

**Metsätehon raportti 166**  
**9.1.2004**

**Rajoitettu jakelu**

Metsähallitus  
Metsäliitto Osuuskunta  
Metsäteollisuus ry  
Stora Enso Oyj  
UPM-Kymmene Oyj  
Vapo Timber Oy  
Yksityismetsätalouden Työnantajat r.y.

**Puutavara-autojen polttoaineen  
kulutus**

*Jouni Väkevä*  
*Olavi Pennanen*  
*Jouko Örn*

## **Puutavara-autojen polttoaineen kulutus**

**Jouni Väkevä  
Olavi Pennanen  
Jouko Örn**

Metsätehon raportti 166  
9.1.2004

Rajoitettu jakelu:

Metsähallitus, Metsäliitto Osuuskunta, Metsäteollisuus ry,  
Stora Enso Oyj, UPM-Kymmene Oyj, Vapo Timber Oy,  
Yksityismetsätalouden Työnantajat r.y.

Asiasanat:

polttoaineen kulutus, puutavara-auto, ympäristövaikutukset,  
päästöt, energian kulutus, kuljetus

© Metsäteho Oy

Helsinki 2004

## SISÄLLYS

<b>ALKUSANAT .....</b>	<b>4</b>
<b>TIIVISTELMÄ.....</b>	<b>5</b>
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 KYSELYTUTKIMUS.....</b>	<b>9</b>
2.1 Menetelmät ja aineisto .....	9
2.2 Tulokset.....	12
<b>3 KULUTUSMITTAUKSET.....</b>	<b>14</b>
3.1 Menetelmät ja aineisto .....	14
3.1.1 Kuormattuna- ja tyhjänäajo.....	15
3.1.2 Pysähdykset.....	16
3.2 Tulokset.....	17
3.2.1 Kuormattuna- ja tyhjänäajo.....	17
3.2.2 Pysähdykset.....	19
3.2.3 Kokonaiskulutus .....	20
<b>4 KULUTUKSEN JA PÄÄSTÖJEN SIMULOINTI.....</b>	<b>21</b>
4.1 Menetelmät ja aineisto .....	21
4.2 Tulokset.....	22
4.2.1 Simuloinnin toimivuus.....	22
4.2.2 Ajonopeuden ja ajoneuvon massan vaikutus kulutukseen ja päästöihin.....	23
4.2.3 Polttoaineen kulutus ja päästöt eri kuljetusreiteillä .....	24
<b>5 YHTEENVETO JA TULOSTEN TARKASTELU.....</b>	<b>25</b>
5.1 Kulutusmalli .....	25
5.2 Vertailu muihin tuloksiin .....	27
5.3 Kulutuksen vaihtelu.....	28
5.4 Tulosten soveltaminen.....	29
5.5 Jatkotutkimustarpeet.....	30
<b>LÄHTEET.....</b>	<b>32</b>

## ALKUSANAT

Tutkimus toteutettiin osana Metsäteho Oy:n projektia *Metsäkoneiden ja puutavara-autojen polttoaineen kulutus*. Metsäkoneita koskevat tulokset on julkaistu Metsätehon raportissa nro 148. Tämän tutkimuksen osatehtävien toteutukseen osallistuivat seuraavat organisaatiot ja henkilöt.

### Projektin johtoryhmä:

*Hannu Airavaara*, UPM-Kymmene Oyj, puheenjohtaja; *Pertti Blomberg*, Metsähallitus; *Kari Immonen*, Yksityismetsätalouden Työnantajat r.y.; *Kari Peltonen*, Metsäliitto Osuuskunta; *Kimmo Roininen*, Stora Enso Oyj; *Harri Rumpunen*, Metsäteollisuus ry.

### Metsätehon projektiryhmä:

*Kaarlo Rieppo*, projektipäällikkö (05/2003 asti), tutkija; *Jouni Väkevä*, projektipäällikkö (05/2003 alkaen), tutkija; *Olavi Pennanen*, erikoistutkija; *Jouko Örn*, erikoistutkija.

### Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Tekniikka ja liikenne:

*Mikko Keskinen*, logistiikan lehtori. Projektiassistentteina toimivat insinööriopiskelijat: *Pasi Sauna-aho*, *Erno Lehtinen*, *Janne Herukka*, *Timo Nisula ja Henri Vuolle*.

### EC-Tools Oy:

*Matti Liedes*.

### Tiehallinto:

*Olavi Koskinen*.

### Vemosim Oy:

*Jussi Sauna-aho ja Pasi Sauna-aho*.

Lisäksi projektin aikana saatiin arvokasta **asiantuntija-apua** seuraavilta henkilöiltä:

*Seppo Pyrrö*, Motiva Oy

*Heikki Parkkonen*, Metsäalan Kuljetusyrittäjät ry

*Jukka Lahti*, UPM-Kymmene Oyj

Projektin rahoittivat edellä mainitut hankkeeseen osallistuneet Metsätehon osakkaat ja Liikenne- ja viestintäministeriö.

*Parhaimmat kiitokset kaikille projektiin osallistuneille henkilöille!*

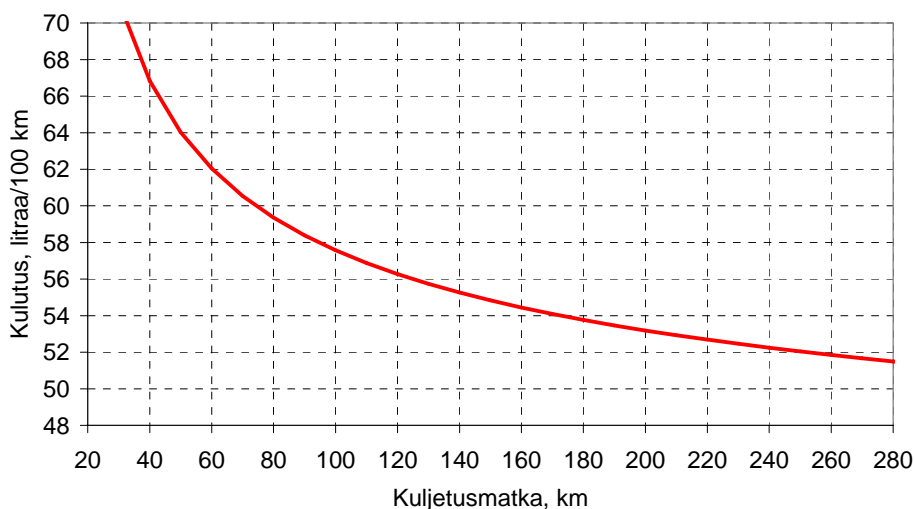
Helsingissä 9.1.2004

Jouni Väkevä, projektipäällikkö

## TIIVISTELMÄ

Ympäristö- ja kustannuslaskentaa varten tarvitaan ajantasaista tietoa puutavaran kuljetuksissa kuluneen polttoaineen ja syntyneiden päästöjen määristä. Kulutukseen vaikuttavien tekijöiden tunteminen on myös olennaista, jotta osataan valita kustannustehokkaita kuljetusmenetelmiä ja kohdentaa säästämis- ja kehittämistoimenpiteet oikeisiin kohteisiin.

Tutkimus toteutettiin yhteistyössä Jyväskylän ammattikorkeakoulun, EC-Tools Oy:n ja Vemosim Oy:n kanssa. Projektin lopputuloksena laadittiin polttoaineen kulutusmalli (kuva A), jonka rakenne perustuu yksityiskohtaiseen mittaustietoon ja kulutustaso kuljetusyrittäjille tehtyyn kyselyyn.



**Kuva A.** Tutkimuksen tuloksena laadittu polttoaineen kulutusmalli puutavara-autolle (tyhjänäajon osuus kokonaisajomatkasta 50 %).

Polttoaineen kulutuksen rakennetta ja riippuvuutta kuljetusmatkasta selvitettiin keräämällä vuoden ajan yksityiskohtaista tietoa yhdestä keskisuomalaisesta puutavara-autosta. Tiedonkeruussa käytettiin SKALNET-laitteistoa, niin sanottua mustaa laatikkoa, jolla saatiin tarkat tiedot muun muassa polttoaineen kulutuksesta, ajokilometreistä, pysähdyksistä ja auton sijainnista. Autosta kerätyt tiedot yhdistettiin kuormatietoihin, jolloin voitiin tarkastella polttoaineen kulutusta kuormattuna- ja tyhjänäajossa sekä pysähdysten aikana.

Polttoaineen kulutuskyselyyn vastasi 31 kuljetusyrittäjää eri puolilta maata. Seurantatietoja kertyi yhteensä 3,4 miljoonan kilometrin matkalta ja polttoainetta yrittäjät käyttivät yhteensä 2,0 miljoonaa litraa. Autokohtaiset keskikulutukset muunnettiin laskennallisesti samalle, 50 prosentin tyhjänäajo-osuudelle ja alle 12 kuukauden seurantatietoihin tehtiin kausikorjaukset, jotta tulokset saatiin keskenään vertailukelpoisiksi.

Projektissa testattiin myös VEMOSIM-simulaattoria polttoaineen kulutuksen ja päästöjen määrittämisessä. Testireitillä simulaattori päätyi samaan polttoaineen kulutukseen kuin mittauskin. Simulointi on nopea tapa selvittää erilaisten kalustoratkaisujen tai ajotapojen vaikutusta kulutukseen ja sen avulla voidaan määrittää myös päästöt. Simuloinnissa tarvittavien tien pystygeometriatietojen keruuseen tulisi jatkossa kehittää uusia menetelmiä. Simuloinnissa tarvitaan jatkossa myös moottorikarttoja uudesta autokalustosta.

Ympäristölaskennan merkityksen ennustetaan jatkossa kasvavan, mikä asettanee lisävaatimuksia laskentatietojen yksityiskohtaisuudelle ja ajantasaisuudelle. Voidaan myös ennustaa, että vaatimukset energiankulutuksen ja päästöjen vähentämiseen tulevat jatkossa kasvamaan.

Polttoaineen kulutuksen vähentäminen on keskeinen tavoite, kun tavoitellaan parempaa kustannustehokkuutta. Keskeisiä toimijoita kustannustehokkuuden parantamisessa ovat kaluston valmistajat, kuljetusyrittäjät, kuljettajat, kuljetuspalvelujen ostajat, kuljetusten ohjaajat ja tiestön ylläpidosta vastaavat tahot.

Teknologian kehittyminen on tuonut uusia mahdollisuuksia kulutus- ja päästötietojen keruuseen. Kulutustietoja voidaan kerätä automaattisesti auton omilla laitteilla tai erillisellä tiedonkeruuyksiköllä. Tutkimuskäyttöön tulisi jatkossa kehittää automaattisia tiedonkeruumenetelmiä, joilla voidaan erotella muun muassa kuljetuksen eri työvaiheet ja tieluokat toisistaan. Myös päästöjen mittaukseen on kehitetty uusia laitteita, joiden soveltuvuus ajonaikaisiin mittauksiin tulisi testata todellisissa ajo-olosuhteissa.

## 1 JOHDANTO

Puunkorjuun ja autokuljetuksen polttoaineen kulutuksen selvittämiseksi Metsäteho Oy toteutti vuosien 2002 – 2003 aikana projektin ”*Metsäkoneiden ja puutavara-autojen polttoaineen kulutus*”. Projekti toteutettiin yhteistyössä Jyväskylän ammattikorkeakoulun, EC-Tools Oy:n, Tiehallinnon ja Vemosim Oy:n kanssa. Metsäkoneita koskevat tulokset on esitetty Metsätehon raportissa nro 148. Tässä raportissa esitetään tulokset puutavara-autojen polttoaineen kulutuksesta.

