuttuva skaalauskerroin.

Kuvassa 6 on esitetty valmiiksi määritellyn skaalauskertoimen vaihtelu nopeuden suhteen. Kuvasta nähdään, että skaalauskertoimen arvo pysyy vakiona nopeuteen 60 km/h asti. Skaalauskertoimen arvo pienenee, kun nopeus nousee yli 60 km:iin/h. Tuuliolosuhteiden vaikutus pienenee nopeuden noustessa riittävän suureksi. VECTOn skaalauskertoimen arvot perustuvat mittaustuloksiin ja virtaussimulointeihin. [5, s.110; 6.]



Kuva 6. VECTOn skaalauskertoimen ominaiskuvaaja [6].

Kolmannessa laskentamallissa käytetään tuuliolosuhteiden määrittämisessä mitattuja arvoja ilman nopeudesta ja suunnasta. Mitatuista arvoista muodostetaan tiedosto, joka määrittää paljonko ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo muuttuu suhteessa ilman tulokulmaan. Kolmatta laskentamallia voidaan käyttää vain suunnittelutilassa, jos ajosykliin on määritetty ilman nopeus ja suunta. Ilmanvastuksen ja virtauspoikkipinta-alan tuloon lasketaan tuuliolosuhde korjaus kaavan 12 mukaan. Ilmanvastuksen arvo saadaan laskettua sijoittamalla kaavan 12 tulos kaavaan 6. [6.]

$$c_dA_{(v_{veh})} = c_dA * \Delta c_dA(\beta) \tag{12}$$

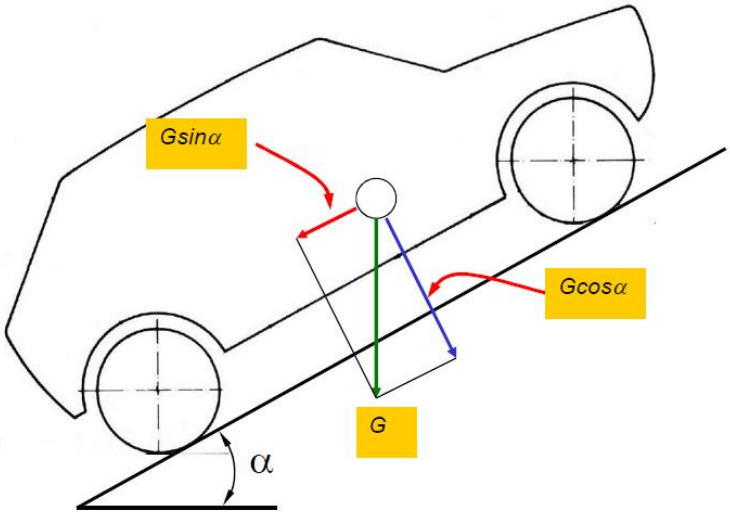
c_dA on ajoneuvon ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo [m^2]
$\Delta c_dA(\beta)$ on ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulon muutos suunnan suhteen [m^2].

Nousuvastus lasketaan VECTOssa kaavan 13 mukaan. Nousuvastusta muodostuu tilanteissa, joissa tienprofiili muuttuu. Ylämäkeen ajaessa syntyy vastustava voima ja alamäkeen ajaessa edistävä voima.

$$F_{nousu} = m * g * \sin \alpha_s \tag{13}$$

m on ajoneuvon kokonaismassa [kg]
g on normaaliputoamiskiihtyvyys [m/s^2]
α_s on tien nousukulma [rad].

Nousuvastus koostuu painovoimavektorin tienpinnan suuntaisesta komponentista. Kuvassa 7 on esitetty painovoimavektorin G komponentit. Tienpinnan suuntainen komponentti on nousuvastus, ja tienpintaa kohtisuorassa oleva komponentti on tukivoimavektori.



Kuva 7. Painovoimavektorin komponentit [8, s. 18].

Kiihdytysvastus vastustaa ajoneuvon liiketilan muutosta. Kiihdytysvastus koostuu ajoneuvon massasta sekä pyörivien komponenttien hitausmomenteista. VECTOssa kiihdytysvastusta laskettaessa pyörivien komponenttien hitausmomentit redusoidaan vetoakselille. Kaavalla 14 lasketaan kiihdytysvastus. [5, s. 111.]

$$F_{kiihdytys} = \left(m + \frac{\theta_{red}}{{r_{dyn}}^2}\right) * a \tag{14}$$

m on ajoneuvon kokonaismassa [kg]
θ_{red} on redusoitu hitausmomentti [kgm^2]
r_{dyn} on renkaan dynaaminen vierintäsäde [m]
a on ajoneuvon kiihtyvyys [m/s^2].

Redusoitu hitausmomentti yhdistää kaikkien pyörivien komponenttien hitausmomentit vetoakselille. Redusoituun hitausmomenttiin ei lasketa moottorin hitausmomenttia. Moottorin hitausmomentti otetaan huomioon myöhemmin laskettaessa moottorin tehoa. Kaavalla 15 lasketaan redusoitu hitausmomentti, joka sijoitetaan kaavaan 14. [5, s. 111.]

$$\theta_{red} = \sum_{j=1}^{n} \theta_j * {i_j}^2 \tag{15}$$

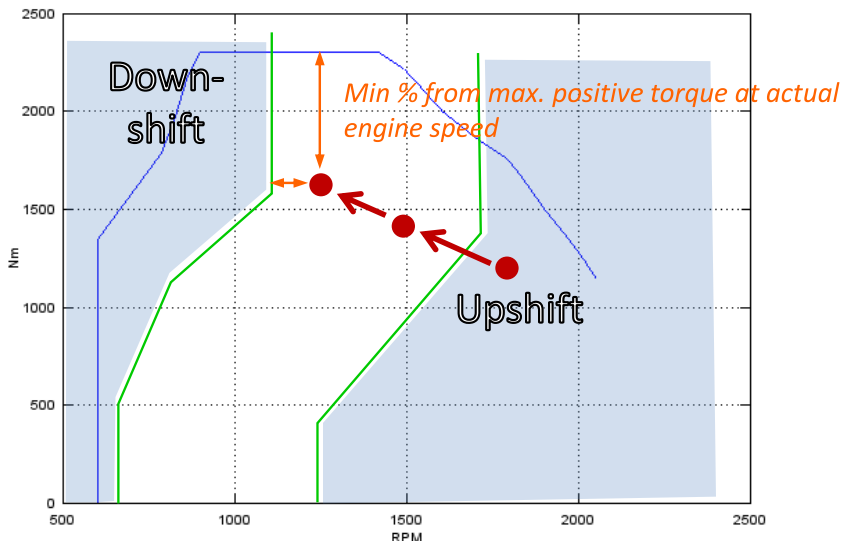
j viittaa jokaiseen yksittäiseen pyörivään komponenttiin
n on pyörivien komponenttien kokonaislukumäärä
θ_j on yksittäisen pyörivän komponentin hitausmomentti [kgm^2]
i_j on yksittäisen pyörivän komponentin kokonaisvälityssuhde vetoakselille.

Vaihteiden vaihtostrategialla yritetään mallintaa keskiverto kuljettajan käyttäytymistä. Vaihtostrategia perustuu vaihtokäyriin, joilla määritetään alasvaihdon ja ylösvaihdon kohdat. VECTO laskee vaihteiden vaihtokäyrät sisäänrakennettujen yhtälöiden avulla. Vaihtokäyrien laskennassa moottorin maksimivääntömomentti alue pyritään käyttämään mahdollisimman tehokkaasti. Vaihteiden vaihdon yhteydessä veto katkaistaan ja ajoneuvo rullaa vapaasti, kunnes uusi vaihde on kytketty. Vedon katkaisu ajat riippuvat vaih-

teistoista. Vedon katkasisu ajat ovat seuraavat: manuaalivaihteisto kaksi sekuntia, automatisoitumanuaalivaihteisto yksi sekunti ja automaattivaihteisto nolla sekuntia. Kuvassa 8 on esimerkki vaihteiden vaihtostrategian vaihtokäyristä. Alasvaihdon käyrää on sininen ja ylösvaihdon käyrä on punainen. [5, s. 112–119; 6.]

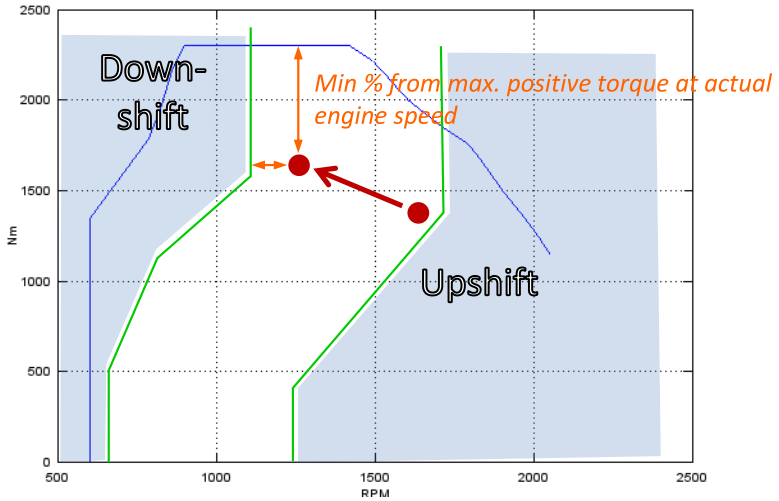
Kuva 8. Esimerkki VECTOn vaihtostrategiasta [5, s. 112].

Vaihteen vaihto tapahtuu, kun moottorin toimintapiste ylittää jommankumman vaihtokäyrän. Alasvaihto tapahtuu, jos moottorin toimintapiste tippuu sinisen käyrän vasemmalle puolelle. Ylösvaihto tapahtuu, kun moottorin toimintapiste nousee punaisen käyrän oikealle puolelle. Vaihtostrategiassa voidaan hypätä vaihteiden yli, niin kauan kuin vaihdetta vastaava moottorin toimintapiste pysyy vaihtokäyrien välissä. Kuvassa 9 on esitetty tilanne, jossa hypätään vaihteen yli. Kuvassa ylösvaihto aloitetaan, kun moottorin toimintapiste nousee ylösvaihtokäyrän oikealle puolelle. Seuraavien vaihteiden asettamat toimintapisteet ovat vaihtokäyrien välissä ja näistä valitaan suurin mahdollinen vaihde, mikä asettuu toiminta-alueelle. Toiminta-alue rajoittuu vaihtokäyrien väliin ja moottorin maksimimomentti käyrän alapuolelle. [6.]



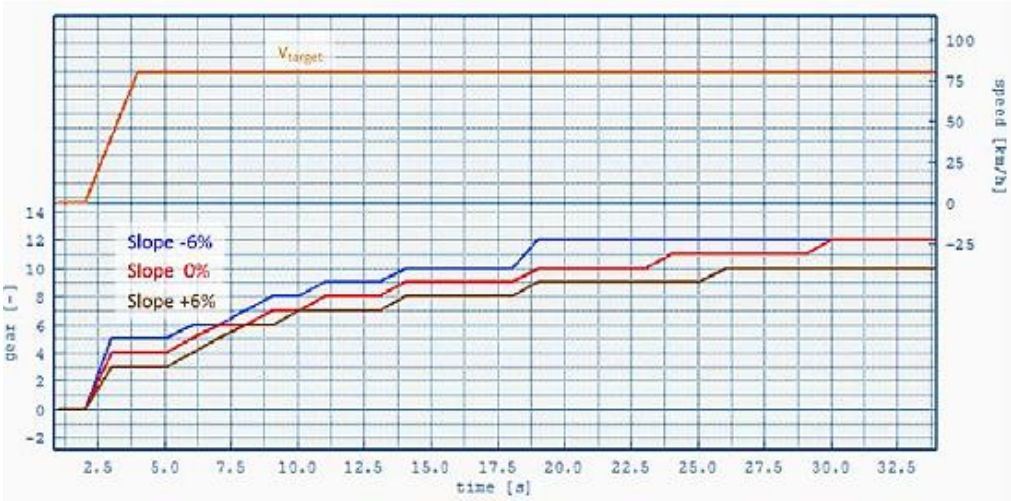
Kuva 9. Esimerkki vaihteen yli hyppäämisestä [6].

Vaihtostrategiassa automatisoiduillamanuaalivaihteistoilla voidaan suorittaa aikainen ylösvaihto. Aikaisessa ylösvaihdossa vaihde vaihdetaan isommalle ennen kuin moottorin toimintapiste ylittää ylösvaihtokäyrän. Aikainen ylösvaihto voidaan tehdä, mikäli moottorin toimintapiste suuremman vaihteen seurauksena pysyy vaihtokäyrien välissä. Kuvassa 10 on esitetty aikainen ylösvaihto. Kuvassa moottorin toimintapiste ei ole ylittänyt ylösvaihtokäyrää, mutta seuraava vaihde voidaan vaihtaa, koska seuraavan vaihteen toimintapiste sijaitsee moottorin toiminta-alueella. [6.]



Kuva 10. Esimerkki aikaisesta ylösvaihdosta [6].

Liikkeellelähtövaihteen laskenta on yksi osa vaihteiden vaihtostrategiaa. Liikkeellelähtövaihde valitaan vallitsevien olosuhteiden mukaan. Liikkeellelähtövaihteen valitsemiseen vaikuttaa tien nousukulma, ajoneuvon kokonaismassa ja lisälaitteiden tehon tarve. Näiden tietojen perusteella lasketaan sopiva liikkeellelähtövaihde, joka asettuu moottorin toiminta-alueelle. Liikkeellelähtövaihteen valitsemista nousun suhteen esitetään kuvassa 11. Kuvasta nähdään, kun nousu on –6 prosenttia, niin liikkeellelähtövaihde on viidesvaihde. Nousun ollessa 6 prosenttia, niin liikkeellelähtövaihde on kolmas vaihde. Kuvan vaihdelaatikossa on 12 vaihdetta yhteensä ja nousun ollessa 0 prosenttia liikkeellelähtövaihde on neljäs vaihde. [5, s. 113.]



Kuva 11. Liikkeellelähtövaihde suhteessa nousuun [5, s. 113].

Moottorin pyörimisnopeus lasketaan kaavasta 16, kun kytkin on kokonaan kiinni. Pyörimisnopeus lasketaan käyttäen ajoneuvon nopeutta ja kokonaisvälityssuhdetta pyörältä moottorille. Pyörimisnopeus ilmoitetaan yksikössä kierrosta minuutissa. [5, s. 113.]

$$n = \frac{60}{2\pi} * \frac{v}{r_{dyn}} * i_{axle} * i_{gear} \tag{16}$$

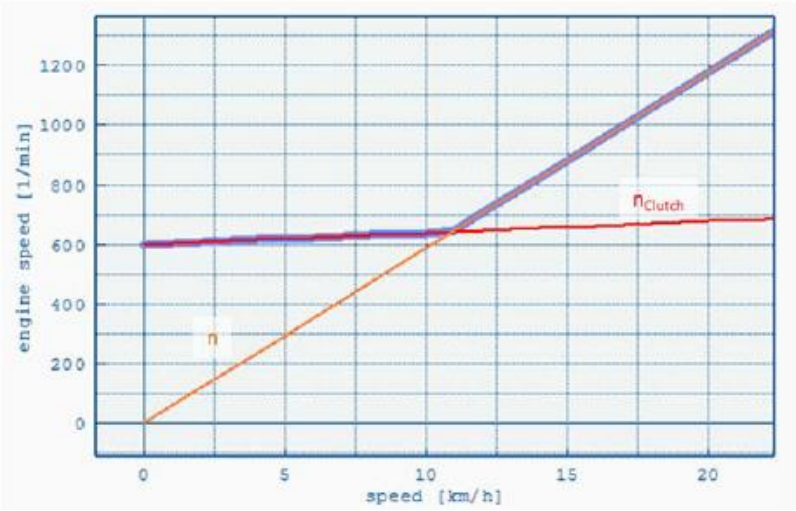
v on ajoneuvon nopeus [m/s]

r_{dyn} on renkaan dynaaminen vierintäsäde [m]

i_{axle} on perävälitys

i_{gear} on kytketyn vaihteen välityssuhde.

