

Markku Ikonen

SIMULOINTIMENETELMÄ

POLTTOAINEENKULUTUKSEN MÄÄRITTÄMISEKSI

SEKÄ

AJOTAVAN VAIKUTUS KULUTUKSEEN

10.02.2019

TIIVISTELMÄ

Ajoneuvojen kuluttamien fossiilisten polttoaineiden määrä sanelee suoraan tärkeimmän ihmisen tuottaman kasvihuonekaasun, hiilidioksidin (CO₂), päästömäärän. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää polttoaineenkulutuksen osatekijät, ajotavan vaikutus kulutukseen, kulutuksen vähentämiskeinot sekä vähennyspotentiaali.

Tutkimuksessa laadittiin auton liikedynamiikkaan perustuva laskentasimulaatio. Se määrittää vetopyöriltä tarvittavan energian erilaisilla ajoneuvoilla erilaisissa ajotehtävissä. Vetopyöräenergiasta laskettiin polttoaineenkulutus. Simulaatiota sovellettiin VW Golf 1,6 FSI:hin. Ajossuoritteina käytettiin EU-tyyppihyväksyntäajosykliä (NEDC) sekä muita ajojaksotuksia. Taloudellisen ajotavan koulutuksen vaikutusta tutkittiin noin 200 kuljettajan koeryhmällä. Kokeessa kukin kuljettaja ajoi kaupunkiajolenkin omalla ajotavallaan ja sen jälkeen uudelleen, kun oli saanut taloudellisen ajon opastuksen.

Simulointitulokset antavat selvät suuntaviivat taloudellisen ajon koulutuksen suuntaamiseen: ennakoimalla aikaansaatava hidastusten ja uudelleen kiihdyttämisten välttäminen osoittautui oivaksi säästökeinoksi. Taloudellisen ajon koulutuksen havaittiin vähentävän henkilöauton kulutusta kaupunkiajossa 21 % ja sekalaisessa ajossa 15 %. Vähennyksen perusteella laskettu vuosittainen koko ajoneuvoliikenteen säästö- ja CO₂-vähennyspotentiaali Suomessa osoittautui huomattavaksi: 58 000–116 000 tonnia polttoainetta, 105–210 miljoonaa euroa kustannuksia ja 182 000–364 000 tonnia hiilidioksidia.

ABSTRACT

The amount of fossil fuels used in vehicles determines directly the emissions of carbon dioxide (CO₂), the most important human-generated greenhouse gas. The objective of the research was to determine the factors affecting fuel consumption, the influence of driving style on consumption, and the means and potential of decreasing fuel consumption.

In this study, a driving dynamics based calculation simulation was created. The simulation determines the energy needed from the driving wheels of different vehicle types and with different duty-cycles. Based on the driving wheel energy, fuel consumption was calculated. The simulation was applied to VW Golf 1,6 FSI. As duty-cycles, the European type-approval cycle (NEDC) and others were utilized. The influence of economical driving training was investigated with a group of about 200 test drivers. In the test, each driver drove a city route using his/her own driving style. Thereafter, the driver was given training before driving the same route again.

The simulation results give guidelines as to how to orientate eco-driving training. Avoiding slowdowns and re-acceleration by anticipating oncoming traffic situations turned out to be a beneficial way to save fuel. Eco-driving training was discovered to give 21 % fuel savings in urban driving and 15 % in mixed driving for passenger cars. Based on this reduction, the total annual road transportation fuel savings and CO₂ reduction potential in Finland was found to be notable: 58 000–116 000 tons of fuel, 105–210 million euros of funds and 182 000–364 000 tons of carbon dioxide.

SISÄLLYSLUETTELO	sivu
SISÄLLYSLUETTELO	5
SYMBOLIT JA LYHENTEET	11
1 JOHDANTO	13
2 POLTTOAINEENKULUTUS	17
2.1 Ajokoulutuksen vaikutus kulutukseen	17
2.2 Kulutuksen simulointi	20
3 MENETELMÄT	25
3.1 Matemaattinen malli	25
3.1.1 Ilmanvastus	25
3.1.2 Vierintävästus	26
3.1.3 Nousuvastus	26
3.1.4 Kiihdytysvastus	27
3.1.5 Vetopyöräteho ja-energia	27
3.1.6 Akseliteho	28
3.2 Moottorin ominaiskulutus	28
3.3 Simulaatio	31
3.3.1 Syötteet	31
3.3.2 Laskenta	32
3.4 Simulaation validointi	33
3.4.1 Alustadynamometrimittaukset VTT:llä	33
3.4.2 Advisor-simuloinnit	35
3.4.3 Race Technology Analysis -tietokoneohjelma	35
3.5 Simulaation soveltaminen	38
3.5.1 EU-testisykli	38
3.5.2 Eri kiihdytystavat	38
3.5.3 Välipysähdykset	41
3.6 Taloudellisen ajon koulutuksen vaikutus	44
3.7 Taloudellisen ajon hyötypotentiaali	44

4	TULOKSET	47
4.1	Simulaation validointi	47
4.1.1	Vertailu alustadynamometrituloksiin	47
4.1.2	Vertailu Advisor-tuloksiin	48
4.1.3	Vertailu Race Technology Analysis -ohjelmaan	52
4.2	EU-testisykli	54
4.2.1	Voimalinjan hyötysuhde	54
4.2.2	Ajovastusten jakauma	56
4.2.3	Lisämässän kulutuslisä	61
4.3	Eri kiihdytysnopeudet tasamaalla	61
4.3.1	Täyskaasukiihdytys	62
4.3.2	Kohtalainen kiihdytys	65
4.3.3	Kiihdytysnopeuksien vertailu	68
4.3.4	Vakionopeusjaksojen mukaanotto	69
4.4	Eri kiihdytystavat ylämäessä	71
4.4.1	Yhtämittainen kiihdytys	71
4.4.2	Viivästetty kiihdytys	74
4.4.3	Kiihdytysjaksotusten vertailu	76
4.5	Välipysähdykset	80
4.6	Taloudellisen ajon koulutus	82
4.7	Taloudellisen ajon hyötypotentiaali	84
4.7.1	Bensiinihenkilöauto	84
4.7.2	Dieselhenkilöauto	86
4.7.3	Valtakunnallinen kokonaishyöty	87
5	POHDINTA	89
5.1	Simulaation validointi	89
5.2	Simulointitulokset	90
5.3	Taloudellisen ajon koulutus	92
5.4	Taloudellisen ajon hyötypotentiaali	93
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	94
7	YHTEENVETO	98

LÄHDELUETTELO 100

LIITTEET

- Liite 1. Koehenkilöille mitatut polttoaineenkulutustulokset ennen ja jälkeen taloudellisen ajon koulutuksen (n = 198)

KUVAT

- Kuva 1. Taloudellisuusajokoulutuksessa käytetty ajoreitti (Ikonen 1984). 18
- Kuva 2. Auton massan ja ilmanvastuksen muutoksen vaikutus polttoaineenkulutukseen EU-syklissä (Fontaras ym. 2007). 23
- Kuva 3. VW Golfin 1,6 FSI -moottorin ominaiskulutus-käyrästä (ATZ/MTZ 2003: 52). 29
- Kuva 4. VW Golfin 2,0 TDI -moottorin ominaiskulutus-käyrästä (ATZ/MTZ 2003: 64). 30
- Kuva 5. Virallinen EU-tyyppihyväksyntäajosykli (NEDC) (Ikonen 2013, 193). 34
- Kuva 6. Ajovastusmittauksissa käytetty 2-akselinen 12,5-metrinen Scania-bussi (kuva: Markku Ikonen). 36
- Kuva 7. Painolastivesisäiliöiden sijoitus bussin käytävällä. 37
- Kuva 8. Yhtämittaisen kiihdytyksen ajonopeus ja korkeusasema ajan funktiona. 40
- Kuva 9. Viivästetyn kiihdytyksen ajonopeus ja korkeusasema ajan funktiona. 41
- Kuva 10. Ajonopeus- ja ajomatkaprofiili perustapauksessa, ajomatka 6 055 m. 42
- Kuva 11. Ajonopeus- ja ajomatkaprofiili vertailutapauksessa, ajomatka 6 055 m. 43
- Kuva 12. Race Technology -laitteiston mittaama Turun bussireitin nro 1 aika-nopeuskäyrä. 52
- Kuva 13. VW Golfin (sukupolvi V) hyötysuhteet kolmella eri moottorilla EU-syklissä. 55
- Kuva 14. VW Golfin vetopyöräenergian kertyminen simuloitussa EU-syklissä. 58

Kuva 15.	VW Golfin vetopyöräenergian jakautuminen EU-syklin kaupunki- osuudessa.	59
Kuva 16.	VW Golfin vetopyöräenergian jakautuminen EU-syklin maantie- osuudessa.	60
Kuva 17.	VW Golfin vetopyöräenergian jakautuminen koko EU-testi- syklissä.	60
Kuva 18.	Ajonopeus sekä sekuntikohtaiset vetopyöräenergiat VW Golfilla kiihdytettäessä 0–100 km/h 10 sekunnissa.	62
Kuva 19.	VW Golf 1,6 FSI:n vaihdeporrastukset ja pyörintänopeudet täyskaasukiihdytyksessä.	64
Kuva 20.	Ajonopeus sekä sekuntikohtaiset vetopyöräenergiat VW Golfilla kiihdytettäessä 0–100 km/h 20 sekunnissa.	66
Kuva 21.	Ajonopeus sekä kumulatiiviset vetopyöräenergiat VW Golfilla kiihdytettäessä 0–100 km/h 10:ssä ja 20 sekunnissa.	69
Kuva 22.	Kumulatiiviset vetopyöräenergiat ajomatkan funktiona VW Golfin yhtämittaisessa kiihdytyksessä 0–100 km/h 20 s:ssa 5 %:n ylämäkeen. Kiihdytysmatka 377 m, jonka jälkeen matka jatkuu tasamaalla. Tarkastelu 1000 metriin saakka.	73
Kuva 23.	Kumulatiiviset vetopyöräenergiat ajomatkan funktiona VW Golfin viivästetyssä kiihdytyksessä. Kiihdytys ensin 0–50 km/h 5 %:n ylämäkeen, nousua kiihdytyksen aikana 3,2 m. Ylämäen loppunousu vakionopeudella, ylämäen kokonaispituus 377 m. Kiihdytys 50–100 km/h vasta mäen päällä tasamaalla. Tarkastelu 1000 metriin saakka.	75
Kuva 24.	Ajo-oppilaiden saavuttamat suhteelliset kulutussäästöt.	83
Kuva 25.	Yhteenveto ajo-oppilaiden polttoaineenkulutustuloksista.	84

TAULUKOT

Taulukko 1.	Taloudellisen ajon koulutuksen vaikutukset polttoaineen- kulutukseen viidellä koehenkilöllä (Ikonen 1984).	20
Taulukko 2.	Fontaras & Samaras (2009) -tutkimuksen tulosten yhteenveto.	21
Taulukko 3.	Kuuden koeauton Advisor 2002:lla simuloitut kulutustulokset (l/100 km) virallisiin EU-kulutuksiin verrattuna (Fontaras ym. 2007).	22

Taulukko 4.	Drives'in verifiointi VTT:n alustadynamometrituloksiin verraten.	47
Taulukko 5.	Auton keventämisen vaikutus kulutukseen ja CO ₂ -päästöön EU-tyyppihyväksyntätestissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).	48
Taulukko 6.	Ilmanvastuksen vähentämisen vaikutus kulutukseen ja CO ₂ -päästöön EU-tyyppihyväksyntätestissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).	49
Taulukko 7.	Vierintävastuksen vähentämisen vaikutus kulutukseen ja CO ₂ -päästöön EU-tyyppihyväksyntätestissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).	50
Taulukko 8.	Massan sekä ilman- ja vierintävastuksen vähentämisen sekä 7,5 %:n hyötysuhdeparannuksen yhteisvaikutus kulutukseen ja CO ₂ -päästöön EU-tyyppihyväksyntätestissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).	51
Taulukko 9.	Yhteenveto vertailutuloksimuksen ja Drives-tulosten kulutus- ja CO ₂ -vähenemästä NEDC-testissä toisiinsa verrattuna.	51
Taulukko 10.	Kolmen tarkastelutapauksen vetopyöräenergia Race Technology -laitteiston laskennalla sekä Drives'illä määritettynä.	53
Taulukko 11.	Virallisen EU-testisyklin alku Drives-simulaatiossa VW Golfilla.	56
Taulukko 12.	Lisäkuorman 50–400 kg aiheuttamat kulutuslisät NEDC-testissä.	61
Taulukko 13.	VW Golfin energiakertymien laskenta täyskaasukiihdytyksessä tasamaalla.	63
Taulukko 14.	VW Golfin energiakertymien laskenta kohtalaisessa kiihdytyksessä tasamaalla.	67
Taulukko 15.	VW Golfin energiantarve sekä polttoaineenkulutus kiihdytettäessä tasamaalla 0–100 km/h 10 ja 20 sekunnissa sekä jatkettaessa ajoa vakionopeudella 1000 ja 10 000 metriin saakka. Vertailukohtana vakionopeus.	70
Taulukko 16.	VW Golfin energiakertymät 20 sekunnin yhtämittaisessa kiihdytyksessä 5 %:n ylämäessä.	72
Taulukko 17.	VW Golfin energiakertymät 20 sekunnin viivästetyssä kiihdytyksessä 5 %:n ylämäessä.	74
Taulukko 18.	Yhteenveto tuloksista kiihdytettäessä 5 %:n ylämäessä.	77
Taulukko 19.	Pelkkien välipysähdysten sekä välipysähdysten + 45 s joutokäynnin vaikutus kulutukseen ja kulutuseroihin kolmella syötönkatkaisuvaihtoehdolla.	82

Taulukko 20.	Taloudellisen ajotavan taloudellinen hyöty ja CO ₂ -vähenemä yksittäiselle bensiinihenkilöautolle sekalaisessa ajossa.	85
Taulukko 21.	Taloudellisen ajotavan taloudellinen hyöty ja CO ₂ -vähenemä yksittäiselle dieselhenkilöautolle sekalaisessa ajossa.	86
Taulukko 22.	Taloudellisella ajotavalla aikaansaattava polttoaineen, kustannusten ja CO ₂ -päästöjen valtakunnallinen vähennyspotentiali.	88

KAAVAT

(1)	$F_i = \frac{1}{2} \rho A C_D v^2$	25
(2)	$F_v = f_r m g$	26
(3)	$F_n = m g \sin \alpha$	26
(4)	$\alpha = \arctan \left(\frac{x}{100} \right)$	27
(5)	$E = \frac{1}{2} m (v^2 - v_0^2)$	27
(6)	$P_{vp} = F_{tot} v$	27
(7)	$E_{vp} = P_{vp} t$	28
(8)	$P_e = \frac{V_i p_e n}{j}$	28
(9)	$P_e = \frac{P_{vp}}{\eta_{vs}}$	28
(10)	$\eta_e = \frac{1}{b h_n}$	29
(11)	$F_{tot}(v) = F_{0v} + F_{1v} + F_{2v^2}$	34

SYMBOLIT JA LYHENTEET

A	poikkipinta-ala
C_d	ilmanvastuskerroin
E	liike-energia
E_{vp}	vetopyöräenergia
F_i	ilmanvastusvoima
F_n	nousuvastusvoima
F_v	vierintävastusvoima
F_{tot}	kokonaisvetovoima
f_r	vierintävastuskerroin
g	gravitaatiokiihtyvyys
j	toimintatapakerroin ($j = 2$ nelitahtiselle, $j = 1$ kaksitahtiselle)
M	ilman moolimassa (0,028966 kg/mol)
m	massa
n	pyörintänopeus
P_e	akseliteho
P_i	ilmanvastusteho
P_n	nousuvastusteho
P_v	vierintävastusteho
P_{vp}	vetopyöräteho
p	paine
p_e	tehollinen keskipaine
R	yleinen kaasuvakio (8,31446 J / (mol K))
T	absoluuttinen lämpötila
V_i	iskutilavuus
v	nopeus
α	kulma

η_{vs}	voimansiirron hyötysuhde
ρ	tiheys
CO	hiilimonoksidi
CO ₂	hiilidioksidi
ESC	European Steady Cycle, raskaiden moottorien testaussykli vakiokuormituksilla
EUDC	Extra Urban Drive Cycle, virallisen mittaussyklin (NEDC) maantieosuus
H ₂ O	vesi
HC	hiilivedyt
NEDC	New European Driving Cycle, virallinen kulutuksen ja päästöjen mittaussykli Euroopan Unionissa elokuun loppuun 2017/2018 saakka
NO _x	typen oksidit
UDC	Urban Drive Cycle, virallisen mittaussyklin (NEDC) alun kaupunkiosuus

1 JOHDANTO

Ajoneuvoliikenteen osuus ihmisen tuottamasta hiilidioksidista maailmassa on 23 % (IEA 2011, 9). Suomessa vastaava osuus on 18 % (Tilastokeskus 2012, 11). Liikenteen CO₂-päästöjen vähentäminen on olennaista ilmastonmuutoksen torjunnassa, koska liikenne on suurin CO₂-päästölähde sähkön ja lämmön tuotannon jälkeen. Lisäksi liikenteen CO₂, vastoin monia muita päästölähteitä, kasvaa jatkuvasti (IEA 2011, 122).

Hiilivety polttoaineen täydellisessä palamisessa hiili hapettuu hiilidioksidiksi ja vety vedeksi. Hiilidioksidia ei voida kohtuullisin kustannuksin poistaa auton pakokaasuista. Täten ainoaksi keinoksi ajoneuvoliikenteen CO₂-päästöjen hillinnässä jää fossiilisen hiilen polttamisen vähentäminen. Tämä edellyttää mm. energiatehokkuuden lisäämistä sekä siirtymistä uusiutuviin polttoaineisiin.

Polttamista voidaan vähentää alentamalla polttoaineenkulutusta ajettavaa matkaa kohti sekä vähentämällä ajosuoritetta. Polttoaineen kulutukseen vaikuttavat ajoneuvon lisäksi kuljettajan toiminta sekä ajotehtävä ja -olosuhteet. Ajosuoritteeseen taas voidaan vaikuttaa esim. logistiikkaa kehittämällä ja autojen käyttötottumuksia muuttamalla.

Kun polttoaineenkulutus pienenee, saavutetaan hiilidioksidipäästöjen vähenemisen lisäksi taloudellista hyötyä. Sekä ajoneuvojen käyttäjät että tuontiöljystä riippuvaiset yhteiskunnat hyötyvät.

Kulutuksen vähentämiseen kannustaa lisäksi epävarmuus öljyn riittävydestä. Ennusteet öljyn loppumisen ajankohdasta vaihtelevat, koska sekä kysyntään että tarjontaan vaikuttavia muuttujia on paljon. Ilmastonmuutoksen kannalta olisi järkevää lopettaa öljyn ja hiilen polttaminen mahdollisimman nopeasti, vaikka niitä riittäisikin vuosikymmeniksi.

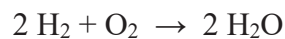
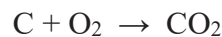
Öljystä riippumattomien energialähteiden kehittäminen ja käyttöönotto vaatii kuitenkin aikansa. Fossiiliseen öljyyn perustuvat polttoaineet lienevät siis maantieliikenteessä vallitsevia vielä ainakin muutaman vuosikymmenen ajan (OPEC 2014).

Polttoaineiden käytön vähentämiseen voidaan kannustaa mm. verotuksen avulla, kuten Suomessa on tehty vuodesta 2008 alkaen. Sekä auto- että ajoneuvoveron perusteena on CO₂, jonka määrään vaikuttaa vain ajoneuvon kulutus.

Henkilöautomainonnassa on oltava esillä virallinen kaupunki-, maantie- sekä yhdistetty polttoaineenkulutuslukema. Samoin yhdistettyä kulutuslukemaa vastaava – verotuksen perusteena oleva – CO₂-päästöarvo on ilmoitettava. Toisinaan unohdetaan, että todellinen CO₂-päästö riippuu kullakin ajomatalla kulutuksesta ja on yleensä virallista normiarvoa suurempi. Normiarvo on ihanteellisissa ajo-olosuhteissa aikaansaatu minimiarvo.

Todelliseen kulutukseen vaikuttavat runsaasti ajotapa ja ajo-olosuhteet sekä auton ilmastoinnin ja sähkölaitteiden käyttö. Kuitenkin virallisten normikulutusten saavuttaminen, tai ainakin lähelle niitä pääseminen, on mahdollista, kun ajo-olosuhteet ovat optimaaliset ja kuljettaja osaa asiansa.

Hiilivety-polttoaineen palaessa tapahtuvat seuraavat kemialliset reaktiot, jos polttoaine palaa optimaalisesti:



Hiilidioksidin molekyyli­massan ja hiilen atomimassan välisestä suhteesta seuraa, että hiiligrammasta syntyy 3,67 g CO₂:ta. Tyypillisessä liikennepolttoaineessa hiilen massaosuus on noin 86 %, joten grammasta polttoainetta syntyy 3,15 g hiilidioksidia. Kun otetaan huomioon tyypilliset bensiinin ja dieselin tiheydet 745 kg/m³ ja 840 kg/m³ (MIT 2007), saadaan selville syntyvän CO₂:n ja polttoaineen tilavuuden välinen yhteys. Bensiinistä syntyy CO₂:ta noin 2350 g/l ja dieselpolttoaineesta suunnilleen 2650 g/l.

Ajoneuvon liikuttamisessa polttoaineen kemiallinen energia muunnetaan moottorissa mekaaniseksi energiaksi, joka puolestaan muunnetaan voimansiirron ja pyörien avulla ajoneuvon liike-energiaksi.

Energiamuunnoksissa syntyy aina häviöitä. Ajoneuvoissa suurimmat häviöt syntyvät moottorissa. Ajoneuvodieselmoottorin hyötysuhde jää sekalaisessa käytössä hyvissäkin olosuhteissa yleensä 25–27 %:n vaiheille. Ottomoottorin hyötysuhde on tätäkin pienempi, tyypillisesti vain 20–23 % (US DOE 2016). Voimansiirron hyötysuhde on selvästi moottoria parempi, luokkaa 90 %.

Moottorin hyötysuhde vaihtelee kuormituksen ja pyörintänopeuden mukaan. Kuljettajan kannattaa siis mahdollisuuksien mukaan käyttää niitä kuormituksia ja pyörintänopeuksia, joilla hyötysuhde on korkeimmillaan. Yleensä moottori toimii parhaalla hyötysuhteella, kun pyörintänopeus on pieni ja kuorma suuri.

Kuljettajan mahdollisuuksia maksimoida moottorin hyötysuhde käytännön ajossa rajoittavat tiedon puute sekä moottorien ylitehoisuus. Suuri osa kuljettajista ei tiedä moottorin toimivan taloudellisimmillaan melko runsaasti kuormitettaessa. Moottorien ylitehoisuus puolestaan aiheuttaa sen, että hyötysuhteen kannalta optimaalisia kohtalaisen korkeita kuormitusalueita voidaan käyttää vain hetkellisesti kiihdytysten aikana.

Hyötysuhteiden maksimoinnin lisäksi merkittävä tekijä ajoneuvon energiankulutuksen vähentämisessä on ajovastusten vähentäminen. Tämä tarkoittaa auton liikuttamiseen tarvittavan tehon minimointia, johon päästään keventämällä autoa sekä vähentämällä ilman- ja vierintävastusta.

Käsillä oleva tutkimus kartoittaa polttoaineenkulutukseen vaikuttavia tekijöitä sekä niiden määräsuhteita. Polttoaineenkulutus riippuu seuraavista kolmesta osatekijästä: ajoneuvosta, kuljettajasta ja olosuhteista. Tutkimuksessa paneudutaan kaikkien näiden vaikutuksiin.

Erityishuomio kulutustarkasteluissa kohdistettiin kuljettajan toimintaan sekä taloudellisen ajotavan koulutuksen vaikuttavuuteen ja potentiaaliin. Taloudellinen ajotapa ei maksa mitään, eikä se välttämättä pidennä matkaan kuluvaan aikaan. Taloudellinen ajotapa vähentää kuitenkin kustannuksia, hiilidioksidipäästöjä ja usein myös ajamisen stressaavuutta sekä onnettomuusalttiutta.

Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää taloudellisen ajon hyötypotentiaali Suomessa. Tämä päätavoite jaettiin viiteen seuraavaan osatavoitteeseen:

1. Laskentasiimulaation laatiminen

Laaditaan ajoneuvon liikedynamiikkaan perustuva laskentasiimulaatio, jolla voidaan määrittää ajoneuvon vetopyöriltä tarvittava energia erilaisissa ajotehtävissä. Vetopyörä-energian pohjalta lasketaan erilaisiin ajotehtäviin tarvittava polttoainemäärä ottamalla huomioon moottorin ja voimansiirron hyötysuhteet sekä apulaite-energia.

2. Simulointimenetelmän validointi ja tulosten verifiointi

Siimulaatiolla laskettuja energiantarve- ja polttoaineenkulutustuloksia verrataan muiden tutkijoiden vastaavalla siimulaatiomenetelmällä aikaansaamiin tuloksiin. Tulokset verifioidaan vertaamalla niitä myös alustadynamometrimittauksiin sekä kaupallisen mittalaitteen laskennan antamiin tuloksiin.

3. Laskentasiimulaation soveltaminen

Laskentasiimulaatiota soveltamalla määritetään ajoneuvon energiankulutukseen vaikuttavien osatekijöiden määräsuhteet erilaisissa ajotehtävissä. Eri tekijöiden merkityksen avulla selvitetään polttoaineenkulutuksen vähentämispotentiaali ja löydetään tehokaimmat vähentämiskeinot sekä niiden tarkoituksenmukainen kohdistaminen. Erityistä huomiota kiinnitetään kuljettajan vaikutusmahdollisuuksiin kulutuksen vähentämisessä.

4. Taloudellisen ajon koulutusvaikutuksen selvittäminen

Selvitetään kokeellisesti kuljettajakoulutuksen vaikuttavuus kulutuksen ja CO₂-päästöjen vähentämisessä. Taloudellisen ajotavan koulutuksen vaikutus polttoaineenkulutukseen mitataan ja tuloksia verrataan laskentasiimulaation tuottamaan tietoon.

5. Taloudellisen ajon koulutuksen hyötypotentiaalın laskenta

Lasketaan systemaattisen, suurille kuljettajamäärille kohdistetun taloudellisen ajotavan koulutuksen avulla aikaansaataavissa oleva vuosittainen polttoaineensäästö- ja CO₂-vähennyspotentiaali Suomessa.

2 POLTTOAINEENKULUTUS

Tässä luvussa kuvataan ajoneuvon polttoaineenkulutus ajokoulutuksen sekä kulutuksen simuloinnin näkökulmista. Luvussa esitellään taloudellisen ajon koulutuksen aikaansaama polttoaineenkulutuksen väheneminen. Lisäksi tarkastelun kohteena on kulutuksen simulointi sekä ajovastus- ja hyötysuhdemuutosten kulutusvaikutus simuloimalla määritettynä. Tavoitteena on luoda teoreettinen viitekehys tutkimuksen aihealueeseen.

2.1 Ajokoulutuksen vaikutus kulutukseen

Autolehti Tuulilasi julkaisi v. 1984 taloudellisen ajon koulutusta käsitelleen artikkelin, jossa oli mukana viisi eri-ikäistä ja taustaltaan erilaista kuljettajaa (Ikonen 1984). Koeksessa koehenkilöt ajoivat saman reitin kahdesti samalla autolla.

Ensimmäinen kerta ajettiin omalla ajotavalla ja toinen kerta palautteen sekä taloudellisuusajo-ohjeistuksen jälkeen. Ennen ensimmäistä ajokertaa koehenkilöille ei kerrottu, että kysymys on kulutusmittauksesta. Heitä ainoastaan pyydettiin ajamaan normaalilla ajotavallaan.

Koe suoritettiin Helsingissä. Reitin alku- ja päätepiste olivat Herttoniemessä, josta reitti suuntautui Pasilan kautta Helsingin ydinkeskustaan. Sieltä se jatkui Mannerheimintietä pohjoiseen päätyen Vihdintietä Kehä I:lle. Kehää jatkettiin itään Malmille, josta käännyttiin takaisin Herttoniemeeseen (kuva 1).



Kuva 1. Taloudellisuusajokoulutuksessa käytetty ajoreitti (Ikonen 1984).

Reitin pituus oli 45,5 km ja kymmenen suorituskerän ajoaika keskimäärin 1 h 15 min. Keskinopeudeksi muodostui 36 km/h. Kunkin kuljettajan ensimmäinen kerta ajettiin klo 10–11 välillä ja toinen klo 13–14 välillä. Näin eliminoitiin työmatkaruuhkat sekä mahdollinen puolen päivän vaiheilla esiintyvä liikenteen lisääntyminen. Sama kellonaika peräkkäisinä päivinä olisi kenties vakioinut olosuhteita paremmin, mutta olisi ollut työläs toteuttaa.

Suurin sallittu ajonopeus reitillä oli 80 km/h. Pysähdyksiä ja kiihdytyksiä oli tiheimmin reitin alkukolmanneksella Pasilassa ja Helsingin ydinkeskustassa. Tämän osuuden jälkeen Vihdintiellä ja Kehä I:llä pystyttiin ajamaan väljemmin. Mainittavia korkeuseroja ei reittiin sisällynyt.

Koeautona oli bensiinikäyttöinen 4-ovinen porrasperäinen Nissan Sunny 1,5 GL. Auto oli viisivaihteinen. Ensimmäisen ajolenkin aikana koehenkilöitä tarkkailtaessa kiinnitettiin erityistä huomiota viidennen vaihteen käyttämiseen, koska viisivaihteinen vaihteisto ei tuohon aikaan ollut kovin yleinen.

Polttoaineenkulutus mitattiin Flowtronic-virtausmittarilla. Se mittaa lävitseen virtaavan polttoaineen 0,6 millilitran sykäyksinä. Mittarin tarkkuus riitti siis hyvin erojen esille saamiseen. Auton matkamittarin virhe oli tarkistettu, ja tämä otettiin huomioon, kun tuloksia laskettiin.

Viiden kuljettajan kulutukset vaihtelivat ensimmäisellä kerralla välillä 6,4–8,5 l/100 km. Pienimmän tuloksen ajoi kuljettajista kokenein, ammatiltaan linja-autonkuljettaja. Suurimman kulutustuloksen ajoi 23-vuotias auton asentaja.

Ohjeistuksen jälkeisellä ajolenkillä kulutukset laskivat välille 4,9–6,4 l/100 km. Absoluuttinen säästö oli 0,7–3,6 l/100 km, ja suhteellinen 10–42 %. Koko koeryhmän keskimääräiseksi kulutussäästökseksi muodostui 23 %.

Sama ajoreitti ajatettiin myös taloudellisuusajokilpailuissa menestyneellä kuljettajalla. Hän ajoi hieman paremman tuloksen (4,8 l/100 km) kuin yksikään varsinaisista koehenkilöistä edes koulutuksen jälkeen.

Yhteenveto tuloksista on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Taloudellisen ajon koulutuksen vaikutukset polttoainekulutukseen viidellä koehenkilöllä (Ikonen 1984).

Yhteenveto autolehdelle tehdystä taloudellisuuskoulutustutkimuksesta (n = 5) (noin 45 km:n lenkki Helsingin kantakaupungissa sekä lähialueilla)					
Kulj. n:o	Kuljettajan ammatti, sukupuoli ja ikä	Ennen koulut. [l/100 km]	Koulut. jälkeen [l/100 km]	Absol. ero [l/100 km]	Suht. ero [%]
1	Linja-auton kuljettaja mies, n. 35 v	6.4	5.0	-1.4	-21.9
2	Juuri ajokortin saanut nainen, 18 v.	8.0	6.3	-1.7	-21.3
3	Puutarhuri mies, n. 60 v.	6.5	5.2	-1.3	-20.0
4	Autonasentaja mies, 23 v.	8.5	4.9	-3.6	-42.4
5	Luokanopettaja nainen, n. 40 v.	7.1	6.4	-0.7	-9.9
	Tulosten keskiarvo	7.3	5.6	-1.7	-23.1
Referenssi	Taloudellisuusajokilpailija mies, n. 40 v.	4.8			

2.2 Kulutuksen simulointi

Fontaras & Samaras (2009) simuloivat ajovastusparametrien muutosten vaikutusta kulutukseen kuudella henkilöautolla. Autoista kolme oli bensiini- ja kolme dieselkäyttöistä, ja kumpaakin edusti pieni, keskikokoinen ja suuri automalli.

Lähtökohdaksi oli otettu v. 2007 Euroopassa myytyjen henkilöautojen virallinen CO₂-keskiarvo 158 g/km. Simuloimalla selvitettiin, millaisilla ja minkä suuruisilla autoihin tehtävillä muutoksilla saavutettaisiin Euroopassa myytävälle autoille vuodelle 2015 asetettu CO₂-tavoitekeskiarvo 130 g/km. Työkaluna käytettiin MATLAB/Simulink-pohjaista ohjelmaa Advanced Vehicle Simulator ("Advisor"). Käytössä oli vuoden 2002 versio.

Advisor'in avulla arvioitiin, miten ajovastusten pienentäminen sekä voimalinjan hyötysuhteen parantaminen vähentävät kulutusta ja CO₂-päästöjä virallisessa EU-testisyklissä (NEDC). Selvitetään, kuinka paljon kulutus muuttuu, kun kutakin siihen vaikuttavaa

parametria muutetaan tietty määrä suuntaan tai toiseen. Parametrien vaikutusta tutkittiin sekä yksittäin että yhdessä. Muutokset oli valittu siten, että niiden katsottiin olevan realistisia toteuttaa vuoteen 2015 mennessä. Muutosten kohteina olivat massa, ilman- ja vierintävastus, välityssuhteet, rengaskoko sekä voimalinjan hyötysuhde.

Tutkimuksessa arvioitiin, että auton massaa pystyttäisiin keventämään 10 %:lla vuoteen 2015 mennessä. Ilmanvastuksen vähentämispotentiaaliksi arvioitiin niin ikään 10 % ja vierintävastuksen 20 %. Simulaatiot tehtiin maksimissaan näillä muutosprosentteilla pienempään sekä suurempaan suuntaan. Lisäksi kaikkien kolmen tekijän yhteisvaikutus selvitettiin. Voimalinjan hyötysuhdetta arvioitiin voitavan samalla aikavälillä kasvattaa 7,5 %:lla.

Simuloinnit tehtiin myös autojen todellisilla massoilla ja ajovastuksilla. Tulosten erot ilmoitettuihin virallisiin kulutuksiin nähden olivat korkeintaan ± 4 %.

Simuloidut ajovastus- ja hyötysuhdemuutosten vaikutukset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Fontaras & Samaras (2009) -tutkimuksen tulosten yhteenveto.

Fontaras & Samaras (2009) -tutkimus Kolme bensiini- ja dieselautoa (pieni, keskikok. ja suuri) Simuloidut CO ₂ -päästömuutokset EU-tyyppihyväksyntätöissä	
Autoon tehtävä muutos	Muutoksen vaikutus CO ₂ -päästöön
Massa ± 10 %	$\pm 3...4$ %
Ilmanvastus ± 10 %	$\pm 1.5...2.5$ %
Vierintävastus ± 20 %	$\pm 2...4$ %
Edellä mainitut yhteensä vähennyksinä	-8...9 %
Voimalinjan hyötysuhdeparannus 7.5 %	n. -6 %
Vähennyksien ja hyötysuhdeparann. yhteisvaikutus	n. -13 %

Toisessakin vastaavassa tutkimuksessa (Fontaras, Kouridis, Samaras, Elst, & Gense 2007) työkaluna oli Advisor-ohjelma. Simulointi kohdistui seitsemään kevyeen tavarautoon, joiden rakenne perustui vastaaviin henkilöautomalleihin.

Tutkimuksen tekijät pitivät Advisor 2002 -simulointia relevanttina menetelmänä kulutusmuutoksen tutkimiseen. He totesivat (kirjoittajan kääntämänä), että "edellyttäen, että auton parametrit kuten massa, C_d -arvo, poikkipinta-ala ja moottorikartta ovat tiedossa, Advisor pystyy laskemaan moottorin toimintapisteet testisylin aikana ja siten selvittämään hyötysuhteen ja polttoaineenkulutuksen".