Polttoaineen kulutuksesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä tarvitaan ajantasaista tietoa ympäristö- ja kustannuslaskennan käyttöön. Ympäristölas kennassa tarvitaan myös päästötietoja. Tiukentuvien ympäristövaatimusten myötä energian kulutukseen kiinnitetään jatkossa yhä enemmän huomiota. Polttoainekustannukset ovat työvoimakustannusten jälkeen toiseksi suurin kustannuserä puutavaran autokuljetuksessa. Niiden osuus kokonaiskustannuksista on polttoaineen hintatasosta riippuen vaihdellut 22 – 27 %:n välillä viime vuosien aikana.

Aikaisempi tietämys polttoaineen kulutuksesta perustuu 1980-luvun tutkimuksiin (esimerkiksi Koskinen ja Pennanen, 1986) ja 1990-luvun aikana tehtyihin arvioihin ja kokemusperäisiin tietoihin. Ruotsissa toteutettiin laaja kulutustutkimus, Transmit-projekti tämän vuosikymmenen alussa (Forsberg, M., 2002; Forsberg, M. & Löfroth, C., 2002a ja Forsberg, M. & Löfroth, C., 2002b).

Polttoainetalouteen vaikuttavat monet tekijät, joista esitetään yhteenveto taulukossa 1. Taulukon lähteinä ovat Suomen Kuorma-autoliitto ry:n koulutusaineisto (SKAL 2001) ja Metsäteho Oy.

TAULUKKO 1 Polttoainetalouteen vaikuttavia tekijöitä

<b>Taloudellinen ajotapa</b> Tavoitenopeuden valinta Vaihteen vaihtostrategia	<b>Säästöt ja hyödyt *</b> Pienemmät polttoainekustannukset 0–25 % Pienemmät korjaus- ja huoltokustannukset 0–15 % Pienemmät rengaskustannukset 0–30 % Parempi ajoneuvon jäännösarvo Pienemmät liikennevahinkojen kustannukset ja suuremmat vakuutusmaksujen bonukset Pienemmät ympäristörasitukset
<b>Kaluston oikea mitoitus</b> Moottorin valinta Voimansiirtolinjan valinta Alhainen kaluston omapaino	<b>Hyödyt</b> Parempi kilpailukyky markkinoilla ja kannattavuus
<b>Poltto- ja voiteluaineet</b> Kesä- ja talvilaatujen oikea-aikainen käyttö Korkealuokkaiset voiteluaineet	<b>Säästöt</b> Kulutusero 2–3%  Pienempi kulutus ja moottorin kuluminen, pidempi öljynvaihtoväli
<b>Ajoneuvon huolto</b> Viallinen polttoainejärjestelmä Likaiset suodattimet Virheellinen akselien suuntaus Renkaissa alipainetta -20 %	<b>Lisäkustannukset</b> 1–2 %  1 % 5–20 % 5–7 %
<b>Kuljetusten suunnittelu</b> Reittipituuden optimointi ja tyhjänäajon vähentäminen Nosturin kuljettaminen  Kuorman keräily pienistä eristä Kuorman purkaminen omalla nosturilla	<b>Vaikutukset</b> Vähentävät kokonaiskulutusta  Nostaa tyhjänäajon kulutusta ja pienentää hyötykuormaa Nostaa kulutusta  Nostaa kulutusta
<b>Infrastrukturi</b> Tiestön ominaisuudet, laatu ja kunto	<b>Vaikutukset</b> Merkittävät vaikutukset kulutukseen ja kuljetustehokkuuteen

\* = Säästöt ja hyödyt riippuvat siitä, kuinka paljon polttoainetaloutta parantavia toimenpiteitä yrityksessä on aikaisemmin tehty.

Tutkimuksen päätavoitteina olivat

1. selvittää polttoaineen kulutuksen tasoa ja siihen vaikuttavia tekijöitä
2. kokeilla ja kehittää polttoaineenkulutuksen mittaamenetelmiä
3. kokeilla simuloinnin käyttökelpoisuutta polttoaineen kulutuksen ja päästöjen määrittämisessä.

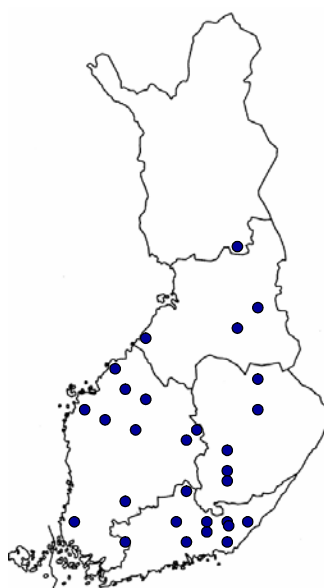
Tavoitteisiin pyrittiin kolmen osatutkimuksen avulla. Kuljetusyrittäjille suunnatun *kyselytutkimuksen* avulla selvitettiin polttoaineen kulutuksen tasoa ja siinä ilmenevää vaihtelua. *Kulutusmittauksissa* kokeiltiin ja kehitettiin mittaamenetelmää ja selvitettiin kulutuksen tasoa ja siihen vaikuttavia tekijöitä. *Simuloinnin* avulla selvitettiin kulutukseen vaikuttavia tekijöitä ja laskettiin päästöjen määrää.



## 2 KYSELYTUTKIMUS

### 2.1 Menetelmät ja aineisto

Kyselytutkimuksen tavoitteena oli selvittää polttoaineen kulutuksen tasoa ja siinä ilmenevä vaihtelu suoraan yrittäjiltä kerätyn aineiston avulla. Kyselytutkimus lähetettiin 655 autoyrittäjälle, joista 31 antoi riittävästi tietoja tulosten laskentaa varten. Vastausten määrä jäi odotettua huomattavasti alhaisemmaksi (vastausprosentti 5 %). Kyselyyn vastanneiden kuljetusyritysten sijainti esitetään kuvassa 1.



**Kuva 1.** Kyselytutkimukseen vastanneiden kuljetusyritysten sijainti.

Aineistossa oli edustettuna kaikkia tyypillisiä automerkkejä (taulukko 2). Yleisin vuosimalli oli 1999 (29 %) ja autoilla oli ajettu keskimäärin 415 000 km. Tyypillisin moottorin ympäristöluokka oli euro2 (68 %). Moottoritehoaan autoista 55 % oli teholuokassa 380–390 kW ja 35 % teholuokassa 330–350 kW.

Kyselytutkimusaineistoa saatiin yhteensä 249 kuukauden ajalta, jolloin ajo-  
matkaa kertyi yhteensä 3,4 milj. km ja polttoainetta käytettiin 2,0 milj. lit-  
raa. Kuormia ajettiin yhteensä noin 16 500 ja laskennallinen keskiluokitus-  
matka oli 129 km. Tyhjänäajoa oli keskimäärin 38 % kokonaisajomatkasta.

TAULUKKO 2 Kyselytutkimuksella kerätty aineisto yhteensä 31 autosta

Vetoauto						Seurantajakson tunnuslukuja						
nro	merkki	malli	vuosi- malli	teho kW	euro lk	mittariluk. km	kesto kk	ajomatka km	tyhj.ajo %	kuormia kpl	kulj.matka km	polttoaine litraa
2	Scania	R144	1999	395	2	475 000	5,0	55 685	15	245	193	30 007
3	Sisu	E12	2002	347	3	113 850	9,5	108 365	25	471	173	68 208
4	Volvo	FH16	1998	382	2	615 000	10,0	127 055	25	561	170	81 318
5	Sisu	E14	1996	312	2	576 000	2,6	17 257	50	<u>43</u>	200	9 478
6	Scania	R144	1999	395	-	590 000	12,0	208 739	48	<u>785</u>	138	121 320
7	Sisu	-	2001	347	2	356 000	10,0	181 150	20	730	199	110 488
8	Sisu	E12	2002	350	3	143 300	10,0	143 300	30	<u>1060</u>	95	93 350
9	Volvo	FH12	2002	362	3	17 956	1,0	17 145	45	74	127	9 615
10	Scania	R144	1998	390	2	390 000	3,0	27 395	30	193	99	16 304
11	Volvo	FH12	1999	343	2	520 000	12,0	176 376	45	<u>960</u>	101	96 878
12	Volvo	FH12	2000	343	2	370 000	10,0	164 670	54	<u>762</u>	99	94 974
13	Volvo	FH16	1999	387	2	400 000	12,0	150 000	20	<u>1200</u>	100	97 500
15	Sisu	-	2001	390	-	158 000	2,0	25 600	50	<u>154</u>	83	14 623
16	Sisu	E14	1998	390	2	560 000	12,1	142 124	40	667	128	87 143
17	Scania	R164	2001	426	3	163 900	6,0	64 181	25	361	133	36 210
18	Sisu	-	1999	345	2	389 053	0,2	2 797	25	24	87	1 688
19	MB	Actros	1998	390	2	500 000	11,9	122 382	45	<u>900</u>	75	75 289
20	MB	Actros	1998	390	2	-	12,0	190 024	50	<u>867</u>	110	112 310
21	MB	Actros	2002	390	3	97 000	2,0	31 788	50	<u>170</u>	93	20 238
22	Volvo	FH12	2000	338	2	378 900	0,1	4 494	50	<u>11</u>	204	2 416
23	Volvo	FH12	2002	338	3	68 214	0,5	10 159	50	<u>45</u>	113	5 867
24	Scania	R144	1999	338	2	421 000	10,0	141 940	40	<u>1071</u>	80	83 380
25	Volvo	FH16	1996	380	2	730 000	11,6	189 263	25	<u>876</u>	162	113 250
26	Sisu	E14	1999	390	2	490 000	10,0	125 464	40	<u>553</u>	136	70 685
27	Volvo	FH16	1997	382	2	860 000	12,0	176 000	50	<u>800</u>	110	109 000
28	Volvo	FH16	1996	345	2	1 250 000	9,9	171 168	45	451	209	92 857
29	Volvo	FH12	2002	340	3	184 843	10,8	184 843	40	<u>820</u>	135	106 043
31	Scania	R144	1999	390	3	-	12,0	141 648	30	<u>800</u>	124	79 892
32	Volvo	FH16	2000	382	2	-	9,9	116 866	45	<u>868</u>	74	68 572
33	Sisu	E14	1999	382	2	395 182	7,5	83 877	50	-	-	49 768
34	Volvo	FH16	1998	382	2	-	12,0	132 209	<u>38</u>	-	-	87494
Yhteensä							249	3 433 964		16 522		2 046 165
Keskimäärin							8,0	110 773	38	570	129	66 005

Taulukon 2 luvuista on osa jouduttu arvioimaan puutteellisten tietojen takia tai muuntamaan toiseen yksikköön (luvut alleviivattu). Kuormien lukumääräarvio laskettiin ilmoitetuista puumääristä olettaen kuorman kooksi 50 m<sup>3</sup>. Auton nro 34 tyhjänäajo-osuudeksi arvioitiin muiden autojen keskiarvo. Kuljetusmatka laskettiin kokonaisajomatkan, kuormien määrän ja tyhjänäajon osuuden avulla.

Tulosten laskennassa käytettiin pääasiassa kulutuksen yksikköä ”litraa/100 km”. Koska keskiikulutukseen vaikuttaa merkittävästi tyhjänäajon suhde kuormattuna-ajoon, laskettiin kaikille autoille niin sanottu korjattu kulutus, jossa tyhjänäajon osuus on 50 %. Korjaus tehtiin kaavalla 1.