Liikkeellelähdettäessä moottorin pyörimisnopeutta ei voida laskea kaavasta 16. Paikalta lähdettäessä kytkintä joudutaan luistattamaan, minkä takia VECTOssa käytetään kytkinmallia laskettaessa moottorin pyörimisnopeutta alhaisissa nopeuksissa. Kuvassa 12 on esimerkki liikkeellelähtötilanteesta. Kuvassa sininen käyrä on moottorin pyörimisnopeus. Punaisella käyrällä kuvataan kytkinmallia, ja oranssi käyrä on kaavalla 16 laskettu moottorin pyörimisnopeus. [5, s. 114.]



Kuva 12. Esimerkki kytkinmallin soveltamisesta liikkeellelähdettäessä.

Moottoritehon laskenta suoritetaan, kun tiedetään ajovastukset ja kytketty vaihde. Moottoriteho lasketaan kaavan 17 mukaan. Kaava 17 koostuu häviötehon arvoista ja ajovastuksien luomasta tehontarpeesta renkaalla. [5, s. 114.]

$$P_{moottori} = P_{rengas} + P_{häv.aks.} + P_{häv.hid.} + P_{häv.vaih.} + P_{apulaitteet} + P_{häv.moot.} \qquad (17)$$

P_{rengas} on tehontarve renkaalla [kW]

$P_{häv.aks.}$ on tasauspyörästön häviöteho [kW]

$P_{häv.hid.}$ on hidastimen häviöteho [kW]

$P_{häv.vaih.}$ on vaihteiston häviöteho [kW]

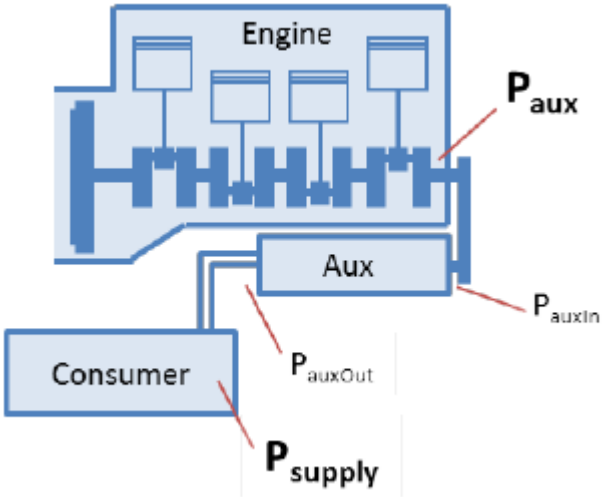
$P_{apulaitteet}$ on apulaitteiden tehon tarve [kW]

$P_{häv.moot.}$ on moottorin hitausmomentin häviöteho [kW].

Kaavassa 17 esiintyvät häviötehon arvot perustuvat mitattuihin tuloksiin eri komponenttien osalta. Mitatuista arvoista muodostetaan häviökartta, mikä koostuu komponenttiin syötettävästä kierrosluvusta ja vääntömomentista. Lisäksi häviökartasta löytyy syöttö kierrosluvun ja vääntömomentin muodostama vääntömomentin häviö. [5, s. 115.]

VECTOssa apulaitteiden tehontarve määritellään eri tavalla riippuen toimintatilasta. Virallisten arvojen määritystilassa apulaitteiden tekniikat valitaan valmiista listasta. Apulaitteille on määritetty kiinteät tehon arvot riippuen tekniikasta. Apulaitteiden tehot lasketaan yhteen ja näistä muodostuu apulaitteiden tehontarve virallisten arvojen määritystilassa. [6.]

Suunnittelutilassa apulaitteiden tehonkulutus lasketaan apulaitetiedoston pohjalta. Apulaitetiedosto määrittää apulaitteen sen ominaisuuksien perusteella. Suunnittelutilassa ajosykliin pitää määrittää kuluttajien teho. Kuvassa 13 on esitetty VECTOn apulaitemalli. Moottoritehon laskennassa oleellisin tehoarvo on apulaitteiden tehontarve, joka on kuvassa merkitty P_{aux}. Kuvassa P_{supply} on ajosykliin määritettävä kuluttajien tehoarvo. P_{auxin} ja P_{auxout} on apulaitetiedostossa määriteltyjä suureita. [5, s. 115; 6.]



Kuva 13. VECTOn apulaitemalli [5, s. 115].

Apulaitteiden tehon tarve lasketaan kaavan 18 mukaan apulaite kohtaisesti, mikäli apulaitteet ovat määritelty yksitellen apulaitetiedostoilla [5, s. 115].

$$P_{aux} = \frac{P_{auxin}}{\eta_{mech}} \tag{18}$$

P_{auxin} on apulaitteen mekaaninen teho [kW]
η_{mech} on apulaitteen voimansiirron hyötysuhde.

Apulaitteen mekaaninen teho saadaan laskettua kaavan 19 mukaan. Mekaanisen tehon laskennassa pitää tietää apulaitteen pyörimisnopeus ja kuluttajan tehontarve. Laskennassa käytetään hyväksi apulaitetiedostoa, josta interpoloidaan mekaaninen tehoarvo tiedetylle pyörimisnopeudelle ja kuluttajan tehontarpeelle. Kaavan 19 tulos sijoitetaan kaavaan 18, mistä lasketaan apulaitteen tarvitsema teho. [5, s. 115; 6.]

$$P_{auxin} = AuxMap(n_{aux}, P_{auxout}) \tag{19}$$

$AuxMap(n, P)$ on interpolointi apulaitetiedostosta tietylle kierrosnopeudelle ja teholle
n_{aux} on apulaitteen pyörimisnopeus [rpm]
P_{auxout} on kuluttajan tehontarve apulaitteelta [kW].

Kuluttajan tehontarve lasketaan kaavan 20 mukaan. Kuluttajan tehontarpeeseen vaikuttaa kuluttajan teho sekä apulaitteen ja kuluttajan välinen hyötysuhde. Kaavan 20 tulos sijoitetaan kaavaan 19, mistä lasketaan apulaitteen mekaanisen tehontarve. [5, s.115; 6.]

$$P_{auxout} = \frac{P_{supply}}{\eta_{eff}} \tag{20}$$

P_{supply} on kuluttajan teho [kW]
η_{eff} on apulaitteen ja kuluttajan välinen hyötysuhde.

Hetkellisissä täyskuormitustilanteissa moottorin teho lasketaan kaavan 21 mukaan. Kaavassa esiintyy PT1-aikavakio, joka kuvaa moottorin vääntömomentin kasvukykyä riippuen moottorin pyörimisnopeudesta. Kaavalla 21 mallinnetaan tilannetta, jossa moottorilta vaaditaan hetkellisesti täysi saatavilla oleva teho. PT1-aikavakio rajoittaa moottorin tehon nousua; esimerkiksi kun kuljettaja painaa kaasun pohjaan, aikaa kuluu PT1-aikavakion verran ennen kuin moottorista saadaan täysteho. [5, s. 116.]

$$P_{fld} = \frac{P_{fld_st} + t_{PT1} * P_{moottori(t-1)}}{t_{PT1} + 1} \quad (21)$$

P_{fld_st} on moottorin täyskuormitus teho [kW]

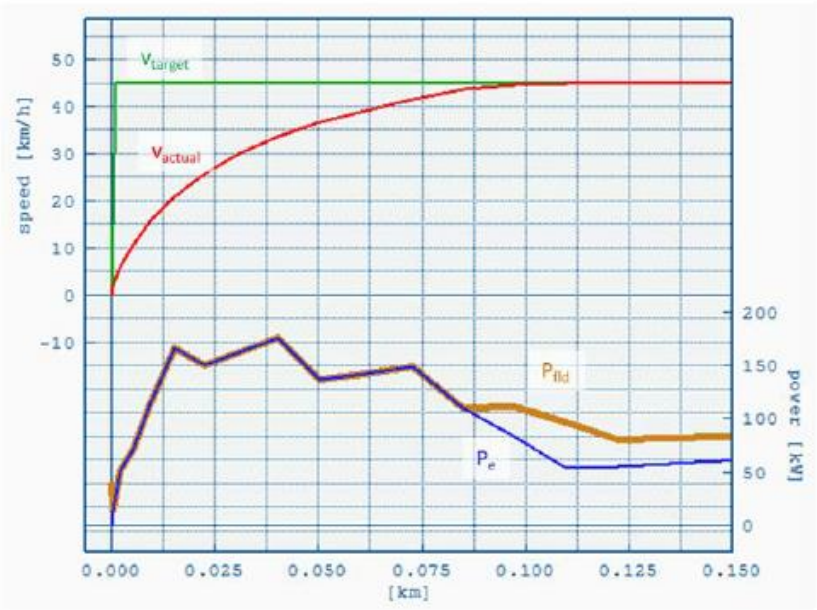
t_{PT1} on PT1-aikavakio tietylle pyörimisnopeudelle [s]

$P_{moottori(t-1)}$ on moottorin teho edellisellä aikapisteellä [kW].

Virallisten arvojen määritys tilassa PT1-aikavakio on ennalta määritelty. Suunnittelutilassa PT1-aikavakio pitää määritellä moottorin täyskuormitustiedostoon. [6.]

Moottorin käynnistys-pysäytysjärjestelmä huomioidaan tehon laskennassa sammuttamalla moottori, jos seuraavat ehdot täyttyvät: tehontarve renkaalla on alle tai yhtä suuri kuin nolla, ajoneuvon nopeus on alle asetetun rajan ja moottori on ollut käynnissä vaaditun minimiajan. Moottori sammutetaan viimeistään kolmen sekunnin kuluttua ajoneuvon pysähdyksestä. [3, s. 11; 5, s. 117.]

VECTOssa nopeutta joudutaan alentamaan tilanteissa, joissa tehontarve ylittää hetkellisen täyskuormitus tehon. Laskenta aloitetaan alusta laskemalla uusi tehon tarverenkaalla pienennetyllä nopeudella. Laskennassa ajoneuvon nopeutta pienennetään niin monta kertaa, kunnes moottori pystyy tuottamaan riittävän tehon täyttääkseen vaaditun tehontarpeen. [5, s. 117–118.] Kuvassa 14 on esitetty tilanne, jossa tavoitenopeus nousee nollasta neljään kymmeneen kilometriin tunnissa. Vihreä käyrä esittää tavoitenopeutta ja punainen käyrä ajoneuvon nopeutta. Sininen käyrä on moottorin teho ja keltainen käyrä on hetkellinen täyskuormitusteho. Kuvasta nähdään, että kiihdyttäessä moottorin teho on sama kuin hetkellinen täyskuormitusteho. Ajoneuvon nopeuden noustessa tavoitenopeuteen huomataan, että moottorin teho laskee.



Kuva 14. Esimerkki täyskiihdytyksestä [5, s. 118].

Ajosyklien kokonaismatkaa joudutaan korjaamaan, koska tavoitenopeudet vaihtuvat välittömästi ja ajoneuvon nopeuden muutoksiin kuluu aikaa. Ajosyklit perustuvat kuljettuun matkaan, joten on tärkeää, että ajoneuvo kulkee ajosyklissä määritellyn matkan. Kokonaismatkavirhettä tapahtuu ennakoivassa rullauksessa, koska ajoneuvon nopeutta hidastetaan ennen kuin tavoitenopeus laskee. Kokonaismatkavirhettä muodostuu kiihdytyksissä, koska ajoneuvoa aletaan kiihdyttämään vasta kun tavoitenopeus on noussut. Kokonaismatkakorjauksen tarve lasketaan tavoitenopeuden muodostamasta matkasta verrattuna ajoneuvon kulkemaan matkaan. Korjaus tehdään ajoneuvon rullausvaiheessa. Rullausvaiheeseen lisätään aikapiste, jos ajoneuvo on kulkenut lyhyemmän matkan kuin tavoitenopeuden muodostama matka. Rullausvaiheessa aikapisteen yli hypätään, jos ajoneuvo on kulkenut pidemmän matkan kuin tavoitenopeuden muodostama matka. [5, s. 118–119.]

Ajosyklien kokonaismatkakorjausta havainnollistetaan kuvassa 15. Kuvassa 15 olevissa kaavioissa havainnollistetaan kokonaismatkakorjauksen vaikutus. Ylemmässä kaaviossa kokonaismatka korjaus ei ole käytössä, kun taas alemmassa kaaviossa kokonaismatkakorjaus on käytössä. Kaavioissa sininen käyrä on tavoitenopeus ja punainen käyrä

on ajoneuvon nopeus. Kaavion vaaka-akselilla on kuljettumatka kilometreinä ja pystyakselilla nopeus kilometriä tunnissa. Kuvasta nähdään, että ilman kokonaismatkakorjausta kuljetaan lyhyempi matka kuin kokonaiskorjauksen ollessa käytössä.

Kuva 15. Kokonaismatkakorjauksen havainnollistaminen [5, s.119].

3.1.4 Polttoaineenkulutuksen laskentavaihe

Polttoaineenkulutuksen laskenta on viimeinen neljästä laskentavaiheesta. Polttoaineenkulutuksen laskennassa hyödynnetään moottorin tehoarvoja, jotka on laskettu jokaiselle aikapisteelle. Polttoaineenkulutuksen laskentaa varten polttoaineenkulutuskartta kolmioidaan Delaunayn kolmioinnin avulla. Polttoaineenkulutuskartta määritellään varsinaisissa syöttötiedoissa. Kolmioidusta polttoaineenkulutuskartasta interpoloidaan polttoaineenkulutuksen arvo, kun tiedetään moottorin toimintapisteet. Jokaiselle aikapisteelle lasketaan polttoaineenkulutuksen arvo kolmioidusta polttoaineenkulutuskartasta. [5, s. 120–121; 6.]

Polttoaineenkulutus arvoa korjataan käynnistys-pysäytysjärjestelmän korjauksella ja polttoainekulutuskartan WHTC (World Harmonized Transient Cycle) -korjauksella. Käynnistys-pysäytysjärjestelmän korjaus perustuu lineaariseen regressiomalliin. WHTC-korjaus perustuu testisyklissä määriteltyihin polttoaineenkulutuksen arvoihin. Käynnistys-pysäytysjärjestelmällä varustettujen ajoneuvojen polttoainekulutusta korjataan, koska moottorin ollessa pysäytettynä apulaitteille ei tarjota tehoa. Moottorin ollessa pysäytettynä kuluttajien tehon kulutus jatkuu. Korjauksen ensimmäisessä vaiheessa lasketaan yksi lineaarinen regressiosuora, joka parhaiten sopii kaikille polttoaineenkulutuksen arvopisteille. Toisessa vaiheessa lasketaan apulaitteiden mekaanisen tehon kulutuksen muutos. Mekaanisen tehon kulutuksen muutos lasketaan mekaanisen tehon tavoitearvon ja käynnistys-pysäytysjärjestelmän kanssa kulutetun tehon erotuksesta. Mekaanisen tehon tavoitearvo lasketaan kuluttajien kuluttamasta tehosta, joka muutetaan mekaaniseksi tehoksi käyttäen keskimääräistä laturin hyötysuhdetta. Kolmannessa vaiheessa suoritetaan polttoaineenkulutuksen korjaus jokaiselle aikapisteelle kaavan 22 mukaan. [5, s. 122.]

$$\Delta FC = \Delta P_{aux} * k \tag{22}$$

ΔP_{aux} on mekaanisen tehon kulutuksen muutos [kW]
k on lineaarisen regressiosuoran kulmakerroin.

