SÄÄ- JA KUORMITUSOLOSUHTEIDEN VAIKUTUS SÄHKÖISEN RASKAAN LIIKENTEEN ENERGIANKULUTUKSEEN: KOKEELLINEN TUTKIMUS POHJOISMAISSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan koulutusohjelma, Diplomityö

2025

Teemu Hiltunen

Tarkastajat: Professori Jero Ahola

Nuorempi tutkija Altti Meriläinen

Tiivistelmä

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Teemu Hiltunen

Sää- ja kuormitusolosuhteiden vaikutus sähköisen raskaan liikenteen energiankulutukseen: kokeellinen tutkimus Pohjoismaissa

Diplomityö

2025

72 sivua, 13 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastajat: Professori Jero Ahola ja Nuorempi tutkija Altti Meriläinen

Avainsanat: sähköinen raskas ajoneuvo, energiankulutus, toimintamatka, lämpötilavaikutus, keliolosuhteet, loskakeli, regressiomallinnus, operointikortti, reitti- ja lataussuunnittelu

Raskaiden sähköisten kuljetusten yleistyminen edellyttää tarkkaa ymmärrystä siitä, miten ympäristöolosuhteet ja kuormitus vaikuttavat ajoneuvojen energiantarpeeseen ja käytettävyyteen. Toimintamatkan vaihtelu eri säätiloissa on edelleen yksi keskeisistä haasteista sähköisen raskaan liikenteen suunnittelussa, mitoituksessa ja operatiivisessa optimoinnissa. Tämän työn tavoitteena oli selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat raskaan täyssähköisen kuormaautoyhdistelmän energiankulutukseen ja toimintamatkaan todellisissa pohjoismaisissa olosuhteissa. Erityisesti tarkasteltiin ympäristön lämpötilan, ajoneuvon kokonaismassan ja tienpinnan olosuhteiden vaikutuksia sekä näiden tekijöiden yhteisvaikutuksia ajoneuvon energiatehokkuuteen. Tutkimusaineistona käytettiin Scania 40R E B6x2 -sähköisen täysperävaunuyhdistelmän 11 kuukauden telematiikkadataa, joka kattoi ajot Lounais-Suomessa ja Etelä-Ruotsissa vaihtelevissa sää- ja kuormitusolosuhteissa. Analyysissä ajoneuvon data yhdistettiin sääaineistoon, ja kulutuksen riippuvuutta lämpötilasta, kokonaismassasta ja tienpinnan keliluokasta (kuiva, märkä, loskainen) tutkittiin kvantitatiivisesti. Tulokset osoittivat, että energiankulutukseen vaikuttavat merkittävimmät tekijät ovat lämpötila, ajoneuvon kokonaismassa ja tiepinnan olosuhteet. Lämpötilan ja kulutuksen välinen yhteys oli lähes lineaarinen kuivissa olosuhteissa, mutta loskakelit aiheuttivat epälineaarisen kulutushuipun 0 °C ympäristössä. Märissä olosuhteissa kulutus kasvoi keskimäärin 15 %–20 %, ja loskassa jopa 40 %–50 % verrattuna kuivaan tiepintaan. Raskailla kuormilla kulutuksen suhteellinen herkkyys pieneni, mutta absoluuttinen energiantarve kasvoi merkittävästi.

Abstract

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Degree Programme in Electrical Engineering

Teemu Hiltunen

The impact of weather and load conditions on the energy consumption of electric heavy-duty transport: experimental research in the Nordic countries

Master's thesis

2025

72 pages, 13 figures and 1 table

Examiners: Professor Jero Ahola and Junior Researcher Altti Meriläinen

Keywords: battery electric heavy-duty vehicle (eHDV), energy consumption, driving range, ambient temperature, road surface conditions, slush (wet snow), regression modelling, operational reference chart, route and charging planning, Nordic climate