Tutkimuksessa käytettiin em. parametrien lisäksi moottorin tehotietoa, auton massaa, vierintävastuskerrointa sekä vaihteiden ja vetopyörästön välityssuhteita. Hyödyksi käytettiin myös auton hidastuvuutta vapaalla rullattaessa ilmentävää coast-down-dataa sekä kahden puolueettoman laboratorion, brittiläisen Vehicle Certification Agency'n (VCA) sekä saksalaisen Krafftahrt-Bundesamt'in (KBA), julkaisemaa tyyppihyväksyntädataa.

Havaittiin, että alustadynamometrillä tehtyjen kulutusmittausten toistot antoivat yleensä $\pm 3\%$:n sisällä olevat tulokset. Laskenta tehtiin erikseen syklin kaupunkiosuudelle (UDC), maantieosuudelle (EUDC) sekä koko syklille (NEDC) (taulukko 3).

Taulukko 3. Kuuden koeauton Advisor 2002:lla simuloidut kulutustulokset (l/100 km) virallisiin EU-kulutuksiin verrattuna (Fontaras ym. 2007).

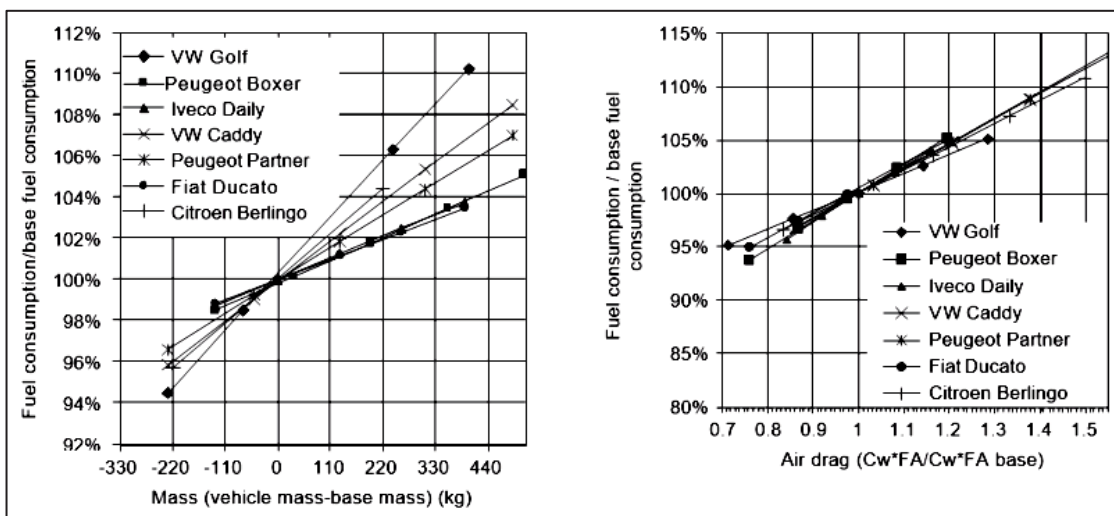
Vehicle (engine)	Test	UDC	EUDC	NEDC
Partner (PSA HDi 1997cc)	Average (2 variants)	7.35	4.95	5.80
	Simulated	7.27	5.13	5.91
	Deviation	-1.04%	3.51%	1.90%
Fiat Ducato (Iveco JTD 2800cc)	Average (2 variants)	11.50	8.35	9.55
	Simulated	12.07	8.57	9.82
	Deviation	4.75%	2.59%	2.93%
Peugeot Boxer (Iveco JTD 2800cc)	Average (2 variants)	11.50	8.35	9.55
	Advisor	12.27	7.90	9.49
	Deviation Average-Advisor	6.24%	-5.70%	-0.61%
Transporter (VW 1896cc TDi)	Variant 1 (1930 kg)	9.30	6.50	7.50
	Simulated	8.80	6.65	7.44
	Deviation	-5.61%	2.24%	-0.80%
	Variant 2 (2150 kg)	9.50	6.70	7.70
	Simulated	9.09	6.90	7.70
	Deviation	-4.51%	2.89%	-0.1%
CADDY (VW 1896cc TDi)	Average (2 variants)	7.25	4.75	5.65
	Simulated	7.58	4.50	5.61
	Deviation	4.40%	-5.6%	-0.48%
BERLINGO (PSA HDi 1997cc)	Average (2 variants)	7.25	4.95	5.75
	Advisor	6.93	5.26	5.87
	Deviation	-4.6%	5.89%	2.06%

Taulukosta 3 ilmenee, että laskentatulokset poikkesivat ilmoitetuista virallisista kuluksilukemista -5,7...-6,2 %. Hajonta oli pienin koko testisyklin (NEDC) tuloksissa.

Moottorin ominaiskulutusarvoja hyödynnettiin kahdella tarkkuudella ja tuloksia verrattiin. Epätarkemmassa vaihtoehdossa ominaiskulutustietona käytettiin mittaustuloksia vain niistä 13:sta moottorin kuormituspisteestä, joita käytetään raskaiden ajoneuvomoottorien tyyppihyväksynnässä käytettävässä vakiokuormituskokeessa (European Steady Cycle, ESC). Kuormituspisteet ovat joutokäynti sekä neljä eri kuormatasoa (25, 50, 75 ja 100 %) erikseen määritellyillä kolmella eri moottorin pyörintänopeudella (Dieselnet 2014). Moottorien tarkempia ominaiskulutustietoja hyödyntäneessä vaihtoehdossa käytettiin "täydellistä moottorikarttaa".

Havaittiin, että Advisor-simuloinnilla saavutetut kulutusarvot osuivat $\pm 4,5$ %:n vaihteluvälille alustadynamometrillä mitattuihin nähden, kun lähtötietoina käytettiin täydellistä moottorikarttadataa. Sen sijaan, kun vain 13 kuormituspisteen ominaiskulutustietoa käytettiin, laskentatulos osui yksin mittaustulosten kanssa "enimmäkseen ± 10 %:n tarkkuudella".

Kulutuksen havaittiin kasvavan tai vähenevän lineaarisesti kaikilla autoilla, kun massaa tai ilmanvastusta kasvatettiin tai vähennettiin (kuva 2).



Kuva 2. Auton massan (vas.) ja ilmanvastuksen (oik.) muutoksen vaikutus polttoaineenkulutukseen EU-syklissä (Fontaras ym. 2007).

Kuvan 2 mukaan massan väheneminen 220 kg:lla vähensi kulutusta 4 %:lla. Vastaavaan suuruinen massan lisäys kasvatti kulutusta samalla määrällä. Ilmanvastuksen muutos 20 %:lla suuntaan tai toiseen aiheutti vastaavasti 5 %:n kulutusmuutoksen.

Simuloinnin tuloksena havaittu kulutusmuutosten lineaarisuus vahvistettiin vielä tarkistusmittauksilla. Tutkimuksessa havaittiin myös, että mitä painavammasta autosta oli kyse, sitä vähemmän massan lisäys kasvatti kulutusta.

3 MENETELMÄT

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen kunkin osatavoitteen saavuttamiseksi käytetyt menetelmät. Laskentasiemulaatiossa esimerkiautomalliksi laskentaan valittiin Volkswagen Golf (viides mallisukupolvi, valmistusvuodet 2003–2008). Valintaan päädyttiin Golfin yleisyyden sekä sen edustaman yleisen autoluokan takia.

3.1 Matemaattinen malli

Ajoneuvoon kohdistuvat ajovastusvoimat koostuvat ilmanvastuksesta sekä vierintä-, kiihdytys- ja nousuvastuksesta.

3.1.1 Ilmanvastus

Ilmanvastus riippuu ilman tiheydestä, auton poikkipinta-alasta, ilmanvastuskertoimesta sekä ajoneuvon nopeudesta.

Ilmanvastusvoima F_i lasketaan kaavalla

$$F_i = \frac{1}{2} \rho A C_D v^2, \quad (1)$$

jossa

- ρ ilman tiheys
- A poikkipinta-ala
- C_D ilmanvastuskerroin
- v nopeus

Ilman tiheys vaikuttaa ilmanvastusvoimaan. Tiheys voidaan ratkaista ihannekaasun tilanyhtälöstä. Jos autolla ajetaan pääasiassa maantienopeuksia, ilmanvastuksen osuus on yli puolet kaikista vastuksista.

VW Golfin ajovastuslaskennassa käytetyt poikkipinta-ala $2,22 \text{ m}^3$ sekä ilmanvastuskerroin $0,32$ perustuvat valmistajan ilmoitukseen (ATZ/MTZ 2003: 35).

3.1.2 Vierintävastus

Vierintävastus riippuu renkaan ja tienpinnan ominaisuuksista sekä auton massasta. Vastusvoima kasvaa suoraan verrannollisena auton massaan.

Vierintävastusvoima F_v lasketaan vierintävastuskertoimen f_r , auton massan m ja gravitaatiokiihtyvyyden g avulla seuraavasti:

$$F_v = f_r mg \quad (2)$$

Henkilöauton vierintävastuskerroin f_r on päällystetyllä tiellä suuruusluokkaa $0,01$ (Sandberg & Ejsmont 2000, 7). Kerroin ei suoranaisesti riipu nopeudesta, mutta kasvaa hieman suurilla ajonopeuksilla. Lähellä nykyhenkilöautoille tyypillisiä $n. 200 \text{ km/h}$ huippunopeuksia vierintävastuskerroin on suuruusluokkaa $0,012\text{--}0,015$, kun taas pienillä ajonopeuksilla se voi olla pienempikin kuin $0,010$ (Heissing & Ersoy 2011).

Rengaspaineen suureneminen vähentää vierintävastusta. Pienin kulutus saavutetaan suositusta suuremmilla rengaspaineilla (Evans, MacIsaac Jr., Harris, Yates, Dudek, Holmes, Popio, Rice & Salaani 2009; Wiegand 2016), koska mukavuustekijät vaikuttavat suosiin renkaan kantavuus- ja ohjautuvuusvaatimusten ohella.

3.1.3 Nousuvastus

Nousuvastusvoima F_n riippuu auton massasta sekä nousukulman jyrkkyydestä. Se pysyy vakiona ajonopeudesta riippumatta. Nousuvastusvoima lasketaan massan m , gravitaatiokiihtyvyyden g ja nousukulman α perusteella kaavalla

$$F_n = mgsin\alpha \quad (3)$$

Tavallisesti maanteiden pituuskaltevuus ilmoitetaan prosentteina eikä asteina. Pituuskaltevuus lasketaan jakamalla pystysuora nousu vaakasuuntaisella matkalla. Kaltevuuskulma α kaltevuusprosentilla x lasketaan kaavalla

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x}{100}\right) \quad (4)$$

3.1.4 Kiihdytysvastus

Kiihdyttämiseen tarvittava energia E voidaan laskea ajoneuvon kineettisen energian muutoksesta kaavalla

$$E = \frac{1}{2}m(v^2 - v_0^2), \quad (5)$$

jossa

m	massa
v	loppunopeus
v_0	alkunopeus

Kun VW Golf (massa 1375 kg) kiihdytetään nopeuteen 100 km/h, nopeuden muutokseen tarvitaan energiaa suunnilleen 150 Wh (= 540 kJ).

3.1.5 Vetopyöräteho ja -energia

Tarvittava vetopyöräteho P_{vp} lasketaan kokonaisvetovoiman F_{tot} (ilman-, vierintä- ja nousuvastuksen summa) ja ajonopeuden v avulla kaavalla

$$P_{vp} = F_{tot}v \quad (6)$$

Samalla tavalla ilmanvastusteho P_i , vierintävastusteho P_v sekä nousuvastusteho P_n voidaan laskea kertomalla asianomainen vastusvoima ajonopeudella.

Vetopyöräenergia E_{vp} saadaan vetopyörätehon P_{vp} ja ajan t tulona kaavalla

$$E_{vp} = P_{vp}t \quad (7)$$

3.1.6 Akseliteho

Moottorin akseliteho P_e voidaan laskea tehollisen keskipaineen avulla kaavalla

$$P_e = \frac{V_i p_e n}{j}, \quad (8)$$

jossa

- V_i iskutilavuus
- p_e tehollinen keskipaine
- n pyörintänopeus
- j toimintataperroin, (nelitahtimoottorille $j = 2$)

Akseliteho saadaan myös vetopyörätehon P_{vp} ja voimansiirron hyötysuhteen η_{vs} avulla kaavalla

$$P_e = \frac{P_{vp}}{\eta_{vs}} \quad (9)$$

3.2 Moottorin ominaiskulutus

Polttomoottorin ominaiskulutus on pienimmillään suurilla kuormilla ja pienillä pyörintänopeuksilla. Taloudellisin kuormitus on yleensä 70–90 % rajamomentista ja pyörintänopeus useimmiten alle puolet nimellipyörintänopeudesta.

Henkilöautojen ottomoottoreiden nimellipyörintänopeus osuu tyypillisesti välille 4500–6500 1/min. Näiden ominaiskulutusminimi sijaitsee monesti välillä 2000–3000 1/min. Henkilöautojen dieselmootoreissa taas nimellipyörintänopeus on useimmiten 3500–4500 1/min. Näiden ominaiskulutusminimi sijaitsee usein alueella 1500–2500 1/min.

Pitkäsén (1982) mukaan polttomoottorin hyötysuhde voidaan laskea kaavalla

$$\eta_e = \frac{1}{bh_n}, \quad (10)$$

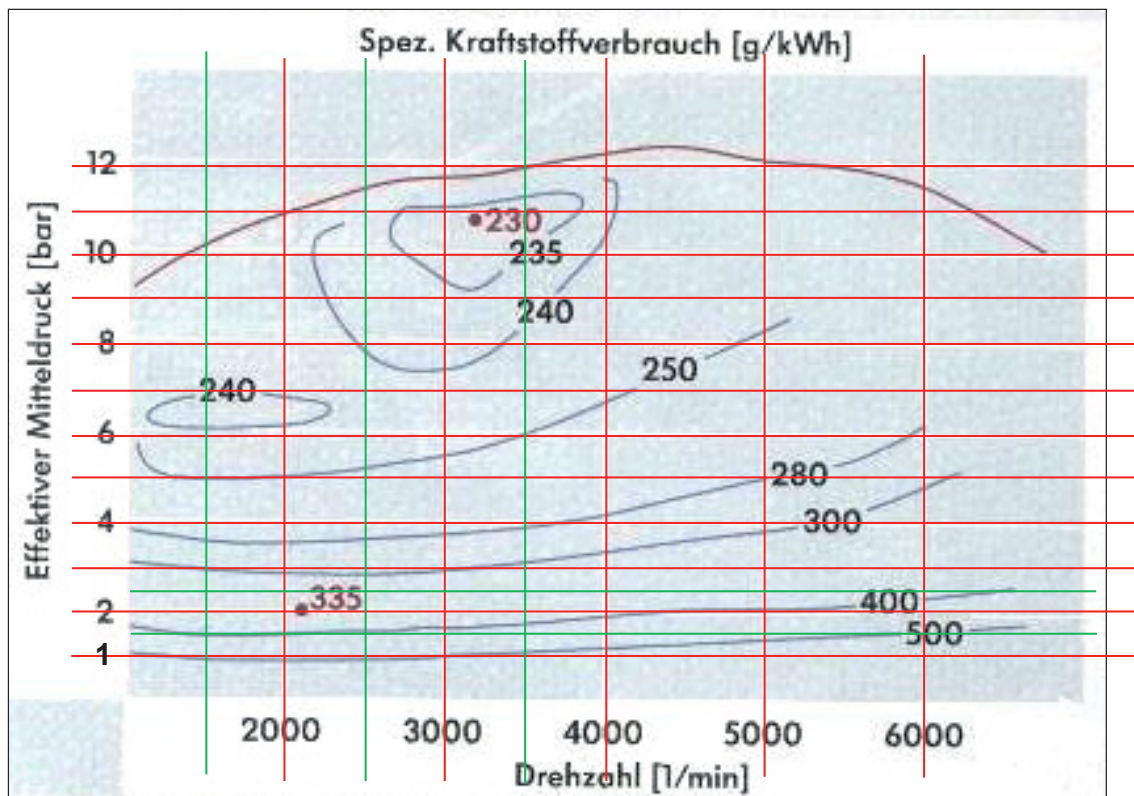
jossa

η_e hyötysuhde

b ominaiskulutus

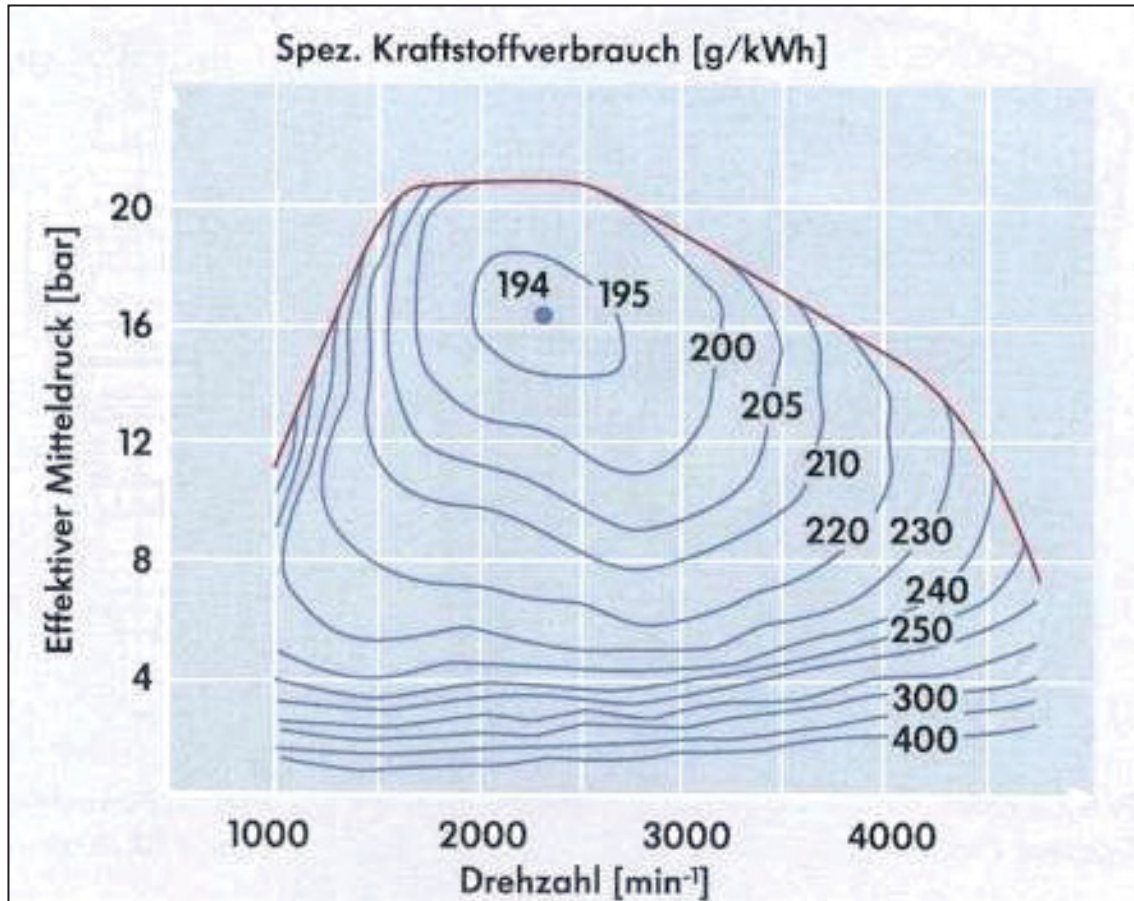
h_n on polttoaineen nettolämpöarvo

Kuvissa 3 ja 4 on esitetty VW Golfin suorasuihkutteisen 1,6 FSI -benssiini- ja turboahdetun 2,0 TDI -dieselmoottorin ominaiskulutuskäyrät. Vihreät ja punaiset ruudukot on lisätty jälkepäin helpottamaan lukuarvojen määrittämistä eri kohdissa kuvaa.



Kuva 3. VW Golfin 1,6 FSI -moottorin ominaiskulutuskäyrät (ATZ/MTZ 2003: 52).

Kuvan 3 mukaan FSI-moottorin ominaiskulutuksen minimiarvo on 230 g/kWh. Se saavutetaan hieman yli 3000 1/min pyörintänopeudella, joka on suunnilleen 55 % nimellispyörintänopeudesta (6000 1/min). Kuormitus on tällöin hieman yli 90 % maksimista.



Kuva 4. VW Golfin 2,0 TDI -moottorin ominaiskulutuskäyrästä (ATZ/MTZ 2003: 64).

Kuvasta 4 havaitaan, että VW Golfin 2,0 TDI -moottorin pienin ominaiskulutus on 194 g/kWh. Se saavutetaan n. 2300 1/min pyörintänopeudelle, joka on suunnilleen 55 % nimellispyörintänopeudesta (4000 1/min). Pienimmän ominaiskulutuksen suhteellinen kuormitus on alempi kuin FSI-moottorissa, noin 80 % maksimista.

3.3 Simulaatio

Tutkimusta varten tehtiin ohjelma Excel-tilukkolaskentaan. Ohjelma summaa kumuloi-
tuvasti sekunnin resoluutiolla vetopyöriltä tarvittavan energian. Laskennalle annettiin ni-
meksi Drives (Driving Wheel Energy Simulator). Laskenta perustuu tarkasteltavan ajo-
neuvon massaan, ilman- ja vierintävastukseen, ajonopeusprofiiliin sekä tien pituuskalte-
vuuteen. Laskennalla määritetään vetopyöriltä tarvittava energia millaiselle autolle tahan-
sa. Tutkittava ajonopeusprofiili ja tien pituuskaltevuus voidaan valita halutuiksi.
Drives'illä määritetyn vetopyöraenergian perusteella voidaan polttoainenkulutus laskea
voimalinjan hyötysuhteen ja polttoaineen energiasisällön perusteella.

Drives'illä tutkittiin eri ajovastuslajien suhdetta toisiinsa erilaisilla nopeusprofiileilla.
Lisäksi selvitettiin autoon ja ajotapahtumaan kohdistuneiden muutosten vaikutusta
vetopyöraenergiaan. Muutoksilla varioitiin auton massaa, ilman- ja vierintävastusta, ajo-
nopeutta sekä pysähdysten ja kiihdytysten määrää.

3.3.1 Syötteen

Drives tarvitsee seuraavat autoon liittyvät syötteen: massa, korin poikkipinta-ala, ilman-
vastuskerroin ja vierintävastuskerroin. Muita tarvittavia lähtötietoja ovat ilman tiheys,
gravitaatiokiihtyvyys, ajonopeuskäyrä sekä tien pituuskaltevuuskäyrä.

VW Golfin laskennassa käytetyt lähtöarvot olivat seuraavat (ATZ/MTZ 2003):

Massa	$m = 1375 \text{ kg}$
Poikkipinta-ala	$A = 2,22 \text{ m}^2$
Ilmanvastuskerroin	$C_d = 0,32$
Vierintävastuskerroin	$f_r = 0,01$
Voimansiirron hyötysuhde	$\eta_{vs} = 0,90$
Ilman tiheys	$\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3$
Gravitaatiokiihtyvyys	$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Ajonopeusprofiilissa oletetaan, että auto liikkuu eteenpäin tai on pysähtynyt. Tien kaltevuusprofiilin tulee olla moottori- ja moottoriliikenne-, valta-, kanta-, seutu- ja yhdysteillä esiintyvien kaltevuuksien rajoissa eli maksimissaan $\pm 10\%$ (Liikennevirasto 2013: 46).

Ajonopeus- ja tien kaltevuustiedot syötetään perustapauksessa sekunnin välein, koska EU-tyyppihyväksyntäsyklin aika-nopeus -lukuparit on ilmoitettu sekunneittain testausnormissa (Direktiivi 91/441/EEC: 33-39). Myöhemmässä vaiheessa sovellettiin kokeilumielessä 0,1 sekunnin resoluutiota. Tämä hidasti laskentaa, mutta tarkkuus ei ratkaisevasti parantunut. Osoittautui siis, että sekunnin välein syötetty ajonopeustieto on resoluutioltaan riittävä hetkittäisen liike-energian kerryttämisen laskemiseksi.

Jos vetopyöräenergian lisäksi lasketaan polttoaineenkulutus, syöteinä tarvitaan apulaitteiden tehontarve, polttoaineen energiasisältö sekä moottorin ja voimansiirron hyötysuhteet. Moottorin hyötysuhteena käytettiin keskimääräisen ominaiskulutuksen perusteella laskettua arvoa, ja voimansiirron hyötysuhteena kirjallisuudessa yleisesti käytettyä arvoa 0,90 (esim. Irimescu, Mihon & Pădure 2011).

3.3.2 Laskenta

Ilmanvastusvoima lasketaan kunkin tarkasteluhetken ajonopeuden perusteella luvun 3.1 kaavalla (1). Vierintävastusvoima lasketaan kaavalla (2) ja nousuvastusvoima kaavoilla (3) ja (4) perustuen prosentteina syötettyyn tien pituuskaltevuuteen. Kun näiden kolmen voiman summa kerrotaan tarkasteluhetken ajonopeudella, saadaan kyseisten voimien voittamiseen tarvittava hetkellinen vetopyöräteho. Kun teho kerrotaan tarkasteluvälin kestoajalla (1 s), saadaan ilman-, vierintä- ja nousuvastuksen voittamiseen tarvittava energia tarkasteltavan sekunnin aikana.

Kiihdytyksiin tarvittava energia lasketaan kaavalla (5) perustuen liike-energian lisäykseen. Liike-energian lisäys lisätään ilman-, vierintävastus- ja nousuenergian summaan, jolloin lopputuloksena on vetopyöriltä tarvittava kokonaisenergia tarkasteluhetkellä. Hetkittäinen kokonaisenergia summataan lopuksi koko tarkasteltavan ajosuorituksen yli.

Kun vetopyöräenergiamäärityksen tulokseen yhdistetään tieto apulaitteisiin kuluva energiasta, polttoaineen energiasisällöstä sekä voimalinjan hyötysuhteesta, kyetään polttoaineenkulutus laskemaan.

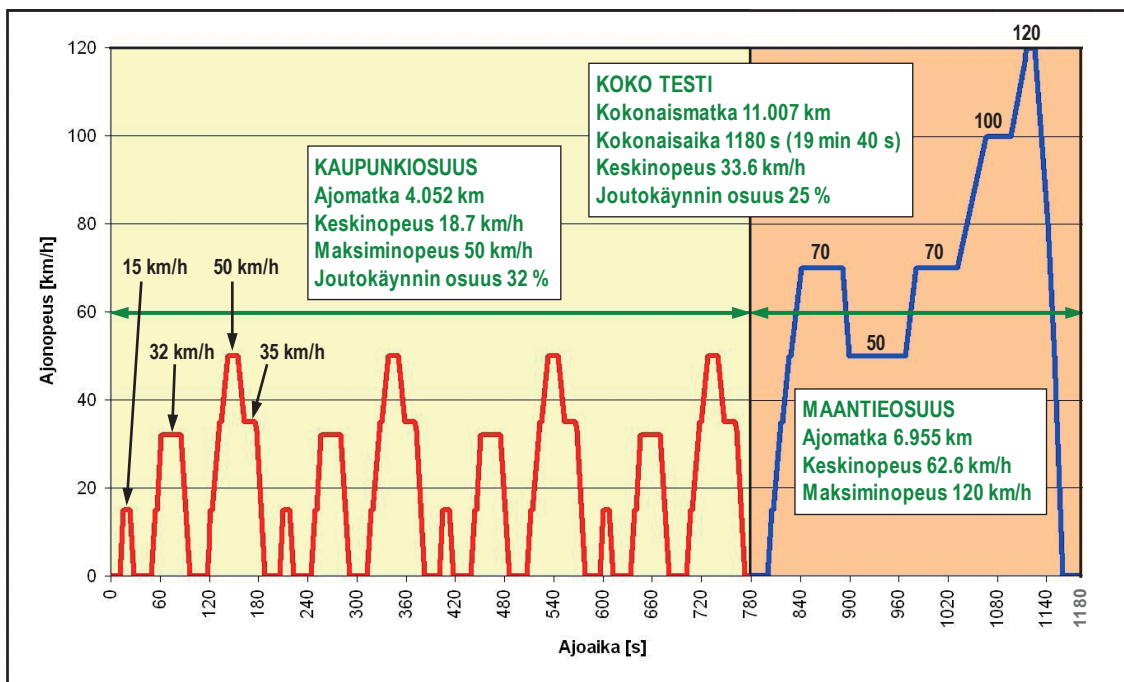
Moottorin keskimääräinen hyötysuhde virallisessa EU-syklissä on helposti laskettavissa, koska polttoaineenkulutus on tiedossa. Ajosuoritteissa, joista mitattua kulutustietoa ei ole, hyötysuhde määritetään ominaiskulutuskäyrästä. Kun keskimääräinen pyörintänopeus ja tehollinen keskipaine tunnetaan, voidaan keskimääräinen ominaiskulutus määrittää ominaiskulutuskäyrästä. Ominaiskulutuksesta saadaan hyötysuhde kaavalla (10). Läh-arvot VW Golfille on esitetty edellä luvussa 3.3.1.

3.4 Simulaation validointi

Simulaatiota testattiin vertaamalla sillä saatuja tuloksia VTT:n alustadynamometrillä mitaamiin tuloksiin. Lisäksi vertailukohtana oli ajoneuvon liiketilaa mittaavaan laitteistoon liittyvä tietokoneohjelma. Pyrkimyksenä oli varmistaa laaditun laskennan validiteetti sekä verifioida tulokset.

3.4.1 Alustadynamometrimittaukset VTT:llä

Drives'illä määritettyä vetopyöräenergiaa verrattiin VTT:n alustadynamometrituloksiin. Tarkastelu kohdistui EU:n viralliseen NEDC-testiajasykliin (New European Drive Cycle, kuva 5). Alustadynamometri oli mitannut vetopyöräenergian erikseen testin kaupunki- ja maantieosuuksilta sekä koko testin ajalta kahdella VW Golfin tyyppisellä ja massaisella autolla. Tulokset saatiin tutkimusinsinööri Ari-Pekka Pellikalta (sähköpostitiedonanto 1.3.2011, VTT/Moottorit ja ajoneuvot).



Kuva 5. Virallinen EU-tyyppihyväksyntäajosykli (NEDC) (Ikonen 2013, 193).

Simulaation validiteetin testaamiseksi määritettiin auton poikkipinta-alalle sekä ilman- ja vierintävastuskertoimelle ne arvot, joilla ajovastukset muodostuivat samoiksi kuin ne olivat dynamometrimitauksissa olleet.

Ajovastustiedot syötetään VTT:n Froude Cosine -dynamometrille ajovastusyhtälön

$$F_{tot}(v) = F_{0v} + F_{1v} + F_{2v}^2 \quad (11)$$

kertoimien F_0 , F_1 ja F_2 avulla. Kertoimet määritetään vapaassa rullauksessa mitattujen hidastuvuusaikojen perusteella. Kyseisestä coast-down-testistä lisätietoja löytyy viittees-tä (Hausberger, Rexeis, Blassnegger & Silberholz 2011).

VTT:llä alustadynamometrimitaukset oli suoritettu kaksilla eri ajovastusarvoilla. Nämä olivat mittausstandardin esittämät pelkästään auton massaan perustuvat taulukkoarvot sekä mitattujen kaltaisille autoille maantiellä coast-down-testillä määritetyt todelliset vastusarvot. Jälkimmäiset vastaavat taulukkoarvoja paremmin nykyisten aerodynamiikkaan kehittyneiden autojen ajovastusarvoja (Ari-Pekka Pellikka, VTT / Moottorit ja

ajoneuvot, henkilökohtainen tiedonanto 1.3.2011.) Drives-laskennalla saatuja tuloksia verrattiin molemmilla vastusarvoilla tehtyjen dynamometrimittausten tuloksiin.

3.4.2 Advisor-simuloinnit

Drives'in tuottamia laskentatuloksia verrattiin Aristotle University Thessaloniki, Department of Applied Thermodynamics'in julkaisemassa tutkimusartikkelissa (Fontaras & Samaras 2009) esitettyihin tuloksiin, jotka oli simuloitu Advanced Vehicle Simulator ("Advisor 2002") -ohjelmalla. Drives'illä tehtiin samankaltaiset ajovastusten ja massan muutosten simuloinnit kuin Advisor-ohjelmalla oli tehty. Tutkimuksen kohteena oli em. muutosten vaikutus polttoaineenkulutukseen EU-testisyklissä.

3.4.3 Race Technology Analysis -tietokoneohjelma

Drives-tuloksia verrattiin myös kaupallisen Race Technology -mittalaitteiston sekä sen ohjelmiston tuloksiin. Laitteiston muodostavat eri suunnissa mittaavat kiihtyvyyssanturit sekä GPS-tietoon perustuva paikannus. Race Technology DL2 -laitteistolla (logger serial number 10241, firmware version 13-7) mitattiin Turun bussilinjan nro 1 ajonopeus 10 Hz taajuudella. Linjan energiankulutus haluttiin mallintaa hankintavaiheessa olleiden sähköbussien ajoakkujen koon sekä latauslaitteiden tehon määrittämiseksi.

Laitteiston Analysis-ohjelmisto (versio 8.5.315) määrittä vetopyöräenergian nopeuskäyrän sekä ajovastusparametrien perusteella. Ajovastukset oli määritetty mittaamalla bussin hidastuvuutta vapaalla rullaten (coast-down).

Lisäksi vakiokaltevuuksisessa alamäessä oli haettu tilanne, jossa ajovastukset ja negatiivinen nousuvastus ovat yhtä suuret eli ajonopeus säilyi vakiona vapaalla rullattaessa. Näin saatiin hidastuvuusrullausta tarkempi tieto ilman- ja vierintävastuksen suhteesta.

Ajovastusmittauksissa koeautona oli uusi (vm. 2015) 2-akselinen 12,5-metrinen Scania-bussi tyyppiä 230UB4X2LB (alusta), korityyppi Omni Express 320LE (kuva 6).



Kuva 6. Ajovastusmittauksissa käytetty 2-akselinen 12,5-metrinen Scania-bussi (kuva: Markku Ikonen).

Kuvan 6 bussi saatiin mittauksia varten käyttöön Turun Kaupunkiliikenne Oy:ltä.

Mittaukset tehtiin sekä puoleen kantavuuteen kuormatulla että tyhjällä bussilla. Kuormana käytettiin erikokoisia vesisäiliöitä. Kuva 7 esittää painolastin sijoittelua bussissa.



Kuva 7. Painolastivesisäiliöiden sijoitus bussin käytävällä.
(kuva: Markku Ikonen).

Bussin laskennassa käytettiin seuraavia lähtöarvoja:

Massa kuormattuna:	16 100 kg (kuorma 3450 kg, puolet kantavuudesta)
Massa tyhjänä:	12 650 kg
Poikkipinta-ala	7,73 m ²
Ilmanvastuskerroin	0,47
Vierintävastuskerroin	0,009

Nopeusmittauksen korkea taajuus (10 Hz) aiheutti signaaliin kohinaa, joka häytti tulosten käsittelyä. Siksi simuloinnissa päädyttiin käyttämään sekunnin liukuvaa keskiarvoa (0,5 s taakse- ja eteenpäin) pehmentämään vaihtelua.

3.5 Simulaation soveltaminen

3.5.1 EU-testisykli

Drives'ia sovellettiin EU:n viralliseen NEDC-testisykliin (New European Driving Cycle, kuva 5). VW Golfille määritettiin koko voimalinjan ja pelkän moottorin hyötysuhde sekä kiihdyttämiseen, ilman- ja vierintävastukseen kuluvan energian osuudet. Lisäksi selvitetiin kuormanlisäyksen aiheuttama kulutuslisä.

Hyötysuhteet määritettiin erikseen syklin kaupunki- ja maantieosuuksille sekä koko syklille. Lähtötietoina käytettiin VW Golfin vetopyöräenergiaa sekä tarkastelluille kolmelle moottorivaihtoehdolle ilmoitettuja virallisia normikulutuslukemia.