WHTC-korjauksella huomioidaan polttoainekulutuskartan määritystapa. Polttoaineenkulutus arvot määritellään polttoainekulutuskarttaan käyttäen tasavääntömomentti ja kierrosluku alueita. Ajosyklissä tapahtuu moottoritehon nopeita muutoksia. WHTC-korjauksella otetaan huomioon nopeat moottorin toimintapiste muutokset. WHTC-korjauksessa käytetään mitattuja polttoaineenkulutuksen arvoja ja laskettuja polttoaineenkulutuksen arvoja eri ajo-osuuksille. Ajo-osuudet ovat kaupunkiosuus, maantieosuus ja moottoritieosuus. WHTC-korjaus lasketaan kaavan 23 mukaan. [5, s. 122–123.]

$$CF_{WHTC} = \sum_{i=1}^{3} f_i * \frac{FC_{meas_i}}{FC_{calc_i}} \tag{23}$$

i indikoi ajo-osuutta
f_i on ajosyklin painokerroin ajo-osuudelle
FC_{meas_i} on mitattu polttoaineenkulutuksen arvo tietylle ajo-osuudelle [g/kWh]

FC_{calc_i} on laskettu polttoaineenkulutuksen arvo tietylle ajo-osuudelle [g/kWh].

WHTC-korjauksessa painokertoimen arvot ovat määritelty ajosykleihin. Painokertoimella kerrotaan mitatun ja lasketun polttoainekulutuksen osamäärää. Painokerroin määrittää kuinka paljon mitäkin ajo-osuutta on ajosyklissä. WHTC-korjaus on suurin ajo-osuudelle, jota on eniten ajosyklissä.

Hiilidioksidipäästöjen suuruus lasketaan suoraan polttoaineenkulutuksesta käyttäen eri polttoaineille ominaista hiilidioksidiarvon painokerrointa [5, s. 123].

3.2 Toimintatilat

Toimintatila määrittää, mitä parametrejä käyttäjä voi muuttaa VECTOssa ja mitä syöttötietoja VECTO tarvitsee. VECTOa voidaan käyttää neljällä eri toimintatilalla. Toimintatilat jakautuvat seuraavasti: virallisten arvojen määritystila, suunnittelutila, todennustestitila ja pelkkä moottoritila. [6.]

Virallisten arvojen määritystilassa VECTOn toiminta perustuu EU:n komission asetukseen 2400/2017. Monet parametrit ovat ennalta määriteltyjä, jolloin saadaan vertailukelpoisia tuloksia ajoneuvovalmistajien kesken. Virallisten arvojen määritystilassa syöttötiedot pitää olla määritetty asetuksen 2400/2017 mukaan. Ajosyklit valikoituvat automaattisesti ajoneuvoryhmä kohtaisesti virallisten arvojen määritystilassa. Käyttäjän tarvitsee määrittää varsinaiset syöttötiedot ja oheissyöttötiedot. [6.] Taulukossa 2 esitetään ajoneuvoryhmäkohtaiset ajosyklit. Taulukosta nähdään, että ajoneuvoryhmän ollessa 9, niin ajoneuvolle lasketaan polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen arvot kaukoreittiajosylissä, alueellinen reitti -ajosyklissä ja kunnalliset palvelut -ajosyklissä.

Taulukko 2. Ajoneuvoryhmäkohtaiset ajosyklit [3, s. 7–8].

Ajoneuvoryhmä	Kaukoreitti	Alueellinen reitti	Kaupunkireitti	Kunnalliset palvelut	Rakentaminen
(0)					
1		X	X		
2	X	X	X		
3		X	X		
4	X	X	X	X	
5	X	X	X		
(6)					
(7)					
(8)					
9	X	X		X	
10	X	X		X	
11	X	X		X	X
12	X	X			X
(13)					
(14)					
(15)					
16					X
(17)					

Suunnittelutilassa kaikki VECTOn parametrit ovat käyttäjän määriteltävissä. Ajoneuvovalmistajat voivat käyttää VECTOn suunnittelutilaa tuotekehityksen apuvälineenä. Suunnittelutilassa voidaan helposti muuttaa komponenttien ominaisuuksia ja tarkastella niiden vaikutusta polttoainekulutukseen ja hiilidioksidipäästöjen suuruuteen. Suunnittelutilassa voidaan luoda täysin omat ajosyklit. Omilla ajosykleillä voidaan laskea polttoaineenkulutusta ja hiilidioksidipäästöjä erikoistilanteissa. [6.]

Todennustestitilassa simuloidaan virallisten arvojen määritystilassa määriteltyä ajoneuvoa oikeassa ajotilanteessa. Todennustestitila käyttää ajotilanteesta mitattuja arvoja ajosyklin perustana ja laskee näistä polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen arvon. Todennustestitilassa laskettuja tuloksia verrataan virallisten arvojen määritystilassa laskettuihin arvoihin. Arvojen pitää olla tiettyjen virhemarginaalien sisällä, jotta ajoneuvolle laskettuja polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen arvoja voidaan pitää luotettavina. Todennustestitila vaatii seuraavia arvoja ajoneuvosta toimiakseen: ajoneuvon nopeus, renkaiden pyörimisnopeus vetävällä akselilla, vääntömomentti vetävillä renkailla, polttoaineenkulutus, moottorin pyörimisnopeus ja tuulettimen pyörimisnopeus. Annettujen arvojen perusteella VECTO laskee sopivimman vaihteen vallitseviin olosuhteisiin ja suorittaa tehon laskennan hyödyntäen syöttötiedoissa annettuja voimansiirron häviökarttoja. Tehon laskennan jälkeen lasketaan polttoaineenkulutus ja hiilidioksidipäästöt. [3, s. 39–54; 6.]

Pelkässä moottoritilassa simuloidaan vain moottoria. Pelkän moottoritilan kuormitussykli koostuu moottorin pyörimisnopeudesta ja moottorin vääntömomentista tai tehosta ulostuloakselilla. Polttoaineenkulutus lasketaan pelkälle moottorille kuormitussyklin mukaisesti huomioiden moottorin inertia, jonka VECTO laskee moottorin kuutiotilavuudesta. [6.]

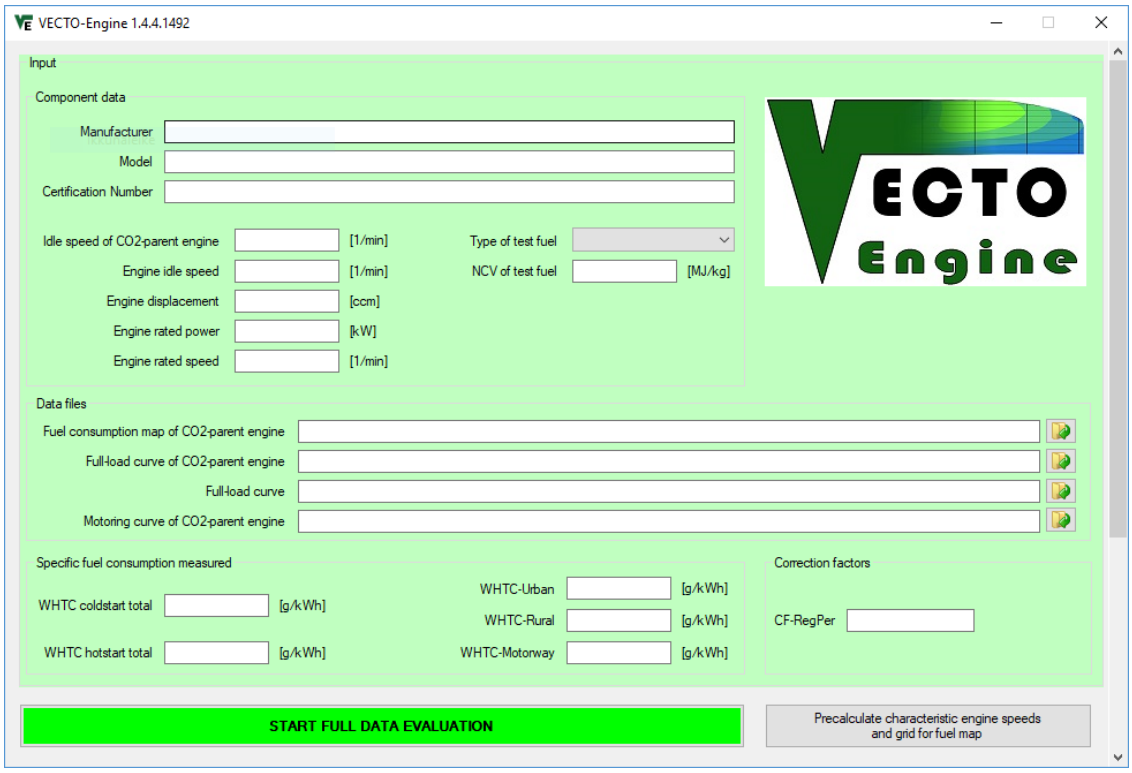
3.3 Syöttötiedot

VECTOssa syöttötiedot ovat jaettu varsinaisiin syöttötietoihin ja oheissyöttötietoihin. Varsinaiset syöttötiedot sisältävät komponenttien, erillisten teknisten yksiköiden tai järjestelmien tietoja ja oheissyöttötiedot ajoneuvon ominaisuuksiin liittyviä tietoja. Syöttötietojen muodostamisesta ja mittaamisesta säädetään Euroopan komission asetuksessa 2017/2400. Kaikki syötetiedot muodostuvat valmistajien suorittamista mittauksista eri komponenteille. [2, s. 8–16].

3.3.1 Varsinaiset syöttötiedot

VECTOssa varsinaisiin syöttötietoihin kuuluvat seuraavat komponentit: moottorit, vaihteistot, momentinmuuntimet, muut momenttia siirtävät komponentit, voimansiirron lisäkomponentit, akselit, korin tai perävaunun ilmanvastus, apulaitteet ja renkaat. Komponenteista syötetään polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen kannalta merkityksellisiä tietoja. [2, s. 8.]

Moottorin syöttötiedot syötetään esikäsittelyvälineeseen, joka muodostaa moottoritiedoston. Esikäsittelyväline tarvitsee tietoja kantamoottorista ja laskennassa käytettävästä moottorista, mikäli se ei ole kantamoottori. Kantamoottori on moottori perheen tehokkain variantti. Esikäsittelyväline tarvitsee seuraavat tiedot kantamoottorista: täyskuormituskäyrä, moottorijarrutuskäyrä, polttoainekulutuskartta ja joutokäyntinopeus. Lisäksi esikäsittelyväline tarvitsee seuraavat tiedot laskennassa käytettävästä moottorista: täyskuormituskäyrä, joutokäyntinopeus, iskutilavuus, nimellisteho, nimellispyörimisnopeus, moottorin merkki, moottorin malli, sertifiointinumero, polttoaineen tyyppi, polttoaineen alempi lämpöarvo ja WHTC-syklistä saadut polttoaineenkulutuksen ominaisarvot. [10.] Kuvassa 16 on kuvakaappaus moottoritietojen esikäsittelyvälineestä. Kuvasta nähdään syöttötiedoille varatut kohdat. Esikäsittelyväline ei laske moottoritiedostoa, ennen kuin kaikki kohdat ovat täytetty.



Kuva 16. VECTO-Engine-moottoritietojen esikäsittelyväline.

Vaihteistojen syöttötiedot muodostuvat vaihteiden välityssuhteista ja vaihdekohtaisista häviökartoista. Häviökartta pitää sisällään vaihteiston sisääntuloakselin pyörimisnopeuden, syötetyn vääntömomentin ja vääntömomentin häviön. Vääntömomentin häviö määritetään pyörimisnopeudesta ja vääntömomentista riippuvaiseksi. VECTOssa pitää valita vaihteistotyyppi, jotta laskennassa voidaan huomioida oikea vedonkatkaisuaika. Valittavat vaihteistotyypit ovat manuaalivaihteisto, automatisoitumanuaalivaihteisto ja automaattivaihteisto. [6.]

Momentinmuuntimen syöttötiedot perustuvat momentinmuuntimen ominaiskuvaajaan, joka on muodostettu standardin VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 2153 mukaan. Momentinmuuntimen syöttötietoja tarvitaan, jos vaihteistoksi on valittu automaatti. Syöttötiedot koostuvat seuraavista tiedoista: nopeussuhde, momenttisuhde ja syötettävä vääntömomentti. [6.]

Muut momenttia siirtävät komponentit pitävät sisällään moottorin hidastimet, vaihteiston hidastimet, vaihteiston ulostuloakselin hidastimet ja vetoakselin hidastimet. Hidastimien

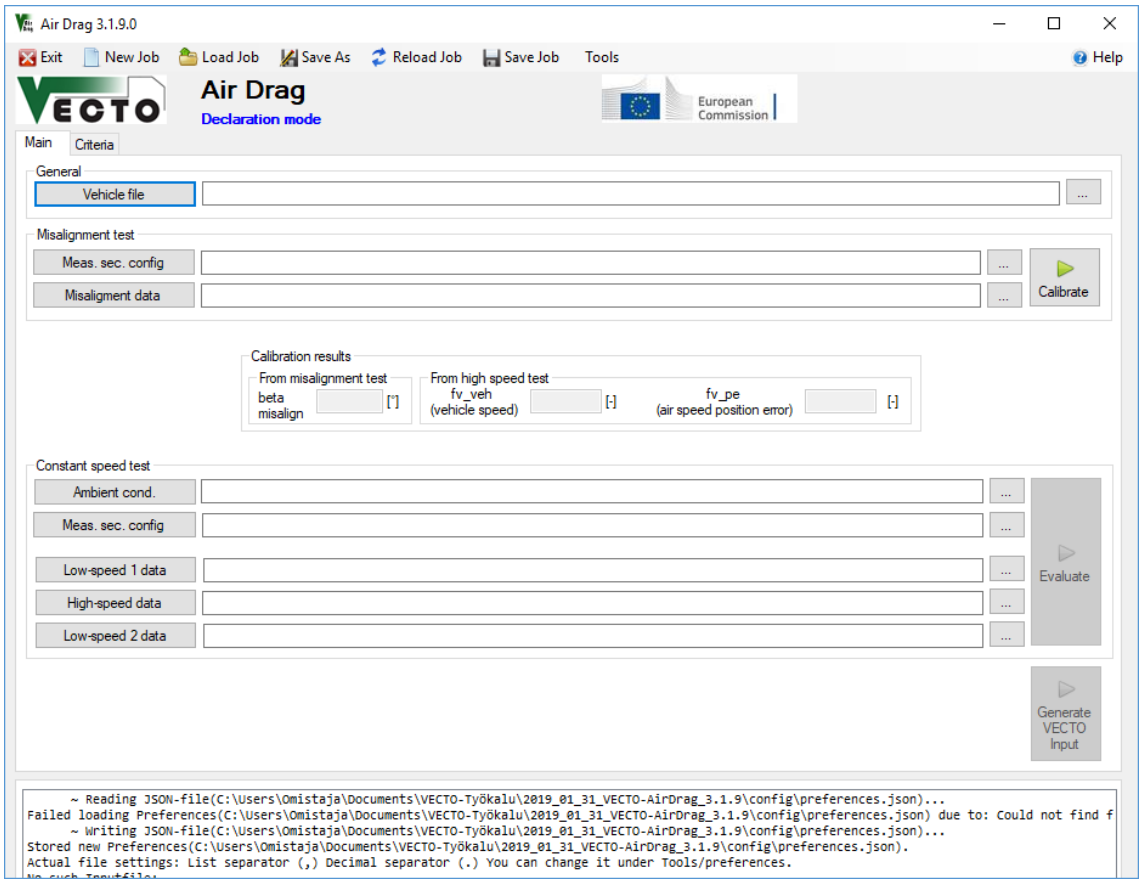
syöttötiedot koostuvat hidastimen välityssuhteesta, hidastimen pyörimisnopeudesta ja vääntömomentti häviöstä. Vääntömomentti häviö riippuu hidastimen pyörimisnopeudesta. [6.]

Voimansiirron lisäkomponentteihin kuuluvat esimerkiksi kulmavaihteet. Voimansiirron lisäkomponenttien syötetiedot koostuvat häviökartasta, joka koostuu syötetystä vääntömomentista, sisääntuloakselin pyörimisnopeudesta ja vääntömomentin häviöstä suhteessa pyörimisnopeuteen ja syötettyyn vääntömomenttiin. [6.]