Kaava 1. Toteutuneen kulutuksen korjaus 50 %:n tyhjänäajo-osuudelle.

$$\text{Korjattu kulutus} = \frac{\text{Toteutunut kulutus}}{0,8 * \left(\frac{z}{100}\right) + 1,2 * \left(1 - \frac{z}{100}\right)}$$

$z$  = tyhjänäajon osuus (%) kokonaisajomatkasta.

Kertoimet 0,8 ja 1,2 ovat kokemusperäisiä painokertoimia tyhjänäajon kulutuksen suhteesta kuormattuna-ajon kulutukseen.

Koska polttoaineen kulutuksessa on selvää kausivaihtelua (esim. kuva 3), tehtiin toteutuneisiin kulutuksiin ns. kausikorjaus, jos vastaukset perustuivat alle 12 kk seurantajaksoon. Korjauseränä käytettiin kuukausierittelyistä las-kettua kausivaihtelua, jonka suuruus oli seuraava eri kuukausina:

Kuukausi	Korjauserä, litraa/100 km
1	0,29
2	0,27
3	0,22
4	0,07
5	-0,12
6	-0,21
7	-0,25
8	-0,26
9	-0,22
10	-0,08
11	0,17
12	0,13

Edellä mainittujen korjausten tarkoituksena oli tehdä eri autojen kulutuslu-kemat paremmin vertailukelpoisiksi. Muista syistä, kuten ajotavasta, olosuh-teista, tai moottorien ominaisuuksien eroista johtuvaa vaihtelua ei voitu kor-jata tulosten laskentavaiheessa.

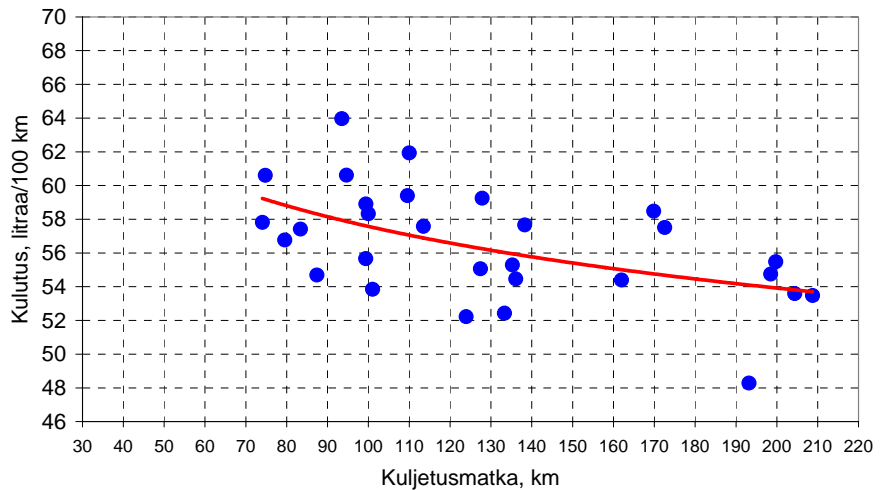
## 2.2 Tulokset

Keskimääräinen toteutunut polttoaineen kulutus oli 59,1 litraa/100 km, kun tyhjänäajoa oli keskimäärin 38 % (taulukko 3). Kun toteutuneisiin kulutuslukuihin oli tehty korjaukset, joilla otettiin huomioon tyhjänäajon osuus ja kausivaihtelu, päädyttiin keskimäärin 56,8 l/100 km kulutukseen (tyhjänäajoa 50 %). Korjaukset pienensivät kulutusta keskimäärin 2,3 litraa/100 km. Keskipuljetusmatka aineistossa oli 129 km.

TAULUKKO 3 Kyselytutkimuksen aineistosta laskettu polttoaineen kulutus ja siihen tehdyt korjaukset (yhteensä 31 autoa)

Auto nro	A. Toteutunut kulutus	Korjaukset		B. Korjattu kulutus	Erotus (A - B)
		tyhj.ajoa 50%	kausikorjaus		
litraa/100 km					
2	53,9	47,3	1,0	48,3	5,6
3	62,9	57,2	0,3	57,5	5,4
4	64,0	58,2	0,3	58,5	5,5
5	54,9	54,9	0,6	55,5	-0,6
6	58,1	57,7	0,0	57,7	0,5
7	61,0	54,5	0,3	54,8	6,2
8	65,1	60,3	0,3	60,6	4,5
9	56,1	55,0	0,1	55,1	1,0
10	59,5	55,1	0,6	55,7	3,8
11	54,9	53,8	0,0	53,8	1,1
12	57,7	58,6	0,3	58,9	-1,2
13	65,0	58,0	0,3	58,3	6,7
15	57,1	57,1	0,3	57,4	-0,3
16	61,3	59,0	0,3	59,2	2,1
17	56,4	51,3	1,1	52,4	4,0
18	60,4	54,9	-0,2	54,7	5,7
19	61,5	60,3	0,3	60,6	0,9
20	59,1	59,1	0,3	59,4	-0,3
21	63,7	63,7	0,3	64,0	-0,3
22	53,8	53,8	-0,2	53,6	0,2
23	57,8	57,8	-0,2	57,6	0,2
24	58,7	56,5	0,3	56,8	2,0
25	59,8	54,4	0,0	54,4	5,4
26	56,3	54,2	0,3	54,5	1,9
27	61,9	61,9	0,0	61,9	0,0
28	54,2	53,2	0,3	53,5	0,8
29	57,4	55,2	0,1	55,3	2,1
31	56,4	52,2	0,0	52,2	4,2
32	58,7	57,5	0,3	57,8	0,9
33	59,3	59,3	0,0	59,3	0,0
34	66,2	63,1	0,0	63,1	3,1
Keskim.	59,1	56,6	0,2	56,8	2,3

Autokohtaiseen havaintoaineistoon sovitettiin funktio (kaava 2), joka kuvaa keskimääräistä kulutusta eri kuljetusmatkoilla (kuva 2). Autot 33 ja 34 jätettiin pois mallinnuksesta puutteellisten ajomatkatietojen takia. Todelliset kulutukset poikkesivat funktion arvosta keskimäärin  $\pm 2,8$  litraa/100 km.



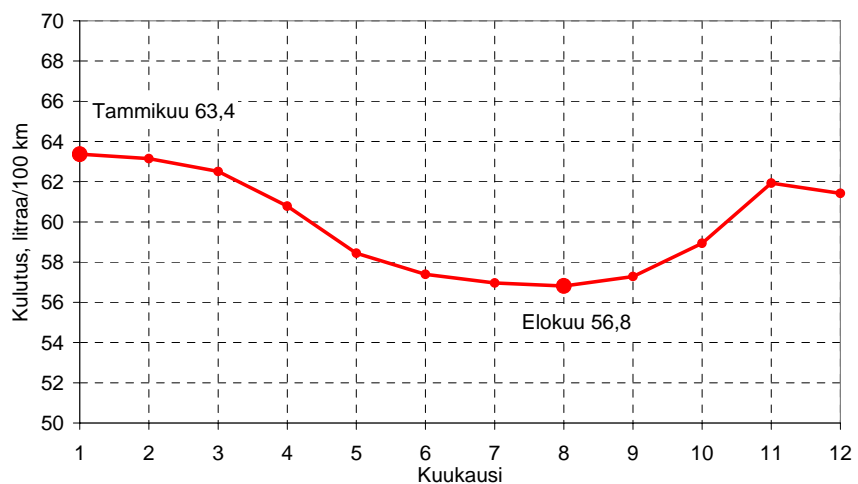
**Kuva 2.** Autokohtaisia keskikulutuksia ja keskimääräinen kulutus kyselytutkimuksen mukaan (aineistona 29 puutavara-autoa, tyhjänäajoa 50 %)

Kaava 2. Polttoaineen kulutusfunktio keskimääräiselle kulutukselle kyselytutkimuksen perusteella.

$$K_x = 89,005 * S_k^{-0,0946}$$

$K_x$  = Keskimääräinen polttoaineen kulutus kyselytutkimuksen mukaan.  
 $S_k$  = Kuormattuna-ajomatka, km.

Kyselytutkimuksessa saatiin 15 autosta seurantatietoja, joissa ajettu matka, polttoaineen määrä ja puumäärä oli eritelty kuukausittain. Aineiston avulla voitiin tarkastella myös vuodenajasta aiheutuvaa vaihtelua polttoaineen kulutuksessa (kuva 3). Korkeimmillaan kulutus oli tammikuussa (63,4 l/100 km) ja alimmillaan elokuussa (56,8 l/100 km). Talven kulutushuippu oli 6,6 l/100 km eli 12 % korkeampi kuin kesän minimi.



**Kuva 3.** Polttoaineen kulutuksen vaihtelu kuukausittain kyselytutkimuksen mukaan (aineistona 15 puutavara-autoa).

## 3 KULUTUSMITTAUKSET

### 3.1 Menetelmät ja aineisto

Projektissa kokeiltiin automaattista tutkimustiedonkeruuta SKALNET-palvelun avulla. SKALNET on EC-Tools Oy:n, AC-Sähköautot Oy:n ja Suomen Kuorma-autoliitto ry:n kehittämä, kuljetusyrittäjille suunnattu palvelu. Järjestelmä toimii tietoverkossa ja sen avulla voidaan mm. seurata auton liikkeitä, suoritteita ja polttoaineen kulutusta.

Autoon asennetaan tiedonkeruuyksikkö, "musta laatikko", joka rekisteröi auton tapahtumia, kuten ajomatkan, polttoaineen kulutuksen, ajonopeuden, ajo- ja pysähdysajat, jarrujen käytön ja auton sijainnin. Tiedonkeruuyksikkö lähettää keräämänsä tiedon GSM-modeemia käyttäen palvelimelle, jossa saatu tieto käsitellään ohjelmallisesti ja kohdennetaan oikealle yritykselle ja autolle. Tämän jälkeen kuljetusyrittäjä voi selainohjelman avulla käydä tutkimassa omien autojensa seurantatietoja.

SKALNET-laitteistot ja -palvelut hankittiin projektin käyttöön. Tiedonkeruuyksikkö asennettiin Keski-Suomen alueella toimivan yrittäjän autoon. Tutkimusauto oli tyypillinen, vuoden 1999 mallia oleva Sisu, jossa oli euro2-luokan, 14 litran Cummins'in moottori.

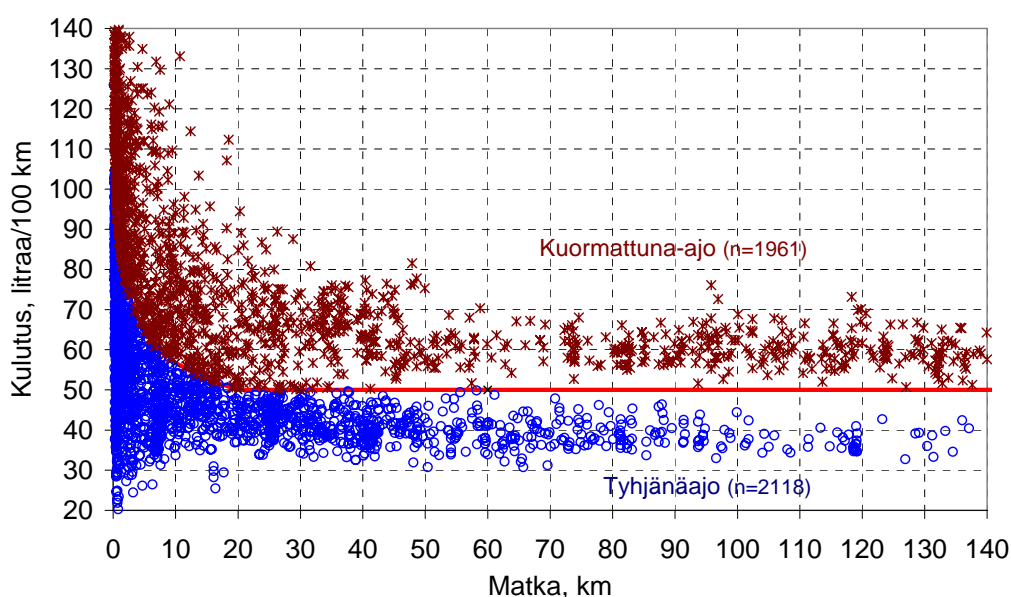
Laitteiston avulla kerättiin seurantatietoa 23.8.2002 – 30.6.2003 väliseltä jaksolta. Tiedonkeruu toimi automaattisesti ilman kuljettajalta vaadittavia toimenpiteitä. Tulosten laskentaa varten data siirrettiin EC-Toolsin tietokannasta Excel-taulukkolaskentaohjelmaan. Palvelun karttaliittymä ym. vakioraportit olivat käytettävissä, mutta niitä ei ole toistaiseksi hyödynnetty tutkimuskäytössä.