Vetopyöräenergian jakaantuminen ilman-, vierintä ja kiihdytysvastukseen testin kaupunki- ja maantieosuuksissa sekä koko testissä määritettiin EU-syklin ajonopeuskäyrän sekä auton ajovastusparametrien avulla.

Autoon kuormattavan massan aiheuttama kulutuslisä EU-syklissä laskettiin 8 kuormaportaalle 50 kg:n välein välillä 50–400 kg. Laskenta tehtiin syklin kaupunkiosuudelle sekä koko syklille. Vetopyöräenergia laskettiin Drives'illä. Moottorin hyötysuhteen kasvu kuormituksen kasvaessa määritettiin keskimääräisen tehon kasvun ja kuvan 3 ominaiskulutuskäyrästä perusteella. Lähtökohtana lisäkulutuksen laskennalle olivat VW Golf 1,6 FSI:n viralliset normikulutukset syklin kaupunkiosuudessa sekä koko syklissä.

3.5.2 Eri kiihdytystavat

Eri kiihdytystapojen vaikutus energiantarpeeseen ja polttoainekulutukseen simuloitiin. Määrittäykset tehtiin sekä tasamaalla että ylämäessä tapahtuvissa kiihdytyksissä.

Tasamaalla muuttujana oli kiihdytysnopeus. Energiantarve ja kulutus selvitetiin kahdella kiihdytysnopeudella. Ylämäessä kiihdyttämässä muuttujana oli kiihdytyksen jaksottaminen mäennousuun nähden eri tavoin. Tarkastelu tehtiin kahdelle erilaiselle jaksotukselle.

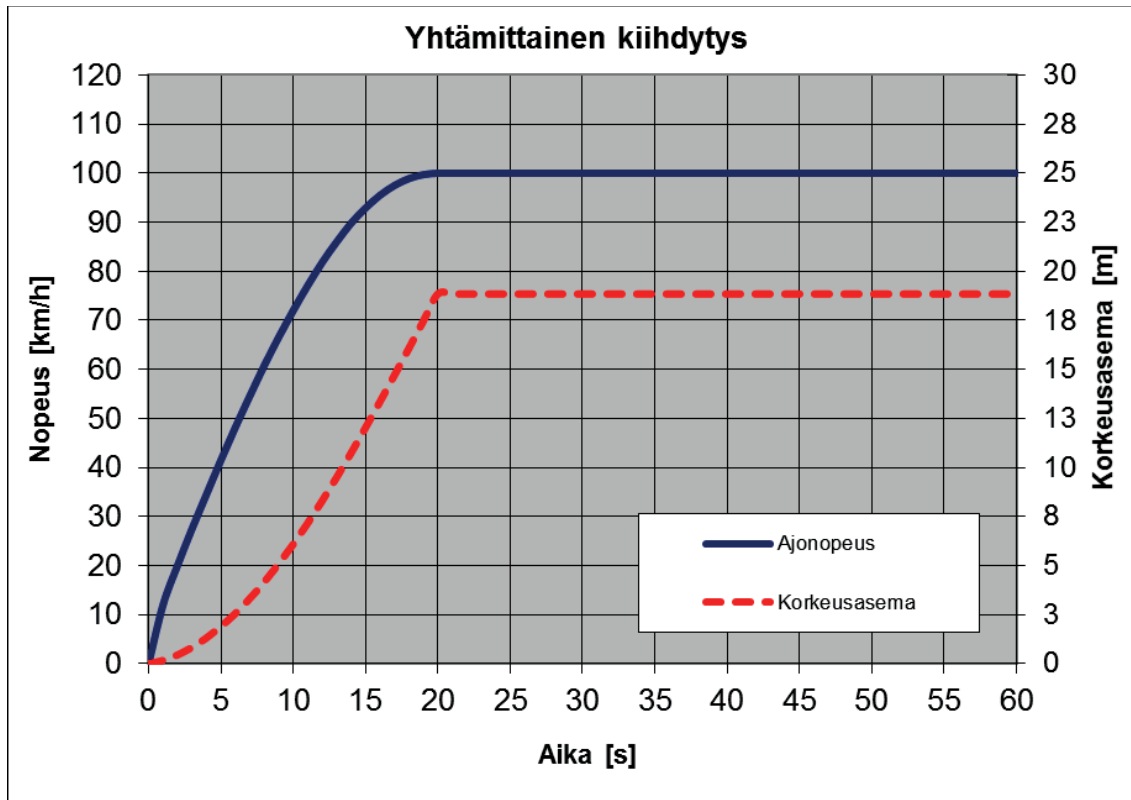
Tasamaakiihdytysten tarkastelukohteet nimettiin täyskaasukiihdytykseksi sekä kohtalaiseksi kiihdytykseksi nopeusvälillä 0–100 km/h. Täyskaasukiihdytyksen kiihdytysajaksi valittiin 10 ja kohtalaisen kiihdytyksen ajaksi 20 sekuntia.

Ylämäkeen kiihdyttämisessä tien pituuskaltevuudeksi valikoitui 5 %. Kiihdytysajaksi valittiin 20 sekuntia nopeusvälillä 0–100 km/h. Tutkitut jaksotusvaihtoehdot nimettiin yhtämittäiseksi ja viivästetyksi kiihdytykseksi.

Yhtämittäisessä kiihdytyksessä koko nopeusväli kiihdytettiin kerralla ylämäkeen. Nopeuden 100 km/h saavuttamisen kohdalla ylämäki loppuu, ja ajoa jatkettiin tasamaalla vakionopeudella 10 000 metriin saakka. Välitulokset laskettiin sekä kiihdytyksen lopussa että 1000 metrin ajomatkan kohdalla.

Viivästetyssä kiihdytyksessä kiihdytettiin aluksi vain nopeuteen noin 50 km/h saakka. Tämän jälkeen ajoa jatkettiin tällä nopeudella mäen päälle, ja kiihdytyksen loppuosa nopeuteen 100 km/h saakka suoritettiin vasta tasamaalla.

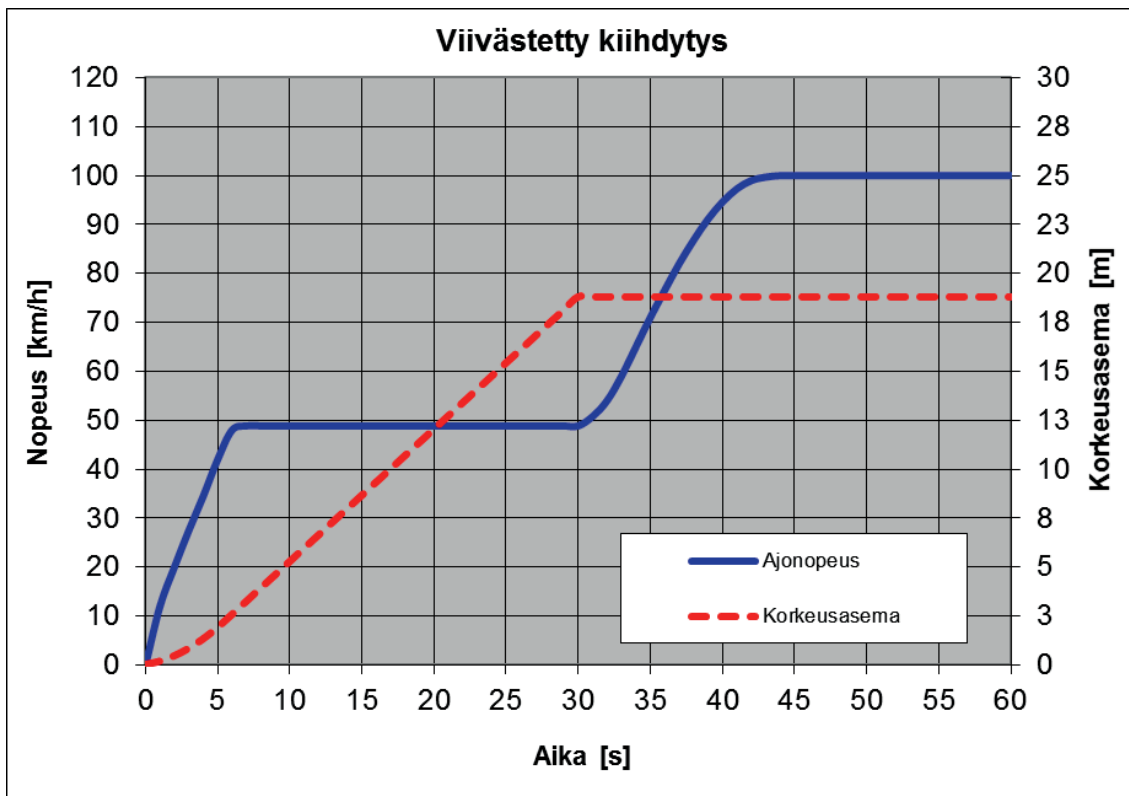
Yhtämittaisen kiihdytyksen nopeus- ja korkeusasemaprofiilit on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Yhtämittaisen kiihdytyksen ajonopeus ja korkeusasema ajan funktiona.

Kuvan 8 yhtämittäisessä kiihdytyksessä auton nopeus (jatkuva viiva) nousee yhtäjaksoisesti 100 km/h:iin. Ajonopeuden kasvaessa korkeusasemakäyrän kulmakerroin jyrkkenee. Kun ajonopeus 100 km/h on saavutettu 20 sekunnissa, auton korkeusasema on kasvanut 18,82 m.

Vertailutapauksena käytetyn viivästetyn kiihdytyksen ajonopeus- ja korkeusasemakäyrät on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Viivästetyn kiihdytyksen ajonopeus ja korkeusasema ajan funktiona.

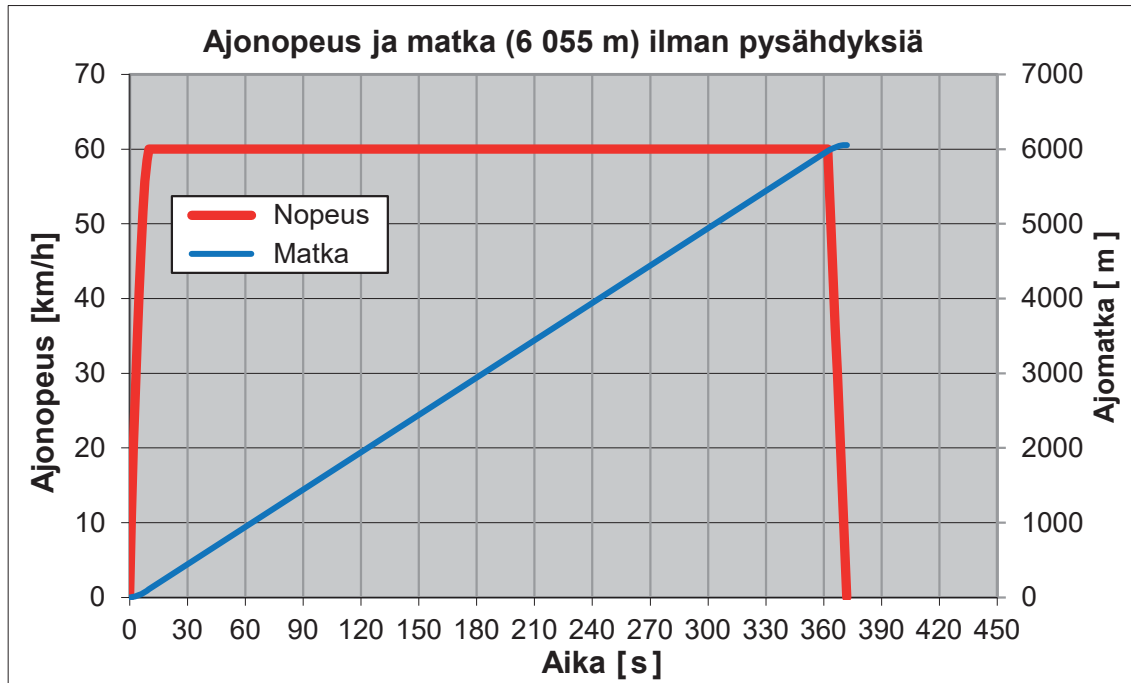
Kuvan 9 viivästetyssä kiihdytyksessä nopeus kasvaa 7 sekunnissa noin 50 km/h:iin. Tällöin korkeusasema on noussut 3,2 m. Ajoa jatketaan vakionopeudella 30 sekuntiin saakka, jolloin korkeusasema 18,82 m on saavutettu ja ylämäki loppuu. Tämän jälkeen kiihdytetään tasamaalla 100 km/h:iin noin 13 sekunnissa.

3.5.3 Välipysähdykset

Laskentaa sovellettiin ajomatkan kestäessä tapahtuvien välipysähdysten ja niistä aiheutuvien uudelleen kiihdyttämisten aiheuttaman kulutuslisän selvittämiseen. Vertailukoh- tana oli vain yhden kiihdytyksen sisältävä vakionopeusajo.

Perustapauksessa kiihdytettiin 0–60 km/h 10 sekunnissa ja ajoa jatkettiin vakionopeu- della n. 6 km:iin, jonka jälkeen auto pysäytettiin vakiohidastuvuudella 10 sekunnissa. Vertailutapauksessa ajettiin sama matka samalla nopeudella, mutta auto pysäytettiin ja kiihdytettiin yhdeksän (9) kertaa matkan aikana. Välipysäytyksissä hidastukset sekä kiihdytykset tehtiin perustapauksen tapaan 10 sekunnissa.

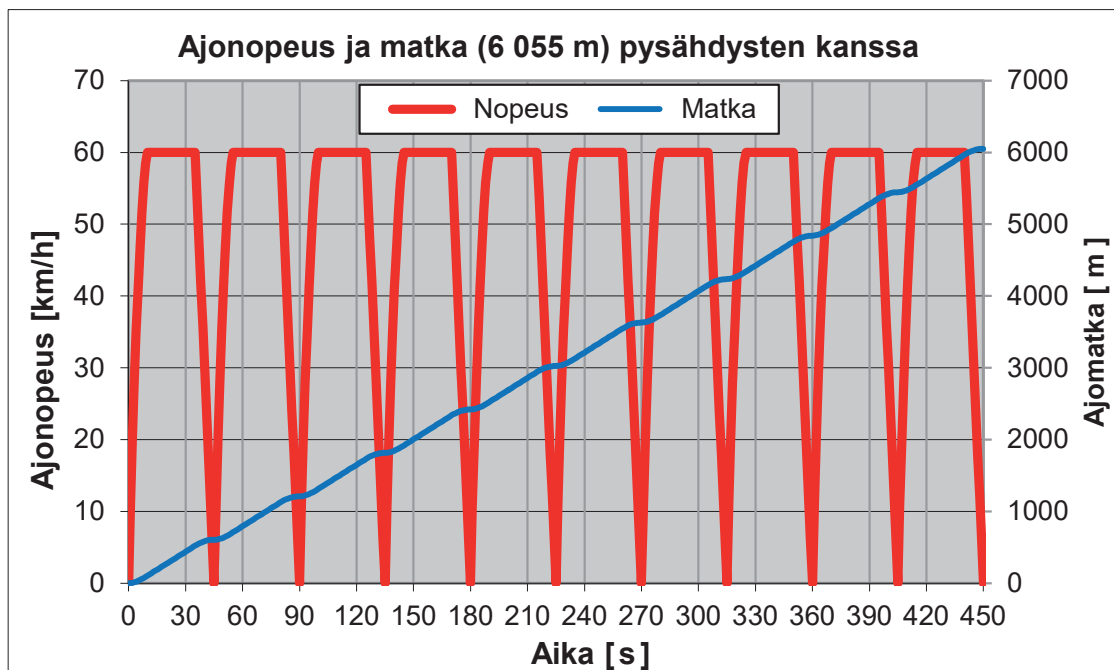
Perustapauksen ajonopeus- sekä ajomatkaprofiili ajan funktiona on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Ajonopeus- ja ajomatkaprofiili perustapauksessa, ajomatka 6 055 m.

Kuvan 10 mukaan aikaa 6 055 m:n ajamiseen kuluu 372 sekuntia.

Vertailutapauksessa simuloitiin kaupunki- ja esikaupunkiajossa tyypillisiä tiheitä pysähdyksiä ja kiihdytyksiä, joita on matkan varrella 9 kpl (kuva 11).



Kuva 11. Ajonopeus- ja ajomatkaprofiili vertailutapauksessa, ajomatka 6 055 m.

Kuvan 11 mukaan 6 055 m:n ajamiseen pysähdysten kanssa kuluu 450 sekuntia, kun liikkeelle lähdettiin heti kunkin pysähdysten jälkeen. Testisyklistä poiketen normaalissa liikenteessä pysähtymistä seuraa yleensä paikallaanoloa liikennevaloissa tai ruuhkassa. Tämän takia tarkasteltiin myös pysähdysten aikaisten 45 sekunnin joutokäyntijaksojen kulutusvaikutusta laskennallisesti. Joutokäyntiaikaa kertyi yhteensä 405 s. Laskenta tehtiin joutokäyntikulutuksella 0,8 l/h (Argonne 2018).

Hidastusten aikainen kulutus laskettiin kolmella eri syötönkatkaisuvaihtoehdolla (0 %, 50 % ja 100 % hidastusajasta). Vakionopeuskulutuksena nopeudella 60 km/h käytettiin arvoa 5,1 l/100 km, joka perustuu Tekniikan Maailman mittaukseen (Ahonen 2004: 21).

Kiihdytyksen aikaiset moottorin teho- ja pyörintänopeusalueet arvioitiin. Näiden perusteella määritettiin tehollisen keskipaineen sekä moottorin pyörintänopeuksien suuruusluokka. Keskimääräinen ominaiskulutus luettiin ominaiskulutuskäyrästä, ja tästä laskettiin moottorin keskimääräinen hyötysuhde.

3.6 Taloudellisen ajon koulutuksen vaikutus

Taloudellisen ajotavan koulutuksen vaikutusta tutkittiin ajattamalla sama ajoreitti kahdesti 212 koekuljettajan ryhmällä. Ensinnä ajettiin kuljettajan omalla ajotavalla, ja sen jälkeen kouluttajan antamien taloudellisuusohjeiden perusteella.

Aineistona käytettiin turkulaisen Autohallin autokoulun mittauksia. Koehenkilöinä olivat ajokortin toista vaihetta suorittaneet kuljettajat. He saivat ensimmäiseltä ajolenkiltä palautteen ajon taloudellisuudesta ja heille annettiin ohjeita kulutuksen vähentämiseen. Tämän jälkeen sama lenkki ajettiin uudelleen. Lopuksi analysoitiin erityisesti sitä, mitkä tekijät saivat jälkimmäisen lenkin toteutumaan pienemmällä polttoainekulutuksella.

Koeautona käytettiin Opel Astra J VVT Sports Tourer -farmaria 1,6-litraisella 85 kW:n bensiinimoottorilla (tuotannossa mallivuodet 2010–2012). Kulutusmittaukset tehtiin moottorinohjaukseen liitetyllä Econen-mittarilla. Ajoreitti sijaitsi Turun keskustan liepeillä, ja sen pituus oli noin 8 km. Reitti oli valittu vähäliikenteisille kaduille, jotta muun liikenteen vaihtelu häiritsisi mittauksia mahdollisimman vähän. Myös ruuhka-aikoja pyrittiin välttämään. Aikaa reitillä kului suunnilleen 20 min, eli keskinopeus oli 24 km/h. Pysähdysten osuus reitin kestoajasta oli 20–25 %.

3.7 Taloudellisen ajon hyötypotentiaali

Taloudellisen ajon koulutuksen tuloksista laskettiin potentiaali vuotuiselle polttoaineen- ja rahansäästölle sekä CO₂-vähenemälle. Laskenta tehtiin sekä yksittäisen bensiini- ja dieselauton käyttäjän kannalta että valtakunnallisesti. Valtakunnallisen systemaattisen koulutuksen vaikutukset laskettiin erikseen bensiini- ja dieselhenkilöautoille sekä dieselkäyttöisille raskaille ajoneuvoille. CO₂-laskennassa ei otettu huomioon polttoaineissa mahdollisesti olevia vaihtelevia uusiutuvan raaka-aineen osuuksia.

Tarkastelussa kaupunki- ja maantieajo erotettiin toisistaan. Henkilöautojen kaupunkiajon säästöt laskettiin taloudellisen ajon koulutuksen vaikutuksen mukaisella 21 prosentin

kulutusvähenemällä. Maantieajon säästöksi arvioitiin vajaat puolet kaupunkiajon vastaavasta eli 10 %. Näin siksi, koska kulutukseen eniten vaikuttavia ajotapamuuttujia (ennakointi, hidastukset, kiihdytykset, vaihteiden käyttö) sisältyy maantieajoon selvästi kaupunkiajota vähemmän. Valtakunnallisessa laskennassa käytetty kaupungissa kulutetun polttoaineen osuus oli 34 % ja maantieajon vastaavasti 66 % henkilöautojen kokonaiskulutuksesta. Jako perustuu VTT:n Liisa 2016 -laskentajärjestelmän (VTT 2016) valtakunnallisiin polttoaineenkulutustietoihin.

Yksittäisen autonkäyttäjän säästöjen laskenta perustui bensiinikäyttöisellä Opel Astra J 1.6 VVT Sports Tourerilla (85 kW, 2010–2012) tehtyihin mittauksiin kaupunkiajossa. Kaupunkikulutuksina käytettiin kaikkien koehenkilöiden keskiarvoja ennen ja jälkeen taloudellisen ajon koulutuksen. Maantieajon käytännön kulutus ennen koulutusta määritettiin laskennallisesti olettaen, että se on suhteellisesti yhtä paljon normikulutusta suurempi kuin mitattu kaupunkikulutus ennen koulutusta oli kaupunkiajon normikulutusta suurempi.

Dieselautoilijan säästöt laskettiin perustuen bensiiniauton mittauksiin. Koeautona käytettyä bensiinikäyttöistä Opel Astra vastavaan dieselversion käytännön kulutus määritettiin laskennallisesti dieselmallin virallisten EU-kulutusten sekä bensiiniversion mitaustulosten perusteella. Oletettiin, että käytännön dieselkulutukset ennen koulutusta ovat sekä kaupunki- että maantieajossa suhteellisesti yhtä paljon normikulutuksia suuremmat kuin bensiinikulutuksetkin. Samoin oletettiin, että koulutuksen aikaansaama säästö on suhteellisesti sama bensiini- ja dieselhenkilöautoille.

Valtakunnallisessa tarkastelussa raskaiden ajoneuvojen säästöpotentiaalit arvioitiin henkilöautoja pienemmiksi. Koska raskaissa autoissa tehon suhde massa on luokkaa kymmenesosa henkilöautojen vastaavasta, niitä kiihdytetään ainakin kuormattuna tyyppillisesti (lähes) rajamomentilla. Käytännössä erilaisia kiihdytystapoja ei siis juurikaan ole valittavissa. Lisäksi raskaiden ajoneuvojen kuljettajat ovat ammattilaisia, joista ainakin osa on saanut työnantajan järjestämää taloudellisen ajon koulutusta. Näillä perusteilla raskaiden autojen kaupunkiajon säästöpotentiaali arvioitiin 21 %:n asemesta 10 prosentiksi ja maantieajon vastaava 10 %:n asemesta 5 prosentiksi.

Valtakunnallisen laskennan lähtökohtana oletettiin, että puolet ajokortinhaltijoista koulutettaisiin. Laskentaan valittiin kaksi skenaariota, minimi ja maksimi, jotka ottavat huomioon sen, että kaikki koulutetut eivät todennäköisesti noudattaisi taloudellista ajotapaa pysyvästi. Minimiskenaariossa arvioitiin, että joka neljäs koulutettu noudattaisi saamiaan oppeja pysyvästi. Maksimiskenaariossa pysyvästi taloudellisesti ajavien osuudeksi arvioitiin puolet koulutetuista.

Valtakunnallisen laskennan pohjana olivat VTT:n Liisa 2016 -laskentajärjestelmästä poimitut vuoden 2016 toteutuneet bensiinin ja dieselpolttoaineen käyttömäärät Suomessa (VTT 2016). Liisa-järjestelmä sisältää tiedot eri ajoneuvotyyppien käyttämästä vuotuisesta polttoaineesta sekä niiden tuottamista päästöistä erikseen kaupunki- ja maantieajon osalta.

4 TULOKSET

Ajonopeus- ja tien kaltevuustiedot syötettiin Drives-simulaatioon sekunnin välein, kuten aika-nopeus -lukuparit on ilmoitettu virallisessa EU-päästö- ja kulutustestin (NEDC) testausnormissa (Direktiivi 91/441/EEC: 33-39). Kokeilumielessä joihinkin tarkasteluihin sovellettiin myös 0,1 sekunnin resoluutiota. Laskenta hidastui, mutta tarkkuus ei juurikaan lisääntynyt. Sekunnin resoluutiolla päästiin siis riittävän tarkkoihin tuloksiin.

4.1 Simulaation validointi

Simulaation validiteetin testaus tehtiin vertaamalla tuloksia VTT:n alustadynamometrillä mitattuihin sekä kaupallisen mittalaitteen laskentaohjelman tuottamiin tuloksiin.

4.1.1 Vertailu alustadynamometrituloksiin

EU-syklin kaupunki- ja maantieosuudessa sekä koko syklissä Drives'illä määritetyt veto-
pyöräenergiat sekä vastaavat VTT:n alustadynamometrin mittaamat tulokset on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Drives'in verifiointi VTT:n alustadynamometrituloksiin verraten.

	Ajovastus- yhtälön kertoimet	Kertoimia vastaavat ajoneuvovakiot			EU-kaupunki			EU-maantie			EU-yhdistetty		
		A [m ²]	f [-]	C _d [-]	Drives [kWh]	VTT [kWh]	Ero [%]	Drives [kWh]	VTT [kWh]	Ero [%]	Drives [kWh]	VTT [kWh]	Ero [%]
"Taulukko-arvot"	F ₀ = 7 F ₁ = 0 F ₂ = 0.0481	2.22	0.000525	0.435	0.297	0.306	-2.9	0.878	0.812	8.1	1.175	1.118	5.1
"Nyky-auton arvot"	F ₀ = 80 F ₁ = 1.50 F ₂ = 0.0350	2.22	0.0059963 * (1+v/14.815)	0.317	0.418	0.397	5.3	1.078	0.983	9.7	1.496	1.38	8.4

Taulukosta 4 ilmenee, että Drives-simulaatio antaa lähimmäksi VTT:n alustadynamometrituloksia osuvat arvot testin kaupunkiosuudessa. Ensimmäiselle vertailukohteelle (”taulukkoarvot”) Drives-laskenta antaa noin 3 % pienemmän ja toiselle (”nykyauton arvot”) runsaan 5 % suuremman arvon kuin dynamometrimitaus.

Testisyklin maantiesuudessa simulaation antamat tulokset olivat molemmissa tapauksissa VTT:n dynamometrituloksia suuremmat. Erot ovat 8–10 %:n luokkaa. Yhdistetyssä eli koko EU-normisyklissä simulointitulokset olivat 5–8 % VTT:n mittaamia suuremmat.

4.1.2 Vertailu Advisor-tuloksiin

Taulukossa 5 on esitetty Drives'illä lasketut kulutusvähenemät VW Golfilla EU-testissä kevennettäessä auton massaa 2 %:n portain maksimissaan 10 %:lla.

Taulukko 5. Auton keventämisen vaikutus kulutukseen ja CO₂-päästöön EU-tyyppi hyväksyntätestissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).

WV Golf sukupolvi V 1.6 FSI benssiini	Liikuttettava massa kg	Vetopyörille tarvitt. energia kWh	Suht. vetopyörä energia -	Energia moottorilta vetopyörille kWh *)	Laturin kuluttama energia kWh **)	Moott. tuottama energia yht. kWh	Suhteellinen moottorienergia -	Suhteell. omin. kulutus -	Polttoaineenkulutusmuutos %
Perustila	1375	1.396	1.000	1.517	0.098	1.616	1.000	1.000	0.0
- 2 %	1348	1.378	0.987	1.498		1.596	0.988	1.003	-0.9
- 4 %	1320	1.360	0.974	1.478		1.577	0.976	1.007	-1.8
- 6 %	1293	1.343	0.962	1.460		1.558	0.964	1.010	-2.6
- 8 %	1265	1.325	0.949	1.440		1.539	0.952	1.015	-3.4
- 10 %	1238	1.307	0.936	1.421		1.519	0.940	1.019	-4.2

*) Voimansiirron hyötysuhteella 0.92

**) Latausteholla 250 W, johon tarvitaan mekaanista tehoa 300 W

Taulukosta 5 nähdään, että kulutusvähenemä on lineaarinen suhteessa massan vähentämiseen. Massavähentämällä 10 % saadaan Drives'illä kulutusvähenemäksi runsaat 4 % (taulukon oikean reunan sarake). Fontaras & Samaras (2009) -tutkimuksen Advisor-simuloinnin vastaava tulos kuudelle koeautolle oli 3–4 %:n kulutusvähenemä.

Taulukossa 6 on esitetty Driwes'illä lasketut kulutusvähenemät VW Golfilla EU-testissä vähennettäessä auton ilmanvastusta 2 %:n portain maksimissaan 10 %:lla.

Taulukko 6. Ilmanvastuksen vähentämisen vaikutus kulutukseen ja CO₂-päästöön EU-tyyppi hyväksyntätestissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).

VW Golf sukupolvi V 1.6 FSI benssiini	Veto- pyörille tarvitt. energia kWh	Suhteell. veto- pyörä energia -	Energia mootto- rilta veto- pyörille kWh *)	Laturin kulut- tama energia kWh **)	Moott. tuottama energia yht. kWh	Suhteel- linen moottori- energia -	Suhteell. omin. kulu- tus -	Poltto- aineen- kulutus- muutos %
Perustila	1.396	1.000	1.517	0.098	1.616	1.000	1.000	0.0
- 2 %	1.386	0.993	1.507		1.605	0.993	1.002	-0.5
- 4 %	1.376	0.986	1.496		1.594	0.987	1.004	-1.0
- 6 %	1.366	0.979	1.485		1.583	0.980	1.006	-1.5
- 8 %	1.355	0.971	1.473		1.571	0.972	1.008	-2.0
- 10 %	1.345	0.963	1.462		1.560	0.966	1.010	-2.5

*) Voimansiirron hyötysuhteella 0.92

**) Latausteholla 250 W, johon tarvitaan mekaanista tehoa 300 W

Taulukon 6 mukaan kulutusvähenemä on lineaarinen myös suhteessa ilmanvastuksen vähenemiseen, ja 10 %:n ilmanvastusvähenemällä saadaan Driwes'illä VW Golfin kulutusvähenemäksi 2,5 %. Vertailututkimuksen tulos oli 2 %:n vähenemä.

Taulukossa 7 on esitetty Driwes'illä lasketut kulutusvähenemät VW Golfilla EU-testissä vähennettäessä renkaiden vierintävastusta 4 %:n portain maksimissaan 20 %:lla.

Taulukko 7. Vierintävastuksen vähentämisen vaikutus kulutukseen ja CO₂-päästöön EU-tyyppihyväksyntätetstissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).

WV Golf sukupolvi V 1.6 FSI bensiini	Veto- pyörille tarvitt. energia kWh	Suhteell. veto- pyörä energia -	Energia mootto- rilta veto- pyörille kWh *)	Laturin kulut- tama energia kWh **)	Moott. tuottama energia yht. kWh	Suhteel- linen moottori- energia -	Suhteell. omin. kulu- tus -	Poltto- aineen- kulutus- muutos %
Perustila	1.396	1.000	1.517	0.098	1.616	1.000	1.000	0.0
- 4 %	1.379	0.988	1.499		1.597	0.989	1.003	-0.8
- 8 %	1.362	0.976	1.480		1.579	0.977	1.006	-1.7
- 12 %	1.346	0.964	1.463		1.561	0.966	1.010	-2.4
- 16 %	1.329	0.952	1.445		1.543	0.955	1.014	-3.2
- 20 %	1.312	0.940	1.426		1.524	0.943	1.018	-4.0

*) Voimansiirron hyötysuhteella 0.92

**) Latausteholla 250 W, johon tarvitaan mekaanista tehoa 300 W

Taulukon 7 mukaan kulutusvähenemä on lineaarinen myös suhteessa vierintävastuksen vähenemiseen. Drives'illä saadaan 20 %:n vierintävastusvähenemällä kulutus- eli CO₂-vähenemäksi 4 %. Vertailututkimuksen tulos oli 3 %.

Taulukossa 8 on esitetty Drives-laskennan kolmen vastustekijän vähentämisen yhteisvaikutus (massa -10 %, ilmanvastus -10 %, vierintävastus -20 %). Erillinen laskenta kaikkien kolmen tekijän ollessa yhtäkaa voimassa on tarpeen, koska näin saadaan tarkempi tulos kuin summaamalla kunkin erillisen tekijän aikaansaamat vähennykset. Lisäksi taulukossa on esitetty tulos, jossa on mukana vertailututkimuksessa aikavälillä 2007–2015 realistiseksi arvioitu voimalinjan hyötysuhdeparannus 7,5 %.

Taulukko 8. Massan sekä ilman- ja vierintävastuksen vähentämisen sekä 7,5 %:n hyötysuhdeparannuksen yhteisvaikutus kulutukseen ja CO₂-päästöön EU-tyyppi hyväksyntätestissä (VW Golf 1,6 FSI, sukupolvi V).

VW Golf sukupolvi V 1.6 FSI bensiini	Veto- pyörille tarvitt. energia kWh	Suhteell. veto- pyörä energia -	Energia moottorilta veto- pyörille kWh *)	Laturin kulut- tama energia kWh **)	Moott. tuottama energia yht. kWh	Suhteel- linen moottori- energia -	Suhteell. omin. kulu- tus -	Poltto- aineen- kulutus- muutos %
Perustila	1.396	1.000	1.517	0.098	1.616	1.000	1.000	0.0
Vast. väh.	1.181	0.846	1.284		1.382	0.855	1.060	-9.3
+ Hyötys.	1.181	0.846	1.284		1.382	0.855	0.980	-16.1

*) Voimansiirron hyötysuhteella 0.92

***) Latausteholla 250 W, johon tarvitaan mekaanista tehoa 300 W

Vimeisen rivin hyötysuhdeparannus: + 7.5 %

Taulukon 8 mukaan massan ja ajovastusten vähennyksen yhteisvaikutus kulutukseen olisi runsaan 9 %:n vähenemä (taulukon toinen rivi). Fontaras & Samaras (2009) -tutkimuksen raportoitu tulos oli 8–9 %:n vähenemä. Kun tähän lisätään vielä 7,5 %:n parannus moottorin hyötysuhteessa, päästään Golfilla Drives-laskennalla suunnilleen 16 %:n kulutusvähenemään. Vertailututkimuksen vastaava tulos oli 13 %.

Yhteenveto Fontaras & Samaras (2009) -tutkimuksen Advisor-simuloinnin lopputulok- sista verrattuna Drives-tuloksiin on esitetty alla taulukossa 9.

Taulukko 9. Yhteenveto vertailututkimuksen ja Drives-tulosten kulutus- ja CO₂- vähenemästä NEDC-testissä toisiinsa verrattuna.