The objective of this study was to identify the factors influencing the energy consumption and driving range of a heavy-duty battery-electric truck combination under real Nordic operating conditions. In particular, the effects of ambient temperature, total vehicle mass, and road surface conditions were examined, as well as the combined impact of these factors on vehicle energy efficiency. The research dataset consisted of eleven months of telematics data from a Scania 40R E B6x2 battery-electric full trailer combination operating in Southwest Finland and Southern Sweden under varying weather and loading conditions. In the analysis, vehicle data were combined with meteorological observations, and the dependence of energy consumption on temperature, gross vehicle mass, and road surface class (dry, wet, slushy) was examined quantitatively. The results showed that the most significant factors affecting energy consumption are ambient temperature, vehicle mass, and road surface conditions. The relationship between temperature and energy consumption was nearly linear under dry conditions, whereas slushy road surfaces caused a nonlinear consumption peak around 0 °C. Under wet conditions, energy consumption increased on average by 15 %–20 %, and under slushy conditions by as much as 40 %–50 % compared with dry pavement. At high vehicle masses, the relative sensitivity of consumption decreased, but the absolute energy demand increased substantially.

Symboli- ja lyhenneluettelo

Latinalaiset aakkoset

A	pinta-ala	m^2
C	energiankulutusarvo	$\mathrm{kWh}/100\,\mathrm{km}$
C_d	ilmanvastuskerroin	
$\Delta(C_\mathrm{d}A)$	aerodynaamisen otsapinta-alan muutos	
E	energia	kWh
η	hyötysuhde	
g	maan vetovoiman kiihtyvyys	m/s^2
M	ajoneuvon massa	t
m	massa	kg
P	teho	W
p	ilmanpaine	Pa
R	ajoneuvon arvioitu toimintamatka	km
T	lämpötila	°C
θ	tien kaltevuuskulma	rad
v	nopeus	km/h

Kreikkalaiset aakkoset

ρ	ilman tiheys	kg/m^3

Alaindeksit

aero	aerodynaaminen vastus
aux	apulaitteiden vastus
dry	kuiva keli
grade	kaltevuuden ja massan aiheuttama potentiaalinen sekä inertiaalinen vastus
100	akun energia sadan prosentin varaustilassa
regen	regeneratiivinen jarrutus
rel	suhteellinen virtaus
rr	vierintävastus
slush	sohjokeli
tot	yhteensä
usable	käytettävissä oleva
veh	ajoneuvon nopeus

wet	märkä keli
wind	tuuli suhteessa ajoneuvoon
0	akun energia nollaprosentin varaustilassa

Lyhenteet

ACE LIFE	(Accelerating Climate Efforts and Investments) LIFE-ohjelman alainen ilmastotoimien ja investointien kiihdyttämishanke (2024–2030) Suomessa
eHDV	(Electric Heavy Duty Vehicle) Sähköinen raskas ajoneuvo
eTPV	Sähköinen täysperävaunuyhdistelmä
FMI	(Finnish Meteorological Institute) Ilmatieteen laitos
GVW	(Gross Vehicle Weight) Ajoneuvon kokonaismassa
HCT	(High Capacity Transport) Suurikapasiteettinen ajoneuvoyhdistelmä (pituus 34,5 m)
LIFE	(Programme for the Environment and Climate Action) Euroopan unionin ympäristö- ja ilmastotoimien rahoitusohjelma
MCS	(Megawatt Charging System) Megawattilatausjärjestelmä
MESI	(Metsäyhtiöiden autokuljetusten sähköistäminen)
PTO	(Power Take-Off) Voiman ulosotto
REEL	(Regional Electrification for Logistics) Lindholmen Science Parkin koordinoima ruotsalainen raskaan tieliikenteen sähköistymistä vauhdittava demonstraatiohanke
RP	(Road Precipitation) Tienpinnan sademääräkeliluokka
RPWT	(Road Wetness) Märkyyskategorian tunniste ajoneuvodatalle
RRF	(Recovery and Resilience Facility) Euroopan unionin elpymis- ja palautumistukiväline
SoC	(State of Charge) Akun varaustila prosentteina
SoS	(State of Slush) Sohjo-olosuhteen tunniste lämpötila-alueella
VTT	(VTT Technical Research Centre of Finland) Teknologian tutkimuskeskus VTT

Ilmoitukset

Rahoittaja

LIFE22-IPC-FI-ACE LIFE. Euroopan unionin osarahoittama. Esitetyt näkemykset ja mielipiteet kuuluvat kuitenkin ainoastaan kirjoittajille eivätkä välttämättä heijasta Euroopan unionin tai CINEAn kantoja. Euroopan unionia tai myöntävää viranomaista ei voida pitää niistä vastuussa.