Akseleiden syöttötiedot koostuvat häviökartasta ja välityssuhteesta. Häviökartta muodostetaan samalla tavalla kuin vaihteiston ja kulmavaihteen häviökartta. Häviökartta pitää sisällään vääntömomentti häviön, sisääntuloakselin pyörimisnopeuden ja syötetyn vääntömomentin. [6.]

Ilmanvastuksen syötetietona käytetään ilmanvastuskertoimen ja poikkipinta-alan tuloa. VECTOssa ilmanvastuksen määrittäminen poikkeaa hieman muista komponenteista. Ilmanvastusarvo määritellään vakionopeustesteillä. Vakionopeustestissä ajoneuvoon kiinnitetään antureita, joista saadaan mitattua dataa ilmanvastustietojen esikäsittelyvälineelle. Ilmanvastustietojen esikäsittelyväline tarvitsee seuraavat mittaussignaalit: poikkeutusmomentti, ajoneuvon nopeus, ilmavirran nopeus ja suhteellinen tuulen kulma. Poikkeutusmomentilla tarkoitetaan molempien vetävän akselin pyörien vääntömomentin mittaamista. Ilmanvastustietojen esikäsittelyväline tarvitsee lisäksi perustietoja mittauksen aikana vallinneesta olosuhteesta, ajoneuvosta ja testiradasta. Ilmanvastustietojen esikäsittelyväline muodostaa valmiin tiedoston käytettäväksi VECTOon. [11.] Kuvassa 17 on kuvakaappaus ilmanvastustietojen esikäsittelyvälineestä. Kuvassa ensimmäiseen syöttöalueeseen syötetään perustiedot ajoneuvosta. Toiseen ja viidenteen syöttöalueeseen syötetään testiradan mittausosion alustustiedosto. Alustustiedostolla kerrotaan ilmanvastustietojen esikäsittelyvälineelle mittausalueen pituus, ajoneuvon suunta ja mittausalueen alku- ja loppupisteet. Kolmanteen syöttöalueeseen syötetään ensimmäinen ajoneuvosta mitattu datatiedosto. Ensimmäisellä mittadatatiedostolla viritetään mitta-anturit. Ilmanvastustietojen esikäsittelyväline laskee ensimmäisestä mittadatatiedostosta mitta-anturien virheet ja ottaa huomioon anturien virheet oikeissa mittauksissa. Ympäristöolosuhteiden tiedosto syötetään neljänteen syöttöalueeseen. Ympäristöolosuhteet perustuvat ulkoisen sääaseman mittauksiin testialueella. Kuudenteen ja kahdeksanteen

syöttöalueeseen syötetään mittausdata pienemmän testinopeuden mittauksista. Seitsemänteen syöttöalueeseen syötetään suuremman testinopeuden mittausdata. Ilmanvastustietojen esikäsittelyväline laskee ilmanvastusarvon ajoneuvolle, jota käytetään polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen laskennassa.



Kuva 17. VECTO-AirDrag-ilmanvastustietojen esikäsittelyväline.

Apulaitteiden syöttötiedot perustuvat ennalta määriteltyihin teknologioihin virallisten arvojen määritystilassa. Seuraavien apulaitteiden teknologiat pitää määrittää tuuletin, ohjausjärjestelmä, sähköjärjestelmä, paineilmajärjestelmä, ilmastointijärjestelmä ja voimanulosoton kytkentälaite. Määritetyn apulaite teknologian perusteella VECTO valitsee laskennassa apulaitteen kuluttaman tehoarvon. Suunnittelutilassa apulaitteista pitää muodostaa apulaitetiedosto, jota käytetään syöttötietona. Apulaitetiedosto pitää sisällään seuraavia tietoja: apulaitteen välityssuhde moottoriin, hyötysuhde moottoriin sekä kuluttajaan, apulaitteen pyörimisnopeus, mekaaninen tehontarve ja apulaitteen antama teho kuluttajalle. [6.]

Renkaiden kannalta merkittäviä syöttötietoja ovat renkaiden koko, asennustapa, vierintävastuskerroin ja vierintävastuskertoimen määrittelyssä käytetty testivoima. Asennustavalla määritetään, onko kyseessä yksikköpyöräasennus vai paripyöräasennus. Vierintävastuskerroin ja testivoima määritetään standardin ISO (International Organization for Standardization) 28580 mukaan. [6.]

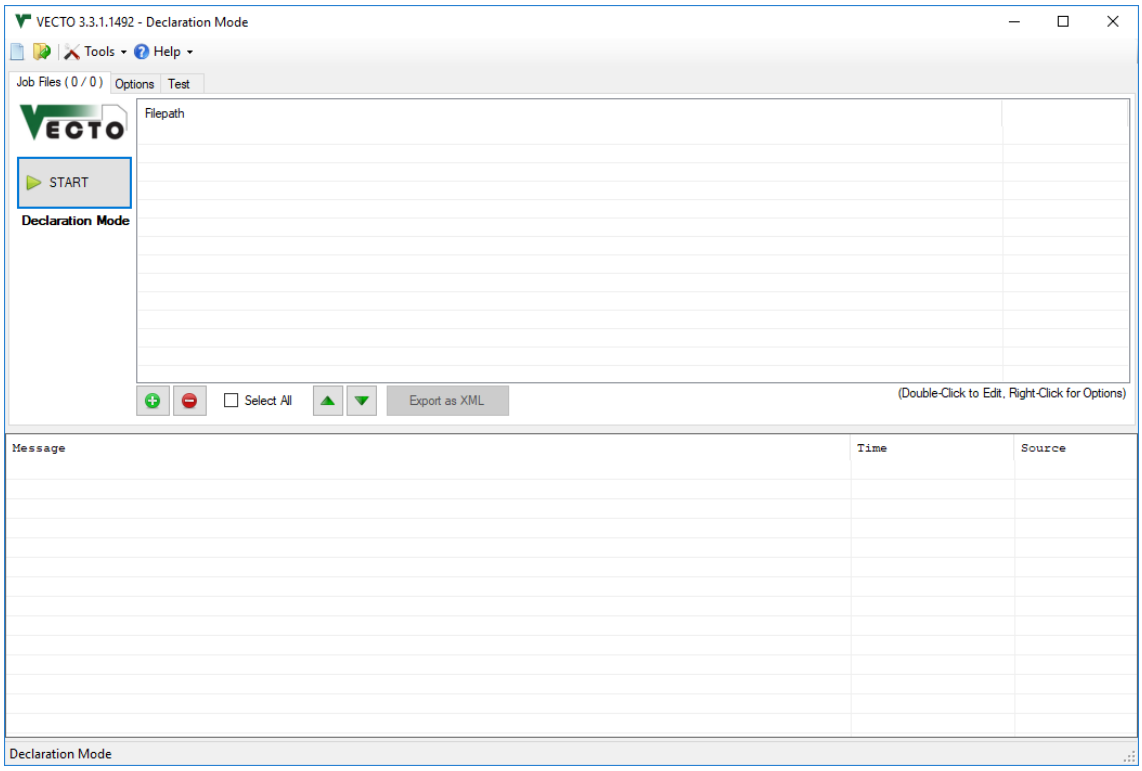
3.3.2 Oheissyöttötiedot

Oheissyöttötiedot koostuvat ajoneuvon ominaisuuksista. Ajoneuvon ominaisuudet sisältävät seuraavia tietoja: ajoneuvon tyyppi, akseli konfiguraatio, ajoneuvon korjattu omamassa, ajoneuvon rekisteröinti luokka, vetävien akseleiden määrä, vaihdesidonnaiset vääntömomentin rajat ja moottorin joutokäyntinopeus. [2, s. 22–26; 6.]

3.4 Käyttöliittymä

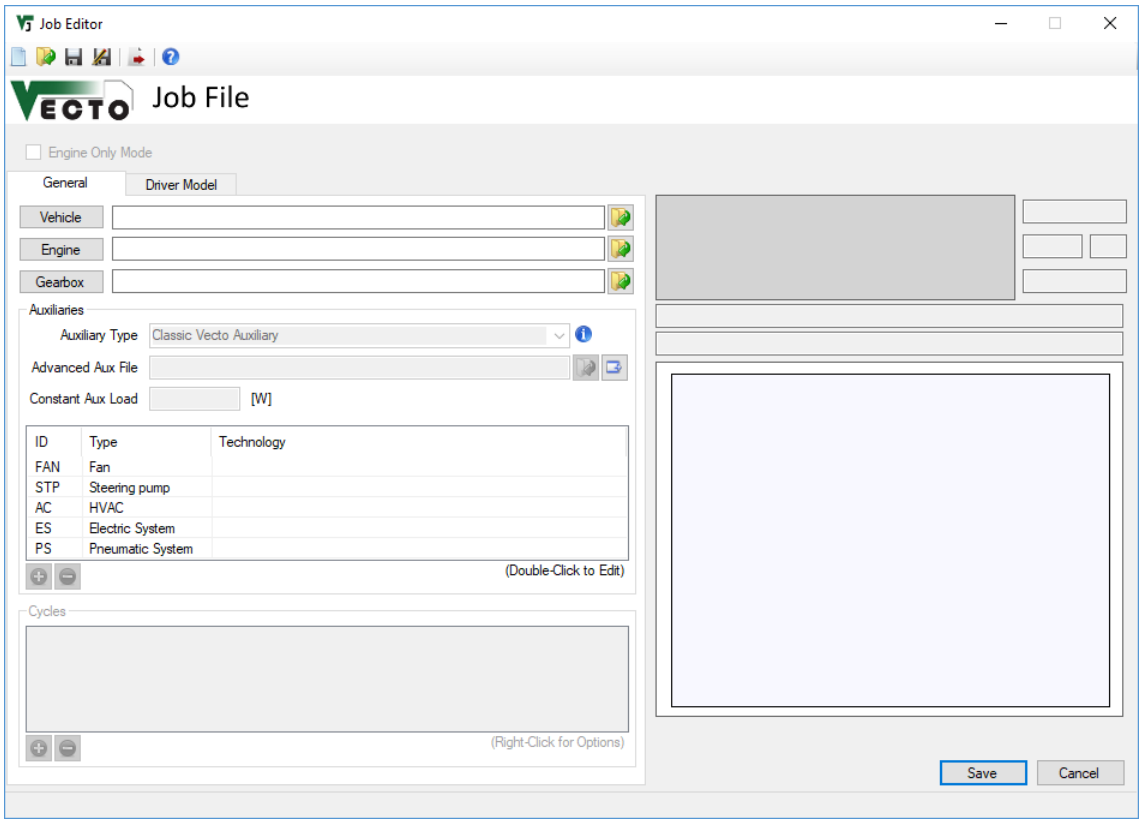
VECTOn käyttöliittymä koostuu pääohjelmasta ja kuudesta aliohjelmasta. Aliohjelmilla muodostetaan laskentatiedostoja, jotka sisältävät syöttötietoja. Pääohjelmassa suoritetaan työtiedostojen laskenta, jotka koostuvat aliohjelmien laskentatiedostoista tai esikäsittelyvälineiden luomista tiedostoista. Aliohjelmiin kuuluvat seuraavat ohjelmat: työtiedosto-ohjelma, todennustestiohjelma, ajoneuvotiedosto-ohjelma, moottoritiedosto-ohjelma, vaihteistotiedosto-ohjelma ja tulostentarkasteluohjelma. [6.]

VECTO-simulointiohjelma rakentuu pääohjelman ympärille. Pääohjelmasta voidaan muuttaa VECTOn asetuksia ja toimintatilaa. Aliohjelmien avaaminen tehdään pääohjelmasta. Pääohjelman tehtävänä on laskea työtiedosto, jonka luontiin tarvitaan aliohjelmia. [6.] Kuvasta 18 nähdään pääohjelman graafinen käyttöliittymä. Pääohjelman yläkenttään haetaan työtiedostot, jotka halutaan laskea. Laskenta aloitetaan START-painikkeesta. Laskennan aikana pääohjelma kirjoittaa alakenttään suorituslokia. Suorituslokista voidaan seurata, miten laskenta etenee ja ilmeneekö laskennassa virheitä. Pääohjelman Tools-valikosta avataan aliohjelmat. Options-välilehden takaa voidaan valita toimintatilaksi joko virallisten arvojen määritystila tai suunnittelutila.



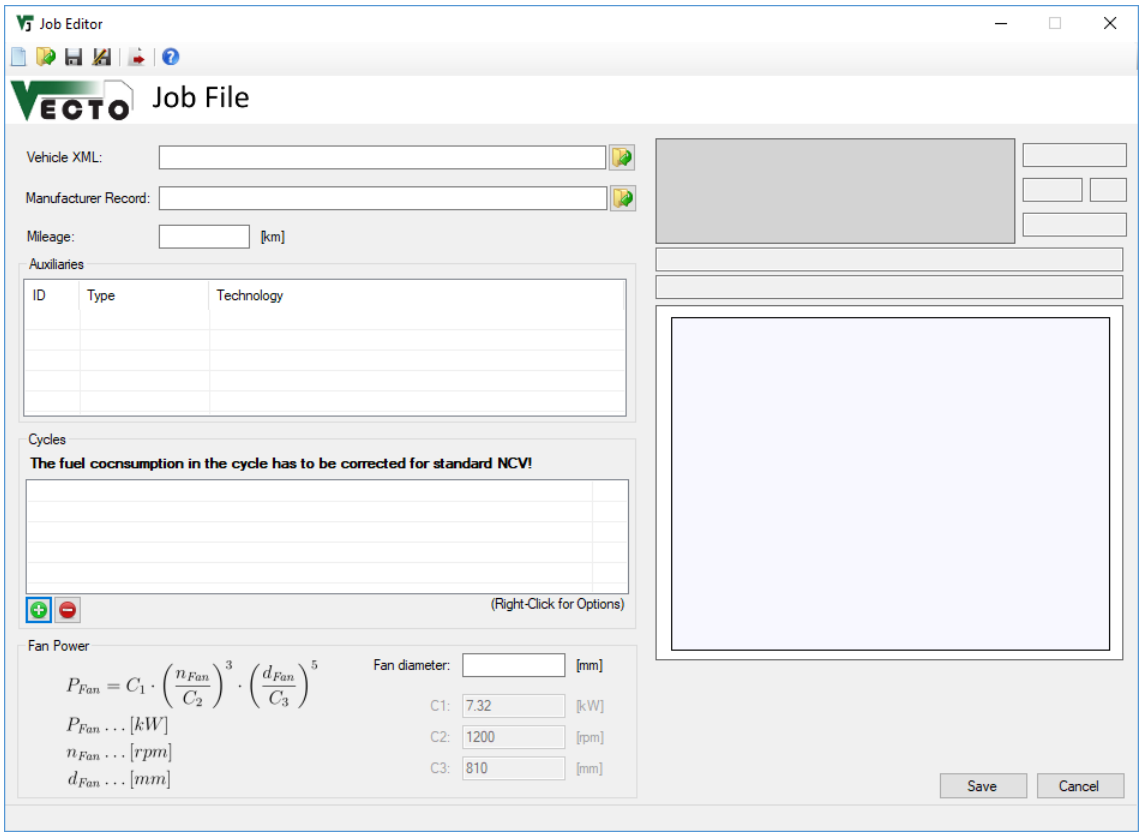
Kuva 18. VECTO-simulointiohjelman pääohjelma.

Työtiedosto-ohjelmalla luodaan työtiedosto, johon kootaan aliohjelmilla tehdyt laskentatiedostot. Ohjelmalla yhdistetään ajoneuvon, moottorin ja vaihteiston laskentatiedostot. Virallisten arvojen määritystilassa työtiedosto-ohjelmalla määritetään apulaitteiden teknologiat apulaite kohtaisesti. Suunnittelutilassa ohjelmalla määritetään apulaitteet ja ajosyklit. Suunnittelutilassa kuljettajan tekemiä ratkaisuja voidaan muokata Driver Model -välilehdellä. Suunnittelutilassa voidaan aktivoida pelkkä moottoritila. [6.] Kuvasta 19 nähdään työtiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä. Kuvassa kolmeen ensimmäiseen syöttöalueeseen syötetään aliohjelmilla tehdyt laskentatiedostot. Kuvassa näkyvään Auxiliaries osioon syötetään tarvittavat tiedot apulaitteista. Kuvassa alimpana oleva syöttöalue on tarkoitettu ajosykleille.