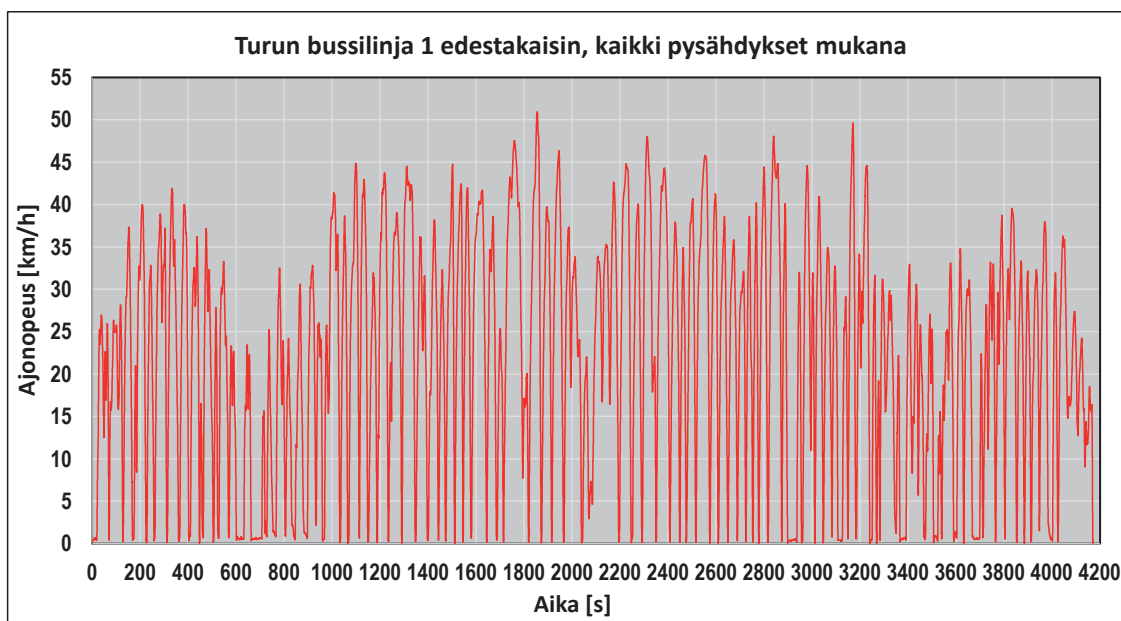
KULUTUKSEN JA CO ₂ :n MUUTOS EU-TESTISSÄ ERI KEINOJEN AVULLA [%]	Liikutettavan massan muutos -10 %	Ilman- vastuksen muutos -10 %	Vierintä- vastuksen muutos -20 %	Massan ja vastusteki- jöiden yhteis- vaikutus	Lisäksi hyötysuhde- muutos +7.5%
Fontaras & Samaras	-3 – -4 %	-1.5 – -2.5 %	-2 – -4 %	-8 – -9 %	-13 %
Drives-simulointi	-4 %	-2.5 %	-4 %	-9 %	-16 %

Taulukko 9 osoittaa, että Drives arvioi VW Golf 1.6 FSI:n kulutusmuutokset hieman suuremmiksi kuin vertailututkimus arvioi kolmelle bensiini- ja dieselautolle keskimäärin.

Ero tulosten välillä on pieni ja saattaa osittain selittyä sillä, että vertailututkimuksessa mukana olleet dieselautot saattoivat reagoida kuormitusmuutoksiin vähemmän kuin bensiinimoottorinen Golf 1.6 FSI.

4.1.3 Vertailu Race Technology Analysis -ohjelmaan

Race Technology -mittalaitteiston taltioima ajomatka edestakaiselle Turun bussilinjalte nro 1 (Turun satama – Kauppatori – lentokenttä) oli 25,684 km. Aikaa kului 4171 sekuntia (1 h 9 min 31 s). Keskinopeus oli 22,2 km/h. Pysähdyksiä ja liikkeellelähtöjä oli runsaat 80 kpl, koska joka pysäkillä pysähdyttiin (kuva 12). Tarkoituksena oli selvittää maksimaalinen energiankulutus sekä sen väheneminen silloin, kun vain joka toisella pysäkillä pysähdytään. Maksiminopeus oli 51 km/h. Pisin seisontajakso kesti 43 s.



Kuva 12. Race Technology -laitteiston mittaama Turun bussireitin nro 1 aikajono-
nopeuskäyrä.

Drives-tulokset osoittivat, että tarvittava vetopyöräenergia pieneni runsaalla 40 %:lla, kun kaikkien pysäkkien asemesta pysähdyttiin vain joka toisella. Simuloinneissa keskinopeus säilytettiin samana, jolloin joka toisella pysäkillä pysähdyttäessä ajonopeus pysäkkien välillä oli pienempi kuin joka pysäkillä pysähdyttäessä.

Race Technology -laitteiston kiihtyvyyssanturien ilmoittama vetopyöräenergiatulos oli kaikissa tapauksissa noin 10 % pienempi kuin saman laitteen GPS-anturin määrittämä tulos. Laitevalmistajan ohjeen mukaan laitteen kiihtyvyyssanturit antavat tarkemman tuloksen kuin GPS-paikannukseen perustuva mittaus. Näin varsinkin pohjoisilla leveysasteilla kuten Suomessa, jossa GPS-tarkkuus ei ole parhaimmillaan. Edellytyksenä tarkkuudelle on, että mittalaite on asennettu auton keskijalalle auton kulkusuntaan nähden oikein. Lisäksi sen on oltava vaakatasossa sekä pituus- että poikkisuunnassa.

Mittalaite oli kiinnitetty autoon ohjeiden mukaisesti, joten oli syytä olettaa, että kiihtyvyyssanturien tulos on GPS-tulosta luotettavampi. Kuitenkaan GPS-tulostakaan ei voinut jättää kokonaan noteeraamatta. Vaikutti siis perustellulta laskea kahden mittalaitteen tulosten keskiarvo painottaen tarkemmaksi ilmoitetun laitteen tulosta. Tulos laskettiin painottaen kiihtyvyyssanturien tulosta 0,65:llä ja GPS-tulosta 0,35:llä.

Mittalaiteohjelmiston sekä Drives-simulaation määrittämien vetopyöräenergiatulosten vertailu ajossa, jossa joka pysäkillä pysähdyttiin, on esitetty taulukossa 10. Bussi mitattiin puoleen kantavuuteen kuormattuna sekä tyhjänä. Lisäksi taulukossa ovat vastaavat VW Golfille määritetyt tulokset. Kaikista testeistä on ilmoitettu kiihtyvyyssanturin sekä GPS-määrittämisen tuottama energiatieto sekä näiden em. periaatteella painotettu keskiarvo.

Taulukko 10. Kolmen tarkastelutapauksen vetopyöräenergiat Race Technology laitteiston laskennalla sekä Drives-simulaatiolla laskettuina.

Simulointimenetelmä	Kuormattu bussi $m_{\text{kok}} = 16\ 100\ \text{kg}$ Vetopyörä- energia kWh	Tyhjä bussi $m_{\text{kok}} = 12\ 650\ \text{kg}$ Vetopyörä- energia kWh	VW Golf $m_{\text{kok}} = 1375\ \text{kg}$ Vetopyörä- energia kWh
Race Technology Analysis, kiihtyvyyssanturit	34.1	27.0	3.08
Race Technology Analysis, GPS-paikannus	37.9	30.0	3.41
Race Technology, painotettu keskiarvo (0.65/0.35)	35.5	28.1	3.20
Drives-simulaatio	35.7	28.3	3.29
Ero Drives / Analysis-ohjelma [%]	0.6	0.9	2.9

Taulukko 10 osoittaa, että energiantarve on tyhjällä bussilla likimain 20 % pienempi kuin puoleen kantavuuteen (kuorma 3 450 kg) kuormatulla. Lisäksi havaitaan, että Drives-tulokset osuvat Race Technology Analysis -ohjelman kahdella mittausperiaatteella määrittämien tulosten väliin. Kun Drives-tuloksia verrataan mittalaitetuloksien painotettuun keskiarvoon, havaitaan melko tarkka vastaavuus: Drives-tulos on suunnilleen puolesta kolmeen prosenttiin vastaavaa Race Technology -keskiarvoa suurempi.

4.2 EU-testisykli

4.2.1 Voimalinjan hyötysuhde

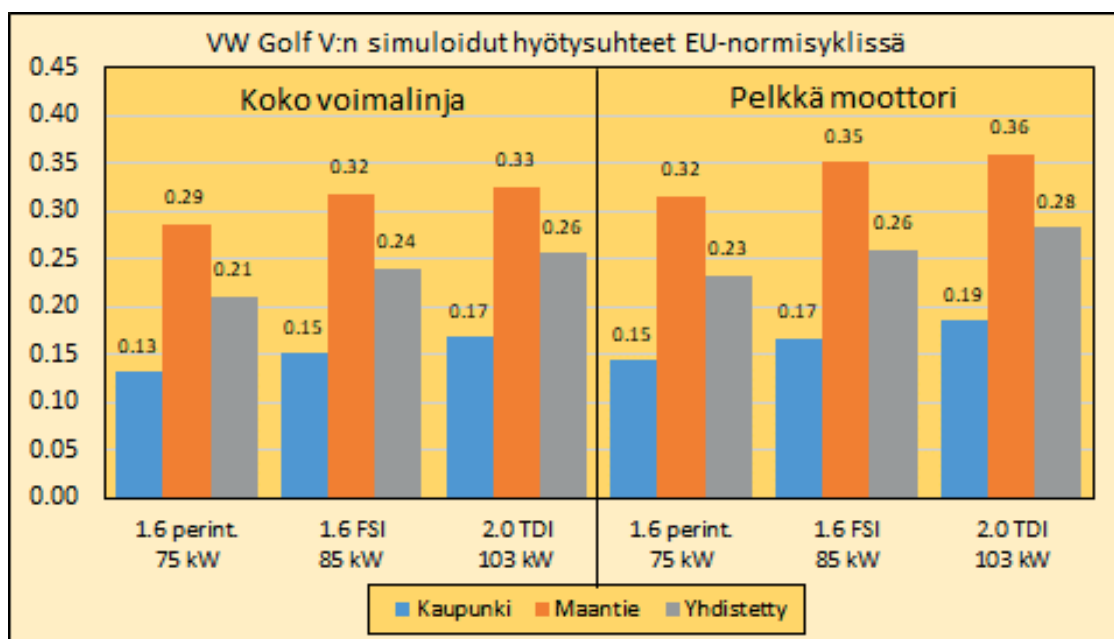
Drives-laskennan perusteella Golfin vetopyöriltä tarvitaan EU-syklissä (NEDC) energiaa 1,396 kWh. Kun tämä jaetaan voimansiirron hyötysuhteella 0,90, päästään moottorilta tarvittavaan energiaan, joka on 1,551 kWh.

Tähän on lisättävä laturin vaatima energia. EU-syklissä vain välttämättömät sähkönkuluttajat ovat käytössä. Laturin kampiakselilta ottamaksi tehoksi arvioidaan 0,3 kW, joka sisältää moottorinohjauksen, polttoaineen pumppauksen, ajovalot sekä laturin ja hihnavedon hyötysuhteet. Tällä teholla laturin kampiakselilta vaatimaksi energiaksi saadaan 1180 sekunnin testissä 0,098 kWh. Kun tämä lisätään moottorin vaihteistoon syöttämään energiaan, päädytään kokonaismoottorienergiaan 1,649 kWh.

Golfin virallinen yhdistetty kulutus 1,6 FSI -bensinimoottorilla on 6,4 l/100 km (ATZ/MTZ 2003). Tämä vastaa arvoa 56,3 kWh/100 km, kun käytetään bensiinin energiasisältöä 42,5 MJ/kg (11.8 kWh/kg) ja tiheyttä 745 kg/m³. Testisyklin matkalla (11,007 km) kulutettu bensiinienergia on 6,196 kWh. Energiasuhde ulos/sisään on siis 1,649 kWh / 6,196 kWh, joten moottorin kokonaishyötysuhteeksi muodostuu 0,26. Koko voimalinjan hyötysuhteeksi, voimansiirtohäviöt huomioon ottaen, saadaan tällä moottorilla 0,24.

Golfin viidennen sukupolven dieselmoottori on suoraruiskutteinen 2,0 TDI (103 kW), jolla virallinen normikulutus on 5,4 l/100 km (ATZ/MTZ 2003). Tämän moottorin hyötysuhteeksi muodostuu 0,28, ja koko voimalinjan hyötysuhteeksi 0,26. Dieselin tiheytenä käytettiin arvoa 830 kg/m³.

Hyötysuhteet laskettiin myös syklin kaupunki- ja maantieosuuksille erikseen käyttäen kummankin virallista normikulutusta. Laskentaan otettiin myös Golf V:een saatavissa ollut vanhempi, imusarjasuihkutteinen 1,6-litrainen bensiinimoottori, jonka suurin teho on 75 kW/5600 1/min ja momentti 148 Nm/3800 1/min. Tämän mukaan ottaminen vertailuun tuo esiin suorasuihkutusperiaatteen tuoman hyötysuhdehyödyn bensiinimoottorissa. Yhteenveto tuloksista on kuvassa 13.



Kuva 13. VW Golfin (sukupolvi V) hyötysuhteet kolmella eri moottorilla EU-syklissä.

Kuvan 13 mukaan bensiinin suorasuihkutus tarjoaa selvän taloudellisuushyödyn. Suorasuihkutteisen FSI-moottorin hyötysuhde on perinteistä bensiinimoottoria selvästi parempi ja on lähempänä dieselmoottoria kuin perinteistä bensiinimoottoria.

Kuitenkin todellisessa ajossa kulutus on yleensä normiarvoja suurempi. Ympäristöjärjestö ICCT (International Council on Clean Transportation) on julkaissut yli 200 000 saksalaisen autoilijan Internetin kautta raportoimat kulutukset (Mock, German, Bandivadekar & Riemersma 2012). Vuosina 2001–2011 autoilijoiden havaitsema kulutus oli 10–20 % normiarvoja suurempi. Jos hyötysuhdelaskenta tehdään näiden keskiarvolla, 15 %:n lisäkulutuksella normiarvoihin nähden, saadaan moottorin hyötysuhteeksi koko testissä perinteiselle 1.6-litraiselle moottorille 0,20, 1,6 FSI:lle 0,23 ja 2,0 TDI:lle 0,25.

4.2.2 Ajovastusten jakauma

Taulukossa 11 on laskettu Drives'illä VW Golf 1,6 FSI:n vetopyöräenergiaa virallisen NEDC-päästö- ja kulutusmittaustestisyklin (Direktiivi 98/69/EC) alusta 30 sekunnin ajalta.

Taulukko 11. Virallisen EU-testisyklin alku Drives-simulaatiossa VW Golfilla.

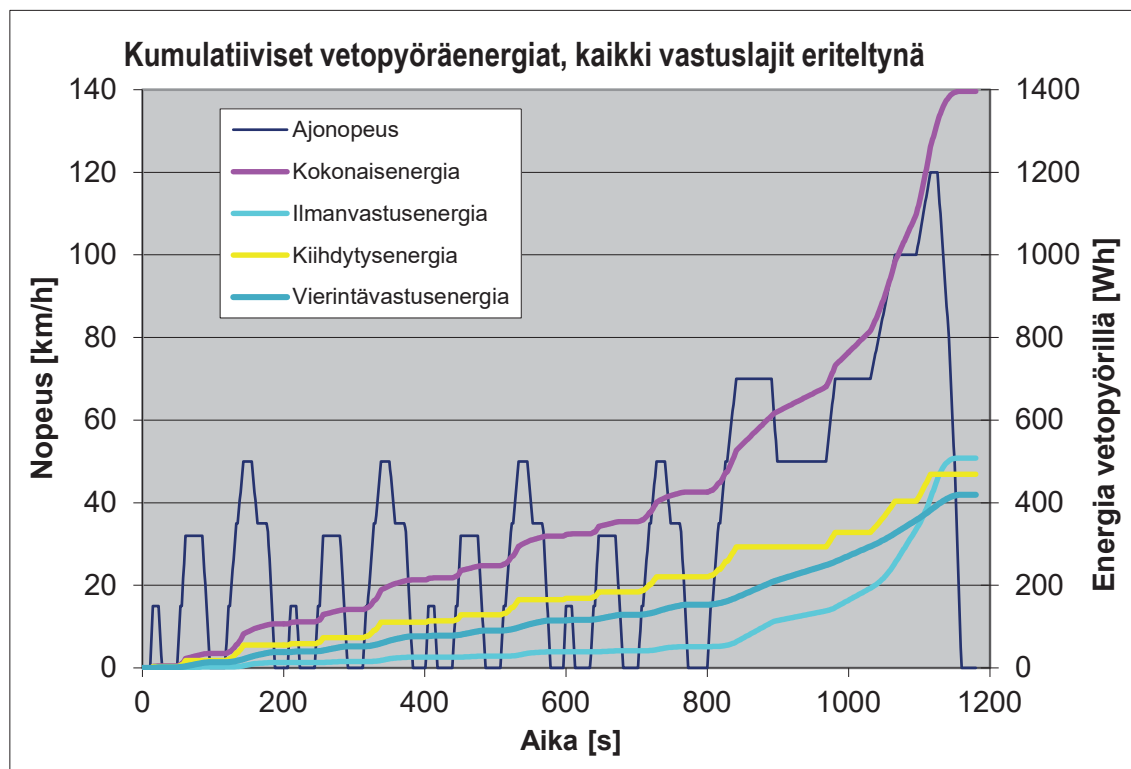
M6		$f_x = (((0.5 * SR\$11 * SR\$5 * SR\$6 * C6^2) + (SR\$7 * (1 + C6/1000) * SR\$4 * SR\$12)) * C6) / 3600$														
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	
1	ECE_EUDC-SYKLI	JOUTOK.	KELT. (alk. jo 10 km/h kohd.)	Kiihdy-	Kumul.	Kumul.	Ilman-	Kumul.	Vierintä-	Kumul.	Ajo-	Kumul.	Ener-	Kumul.		
2	Aika	Ajo-	Ajo-	tys-	energia	energia	vastus-	energia	vastus-	energia	vastus-	energia	summa	energia-		
3	nopeus	nopeus	matka	hidastuvuus /	energia	energia	energia	energia	energia	energia	energia	energia	energia	energia-		
4	[s]	[km/h]	[m/s]	matka	km/h/s	m/s ²	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	
5	0	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
6	1	0.00	0.00	0	Auto paikallaan		0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
7	2	0.00	0.00	0	293 s		0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
8	3	0.00	0.00	0	(24.8 % ajasta)		0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
9	4	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
10	5	0.00	0.00	0	Joutokäyntiä		0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
11	6	0.00	0.00	0	338 s (28.6 %)		0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
12	7	0.00	0.00	0	(alkaa jo hidastusten aikana)		0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
13	8	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
14	9	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
15	10	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
16	11	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00
17	12	3.75	1.04	1	3.75	1.04	0.21	0.21	0.000	0.00	0.039	0.04	0.039	0.04	0.25	0.25
18	13	7.50	2.08	3	3.75	1.04	0.62	0.83	0.001	0.00	0.078	0.12	0.079	0.12	0.70	0.95
19	14	11.25	3.13	6	3.75	1.04	1.04	1.86	0.004	0.01	0.117	0.23	0.121	0.24	1.16	2.10
20	15	15.00	4.17	10	3.75	1.04	1.45	3.32	0.009	0.01	0.157	0.39	0.166	0.41	1.62	3.72
21	16	15.00	4.17	15			0.00	3.32	0.009	0.02	0.157	0.55	0.166	0.57	0.17	3.89
22	17	15.00	4.17	19			0.00	3.32	0.009	0.03	0.157	0.71	0.166	0.74	0.17	4.05
23	18	15.00	4.17	23			0.00	3.32	0.009	0.04	0.157	0.86	0.166	0.90	0.17	4.22
24	19	15.00	4.17	27			0.00	3.32	0.009	0.05	0.157	1.02	0.166	1.07	0.17	4.39
25	20	15.00	4.17	31			0.00	3.32	0.009	0.06	0.157	1.18	0.166	1.24	0.17	4.55
26	21	15.00	4.17	35			0.00	3.32	0.009	0.07	0.157	1.33	0.166	1.40	0.17	4.72
27	22	15.00	4.17	40			0.00	3.32	0.009	0.08	0.157	1.49	0.166	1.57	0.17	4.88
28	23	15.00	4.17	44			0.00	3.32	0.009	0.09	0.157	1.65	0.166	1.73	0.17	5.05
29	24	12.00	3.33	47	-3.00	-0.83	0.00	3.32	0.005	0.09	0.125	1.77	0.130	1.86	0.13	5.18
30	25	9.00	2.50	50	-3.00	-0.83	0.00	3.32	0.002	0.09	0.094	1.86	0.096	1.96	0.10	5.28
31	26	6.00	1.67	51	-3.00	-0.83	0.00	3.32	0.001	0.10	0.063	1.93	0.063	2.02	0.06	5.34
32	27	3.00	0.83	52	-3.00	-0.83	0.00	3.32	0.000	0.10	0.031	1.96	0.031	2.05	0.03	5.37
33	28	0.00	0.00	52	-3.00	-0.83	0.00	3.32	0.000	0.10	0.000	1.96	0.000	2.05	0.00	5.37
34	29	0.00	0.00	52			0.00	3.32	0.000	0.10	0.000	1.96	0.000	2.05	0.00	5.37
35	30	0.00	0.00	52			0.00	3.32	0.000	0.10	0.000	1.96	0.000	2.05	0.00	5.37

Taulukosta 11 ilmenevät aika-ajonopeus -lukuparit sekunnin välein (sarakkeet A ja B). Nopeus on direktiivin mukainen (Direktiivi 91/441/EEC: 33–39) sellaisena, jollaiseksi se muutettiin Euro 3 -tasolle siirryttäessä (Direktiivi 98/69/EC: 30). Tuolloin testin alusta jätettiin 40 sekunnin joutokäynti pois ennen pakokaasunkeruun aloittamista. Ajonopeus on yksikössä m/s sarakkeessa C. Sarake D laskee kumulatiivista ajomatkaa, ja sarakkeissa E ja F ovat kiihtyvyys ja hidastuvuus kahdessa eri yksikössä. Tyhjät kohdat näissä sarakkeissa ilmentävät vakionopeusjaksoja.

Sarake G laskee hetkellisen kiihdytysenergian, ja sarake H summaa sitä kumulatiivisesti. Sarakkeet I ja J laskevat hetkelliset ja kumulatiiviset ilmanvastusenergiat. Sarakkeet K ja L esittävät hetkellistä ja kumulatiivista vierintävastusenergiaa. Sarakkeissa M ja N on ajovastusenergia eli ilman- ja vierintävastusenergian summa. Kokonaisenergia on sarakkeissa O ja P.

Keltaisella värjättyt alueet taulukossa 11 liittyvät joutokäyntiajan laskentaan. Testistandardin mukaan manuaalivaihteisessa autossa kytkinpoljin on painettava hidastuksissa pohjaan nopeudella 10 km/h. Tästä seuraa, että joutokäyntiaikaa on testin aikana hieman enemmän (338 s, 28,6 %) kuin auton paikallaan oloa (293 s, 24,8 %).

Kuvassa 14 on esitetty taulukon 11 laskennan tuottamat koko NEDC-syklin yli (1180 s) lasketut tulokset graafisesti. Käyrät esittävät kumulatiivista kunkin vastuslajin vetopyöräenergiaa sekä kokonaisenergiaa. Ajonopeuskäyrä on taustalla.

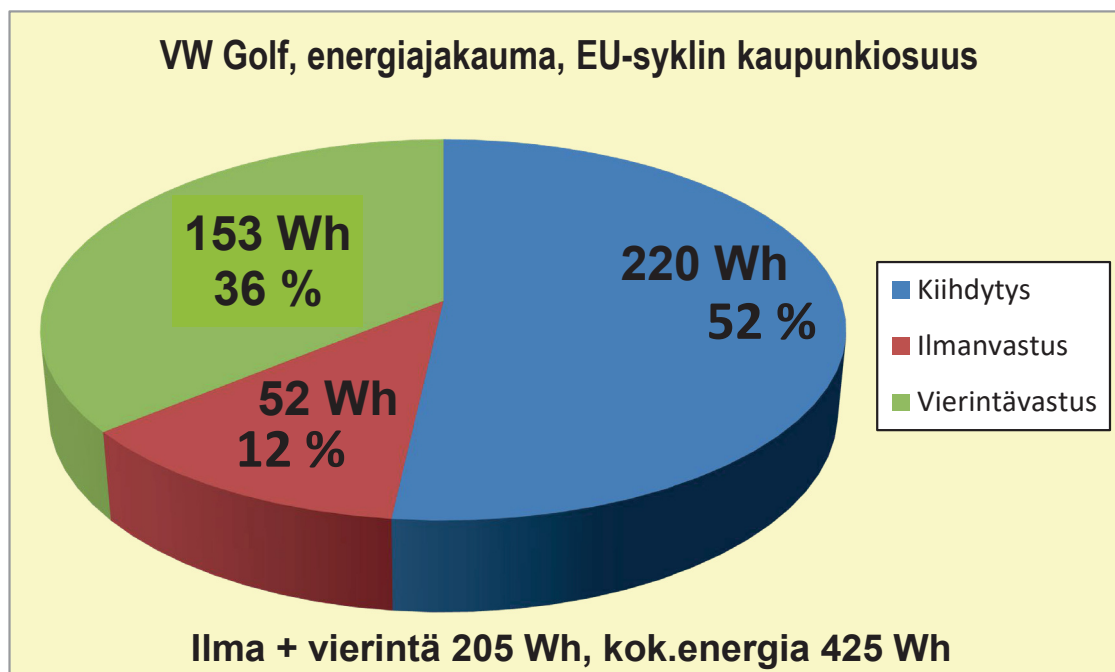


Kuva 14. VW Golfin vetopyöräenergian kertyminen simuloitussa EU-syklissä.

Kuvasta 14 nähdään, että ilmanvastuksen osuus on suurin, 510 Wh. Kiihdytyksiin kuluu 470 Wh ja vierintävastukseen 420 Wh. Ilman- ja vierintävastuksen summa on 930 Wh, josta ilman osuus on 55 % ja vierinnän 45 %. Kokonaisenergia on suunnilleen 1400 Wh, joka jakaantuu melko tasaisesti ilman-, vierintä- ja kiihdytysvastuksen kesken.

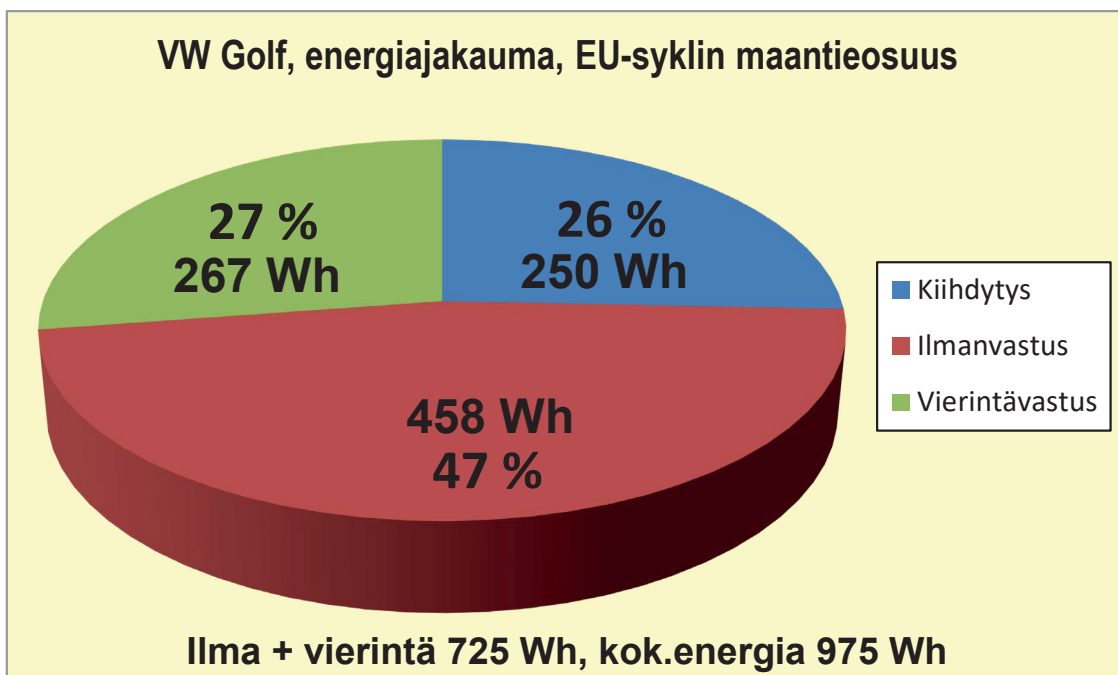
Kuvasta havaitaan myös, että ajonopeuden mukana kasvavan ilmanvastusenergian käyrä nousee syklin kaupunkiajovaiheessa loivasti, mutta nousu jyrkkenee selvästi maantieosuuden suuremmilla nopeuksilla. Ilman- ja vierintävastuksen summan osuus kokonaisenergiasta on 66 %, joten kiihdytysten osuudeksi jää 34 %.

Kuvan 14 käyrien laskennan (taulukko 11) mukaiset virallisessa NEDC-testisyklissä VW Golfille simuloitut eritellyt kiihdytys-, ilmanvastus ja vierintävastusenergiat on esitetty kuvissa 15, 16 ja 17. Testin kaupunkiosuus on esitetty kuvassa 15, maantieosuus kuvassa 16 ja koko testi kuvassa 17. Kuvissa esitetään sekä absoluuttiset energiamäärät että niiden suhteelliset jakaumat.



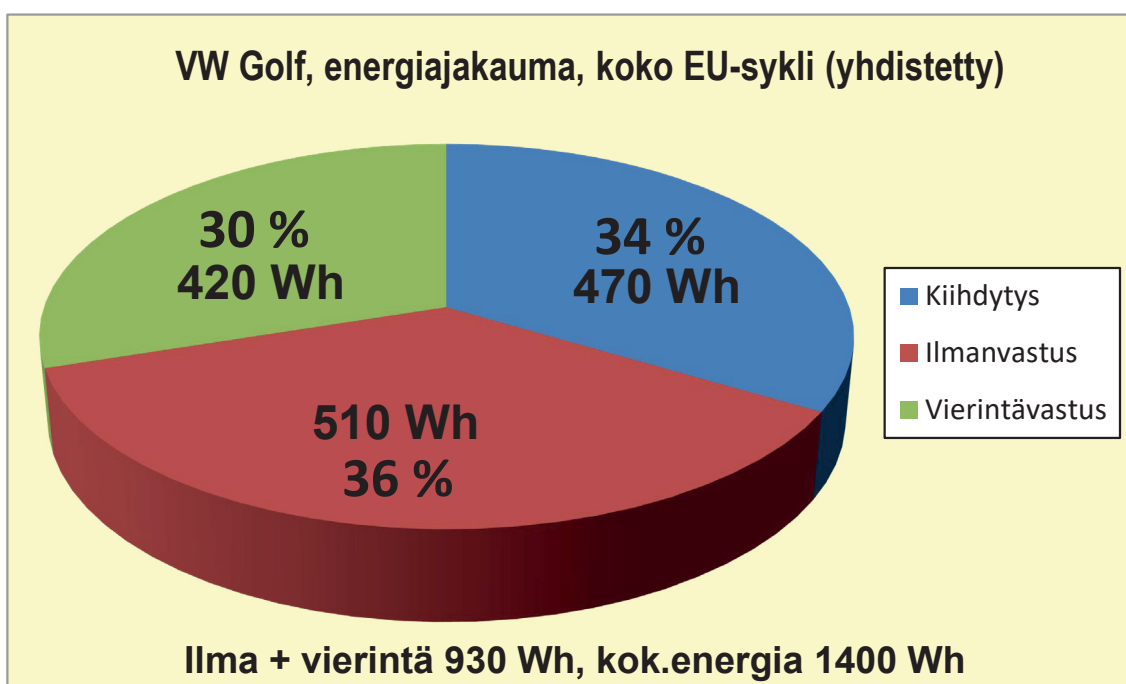
Kuva 15. VW Golfin vetopyöräenergian jakautuminen EU-syklin kaupunkiosuudessa.

Kuvan 15 mukaan syklin kaupunkiosuudessa kiihdytysenergiaa tarvitaan enemmän kuin ilman- ja vierintävastusenergiaa yhteensä. Tämä osoittaa, että taloudelliseen ajamiseen pyrittäessä nopeuden ylläpitäminen eli kiihdytysten minimointi on ratkaisevassa asemassa erityisesti pienillä ajonopeuksilla, jolloin ilmanvastuksen osuus vastuksista jää vähäiseksi.



Kuva 16. VW Golfin vetopyöräenergian jakautuminen EU-syklin maantieosuudessa.

Kuva 16 osoittaa, että testisyklin maantieosuudessa kiihdytysten ja vierintävastuksen osuudet ovat suunnilleen samansuuruiset: kumpikin edustaa runsasta neljännestä kokonaisvastuksista. Ilmanvastuksen osuudeksi muodostuu lähes puolet kokonaisuudesta.



Kuva 17. VW Golfin vetopyöräenergian jakautuminen koko EU-testisyklissä.

Kuvan 17 mukaan koko NEDC-syklissä ilmanvastuksen osuus on suurin (36 %) ja vierintävastuksen pienin (30 %). Kiihdytysten osuus (34 %) osuu näiden väliin. Kaikkien kolmen vastuslajin osuudet ovat suuruudeltaan lähellä toisiaan.

4.2.3 Lisämassan kulutuslisä

Taulukossa 12 on esitetty simuloitu polttoaineenkulutuksen absoluuttinen ja suhteellinen lisäys, kun VW Golf 1,6 FSI:hin lisätään kuormaa NEDC-testin kaupunkiosuudessa sekä koko testissä.

Taulukko 12. Lisäkuorman 50–400 kg aiheuttamat kulutuslisät NEDC-testissä.

VW Golf 1.6 FSI, korimalli V (2003...2008)				
Lisäkuorman aiheuttama lisäkulutus				
absoluuttisina sekä suhteellisina arvoina normitestissä				
Liikutettava massa [kg]	Testin kaupunkiosuus (4.052 km) Virallinen kulutus 8.5 l/100 km		Koko normitesti (11.007 km) Virallinen kulutus 6.4 l/100 km	
	[l/100 km]	[%]	[l/100 km]	[%]
1375 kg				
+ 50 kg	< 0.2	2	0.1	1
+ 100 kg	0.3	> 3	0.2	< 3
+ 150 kg	< 0.5	5	< 0.3	4
+ 200 kg	0.6	7	< 0.4	5
+ 250 kg	0.7	9	< 0.5	7
+ 300 kg	0.9	10	0.5	8
+ 350 kg	1.0	12	0.6	9
+ 400 kg	1.2	14	0.7	11

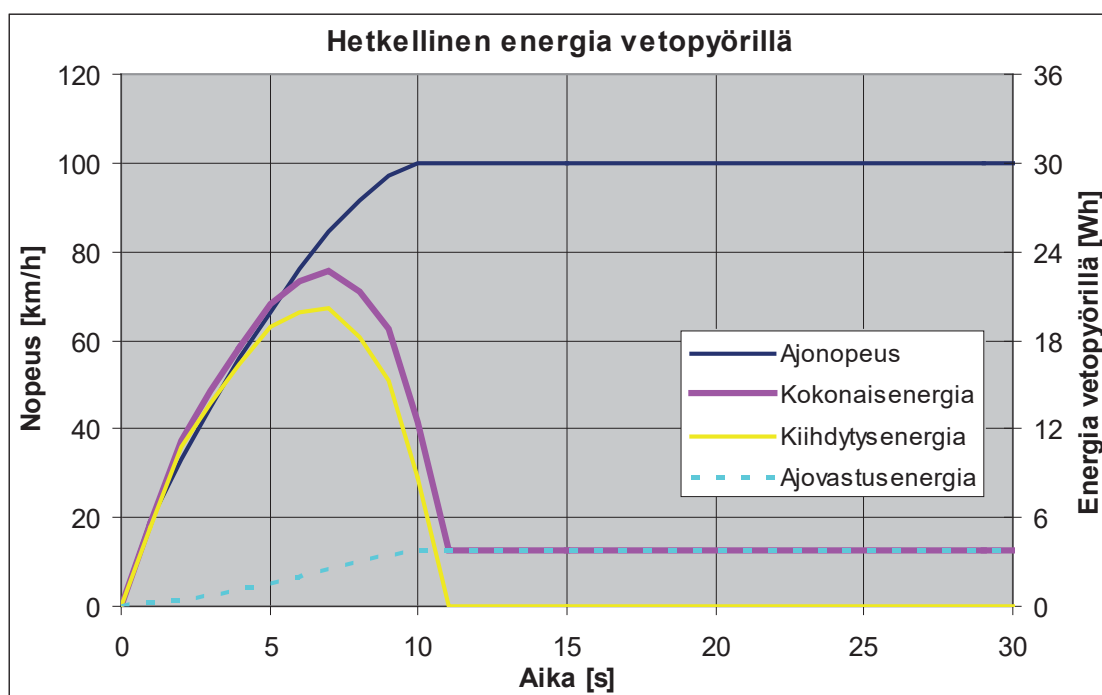
Taulukon 12 mukaan kulutuksen kasvu virallisen NEDC-syklän kaupunkiosuudessa oli 0,2–1,2 l/100 km (2–14 %), kun kuorma lisääntyy 50–400 kg. Koko syklissä vastaavaksi kasvuksi saatiin 0,1–0,7 l/100 km (1–11 %).