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Teemu Hiltunen on käyttänyt seuraavia tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä:

1. Writefull
    a. **Työkalun käytön tarkoitus:** Writefullia käytettiin tekstin kieliasun, lauserakenteen ja tieteellisen ilmaisun tarkistamiseen Overleaf LaTeX-ympäristössä. Työkalun avulla varmistettiin, että teksti vastaa akateemisen englannin sekä suomen tyyli- ja kielioppivaatimuksia.
    b. **Selvitys työkalun käytöstä:** Writefullin tekoälypohjaista kielimallia hyödynnettiin tekstin kielen tarkistamiseen. Työkalua käytettiin vain tekstin selkeyden ja kielenhuollon parantamiseen.
2. ChatGPT (OpenAI GPT-5, 2025)
    a. **Työkalun käytön tarkoitus:** ChatGPT:tä käytettiin tekstin rakenteen, terminologian yhdenmukaistamisen ja kappaleiden muotoilun tukena sekä LaTeX-muotoilun teknisessä avustamisessa.
    b. **Selvitys työkalun käytöstä:** Työkalu auttoi tekstiosuuksien jäsentelyssä, kieliopillisessa tarkistuksessa ja koodiesimerkkien muotoilussa.

Vastuu

Kirjoittaja, Teemu Hiltunen, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

Ilmoitukset

Sisällysluettelo 7

Kuva- ja taulukkoluettelot 9

1 Johdanto 11

2 Kirjallisuuskatsaus 14

2.1 Sähköisen raskaan liikenteen tilanne ja pilotit Pohjoismaissa 14

2.2 Raskaan liikenteen energiankulutus ja lataus 16

2.3 Sääntely ja tukimekanismit 16

2.4 Tutkimusaukko 16

2.5 Ilmastolliset olosuhteet Suomessa 17

3 Sähköisen ajoneuvon energiankulutuksen fysikaaliset taustatekijät 18

3.1 Ajoneuvon energiahäviöiden jakauma 18

3.2 Vierintävastus 21

3.3 Ilmanvastus 22

3.4 Tien kaltevuuden ja massan hitauden vaikutus 24

3.5 Apulaitteiden kuluttama teho 25

4 Tiedonkeruun ja -käsittelyn menetelmät 26

4.1 Ajoneuvoyhdistelmä ja käyttöympäristö 27

4.2 Aineisto ja suodatukset 28

4.3 Sääaineistot ja yhdistäminen reittiin 29

4.4 Datan mittaus ja laadunvarmistus 30

4.5 Toistettavuus, eettiset seikat ja tietosuoja 31

5 Tulokset 33

5.1 Energiankulutuksen riippuvuudet 33

5.1.1 Kuormituksen vaikutus kulutukseen 34
5.1.2 Lämpötilan ja kuormituksen yhteisvaikutus 35
5.2 Energiankulutuksen riippuvuus massasta ja lämpötilasta 37
5.2.1 Kuivat ja märät olosuhteet 39
5.2.2 Sateen ja lämpötilan vaikutus energiankulutukseen eri kuormilla . . 41
5.3 Toimintamatka eri olosuhteissa 43
5.3.1 Lämpötilan vaikutus toimintamatkaan (kuormaamaton vs. täyteen lastattu ajoneuvoyhdistelmä) 43
5.3.2 Toimintamatka kuormituksen ja sään mukaan 45
5.4 Operointikortti: energiankulutuksen arviointi massan, lämpötilan ja kelin mukaan 46
5.4.1 Menetelmä ja mallinnusperiaatteet 46
5.4.2 Operointikortin rakenne 47
6 Keskustelu 51
6.1 Tulkinta suhteessa kirjallisuuteen 51
6.2 Epälineaarisuus ja ääriolosuhteet 53
6.3 Operointiin kohdistuvat käytännön vaikutukset 54
6.4 Ulkoistettavuus ja yleistettävyys 55
6.5 Rajoitteet ja epävarmuustekijät 56
6.6 Jatkokehitys 58
7 Johtopäätökset 60
7.1 Keskeiset havainnot 60
7.2 Vastaukset tutkimuskysymyksiin 61
7.3 Käytännön suositukset 63
7.4 Rajoitteet 64
7.5 Jatkokehitys 64
8 Yhteenveto 66
Lähdeluettelo 67