Tiedonkeruussa eroteltiin ajovaiheet ja pysähdykset toisistaan. Kerätyt tiedot yhdistettiin auton kuormatietoihin, jotka saatiin UPM-Kymmenen Keski-Suomen hankinta-alueesta. Tietojen yhdistäminen perustui kuorman vastaanoton päiväykseen eli saman vuorokauden ajalta kerätyt ajotapahtumat tulkittiin kyseiselle kuormalle. Jos saman vuorokauden aikana oli ajettu useita kuormia, laskettiin tunnusluvuista keskiarvot päivän kaikille kuormille. Muutamien päivien tiedot jätettiin pois lopullisten tulosten laskennasta, johtuen puutteellisista tai epäselvistä ajotapahtuma- tai kuormatiedoista.

Päiväkohtaisten keskikuormahavaintojen perusteella laadittiin kuvaajat polttoaineen kulutukselle kuormattuna- ja tyhjänääjossa. Pysähdysten aikana kulutetusta polttoaineesta laskettiin kuormakohtainen keskiarvo.

### 3.1.1 Kuormattuna- ja tyhjänäajo

Ajovaiheista kerätyt havainnot jaettiin kulutuksen perusteella kuormattuna- ja tyhjänäajoon tulosten laskennan yhteydessä. Yksi havainto oli kahden, yli 2 minuuttia kestäneen pysähdyksen välinen ajo-osuus. Yli 20 km:n pituisilla ajo-osuuksilla kulutuksissa oli selvä tasoero ja jako kuormattuna- ja tyhjänäajoon oli helposti tehtävissä (kuva 4). Alle 20 km:n ajo-osuudet jaettiin eri luokkiin arviovaraisesti, mikä johti siihen, että osa tyhjänäajohavainnoista kirjautui kuormattuna-ajoon ja päinvastoin. Tyhjänäajon kulutus on aliarvio ja kuormattuna-ajon kulutus on yliarvio todellisesta. Kohdentumisvirheen merkitys jää lopputuloksissa kuitenkin pieneksi, koska koko ajomatka ja kulutettu polttoaine ovat joka tapauksessa mukana keskikulutuksen laskennassa. Lyhyiden, alle 20 km:n havaintojen osuus kokonaisajomatkasta jäi alle 10 %:n (taulukko 5).



**Kuva 4.** Ajovaiheista kerätyt havainnot jaettuna kuormattuna- ja tyhjänäajoon. Yksi havainto on kahden pysähdyksen välinen ajo-osuus.

Ajovaiheista kerätyn aineiston tunnuslukuja esitetään taulukossa 4.

**TAULUKKO 4** Ajovaiheista kerätyn aineiston määrä

	Kuormattuna-ajo	Tyhjänäajo	Yhteensä
Ajettu matka, km	55 686	41 261	96 947
Osuus matkasta, %	57	43	100
Kulutettu polttoaine, litraa	35 267	16 883	52 150
Osuus polttoaineesta, %	68	32	100

TAULUKKO 5 Kuormattuna- ja tyhjänäajosta kerätyn aineiston tunnuslukuja

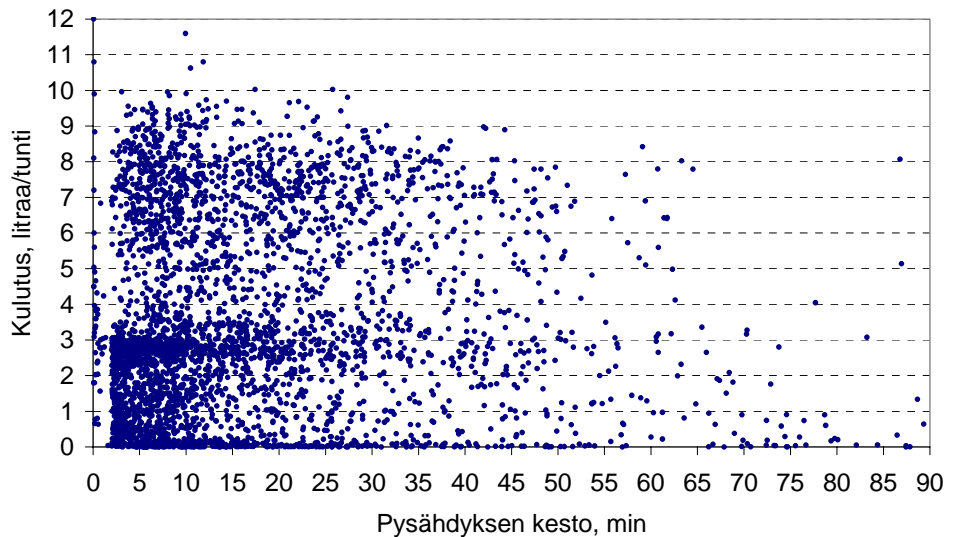
Ajomatkaluokka	Osuus kokonaismatkasta	Kulutus, litraa/100 km	
		Tyhjänä	Kuormattuna
km	%		
alle 0,5	0,1	74,7*	289,9*
0,5 - 2	1	61,9*	145,2*
2 - 10	4	48,1*	89,7*
10 - 30	14	43,8	67,2
30 - 60	21	40,6	64,1
60 -100	22	39,1	60,6
yli 100	37	37,1	59,9
Keskimäärin	100,0	40,9	63,3

\* = tyhjänäajon kulutus on aliarvio ja kuormattuna-ajon kulutus on yliarvio todellisesta johtuen aineiston käsittelystä.

Taulukon 5 kulutusluvuilla laskettuna päädytään ajovaiheissa 52,1 litraa/100 km keskikulutukseen, jos tyhjänäajoa on 50 % kokonaisajomatkasta. Tulokseen on lisättävä pysähdyksistä aiheutunut kulutus, jotta saadaan kokonaiskulutus.

### 3.1.2 Pysähdykset

Pysähdyksiin luettiin kaikki yli 2 minuuttia kestäneet pysähdykset (kuva 5). Pysähdyksiin kului polttoainetta yhteensä 4 111 litraa. Siitä noin 60 % arviointiin kuluvan nosturin käyttöön, joksi tulkittiin kaikki 5 litraa tunnissa ylittäneet kulutukset.



**Kuva 5.** Pysähdyksistä kerätyt havainnot polttoaineen kulutuksesta (n=4 313).



## 3.2 Tulokset

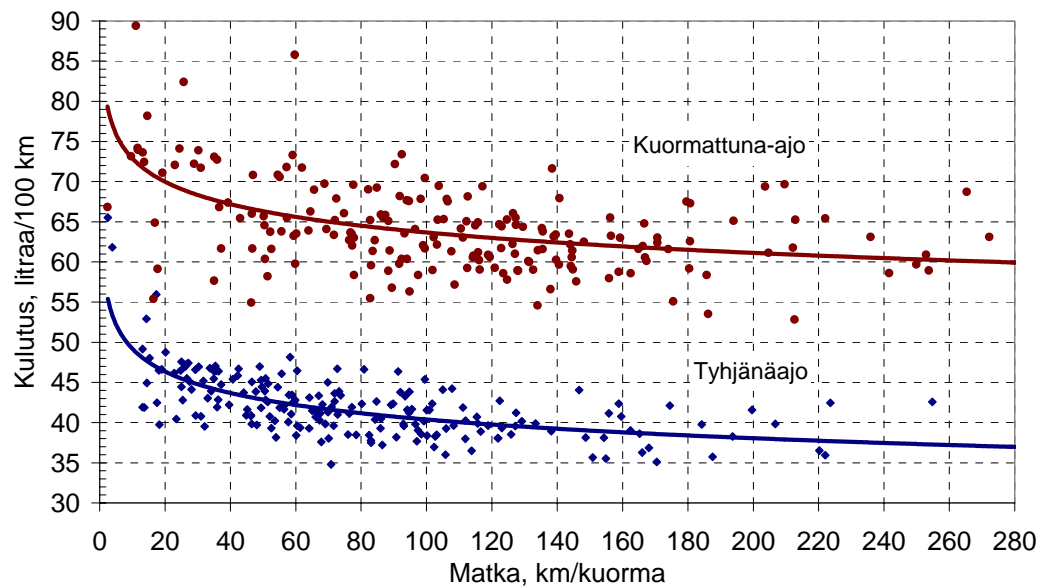
### 3.2.1 Kuormattuna- ja tyhjänäajo

Kuormattuna- ja tyhjänäajon kulutus mallinnettiin matkan funktiona (kaavat 3 ja 4) päiväkohtaisten keski kuormahavaintojen avulla (kuva 6).

Funktion muoto selittyy tieluokkajakauman eroista eri matkoilla. Lyhyillä ajomatkalla alempiasteisten teiden osuus kokonaisajomatkasta on suuri, mikä nostaa keskikulutusta, johtuen alempiasteisten teiden vaikeammista ajo-olosuhteista. Matkan pidetessä alempiasteisten teiden osuus pienenee, jolloin keskikulutus laskee.

Kulutuksessa ilmenevää hajontaa aiheuttavat monet tekijät, joita käsitellään jäljempänä. Kuormattuna-ajon mallin selitysaste on 27 % eli keskikulutuksen vaihtelu selittyy pääosin muilla tekijöillä kuin kuljetusmatkalla. Kuormattuna-ajon keskikulutukset poikkeavat mallin antamista keskimäärin 3,8 litraa/100 km. Tyhjänäajon mallin selitysaste on 50 % ja toteutuneet keskikulutukset poikkeavat mallin antamista keskimäärin 2,2 litraa/100 km.

Valitulla funktion rakenteella kulutus lähestyy nollaa matkan pidentyessä kohti ääretöntä, mikä ei vastaa käytäntöä. Funktio toimii kuitenkin loogisesti käytäntöä vastaavilla kuljetusmatkoilla.



**Kuva 6.** Päiväkohtaiset keski kuormahavainnot kuormattuna- ja tyhjänäajosta ja aineistoon sovitetut funktiot.

Kaava 3. Polttoaineen kulutus tyhjänäajossa.

$$K_t = 59,928 * S_t^{-0,0857}$$

Kaava 4. Polttoaineen kulutus kuormattuna-ajossa.