4.3 Eri kiihdytysnopeudet tasamaalla

Drives'in avulla verrattiin toisiinsa täyskaasukiihdytystä (0–100 km/h 10 sekunnissa) sekä kohtalaista kiihdytystä (0–100 km/h 20 sekunnissa) VW Golf 1,6 FSI:llä.

4.3.1 Täyskaasukiihdytys

Täyskaasukiihdytyksen simuloimiseksi luotiin kuvassa 18 esitetty kiihdytyskäyrä. Nopeusväli 0–100 km/h kiihdytetään 10 sekunnissa, ja tämän jälkeen nopeus pidetään vakiona.



Kuva 18. Ajonopeus sekä sekuntikohtaiset vetopyöräenergiat VW Golfilla kiihdytettäessä 0–100 km/h 10 sekunnissa.

Kuvaan 18 on piirretty myös kunkin sekunnin aikana vallitsevat energiat vetopyörillä. Korkeimmalle nouseva vastuskäyrä on kokonaisenergia. Toiseksi korkeimmalle nouseva käyrä esittää kiihdytysenergiaa, ja alimmaksi jäävä katkoviivakäyrä ajovastusenergiaa (ilman- ja vierintävastuksen summa), joka jää kiihdytyksen aikana selvästi kiihdytysenergiaa vähäisemmäksi. Vakionopeusjakson alkaessa kokonaisenergian ja ajovastusenergian käyrät yhdistyvät, koska kiihdytysenergiaa ei enää kulu. Koska simuloidaan tasamaata, nousuenergiaa ei tarvita.

Taulukossa 13 on esitetty Drives'illä laskettu kuvan 18 pohjana oleva taulukko VW Golfille 10 sekunnin täyskaasukiihdytyksessä 0–100 km/h tasamaalla.

Taulukko 13. VW Goflin energiakertymien laskenta täyskaasukiihdytyksessä tasamaalla.

G6 =IF(\$C6-\$C5>0;((0.5*\$O4*\$C6^2)-(0.5*\$O4*\$C5^2))/3600;0)													
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2	KIIHDYTYS 0-100 km/h, 10 sekunnissa, VW Golf, korimalli V												
3			Kumul.				Kiihd.	Kumul.	Ajovastus-	Kumul.	Vetopyörä-	Hetkell.	Kumul.vetop.
4	Aika	Nopeus	Nopeus	matka	Kiiht./hidastuvuus		energia	kiihd.energ.	energia	ajov.energ.	energia yht.	vetop.teho	energia
5	[s]	[km/h]	[m/s]	[m]	km/h/s	m/s ²	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	kW	Wh
6	0	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.0	0.00
7	1	19.00	5.28	5	19.00	5.28	5.32	5.32	0.219	0.22	5.54	19.9	5.54
8	2	33.00	9.17	14	14.00	3.89	10.73	16.05	0.448	0.67	11.18	40.2	16.71
9	3	45.00	12.50	27	12.00	3.33	13.79	29.84	0.728	1.40	14.52	52.3	31.24
10	4	56.00	15.56	43	11.00	3.06	16.37	46.21	1.078	2.47	17.45	62.8	48.68
11	5	66.50	18.47	61	10.50	2.92	18.95	65.16	1.516	3.99	20.47	73.7	69.15
12	6	76.00	21.11	82	9.50	2.64	19.95	85.11	2.016	6.01	21.96	79.1	91.12
13	7	84.50	23.47	106	8.50	2.36	20.10	105.22	2.559	8.56	22.66	81.6	113.78
14	8	91.50	25.42	131	7.00	1.94	18.15	123.37	3.081	11.64	21.23	76.4	135.01
15	9	97.00	26.94	158	5.50	1.53	15.28	138.65	3.542	15.19	18.82	67.7	153.63
16	10	100.00	27.78	186	3.00	0.83	8.71	147.36	3.814	19.00	12.52	45.1	166.36

Kun VW Golfilla kiihdytetään väli 0–100 km/h, on kineettisen energian muutos lausekkeella 5 laskettuna 147 Wh. Drives'in antama tulos sekunneittain summattuna päättyy samaan (taulukko 13, sarake H).

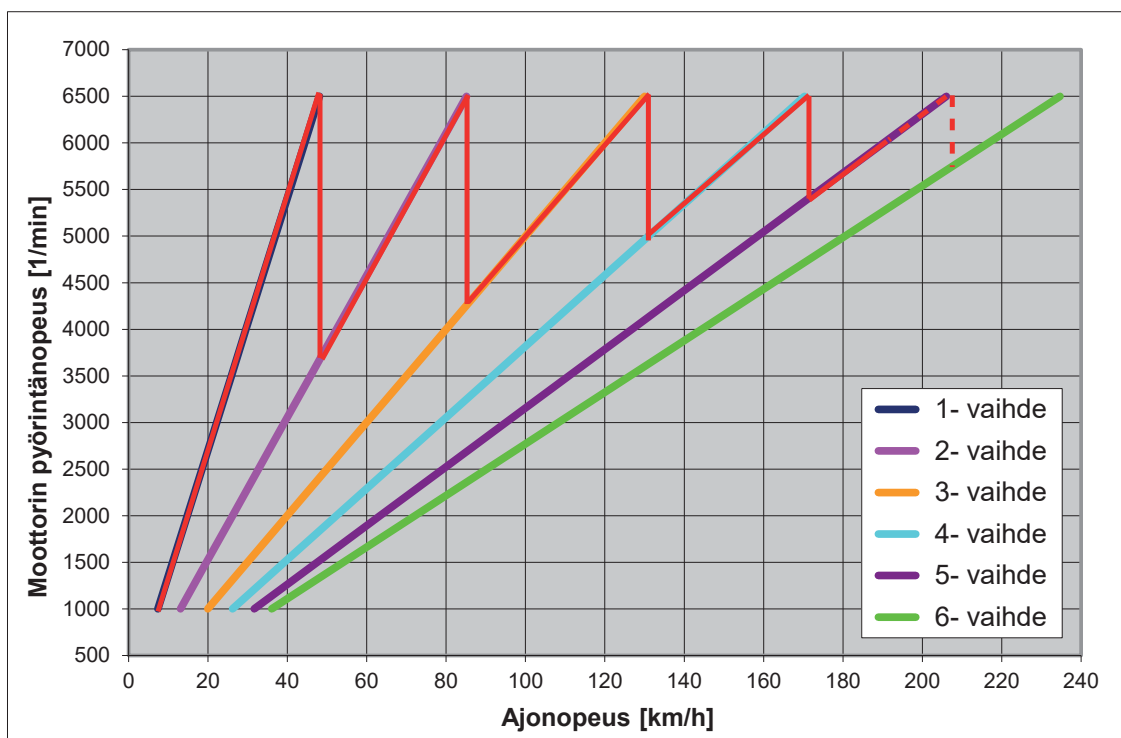
Taulukon 13 sarake J osoittaa, että ajovastuksista (ilman- ja vierintävastus) kertyvä energiantarve vetopyörillä on 19 Wh. Tämä on vain 13 % massan kiihdyttämiseen tarvittavasta energiasta (147 Wh). Syynä ajovastusenergiakertymän vähäisyyteen on lyhyt kiihdytysaika ja -matka. Kokonaisvetopyöräenergiaksi muodostuu 166 Wh (sarake M), josta ajovastusten osuus (19 Wh) on vain runsas 11 %.

Moottorienergian laskemiseksi vetopyöräenergia 166 kWh jaetaan voimansiirron hyötysuhteella 0,90:llä (Irimescu ym. 2011). Näin saadaan pyörille siirtyväksi moottorienergiaksi 185 Wh. Kampiakselilta otettava apulaitetehto arvioidaan 0,3 kW:ksi. Tällä teholla 10 sekunnin kiihdytyksen aikana apulaite-energiaa tarvitaan vain vajaa wattitunti. Kokonaisuutena moottorienergiaksi muodostuu siis 186 Wh.

Polttoainekulutuksen määrittämiseksi tarvitaan moottorin keskimääräinen hyötysuhde kiihdytyksen aikana. Tämän selvittämiseksi on arvioitava, millä alueella ominaiskulutus-käyrästä (kuva 3) 1,6 FSI -moottori toimii, kun kiihdytetään täyskaasulla.

Moottorin toimintapiste liikkuu maksimimomentin käyrää pitkin. Kun vaihdetaan ykköseltä kakkoselle maksimipyörintänopeudella 6500 1/min, pyörintänopeus putoaa noin

3600 1/min:iin. Vaihdoissa kakkoselta kolmoselle se putoaa runsaaseen 4000 1/min:iin, kolmoselta neloselle noin 5000 1/min:iin, ja neloselta viitoselle vaihdettaessa suunnilleen 5500 1/min:iin (kuva 19).



Kuva 19. VW Golf 1,6 FSI:n vaihdeporrastukset ja pyörintänopeudet täyskaasukiihdytyksessä.

Em. pyörintänopeudet näkyvät kuvan 19 punaisen murtoviivan alaspäin osoittavien kärkien kohdalla. Nopeudesta 192 km/h (huippunopeus) ylöspäin viiva on piirretty katkoviivana, koska moottorin teho riittää tätä suurempiin nopeuksiin ainoastaan alamäessä.

Golf 1,6 FSI tarvitsee vain kolme ensimmäistä vaihdetta saavuttaakseen ajonopeuden 100 km/h. Näin ollen vain ykkös- ja kakkosvaihteen sekä kakkos- ja kolmosvaihteen väliset välityssuhdeporrastukset vaikuttavat pyörintänopeuksiin tarkasteltavalla kiihdytysvälillä. Täyskaasukiihdytyksen 0–100 km/h aikana käytettävät moottorin pyörintänopeudet ovat siten välillä 3700/4300–6500 1/min.

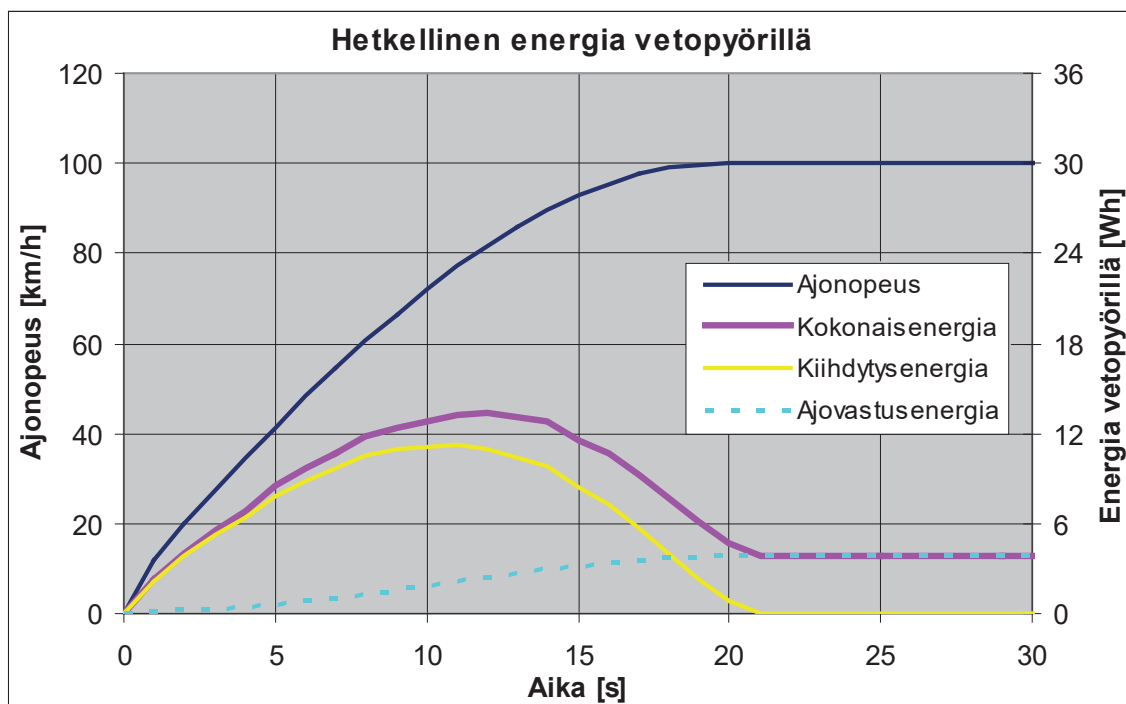
Keskimääräinen ominaiskulutus osuu ominaiskulutuskäyrästä (kuva 3) perustella täyskaasukiihdytyksessä käyrän 270 g/kWh vaiheille, koska kuormitus on rajamomentilla ja moottorin pyörintänopeudet liikkuvat mainitulla välillä 3700/4300–6500 1/min. Moottorin hyötysuhde määritetään ominaiskulutuksen avulla käyttäen kaavaa (10).

Ominaiskulutuksen arvolla 0,270 kg/kWh ja bensiinin energiasisällöllä 11,81 kWh/kg (42,5 MJ/kg) saadaan moottorin kokonaishyötysuhteeksi täyskaasukiihdytyksessä 0,31. Kun kokonaisenergia 0,186 kWh jaetaan moottorin hyötysuhteella 0,31, saadaan tarvittavaksi polttoaine-energiaksi 0,60 kWh. Kun tämä jaetaan bensiinin energiasisällöllä 8,8 kWh/l, saadaan kiihdytyksessä tarvittavaksi polttoainemääräksi 0,068 l.

Kiihdytysmatka on Drives'illä laskettuna 186 m (taulukko 13, sarake D). Tälle matkalle polttoaineenkulutus on täyskaasukiihdytyksen aikana 37 l/100 km.

4.3.2 Kohtalainen kiihdytys

Kohtalaisen kiihdytyksen (0–100 km/h 20 sekunnissa) simuloimiseksi luotiin kuvassa 20 esitetty kuvan 18 kiihdytyskuvaajaa loivempi kiihdytyskäyrä. Kuvassa näkyvät myös sekuntikohtaiset kiihdytys- ja ajovastusenergiat vetopyörillä.



Kuva 20. Ajonopeus sekä sekuntikohtaiset vetopyöräenergiat VW Golfilla kiihdytettäessä 0–100 km/h 20 sekunnissa.

Kuva 20 osoittaa, että kiihdytysenergia on tässäkin tapauksessa kiihdytyksen aikana selvästi ajovastusenergiaa suurempi. Ero tosin on pienempi kuin edellä esitetystä täyskaasukiihdytyksessä. Kokonais- ja kiihdytysenergian käyrät erkaantuvat toisistaan ajovastusenergian kasvaessa nopeuden myötä. Kokonais- ja ajovastusenergia vakiintuvat noin 4 Wh:iin per sekunti, kun kiihdytys on päättynyt. Käyrien laskenta ilmenee taulukosta 14.

Taulukko 14. VW Goflin energiakertymien laskenta kohtalaisessa kiihdytyksessä tasamaalla.

=(((0.5*\$O\$11*\$O\$5*\$O\$6*\$C6^2)+(\$O\$7*(1+C6/1000)*\$O\$4*\$O\$12))*C6)/3600												
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
KIIHDYTYS 0-100 km/h 20 sekunnissa, VW Golf, korimalli V												
Aika	Nopeus	Nopeus	Kumul. matka	Kiiht./hidastuvuus	Kiihd. energia	Kumul. kiihd. energ.	Ajovastus-energia	Kumul. ajov. energ.	Vetopyörä-energia yht.	Hetkell. vetop. teho	Kumul. vetop. energia	
[s]	[km/h]	[m/s]	[m]	km/h/s	m/s ²	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	kW	Wh
0	0.00	0.00	0			0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.0	0.00
1	12.00	3.33	3	12.00	3.33	2.12	2.12	0.130	0.13	2.25	8.1	2.25
2	20.00	5.56	9	8.00	2.22	3.77	5.89	0.231	0.36	4.00	14.4	6.26
3	27.50	7.64	17	7.50	2.08	5.25	11.14	0.345	0.71	5.59	20.1	11.85
4	34.50	9.58	26	7.00	1.94	6.40	17.54	0.475	1.18	6.87	24.7	18.72
5	41.50	11.53	38	7.00	1.94	7.84	25.38	0.632	1.81	8.47	30.5	27.19
6	48.20	13.39	51	6.70	1.86	8.86	34.23	0.814	2.63	9.67	34.8	36.86
7	54.60	15.17	66	6.40	1.78	9.69	43.93	1.021	3.65	10.72	38.6	47.58
8	60.80	16.89	83	6.20	1.72	10.54	54.47	1.257	4.90	11.80	42.5	59.38
9	66.60	18.50	102	5.80	1.61	10.89	65.36	1.512	6.42	12.40	44.6	71.78
10	72.00	20.00	122	5.40	1.50	11.03	76.39	1.783	8.20	12.81	46.1	84.59
11	77.10	21.42	143	5.10	1.42	11.21	87.59	2.070	10.27	13.27	47.8	97.86
12	81.80	22.72	166	4.70	1.31	11.00	98.60	2.364	12.63	13.37	48.1	111.23
13	86.00	23.89	190	4.20	1.17	10.38	108.98	2.652	15.28	13.04	46.9	124.27
14	89.80	24.94	215	3.80	1.06	9.84	118.83	2.933	18.22	12.78	46.0	137.05
15	92.90	25.81	240	3.10	0.86	8.35	127.17	3.179	21.40	11.52	41.5	148.57
16	95.50	26.53	267	2.60	0.72	7.22	134.39	3.396	24.79	10.61	38.2	159.18
17	97.50	27.08	294	2.00	0.56	5.69	140.08	3.571	28.36	9.26	33.3	168.44
18	98.90	27.47	321	1.40	0.39	4.05	144.13	3.697	32.06	7.75	27.9	176.19
19	99.70	27.69	349	0.80	0.22	2.34	146.47	3.770	35.83	6.11	22.0	182.30
20	100.00	27.78	377	0.30	0.08	0.88	147.36	3.798	39.63	4.68	16.9	186.98

Kun väli 0–100 km/h kiihdytetään 20 sekunnissa, ajovastuksiin kiihdytyksen aikana kuluva energia nousee pitemmän ajomatkan takia 40 Wh:iin eli yli kaksinkertaiseksi täys-tehokiihdytykseen nähden (taulukko 14, sarake J). Kiihdytysenergia 147 Wh (sarake H) on sama kuin täyskaasukiihdytyksessä. Ajovastusenergia 40 Wh on 27 % kiihdytysenergiasta. Vetopyöräenergiaa tarvitaan kaikkiaan 187 Wh (sarake M).

Voimansiirron hyötysuhde (0,90) huomioon ottaen moottorilta tarvitaan vetopyörille run-sas 207 Wh, ja kun tähän lisätään vajaa 2 Wh apulaite-energiaa, saadaan moottorilta tarvittavaksi kokonaisenergiaksi 209 Wh.

Määritetään moottorin hyötysuhde kulutuksen laskemiseksi. Kohtalaisessa kiihdytyksessä käytetään pienempiä pyörintänopeuksia kuin täyskaasukiihdytyksessä, eikä moottoria kuormiteta rajamomentille saakka. Taulukon 14 perusteella hetkellinen vetopyörätehon tarve on 30–50 kW (sarake L), joka voimansiirron hyötysuhde huomioon ottaen vaatii moottoritehoa 33–56 kW.

Kun kiihdytetään kohtalaisesti, täytyy arvioida, millä kuvan 3 ominaiskulutuskäyrästäön pyörintänopeuksien ja tehollisten keskipaineiden yhdistelmällä moottoritehoksi muodostuu mainitut 33 ja 56 kW.

Kaavaa (10) käyttäen tuloksina saadaan, että teho 33 kW saavutetaan esim. 3500 1/min pyörintänopeudella 7,1 barin tehollisella keskipaineella ja teho 56 kW esim. 5000 1/min pyörintänopeudella 8,4 barin tehollisella keskipaineella. Ominaiskulutuskäyrästä havaitaan, että moottorin ominaiskulutus näiden pisteiden välisellä alueella on suunnilleen 250 g/kWh, joka vastaa kokonaishyötysuhdetta 0,34.

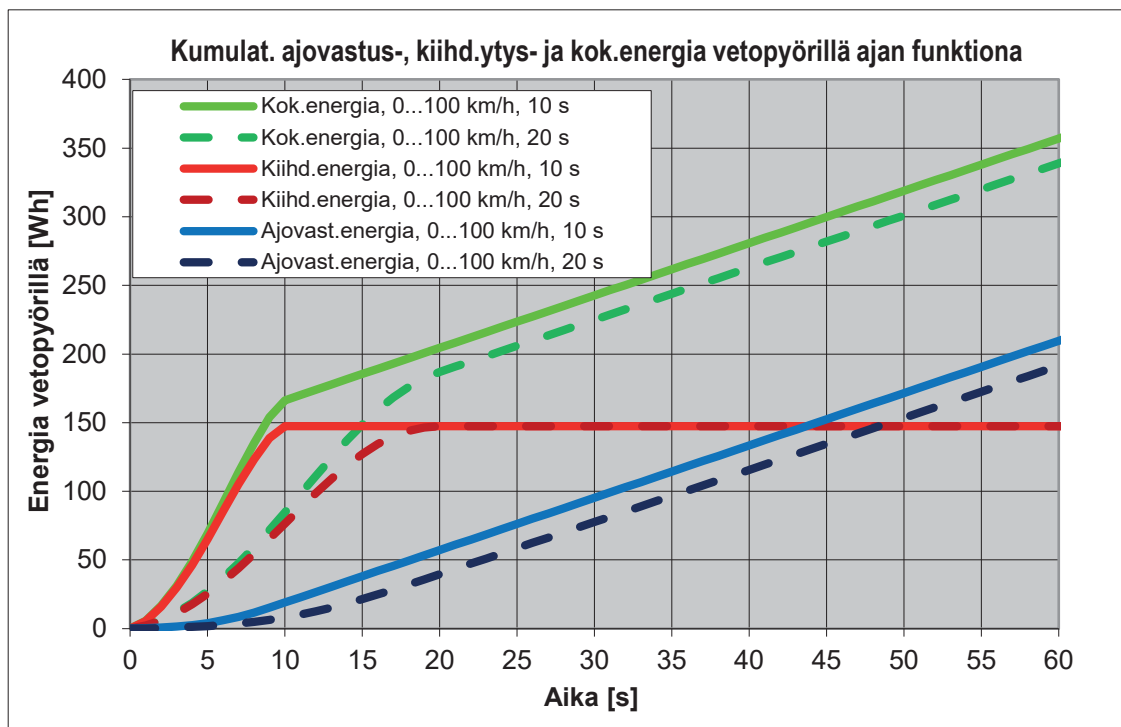
Kun tarvittava kokonaisenergia 0,209 kWh jaetaan moottorin kokonaishyötysuhteella, saadaan tarvittavaksi polttoaine-energiaksi 0,62 kWh. Tämä vastaa 0,070 litran bensiiniannosta (energiasisältö 8,8 kWh/l). Polttoainekulutukseksi kiihdytysmatkalle 377 m muodostuu 19 l/100 km.

4.3.3 Kiihdytysnopeuksien vertailu

Kohtalaiseen kiihdytykseen tarvittava polttoainemäärä 0,070 l on suurempi kuin täyskaasun 0,068 l. Täyskaasukiihdytys ei kuitenkaan ole näistä taloudellisempi, koska nopeuden 100 km/h saavuttamiseksi auto on täyskaasulla liikkunut 186 m, joka on vain puolet kohtalaisen kiihdytyksen 377 metristä. Kohtalaisesti kiihdyttäen pystyy siis ajamaan samalla polttoainemäärällä lähes kaksinkertaisen matkan. Kohtalaisen kiihdytyksen kulutus matkaa kohti on 19 l/100 km, kun se täyskaasukiihdytyksessä on 37 l/100 km.

Kohtalaisessa kiihdytyksessä moottori toimii lähellä pienimmän ominaiskulutuksen alueella, koska sitä käytetään hieman alle rajamomentin kuormituksella. Tosin 20 sekunninkin kiihdytys näyttäisi olevan liian nopea moottorin ominaiskulutusminimin saavuttamiseksi, koska tarvittavat pyörintänopeudet ovat jonkin verran korkeampia kuin ominaiskulutusminimin pyörintänopeus.

Kuvassa 21 näkyvät ajovastusenergia (ilman- ja vierintävastuksen summa), kiihdytysenergia sekä kokonaisenergia molemmilla kiihdytysnopeuksilla. Mukana ovat kiihdytykset ja niiden jälkeinen vakionopeusajo nopeudella 100 km/h 60 sekuntiin saakka.



Kuva 21. Ajonopeus sekä kumulatiiviset vetopyöräenergiat VW Golfilla kiihdytettäessä 0–100 km/h 10:ssä ja 20 sekunnissa.

Kuvassa 21 täyskaasukiihdytyksen sininen ajovastuskäyrä kipuaa heti alussa korkeammalle kuin kohtalaisen kiihdytyksen sininen katkoviiva. Tämä johtuu kiivaamman nopeuden nousun aiheuttamasta ilmanvastusenergian kasvusta. Käyrät nousevat samansuuntaisina kiihdytysten jälkeen, kun ajoa jatketaan vakionopeudella 100 km/h.

Punaiset kiihdytysenergian käyrät saavuttavat lopullisen tasonsa 10:n ja 20 sekunnin kohdalla. Kokonaisenergian vihreiden käyrien kulmakertoimet loivenevat selvästi vakionopeusajoon siirryttäessä. Tämän jälkeen molemmat nousevat samansuuntaisina.

4.3.4 Vakionopeusjaksojen mukaanotto

Kulutuksen selvittämiseksi kiihdytysjaksoja pitemmässä ajossa tehtiin molemmille kiihdytystavoille laskelmat sisällyttäen tarkasteluun matkan jatkaminen 100 km/h vakionopeudella. Tarkastellut kokonaisajomatkat olivat 1000 m ja 10 000 m. Tulokset on esitetty taulukossa 15. Lisäksi taulukossa on esitetty kootusti pelkkien kiihdytysvaiheiden tulokset sekä tiedot pelkästä vakionopeusajosta nopeudella 100 km/h.

Taulukko 15. VW Golfin energiantarve sekä polttoaineenkulutus kiihdytettäessä tasamaalla 0–100 km/h 10 ja 20 sekunnissa sekä jatkettaessa ajoa vakionopeudella 1000 ja 10 000 metriin saakka. Vertailukohtana vakionopeus.

Laskennan kohde		Kiihdytysvaihe 0 - 100 km/h		Kiihdytys + vakionop. 1000 m saakka		Kiihdytys + vakionop. 10 000 m saakka		Vak.nop. 100 km/h
		10	20	10	20	10	20	Matka
Kiihd. aika 0...100 km/h	[s]	10	20	10	20	10	20	10 000 m
Kiihdytysenergia	[Wh]	147	147	147	147	147	147	
Ajovastusenergia	[Wh]	19	40	131	125	1367	1355	1373
Vetopyöräenergia yht.	[Wh]	166	187	278	272	1514	1503	1373
Moott.energia vetopyörille *)	[Wh]	185	208	309	302	1682	1670	1526
Jakson aika	[s]	10.0	20.0	39.3	42.4	363	366	360
Apulaite-energia **)	[Wh]	0.83	1.67	3.28	3.54	30	31	30.0
Energia moottorilta yht.	[Wh]	186	209	312	306	1713	1700	1556
Keskimäär. moottoriteho	[kW]	66.8	37.7	28.6	26.0	17.0	16.7	15.6
Jakson matka	[m]	186	377	1000	1000	10 000	10 000	10 000
Moottorin hyötysuhde		0.310	0.340	0.294	0.318	0.274	0.279	0.270
Polttoaine-energia	[kWh]	0.599	0.616	1.06	0.962	6.24	6.10	5.76
Jaksoon tarvitt. p-aine ***)	[l]	0.068	0.070	0.121	0.109	0.71	0.69	0.65
Jakson p-aineenkulutus	[l/100 km]	36.7	18.6	12.1	10.9	7.09	6.93	6.55
Lisäkul. vak.nop.nähdn	[%]	460	184	85	67	8.3	5.9	0.00
Täystehokiihd:n lisäkulutus	[%]	97		10		2.3		

*) Voimansiirron hyötysuhde 0.90

**) Apulaiteteho 300 W kampiakselilta

***) Benssiinin energiasisältö 8.80 kWh/l

Kiihdytyksen ja vakionopeusajon sisältäneissä tarkasteluissa moottorin hyötysuhteet määritettiin laskemalla energian mukaan painotetut keskiarvot kiihdytys- ja vakionopeusjaksojen hyötysuhteista. Nämä olivat moottorikartalta arvioidut kiihdytyshyötysuhteet (jo mainitut täyskaasu/kohtalainen 0,31/0,34) sekä Tekniikan Maaailma -lehden (9/2004) mittaamaan vakionopeuden 100 km/h polttoaineenkulutukseen (6,6 l/100 km) perustuva hyötysuhde 0,27.

Ajomatkoilla 1000 metriin saakka hyötysuhteet (täyskaasu 0,294 / kohtalainen 0,318) ovat odotetusti suuremmat kuin matkoilla 10 000 metriin saakka (0,274 ja 0,279). Kiihdytyksissä hyötysuhde on suurempi kuin vakionopeudella, ja lyhyemmällä ajomatkalla kiihdytyksen osuus on suurempi. Molemmilla matkoilla hyötysuhde on suurempi kohtalaisessa kuin täyskaasukiihdytyksissä. Kiihdytystapojen välinen suhteellinen hyötysuhde-ero tosin pienenee, kun matka kasvaa eli kiihdyttämisen osuus tarkastelujaksosta pienenee.

Kiihdytysjakson polttoainetarve on täyskaasukiihdytyksessä suunnilleen 3 % pienempi kuin kohtalaisessa (0,068 vs. 0,070 l). Sen sijaan matkaa kohti laskettuna täyskaasukiihdytyksen kulutus on lähes kaksinkertainen kohtalaiseen verrattuna (kulutuslisä 97 %, taulukko 15, alin rivi).

Ajomatkan 1000 m kohdalla täyskaasukiihdytyksen kulutus on 12,1 l/100 km ja kohtalaisen 10,9 l/100 km, jolloin täyskaasun kulutuslisä on 10 %. Matkan 10 000 m kohdalla vastaavat lukemat ovat 7,1 ja 6,9 l/100 km, jolloin täyskaasun kulutuslisä on enää runsas 2 %. Mitä pitempi matka kiihdyttämisen jälkeen ajetaan, sitä vähäisempi merkitys kulu- tukseen on kiihdytystavalla ja kiihdyttämällä ylipäänsä.

Vakionopeuden 100 km/h kulutukseen (n. 6,6 l/100 km) nähden täyskaasukiihdytyksen kulutus on suunnilleen 5,6-kertainen (kulutuslisä 460 %), mutta 1000 metrin ajon jälkeen enää 1,85-kertainen (kulutuslisä 85 %). Kun matka on edennyt 10 000 metriin saakka, kiihdytyslisä on enää alle 1,1-kertainen (kulutuslisä 8,3 %, taulukko 15, toiseksi alin rivi).

4.4 Eri kiihdytystavat ylämäessä

4.4.1 Yhtämittainen kiihdytys

Yhtämittaisen kiihdytyksen (VW Golf 1,6 FSI, 0–100 km/h 20 sekunnissa 5 %:n ylä- mäessä) ajonopeus- ja korkeusasemakuvaajat on esitetty edellä kuvassa 8. Laskenta ilmenee taulukosta 16.

Taulukko 16. VW Golfin energiakertymät 20 sekunnin yhtämittäisessä kiihdytyksessä 5 %:n ylämäessä.

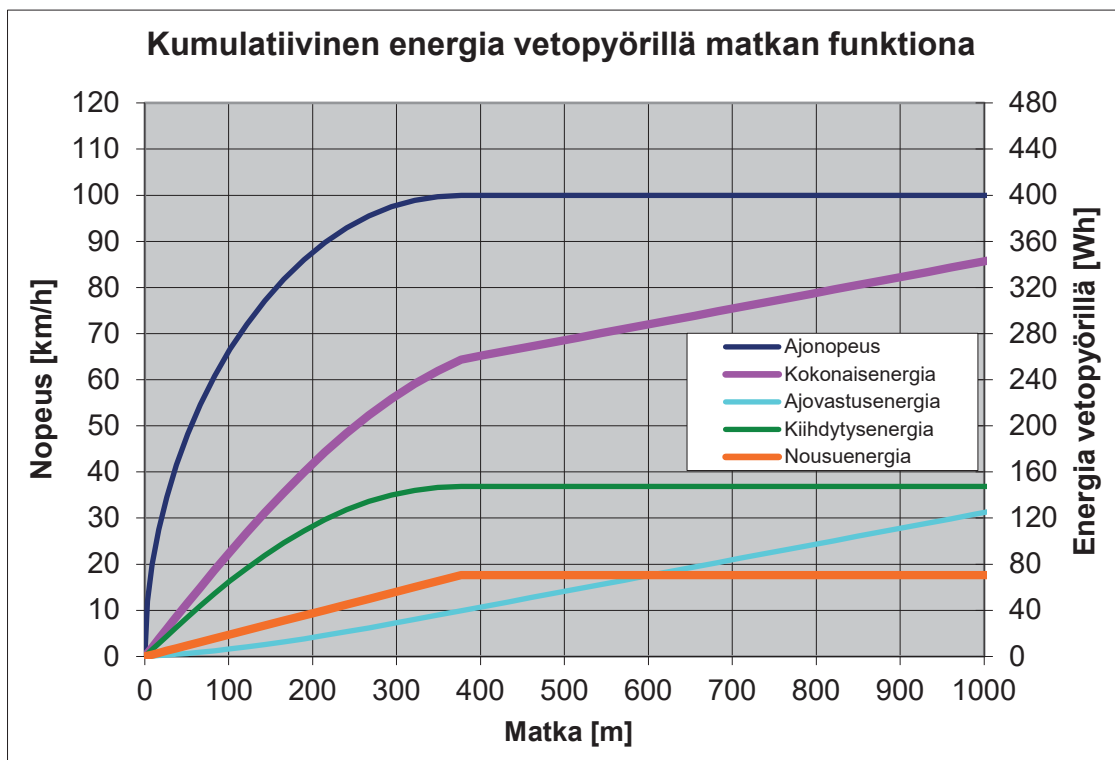
N7 =T86°T814°SIN(E7/(180/PI))°C7/3600																		
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	KIIHDYTYKSEN 0-100 km/h 20 sekunnissa, VW Golf, korimalli V, 5 %:n NOUSU																	
2																		
3				Pituus-							Kumul.	Ajo-	Kumul.		Kumul.	Veto-	Hetkell.	Kumul.
4		No-	No-	kalte-	Nousu-	Kumul.	Kumul.	Kiiht./	Kiiht./	Kiihd.	Kiihd.	vastus-	ajov.	Nousu-	nousu-	pyörä	vetop.	vetop.
5	Aika	peus	peus	vuus	kulma	nousu	matka	hidast	hidast	energia	energia	energia	energia	energia	energia	ergia yf	teho	energia
6	[s]	[km/h]	[m/s]	%	[astetta]	[m]	[m]	km/h/s	m/s ²	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	kW	Wh
7	0	0.00	0.00	5.00	2.86	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00
8	1	12.00	3.33	5.00	2.86	0.17	3	12.00	3.33	2.12	2.12	0.130	0.13	0.62	0.62	2.88	10.4	2.88
9	2	20.00	5.56	5.00	2.86	0.44	9	8.00	2.22	3.77	5.89	0.231	0.36	1.04	1.66	5.04	18.2	7.92
10	3	27.50	7.64	5.00	2.86	0.83	17	7.50	2.08	5.25	11.14	0.345	0.71	1.43	3.09	7.02	25.3	14.94
11	4	34.50	9.58	5.00	2.86	1.30	26	7.00	1.94	6.40	17.54	0.475	1.18	1.79	4.89	8.86	31.2	23.61
12	5	41.50	11.53	5.00	2.86	1.88	38	7.00	1.94	7.84	25.38	0.632	1.81	2.16	7.04	10.63	38.3	34.23
13	6	48.20	13.39	5.00	2.86	2.55	51	6.70	1.86	8.86	34.23	0.814	2.63	2.51	9.55	12.17	43.8	46.41
14	7	54.60	15.17	5.00	2.86	3.31	66	6.40	1.78	9.69	43.93	1.021	3.65	2.84	12.39	13.55	48.8	59.96
15	8	60.80	16.89	5.00	2.86	4.15	83	6.20	1.72	10.54	54.47	1.257	4.90	3.16	15.55	14.96	53.9	74.92
16	9	66.60	18.50	5.00	2.86	5.07	102	5.80	1.61	10.89	65.36	1.512	6.42	3.46	19.01	15.86	57.1	90.78
17	10	72.00	20.00	5.00	2.86	6.07	122	5.40	1.50	11.03	76.39	1.783	8.20	3.74	22.75	16.55	59.6	107.34
18	11	77.10	21.42	5.00	2.86	7.14	143	5.10	1.42	11.21	87.59	2.070	10.27	4.01	26.76	17.28	62.2	124.62
19	12	81.80	22.72	5.00	2.86	8.28	166	4.70	1.31	11.00	98.60	2.364	12.63	4.25	31.01	17.62	63.4	142.24
20	13	86.00	23.89	5.00	2.86	9.47	190	4.20	1.17	10.38	108.98	2.652	15.28	4.47	35.48	17.51	63.0	159.75
21	14	89.80	24.94	5.00	2.86	10.71	215	3.80	1.06	9.84	118.83	2.933	18.22	4.67	40.15	17.44	62.8	177.19
22	15	92.90	25.81	5.00	2.86	12.00	240	3.10	0.86	8.35	127.17	3.179	21.40	4.83	44.97	16.35	58.9	193.54
23	16	95.50	26.53	5.00	2.86	13.33	267	2.60	0.72	7.22	134.39	3.396	24.79	4.96	49.94	15.58	56.1	209.12
24	17	97.50	27.08	5.00	2.86	14.68	294	2.00	0.56	5.69	140.08	3.571	28.36	5.07	55.01	14.33	51.6	223.45
25	18	98.90	27.47	5.00	2.86	16.05	321	1.40	0.39	4.05	144.13	3.697	32.06	5.14	60.15	12.89	46.4	236.34
26	19	99.70	27.69	5.00	2.86	17.44	349	0.80	0.22	2.34	146.47	3.770	35.83	5.18	65.33	11.29	40.7	247.63
27	20	100.00	27.78	5.00	2.86	18.82	376.9	0.30	0.08	0.88	147.36	3.798	39.63	5.20	70.52	9.88	35.6	257.51

Ajonopeus on taulukon 16 sarakkeissa B ja C, pituuskaltevuus sarakkeissa D ja E ja korkeusasema sarakkeessa F. Matka on sarakkeessa G ja kiihtyvyydet sarakkeissa H ja I.