Kuvaluettelo

1 Henkilöauton energiankäytön ja häviöiden jakauma polttomoottori- ja täyssähköisessä käyttövoimassa (Malik et al., 2025). Kokonaisenergiankulutus on henkilöauton polttomoottoriversiolla tyypillisesti 50–70 kWh/100 km ja täyssähköisellä 15–20 kWh/100 km.

2 Sähköisen raskaan ajoneuvoyhdistelmän energiankäytön ja häviöiden jakauma. Dieselajoneuvon kokonaisenergiankulutus vastaa noin 35–45 litran kulutusta 100 kilometrillä (340–435 kWh/100 km). Dieselajoneuvon jakauma perustuu Nylundin (Nylund, 2013) esittämiin energiatehokkuuslukuihin. Täyssähköisen yhdistelmän jakauma on johdettu suhteuttamalla dieselajoneuvon ajovastusjakaumaa (Malik et al., 2025).

3 Tutkimuksen menetelmäkehikko

4 Mitattu energiankulutus eri kokonaismassaluokissa (laatikot) sekä kuivan kelin fysikaalinen kulutusmalli (katkoviiva). Laatikot esittävät kunkin GVW-luokan mediaanin, kvartiilit ja ääripisteet. Laatikot esittävät kunkin GVW-luokan mediaanin (50-percentiili), alakvartiilin (25-percentiili) ja yläkvartiilin (75-percentiili) sekä minimi- ja maksimiarvot. Mallikäyrä on laskettu kunkin massaluokan keskimääräiselle kokonaismassalle ja kyseisen luokan keskimääräiselle ajonopeudelle kuivalla tienpinnalla.

5 Energiankulutuksen riippuvuus ympäristön lämpötilasta ja ajoneuvon kokonaismassasta. Kuvassa (a) esitetään kaikki matkat, ja kuvassa (b) vastaava lämpökartta poikkeavat ajot suodatettuna.

6 Energiankulutus massan ja lämpötilan funktiona kolmessa eri kuormitustilanteessa. Väri kuvaa ulkolämpötilaa.

7 Energiankulutuksen riippuvuus kokonaismassasta ja lämpötilasta kuivissa (a) ja märissä (b) keliolosuhteissa. Lämpötilakohtaiset regressioviivat on sovitettu ±2,5 °C leveisiin lämpötilaluokkiin, jotta samaan lämpötila-alueeseen kuuluvat havainnot voidaan esittää yhtenäisenä trendinä.

8 Energiankulutus lämpötilan ja sateen intensiteetin funktiona kevyellä (a) ja raskaalla (b) yhdistelmällä. Harmaat pisteet ovat havaintopisteitä, joita yhteensä 79 kappaletta.

9 Toimintamatkan riippuvuus lämpötilasta kuormaamattomalla (a) ja täydellä (b) ajoneuvoyhdistelmällä. Punainen viiva kuvaa lineaarista sovitusta.

10 Toimintamatka lämpötilan funktiona kahdella massaluokalla: (a) kuivat olosuhteet ja (b) märät olosuhteet.

11 Operointikortti kuivalle kelille. Energiankulutus kWh/100 km lämpötilan ja massan funktiona.

12 Operointikortti märälle kelille. Energiankulutus kWh/100 km lämpötilan ja massan funktiona.
13 Operointikortti sohjokelille. Energiankulutus kWh/100 km lämpötilan ja massan funktiona.

Taulukkoluettelo

1 Tuloksien analyysissa käytettyjen matkojen lukumäärä GVW-luokissa ja sääkategorioissa. "Märkä"sisältää sateen ja sohjon osion 4 määritelmän mukaisesti.