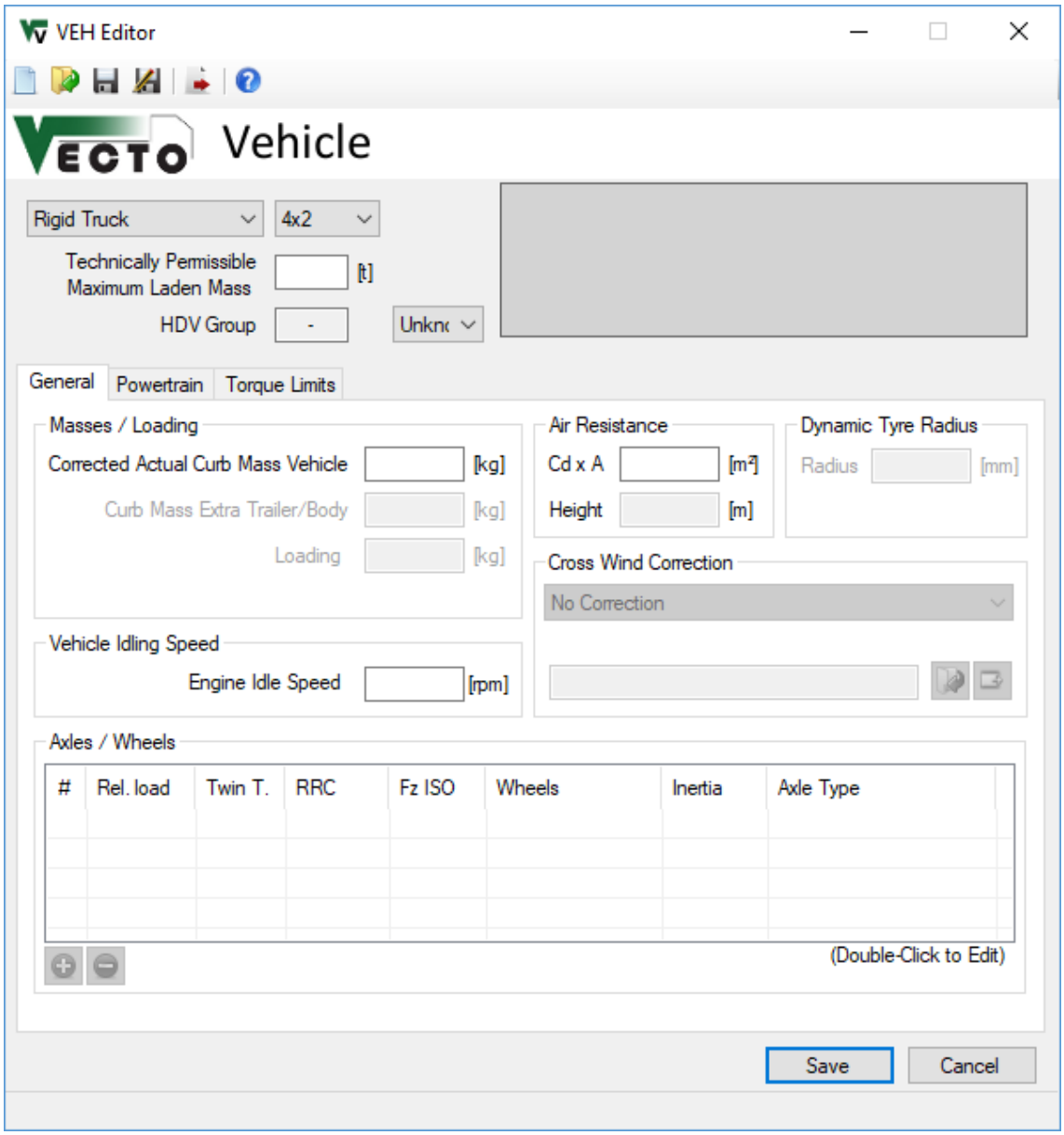
Kuva 19. Työtiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä.

Todennustestiohjelmalla luodaan työtiedosto VECTOn pääohjelmaan, joka käyttää laskennassa ajoneuvosta mitattuja arvoja. Todennustestiohjelman ajoneuvotiedosto koostuu samoista syöttötiedoista kuin virallisten arvojen määritystilassa. Ohjelmalla luotu tiedosto käy suoraan laskettavaksi pääohjelmaan. [6.] Kuvassa 20 on esitetty todennustestiohjelman graafisenkäyttöliittymän rakenne. Ensimmäiseen syöttöalueeseen syötetään ajoneuvotiedosto. Toiseen syöttöalueeseen syötetään virallisten arvojen määritystilassa laskettu tulostiedosto. Ajoneuvon matkamittari lukema syötetään kolmanteen syöttöalueeseen. Neljännestä syöttöalueesta voidaan tarkistaa apulaitteiden määritelmät. Viidenteen syöttöalueeseen syötetään ajoneuvosta mitattu ajosyklitiedosto. Tuulettimen halkaisija määritellään kuudennessa syöttöalueessa.



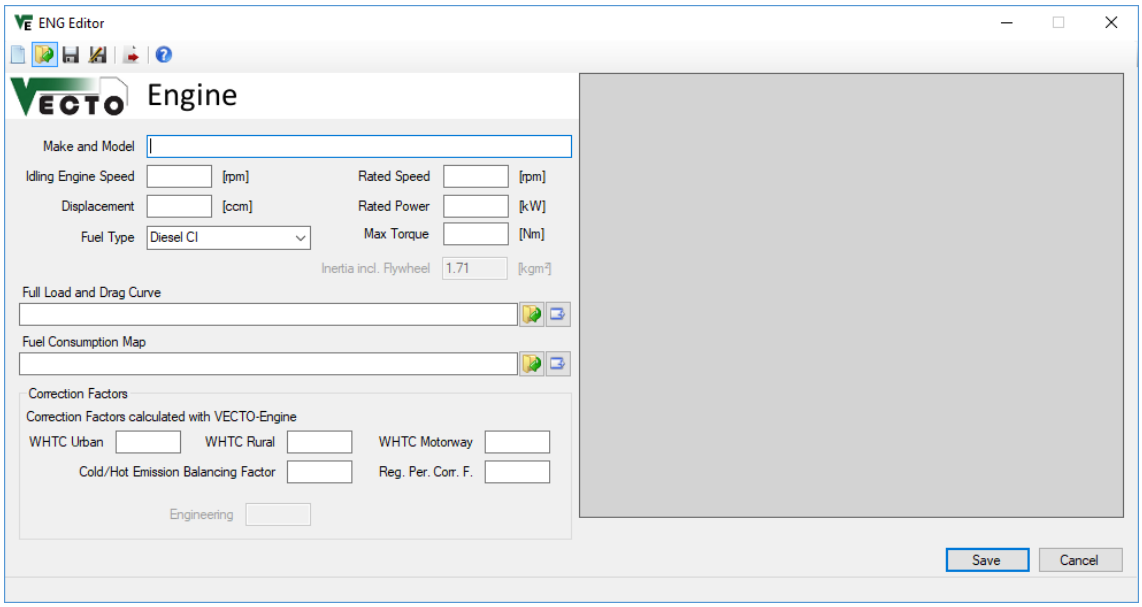
Kuva 20. Todennustestiohjelman graafinen käyttöliittymä.

Ajoneuvotiedosto-ohjelmalla määritetään ajoneuvon ominaisuudet. Ajoneuvotiedosto-ohjelma koostuu kolmesta välilehdestä. Ensimmäisellä välilehdellä määritellään ajoneuvon massat, joutokäyntinopeus, ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulo, akselikohtaiset ominaisuudet, renkaiden ominaisuudet ja sivutuulen huomiointi menetelmä. Toisella välilehdellä valitaan, onko ajoneuvossa käytössä hidastinta, kulmavaihdetta tai voimanulosottoa. Mikäli jokin edellä mainituista komponenteista valitaan, pitää komponentti määrittää. Kolmannessa välilehdessä on mahdollista määrittää vaihdekohtaiset vääntömomentin raja-arvot. [6.] Kuvassa 21 esitetään ajoneuvotiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä. Kuvassa nähdään kolme alasvetovalikkoa, joista voidaan määrittää ajoneuvon alustakonfiguraatio, akselikonfiguraatio ja rekisteröintiluokka. Kuvasta nähdään kolme välilehteä, jotka ovat nimetty seuraavasti: General, Powertrain ja Torque Limits. Välilehdet vaihdetaan painamalla välilehden nimeä.



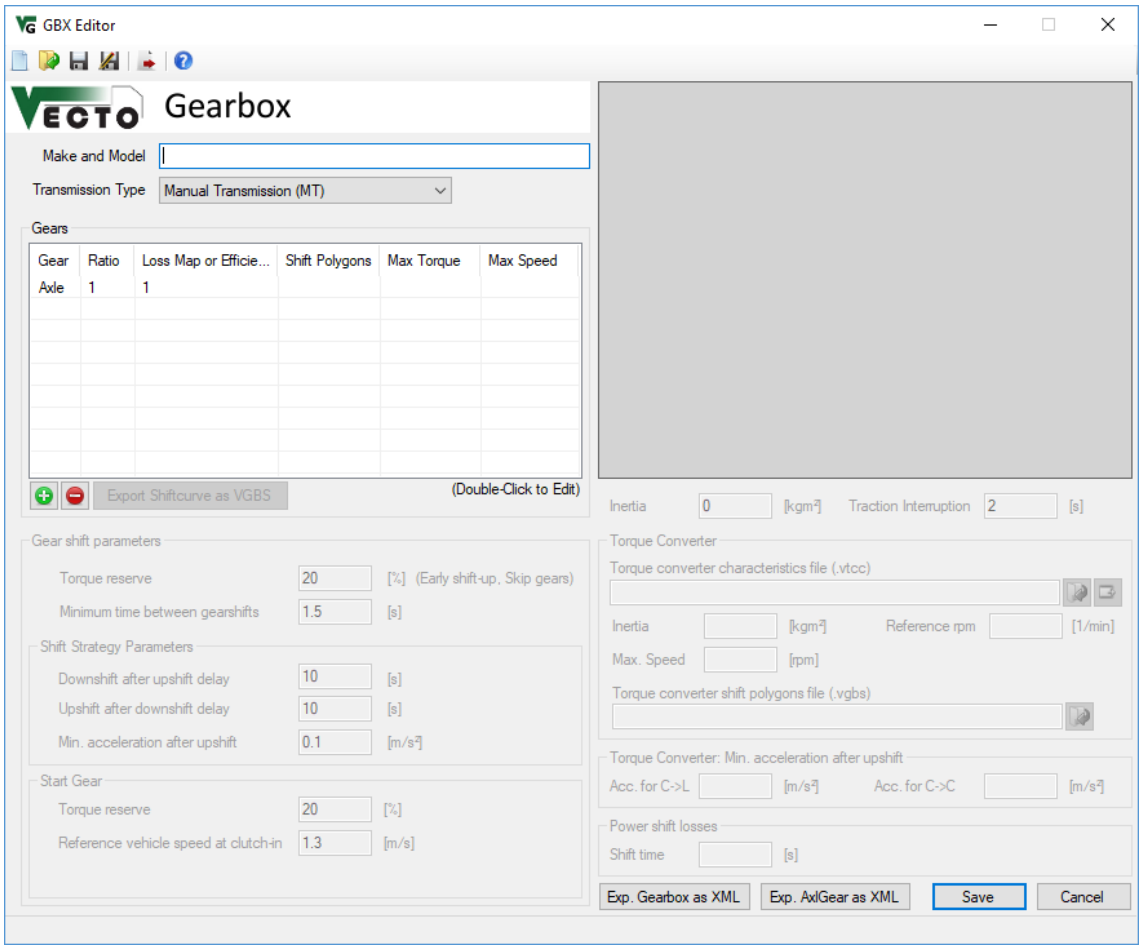
Kuva 21. Ajoneuvotiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä.

Moottoritiedosto-ohjelmalla luodaan laskentatiedosto moottorille ominaisista tiedoista. Moottoritiedosto-ohjelmaan syötetään seuraavat tiedot: moottorin merkki ja malli, joutokäyntinopeus, kuutiotilavuus, polttoaineen tyyppi, nimellispyörimisnopeus, nimellisteho, maksimi vääntömomentti, yhdistetty täyskuormitus- ja moottorijarrutuskäyrä, polttoaineenkulutuskartta sekä WHTC-korjauskertoimet. [6.] Kuvassa 22 näkyy moottoritiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä.



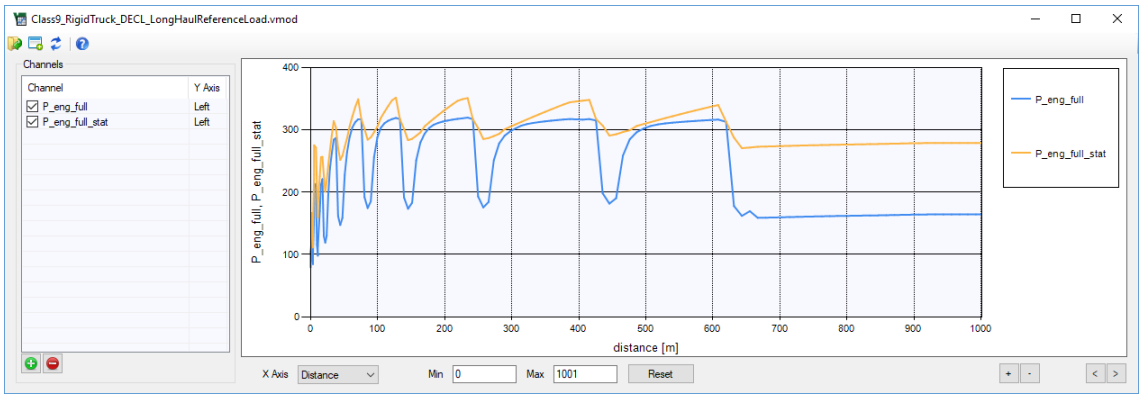
Kuva 22. Moottoritiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä.

Vaihteistotiedosto-ohjelmalla luodaan vaihteistolle laskentatiedosto sen ominaisuuksista. Vaihteistotiedosto-ohjelmalla määritetään vaihteiston tyyppi, merkki, malli, vaihteiden lukumäärä, välityssuhteet ja perävälitys. Jokaiselle vaihteelle ja perävälitykselle syötetään häviökartta. Momentinmuuntimen ominaisuustiedosto määritetään, jos vaihteiston tyypiksi valitaan automaattivaihteisto. Suunnittelutilassa ohjelmassa määritetään vaihteiden vaihtoon liittyvät parametrit. [6.] Kuvassa 23 esitetään vaihteistotiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä. Kuvassa näkyvästä alasvetovalikosta määritetään vaihteiston tyyppi. Vaihteiston tyypiksi valitaan jokin seuraavista: manuaalivaihteisto, automatisoitumanuaalivaihteisto tai automaattivaihteisto.



Kuva 23. Vaihteistotiedosto-ohjelman graafinen käyttöliittymä.

Tulostentarkasteluohjelmalla voidaan tarkastella pääohjelman muodostamia tulostiedostoja. Tulostentarkasteluohjelma esittää laskennan tulokset graafisesti käyrinä. Ohjelmassa valitaan näytettävät kanavat tulostiedostosta. Ohjelmassa on vaaka-akselilla aina jompikumpi matka tai aika. Tulostiedoston kanavista löytyy kaikki laskennassa käytetyt muuttujat. [6.] Kuvassa 24 esitetään esimerkki tulostiedoston tarkastelusta. Kuvasta nähdään tulostentarkasteluohjelman graafisen käyttöliittymän rakenne. Alhaalla olevista plus ja miinus merkeistä lisätään tai poistetaan tulostiedostosta valittu muuttujakanava. Alasvetovalikosta vaihdetaan vaaka-akselin suure. Alasvetovalikon vieressä olevista kentistä muutetaan kuvaajan vaaka-akselin päätepisteitä.