Hetkellinen kiihdytysenergia on sarakkeessa J ja vastaava kumulatiivinen sarakkeessa K. Ajovastusenergiat ovat vastaavasti sarakkeissa L ja M. Nousuvastusenergia lasketaan sekunneittain sarakkeessa N ja kumulatiivisesti sarakkeessa O. Kokonaisvetopyöräenergia näkyy sarakkeissa P (hetkellinen) ja R (kumulatiivinen).

Loppunopeus 100 km/h saavutetaan yhtämittäisessä kiihdytyksessä 377 metrin ajomatkan jälkeen kuten tasamaallakin. Tarvittava kokonaisenergia on 258 Wh, josta kiihdytyksen osuus on 147 Wh ja ajovastusten 40 Wh kuten tasamaallakin. Nousun osuudeksi muodostuu 71 Wh. Suhteelliset osuudet ovat seuraavat: kiihdytys 57 %, ajovastukset 15 % ja nousu 28 %.

Taulukon 16 mukaiset vetopyöräenergiakuvaajat on esitetty graafisesti kuvassa 22 ajomatkan funktiona 1000 metrin matkaan saakka.



Kuva 22. Kumulatiiviset vetopyöräenergiat ajomatkan funktiona VW Golfin yhtämittaisessa kiihdytyksessä 0–100 km/h 20 s:ssä 5 %:n ylämäkeen. Kiihdytysmatka 377 m, jonka jälkeen matka jatkuu tasamaalla. Tarkastelu 1000 metriin saakka.

Kuvan 22 nousuenergiäkäyrä (oranssi) taittuu terävästi vaakatasoon matkan 377 m kohdalla, jossa ylämäki loppuu. Käyrä asettuu 71 Wh:n korkeudelle, jossa se pysyy vakiona. Nousua on kaikkiaan 18,82 m. Vihreä kiihdytysenergiäkäyrä nousee niin ikään 377 metriin saakka, jota ennen käyrän nousu loivenee kiihdytyksen hidastuessa ja asettuu sen päättyessä vakioarvoon 147 Wh.

Turkoosilla esitetty ajovastusenergia nousee nopeuden kasvaessa kulmakerrointaan hieman kasvattaen ajomatkaan 377 m saakka, jonka jälkeen se jatkaa vakiokaltevuudella ylöspäin, koska ajonopeus pysyy vakiona. Ajomatkan 1000 m kohdalla ajovastusenergiaa on kulunut 125 Wh.

Summakäyrässä (vaaleanpunainen) on epäjatkuvuuskohta ajomatkan 377 m kohdalla, koska sekä kiihdyttäminen että mäen nouseminen päättyvät. Tämän jälkeen kuvaaja

muuttuu suoraksi, jonka kulmakerroin on vakio 0,137 ja on sama kuin turkoosilla ajo-
vastuskäyrällä. Summakäyrä päättyy 343 Wh:iin.

4.4.2 Viivästetty kiihdytys

Viivästetyn kiihdytyksen ajonopeus- ja matkakuvaajat on esitetty aiemmin kuvassa 9.
Laskenta ilmenee taulukosta 17. Taulukko kattaa 44 sekuntia, joka tarvitaan tällä kiih-
dytystavalla nopeuden 100 km/h saavuttamiseen.

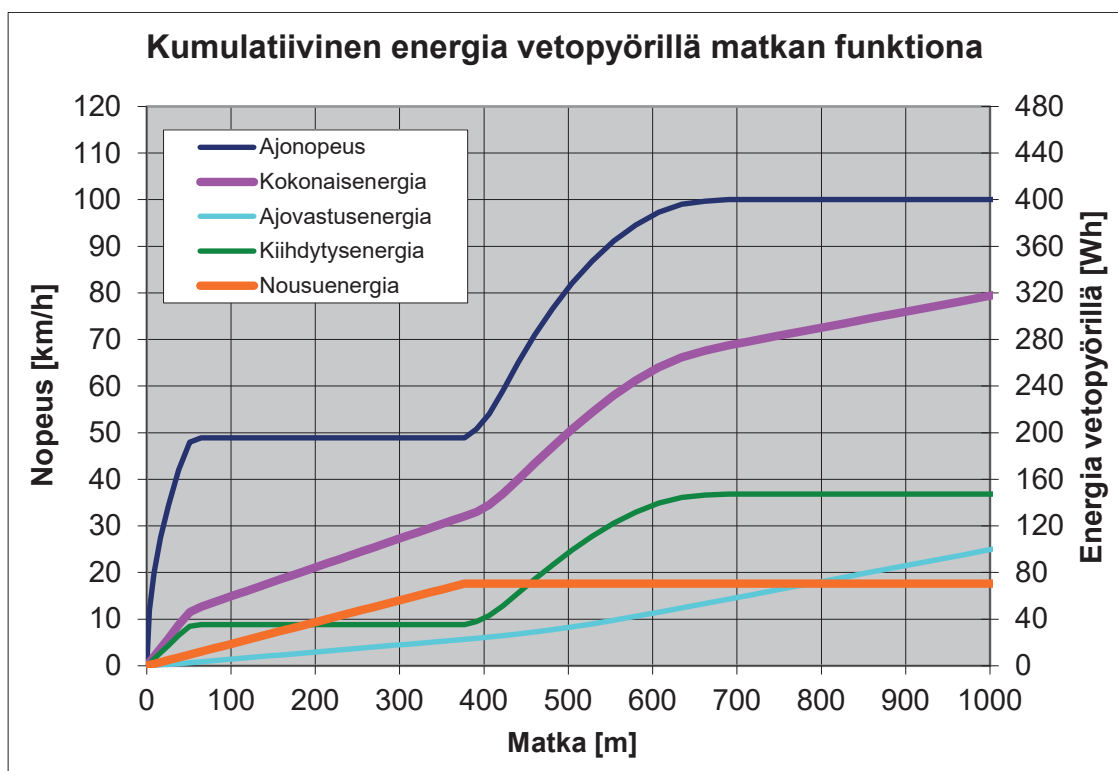
Taulukko 17. VW Golfin energiakertymät 20 sekunnin viivästetyssä kiihdytyksessä
5 %:n ylämäessä.

N49 $f = T \cdot \sin(\theta) = T \cdot \sin(E49 / (180 / \pi)) = C49 / 3600$																				
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R		
2	KIIHDYTYKSEN AJONOPEUS- JA MATKAKUVAAJAT 0-100 KM/H:IN, VW GOLF V																			
3	KIIHDYTYKSEN AJONOPEUS- JA MATKAKUVAAJAT 0-100 KM/H:IN, VW GOLF V																			
4	KIIHDYTYKSEN AJONOPEUS- JA MATKAKUVAAJAT 0-100 KM/H:IN, VW GOLF V																			
5	Aika	peus	peus	kalte	Nousu-	Kumul.	Kumul.	Kiiht./	Kiiht./	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.	Kiihd.
6	[s]	[km/h]	[m/s]	%	[astetta]	[m]	[m]	km/h/s	m/s ²	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh	Wh
7	0	0.00	0.00	5.00	2.86	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1	12.00	3.33	5.00	2.86	0.17	3	12.00	3.33	2.12	2.12	0.130	0.13	0.62	0.62	2.88	10.4	2.88		
9	2	20.00	5.56	5.00	2.86	0.44	9	8.00	2.22	3.77	5.89	0.231	0.36	1.04	1.66	5.04	18.2	7.92		
10	3	27.50	7.64	5.00	2.86	0.83	17	7.50	2.08	5.25	11.14	0.345	0.71	1.43	3.09	7.02	25.3	14.94		
11	4	34.50	9.58	5.00	2.86	1.30	26	7.00	1.94	6.40	17.54	0.475	1.18	1.79	4.89	8.66	31.2	23.81		
12	5	42.00	11.67	5.00	2.86	1.89	38	7.50	2.08	8.45	25.99	0.644	1.83	2.18	7.07	11.28	40.6	34.89		
13	6	48.87	13.33	5.00	2.86	2.55	51	6.00	1.67	7.96	33.95	0.808	2.63	2.49	9.56	11.26	40.5	46.15		
14	7	48.87	13.58	5.00	2.86	3.23	65	0.87	0.24	1.24	35.19	0.834	3.47	2.54	12.10	4.62	16.6	50.76		
15	8	48.87	13.58	5.00	2.86	3.91	78	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	4.30	2.54	14.64	3.37	12.1	54.14		
16	9	48.87	13.58	5.00	2.86	4.59	92	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	5.13	2.54	17.18	3.37	12.1	57.51		
17	10	48.87	13.58	5.00	2.86	5.26	105	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	5.97	2.54	19.72	3.37	12.1	60.88		
18	11	48.87	13.58	5.00	2.86	5.94	119	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	6.80	2.54	22.26	3.37	12.1	64.26		
19	12	48.87	13.58	5.00	2.86	6.62	133	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	7.64	2.54	24.80	3.37	12.1	67.63		
20	13	48.87	13.58	5.00	2.86	7.30	146	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	8.47	2.54	27.34	3.37	12.1	71.01		
21	14	48.87	13.58	5.00	2.86	7.98	160	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	9.30	2.54	29.88	3.37	12.1	74.38		
22	15	48.87	13.58	5.00	2.86	8.65	173	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	10.14	2.54	32.42	3.37	12.1	77.75		
23	16	48.87	13.58	5.00	2.86	9.33	187	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	10.97	2.54	34.96	3.37	12.1	81.13		
24	17	48.87	13.58	5.00	2.86	10.01	200	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	11.81	2.54	37.50	3.37	12.1	84.50		
25	18	48.87	13.58	5.00	2.86	10.69	214	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	12.64	2.54	40.04	3.37	12.1	87.88		
26	19	48.87	13.58	5.00	2.86	11.37	228	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	13.47	2.54	42.58	3.37	12.1	91.25		
27	20	48.87	13.58	5.00	2.86	12.04	241	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	14.31	2.54	45.12	3.37	12.1	94.62		
28	21	48.87	13.58	5.00	2.86	12.72	255	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	15.14	2.54	47.66	3.37	12.1	98.00		
29	22	48.87	13.58	5.00	2.86	13.40	268	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	15.98	2.54	50.20	3.37	12.1	101.37		
30	23	48.87	13.58	5.00	2.86	14.08	282	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	16.81	2.54	52.74	3.37	12.1	104.75		
31	24	48.87	13.58	5.00	2.86	14.75	295	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	17.64	2.54	55.28	3.37	12.1	108.12		
32	25	48.87	13.58	5.00	2.86	15.43	309	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	18.48	2.54	57.82	3.37	12.1	111.49		
33	26	48.87	13.58	5.00	2.86	16.11	323	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	19.31	2.54	60.36	3.37	12.1	114.87		
34	27	48.87	13.58	5.00	2.86	16.79	336	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	20.15	2.54	62.90	3.37	12.1	118.24		
35	28	48.87	13.58	5.00	2.86	17.47	350	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	20.98	2.54	65.44	3.37	12.1	121.62		
36	29	48.87	13.58	5.00	2.86	18.14	363	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	21.81	2.54	67.98	3.37	12.1	124.99		
37	30	48.87	13.58	5.00	2.86	18.82	376.91	0.00	0.00	0.00	35.19	0.834	22.65	2.54	70.52	3.37	12.1	128.36		
38	31	50.80	14.11	0.00	0.00	0.00	391	1.93	0.54	2.83	38.03	0.894	23.54	0.00	70.52	3.73	13.4	132.09		
39	32	54.00	15.00	0.00	0.00	0.00	406	3.20	0.89	4.94	42.97	1.000	24.54	0.00	70.52	5.94	21.4	138.03		
40	33	59.00	16.39	0.00	0.00	0.00	422	5.00	1.39	8.33	51.29	1.184	25.73	0.00	70.52	9.51	34.2	147.54		
41	34	65.00	18.06	0.00	0.00	0.00	440	6.00	1.67	10.96	62.26	1.438	27.16	0.00	70.52	12.40	44.6	159.95		
42	35	71.00	19.72	0.00	0.00	0.00	460	8.00	1.67	12.02	74.28	1.730	28.89	0.00	70.52	13.75	49.5	173.70		
43	36	76.60	21.28	0.00	0.00	0.00	481	5.60	1.56	12.18	86.46	2.040	30.93	0.00	70.52	14.22	51.2	187.92		
44	37	82.00	22.78	0.00	0.00	0.00	504	5.40	1.50	12.62	99.08	2.377	33.31	0.00	70.52	15.00	54.0	202.92		
45	38	86.80	24.11	0.00	0.00	0.00	528	4.80	1.33	11.94	111.02	2.709	36.02	0.00	70.52	14.65	52.7	217.57		
46	39	91.10	25.31	0.00	0.00	0.00	554	4.30	1.19	11.27	122.29	3.035	39.06	0.00	70.52	14.31	51.5	231.87		
47	40	94.60	26.28	0.00	0.00	0.00	580	3.50	0.97	9.58	131.87	3.320	42.38	0.00	70.52	12.90	48.4	244.77		
48	41	97.30	27.03	0.00	0.00	0.00	607	2.70	0.75	7.63	139.51	3.553	45.93	0.00	70.52	11.19	40.3	255.96		
49	42	99.00	27.50	0.00	0.00	0.00	634	1.70	0.47	4.92	144.42	3.706	49.63	0.00	70.52	8.62	31.0	264.58		
50	43	99.70	27.69	0.00	0.00	0.00	662	0.70	0.19	2.05	146.47	3.770	53.40	0.00	70.52	5.82	21.0	270.40		
51	44	100.00	27.78	0.00	0.00	0.00	689.9	0.30	0.08	0.88	147.36	3.798	57.20	0.00	70.52	4.68	16.9	275.08		

Taulukon 17 sarakkeesta D ilmenee, että kaltevuus on 5,0 % 377 m:iin asti eli yhtämittaisen kiihdytyksen nopeuden 100 km/h saavuttamiskohtaan. Sarake G kertoo, että viivästetyssä kiihdytyksessä nopeus 100 km/h saavutetaan kohdalla 690 m.

Taulukon 17 alariviltä ilmenee myös, että viivästetyssä kiihdytyksessä kokonaisvetopyöräenergia on 275 Wh (sarake R). Tästä kiihdytyksen osuus on 147 Wh (n. 53 %), ajovastusten 57 Wh (21 %) ja nousun 71 Wh (26 %).

Viivästetyn kiihdytyksen vetopyöräenergiakuvaajat ajomatkan funktiona 1000 metriin saakka on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Kumulatiiviset vetopyöräenergiat ajomatkan funktiona VW Golfin viivästetyssä kiihdytyksessä. Kiihdytys ensin 0–50 km/h 5 %:n ylämäkeen, nousua kiihdytyksen aikana 3,2 m. Ylämäen loppunousu vakionopeudella, ylämäen kokonaispituus 377 m. Kiihdytys 50–100 km/h vasta mäen päällä tasamaalla. Tarkastelu 1000 metriin saakka.

Kuvan 23 nousuenergiakäyrä (oranssi) on identtinen kuvan 22 vastaavan käyrän kanssa ja päättyy niin ikään 71 Wh:iin, koska kiihdytys suoritetaan samassa mäessä kuin yhtämittäinenkin (nousua 18,82 m). Vihreä kiihdytysenergiakäyrä noudattaa muodoltaan ajonopeuskäyrää (tummansininen). Se kääntyy vaakatasoon nopeuden 50 km/h saavuttamisen kohdalla, koska kiihdyttämisessä pidetään taukoa, sekä jälleen ajonopeuden 100 km/h saavuttamisen jälkeen. Kiihdytysenergia päättyy arvoon 147 Wh kuten yhtämittäisessäkin kiihdytyksessä.

Turkoosi ajovastusenergiakäyrä nousee aluksi yhtämittaista kiihdytystä loivemmin pienemmästä nopeudesta aiheutuvan pienemmän ilmanvastuksen takia. Loppunopeuden 100 km/h saavuttamisen kohdalla se alkaa nousta samalla kulmakertoimella kuin yhtämittaisen kiihdytyksen vastaavan käyrän loppupää. Käyrä päättyy alun loivemman nousun takia arvoon 99 Wh, joka on 26 Wh pienempi kuin yhtämittäisessä kiihdytyksessä.

Kokonaisenergiakäyrässä (vaaleanpunainen) on kolme muutoskohtaa: Ensimmäinen on 50 m:n kohdalla, jossa kiihdyttämisen ensimmäinen vaihe päättyy. Toinen on 377 m:n kohdalla, jossa käyrän kulmakerroin kasvaa, vaikka mäennousu päättyy, koska kiihdyttämisen toinen vaihe alkaa. Käyrä päättyy 317 Wh:iin, joka on 26 Wh pienempi kuin yhtämittaisen kiihdytyksen 343 Wh.

Ainoa ero kuvien 22 ja 23 käyrien loppupisteissä summakäyrää lukuun ottamatta on ajovastusenergiassa, joka yhtämittäisessä kiihdytyksessä päättyy lukemaan 125 Wh ja viivästetyssä lukemaan 99 Wh. Ero aiheutuu viivästetyn pienemmästä ilmanvastuskertymästä, ja se näkyy tietysti erona myös summakäyrissä. Ilmanvastusenergia olisi viivästetyssä kiihdytyksessä saman verran pienempi, vaikka ajettaisiin tasamaalla. Kiihdytyksen loppuvaiheen viivästämisellä vasta ylämäen jälkeen tapahtuvaksi ei siis saavuteta säästöä tarvittavassa vetopyöräenergiassa.

4.4.3 Kiihdytysjaksotusten vertailu

Yhteenveto ylämäkikihdytysten simuloinneista on taulukossa 18.

Taulukko 18. Yhteenvedo tuloksista kiihdytettäessä 5 %:n ylämäessä.

Tarkastelu- hetki	Laskennan kohde	Yksikkö	Yhtä- mittainen kiihdytys	Viiväs- tetty kiihdytys	Viivästetyn abs. ero yhtä- mitt. nähden	Viivästetyn ero-% yhtä- mitt. nähden
Nopeuden 100 km/h saavutta- miskohta	Ajoaika	s	20	44	24	120
	Ajomatka	km	0.377	0.690	0.313	83
	Keskinopeus	km/h	68	56	-12	-17
	Kiihdytysenergia	Wh	147	147	0	0.0
	Nousuenergia	Wh	71	71	0	0.0
	Ajovastusenergia	Wh	40	57	17	43
	Vetopyöräenergia yht.	Wh	258	275	17	6.6
	Moott. energ. vetopyörille *)	Wh	287	306	19	6.6
	Apulaite-energia **)	Wh	2	4	2.0	120
	Energia moottorilta yht.	Wh	289	310	21	7.3
	Moottorienergian kulutus	kWh/100 km	76.7	44.9	-31.7	-41
	Keskimäär. moottoriteho	kW	52.0	25.4	-26.7	-51
	Moott. hyötysuhde	-	0.336	0.339	-	-
	Tarvittava polttoaine ***)	litraa	0.098	0.104	0.006	6
	Polttoaineenkulutus	l/100 km	25.9	15.1	-10.9	-42
Ajomatkan 1000 m saavutta- miskohta	Ajoaika	s	42	55	13	30
	Ajomatka	km	1.000	1.000	0.0	0.0
	Keskinopeus	km/h	85	65	-20	-23
	Kiihdytysenergia	Wh	147	147	0	0.0
	Nousuenergia	Wh	71	71	0	0.0
	Ajovastusenergia	Wh	125	99	-26	-21
	Vetopyöräenergia yht.	Wh	343	317	-26	-7.6
	Moott. energ. vetopyörille *)	Wh	381	352	-29	-7.6
	Apulaite-energia **)	Wh	4	5	1	30
	Energia moottorilta yht.	Wh	385	357	-28	-7.2
	Moottorienergian kulutus	kWh/100 km	38.5	35.7	-2.8	-7.2
	Keskimäär. moottoriteho	kW	32.7	23.3	-9.4	-29
	Moott. hyötysuhde	-	0.320	0.331	-	-
	Tarvittava polttoaine ***)	litraa	0.137	0.123	-0.014	-10.3
	Polttoaineenkulutus	l/100 km	13.7	12.3	-1.41	-10.3
Ajomatkan 10 000 m saavutta- miskohta	Ajoaika	s	366	379	13	3.6
	Ajomatka	km	10.00	10.00	0.0	0.0
	Keskinopeus	km/h	98	95	-3	-3.4
	Kiihdytysenergia	Wh	147	147	0	0.0
	Nousuenergia	Wh	71	71	0	0.0
	Ajovastusenergia	Wh	1356	1330	-26	-1.9
	Vetopyöräenergia yht.	Wh	1574	1548	-26	-1.7
	Moott. energ. vetopyörille *)	Wh	1749	1720	-29	-1.7
	Apulaite-energia **)	Wh	31	32	1	3.6
	Energia moottorilta yht.	Wh	1780	1752	-28	-1.6
	Moottorienergian kulutus	kWh/100 km	17.8	17.5	-0.3	-1.6
	Keskimäär. moottoriteho	kW	17.5	16.6	-0.9	-4.9
	Moott. hyötysuhde	-	0.281	0.284	-	-
	Tarvittava polttoaine ***)	litraa	0.720	0.701	-0.019	-2.6
	Polttoaineenkulutus	l/100 km	7.2	7.0	-0.19	-2.6

*) Voimansiirron hyötysuhde 0.90

**) Apulaitetehto 300 W kampiakselilta

***) Bensiniin energiasisältö 8.8 kWh/l

Taulukko 18 kertoo, että kiihdytysenergia 147 Wh on molemmilla kiihdytystavoilla sama, samoin nousuenergia 71 Wh. Saavutettaessa nopeus 100 km/h on ajovastuksiin kulunut viivästetyssä 57 Wh, mutta yhtämittaisessa vain 40 Wh. Tämä aiheutuu viivästetyn pidemmästä ajomatkasta. Nopeuden 100 km/h saavuttamishetkellä on viivästetyn kokonaisenergia 275 Wh vain ajovastuslisän 17 Wh verran suurempi kuin yhtämittaisen 258 Wh. Kiihdytyksen viivästäminen ei siis vähennä kiihdytys- tai nousuenergiaa.

Taulukossa 18 ovat tulokset myös 1000 m ja 10 000 m ajomatkojen kohdalla, kun matkaa on kiihdytysten jälkeen jatkettu vakionopeudella 100 km/h. Lisäksi taulukosta selviävät polttoainekulutukset eri tapauksille. Laskennassa käytetyt moottorin hyötysuhdearvot (ääriarvot 0,281–0,339) perustuvat taulukon 15 hyötysuhteista johdettuihin arvioihin sekä VW:n 1,6 FSI -moottorin ominaiskulutuskäyrästöön (kuva 3).

Hyötysuhteita määritettäessä ajo pilkottiin kiihdytys- ja vakionopeusjaksoihin. Kullekin jaksolle laskettiin keskimääräinen moottoriteho. Sitten arvioitiin, millä pyörintänopeudella kukin jakso keskimäärin operoidaan. Valitun pyörintänopeuden perusteella laskettiin, millä tehollisella keskipaineella tarvittava teho saavutetaan. Seuraavaksi luettiin moottorikartalta ko. toimintapisteen ominaiskulutus, josta laskettiin hyötysuhde. Lopuksi koko ajon hyötysuhde laskettiin eri jaksojen hyötysuhteista moottorienergialla painotettuna keskiarvona. Menetelmän tarkkuudeksi arvioitiin $\pm 10\%$.

Taulukosta 18 nähdään, että hyötysuhteet ovat pienimmillään 10 000 metrin tarkasteleissa (yhtämittainen 0,281, viivästetty 0,284). Ne ovat hieman suuremmat 1000 metrin kohdalla (0,320 / 0,331), koska tällöin paremmalla hyötysuhteella ajettavan kiihdytysosuuden painoarvo on suurempi. Korkeimmillaan hyötysuhteet ovat kiihdytysjaksoissa (0,336 / 0,339). Hyötysuhde on yhtämittaisessa tapauksessa aina hieman viivästettyä pienempi, koska yhtämittaisessa joudutaan käyttämään lähes rajamomenttia, jolloin moottorin kuormitus on parasta hyötysuhdealuetta korkeammalla.

Viivästetty kiihdytys antaa yhtämittaista selvästi pienemmän matkaan suhteutetun kulutuksen nopeuden 100 km/h saavuttamishetkellä (15,1 vs. 25,9 l/100 km). Viivästetyn kulutus on hieman pienempi myös 1000 m:n (12,3 vs. 13,7 l/100 km) sekä 10 000 m:n kohdalla (7,0 vs. 7,2 l/100 km). Viivästetyn ratkaisevasti pienempi kulutus 100 km/h

saavuttamishetkellä aiheutuu pitemmästä ajomatkasta (690 m vs. 377 m). Lievä kulutus säästö 1000 m:n ja 10 000 m:n kohdalla puolestaan aiheutuu pienemmästä ilmanvastuskertymästä kiihdytyksen aikana.

Yhtämittaisen kiihdytyksen ja sen jälkeisen vakionopeusajon kulutus laskettuna viivästetyn ajomatkalle (690 m), on 17,1 l/100 km (ei taulukoitu). Moottorienergia on 336 Wh (ei taulukoitu). Viivästetyn kiihdytyksen eli saman 690 metrin kulutus (taulukko 18) on 15,1 l/100 km ja moottorienergia 310 Wh. Kulutus yhtämittäisessä on siis 690 metrin kohdalla 2,0 l/100 km (13 %) ja moottorienergia 26 Wh (8 %) viivästettyä suurempi. Syynä suurempaan moottorienergian on suurempi ilmanvastuskertymä.

Moottorienergian 8 %:n lisäystä suurempi kulutuslisä (13 %) selittyy sillä, että yhtämittäinen kiihdytys on 5 %:n ylämäkeen tehtävä lähes rajamomentilla. Tällöin moottorin kuormitus on korkeampi kuin pienimmän ominaiskulutuksen kuormitus. Sen sijaan viivästetyssä kiihdytyksessä moottorin keskimääräinen kuormitus osuu lähemmäs ominaiskulutusminimiä. Ilmi tulleet hyötysuhde-erot kuitenkin muuta havaintoa siitä, että kiihdyttämisen viivästäminen ei vähennä kiihdytys- eikä nousuenergian tarvetta.

Em. havainto verifioitiin vielä laskemalla pelkkien kiihdytysten vetopyöräenergiat matkaa kohti nollakaltevuudella. Yhtämittaisen tulokseksi saatiin 50 kWh/100 km ja viivästetyn 30 kWh/100 km. Jälkimmäinen on 40 % pienempi, eli suhteellinen ero on sama kuin ylämäkikihdytysten tulosten 76,7 ja 44,9 kWh/100 km (taulukko 18) välillä.

Kiihdytettäessä yhtämittäisesti 100 km/h:iin ja jatkettaessa ajoa 1000 m:iin saakka vetopyöriltä tarvittava energia on 343 Wh (taulukko 18). Vastaava lukema aikaisemmin lasketussa tasamaakiihdytyksessä on 272 Wh (taulukko 15). Arvojen erotus (71 Wh) vastaa potentiaalienergian kasvua 18,82 m:n korkeusaseman kasvun seurauksena.

Viivästetty kiihdytys antoi 1000 m ajomatkan jälkeen vetopyöräenergiaksi 317 Wh (taulukko 18). Vähennystä yhtämittäiseen kiihdytykseen (343 Wh) on 26 Wh, joka aiheutuu alemman keskinopeuden pienemmästä ilmanvastusenergiakertymästä. Sama 26 Wh:n ero todettiin jo edellä viivästetyn saavuttaessa ajonopeuden 100 km/h eli ajomatkan 690 m kohdalla. Ajon jatkaminen tämän jälkeen vakionopeudella ei vaikuta ko. eroon.

Matkan 10 000 m kohdalla kiihdytystapojen suhteellinen ero kutistuu entisestään. Yhtämittaisen kiihdytyksen vetopyöräenergia on 1574 Wh ja viivästetyn 1548 Wh (taulukko 18). Viivästetyn vetopyöräenergian säästö on edelleen ilmanvastuksesta aiheutuva 26 Wh. Suhteellinen ero on enää alle 2 %. Myös kulutusero on kaventunut 10 000 metrin kohdalla lähes merkityksettömäksi (n. 0,2 l/100 km, alle 3 %, taulukko 18). Myös keskinopeuksien välinen ero on kaventunut vain 3 km/h:iin.

4.5 Välipysähdykset

Teho- ja pyörintänopeusalue määrityksen tuloksiksi nopeusvälin 0–60 km/h kiihdytyksessä 10 sekunnissa saatiin 15–30 kW ja 2000–3000 1/min. Tehollisen keskipaineen arvoiksi tällä moottorikartan alueella määritettiin 5,6 bar – 7,5 bar. Ominaiskulutuksen (kuva 3) havaittiin vaihtelevan tällä moottorikartan alueella välillä 238–248 g/kWh. Laskenta tehtiin keskiarvolla 243 g/kWh, jota käyttäen moottorin keskimääräiseksi hyötysuhteeksi kiihdytyksen aikana laskettiin 0,35.

Drives-laskenta antoi kiihdytyksen kokonaisenergiatarpeeksi 60 Wh, joka voimansiirron hyötysuhteella 0,92 antaa moottorienergian tarpeeksi 65,2 Wh. Vetopyöräenergiaan lisättiin apulaite-energia 0,8 Wh (300 W kampiakselilta 10 sekunnin ajan), jolloin päästiin kiihdytyksen kokonaisenergiaan 66 Wh. Moottorin kokonaishyötysuhteella 0,35 saatiin polttoaine-energiaksi 0,189 kWh. Bensiinin energiasisällöllä 8,8 kWh/l saatiin 105 metrin kiihdytyksen polttoainetarpeeksi 0,0215 litraa.

Polttoaineen tarve muodostuu perustapauksessa (kiihdytys, vakionopeus, hidastus, ei välipysähdyksiä, kuva 10) 50 %:n syötönkatkaisulla seuraavasti:

- Kiihdytysjakso (105 m) 0,0215 l
- Vakionopeusjakso (5 866,7 m) 0,2992 l (5,1 l/100 km, Tekniikan Maaailma)
- Hidastusjakso (83,3 m) 0,0011 l (joutok. 0,8 l/h, syötön katk. 50 %)
- Yhteensä (6 055 m) 0,3218 l

Koska tämä kulutetaan 6 055 metrin matkalla, kulutukseksi muodostuu 5,3 l/100 km.

Polttoaineenkulutus muodostuu vertailutapauksessa (9 välipysähdystä, kuva 11)

50 %:n syötönkatkaisulla seuraavasti:

- Kiihdytysjaksot (10 x 105 m) 0,2153 l
- Vakionopeusjaksot (4 172 m) 0,2128 l (5,1 l/100 km, Tekniikan Maailma)
- Hidastusjaksot (10 x 83,3 m) 0,0111 l (joutok. 0,8 l/h, syötön katk. 50 %)
- Yhteensä (6 055 m) 0,4391 l

Polttoaineenkulutukseksi välipysähdysten kanssa 50 %:n syötönkatkaisulla muodostuu 7,3 l/100 km. Pysähdysten aiheuttama kulutuslisä on 37 %. Ilman syötönkatkaisua kulutus olisi 7,5 l/100 km. Täydellisellä katkaisulla tulos olisi 7,1 l/100 km. Tulokset osoittivat, että 50-prosenttinen katkaisu vähentää kulutusta likimain 3 %, ja 100-prosenttinen yli 5 % verrattuna tilanteeseen ilman syötönkatkaisua.

Kun kuhunkin pysähdykseen lisättiin 45 sekunnin joutokäyntikulutus, kuvan 11 välipysähdysyötkin kulutukseksi ilman syötönkatkaisua saatiin 8,9 l/100 km. Syötönkatkaisulla 50 % hidastusajasta tulos oli 8,7 l/100 km. Katkaisulla 100 % tulos oli 8,5 l/100 km. Vastaavat suhteelliset kulutuslisäykset verrattuna tilanteeseen ilman välipysähdymiä olivat 67 %, 64 % ja 62 %.

Kun ilman joutokäyntiä laskettuja välipysähdysyötkin kulutuksia verrattiin joutokäynnit sisältäviin arvoihin, saatiin tulos start-stop -järjestelmän eli moottorin sammuttamisen liikennevaloissa aikaansaamalle kulutussäästölle. Se on tässä tapauksessa 17 %.

Yhteenveto perus- ja vertailutapauksen tuloksista on esitetty taulukossa 19.

Taulukko 19. Pelkkien välipysähdysten sekä välipysähdysten + 45 s joutokäynnin vaikutus kulutukseen ja kulutuseroihin kolmella syötönkatkaisuvaihtoehdolla.

P-aineen syötön katk.osuus hidastuksissa	Kulutus perustapauksessa (60 km/h, ei välipysähdyksiä) [l/100 km]	Kulutus vertailutapauksessa (9 välipysähdystä)		Välipysähdysten aiheuttama lisäkulutus [%]	Kulutus välipysähdysten ja 45 s joutokäynnin kanssa		Välipys. + joutok. aiheuttama lisäkulutus [%]
		[l/100 km]	[%]		[l/100 km]	[%]	
0 %	5.3	7.5	0	39	8.9	0	67
50 %	5.3	7.3	-3	37	8.7	-2	64
100 %	5.3	7.1	-6	33	8.5	-4	62

Taulukosta 19 havaitaan mm., että joutokäynnin sisältävien välipysähdysten kulutuslisä on merkittävä (+62–67 %). Samoin nähdään, että syötönkatkaisun kulutusta suhteellisesti pienentävä vaikutus vähenee, kun joutokäyntikulutus on mukana, koska hidastusvaiheiden kulutuksen osuus kokonaisuudesta jää pienemmäksi.