1 Johdanto

Raskaan tieliikenteen sähköistäminen on tunnistettu keskeiseksi menetelmäksi hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi, energiatehokkuuden parantamiseksi sekä fossiilisten polttoaineiden riippuvuuden vähentämiseksi (H. Ritchie & Roser, 2020; Seppälä et al., 2024). Sähköiset raskaat ajoneuvot (electric heavy-duty vehicle, eHDV) ovat kehittyneet nopeasti, mutta niiden energiankulutukseen vaikuttavia tekijöitä pohjoismaisissa olosuhteissa on tutkittu merkittävästi vähemmän verrattuna perinteisiin raskaan liikenteen dieselajoneuvoihin (Feng, Rindt & S. G. Ritchie, 2025; Karam & Rich, 2025). Kylmissä olosuhteissa samat fysikaaliset tekijät, kuten ilman suurempi tiheys, renkaiden vierintävastuksen kasvu sekä lämmityksen energiantarve, vaikuttavat sekä sähköisiin raskaisiin ajoneuvoihin että vastaavaan dieselkalustoon. Näiden vaikutusten suuruus ja jakautuminen kokonaisenergiankulutukseen poikkeavat kuitenkin merkittävästi: sähköajoneuvoissa lämpötilan lasku vaikuttaa erityisesti akun hyötysuhteeseen ja lämmitysenergian tarpeeseen, kun taas dieselajoneuvoissa vaikutus kohdistuu pääosin moottorin lämpenemiseen ja polttoaineen palamishyötysuhteeseen. Sähköajoneuvoissa akuston ja ohjaamon lämmönhallinta kuluttaa energiaa, joka dieselkalustossa saadaan moottorin hukkalämmöstä (Lajunen, Yang & Emadi, 2020; Seo et al., 2025). Lisäksi apujärjestelmät, kuten lämmitys, jäähdytys ja voiman ulosotto (power take-off, PTO), muodostavat merkittäviä kulutuskomponentteja, joiden vaikutus korostuu matalissa lämpötiloissa ja pitkän ajon aikana (Lee et al., 2024; Gu, Liao & Zhang, 2025). Vaikka dieselkaluston polttoaineenkulutusta sekä sen riippuvuutta kuormituksesta, reitistä ja sääolosuhteista on mallinnettu kattavasti, sähköisten raskaiden ajoneuvojen energiankulutuksesta on edelleen niukasti vertaisarvioitua tutkimusta, erityisesti pohjoismaisessa ilmastossa. Kirjallisuudessa on tunnistettu useita puutteita, jotka liittyvät ympäristön lämpötilan ja sään vaikutukseen kulutukseen, kuorman ja kokonaismassan vaikutukseen energiantarpeeseen, ajoprofiilin (nopeus, tien topografia, kaupunki-maantie) sekä apukuormien (lämmitys, kompressorit, hydrauliikka) rooliin. Lisäksi operatiivisten toimenpiteiden (esilämmitys, rengaspaineet, pyörien suuntaus, reititys) vaikuttavuus käytännön ajossa on jäänyt vähäiseksi tutkimuskohteeksi (Carlson & Vieira, 2021a; Sauna-aho et al., 2018a; Khosravi et al., 2015).

Erityisesti vierintävastus ja sen herkkyys ympäristö- ja kuormitusolosuhteille nousevat keskeisiksi tekijöiksi raskaan kaluston energiatehokkuudessa. Aiemmat tutkimukset osoittavat, että vierintävastuksen osuus ajovastuksesta voi olla jopa 60 % maantienopeuksilla, ja sen vaihtelu johtuu pääosin tienpinnan olosuhteista, rengastyypistä ja akselikuormituksesta. Tästä syystä myös kuorman jakautuminen akseleille vaikuttaa suoraan energiankulutukseen, mutta tätä ilmiötä ei ole aikaisemmin kvantifioitu pohjoismaisissa olosuhteissa. Tämä näkökulma toimii tutkimuksen keskeisenä lähtökohtana ja motivoi tutkimuskysymysten muodostamista.