Kuva 24. Tulostentarkasteluohjelman graafinen käyttöliittymä.

Laskennassa voidaan käyttää aliohjelmilla tehtyjä laskentatiedostoja tai esikäsittelyvälineillä tehtyjä laskentatiedostoja. Virallisten arvojen määritystilassa käytetään esikäsittelyvälineillä luotuja laskentatiedostoja. [2, s. 91 s. 228; 6.]

4 Simuloinnin lähtötiedot

Polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen laskentaan valittiin Sisun ajoneuvomalli. Sisun valmistamista ajoneuvoista valittiin yleisin ajoneuvokokonaisuus, jolle laskenta suoritettiin. Yleisin ajoneuvo kokonaisuus valittiin, koska niistä on saatu eniten kokemuksia asiakkailta.

Simuloitavan ajoneuvon pääpiirteet:

- Akselikonfiguraatio: 8x4
- Ohjaamo: Makuuohjaamo
- Moottori: Mercedes-Benz OM473 460kW
- Automatisoitumanuaalivaihteisto: Mercedes-Benz Powershift G280
- Perävälitys: 4,65:1
- Renkaat: 385/65R22,5 ja 315/80R22,5.

Laskennassa tarvittavat tiedot saatiin ajoneuvon ECU (Engine Control Unit) -tiedostosta ja ajoneuvon rekisteröintitodistuksesta. ECU-tiedostosta saatuja tietoja jouduttiin muokkaamaan, että niitä pystyttiin käyttämään VECTOn syöttötietoina.

4.1 Moottorin tiedot

Ajoneuvon moottoritiedot saatiin ECU-tiedostosta ja WHTC-polttoainekulutusarvot tyyppihyväksyntä dokumenteista. ECU-tiedoston moottoriarvot olivat muodostettu eri tarkkuuksille riippuen arvosta. Moottorijarrutuskäyrä annettiin kahdeksalle eri kierrosluvulle. Täyskuormituskäyrä annettiin kuudelletoista eri kierrosluvulle. Polttoaineenkulutus arvot annettiin kuudelletoista eri kierrosluvulle ja kuudelletoista eri vääntömomentin arvolle. ECU-tiedostosta saadut arvot eivät käyneet sellaisinaan moottoritietojen esikäsittelyvälineeseen. Moottoritietojen esikäsittelyväline tarvitsee kaikki tiedot tarkkuudella, jossa kierrosluku kasvaa vähintään kahdeksan kierrosta minuutissa aina edelliseen verrattuna. ECU-tiedoston arvoille tehtiin laskentatyökalut, joissa ECU-tiedoston arvoja käytettiin lähdetietona laskettaessa moottoritietojen esikäsittelyvälineelle kelpaavat syöttötiedot. Moottorijarrutuskäyrä ja täyskuormituskäyrä muodostettiin lineaarisella interpoloinnilla. Interpoloinnissa käytettiin ECU:sta saatuja kierrosluvun arvoja laskentavälin päätepisteinä. Moottorijarrutuskäyrälle tehtiin seitsemän lineaarista interpolointia ja täyskuormituskäyrälle tehtiin viisitoista lineaarista interpolointia.

Polttoaineenkulutuskartan määrittely aloitettiin laskemalla polttoainekulutuskartalle ominainen ruudukko. Ruudukko koostuu moottorin kierrosluvusta ja vääntömomentista. Moottoritietojen esikäsittelyväline laskee täyskuormituskäyrän perusteella ruudukkoon kierrosluvun arvot ja antaa vääntömomentille lukuarvon, paljonko seuraava vääntömomentin arvo kasvaa edellisestä.

Polttoaineenkulutuskartta laskettiin kahdessa vaiheessa. Molemmissa vaiheissa sovellettiin käyrän sovitusta arvopisteille. Ensimmäisessä vaiheessa sovitettiin käyrät ECU:sta saaduille polttoaineenkulutusarvoille. Käyrän sovituksessa parhaiten arvopisteitä kuvasi kuudennen asteen polynomifunktio. Ensimmäisessä vaiheessa kierrosluku valittiin funktion muuttujaksi. Muodostetulla funktiolla laskettiin polttoaineenkulutuksen arvot kierrosluvuille, jotka saatiin moottoritietojen esikäsittelyvälineestä. Toisessa vaiheessa sovitettiin käyrät uusille polttoaineenkulutusarvoille. Kuudennen asteen polynomifunktio valikoitui toisessakin vaiheessa parhaiten arvopisteitä kuvaavaksi. Toisessa vaiheessa funktion muuttujaksi valittiin vääntömomentti. Funktiolla laskettiin polttoaineenkulutuksen arvot jokaiselle kierrosluvulle käyttäen moottoritietojen esikäsittelyvälineen vaatimaa vään-

tömomentin arvojoukkoa. Vääntömomentin arvojoukko muodostettiin käyttäen moottoritietojen esikäsittelyvälineen laskemaa lukuarvoa. Arvojoukko muodostettiin jokaiselle kierrosluvulle. Arvojoukon päätepisteenä käytettiin maksimivääntömomenttia kyseisellä kierrosluvulla. Toisen vaiheen laskennan jälkeen polttoaineenkulutuskartta vastaa moottoritietojen esikäsittelyvälineen vaatimuksia.

Moottoritiedot syötettiin moottoritietojen esikäsittelyvälineeseen, kun ne saatiin muokattua siihen sopiviksi. Moottoritietojen esikäsittelyväline muodosti moottoritiedoston, jota käytettiin laskennassa.

4.2 Voimansiirron tiedot

Ajoneuvon vaihteiston tiedot saatiin ECU-tiedostosta ja akseliston tiedot saatiin valmistajan dokumenteista. Vaihteistolle ja akselistolle laskettiin häviökartat syöttötiedoiksi vaihteistotiedosto-ohjelmaan. Vaihteiston tyyppi katsottiin komponenttitoimittajan materiaalista. Vaihteiston välityssuhteet ja vaihdekohtaiset hyötysuhteet saatiin ECU-tiedostosta. Vaihteiston vaihdekohtaiset häviökartat laskettiin käyttäen vaihteille ominaisia hyötysuhteen arvoja. Vaihteiston häviökartan raja-arvoina käytettiin moottorin maksimipyörimisnopeutta ja maksimivääntömomenttia. Akseliston häviökartta laskettiin käyttäen akselin hyötysuhdetta. Akseliston häviökartan raja-arvot ovat laajemmat kuin vaihteiston. Häviökartan vääntömomentti häviö lasketaan kertomalla sisään tuleva vääntömomentti hyötysuhteella. Häviökarttojen määrittämisen jälkeen arvot syötettiin vaihteistotiedosto-ohjelmaan. Vaihteistotiedosto-ohjelmaan syötettiin välityssuhteet ja häviökartat. Syöttötietojen syötön jälkeen valittiin vaihteiston tyyppi ja muodostettiin vaihteistotiedosto laskentaa varten.

4.3 Renkaiden tiedot

Rengastietojen löytäminen todettiin haasteelliseksi, koska renkaiden valmistajat ilmoittavat vierintävastuksen luokkana arvon sijaan. Vierintävastusarvot jaetaan kuuteen eri luokkaan kuvan 25 mukaan. Kuvasta nähdään, että pienimmän vierintävastuksen arvon omaavat luokan A renkaat ja suurimman vierintävastuksen luokan F renkaat. Loput vierintävastuksen luokat jakautuvat 0,9 välein.

RRC, kg/t	Energiate-hokkuus-luokka
RRC ≤ 4,0	A
4,1 ≤ RRC ≤ 5,0	B
5,1 ≤ RRC ≤ 6,0	C
6,1 ≤ RRC ≤ 7,0	D
7,1 ≤ RRC ≤ 8,0	E
RRC ≥ 8,1	F
Tyhjä	G

Kuva 25. Vierintävastusluokkien jaottelu [12, s. 12].

Laskettava ajoneuvo koostuu kahdesta ohjaavasta akselista ja kahdesta vetävästä akselista. Ohjaavilla akseleilla käytetään rengaskokoa 385/65R22,5 ja vetävillä akseleilla rengaskokoa 315/80R22,5. Vetävällä akselilla käytetään neljää rengasta eli paripyöräasennusta, kun taas ohjaavalla akselilla käytetään kahta rengasta eli yksikköpyöräasennusta. Vierintävastuksen arvot löydettiin tutkimuksista. Ohjaavien akseleiden renkaille vierintävastuksen arvoksi löydettiin 0,003812 [13, s. 107]. Vetävien akseleiden renkaille vierintävastuksen arvoksi löydettiin 0,004847 [14, s. 9]. Renkaiden testikuormitusvoimat saatiin samoista tutkimuksista. Ajoneuvotiedosto-ohjelmaan syötettiin renkaiden tiedot ja akselien lukumäärä.

4.4 Ohjaamon tiedot

Ohjaamon ilmanvastustiedot kerättiin ECU-tiedostosta ja ohjaamopiirustuksen etuprojektiosta. ECU-tiedostosta saatiin ilmanvastuskertoimen arvo. Ilmanvastuskertoimen arvoa etsittäessä verrattiin eri autojen ECU-tiedostoja. Eri tiedostoja verrattiin, jos ilmanvastuskertoimen arvo vaihtelisi eri ohjaamokorkeuksien johdosta. Tutkittaessa eri ECU-tiedostoja huomattiin, että ilmanvastuskertoimen arvo oli kaikissa tiedostoissa sama. Ilmanvastusarvon määrittelyssä tarvitaan ilmanvastuskertoimen lisäksi virtauspoikkipinta-ala. Virtauspoikkipinta-ala saatiin laskettua ohjaamopiirustuksen etuprojektiosta. Syöttötiedoksi kelpaava ilmanvastusarvo saadaan kertomalla ilmanvastuskerroin virtauspoikkipinta-alalla. Ilmanvastusarvo syötettiin ajoneuvotiedosto-ohjelmaan.

4.5 Ajoneuvon muut tiedot

Ajoneuvon muita tietoja otettiin rekisteröintitodistuksesta ja komponenttitoimittajien dokumenteista. Ajoneuvon massatiedot saatiin rekisteröintitodistuksesta. Apulaitteiden teknologiat pystyttiin määrittämään komponenttitoimittajien dokumenttien perusteella. Joitain apulaiteteknologioita käytiin tarkistamassa silmämääräisesti vastaavanlaisesta ajoneuvosta.

5 Simuloinnin syöttötietomuuttujat

Työssä haluttiin tutkia tiettyjen syöttötietojen muutoksen vaikutusta lopputulokseen. Muutettaviksi syöttötiedoiksi valittiin ohjaamoiden ilmanvastusarvo, renkaiden vierintävastuskerroin, perävälitys ja polttoainekartan luonnista syntyvä virhe. Muuttujien aikaansaamia tuloksia verrattiin perusajoneuvon tuloksiin.

Ohjaamoiden ilmanvastusarvot muodostettiin käyttäen samaa ilmanvastuskertoimen arvoa riippumatta ohjaamokorkeudesta. Kohdassa 4.4 kerrottiin, että eri ECU-tiedostoja verrattiin, mutta kaikissa tiedostoissa ilmanvastuskertoimen arvo on sama. Ohjaamoiden ilmanvastusarvon muuttujaksi jäi virtauspoikkipinta-alan muutos. Eri ohjaamoiden virtauspoikkipinta-alat laskettiin ohjaamopiirustusten etuprojektioista. Taulukossa 3 esitetään eri ohjaamoiden suhteelliset ilmanvastusarvon muutokset verrattuna perusajoneuvoon. Taulukosta nähdään, että lepo-ohjaamolla on 5,4 prosenttia pienempi virtauspoikkipinta-ala kuin perusajoneuvolla. Tilaohjaamon virtauspoikkipinta-ala kasvaa 14,4 prosenttia verrattuna perusajoneuvoon.

Taulukko 3. Ilmanvastusarvojen suhteelliset erot perusajoneuvoon.

Lepo-ohjaamo	Makuuohjaamo (perusajoneuvo)	Tilaohjaamo
-5,4 %	0,0 %	14,4 %

Renkaiden vierintävastuskerroin valittiin yhdeksi muuttujaksi, koska arvot olivat peräisin tutkimuksista ja tiedettiin, että renkaiden vierintävastuskertoimen arvot vaihtelevat laajasti. Laajan vaihteluvälin takia renkaiden vierintävastuskertoimen arvoa muutettiin 10

prosentilla suuremmaksi ja pienemmäksi. Taulukosta 4 nähdään muutetut vierintävastuskertoimen arvot. Taulukon +10 % -sarakkeen arvoista huomataan, että molemmat rengaskoot muuttavat vierintävastusluokkaa, kun niiden arvoja on korotettu 10 prosentilla. Vierintävastusluokka jaottelu löytyy aiemmin esitetystä kuvasta 25.

Taulukko 4. Vierintävastuskertoimen arvot.

Vierintävastuskerroin (RRC)

Rengaskoko	-10 %	Perus-ajoneuvo	+10 %
385/65R22,5	0,003431	0,003812	0,004193
315/80R22,5	0,004362	0,004847	0,005332

Perävälitys valittiin muuttujaksi, koska sillä saadaan muutettua helposti ajoneuvon kokonaisvälityssuhdetta. Lisäksi haluttiin tarkastella muiden perävälitysten toimivuutta verrattuna yleisimmin käytössä olevaan perävälitykseen. Kaikille perävälityksille luotiin häviökartat käyttäen samaa hyötysuhdetta. Eri perävälitysten välityssuhde syötettiin vaihteistotiedosto-ohjelmaan perävälityksen kohdalle. Taulukosta 5 löytyy simuloinnissa käytetyt perävälitysten välityssuhteet. Taulukosta nähdään, että simuloinnissa käytettiin kolmea harvempaa perävälitystä ja yhtä tiheämpää perävälitystä.

Taulukko 5. Perävälitysten välityssuhteet.

Perävälitykset				
3,79:1	4,09:1	4,29:1	(Perusajoneuvo) 4,65:1	5,56:1

Polttoainekulutuskartan määrittelystä syntyvä virhe valikoitiin viimeiseksi tarkasteltavaksi muuttujaksi. Polttoaineenkulutuskartan määrittelyssä luotiin kaksi uutta karttaa. Toinen kartoista määriteltiin laskennassa käytettyjen funktioiden minimiarvoille ja toinen maksimiarvoille. Polttoaineenkulutuskartan arvojen laskennassa käytettyjen sovituskäyrien ennusteiden keskivirhettä käytettiin määrittäessä minimi- ja maksimipolttoaineenkulutuskartta. Minimi- ja maksimipolttoaineenkulutuskartta muodostetaan noudattaen samaa periaatetta kuin perusajoneuvon polttoaineenkulutuskartta. Ensimmäisessä vaiheessa lasketaan polttoaineenkulutusarvot moottoritietojen esikäsittelyvälineen haluamille kierrosluvuille. Toisessa vaiheessa lasketaan polttoaineenkulutusarvot moottoritietojen esikäsittelyvälineen haluamalle vääntömomentin arvojoukolle.