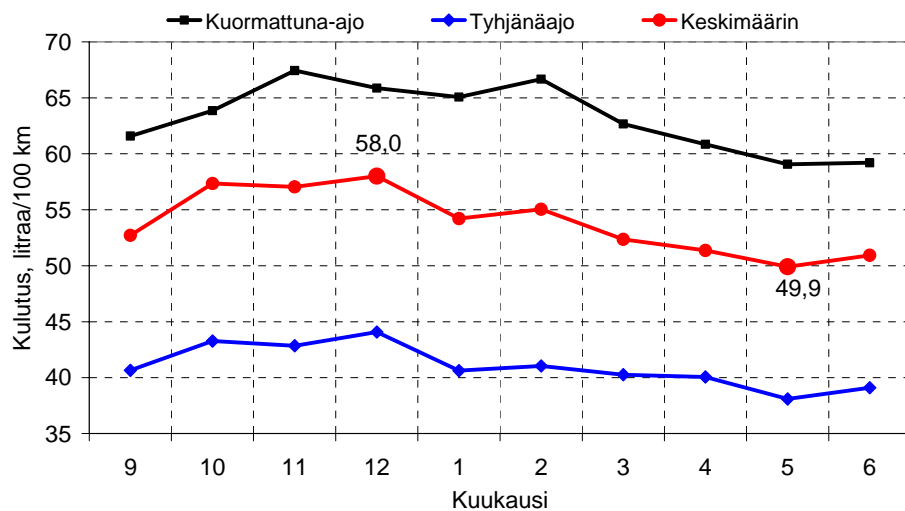
$$K_k = 83,445 * S_k^{-0,0587}$$

- $K_t$  = polttoaineen kulutus tyhjänäajossa, litraa/100 km  
 $K_k$  = polttoaineen kulutus kuormattuna-ajossa, litraa/100 km  
 $S_t$  = tyhjänäajomatka, km  
 $S_k$  = kuormattuna-ajomatka, km

Yhden tonnin massan lisäys nostaa keskikulutusta keskimäärin 0,6 litraa/100 km. Tulos saatiin jakamalla kuormattuna- ja tyhjänäajon kulutusten erotus eri matkoilla keskimääräisellä kuorman koolla (40 – 42 tonnia).

Ajovaiheiden polttoaineen kulutusta tarkasteltiin myös kuukausittain (kuva 7). Tuloksissa ilmenee vastaava kausivaihtelu kuin kyselytutkimuksessakin (kuva 3). Polttoaineen kulutuksen huippu osui joulukuuhun (58,0 litraa/100 km) ja alimmillaan kulutus oli toukokuussa (49,9 litraa/100 km). Talven kulutushuippu oli 8,1 litraa/100 km eli 16 % korkeampi kuin kesän minimi.

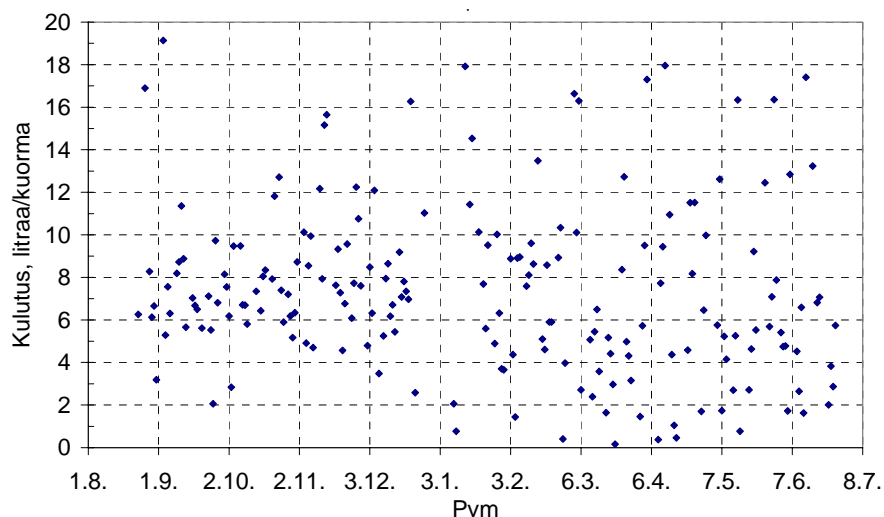
Loka-joulukuun kulutustaso oli 2 – 3 litraa korkeammalla kuin keskitalvella tammi-helmikuussa, jolloin kulutus on yleensä huipussaan. Selityksenä saattaa olla ero ajotavoissa, johtuen auton omistajan ja kuljettajan vaihtumisesta vuoden vaihteessa.



**Kuva 7.** Ajovaiheiden polttoaineen kulutus kuukausittain eriteltynä.

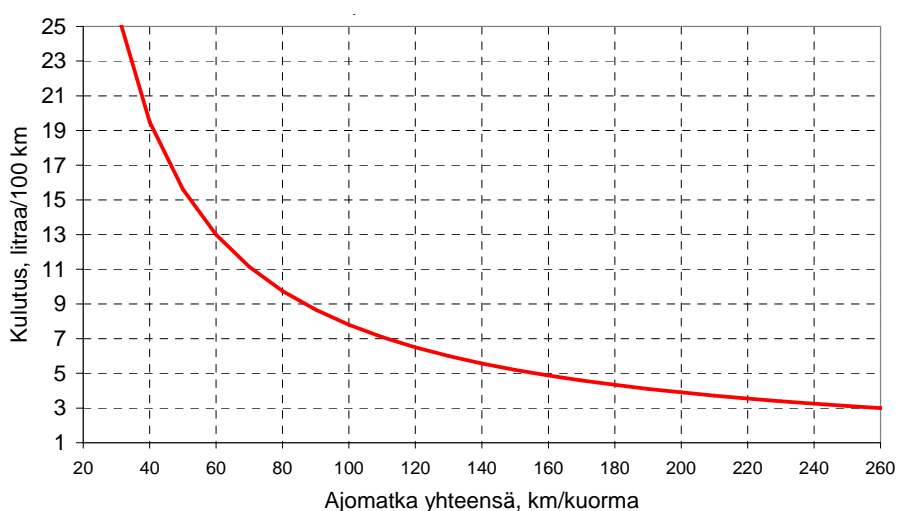
### 3.2.2 Pysähdykset

Pysähdyksiin kului polttoainetta keskimäärin 7,8 litraa/kuorma. Vaihtelu oli kuitenkin suurta (kuva 8), mikä ilmeni myös suurena keskihajontana (4,7 litraa/kuorma). Suurin osa, noin 60 %, pysähdysten aikaisesta kulutuksesta syntyi kuormausvaiheessa, kun käytetään auton nosturia. Loput kulutuksesta aiheutui muista työvaiheista kuormauksen ja purkamisen aikana sekä muista syistä aiheutuneista pysähdyksistä. Pysähdyksiin luettiin kaikki yli 2 minuuttia kestäneet seisahdukset.



**Kuva 8.** Polttoaineen kulutus päiväkohtaisilla keskikuormilla pysähdysten aikana.

Keskimääräinen kulutus (7,8 litraa/kuorma) muunnettiin kulutukseksi ajomatkaa kohden (litraa/100 km). Tuloksena saatiin funktio (kaava 5), jonka muoto esitetään kuvassa 9.



**Kuva 9.** Polttoaineen kulutus pysähdysten aikana matkan funktiona (mallin perusteena 7,8 litraa/kuorma kulutus).

Kaava 5. Kulutusfunktio pysähdysten aikana

$$K_p = \frac{K_r}{(S_t + S_k)/100}$$

$K_p$  = polttoaineen kulutus pysähdysten aikana, litraa/100 km

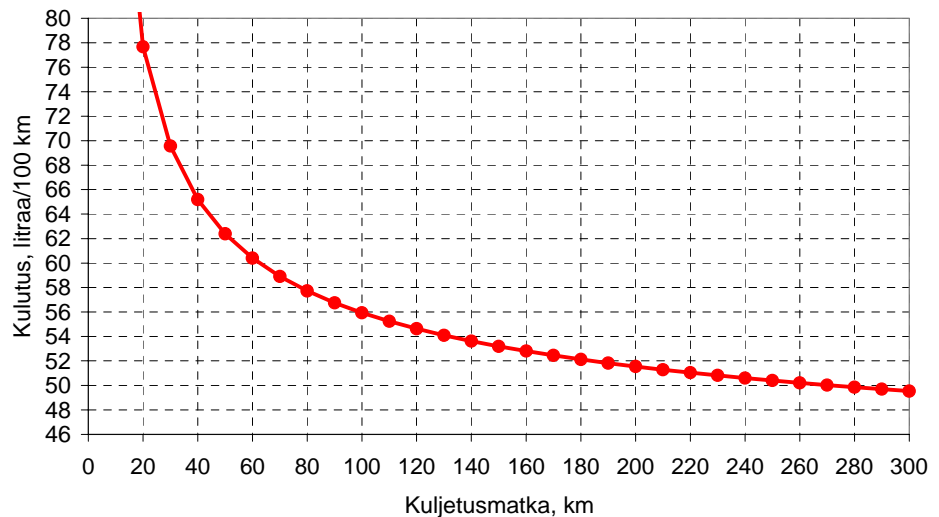
$K_r$  = polttoaineen kulutus pysähdysten aikana, litraa/kuorma

$S_t$  = tyhjänäajomatka

$S_k$  = kuormattuna-ajomatka

### 3.2.3 Kokonaiskulutus

Kun kuormattuna- ja tyhjänäajon ja pysähdysten kulutusfunktiot (kaavat 3 – 5) yhdistetään, päädytään kuvan 10 mukaiseen kokonaiskulutukseen. Kuvan esimerkissä tyhjänäajon osuus on 50 % kokonaisajomatkasta. Keskikulutus laskee kuljetusmatkan pidentyessä, mikä johtuu parempilaatuisten teiden osuuden kasvusta ja pysähdysten aikaisen kulutuksen jakaantumisesta pidemmälle ajomatkalle.



**Kuva 10.** Polttoaineen kokonaiskulutus laskettuna kuormattuna- ja tyhjänäajosta ja pysähdyksistä laadituilla kulutusfunktioilla. Kuvan esimerkissä tyhjänäajon osuus kokonaisajomatkasta on 50 %.

## 4 KULUTUKSEN JA PÄÄSTÖJEN SIMULOINTI

### 4.1 Menetelmät ja aineisto

Simuloinnit tehtiin VEMOSIM-järjestelmällä (VEhicle MOtion SIMulator), joka jäljittelee ajoneuvon liike- ja toimintatiloja. Simulointia varten tarvitaan moottorikartta, muut ajoneuvon tekniset tiedot sekä reitin ajotavan kuvaus. Simuloinnin tuloksena saadaan mm. polttoaineen kulutus ja päästöjen määrä. Simuloitava ajoneuvo oli vuoden 1999 mallia oleva Sisu E14M-530. Autossa oli Cummins'in euro2-luokan moottori.

Simuloinnin käyttökelpoisuutta kokeiltiin valtatiellä 9 välillä Jämsä - Jyväskylä. Reitillä ajettiin testiajo (26.9.2002), josta kerättiin muun muassa seuraavat tiedot: ajoreitti (x- ja y-koordinaatit), hetkellinen ajonopeus, kumulatiivinen polttoainemäärä, hetkellinen moottorin pyörimisnopeus, jonka perusteella voidaan määrittää vaihteiden käyttö. Erikseen kerättiin tiedot normaaliajosta mahdollisesti häirinneistä tekijöistä. Tiedonkeruussa käytettiin EC-Tools'in tiedonkeruulaitetta. Tiedonkeruuvälinä käytettiin 1 sekuntia.

Tien ko. tarkastelujakson pystygeometria määritettiin Tiehallinnon tierekisterin mäkitietojen perusteella. Alkuperäisenä tavoitteena oli ottaa reitin alkupäähän mukaan myös metsätieosuus ja muita alempiasteisia teitä, mutta näistä teistä ei saatu riittävän tarkkaa korkeustietoa simulointia varten. Tutkimuksessa kokeiltiin korkeustietojen keruuta muun muassa korkeusbarometrin avulla, mutta menetelmällä ei päästy riittävään tarkkuuteen. Simulointeja metsätiellä ajosta tehtiin Itä-Suomesta aikaisemmin kerätyillä tiedoilla reitillä Kekomäki – Uimaharju (kuva 12).