Tämän työn tavoitteena on luoda systemaattinen kokonaiskuva niistä tekijöistä, jotka selittävät sähköisten raskaan liikenteen ajoneuvojen energiankulutusta todellisissa käyttöolosuhteissa. Tavoitteena on paitsi tunnistaa kulutukseen vaikuttavat päätekijät, myös arvioida niiden suhteellista merkitystä pohjoisen ilmaston kontekstissa ja muodostaa näiden pohjalta fysikaalisesti perusteltu energiankulutuksen vaihtelulle. Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksen sekä kokeellisen tutkimuksen yhdistelmänä, jossa tarkastellaan 64 tonnin sähköisen täysperävaunuyhdistelmän (eTPV) energiankulutusta käytännön kuljetusreitillä. Aineisto koostuu 11 kuukauden mittaisesta telematiikkadatasta, jota täydennetään aikaisemman tutkimuskirjallisuuden pohjalta rakennetuilla tilastollisilla ja fysikaalisilla malleilla. Koska tutkimuksen ajoneuvoyhdistelmä oli varustettu pressukapellirakenteisella umpikorityyppisellä perävaunulla, mallin tuloksia voidaan yleistää ajoneuvoihin, joissa on vastaava vetoauton ohjaamorakenne, rengastus ja aerodynaamisilta ominaisuuksiltaan samankaltainen umpipäällirakenne. Tämä viittaa siihen, että ajoneuvon päällirakenteen muodolla on merkittävä vaikutus kokonaisenergiankulutukseen, erityisesti maantienopeuksilla (Sauna-aho et al., 2018b). Työ eroaa aiemmasta kirjallisuudesta siinä, että se yhdistää pitkittäisen telematiikkaaineiston ja säädatan fysikaalisiin perusmalleihin, mahdollistaen ensimmäistä kertaa vierintävastuksen ja keliluokan kvantitatiivisen arvioinnin reaalisessa sähköisessä raskaan liikenteen operoinnissa. Työn myötävaikutus on käytännön ajodataan perustuva analyysi, joka osoittaa, miten kylmät lämpötilat, ajoneuvon kuorma ja erilaiset keliolosuhteet vaikuttavat raskaan sähköajoneuvon energiankulutukseen. Tutkimus tuo nämä vaikutukset numeerisesti esille ja tuottaa selkeitä suosituksia siitä, miten energiankulutusta voidaan vähentää todellisissa talviolosuhteissa. Tulokset tukevat tulevan infrastruktuurin, reitityksen ja kaluston suunnittelua pohjoismaisissa olosuhteissa.

Työ rajautuu N3-luokan sähköiseen kuorma-autoon, jonka suurin sallittu kokonaismassa on yli 12 tonnia, sekä O4-luokan perävaunuun, jonka suurin sallittu kokonaismassa ylittää 10 tonnia. Ajoneuvoluokitukset perustuvat Euroopan unionin ajoneuvoasetukseen (EU) 2018/858, jossa N-luokka kattaa tavarankuljetukseen tarkoitetut moottoriajoneuvot ja O-luokka perävaunut (*Regulation (EU) 2018/858* 2018). N3 viittaa raskaisiin, yli 12 tonnin moottoriajoneuvoihin, kun taas O4 viittaa raskaisiin, yli 10 tonnin perävaunuihin. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan näiden ajoneuvoluokkien käyttöä ja energiankulutusta pohjoismaisissa (Suomen ja Ruotsin) olosuhteissa. Tarkastelu keskittyy runkoliikennetyyppisiin tehtäviin sekä todellisiin ajosuoritteisiin. Latausinfrastruktuuria ja akkujen kemiallista käyttäytymistä eri lämpötiloissa ei analysoida, vaan niihin viitataan ainoastaan taustoituksen yhteydessä. Työ etenee seuraavasti. Luvussa 2 esitellään sähköisen raskaan liikenteen taustat ja aiempi tutkimus. Luvussa 3 kuvataan energiankulutuksen fysikaaliset perusteet, ja luvussa 4 esitellään tutkimuksessa käytetyt menetelmät, aineistot sekä analyysiprosessi. Luku 5 esittelee tulokset kuorman, lämpötilan ja sääolosuhteiden vaikutuksista sekä operointikortin muo-

dostamisesta. Luvuissa 6 ja 7 käsitellään tulosten tulkintaa, päätelmiä ja suosituksia, ja luku 8 kokoaa työn keskeiset havainnot yhteen. Tutkimuskysymykset, joihin pyritään vastaamaan, ovat seuraavat:

TK1: Miten ympäristön lämpötila vaikuttaa eHDV-ajoneuvojen energiankulutukseen, ja mikä on akuston lämmönhallinnan sekä ohjaamon lämmityksen suhteellinen osuus tästä vaikutuksesta?

TK2: Kuinka merkittävä on ajoneuvoyhdistelmän kokonaismassan vaikutus energiankulutukseen suhteessa ajonopeuteen ja maaston muotoon?

TK3: Miten renkaiden vierintävastus, aerodynamiikka ja tieolosuhteet (kitka, lumi, sohjo, vesi) vaikuttavat energiankulutukseen, ja kuinka nämä vaikutukset skaalautuvat nopeuden kasvaessa?

TK4: Missä määrin operatiiviset keinot, kuten reitin ja nopeuden optimointi, esilämmitys, rengaspaineiden hallinta sekä kuorman sijoittelu akseleille, voivat vähentää energiankulutusta ilman teknisiä muutoksia ajoneuvoon?

2 Kirjallisuuskatsaus

Tässä luvussa kootaan yhteen sähköisen raskaan liikenteen nykytila ja luodaan teoreettinen perusta työn analyysiosalle. Tarkastelu etenee kolmella tasolla: ensin kuvataan sähköisten raskaan kaluston piloteista ja niiden toimintaympäristöstä Pohjoismaissa, sen jälkeen tarkastellaan energiankulutukseen vaikuttavia fysikaalisia tekijöitä ja lopuksi tunnistetaan keskeiset tutkimusaukot. Näin kirjallisuuskatsaus toimii viitekehyksenä, jonka pohjalta myöhemmässä analyysissä tarkastellaan vierintävastuksen, kuorman ja sääolosuhteiden vaikutuksia kokeellisesti.

2.1 Sähköisen raskaan liikenteen tilanne ja pilotit Pohjoismaissa

Raskaan liikenteen sähköistyminen etenee Pohjoismaissa nopeasti, ja siihen vaikuttavat sekä ilmastotavoitteet että teknologinen kehitys. Ruotsissa, Norjassa ja Tanskassa toteutetut pilotit ovat tuottaneet arvokasta käytännön tietoa energiankulutuksesta, toimintamatkasta, lataustavoista sekä ajoneuvojen suorituskyvystä kylmissä olosuhteissa. Kokemusten perusteella sähköinen raskas kalusto on jo teknisesti käyttökelpoista alue- ja jakeluliikenteessä; kuitenkin pitkän matkan kuljetuksissa latausinfrastruktuurin puute sekä akkujen rajallinen energiatiheys rajoittavat edelleen toimintamatkaa. (Hiltunen et al., 2025)

Norjan liikennetaloudellisen instituutin kenttäkokeet ja käyttäjäkyselyt osoittavat, että sähkökäyttöiset kuorma-autot ovat olleet luotettavia kaupunki- ja aluejakelussa. Kuitenkin pitkän matkan kuljetuksissa esiintyy rajoitteita, jotka johtuvat rajallisesta toimintamatkasta sekä suurteholatauksen saatavuudesta (Hovi, Pinchasik, Thorne et al., 2019; Pinchasik, Figenbaum & Hovi, 2022). Talviolosuhteissa energiankulutus kasvaa merkittävästi verrattuna kesäolosuhteisiin, mikä on havaittu tyypillisesti 30–40 % lisäyksenä. Kasvu johtuu pääasiassa ajoneuvon lämmitystarpeesta sekä akun hyötysuhteen heikkenemisestä (Hovi, Pinchasik, Figenbaum et al., 2020). Lisäksi lumi, loska ja märkä tienpinta lisäävät vierintävastusta ja mekaanisia häviöitä, mikä voi edelleen nostaa energiankulutusta erityisesti nollakelien ja sulamisolosuhteiden aikana.