Start-stop -järjestelmää käytettäessä sähkökulutus kasvaa, koska käynnistysmoottorin käyttö lisääntyy. Jos moottori käynnistetään sekunnissa 1 kW:n teholla, yhdeksään (9) välikäynnistykseen kuluu 2,5 Wh sähköä. Tällöin generaattorille tarvitaan kampiakselilta likimäärin 3 Wh. Tämä vastaa moottorin hyötysuhde huomioiden noin 0,0014 litraa bensiiniä. Tätä verrattaessa koko tarkastelujakson 0,4391 litraan nähdään, että välikäynnistykseen tarvittavan sähkö tuottamisen suhteellinen kulutuslisä on 0,3 % eli käytännössä merkityksetön.

4.6 Taloudellisen ajon koulutus

Tarkastelun kohteena oli 212 ajo-oppilaan polttoaineenkulutustulokset ennen jälkeen taloudellisen ajon koulutuksen.

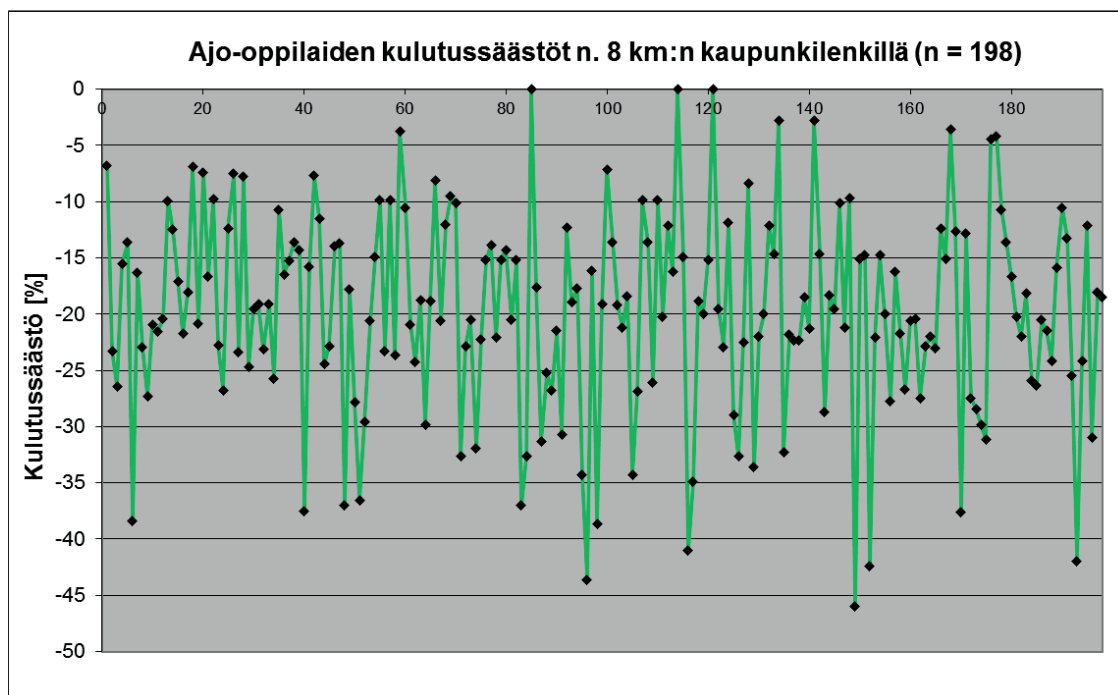
Tarkasteluun hyväksyttiin vain ne tulosparit, joissa aikaero kahden suorituskerän välillä oli maksimissaan 30 %. Rajaus pudotti otoksesta pois 10 mittausa. Ei-toivotuista liikenne-esteistä kielivät myös tapaukset, joissa jälkimmäisen ajon kulutus oli korkeampi kuin ensimmäisen. Myös tällaiset neljä tulosta jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.

Lopulliseen aineistoon kelpuutettiin 198 kuljettajan tulokset. Näissä oli mukana kolme nollatulosta, eli kulutus oli sama molemmilla mittauskerroilla. Vaikka nämäkin olivat mahdollisesti aiheutuneet epäedullisista liikenneolosuhteista jälkimmäisellä ajokerralla, ne päätettiin jättää aineistoon, koska joidenkin kuljettajien ajotyylly on saattanut olla niin taloudellinen, että siihen ei enää koulutuksella voitu vaikuttaa.

Ennen koulutusta ajetun mittauslenkin kulutukset vaihtelivat välillä 6,5–12,7 l/100 km eli hajonta oli suuri. Keskiarvotulos oli 9,1 l/100 km ja keskihajonta 1,2 l/100 km. Talousajo-ohjeistuksen jälkeisellä kerralla tulokset laskivat välille 5,8–10,4 l/100 km. Keskiarvotulokseksi muodostui 7,2 l/100 km ja keskihajonnaksi 0,7 l/100 km.

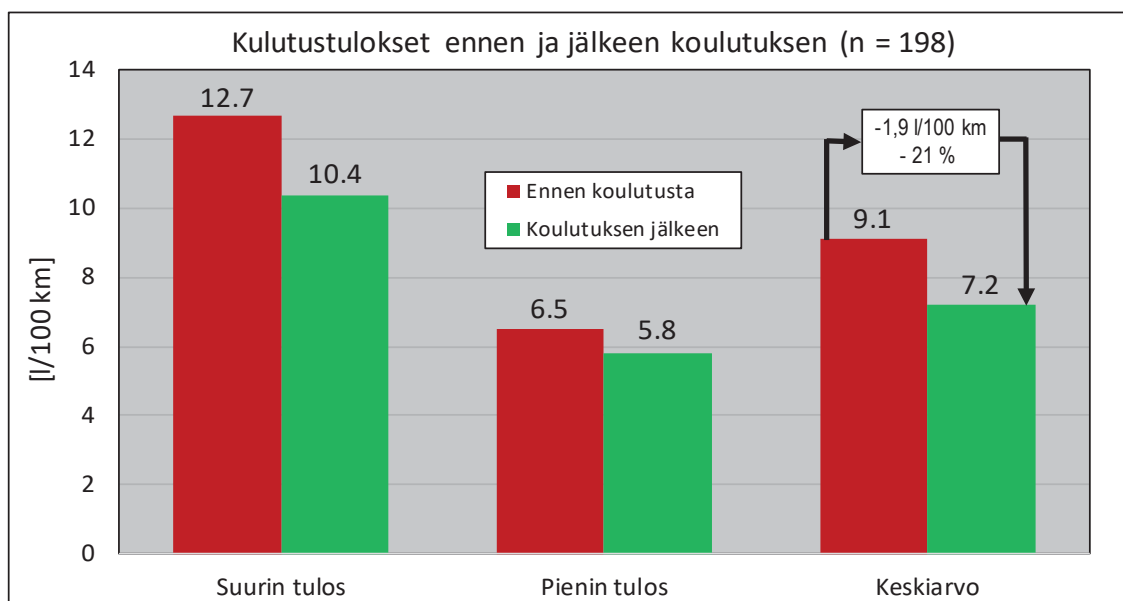
Absoluuttisen vähenemä oli keskimäärin 1,9 l/100 km (vaihteluväli 0,0–5,5 l/100 km, keskihajonta 1,1 l/100 km). Suhteellisen vähenemän keskiarvoksi saatiin 21 %, vaihteluväliksi 0–46 % ja keskihajonnaksi likimain 9 %.

Kunkin kuljettajan saavuttamista säästöprosentteista on graafinen esitys kuvassa 24.



Kuva 24. Ajo-oppilaiden saavuttamat suhteelliset kulutussäästöt (sähköpostitiedonanto, liikenneopettaja Jari Kouvo 2011).

Kuvassa 24 erottuvat kolme nollatulosta sekä viisi tulosta, joissa polttoaineensäästö on ollut yli 40 %. Lähes puolet (n. 45 %) tuloksista osuu välille -15 – -25 %. Jos tarkasteluväliä laajennetaan haarukkaan -10 – -40 %, tuloksista osuu tarkasteluvälille noin kolme neljännestä. Graafinen yhteenveto tuloksista on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. Yhteenveto ajo-oppilaiden polttoaineenkulutustuloksista.

Kuvan 25 mukaan koulutus vähensi kulutusta keskimäärin 21 %:lla. Suurin yksittäinen vaikuttava tekijä oli ennakoinnin avulla aikaansaatu kiihdytysten väheneminen.

Kaikkien kuljettajien henkilökohtaiset tulokset on esitetty liitteessä 1.

4.7 Taloudellisen ajon hyötypotentiaali

4.7.1 Bensiinihenkilöauto

Käytännön maantiekulutus ennen koulutusta määritettiin laskennallisesti kertomalla koeauton virallinen EU-maantiekulutus (5,1 l/100 km) ennen koulutusta mitatun kaupunkikulutuksen (9,1 l/100 km) ja virallisen EU-kaupunkikulutuksen (8,6 l/100 km) suhteella.

Tulokseksi saatiin 5,4 l/100 km. Maantieajossa arvioitu 10 %:n säästö koulutuksen tuloksena pudottaa lukeman arvoon 4.8 l/100 km.

Kaupunki- (9,1 l/100 km) sekä maantieajon (5,4 l/100 km) huomioon ottavaksi kulutukseksi ennen koulutusta laskettiin 6,6 l/100 km vuoden 2016 tilastoidulla henkilöautojen polttoaineenkulutuskajauksella (34 % kaupungissa, 66 % maantiellä) (VTT 2016). Tällä painotuksella lasketuksi koulutuksen jälkeiseksi kaupunki- (mitattu 7.2 l/100 km) sekä maantieajon (edellä laskettu 4.8 l/100 km) sisältäväksi kulutukseksi saatiin 5.6 l/100 km. Säästöä syntyy siis 1.0 l/100 km eli 15 %.

Bensiinin aikavälin 1/2010–3/2016 hinnan keskiarvolla 1,55 €/l (Oil 2016) 1,0 litran säästön per 100 km rahallinen arvo olisi 1,55 €/100 km. Vuotuisella ajomäärällä 20 000 km saataisiin likimain 310 euron säästö, ja CO₂-vähennyksi ominaispäästöllä 2350 g/l muodostuisi noin 470 kg. Bensiiniautoilijan vuotuiset säästöt sekä CO₂-vähennykset eri ajomäärillä on esitetty taulukossa 20.

Taulukko 20. Taloudellisen ajotavan taloudellinen hyöty ja CO₂-vähennys yksittäiselle bensiinihenkilöautolle sekalaisessa ajossa.

BENSIINIHENKILÖAUTO									
Kulutus tavall. ajotavalla [l/100 km]	Kulutus taloudell. ajotavalla [l/100 km]	Bens. polttoaineen säästö [l/100 km]	Koulutuksen taloudell. hyöty	Polttoaineen hinta [€/l]	Vuotuinen rahallinen säästö [€] eri ajomäärillä [km/v]				
					10 000	15 000	20 000	25 000	30 000
				1.55	155	233	310	388	465
6.6	5.6	1.0	Koulutuksen CO ₂ -päästövähenemä	CO ₂ -omin. päästö [g/l]	Vuotuinen CO ₂ -päästövähenemä [kg] eri ajomäärillä [km/v]				
					10 000	15 000	20 000	25 000	30 000
				2350	235	353	470	588	705

Taulukossa 20 esitettyjen lukujen lisäksi voidaan todeta, että pelkässä kaupunkiajossa (kulutus ennen koulutusta 9,1 l/100 km, säästö 1.9 l/100 km eli 21 %) bensiiniauton vähennykset vuotuisella 20 000 km:lla olisivat lähes 600 € ja 900 kg. Pelkässä kaupunkiajossa saataisiin siis jo tällä ajosuoritteella selvästi suuremmat säästöt kuin taulukossa ilmenevät sekalaisen ajon vähennykset 30 000 km:lle.

4.7.2 Dieselhenkilöauto

Koeautona käytettyä bensiinikäyttöistä Opel Astraan vastaavan dieselversion käytännön kaupunkikulutus ennen koulutusta määritettiin kertomalla dieselin virallinen kaupunkikulutus (5,5 l/100 km) bensiiniversiolle mitatun (9,1 l/100 km) ja sille ilmoitetun virallisen kaupunkikulutuksen (8,6 l/100 km) suhteella. Päädyttiin lukemaan 5,8 l/100 km. Maantiekulutus määritettiin kertomalla dieselin virallinen maantiekulutus (3,9 l/100 km) vastaavalla suhteella. Tulokseksi saatiin 4,1 l/100 km. Keskimääräiseksi kaupunkiajon (34 %) ja maantieajon (66 %) kulutukseksi laskettiin em. painotuksilla 4,7 l/100 km.

Kaupunkiajon 21 %:n säästö koulutuksen tuloksena pudottaa kulutuksen 5,8 l/100 km lukemaan 4,6 l/100 km. Maantieajon 10 %:n säästö pudottaa lukeman 4,1 l/100 km arvoon 3,7 l/100 km. Sekalaisen ajon (34 % / 66 %) kulutus 4,7 l/100 km puolestaan alenee lukemaan 4,0 l/100 km. Sekalaisessa ajossa säästöä syntyy siis 0,7 l/100 km eli jälleen suunnilleen 15 %.

Dieselhin hinnalla 1,38 €/l rahallinen säästö on 0,97 €/100 km. Dieselautoilla ajetaan yleensä bensiiniautoja enemmän, joten tuloksia kannattaa tarkastella suurehkoilla ajosuoritteilla. Esim. ajomäärällä 30 000 km/v säästö on lähes 300 € ja vastaava CO₂-vähenemä yli 550 kg. Dieselin CO₂-päästö laskettiin ominaispäästöllä 2650 g/l. Dieselautoilijan vuotuiset säästöt sekä CO₂-vähenemät eri ajomäärillä on esitetty taulukossa 21.

Taulukko 21. Taloudellisen ajotavan taloudellinen hyöty ja CO₂-vähenemä yksittäiselle dieselhenkilöautolle sekalaisessa ajossa.

DIESELHENKILÖAUTO									
Kulutus tavall. ajo-tavalla [l/100 km]	Kulutus taloudell. ajo-tavalla [l/100 km]	Diesel-poltto-aineen säästö [l/100 km]	Koulutuksen taloudell. hyöty	Poltto-aineen hinta [€/l]	Vuotuinen rahallinen säästö [€] eri ajomäärillä [km/v]				
					10 000	15 000	20 000	25 000	30 000
				1.38	97	145	193	242	290
4.7	4.0	0.7	Koulutuksen CO ₂ -päästö-vähenemä	CO ₂ -omin. päästö [g/l]	Vuotuinen CO ₂ -päästövähennemä [kg] eri ajomäärillä [km/v]				
					10 000	15 000	20 000	25 000	30 000
				2650	186	278	371	464	557

Taulukossa 21 esitettyjen lukujen ohella todettakoon, että pelkässä kaupunkiajossa (kulutus 5,8 l/100 km ja 1,2 litran eli 21 %:n säästö) dieselhenkilöauton kustannus- ja CO₂-vähenemät vuotuiselle 20 000 km:lle olisivat noin 330 € ja lähes 640 kg.

4.7.3 Valtakunnallinen kokonaishyöty

Taloudellisen ajon koulutuksen valtakunnallinen kokonaishyöty laskettiin erikseen bensiinautoille sekä kevyille ja raskaille dieselautoille. Kevyille autoille koulutuksen vaikutuksena kaupunkiajossa käytettiin kaupungissa mitattua 21 %:n kulutusvähenemää. Maantieajossa säästö laskettiin arvioidulla 10 %:n vähenemällä. VTT:n Liisa 2016 -laskennan mukaisilla kaupungissa ja maantiellä kulutetun polttoaineen käyttömäärillä painotettuna henkilöautojen keskimääräiseksi säästökseksi saatiin 15 %.

Raskaille autoille valitut vastaavat säästöprosentit olivat 10 % kaupungissa ja 5 % maantiellä. Raskaan kaluston keskimääräiseksi säästöpotentiaaliksi saatiin vastaavalla painotusperiaatteella 6,4 %. Kaikki ajoneuvotyypit käsittävä keskimääräinen säästövaikutus laskettiin Liisa 2016 -laskennan bensiini-, dieselhenkilö- ja raskaiden autojen käyttämien polttoainemäärien jakauman (34.3 % / 30.9 % / 34.8 %) perustella. Näillä painotuksilla kaikkien ajoneuvojen keskimääräiseksi koulutushyödyksi saatiin 12 %.

Oletuksen mukaan puolet ajokortin haltijoista koulutetaan, ja minimissään joka neljäs ja maksimissaan joka toinen koulutettu ajaa pysyvästi taloudellisesti. Tällöin henkilöautojen säästöpotentiaali on välillä 15 % / 8 – 15 % / 4 eli 1,9–3,8 %. Vastaava potentiaali raskaille autoille on välillä 6.5 % / 8 – 6.5 % / 4 eli 0,8–1,6 %. Kaikki ajoneuvotyypit huomioon ottavaksi keskimääräiseksi säästöpotentiaaliksi muodostuu 1,5–3,0 % kulutuksesta.

Vuonna 2016 bensiinikäyttöiset henkilö- ja pakettiautot käyttivät moottoribensiiniä yhteensä 1,315 milj. tonnia (VTT 2016). Minimiskenaarion (1,5 %) mukainen taloudellisen ajotavan tuottama vuotuinen bensiinin säästöpotentiaali on 25 000 tonnia ja maksimiskenaarion (3 %) vastaava on 50 000 tonnia. Aikavälin 1/2010–3/2016 bensiinin verollisella keskiarvohinnalla 1,55 €/l (Oil 2016) rahansäästö olisi 50–100 milj. euroa. Bensiinautojen vuotuiset CO₂-päästövähennykset olisivat minimissään 78 000 tonnia ja maksimissaan 156 000 tonnia (taulukko 22).

Vastaavasti dieselkäyttöisten henkilö- ja pakettiautojen kulutus v. 2016 oli 1,183 milj. tonnia. Näiden autojen vähennyspotentiaalit ovat 22 000–44 000 tonnia polttoainetta, 37–74 miljoonaa euroa rahaa ja 70 000–140 000 tonnia hiilidioksidia (taulukko 22).

Raskaiden dieselien luvut ovat puolestaan 1,332 milj. tonnia vuotuista kulutusta ja vähennyspotentiaaleina 11 000–22 000 tonnia polttoainetta, 18–36 miljoonaa euroa rahaa ja 34 000–68 000 tonnia hiilidioksidia (taulukko 22).

Taulukko 22. Taloudellisella ajotavalla aikaansaattava polttoaineen, kustannusten ja CO₂-päästöjen valtakunnallinen vähennyspotentiaali.

Polttoaine, ajoneuvotyyppi	Koulutuksen säästövaikutus [%]	Kulutettu määrä v. 2016 [1000 t]	Potentiaalinen vähennys [%]		Vuositt. polttoaineen säästö [1000 t]		Vuositt. rahansäästö [milj. € verollista]		Vuositt. CO ₂ -vähenemä [1000 t]	
			Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Bensiini	15	1 315	1.9	3.8	25	50	50	100	78	156
Diesel, kevyet	15	1 183	1.9	3.8	22	44	37	74	70	140
Diesel, raskaat	6.4	1 332	0.8	1.6	11	22	18	36	34	68
Keskim. / Yht.	12	3 830	1.5	3.0	58	116	105	210	182	364

Taulukon 22 mukaan Suomen koko ajoneuvoliikenteen valtakunnalliseksi yhteissäästöksi saadaan minimi- ja maksimiskenaarion mukaisesti laskettuna 58 000–116 000 tonnia polttoainetta, 105–210 milj. euroa kustannuksia ja 182 000–364 000 tonnia hiilidioksidia.

5 POHDINTA

Driwes-simulaation vetopyöräenergiälaskenta osoittautui antavan varsin tarkkoja tuloksia. Voidaan arvioida, että laskentaepävarmuus on lähtöarvojen tarkkuudesta riippuen parhaimmillaan luokkaa ± 5 %. Sen sijaan polttoaineenkulutuksen määrittämisessä tarvittava moottorin hyötysuhdetieto ei ole käytetyllä menetelmällä määritettävissä yhtä tarkasti. Tämä ei kuitenkaan haittaa niiden päätelmien tekemistä, jotka on tehty taloudellisen ajamisen keinojen löytämiseksi.

5.1 Simulaation validointi

Driwes'illä simuloidut vetopyöräenergiatulokset olivat hieman suurempia kuin VTT:n alustadynamometritulokset. Tosin VTT määrittämiin tuloksiinkin sisältyy epävarmuutta: aineistossa oli 2–3 eri tavoin määritettyä tulosta samoista testeistä, ja niiden välinen hajonta oli suurimmillaan ± 3 %:n luokkaa. Vertailu tehtiin VTT:n tulosten keskiarvoihin. Jos vertailukohtana olisi käytetty suurimpia VTT:n mittaamia tuloksia, simulointitulosten ero näihin olisi kaventunut muutamaan prosenttiin.

Driwes-simulaatiolla tehdyt CO₂- ja kulutusvähenemämääritykset ajovastuksia vähennettäessä antoivat VW Golf 1,6 FSI:lle tuloksia, jotka osuvat Fontaras & Samaras (2009) -tutkimuksen tulosten vaihteluvälille, enimmäkseen sen ylärajalle. Driwes antaa siis vastaavaan kaupalliseen laskentaan (Advisor 2002) verrattuna riittävän tarkkoja tuloksia.

Driwes-tulosten validoinnin kannalta olennainen havainto oli, että vertailussa käytettyjen tutkimusten sekä mitatuissa että simuloiduissa tuloksissa esiintyy hajontaa. Molempiin määrittämismenetelmiin sisältyy vähintään muutaman prosentin epävarmuus kumpaankin suuntaan, joten absoluuttisen tarkkaa kulutusmuutostietoa ei oikeastaan ole olemassa.

Race Technology -mittalaitteiston ja siihen kuuluvan Analysis -tietokoneohjelman käyttö Driwes-simulaation validointiin antoi uudentyyppistä vertailutietoa. Laskennassa käytetty kaupunkibussilinjan nopeussykli perustui todelliseen tallennukseen eikä keinotekoi-

siin esimerkkeihin, jollaiseksi virallinen EU-syklikin voidaan luokitella. Lisäksi nopeustiedon resoluutio oli 10-kertainen verrattuna aikaisemmin käytettyyn, minkä pitäisi lisätä laskennan tarkkuutta. Driwes antoi kaikissa tapauksissa kaupallista laskentaohjelmaa suuremmat tulokset, mutta ero vaihteli vain puolesta prosentista kolmeen.

5.2 Simulointitulokset

Kiihdytys, ilmanvastus, vierintävastus -kolmijaon suhteellisten osuuksien määrittäminen sekä välipysähdystarkastelut konkretisoivat sen, että kiihdytyksiin tarvitaan paljon energiaa. Auton liikkeen ylläpitäminen ennakoimalla tulevat liikennetilanteet on siis erittäin merkityksellistä minimoitaessa kulutusta ajotavan avulla.

Samoin havaittiin selvästi, että ilman- ja vierintävastusmuutosten aiheuttamat kulutusmuutokset riippuvat sekä autosta että ajonopeuksista. Jos auton poikkipinta-ala on pieni ja muoto aerodynaaminen, vierintävastus säilyy hallitsevana vastuskomponenttina kohdalaisille ajonopeuksille saakka. Tällaisella autolla vierintävastusmuutosten aiheuttamat kulutusmuutokset ovat suuria erityisesti sellaisessa maantienopeuksia hitaammassa ajossa, jossa kiihdytystarvetta on harvoin. Vierintävastusta voidaan vähentää rengaspainetta korottamalla sekä valitsemalla yleensä kapeahko rengas (Pavlovic, Ciuffo, Fontaras, Valverde & Marotta 2018, 139), jonka suunnittelussa on painotettu matalaa vierintävastusta.

Autonsa ilmanvastusominaisuuksiin käyttäjä voi vaikuttaa lähinnä vain minimoimalla kattokuorman käytön. Jos ajonopeus on suuri, ilmanvastuksen osuus kasvaa ja vierintävastuksen osuus kulutuksesta pienenee. Näiden molempien osuudet pienenevät erityisesti silloin, kun painavalla autolla joudutaan kiihdyttämään usein. Tiheitä kiihdytyksiä sisältävässä ajossa myös massan muutosten (kuorman) vaikutus kulutukseen on suuri.

Vierintä- ja kiihdytysvastus riippuvat auton massasta. Näin ollen kulutuksen ja CO₂-päästöjen vähentämisessä autojen keventämisellä on suuri merkitys.

Dr.-Ing. Klaus Rohde-Brandenburger Volkswagenilta on ilmoittanut ilman-, vierintä- ja kiihdytysvastuksen tyypilliseksi jakaumaksi EU-normisyklissä 35 %, 30 % ja 35 %

(Rohde-Brandenburger 2012). Tämä osuu hyvin lähelle Drives'illä VW Golfille laskettua jakaumaa, joka on 36 %, 30 % ja 34 %.

Kiihdytyshavainnoissa oli huomionarvoista, että voimakkaasti kiihdyttämällä aikaansaatava ajansäästö supistuu alle prosentin suuruiseksi jo 10 km:n matkalla. Eri kiihdytystapojen kulutuserojen vaikutus matkan kokonaiskulutukseen pienenee jyrkästi, kun kiihdytyksen jälkeinen vakionopeudella ajettava matka pitenee.

Pienikulutuksisin kiihdytysaika välillä 0–100 km/h saattaisi VW Golf 1,6 FSI:llä olla kumpaakin tarkasteltua aikaa (10 ja 20 s) pitempi, suunnilleen 25 sekuntia. Tällöin se tehoalue riittäisi, joka voidaan tuottaa hieman rajamomentin alapuolella ominaiskulutuksen kannalta optimaalisella pyörintänopeusalueella 2000–4000 1/min.

Ylämäkikiihdytysten simulointi osoitti, että vetopyöräenergian kannalta ei ole merkitystä, kiihdytetäänkö tasamaalla vai ylämäessä, eli kerrytetäänkö liike- ja potentiaalienergiaa yhtäaikaan vai peräkkäin. Näin ollen kulutuksen minimoimiseksi huomio onkin kiinnitettävä ominaiskulutukseen. Samanaikainen kiihdyttäminen ja mäennousu lisäävät moottorin kuormitusta. Tällöin pienimmän ominaiskulutuksen kannalta riittävän suuri kuormitus on helpompi saavuttaa kuin muutoin.

Jos ylämäkikiihdytysten laskelmat olisi tehty hieman 5 prosenttia pienemmällä kaltevuudella, yhtämittaisen kiihdytyksen vaatima moottorin kuormitus olisi vähentynyt lähes rajamomentilta lähelle ominaiskulutuksen minimiä ja antanut paremman hyötysuhteen kuin viivästetty. Tällöin eri kiihdytysjaksotusten kulutukset olisivat osuneet lähemmäksi toisiaan. Vaikka tällainen laskelma olisi tehty, se ei olisi muuttanut havaintoa siitä, että viivästetty kiihdytys ei vähennä kiihdytys- eikä nousuenergian tarvetta.

Välipysähdysten ja uudelleen kiihdyttämisten energiatarvetarkastelu vahvisti havaintoa, että tehokkain tapa vähentää kulutusta on kiihdytysten minimointi eli pyrkimys nopeuden ylläpitämiseen ennakoinnin avulla. VW Golfin kiihdyttämiseen 0–60 km/h 100 metrin matkalla kuluva vetopyöräenergia vastaa 7,5-kertaisen matkan (750 m) vetopyöräenergiaa vakionopeudella 60 km/h. Kiihdytyskulutus jää kuitenkin ”vain” noin nelinkertaiseksi, koska moottorin hyötysuhde on kiihdytyksessä parempi kuin vakionopeudella.

5.3 Taloudellisen ajon koulutus

Merkittävin yksittäinen tekijä koulutuksen avulla savutetussa polttoaineensäästöissä oli liikenopeuden ylläpitäminen eli tilanteiden ennakointi hidastusten sekä pysähdysten ja niistä seuraavien kiihdytysten minimoimiseksi. Lisäksi kulutusvähenemään vaikuttivat riittävän ripeät kiihdytykset, jolloin moottorin kuormitus on hyötysuhteen kannalta riittävä. Kolmas merkittävä tekijä oli pienten pyörintänopeuksien eli suurten vaihteiden käyttö.

Kulutusmittauksessa käytetyn ajotietokoneen mahdollinen epätarkkuus ei haittaa ajotavan vaikutuksen tutkimista – tärkein selvitettävä asia kun on kulutuksen muutos. Lisäksi ajotapamuutosten aiheuttamat kulutuserot ovat jopa kymmeniä prosentteja, joten erot saadaan esiin, vaikka mittatarkkuus ei huippuluokkaa olisikaan.

Ajo-oppilaat tiesivät, että kyse on kulutusmittauksesta. Tieto on saattanut saada heidät ajamaan tavanomaista taloudellisemmin jo ensimmäisellä ajokerralla. Toisaalta tämä ei liene kovin todennäköistä, koska nuorten kuljettajien ei ole vähäisen ajokokemuksensa takia kovinkaan helppoa muutella ajotyyliään. Ensimmäinen mittauslenkki on siis kuvastanut vähintään kohtalaisesti koekuljettajien normaalia ajamista.

Eri kuljettajien säästöprosenttien hajonta oli suuri. Ensimmäisellä kerralla huomattavan epätaloudellisesti ajaneiden kuljettajien säästöprosentit muodostuivat suuremmiksi kuin niiden, joiden ajotyyli täytti jo ennen koulutusta taloudellisen ajon tunnusmerkit. Näin siksi, koska kulutuksella on kunkin tyyppisessä ajossa kullakin autolla miniminsä, joka on tietoon perustuvan harjoittelun avulla kenen tahansa saavutettavissa, mutta jota ei kenenkään taidoilla voida alittaa. Niiden kuljettajien ajotapa, jotka saivat koulutuksen tuloksena ainoastaan pienen säästön, oli siis jo ennen koulutusta lähellä tätä minimiä.

Jos taloudellinen ajotapa hidastaa etenemistä, motivaatio sen noudattamiseen vähenee. Havaittiin, että taloudellinen ajotapa ei kaupunkioiloissa juurikaan lisännyt matkaan käytettyä aikaa. Sen sijaan maantieajossa polttoaineen säästämiseksi tarvitaan nopeuden vähentämistä ilmanvastuksen pienentämiseksi. Tämä voi vähentää motivaatiota taloudellistaa ajotapaa maantiellä.

Taloudellinen ajaminen ei kaikissa ajotilanteissa edellytä kaasupolkimen painamisen minimointia, kuten usein mainitaan. Taloudellinen kiihdyttäminenhan vaatii juuri päinvastaista kaasunkäyttöä. Osuvampaa olisikin puhua jarrun käytön minimoinnista porttina taloudelliseen ajamiseen. Kun toimitaan näin, kaasujalan käyttö ohjautuu automaattisesti taloudellisuuden kannalta oikeanlaiseksi.

5.4 Taloudellisen ajon hyötypotentiaali

Polttoaineenkulutuksen vähentäminen on olennainen osa ilmastonmuutoksen hidastamiskäytännöksiä. Ajotavan vaikutuksesta kulutukseen ja CO₂-päästöön tulisi tiedottaa nykyistä aktiivisemmin. Tiedottamisessa tulisi painottaa sitä, että hiilidioksidipäästö ei määräydy virallisen normiarvon vaan oman ajotyylin ja ajo-olosuhteiden aikaansaaman polttoaineenkulutuksen perusteella. Jokaisella on ajotapaansa kehittämällä mahdollisuus vähentää hiilidioksidipäästöjään. Vaikka käytössä olisi vähäpäästöiseksi mainittu eli pienikulutusinen auto, ajotavalla on silti merkitystä.

On huomattava, että laskelmissa esitetty polttoaineiden käytön vähenemisestä aiheutuva rahansäästö hyödyttää kyllä täysimääräisesti polttoaineen käyttäjää, mutta ei vaikuta kauppataaseeseen koko myyntihinnan arvolla. Tämä aiheutuu polttoaineiden myyntihinnassa olevista veroista. Lisäksi kotimaassa jalostetun polttoaineen verottomasta hinnastakin suuri osa on kotimaassa tuotettua jalostuksen tuomaa lisäarvoa. Sen sijaan tuontitavarana maahantuodun valmiin polttoaineen käytön väheneminen hyödyttäisi kauppataasetta koko verottomalta hinnaltaan.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laskentasiimulaation laadinnasta ja sillä lasketuista tuloksista voidaan vetää seuraavat johtopäätökset:

- Auton liikuttamisen energiantarvetta sekä ajotavan taloudellisuutta analysoiva laskenta voidaan toteuttaa riittäväällä tarkkuudella Excel-taulukkolaskennalla.
- EU-tyyppihyväksyntäsyklin (NEDC) laskenta onnistuu Excelillä sekunnin resoluutiolla (1180 sekuntia eli 1180 laskentariviä) muutamassa sekunnissa kannettavalla tietokoneella, jonka pääkomponentit ovat Intel Core i5-7200U@2.5 GHz -suoritin ja 16,0 Gt RAM-muistia.
- Yli tunnin kestävän ajosuorituksen laskenta 0,1 sekunnin resoluutiolla (yli 41 000 aika-askelta) tarvitsee laskenta-aikaa em. kaltaisella tietokoneella minuutista puoleentoista.

Drives-simulointitulosten vertailu muihin vastaaviin tuloksiin osoitti seuraavaa:

- Drives'in henkilöautolle lasketut vetopyöräenergiatulokset olivat koko EU-syklissä 5–8 % suuremmat kuin VTT:n alustadynamometrin mittaamat keskiarvot. Erot olivat suurimmillaan testin maantieosuudessa. Kaupunkiosuudessa laskentatulokset osuivat alueelle –3 – +5 % dynamometrimittauksiin verrattuna.
- Kun laskettiin henkilöauton massan sekä ilman- ja vierintävastuksen vähenemisen vaikutusta kulutukseen EU-syklissä, Drives-tulokset osuivat Fontaras & Samaraksen (2009) Advisor-simuloinnilla kuudella eri autoilla raportoimien kulutusvähennysprosenttien haarukkaan. Drives-tulos oli yleensä vaihteluvälin ylärajalla. Kaikkien ajovastusparametrien pieneneminen (massa ja ilmanvastus –10 %, vierintävastus –20 %) sekä moottorin hyötysuhdeparannus (+7,5 %) yhteensä antoivat vertailututkimuksessa keskimäärin 13 %:n kulutusvähennyksen, kun vastaava Drives-tulos VW Golfille oli 16 %.
- Kaksiakselisen, 12,5-metrin Scania-kaupunkilinja-auton simulointi Turun bus-silinjalla 1 antoi puolesta kolmeen prosenttia suuremmat vetopyöräenergiatulokset kuin Race Technology Analysis -tietokoneohjelma.