Simuloinnissa tuotettiin jatkuvana koko ajoreitiltä ajoaika, kumulatiivinen polttoaineen kulutus ja päästöt (NO<sub>x</sub>, HC, CO, PM ja CO<sub>2</sub>) koko reitiltä yhteensä ja laskettiin keskimäärin ajosuoriteyksikköä kohden.

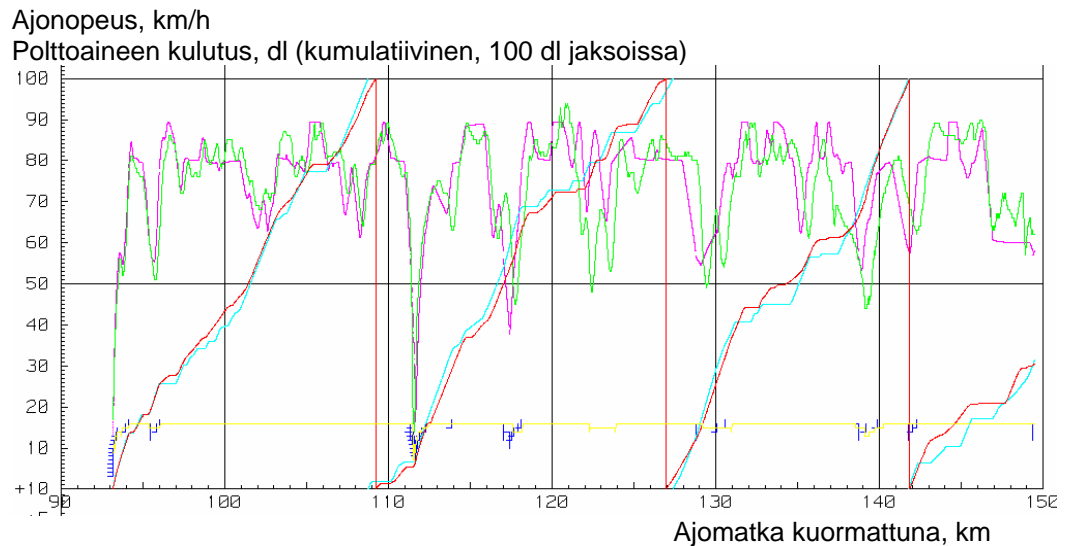
Eri tekijöiden vaikutuksia polttoaineen kulutukseen ja päästöihin tarkasteltiin simuloinnin avulla siten, että muutettiin ajoneuvon tavoitenopeutta (70, 80, 90 ja 100 km/h), massaa (20, 40 ja 60 tonnia), gravitaation mahdollistamaa tavoitenopeuden alamäkilisää (0 ja 10 km/h), vetopyörästön välityssuhdetta (4.09, 4.30 ja 4.68) ja vaihtostrategiaa (kaksi moottorin pyörimisnopeuden arvoparia vaihdettaessa ylös- ja alaspäin: 1000–1500 r/min ja 1300–1800 r/min).

## 4.2 Tulokset

### 4.2.1 Simuloinnin toimivuus

Tähän raporttiin on koottu simuloitien saadut päätulokset. Yksityiskohtaisempi kuvaus menetelmistä ja tuloksista esitetään aiheesta laaditussa opinäytetyössä (Sauna-aho, 2003).

Simulointitulosten ja mittausten vertailu osoitti, että simuloinnilla päästiin samoihin ajonopeuksiin ja polttoaineen kulutuksiin kuin käytännössäkin mitattiin (kuva 11). Kuvaajissa ilmenevät hetkelliset erot eivät heikennä simulointitulosten käyttökelpoisuutta tutkimuksessa. Päästöjen mittauksessa ei vastaavaa vertailua voitu tehdä, koska päästöjen mittaukseen ajon aikana ei ollut mahdollisuuksia.



#### Värien selitykset:

simuloitu nopeus  
mitattu nopeus

simuloitu pa-kulutus  
mitattu pa-kulutus

**Kuva 11.** Simuloitu ja mitattu ajonopeus ja polttoaineen kulutus kuormattuna-ajossa (VT 9, Jämsä – Jyväskylä).

Toistaiseksi simuloinnin laajempaa hyödyntämistä puutavaran kuljetustutkimuksissa rajoittavat tietietojen ja moottorikarttojen vaikea saatavuus. Tien pystygeometrian määrittämiseen tulisikin kehittää uusia menetelmiä. Uusien moottorikarttojen saaminen simulointikäyttöön on jatkossa entistä tärkeämpää koska kuljetuskalusto uusiutuu jatkuvasti.

#### 4.2.2 Ajonopeuden ja ajoneuvon massan vaikutus kulutukseen ja päästöihin

Simuloinnin avulla tarkasteltiin ajonopeuden ja ajoneuvon massan vaikutusta polttoaineen kulutukseen, hiilidioksidi- ja typpioksidipäästöjen määrään. Tarkastelut tehtiin kahdella eri vetopyörästön välityssuhteella. Seuraavien taulukoiden tulokset perustuvat välityssuhteeseen 4,68. Simuloinnit tehtiin testireitin tiedoilla (VT 9, Jämsä – Jyväskylä, 56 km).

Tavoitenopeuden nosto lisäsi polttoaineen kulutusta taulukon 6 mukaisesti. Nopeuden nosto 10 km/h (70 km/h → 80 km/h) lisäsi tyhjän ajoneuvon kulutusta 9 % ja kuormatun ajoneuvon kulutusta 3 %. Vastaavat simuloinnit tehtiin myös välityssuhteella 4,09, jolloin päädyttiin 1–2 litraa/100 km pienempiin kulutuksiin.

TAULUKKO 6 Ajonopeuden ja ajoneuvon massan vaikutus polttoaineen kulutukseen

	Tavoitenopeus, km/h	
	70	80
	Polttoaineen kulutus, litraa/100 km	
20 tonnia (massa tyhjänä)	35	38
60 tonnia (massa kuormattuna)	67	69

Taulukon 7 mukaan tavoitenopeuden nosto 10 km/h (70 km/h → 80 km/h) lisäsi tyhjän ajoneuvon hiilidioksidipäästöjä 9 % ja kuormatun ajoneuvon päästöjä 3 %. Vastaavat simuloinnit tehtiin myös välityssuhteella 4,09, jolloin päädyttiin 30–70 g/km pienempiin päästöihin.

Vastaava nopeuden nosto lisäsi tyhjän ajoneuvon typpioksidipäästöjä 19 % ja kuormatun ajoneuvon päästöjä 10 %. Välityssuhteella 4,09 päädyttiin 1–3 g/km pienempiin päästöihin.

TAULUKKO 7 Ajonopeuden ja ajoneuvon massan vaikutus hiilidioksidi- ja typpioksidipäästöihin

	Tavoitenopeus, km/h	
	70	80
	Hiilidioksidipäästöt, g/km	
20 tonnia (massa tyhjänä)	920	1 020
60 tonnia (massa kuormattuna)	1 780	1 830
Typpioksidipäästöt, g/km		
20 tonnia (massa tyhjänä)	15,6	18,6
60 tonnia (massa kuormattuna)	24,5	27,0

### 4.2.3 Polttoaineen kulutus ja päästöt eri kuljetusreiteillä

Taulukkoon 8 on koottu simulointituloksia eri kuljetusreiteiltä. Keski-Suomen reitti oli pelkästään valtatietä, mistä johtuen keskinopeus oli selvästi suurempi kuin Itä-Suomessa. Polttoaineen keskikulutuksessa oli eroa 2,4 l/100 km, mitä selittävät tietyyppien erot ja 2 tonnin ero kuorman koossa. Mäkisellä metsätieosuudella, jota Itä-Suomen reitillä oli 1 km, oli kulutus lähes kaksinkertainen verrattuna koko reitin keskikulutukseen.

Itä-Suomen reitin hiilidioksidipäästöt olivat samalla tasolla ja typenoksidipäästöt olivat 12 % suuremmat kuin Keski-Suomessa. Metsätieosuudella kummatkin päästöt olivat noin kaksinkertaisia päätiellä ajoon verrattuna.

TAULUKKO 8 Simulointituloksia eri kuljetusreiteillä ja tietyypeillä

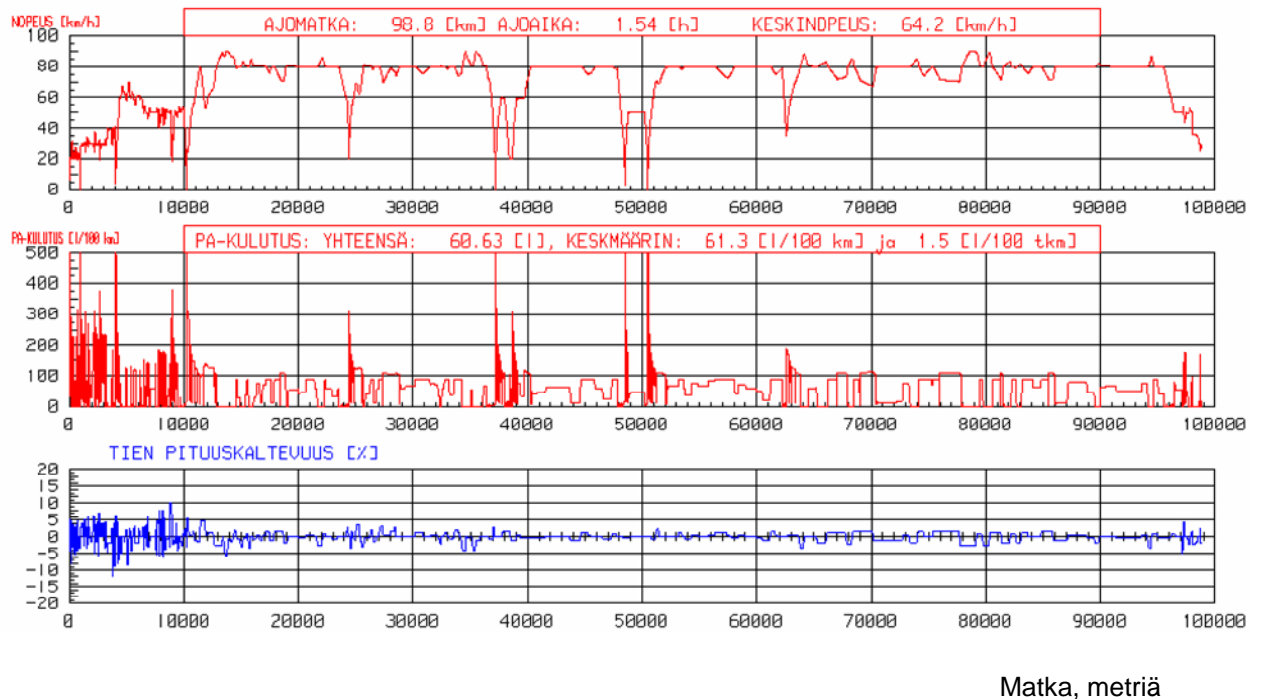
	Keski-Suomi Jämsä – Jyväskylä	Itä-Suomi Kekomäki – Uimaharju	
	Päätie	Metsä- autotie	Metsäauto- tie + päätie
Ajomatka, km	56,3	1,0	98,8
Kuorman koko, tonnia	40,0	42,0	42,0
Keskinopeus, km/h	75,7	20,5	64,2
Polttoaineen kulutus yht., litraa	33,16	1,16	60,56
Polttoaineen kulutus, l/100km	58,9	116,3	61,3
CO <sub>2</sub> , g/km	1 789	3 400	1 800
NO <sub>x</sub> , g/km	22,3	50,5	25,0
CO, g/km	1,16	-	-
HC, g/km	0,49	-	-
PM, g/km	0,19	-	-

Itä-Suomen reitin ajonopeus, polttoaineen kulutus ja tien pituuskaltevuus ilmenevät kuvasta 12. Keski-Suomen reitin tietoja on esitetty jo aiemmin kuvassa 11.