Minimi- ja maksimipolttoainekulutuskartan määrittelyn ensimmäisessä vaiheessa käytettään samoja funktioita kuin perusajoneuvon polttoainekulutuskartassa. Minimi- ja maksimikarttaa määriteltäessä ensimmäisessä vaiheessa polttoaineenkulutusarvoihin lisätään tai vähennetään ennusteen keskivirhe. Toisessa vaiheessa minimi- ja maksimipolttoaineenkulutuksen arvopisteille sovitetaan käyrät. Toisen vaiheen yhtälöiden avulla laskettuihin polttoaineenkulutusarvoihin lisätään tai vähennetään ennusteen keskivirhe. Minimikarttaa laskettaessa keskivirhe vähennetään polttoaineenkulutusarvoista. Maksimikartan tapauksessa polttoaineenkulutusarvoihin lisätään keskivirhe. Taulukosta 6 nähdään minimi- ja maksimipolttoaineenkulutuskartan suhteelliset keskivirheet verrattuna perusajoneuvon polttoainekulutuskarttaan. Taulukon arvojen perusteella voidaan todeta, että maksimipolttoaineenkulutuskartta eroaa enemmän perusajoneuvon polttoaineenkulutuskartasta kuin minimipolttoaineenkulutuskartta.

Taulukko 6. Minimi- ja maksimipolttoainekulutuskartan suhteelliset keskivirheet.

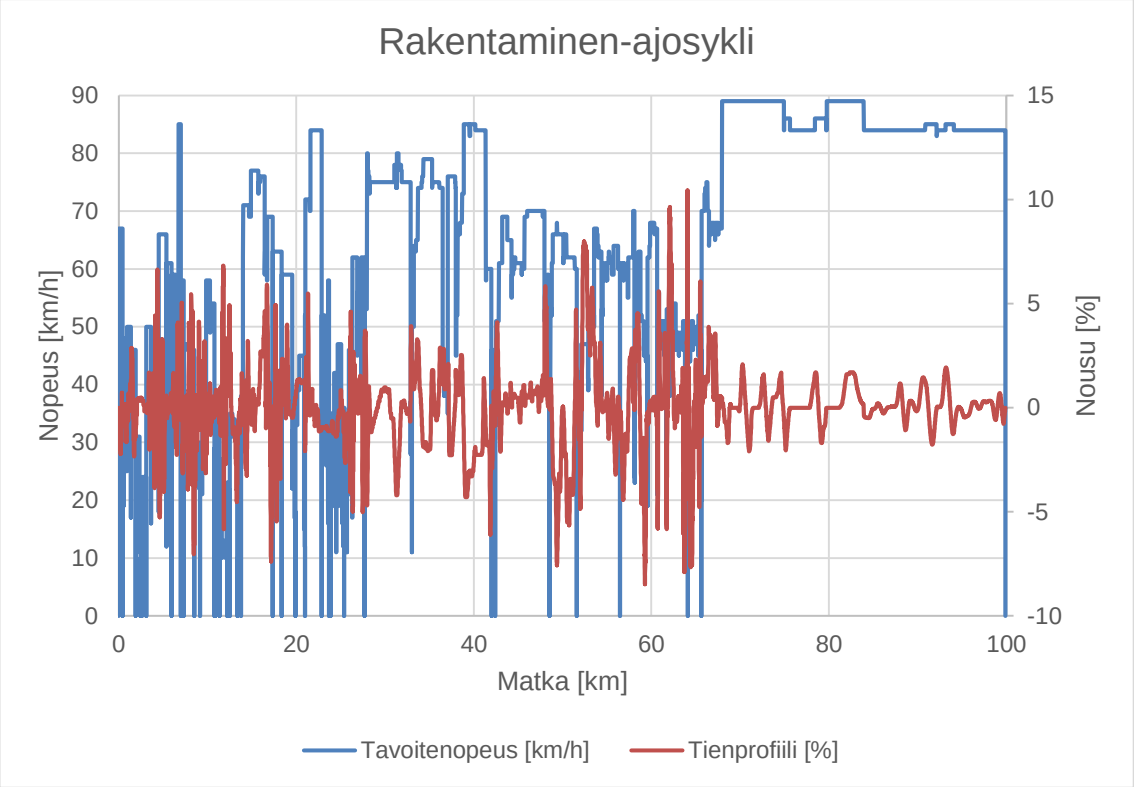
Polttoaineenkulutuskarttojen suhteelliset keskivirheet

Minimiarvot	Perusajoneuvo	Maksimiarvot
-1,9 %	0 %	2,1 %

Muuttujien simulointi suoritettiin aina yksi muuttuja kerrallaan. Monen muuttujan samanaikaisia vaikutuksia ei simuloitu.

6 Simuloinnin tulokset

Kaikki simuloinnit suoritettiin virallisten arvojen määritystilassa. Ajosykli määräytyi ajoneuvo ryhmän mukaan. Simuloitava ajoneuvo kuului ryhmään 16, joten ajosykliksi valikoitui rakentaminen-ajosykli. Kuvasta 26 nähdään rakentaminen-ajosyklin rakenne. Rakentaminen-ajosykli koostuu hyvin vaihtelevista olosuhteista. Rakentaminen-ajosyklissä tienprofiili on hyvin mäkistä. Nousut ovat jyrkimmillään 10 prosenttia ja laskut yli 5 prosenttia. Rakentaminen-ajosykli sisältää runsaasti tavoitenopeuden vaihteluita. Ajosyklin lopussa ajetaan noin 30 kilometrin pituinen maantieosuus. Ajosyklistä löytyy myös monta kohtaa, jossa pysähdytään.



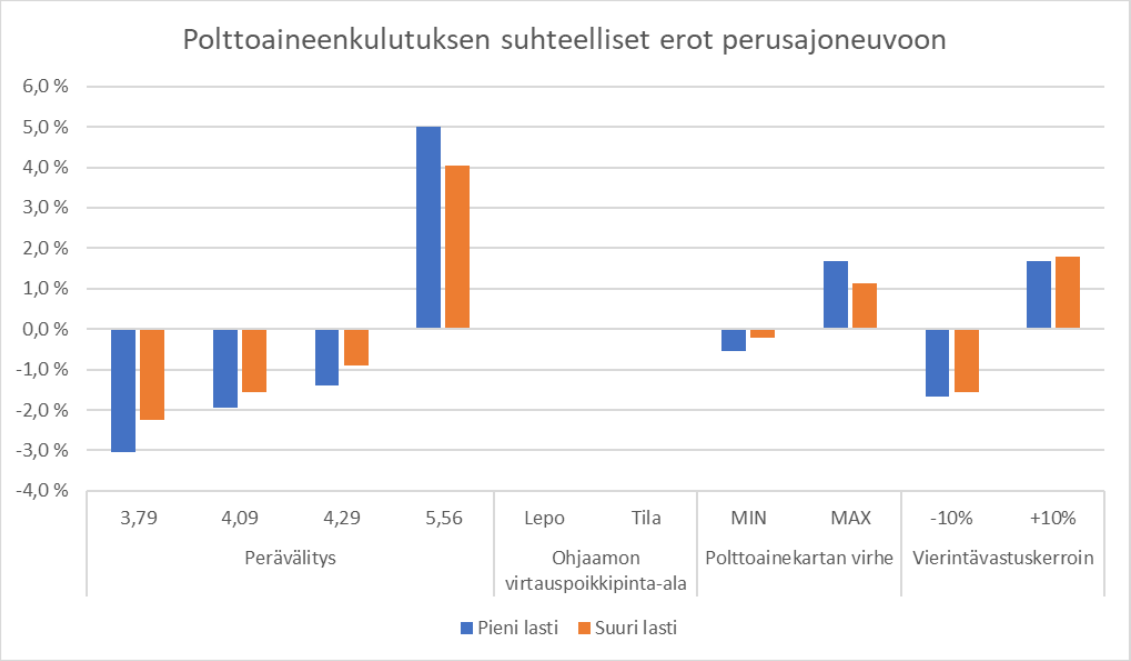
Kuva 26. Havainnekuva rakentaminen-ajosyklistä.

Rakentaminen-ajosykli simuloitiin ajoneuvolle kaksi kertaa. Ensimmäinen simulointi suoritettiin pienessä lastissa ja toinen simulointi suuressa lastissa. Pienen lastin ja suuren lastin kuormitustiedot ovat sisään rakennettuja ajosykliin. Pienen lastin kuorma on 2 600 kilogrammaa ja suuren lastin kuorma on 12 900 kilogrammaa. Kaikista simuloinnin tuloksista koottiin tulostaulukot. Tulostaulukot muodostettiin polttoaineenkulutukselle ja hiilidioksidipäästöille. Taulukoista pystyttiin vertailemaan eri muuttujien aiheuttamia muutoksia.

Liitteessä 1 nähdään polttoaineenkulutuksen tulokset. Perusajoneuvon polttoaineenkulutukseksi pienellä lastilla saatiin 36 l / 100 km ja suurella lastilla 44,5 l / 100 km. Suurimmat polttoaineenkulutuksen arvot saatiin perävälityksen ollessa 5,56:1. Pienessä lastissa polttoaineenkulutuksen arvoksi saatiin 37,8 l / 100 km ja suuressa lastissa 46,3 l / 100 km. Pienimmät polttoaineenkulutuksen arvot saatiin perävälityksen ollessa 3,79:1. Pienen lastin polttoaineenkulutukseksi saatiin 34,9 l / 100 km ja suuren lastin polttoaineenkulutukseksi saatiin 43,5 l / 100 km. Virtauspoikkipinta-alan muutos ei muuttanut

tulosta lainkaan. Polttoaineenkulutuskartan virheet aiheuttivat pieniä muutoksia polttoaineenkulutukseen. Maksimipolttoaineenkulutuskartalla saatiin aikaiseksi suurempia muutoksia kuin minimipolttoaineenkartalla. Minimipolttoaineenkulutuskartalla tuloksiksi saatiin pienessä lastissa 35,8 l / 100 km ja suuressa lastissa 44,4 l / 100 km. Maksimipolttoaineenkulutuskartalla tulokseksi saatiin pienessä lastissa 36,6 l / 100 km ja suuressa lastissa 45,0 l / 100 km. Vierintävastuskertoimen ollessa 10 prosenttia pienempi tuloksiksi saatiin pienessä lastissa 35,4 l / 100 km ja suuressa lastissa 43,8 l / 100 km. Vierintävastuskertoimen 10 prosenttia suurempi tuloksiksi saatiin pienessä lastissa 36,6 l / 100 km ja suuressa lastissa 45,3 l / 100 km.

Liitteestä 2 nähdään polttoaineenkulutuksen suhteelliset erot perusajoneuvoon. Suurempien polttoaineenkulutuslukujen suhteelliset erot asettuivat 1,1…5,0 prosentin väliin. Pienempien polttoaineenkulutuslukujen suhteelliset erot asettuivat –0,2…–3,1 prosentin väliin. Kuvassa 27 esitetään liitteen 2 tulokset graafisesti. Kuvassa siniset palkit edustavat tuloksia pienessä lastissa ja oranssit palkit tuloksia suuressa lastissa. Kuvasta nähdään, että perävälityksen muutoksella saatiin aikaiseksi suurimmat erot. Kuvasta voidaan todeta, että maksimiarvoilla määritetty polttoaineenkulutuskartta vaikutti tuloksiin enemmän kuin minimiarvoilla määritetty polttoaineenkulutuskartta. Kuvasta nähdään ajoneuvon kokonaismassan vaikutus polttoaineenkulutukseen. Ajoneuvon kokonaismassan kasvattaminen vähensi polttoaineen kulutusta kahdessa tapauksessa laskettaessa maksimipolttoaineenkulutuskartalla ja käytettäessä 5,56:1-perävälitystä. Kaikissa muissa tapauksissa ajoneuvon kokonaismassan kasvaessa polttoaineenkulutuskin kasvoi.

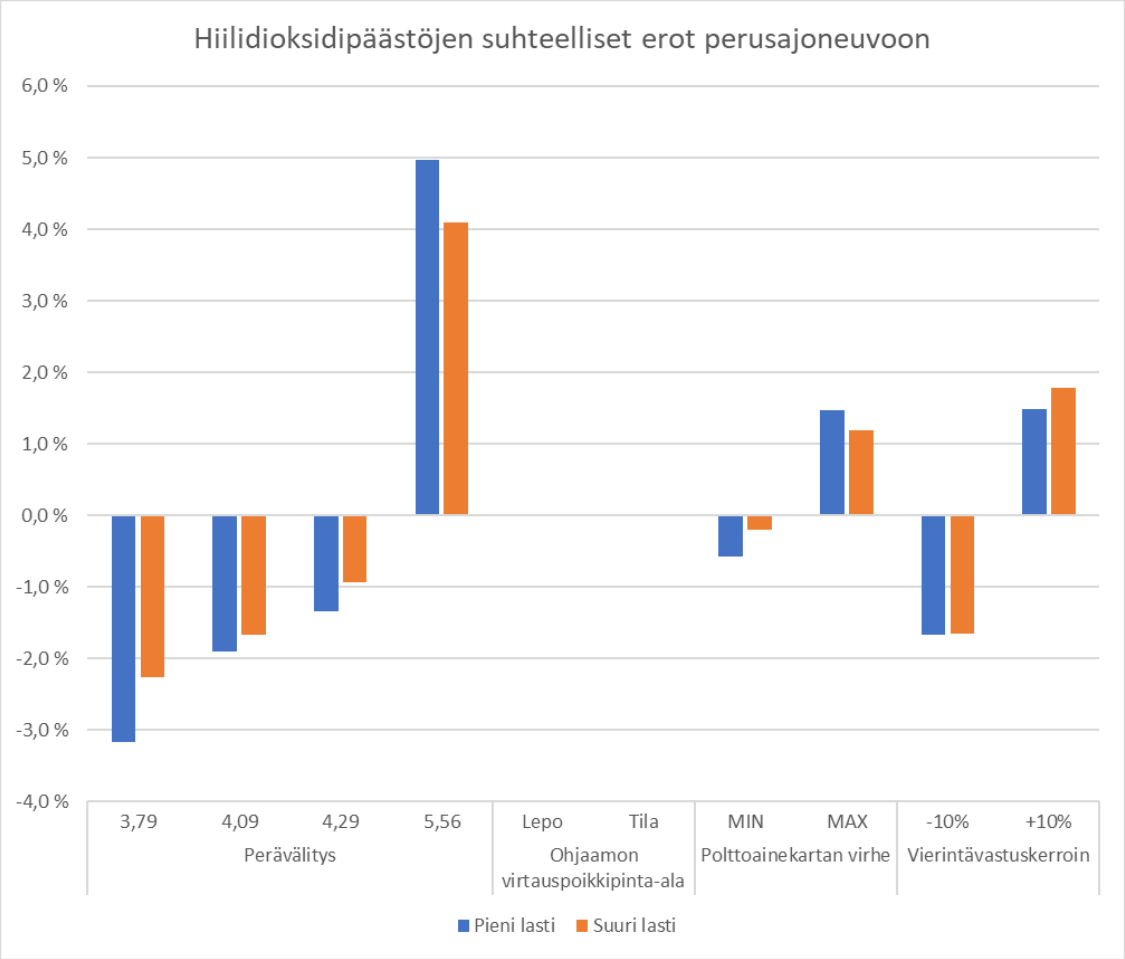


Kuva 27. Polttoaineenkulutuksen suhteelliset erot perusajoneuvoon.

Hiilidioksidipäästöjen tulokset löytyvät liitteestä 3. Hiilidioksidipäästöille luotiin samanlainen tulostaulukko kuin polttoaineenkulutuksen tuloksille. Hiilidioksidipäästöjen arvot lasketaan polttoaineenkulutuksesta, joten muuttujien tulokset ovat samassa järjestyksessä kuin polttoaineenkulutuksen tulokset. Perusajoneuvon hiilidioksidipäästöiksi saatiin pienessä lastissa 942,7 g/km ja suuressa lastissa 1 164,3 g/km. Pienimmät hiilidioksidipäästöt saatiin perävälityksen ollessa 3,79:1. Pienessä lastissa hiilidioksidipäästön arvoksi saatiin 912,9 g/km ja suuressa lastissa arvoksi saatiin 1 138,0 g/km. Suurimmat hiilidioksidipäästöjen arvot saatiin, kun perävälitys oli 5,56:1. Tällöin hiilidioksidipäästöjen arvoiksi saatiin pienessä lastissa 989,6 g/km ja suuressa lastissa 1 212,0 g/km. Minimipolttoainekulutuskartalla tuloksiksi saatiin pienessä lastissa 937,3 g/km ja suuressa lastissa 1 162,0 g/km. Maksimipolttoainekulutuskartan hiilidioksidipäästöiksi saatiin pienessä lastissa 956,5 g/km ja suuressa lastissa 1 178,1 g/km. Vierintävastuskertoimen ollessa 10 prosenttia pienempi tuloksiksi saatiin pienessä lastissa 927,0 g/km ja suuressa lastissa 1 145,1 g/km. Vierintävastuskertoimen ollessa 10 prosenttia suurempi pienen lastin tulokseksi saatiin 956,7 g/km ja suuren lastin tulokseksi saatiin 1 185,0 g/km.

Hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perusajoneuvoon on esitetty liitteessä 4. Pienempien hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perusajoneuvoon asettuivat välille –0,2…–3,2

prosenttia. Suurempien hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perusajoneuvoon asettuivat välille 1,2…5,0 prosenttia. Kuvassa 28 on esitetty hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perusajoneuvoon graafisesti. Kuvassa pienen lastin tuloksia kuvataan sinisellä värillä ja suuren lastin tuloksia oranssilla värillä. Kuvasta nähdään, että ajoneuvon kokonaismassan muutoksella ei ollut juurikaan vaikutusta hiilidioksidipäästöihin, kun käytettiin pienennettyä vierintävastuskerrointa. Kuvasta voidaan todeta, että hiilidioksidipäästöarvoissa suurimmat erot saatiin aikaiseksi perävälityksen muutoksilla. Kuvan perusteella nähdään, että maksimipolttoaineenkulutuskartta vaikuttaa hiilidioksidipäästöihin melkein yhtä paljon kuin vierintävastuskertoimen 10 prosentin korotus. 10 prosentin pienennys vierintävastuskertoimessa aiheuttaa melkein samanlaisen muutoksen kuin 4,09:1-perävälitys.



Kuva 28. Hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perusajoneuvoon.

Polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen suhteellisissa eroissa huomattiin hieman vaihtelua. Vaihtelu johtuu arvojen suuruudesta. Hiilidioksidipäästöjen arvot ovat suurempia kuin polttoaineenkulutuksen arvot. Hiilidioksidipäästöjen arvoissa yhden desimaalin muutos aiheuttaa pienemmän vaikutuksen suhteessa perusajoneuvon tulokseen kuin polttoaineenkulutuksen arvon yhden desimaalin muutos. Molempia tuloksia yhdistää se, että pienessä lastissa saatiin aikaan suurempia eroja kuin suuressa lastissa. Pienessä lastissa ajoneuvon kiihtyvyyttä joudutaan rajoittamaan useammin kuin suuressa lastissa. Kiihtyvyyden rajoituksesta johtuen pienen lastin tuloksiin muodostuu suurempia eroja kuin suuren lastin tuloksiin.

7 Yhteenveto ja jatkotoimenpiteet

Opinnäytetyössä verrattiin simulointiohjelmiston syöttötietojen muutosten vaikutusta lopputulokseen. Opinnäytetyön tavoite saavutettiin. Työssä nähtiin eri syöttötietomuuttujien vaikutukset lopputulokseen simuloitaessa virallisten arvojen määritystilassa. Työssä tarkasteltiin simulointiohjelmiston toimintaperiaatetta ja tutustuttiin lain vaatimuksiin. Simulointiohjelmiston toiminnasta luotiin kattava tietopaketti ja syöttötietojen vaatimukset saatiin selvitettyä. Sisulle ominaisia syöttötietoja saatiin määriteltyä olemassa olevan materiaalin perusteella. Syöttötietoja määriteltäessä luotiin kolme laskentatyökalua, jotta voidaan hyödyntää ajoneuvojen moottorinohjainlaitteen sisältämiä tietoja.

Tämän opinnäytetyön avulla saatiin selvitettyä määritettyjen syöttötietojen sopivuus virallisten arvojen määritystilassa simuloitaville polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen arvoille. Opinnäytetyön aikana määritellyt syöttötiedot ovat puutteellisia käytettäväksi tyyppihyväksynnässä. Laki vaatii syöttötietojen osalta samoja tietoja, mitä on käytetty kyseisen komponentin sertifiointimittauksissa. Jatkoa ajatellen Oy Sisu Auto Ab:n olisi suositeltavaa olla yhteydessä voimansiirtokomponentti toimittajiin ja pyytä heiltä tarvittavat tiedot syöttötietoja varten. Toinen vaihtoehto on suorittaa mittaukset itse Euroopan komission asetuksen 2017/2400 mukaan. Kolmas vaihtoehto on käyttää kiinteitä arvoja. Kiinteitä arvoja voidaan käyttää kaikille muille komponenteille paitsi moottorille. Euroopan komission asetuksessa 2017/2400 on säädetty, miten kiinteät arvot määritetään eri komponenteille.

Opinnäytetyössä ohjaamoiden virtauspoikkipinta-alan muutosta ei voitu arvioida, koska ei saatu aikaiseksi muutosta. Eri ohjaamoiden virtauspoikkipinta-alat määriteltiin ja syötettiin simulointiohjelmistoon oikeanlaisena syöttötietona eli ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan tulona. Oikeasta syöttötavasta huolimatta virtauspoikkipinta-alan vaikutusta ei voitu simuloida. Simulointiohjelmisto käytti syöttötiedosta riippumatta aina kiinteää ajoneuvoryhmäkohtaista ilmanvastuskertoimen ja virtauspoikkipinta-alan arvoa. Jatkon kannalta järkevää olisi suorittaa ilmanvastusarvon kokeellinen mittaaminen komission asetuksen 2017/2400 mukaan. Ohjaamopiirustuksen etuprojektiosta lasketun virtauspoikkipinta-alan ja ECU-tiedostosta saadun ilmanvastuskertoimen tulo olisi ollut perusajoneuvolle pienempi kuin simulointiohjelmiston käyttämä kiinteä arvo.

Opinnäytetyössä perävälitysten muutoksella oli suhteellisen suuri merkitys polttoaineenkulutukseen ja hiilidioksidipäästöihin. Perävälityksen muutoksella ajoneuvon toiminta kierroslukualuetta saadaan muutettua matalammaksi tai korkeammaksi. Simuloinnissa saatiin pienempiä kulutuksen ja päästöjen arvoja, kun moottori toimi matalammilla kierrosluvuilla. Perävälityksen ollessa 4,09:1 saadaan aikaiseksi yhtä suuri arvojen muutos kuin pienentämällä 10 prosenttia vierintävastuskerrointa. Moottorin kierrosluku tippuu noin 180 kierroksella minuutissa, kun käytetään perävälitystä 4,09:1 perävälityksen 4,65:1 sijaan. Jatkossa voi miettiä harvempien perävälitysten tuontia ajoneuvovalikoimaan, jos sillä saadaan aikaiseksi 0,8 litran polttoaineenkulutuksen säästö sadalla kilometrillä. Perävälitysten vaikutusta polttoaineenkulutukseen kannattaisi mitata pienimuotoisella kokeella. Perävälityksen muutoksella saatu polttoaineenkulutuksen säästö olisi helppo toteuttaa, jos suorituskyvyn aleneminen ei aiheuta ongelmia. Ajoneuvon suorituskyky laskee harvemmalla perävälityksellä. Harvempi perävälitys pienentää ajoneuvon käyttövoimareserviä, joka voi olla ongelma esimerkiksi jyrkissä mäkilähdöissä ja pitkissä mäissä maantiellä. Pienemmällä käyttövoimareservillä varustetun ajoneuvon vaihteiden vaihto tarve lisääntyy, mikä saattaa tehdä ajamisesta epänautinnollista.

Vierintävastuskertoimen arvot perustuivat opinnäytetyössä kahteen eri tutkimukseen. Opinnäytetyössä tutkimuksista löydettyjä vierintävastuskertoimen arvoja muutettiin 10 prosentilla suuremmaksi ja pienemmäksi. Vierintävastuskertoimen 10 prosentin muutos sai aikaan melkein kahden prosentin polttoaineenkulutuksen säästön tai nousun. 10 prosentin muutos vierintävastuskertoimeen on hyvin marginaalinen verrattaessa vierintä-

vastusluokkajaotteluun, mikä vierintävastuskertoimille on annettu. Suhteellisista tuloksista huomattiin, että vierintävastuskertoimen merkitys korostuu, mitä suurempi ajoneuvon kokonaismassa on. Jatkoa ajatellen vierintävastuskertoimien saanti komponenttitoimittajalta olisi tärkeää, sillä se poistaisi yhden epävarmuustekijän. Vierintävastuskertoimen arvojen kokeellista mittausta kannattaisi harkita, jos niitä ei saada komponenttitoimittajilta.

Opinnäytetyössä luotiin polttoaineenkulutuskartat käyttäen pohjatietoina ajoneuvon moottorinohjainlaitteesta saatuja tietoja. Moottoriohjainlaitetietojen perusteella laskettuja polttoaineenkulutuskarttoja varten kehitettiin laskenta työkalu, jolla voidaan laskea polttoainekulutuskartta sellaiseen muotoon, mitä simulointiohjelma käsittelee. Laskennassa syntynyttä virhettä tarkasteltiin luomalla kaksi polttoainekulutuskarttaa. Polttoainekulutuskartat luotiin laskennassa käytettyjen funktioiden virheen minimi ja maksimi arvoille. Minimipolttoainekulutuskartan suhteellinen ero peruspolttoainekulutuskarttaan oli –1,9 prosenttia. Maksimipolttoainekulutuskartan suhteellinen ero peruskulutuskarttaan oli 2,1 prosenttia. Maksimipolttoainekulutuskartalla simuloidut polttoaineenkulutusarvot, olivat reilun prosentin suurempia verrattuna perusajoneuvoon. Minimipolttoaineenkulutuskartan simuloidut arvot poikkesivat vain alle prosentin perusajoneuvon arvoista. Maksimipolttoaineenkulutuskartan suurempi ero syntyi kartan rakenteesta. Maksimipolttoaineenkulutuskartan virhe on suurempi moottorin toiminta-alueella kuin minimipolttoainekulutuskartassa. Jatkon kannalta olisi järkevää pyytää komponenttitoimittajalta valmiiksi VECTO:on määriteltyjä moottoritietoja. Laskettujen polttoainekulutuskarttojen paikkaansa pitävyys voitaisiin mitata ajoneuvosta. Mittauksella voitaisiin varmistua, että moottoriohjainlaitteen tiedot ovat riittäviä määriteltäessä polttoaineenkulutuskarttoja.

Lähteet

1 Liikenteen turvallisuusvirasto. 2018. TRAFI/437519/03.04.03.00/2017 Autojen ja niiden perävaunujen tekniset vaatimukset. Helsinki: liikenteen turvallisuusvirasto.

2 Komission asetus (EU) 2017/2400.

3 Komission asetus (EU) 2019/318.

4 Komission asetus (EU) 2018/956.

5 Luz, Raphael; Rexeis, Martin; Hausberger, Stefan; Jajcevic, Dalibor; Lang Wolfgang; Schulte, Leif-Erik; Hammer, Jan; Lessmann Lutz; van Pim, Mensch; Verbeek, Ruud & Steven, Heinz. 2014. Development and validation of a methodology for monitoring and certification of greenhouse gas emissions from heavy duty vehicles through vehicle simulation. Final report. Verkkodokumentti. European Commission DG Clima. <https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/transport/vehicles/heavy/docs/final_report_co2_hdv_en.pdf>. Luettu 13.3.2019.

6 Graz University of Technology. 2019. VECTO User Manual. Graz.

7 Robert Bosch GmbH. 2014. Automotive handbook 9th edition. Karlsruhe: Robert Bosch GmbH.

8 Oikarinen Pasi. 2016. Auton dynamiikka A. Opintodokumentti. Metropolia ammattikorkeakoulu.

9 Milliken, William F. & Milliken Douglas L. 1995. Race car vehicle dynamics. Warrendale: Society of Automotive Engineers.

10 Graz University of Technology. 2018. VECTO Engine User Manual. Graz.

11 Graz University of Technology. 2018. VECTO Air Drag User Manual. Graz.

12 Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EY) 1222/2009.

13 Report from the Expert Group on laboratory alignment for the measurement of tyre rolling resistance installed under Regulation (EC) No 1222/2009 and listed on the Comission registery of Expert Groups to European Commission. 2017.

Verkkodokumentti. European Commission. <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/report_from_egla_expert_group_2017.pdf>. Luettu 9.4.2019.

14 Method of Deceleration Measuring and Data Processing for Tyre Rolling Resistance Determination. 2015. Verkkodokumentti. UTAC Ceram. <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2015/wp29grb/GRB-61-09e.pdf>. Luettu 9.4.2019.

Polttoaineenkulutuksen tulokset

Polttoaineenkulutus [l/100km]		Rakentaminen-ajosykli pieni lasti (2 600 kg)	Rakentaminen-ajosykli suuri lasti (12 900 kg)
	Perusajoneuvo	36,0	44,5
Perävälitys	3,79	34,9	43,5
	4,09	35,3	43,8
	4,29	35,5	44,1
	5,56	37,8	46,3
Virtaus-poikki-pinta-ala	Lepo-ohjaamo	36,0	44,5
	Tilaohjaamo	36,0	44,5
Polttoai-nekartan virhe	MIN	35,8	44,4
	MAX	36,6	45,0
Vierintä-vastus-kerroin	-10 %	35,4	43,8
	+10 %	36,6	45,3

Polttoaineenkulutuksen suhteelliset erot perusajoneuvoon

Polttoaineenkulutuksen suhteelliset erot perusajo-neuvoon [%]		Rakentaminen-ajo-sykli pieni lasti	Rakentaminen-ajo-sykli suuri lasti
Perusajoneuvo [l/100km]		36,0	44,5
Perävälitys	3,79	-3,1 %	-2,2 %
	4,09	-1,9 %	-1,6 %
	4,29	-1,4 %	-0,9 %
	5,56	5,0 %	4,0 %
Virtaus-poikki-pinta-ala	Lepo-ohjaamo	0,0 %	0,0 %
	Tilaohjaamo	0,0 %	0,0 %
Polttoai-nekartan virhe	MIN	-0,6 %	-0,2 %
	MAX	1,7 %	1,1 %
Vierintä-vastus-kerroin	-10 %	-1,7 %	-1,6 %
	+10 %	1,7 %	1,8 %

Hiilidioksidipäästöjen tulokset

Hiilidioksidipäästöt [g/km]		Rakentaminen-ajosykli pieni lasti	Rakentaminen-ajosykli suuri lasti
	Perusajoneuvo	942,7	1 164,3
Perävälitys	3,79	912,9	1 138,0
	4,09	924,8	1 144,9
	4,29	930,0	1 153,5
	5,56	989,6	1 212,0
Virtaus-poikki-pinta-ala	Lepo-ohjaamo	942,7	1 164,3
	Tilaohjaamo	942,7	1 164,3
Polttoai-nekartan virhe	MIN	937,3	1 162,0
	MAX	956,5	1 178,1
Vierintä-vastus-kerroin	-10 %	927,0	1 145,1
	+10 %	956,7	1 185,0

Hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perusajoneuvoon

Hiilidioksidipäästöjen suhteelliset erot perus-ajoneuvoon [%]		Rakentaminen-ajo-sykli pieni lasti	Rakentaminen-ajo-sykli suuri lasti
Perusajoneuvo [g/km]		942,7	1 164,3
Perävälitys	3,79	-3,2 %	-2,3 %
	4,09	-1,9 %	-1,7 %
	4,29	-1,3 %	-0,9 %
	5,56	5,0 %	4,1 %
Virtaus-poikki-pinta-ala	Lepo-ohjaamo	0,0 %	0,0 %
	Tilaohjaamo	0,0 %	0,0 %
Polttoai-nekartan virhe	MIN	-0,6 %	-0,2 %
	MAX	1,5 %	1,2 %
Vierintä-vastus-kerroin	-10 %	-1,7 %	-1,6 %
	+10 %	1,5 %	1,8 %