Henkilöautoon (VW Golf) ja kaupunkibussiin sovelletun laskennan tulokset mahdollistivat seuraavat johtopäätökset:

- Tutkitun henkilöauton kahden bensiini- ja yhden dieselmoottorin kokonaishyötysuhteet olivat EU-syklissä 0.23–0.28. Tulokset perustuvat virallisiin kulutuslukemiin, jotka tosin ovat tavanomaisen arkikäytön kulutusta pienemmät. Todellisessa käytössä hyötysuhteet jäävät huonommiksi, suuruusluokkaan 0.20–0.25.
- Tutkitun henkilöauton suorasuihkutteisen bensiinimoottorin kokonaishyötysuhde oli varsinkin EU-syklin maantieosuudessa vain hieman dieselmoottoria pienempi.
- Tutkitun henkilöauton tarvitsemat ilman-, vierintä- ja kiihdytysvastusenergiat vetopyörillä olivat koko EU-syklissä keskenään samaa suuruusluokkaa.
- EU-syklin kaupunkiosuudessa henkilöauton kiihdytysenergia oli likimain puolet kokonaisenergiasta. Tulos vahvistaa kiihdytysten minimoinnin merkitystä kulutuksen vähentämisessä.
- EU-syklin maantieosuudessa henkilöauton ilmanvastusenergia oli noin puolet kokonaisenergiasta. Tulos korostaa ajonopeuden alentamisen merkitystä pyrittäessä pienentämään maantieajon kulutusta.
- Tarkastellun henkilöauton kuormaaminen täyteen kantavuuteen nosti polttoainekulutusta koko EU-syklissä 11 %:lla ja sen kaupunkiosuudessa 14 %:lla. Tulosten ja syklin osien ajomatkojen perusteella voitiin laskea, että maantieosuudessa kulutuksen kasvu täyteen kantavuuteen kuormattuna olisi runsas 9 %.
- Henkilöauton moottori toimii huonolla hyötysuhdealueella, jos autoa kiihdytetään hitaasti eli pienellä kuormalla. Taloudellisin tapa kiihdyttää on tehdä se moottoria kohtalaisen runsaasti kuormittaen, mutta aikaisin suuremmille vaihteille vaihtaen. Tulos on taloudellisen ajamisen koulutuksen kannalta olennainen.
- Energiantarpeen kannalta on samantekevää, kiihdytetäänkö tasamaalla vai ylämäessä. Kun kiihdytetään ylämäkeen, voidaan tarvittava vetopyöräenergia tuottaa hyvällä hyötysuhteella, koska tällöin moottorin kuormitus on suuri ja ominaiskulutus pieni. Edellytyksenä on, että moottoria ei kuormiteta rajamomentille saakka ja sen pyörintänopeudet pidetään maltillisina.

- Yhdeksän välipysähdystä 6 km:n taajama-ajomatkalla kasvattivat bensiinikäyttöisen henkilöauton polttoaineenkulutusta 33–39 %:lla. Kun mukaan simuloitiin 45 sekunnin joutokäynti kullakin pysähdyksellä, kulutuksen kasvu vakionopeusajoon nähden oli 62–67 %. Start-stop-järjestelmä antama säästö olisi 17 %.
- Kaupunkibussin simuloinnissa havaittiin, että pysähtyminen vain joka toisella pysäkillä jokaisen asemesta alensi vetopyöräenergiaa edestakaisella Turun bussilinjalla nro 1 (yht. runsas 25 km) yli 40 %:lla sekä tyhjän että puoliksi kuormatun bussin massoilla laskettuna. Tyhjän bussin energiantarve linjalla oli 20 % pienempi kuin puoleen kantavuuteen kuormatun.

Taloudellisen ajon koulutuksen tuloksena saatiin noin 200 kuljettajan tuloksina kaupunkiajossa seuraavaa:

- Noin kolme neljännestä kuljettajista saavutti 10–40 %:n kulutusvähenemän. Muutamissa tapauksissa vähenemä oli tätä suurempi tai pienempi.
- Keskimäärin säästöä syntyi 21 %. Tärkeimmät vaikuttaneet tekijät olivat tilanteiden ennakointi jarrutusten ja pysähdysten välttämiseksi, riittävän ripeät kiihdytykset sekä mahdollisimman suurten vaihteiden käyttö.
- Maantiellä säästöä arvioitiin syntyvän vajaat puolet siitä mitä kaupungissa eli 10 %. Säästökeinot maantiellä ovat kaupunkiajoo vähäisemmät, koska nopeusmuutoksia on vähän. Näitä ovat matkanopeuden alentaminen, tasainen nopeus sekä suurten vaihteiden käyttö. Sekalaisen kaupunki- ja maantieajoo sisältävän ajon säästöpotentiaaliksi muodostuu 15 % kaupunki- ja maantieajossa valtakunnallisesti kulutettujen polttoainemäärien mukaisilla painotuksilla.

Taloudellisen ajon koulutuksen hyötypotentiaalin laskenta tuotti seuraavia tuloksia:

- Vuotuiseksi säästökseksi yksittäisellä bensiiniautolla 20 000 km:n ajosuoritteella saatiin suunnilleen 310 euroa ja noin 470 kg hiilidioksidia.

- Vastaavat luvut yksittäiselle dieselhenkilöautolle ovat 30 000 km:n ajosuoritteella lähes 300 euroa ja likimain 560 kg hiilidioksidia.
- Systemaattisen taloudellisen ajon koulutuksen hyötypotentiaalia laskettaessa tehtiin kaksi valtakunnallista skenaariota, minimi ja maksimi. Lähtökohtana oli joka toisen ajokortin haltijan kouluttaminen. Minimiskenaariossa oletettiin, että joka neljäs koulutettu noudattaisi taloudellista ajotapaa pysyvästi, maksimiskenaariossa vastaavasti joka toinen. Laskenta tehtiin suhteessa vuoden 2016 bensiinin ja dieselpolttoaineen käytön tilastolukuihin.
- Systemaattisen taloudellisen ajon koulutuksen valtakunnalliset säästöt ovat 1.5–3.0 % autoliikenteen kulutuksesta.
- Minimiskenaarion mukaan vuotuiset bensiinin ja dieselin yhteissäästöt ovat suunnilleen 60 000 tonnia polttoainetta, noin 100 miljoonaa euroa kustannuksia (verollisella polttoainehinnalla) sekä likimain 180 000 tonnia CO₂:ta.
- Maksimiskenaarion vastaavat luvut ovat suunnilleen 120 000 tonnia polttoainetta, noin 200 miljoonaa euroa kustannuksia sekä likimain 360 000 tonnia CO₂:ta.

Jatkotutkimusta tarvittaisiin taloudellisen ajon koulutuksen polttoainekulutusvaikutuksen selvittämiseksi automaattivaihteisilla, sylinterien lepuutuksella varustetuilla sekä hybridi- ja sähköautoilla. Kulutuksen laskentaa puolestaan voitaisiin kehittää tarkentamalla ominaiskulutuksen määrittystapaa sekä tarkastelemalla eri vaihtamisstrategioita.. Lisäksi olisi selvitettävä, missä määrin ajotavan ja CO₂-päästön välinen yhteys tunnetaan autoilijoiden keskuudessa, ja miten tietämystä tästä saataisiin lisätyksi.

7 YHTEENVETO

Ajoneuvojen polttoaineenkulutusta tulee alentaa, koska fossiilisen hiilen poltolla on suora yhteys CO₂-päästöön ja ilmastonmuutokseen. Lisäksi energiatehokkuuteen kannustavat raakaöljyvarojen ehtyminen sekä pitkällä aikavälillä nouseva öljytuotteiden hinta.

Tutkimuksessa kehitettiin laskentasiluulaatio ("Drives"), jolla analysoitiin henkilöauton ja kaupunkibussin vetopyöräenergian tarpeen jakautumista sekä siihen vaikuttavia tekijöitä. Energiatarve riippuu ajoneuvosta, ajo-olosuhteista (ajotehtävä, ajonopeudet, muu liikenne jne.) sekä kuljettajan toiminnasta. Lisäksi tutkittiin taloudellisen ajamisen koulutuksen vaikutusta sekä laskettiin koulutusvaikutuksen perusteella valtakunnalliset polttoaineiden, polttoainekustannusten sekä CO₂-päästöjen vähennysskenaariot.

Drives-simulaatiolla voidaan määrittää vetopyöriltä tarvittava energia erilaisille autoille erilaisissa ajotehtävissä ja -olosuhteissa. Simulaatioon syötetään tarkasteltavan ajoneuvon ajovastuksiin vaikuttavat parametrit, reitin ajonopeusprofiili sekä pituuskaltevuustiedot. Näiden perusteella lasketaan tarvittava vetopyöräenergia, johon pohjautuen määritetään polttoaineenkulutus voimalinjan hyötysuhteen ja polttoaineen energiasisällön perusteella. Laskennalla on myös mahdollista tarkastella ajoneuvon ajovastuksiin sekä ajonopeus- ja tieprofiilin tehtävien muutosten vaikutusta vetopyöräenergian tarpeeseen ja polttoaineenkulutukseen.

Polttoaineenkulutuksen laskemiseksi tarvittava moottorin keskimääräinen hyötysuhdemääritys tehtiin moottorin ominaiskulutuskäyrästä, tarvittavan tehotason ja moottorin pyörintänopeuksien perusteella. Tarkastelun kohteina olleet ajotehtävät olivat NEDC-tyyppihyväksyntäsykli, eri tavoin ja erilaisissa maastonkohdissa tapahtuvat kiihdytykset, vakionopeusajo sekä pysähtelyjä sisältävä ruuhka-ajo. Esimerkkiautona käytettiin VW Golfin viidettä sukupolvea (2003–2008), enimmäkseen 1,6 FSI -moottorilla varustettuna.

Drives-laskentatuloksia verrattiin VTT:n alustadynamometrimittauksiin, tieteellisissä artikkeleissa julkaistuihin vastaaviin simulointituloksiin sekä auton liiketilaa mittaavan kaupallisen laitteiston laskentaohjelmiston tuloksiin. Drives-tulokset osuivat referenssiaineiston vaihteluvälille, useimmiten sen ylärajan tuntumaan.

Havaittiin, että tärkein polttoaineenkulutusta vähentävä tekijä on jarrutusten ja hidastusten sekä niistä aiheutuvien kiihdytysten minimointi ennakoivan ajotavan avulla. Näin saadaan säästöä erityisesti kaupunkiajossa. Tulokset osoittivat myös, että taloudellinen eteneminen ei välttämättä ole hidastelua. Taloudellisin kiihdytystapa on ripeä, mutta pienillä pyörintänopeuksilla tehty, koska polttomoottorin hyötysuhde on tällöin parhaimmillaan. Lisäksi havaittiin, että vetopyöräenergian kannalta ei ole merkitystä, lisääkö ajonopeutta hitaasti vai nopeasti eikä myöskään sillä, kiihdytetäänkö ylämäessä vai tasamaalla. Sen sijaan moottorin hyötysuhteeseen kiihdytystapa vaikuttaa.

Taloudellisen ajon koulutuksen tulokseksi henkilöautolla kaupunkiajossa saatiin keskimäärin 21 %:n polttoaineensäästö. Noin 200 kuljettajan otannassa koulutuksen aikaansaama polttoaineensäästö vaihteli suurimmalla osalla kuljettajia välillä 10–40 %. Maantiejon säästöpotentiaaliksi arvioitiin 10 %. Sekä kaupunki- että maantieajoa sisältäen koulutuksen keskimääräiseksi säästöpotentiaaliksi määritettiin 15 %.

Talousajokoulutuksen aikaansaaman polttoaineen, polttoainekustannusten sekä CO₂-päästöjen vähennyspotentiaalinen laskennan pohjana olivat toteutuneet polttoainemyyntiluvut vuodelta 2016. Oletusten mukaan puolet ajokortin haltijoista koulutetaan ja vähintään joka neljäs ja enintään joka toinen noudattaa taloudellista ajotapaa pysyvästi. Bensiniin ja dieselpolttoaineen yhteiseksi vuotuiseksi säästöpotentiaaliksi saatiin 58 000–116 000 tonnia, verolliseksi kustannussäästökseksi 105–210 milj. euroa ja CO₂-vähenemäksi 182 000–364 000 tonnia.

LÄHDELUETTELO

- Ahonen, H. (2004). Kahden kauppa – vai onko? TM-vertailu: Viisioviset perheautot, 1,6 litraa. Helsinki: Yhtyneet Kuvalehdet Oy, *Tekniikan maailma* 9/2004, 21.
- Argonne (2018). *Idling Reduction Research* [online]. Lemont, Illinois: Argonne National Laboratory. [17.6.2018]. Saatavissa: <http://www.anl.gov/energy-systems/project/idle-reduction-research>.
- ATZ/MTZ (2003). Der Neue Golf. *Automobiltechnische Zeitschrift und Motortechnische Zeitschrift*, Sonderausgabe, Oktober 2003. Wiesbaden: Springer Automotive Media.
- Dieselnet (2014). *Emission Test Cycles, European Stationary Cycle (ESC)* [online]. [18.6.2018]. Saatavissa: <http://www.dieselnet.com/standards/cycles/esc.php>.
- Direktiivi 91/441/EEC. Council Directive of 26 June 1991 amending Directive 70/220/EC on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles [online]. [13.10.2014]. Saatavissa: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1991:242:0001:0106:EN:PDF>.
- Direktiivi 98/69/EC. Directive of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998, relating to measures to be taken against air pollution by emissions from motor vehicles and amending Council Directive 70/220/EEC [online]. [13.10.2014]. Saatavissa: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CONSLEG:1998L0069:19981228:EN:PDF>.
- Ekoake (2012). *Uuden auton päästötiedot* [online]. [27.1.2012]. Saatavissa: <http://ekoake.autoalanverkkopalvelu.fi/default.asp>.

- Evans, L., J. MacIsaac Jr., J. Harris, K. Yates, W Dudek, J. Holmes, J. Popio, D. Rice & M. Salaani (2009). NHTSA Tire Fuel Efficiency Consumer Information Program Development: Phase 2 – *Effects of Tire Rolling Resistance Levels on Traction, Tread-wear, and Vehicle Fuel Economy*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration, DOT HS 811 154.
- Fontaras, G., H. Kouridis, Z. Samaras, D. Elst, & R. Gense (2007). Use of a vehicle-modelling tool for predicting CO₂ emissions in the framework of European regulations for light goods vehicles. *Atmospheric Environment* [online]. Volume 41, Issue 14, May 2007, 3009-3021. ISSN 1352-2310. [7.10.2013]. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.12.004>.
- Fontaras, G. & Z. Samaras (2009). On the way to 130 g CO₂/km – Estimating the future characteristics of the average European passenger car, *Energy Policy* [online]. Volume 38, Issue 4, April 2010, 1826-1833. [7.10.2013]. Saatavissa <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421509009094>.
- Hausberger, S., M. Rexeis, J. Blassnegger & G. Silberholz (2011). *Evaluation of fuel efficiency improvements in the Heavy-Duty Vehicle (HDV) sector from improved trailer and tire designs by application of a new test procedure* [online]. Graz: Graz University of Technology. [21.11.2015]. Saatavissa: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Final_Report_ICCT_VDA_FINAL2.pdf.
- Heissing, B. & M. Ersoy (Eds.) (2011). *Chassis Handbook*. Fundamentals, Driving Dynamics, Components, Mechatronics, Perspectives. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- IEA (2011). *CO₂ emissions from fuel combustion – Highlights*, 2011 Edition [online]. Paris: International Energy Agency. [5.5.2012]. Saatavissa: <http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>.
- Ikonen, M. (1984). Säästöä syntyy helposti - viisi kuskia kulutuskokeessa. Helsinki: A-Lehdet Oy, *Tuulilasi* 8/1984, 32–35.

- Ikonen, M. (2013). *Aja taloudellisesti – Ajoneuvon, kuljettajan ja olosuhteiden vaikutus polttoaineenkulutukseen*. Turun ammattikorkeakoulun oppimateriaaleja 80. Turku: Turun ammattikorkeakoulu, Auto- ja kuljetustekniikan koulutusohjelma. Saatavissa myös: <http://julkaisut.turkuamk.fi/isbn9789522163936.pdf>.
- Irimescu, A., L. Mihon & G. Pădure (2011). Automotive Transmission Efficiency Measurement Using a Chassis Dynamometer. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 12, No. 4, 555–559.
- Liikennevirasto (2013). *Tien suuntauksen suunnittelu*. Liikenneviraston ohjeita 30/2013 [online]. [21.1.2018]. Saatavissa: https://julkaisut.liikennevirasto.fi/pdf3/lo_2013-30_tien_suuntauksen_suunnittelu.pdf.
- MIT (2007). *Units & Conversions Fact Sheet*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology [online]. [18.5.2012]. Saatavissa: http://www.mitenergyclub.org/assets/2008/11/15/Units_ConvFactors.MIT_EnergyClub_Factsheet.v8.pdf.
- Mock, P., J. German, A. Bandivadekar, I. Riemersma (2012). *Discrepancies between type approval and “real world” fuel consumption and CO₂ values*, Assessment for 2001–2011 European Passenger cars [online]. ICCT Working paper 2012-02. Washington, San Francisco and Berlin: The International Council on Clean Transportation. [30.12.2014]. Saatavissa: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_EU_fuelconsumption2_workingpaper_2012.pdf.
- OPEC (2014). *World Oil Outlook* [online]. Vienna: Organization of the Petroleum Exporting Countries. [22.9.2016]. Saatavissa: https://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/.../WOO_2014.pdf.
- Oil (2016). *Öljytuotteiden kuluttajahintaseuranta* [online]. Helsinki: Öljy- ja biopolttoaineala ry [7.4.2016]. Saatavissa: www.oil.fi/fi/tilastot-1-hinnat-ja-verot/11-oljytuotteiden-kuluttajahintaseuranta.

- Pavlovic, J., B. Ciuffo, G. Fontaras, V. Valverde & A Marotta (2018). How much difference in type-approval CO₂ emissions from passenger cars in Europe can be expected from changing to the new test procedure (NEDC vs. WLTP)? *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Vol. 111, 136-147. [30.6.2018]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856417312831>.
- Pitkänen J. (1982). *Mäntämoottoritekniikan perusteet ja konedynamiikka*. Opintojakson opetusmonisteet, syyskuu 1987. Espoo: Teknillinen korkeakoulu.
- Rohde-Brandenburger, K. (2012). Gewichtseinfluss auf die CO₂-Emission von Pkw Karosseriebauteile. Hamburg, 12. Internationale ATZ-Fachtagung. *ATZ Auto-technology*, 03 June 2012 / Volume 12.
- Sandberg, U. & J. Ejsmont (2000). *Noise emission, friction and rolling resistance of car tires – Summary of an experimental study*. Linköping: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI). VTI särtryck 339/2000.
- Tilastokeskus (2012). *Suomen kasvihuonepäästöt 1990–2010* [online]. Helsinki: Tilastokeskus, katsauksia 2012/1. [5.5.2012]. Saatavissa: http://www.stat.fi/tup/khkinv/suominir_2012.pdf.
- US DOE (2016). *Where The Energy Goes: Gasoline Vehicles* [online]. United States Department of Energy. [14.2.2016]. Saatavissa: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>.
- VTT (2016). *Suomen tieliikenteen päästöjen kehitys* [online]. LIPASTO-laskenta-järjestelmä: LIISA 2016 -laskenta, Suomen tieliikenteen päästöt 2016, päivitetty 27.6.2017. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. [20.2.2018]. Saatavissa: <https://lipasto.vtt.fi/liisa/perustulos2016.htm>.
- Wiegand, B. (2016). *Estimation of the Rolling Resistance of Tires*. Warrendale: SAE International, Technical Paper 2016-01-0445, 2016. doi:10.4271/2016-01-0445.

**AUTOKOULULAISTEN KESKUUDESSA MITATUT KULUTUSTULOKSET
 ENNEN JA JÄLKEEN KOULUTUKSEN (n = 198)**

NIMI	AIKA			POLTTOAINEENKULUTUS			
	testi 1 [min]	testi 2 [min]	muutos [min]	testi 1 [l/100km]	testi 2 [l/100km]	muutos [l/100km]	muutos [%]
susanna	20.0	19.0	-1.0	7.4	6.9	-0.5	-6.8
jenna	18.0	17.0	-1.0	8.6	6.6	-2.0	-23.3
eero	22.5	18.5	-4.0	10.6	7.8	-2.8	-26.4
mikko	25.5	22.0	-3.5	10.3	8.7	-1.6	-15.5
salla-maria	19.5	20.5	1.0	8.8	7.6	-1.2	-13.6
jani	14.0	18.0	4.0	11.2	6.9	-4.3	-38.4
anna	22.0	18.5	-3.5	8.6	7.2	-1.4	-16.3
mia	18.0	17.0	-1.0	8.7	6.7	-2.0	-23.0
christina	20.5	19.0	-1.5	11.0	8.0	-3.0	-27.3
susanne	19.0	17.0	-2.0	8.6	6.8	-1.8	-20.9
laura	18.0	17.5	-0.5	8.8	6.9	-1.9	-21.6
nina	17.5	18.0	0.5	8.8	7.0	-1.8	-20.5
pekka v	26.0	26.0	0.0	10.1	9.1	-1.0	-9.9
iida	18.0	17.0	-1.0	7.2	6.3	-0.9	-12.5
helena	17.5	18.5	1.0	8.2	6.8	-1.4	-17.1
janne	19.0	17.5	-1.5	9.2	7.2	-2.0	-21.7
petri	18.5	18.5	0.0	8.3	6.8	-1.5	-18.1
nea	22.0	24.5	2.5	10.1	9.4	-0.7	-6.9
pekka j	19.5	18.5	-1.0	9.6	7.6	-2.0	-20.8
emmi	17.0	20.0	3.0	8.1	7.5	-0.6	-7.4
ville n	19.0	18.0	-1.0	8.4	7.0	-1.4	-16.7
jaana	19.0	20.5	1.5	8.2	7.4	-0.8	-9.8
kirsi	20.5	17.0	-3.5	8.8	6.8	-2.0	-22.7
alexei	16.5	14.5	-2.0	8.6	6.3	-2.3	-26.7
jukka	20.5	20.5	0.0	8.1	7.1	-1.0	-12.3
toni	20.0	20.5	0.5	8.0	7.4	-0.6	-7.5
emilia	20.0	18.0	-2.0	9.4	7.2	-2.2	-23.4
jenni	16.5	18.0	1.5	7.7	7.1	-0.6	-7.8
sara	19.5	16.5	-3.0	9.3	7.0	-2.3	-24.7
leena	18.0	17.0	-1.0	8.7	7.0	-1.7	-19.5
maria s	19.0	19.0	0.0	9.4	7.6	-1.8	-19.1
susanna	20.5	19.5	-1.0	9.5	7.3	-2.2	-23.2
juho	17.5	19.0	1.5	8.9	7.2	-1.7	-19.1
elise	20.5	18.5	-2.0	9.7	7.2	-2.5	-25.8
ville v	22.0	27.5	5.5	11.2	10.0	-1.2	-10.7
aarni	18.5	18.5	0.0	9.1	7.6	-1.5	-16.5
reetta	18.0	21.0	3.0	9.8	8.3	-1.5	-15.3
elli	19.0	18.5	-0.5	8.8	7.6	-1.2	-13.6
jere	15.0	13.5	-1.5	7.7	6.6	-1.1	-14.3
miika	15.0	13.5	-1.5	9.6	6.0	-3.6	-37.5
aarni	14.0	15.5	1.5	7.6	6.4	-1.2	-15.8
kristiina	17.0	17.0	0.0	6.5	6.0	-0.5	-7.7
eveliina	15.5	16.0	0.5	7.8	6.9	-0.9	-11.5
iikka	13.0	13.0	0.0	9.0	6.8	-2.2	-24.4
sari	19.5	19.5	0.0	9.2	7.1	-2.1	-22.8
markus	14.5	14.0	-0.5	7.9	6.8	-1.1	-13.9
asko	21.5	22.0	0.5	9.5	8.2	-1.3	-13.7
inka	18.0	14.5	-3.5	10.8	6.8	-4.0	-37.0
sanna	18.5	16.5	-2.0	9.0	7.4	-1.6	-17.8
noora	21.5	18.0	-3.5	9.7	7.0	-2.7	-27.8
taija	14.5	15.5	1.0	11.5	7.3	-4.2	-36.5
rym	16.0	14.0	-2.0	9.8	6.9	-2.9	-29.6
jenni	15.5	15.0	-0.5	9.7	7.7	-2.0	-20.6
besim	15.0	16.0	1.0	8.7	7.4	-1.3	-14.9
jenni	18.5	20.5	2.0	9.1	8.2	-0.9	-9.9

NIMI	AIKA			POLTTOAINEENKULUTUS			
	testi 1 [min]	testi 2 [min]	muutos [min]	testi 1 [l/100km]	testi 2 [l/100km]	muutos [l/100km]	muutos [%]
inkeri	19.0	14.5	-4.5	8.6	6.6	-2.0	-23.3
matias	15.0	14.5	-0.5	7.1	6.4	-0.7	-9.9
niko	15.5	13.5	-2.0	7.6	5.8	-1.8	-23.7
riku	13.5	16.0	2.5	8.0	7.7	-0.3	-3.8
miia	14.0	14.0	0.0	7.6	6.8	-0.8	-10.5
matias	23.5	22.5	-1.0	8.6	6.8	-1.8	-20.9
akseli	25.0	21.0	-4.0	10.3	7.8	-2.5	-24.3
jatta	20.0	20.5	0.5	9.6	7.8	-1.8	-18.8
abbas	19.0	18.0	-1.0	10.4	7.3	-3.1	-29.8
petra	25.0	26.0	1.0	8.5	6.9	-1.6	-18.8
jenni	17.0	19.0	2.0	8.6	7.9	-0.7	-8.1
kim	22.0	20.5	-1.5	9.7	7.7	-2.0	-20.6
henna	18.0	20.5	2.5	7.5	6.6	-0.9	-12.0
osman	19.0	21.0	2.0	8.4	7.6	-0.8	-9.5
inkeri	20.0	19.0	-1.0	7.9	7.1	-0.8	-10.1
sirkku	14.5	13.0	-1.5	9.8	6.6	-3.2	-32.7
jasmina	17.5	18.0	0.5	8.3	6.4	-1.9	-22.9
juhamatti	13.5	13.5	0.0	7.8	6.2	-1.6	-20.5
dan	18.0	17.5	-0.5	9.4	6.4	-3.0	-31.9
mikko	14.0	13.0	-1.0	8.1	6.3	-1.8	-22.2
assad	19.5	18.5	-1.0	9.2	7.8	-1.4	-15.2
elias	16.0	18.5	2.5	9.4	8.1	-1.3	-13.8
riku	20.0	20.0	0.0	9.5	7.4	-2.1	-22.1
janne	19.0	16.0	-3.0	7.9	6.7	-1.2	-15.2
neriman	17.0	17.5	0.5	7.7	6.6	-1.1	-14.3
hanna-k	13.5	13.0	-0.5	7.8	6.2	-1.6	-20.5
joona	19.5	18.5	-1.0	9.2	7.8	-1.4	-15.2
adelina/ope	17.0	17.5	0.5	10.8	6.8	-4.0	-37.0
arto	19.5	17.5	-2.0	10.1	6.8	-3.3	-32.7
niklas	18.0	21.0	3.0	7.5	7.5	0.0	0.0
tomi	17.5	18.5	1.0	8.5	7.0	-1.5	-17.6
saku	17.5	17.5	0.0	9.9	6.8	-3.1	-31.3
kaarina	19.5	18.0	-1.5	9.9	7.4	-2.5	-25.3
pyry	22.5	19.5	-3.0	9.7	7.1	-2.6	-26.8
jasmin	18.0	18.0	0.0	9.3	7.3	-2.0	-21.5
anguelina	14.5	13.5	-1.0	8.8	6.1	-2.7	-30.7
teija	12.5	13.0	0.5	7.3	6.4	-0.9	-12.3
aino	13.5	13.5	0.0	7.4	6.0	-1.4	-18.9
aki	17.5	14.5	-3.0	7.9	6.5	-1.4	-17.7
suwanna	19.0	17.0	-2.0	10.2	6.7	-3.5	-34.3
riku	15.0	14.0	-1.0	12.6	7.1	-5.5	-43.7
rebecca	19.0	20.5	1.5	9.9	8.3	-1.6	-16.2
nina	21.0	16.0	-5.0	10.1	6.2	-3.9	-38.6
eetu	17.5	19.0	1.5	9.4	7.6	-1.8	-19.1
niko	13.5	14.5	1.0	7.0	6.5	-0.5	-7.1
aki	14.5	15.0	0.5	8.1	7.0	-1.1	-13.6
mika	15.0	13.0	-2.0	7.8	6.3	-1.5	-19.2
jesse	13.5	13.5	0.0	8.5	6.7	-1.8	-21.2
antti	15.0	14.5	-0.5	7.6	6.2	-1.4	-18.4
suwanna	19.0	17.0	-2.0	10.2	6.7	-3.5	-34.3
anong	22.5	19.5	-3.0	10.8	7.9	-2.9	-26.9
arthur	17.5	18.5	1.0	9.1	8.2	-0.9	-9.9
joni	17.0	20.0	3.0	8.8	7.6	-1.2	-13.6
annika	22.5	19.5	-3.0	9.2	6.8	-2.4	-26.1
ossi	19.0	21.0	2.0	9.1	8.2	-0.9	-9.9

NIMI	AIKA			POLTTOAINEENKULUTUS			
	testi 1 [min]	testi 2 [min]	muutos [min]	testi 1 [l/100km]	testi 2 [l/100km]	muutos [l/100km]	muutos [%]
rim	14.0	14.5	0.5	8.4	6.7	-1.7	-20.2
aku	14.5	15.0	0.5	7.4	6.5	-0.9	-12.2
minna	16.0	14.0	-2.0	8.0	6.7	-1.3	-16.3
auriina	18.5	20.0	1.5	8.5	8.5	0.0	0.0
olow	13.5	12.5	-1.0	9.4	8.0	-1.4	-14.9
lauri v	18.5	18.0	-0.5	12.2	7.2	-5.0	-41.0
lauri s	21.0	18.0	-3.0	10.6	6.9	-3.7	-34.9
joonas	18.0	19.0	1.0	8.5	6.9	-1.6	-18.8
lari	14.5	17.0	2.5	10.0	8.0	-2.0	-20.0
jenina	13.5	13.5	0.0	7.9	6.7	-1.2	-15.2
maria	16.5	16.5	0.0	8.8	8.8	0.0	0.0
julia f	15.5	16.5	1.0	9.2	7.4	-1.8	-19.6
nora	20.0	19.5	-0.5	9.6	7.4	-2.2	-22.9
maria	12.0	12.0	0.0	7.6	6.7	-0.9	-11.8
miia	15.0	13.5	-1.5	11.4	8.1	-3.3	-28.9
otto	19.0	18.0	-1.0	9.8	6.6	-3.2	-32.7
jasmina	22.0	18.5	-3.5	8.9	6.9	-2.0	-22.5
eero	19.0	20.0	1.0	8.4	7.7	-0.7	-8.3
christian	20.0	20.0	0.0	11.9	7.9	-4.0	-33.6
arton	19.5	19.5	0.0	9.1	7.1	-2.0	-22.0
henry	14.5	17.0	2.5	10.0	8.0	-2.0	-20.0
nina	13.5	13.0	-0.5	7.4	6.5	-0.9	-12.2
eveliina	14.0	13.0	-1.0	8.2	7.0	-1.2	-14.6
heidi	13.5	15.0	1.5	7.2	7.0	-0.2	-2.8
maria m	22.0	20.5	-1.5	12.7	8.6	-4.1	-32.3
elina	22.0	20.0	-2.0	10.1	7.9	-2.2	-21.8
sami	18.5	21.0	2.5	9.4	7.3	-2.1	-22.3
noora	18.5	21.0	2.5	9.4	7.3	-2.1	-22.3
jussi	15.0	13.5	-1.5	8.1	6.6	-1.5	-18.5
anni	15.5	13.0	-2.5	8.0	6.3	-1.7	-21.3
jussi-p	14.5	15.5	1.0	7.2	7.0	-0.2	-2.8
ville	14.0	13.0	-1.0	8.2	7.0	-1.2	-14.6
martina	21.0	17.5	-3.5	9.4	6.7	-2.7	-28.7
jenni	21.5	21.0	-0.5	10.9	8.9	-2.0	-18.3
henri	18.0	19.0	1.0	8.2	6.6	-1.6	-19.5
eva	19.0	19.0	0.0	7.9	7.1	-0.8	-10.1
harri	19.0	19.0	0.0	11.8	9.3	-2.5	-21.2
george	13.5	13.0	-0.5	7.2	6.5	-0.7	-9.7
ahmad/ope	22.5	21.0	-1.5	11.1	6.0	-5.1	-45.9
salla	15.0	13.0	-2.0	9.3	7.9	-1.4	-15.1
maarit	13.5	12.0	-1.5	9.5	8.1	-1.4	-14.7
kalle	21.0	18.0	-3.0	11.8	6.8	-5.0	-42.4
mustatha	16.5	15.0	-1.5	8.6	6.7	-1.9	-22.1
jonna	19.0	20.0	1.0	8.8	7.5	-1.3	-14.8
raul	16.5	15.5	-1.0	9.0	7.2	-1.8	-20.0
marianna	17.0	15.5	-1.5	9.0	6.5	-2.5	-27.8
greta	16.0	16.0	0.0	8.0	6.7	-1.3	-16.3
iida	15.0	12.0	-3.0	8.3	6.5	-1.8	-21.7
ville	20.0	17.0	-3.0	10.1	7.4	-2.7	-26.7
eero	16.0	16.0	0.0	9.7	7.7	-2.0	-20.6
johanna	15.5	15.5	0.0	8.8	7.0	-1.8	-20.5
leena	22.0	19.0	-3.0	10.2	7.4	-2.8	-27.5
jouni	17.5	17.5	0.0	9.2	7.1	-2.1	-22.8
niina	15.0	12.0	-3.0	9.1	7.1	-2.0	-22.0
jenni	14.0	13.0	-1.0	10.0	7.7	-2.3	-23.0

NIMI	AIKA			POLTTOAINEENKULUTUS			
	testi 1 [min]	testi 2 [min]	muutos [min]	testi 1 [l/100km]	testi 2 [l/100km]	muutos [l/100km]	muutos [%]
jutta	14.0	13.5	-0.5	8.1	7.1	-1.0	-12.3
jussi	14.0	13.0	-1.0	8.6	7.3	-1.3	-15.1
jani	13.5	13.0	-0.5	8.3	8.0	-0.3	-3.6
leena	13.5	13.5	0.0	11.9	10.4	-1.5	-12.6
denise	13.0	13.0	0.0	11.7	7.3	-4.4	-37.6
petri	15.0	13.5	-1.5	8.6	7.5	-1.1	-12.8
olga	22.0	19.0	-3.0	10.2	7.4	-2.8	-27.5
anna-liisa	18.5	18.5	0.0	9.5	6.8	-2.7	-28.4
senni	20.5	19.0	-1.5	10.4	7.3	-3.1	-29.8
kaisu	19.0	17.5	-1.5	10.6	7.3	-3.3	-31.1
tomi	17.5	19.0	1.5	9.0	8.6	-0.4	-4.4
eveliina	13.5	13.0	-0.5	7.2	6.9	-0.3	-4.2
pekka	13.0	14.0	1.0	8.4	7.5	-0.9	-10.7
diina	12.0	13.0	1.0	8.1	7.0	-1.1	-13.6
emilia	13.0	13.5	0.5	7.8	6.5	-1.3	-16.7
asta	14.0	15.0	1.0	8.9	7.1	-1.8	-20.2
hanna	23.0	19.0	-4.0	8.2	6.4	-1.8	-22.0
mirka	19.5	20.0	0.5	8.8	7.2	-1.6	-18.2
heikki	15.5	14.5	-1.0	8.1	6.0	-2.1	-25.9
jyri	19.0	20.5	1.5	9.5	7.0	-2.5	-26.3
mikaela	17.0	16.5	-0.5	7.8	6.2	-1.6	-20.5
alisa	20.0	20.5	0.5	9.3	7.3	-2.0	-21.5
suvi	21.5	18.5	-3.0	8.7	6.6	-2.1	-24.1
ulla	17.0	16.0	-1.0	8.2	6.9	-1.3	-15.9
riikka	17.5	15.0	-2.5	10.4	9.3	-1.1	-10.6
Marjo	13.5	14.5	1.0	8.3	7.2	-1.1	-13.3
Aran/ope	22.0	19.0	-3.0	9.8	7.3	-2.5	-25.5
Ali	17.0	15.0	-2.0	12.4	7.2	-5.2	-41.9
Matti	19.5	20.0	0.5	9.5	7.2	-2.3	-24.2
Sini	20.5	21.0	0.5	9.9	8.7	-1.2	-12.1
Tjing/ope	17.0	17.5	0.5	11.3	7.8	-3.5	-31.0
Tram	20.0	22.5	2.5	8.3	6.8	-1.5	-18.1
Sefik	20.5	19.5	-1.0	8.1	6.6	-1.5	-18.5
Keskiarvo koko otannasta (4 liitesivua) n = 198	testi 1 [min]	testi 2 [min]	muutos [min]	testi 1 [l/100km]	testi 2 [l/100km]	muutos [l/100km]	muutos [%]
	17.7	17.2	-0.5	9.1	7.2	-1.9	-20.6