## METSÄAUTOTIE JA PÄÄTIE

AJONEUVOTYYPPI: KUORMA-AUTO + VARSINAINEN PERÄVAUNU, KOKONAISMASSA 68 t, KUORMAKOKO 42 t



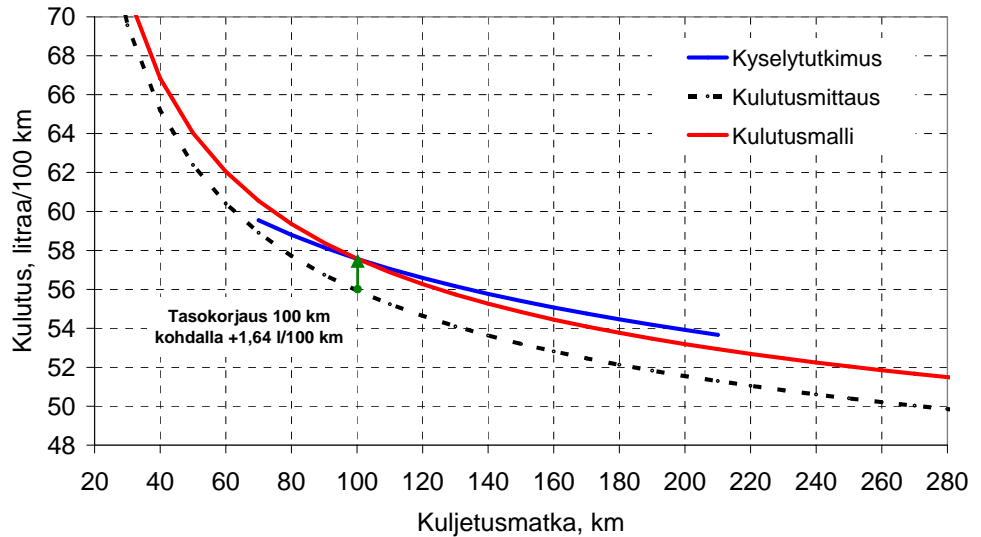
Matka, metriä

**Kuva 12.** Simuloitu ajonopeus ja polttoaineen kulutus Kekomäki – Uimaharju reitillä.

## 5 YHTEENVETO JA TULOSTEN TARKASTELU

### 5.1 Kulutusmalli

Edellä esitettyjen tulosten perusteella laadittiin puutavara-auton polttoaineen kulutuksen malli, jonka rakenne perustuu kulutusmittauksiin ja taso kyselytutkimukseen (kuva 13). Kulutusfunktio rakentuu tyhjänäajon, kuormattuna-ajon ja pysähdysten aikaisesta polttoaineen kulutuksesta (kaava 6). Kulutusfunktion taso korjataan vastaamaan kyselytutkimuksen tasoa tietyllä, esimerkiksi tyypillisellä keskipoljetusmatkalla. Kuvan esimerkissä tasokorjaus on tehty 100 km keskimatkalla, jolloin korjauserän suuruus on +1,64 litraa/100 km. Korjauserän suuruus eri keskimatkoilla ilmenee taulukosta 9.



**Kuva 13.** Polttoaineen kulutusmalli (kuvan esimerkissä tyhjänäajon osuus on 50 % kokonaisajomatkasta). Mallin muoto perustuu kulutusmittauksiin ja taso kyselytutkimukseen.

Kaava 6. Polttoaineen kokonaiskulutuksen laskentakaavat.

$$K_y = \frac{(K_k * S_k + K_t * S_t)}{S_k + S_t} + K_p + K_s$$

$$K_k = 83,445 * S_k^{-0,0587}$$

$$K_t = 59,928 * S_t^{-0,0857}$$

$$K_p = \frac{K_r}{(S_t + S_k)/100}$$

$K_y$  = polttoaineen kulutus, litraa/100 km

$K_k$  = polttoaineen kulutus kuormattuna-ajossa, litraa/100 km

$K_t$  = polttoaineen kulutus tyhjänäajossa, litraa/100 km

$K_p$  = polttoaineen kulutus pysähdysten aikana, litraa/100 km

$K_s$  = tasokorjaus, jolla funktion taso kiinnitetään seuranta-aineiston tasoon tietyllä keskimatkalla, litraa/100 km (taulukko 9).

$K_r$  = polttoaineen kulutus pysähdysten aikana, litraa/kuorma

$S_t$  = tyhjänäajomatka

$S_k$  = kuormattuna-ajomatka

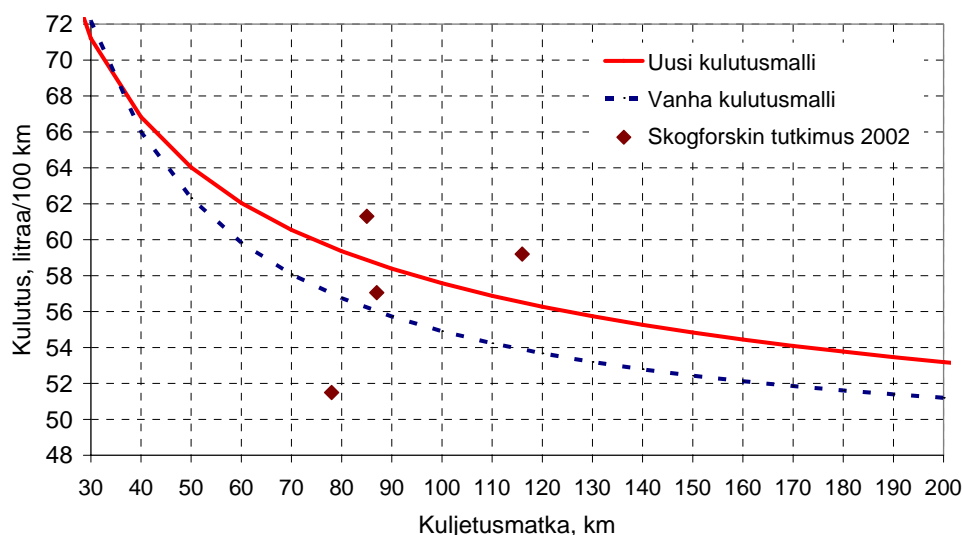
TAULUKKO 9 Polttoaineen kulutuksen tasokorjaus eri keskimatkoilla

Kuljetusmatka, km	Kyselytutkimus	Tutkimusauto	Tasokorjaus
	Kulutus, litraa/100 km		
70	59,5	58,9	0,6
80	58,8	57,7	1,1
90	58,1	56,7	1,4
100	57,6	55,9	1,6
110	57,1	55,2	1,8
120	56,6	54,6	2,0
130	56,2	54,1	2,1
140	55,8	53,6	2,1
150	55,4	53,2	2,2
160	55,1	52,8	2,3
170	54,8	52,5	2,3
180	54,5	52,1	2,3
190	54,2	51,8	2,4
200	53,9	51,5	2,4

## 5.2 Vertailu muihin tuloksiin

Projektin tuloksena laaditun polttoaineen kulutusmallin rakenne vastaa Metsätehon vanhaa kulutusmallia (kuva 14). Keskikulutus lasketaan ajomatkan funktiona ja laskentatekijöinä ovat kuormattuna- ja tyhjänäajon kulutus sekä pysähdysten aikana kulunut polttoaine. Uusi kulutusmalli antaa aikaisempaa korkeampia kulutuslukemia yli 35 km ajomatkoilla. Suhteellinen ero on suurimmillaan 100 – 120 km kuljetusmatkoilla, jolloin eroa on 4,9 %. Pidemmällä matkoilla ero pienenee, esimerkiksi 200 km:n matkalla eroa on 3,9 %.

SkogForskin tutkimuksessa seurattiin 4 puutavara-auton kulutusta (Forsberg ja Löfroth, 2002a). Autot vastasivat Suomessa käytössä olevia puutavara-autoja. Keskikulutukset osuivat lähelle uuden kulutusmallin tasoa yhtä autoa lukuun ottamatta (kuva 14).



**Kuva 14.** Uuden kulutusmallin taso verrattuna vanhaan malliin ja Skogforskin tuloksiin (vertailussa tyhjänäajon osuus on 50 % kokonaisajomat-kasta).

### 5.3 Kulutuksen vaihtelu

Kyselytutkimuksen tuloksissa (kuva 2) näkyy suuri vaihtelu autojen välises-sä kulutuksessa. Esimerkiksi tyypillisellä 90 - 100 kilometrin kuljetusmat-kalla kulutus oli alimmillaan noin 54 ja korkeimmillaan noin 64 litraa/100 km. Autoittain kulutus poikkesi keskiarvokäyrältä keskimäärin  $\pm 2,8$  lit-  
raa/100 km. Suuria eroja voidaan selittää tie- ja keliolosuhteilla, ajotavalla, kaluston ominaisuuksilla ja kunnolla, kuorman koolla sekä kuljetusten ohja-  
ustoimenpiteillä.

Kulutus kasvaa mitä enemmän joudutaan ajamaan *alempiasteisilla, huono-laatusilla ja -kuntoisilla, mäkisillä teillä*. Esimerkiksi simuloinnissa päädyttiin mäkisellä metsäautotiellä kaksikertaiseen kulutukseen verrattuna pää-tiellä ajoon.

*Vuodenaika* vaikuttaa kulutukseen merkittävästi. Lumi, liukkaus ja kylmä ilma lisäävät polttoaineen kulutusta talvikuukausina. Kyselytutkimuksen vastausten mukaan tammikuuhun osunut vuoden kulutushuippu 63,4 lit-  
raa/100 km oli 12 prosenttia korkeampi kuin elokuuhun osunut vuoden pie-nin keskikulutus 56,8 litraa/100 km.

*Kuljetuskaluston keveys* vähentää polttoaineen kulutusta tuoden taloudellista etua. Massan lisäys yhdellä tonnilla lisää keskikulutusta tyhjänäajossa 0,6 litraa/100 km eli suhteellisesti kulutus nousee 1,5 %. Kuormattuna-ajossa jokainen lisättonni kaluston omapainossa pienentää hyötykuormaa 2,5 %. *Kuorman koko* vaikuttaa vastaavalla tavalla kuormattuna-ajon keskikulutuk-  
seen.

*Taloudellisella ajotavalla* saavutetaan tyypillisesti 10–15 prosentin säästöjä. Vaikutus riippuu luonnollisesti lähtötasosta, jolta ajotapaa lähdetään parantamaan. Ajoneuvon *säännöllinen huolto* estää esimerkiksi likaisista suodatimista, vääristä renkaiden ilmanpaineista tai huonosta voitelusta aiheutuvat lisälaskut.

Kun kuljetusten ohjauksessa pyritään mahdollisimman *lyhyisiin kuljetusmatkoihin ja vähäiseen tyhjänäajoon*, sekä kuljetuskustannukset että yksikkökulutus – litraa polttoainetta/m<sup>3</sup> – pysyvät minimissä.

Mikäli kuljetusten ohjauksella voidaan vähentää *pienen puutavara-erien keräilyä ja nosturin kuljettamista auton mukana* vähennetään samalla myös polttoaineen kulutusta. Keräilyajossa kulutusta nostaa pidempi varastoilla viipymisaika kuormausvaiheessa ja alempiasteisella tieverkolla ajamisen lisääntyminen. Kolme tonnia painavan nosturin kuljettaminen auton mukana nostaa tyhjänäajon kulutusta noin 1,8 litraa/100 km (4 - 5 %) ja pienentää hyötykuormaa kuormattuna-ajossa noin 7 %. Nosturi lisää myös tyhjän auton ilmanvastusta.

Kuljetusreitit valinnassa tulisi ottaa huomioon ajoajan, ajomatkan ja tietyypin lisäksi myös *mahdollisuus sujuvaan ajoon ja pysähdysten välttämiseen*. Esimerkiksi 60 tonnia painavan ajoneuvon pysäyttäminen nopeudesta 80 km/h ja kiihdyttäminen takaisin samaan nopeuteen tasaisella tiellä kuluttaa litran enemmän polttoainetta verrattuna ajoon tasaisella nopeudella.

## 5.4 Tulosten soveltaminen

Tutkimuksen tuloksena laadittu kulutusmalli antaa keskimääräisen kulutuksen kuljetusmatkan funktiona. Polttoaineen kulutukseen vaikuttavista monista tekijöistä johtuen voi kulutustaso käytännön tapauksissa poiketa huomattavasti mallin antamista kulutuslukemista. Kulutusmalli soveltuu parhaiten laskentaan 20–200 km:n ajomatkoille, joilta myös tutkimusaineisto pääosin kerättiin.

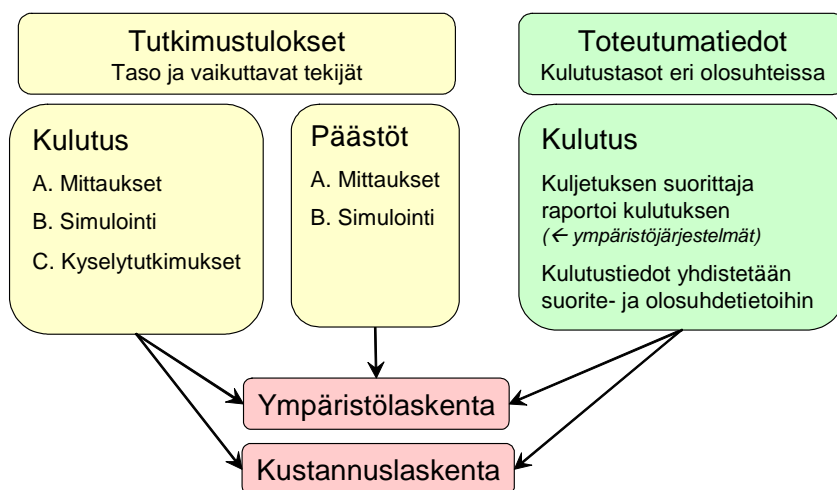
Mallin soveltamisessa tulee ottaa huomioon, että se perustuu pieneen aineistoon. *Mallin muoto* perustuu yhdestä, Keski-Suomen olosuhteissa liikennöivästä autosta kerättyyn vuoden aineistoon. Toisenlaisissa olosuhteissa, joissa erityisesti alempiasteisen tiestön osuus ja mäkisyys ovat erilaiset, voi mallin muoto matkan funktiona olla jyrkempi tai loivempi. *Mallin taso* perustuu kyselytutkimuksen aineistoon (29 autoa). Tutkimusaineisto jäi odotettua pienemmäksi, ja kuten kyselytutkimuksen tuloksista ilmenee, ovat kulutuserot autojen välillä suuria. Kun kaikki kulutusta pienentävät tekijät ovat yhtä aikaa voimassa, jää kulutustaso huomattavasti alemmalle tasolle kuin päinvastaisessa tapauksessa. Suuremmalla aineistolla olisi tuloksen luotettavuutta saatu parannettua. On kuitenkin huomattava, että aineisto on toistaiseksi laajin mitä puutavara-autoista on julkaistu.

Kulutusmalli on laadittu keskimääräisen kulutuksen laskemiseksi kustannus- ja ympäristölaskennan tarpeisiin. Tarvittaessa kulutusfunktioita voi-

daan korjata vastaamaan paremmin käytännön olosuhteita eri laskentatehtävissä, jos parempaa tietoa on käytettävissä.

## 5.5 Jatkotutkimustarpeet

Ympäristö- ja kustannuslaskennassa tarvittavaa tietoa voidaan tuottaa tutkimusten avulla ja/tai tilastoimalla toteutumatietoja kuljetusten suorittajilta (kuva 15).



**Kuva 15.** Polttoaineen kulutus- ja päästötietojen tiedonkeruuvaihtoehtoja.

Ympäristölaskennassa tarvitaan ajantasaista tietoa kuljetuksiin kuluneen polttoaineen ja syntyneiden päästöjen määrästä sekä niihin vaikuttavista tekijöistä. Kulutus ja päästöt tulee myös pystyä kohdentamaan eri lopputuotteille. Ympäristölaskennan merkityksen ennustetaan jatkossa kasvavan, mikä asettaa lisävaatimuksia laskentatietojen yksityiskohtaisuudelle ja ajantasaaisuudelle.

Kustannuslaskennassa tarvitaan tietoa polttoaineen kulutuksen tasosta ja siihen vaikuttavista päätekijöistä. Kustannustehokkuus syntyy eri osapuolien toimenpiteiden tuloksena. Keskeisiä toimijoita ovat kaluston valmistajat, kuljetusyrittäjät, kuljettajat, kuljetuspalvelujen käyttäjät, kuljetusten ohjaajat sekä tiestön ylläpidosta vastaavat tahot.

### ***Kulutusmittaukset***

Erillisten mittaustutkimusten perusongelmana on riittävän kattavien aineistojen kerääminen, jotta monien eri tekijöiden aiheuttama vaihtelu saadaan luotettavasti mallinnettua. Tutkimusaineistojen määrää ja laatua voidaan kasvattaa automatisoimalla tiedonkeruuta. Tässä tutkimuksessa käytetty SKALNET-laitteisto on yksi lupaava vaihtoehto uudeksi tutkimustiedon keruumenetelmäksi. Sitä tulisi kuitenkin edelleen kehittää, jotta tietoja voitaisiin kerätä yksityiskohtaisemmin. Esimerkiksi kulutus- ja aikatietojen

kerääminen kuorma-, työnvaihe- ja tieluokkakohtaisesti toisi arvokasta lisätietoa kulutukseen vaikuttavista tekijöistä.

### ***Päästöjen mittaus***

Päästöjen mittausta suoraan ajoneuvosta on Suomessa tehty toistaiseksi vain laboratorio-olosuhteissa. Teknologian kehitys on tuonut viime aikoina markkinoille mittalaitteita, joilla voidaan mitata päästöjen määrää myös ajon aikana todellisissa ajo-olosuhteissa. Uusien menetelmien myötä voitaneen tietopohjaa päästöjen osalta merkittävästi parantaa tulevaisuudessa.

### ***Kulutuksen ja päästöjen simulointi***

Polttoaineen kulutuksen simulointi on tehokas menetelmä kulutuksen ja päästöjen ja niihin vaikuttavien tekijöiden laskennalliseen tarkasteluun. Simuloinnin avulla voidaan tuottaa kustannustehokkaasti vaihtoehtoisia laskelmia, esimerkiksi muuttamalla kaluston ominaisuuksia tai ajotapaa. Kun simulointeja halutaan tehdä todellisilla kuljetusreiteillä, on toistaiseksi keskeisenä ongelmana ollut reitin tietietojen (pystygeometrian) määrittäminen. Tietietoja on ollut saatavissa vain yleiseltä tieverkolta, lähinnä pääteistä. Kustannustehokkaan ja riittävän tarkan mittausmenetelmän kehittäminen lisäisikin huomattavasti simuloinnin soveltamismahdollisuuksia puutavaran kuljetuksissa, joissa alemman tason tieverkolla on keskeinen merkitys. Simulointi perustuu moottorikartan hyödyntämiseen. Erimerkkisten ja erimallisten puutavara-autojen moottoreiden karttojen saaminen tutkimuskäyttöön on edellytys simuloinnin hyödyntämiselle tulevaisuudessa. Autokalusto uusiutuu jatkuvasti.

### ***Yrittäjäseuranta***

Monet kuljetusyrittäjät seuraavat oman kalustonsa polttoaineen kulutusta ja kuljetussuoritteita. Seurannassa käytetään apuna muun muassa ympäristöjärjestelmiä. Karkean, vuositason tiedon keruusta voidaan edetä aina yksityiskohtaisemmalle tasolle, kuten olosuhde- ja kuljettajakohtaiseen seurantaan, jolloin voidaan paremmin etsiä keinoja polttoaineen kulutuksen vähentämiseksi. Tällöin kannattaa harkita automaattisten tiedonkeruulaitteiden hyödyntämistä. Polttoaineen kulutuksessa saavutetut säästöt näkyvät yrityksen parempana kannattavuutena. Yrittäjäkohtaisten seurantatietojen tarve voi jatkossa kasvaa, jos ympäristöraportointia edellytetään kaikilta puunhankintaketjun toimijoilta kannolta tehtaalle.

### ***Polttoaineen kulutuksen vähentäminen***

Kyselytutkimuksen tuloksissa ilmeni suurta hajontaa autojen välisessä keskikulutuksessa. Osa kulutuseroista voidaan selittää kuljetusolosuhteiden erilaisuudella. Kysymykseksi jää kuinka paljon korkeita kulutustasoja voitaisiin alentaa toisenlaisilla kalustoratkaisuilla, ajotavan muutoksilla, kuljetuksenohjauksella ja muilla vastaavilla toimenpiteillä (taulukko 1). Polttoainekulutuksen säästöön ja päästöjen vähentämiseen tähtääville tutkimus- ja kehityshankkeille onkin jatkuva tarve.

## LÄHTEET

- Forsberg, M.** 2002. Transmit – Driftstatistik och vägstandardens påverkan på bränsleförbrukning. Arbetsrapport Nr 515. SkogForsk.
- Forsberg, M. & Löfroth, C.** 2002a. TRANSMIT – Kvalificerad IT i fyra virkesfordon visar: Lägre bränsleförbrukning med utbildning och bättre vägar. Resultat Nr 18.
- Forsberg, M. & Löfroth, C.** 2002b. TRANSMIT – Förarnas påverkan på bränsleförbrukning och utbildning is sparsam körning. Arbetsrapport Nr 516. SkogForsk.
- Koskinen, O. & Pennanen, O.** 1986. Puutavara-auton polttoaineen kulutus. Metsätehon tiedotus 395. 14 s.
- Rieppo, K. & Örn, J.** 2003. Metsäkoneiden polttoaineen kulutuksen mittaaminen - esitutkimus. Metsätehon raportti nro 148. 23 s.
- Sauna-aho, P.** 2003. Raakapuukuljetusten energiakulutuksen ja päästöjen määrittäminen ajoneuvosimulaattori Vemosimilla. Opinnäytetyö. Tekniikka ja liikenne, Logistiikan koulutusohjelma, Jyväskylän ammattikorkeakoulu. 50 s.
- SKAL 2001. Polttoainetalouden perusteet. Suomen Kuorma-autoliitto ry. 47 s.
- SKALNET-kustannusseuranta käyttöohje. Versio 1.2.2003. 23 s.  
[http://www.ectools.fi/ec-road/ecroad\\_ohje.htm](http://www.ectools.fi/ec-road/ecroad_ohje.htm)