Lindholmen Science Parkin REEL (Regional Electrification for Logistics) on laaja ruotsalainen demonstraatiohanke, jonka tavoitteena on vauhdittaa raskaan tieliikenteen sähköistymistä. Ohjelma kokoaa yhteen yli 60 yritystä ja organisaatiota, ja sen puitteissa toteutetaan yli 20 käytännön pilottia eri puolilla Ruotsia. REEL keskittyy erityisesti sähkökuormaautojen käyttöönoton, varikkolatauksen ja suurteholatausinfrastruktuurin kehittämiseen sekä latauksen integrointiin osaksi päivittäisiä kuljetusprosesseja (Lindholmen Science Park, 2022; Lindholmen Science Park, 2023; Lindholmen Science Park, 2024). Ruotsissa on lisäksi arvioitu akkujen vaihtoratkaisujen skaalautuvuutta pitkän matkan kuljetuksille. Akkujen

vaihtaminen voi merkittävästi lyhentää ajoneuvon seisokkiaikaa verrattuna perinteiseen latukseen, mutta ratkaisun laajamittainen käyttöönotto edellyttää akkupakettien ja liitäntöjen standardointia eri valmistajien välillä. Tällä hetkellä raskaan kaluston akkurakenteet, kennokemiat ja jännitetasot vaihtelevat huomattavasti, mikä vaikeuttaa yhteensopivien vaihtojärjestelmien kehittämistä. Lisäksi investointikustannukset ovat korkeita, sillä akkuvarastojen, robottivaihtoasemien ja sähköverkon liitäntöjen rakentaminen edellyttää merkittäviä pääomasijoituksia. Näistä syistä akkujenvaihto nähdään toistaiseksi rajatun soveltuvuuden ratkaisuna, joka voi täydentää suurteholatausta tietyissä käyttöympäristöissä, kuten terminaali- tai hubioperaatioissa (Nåbo et al., 2024).

Suomessa on toteutettu useita sähköisen raskaan liikenteen pilotteja osana valtion ja yritysten yhteistyöhankkeita. Liikenne- ja viestintävirasto Traficomin RRF-valtionavustuksen (Recovery and Resilience Facility, elpymis- ja palautumistukiväline) sekä Euroopan unionin LIFE-ohjelman (Programme for the Environment and Climate Action) ACE LIFE-hankkeen (Accelerating Climate Efforts and Investments, ilmastotoimien ja investointien kiihdyttämishanke; 2024–2030) puitteissa pilotoidaan sähköisiä HCT-yhdistelmiä (High Capacity Transport, suurikapasiteettisia ajoneuvoyhdistelmiä), suurteholatausta sekä sähköisiä runkoyhteyksiä. Näiden ohjelmien tavoitteena on vauhdittaa raskaan liikenteen sähköistymistä, kehittää vähähiilisiä energiaratkaisuja ja edistää latausinfrastruktuurin käyttöönottoa Suomen keskeisillä kuljetusreiteillä. Traficomin koordinoimat yrityspilotit, mukaan lukien Ahola Transport, Posti, DB Schenker ja SSAB Europe, tutkivat 50–76 tonnin täyssähköisten yhdistelmien energiankulutusta ja käyttövarmuutta. (Traficom, 2025; Traficom, 2024) Suomessa raskaan kaluston sähköistymisen kehitys on edennyt vaiheittain. DB Schenker otti käyttöön maan ensimmäisen täyssähköisen HCT-yhdistelmän (68 t) Vantaa-Lempäälä-linjalla lokakuussa 2023. Tämän jälkeen Ahola Transport ja Plugit Finland avasivat Naantaliin julkisen suurteholatausaseman syyskuussa 2024, ja SSAB yhdessä Kuljettavan kanssa käynnistivät 64 tonnin sähköiset lähikuljetukset Hämeenlinnassa tammikuussa 2025 (Ahola Transport, 2024; SSAB Europe, 2025; DB Schenker Finland, 2023). Posti testaa sähköisiä jakeluyksiköitä ja dieselkuorma-autojen konversioita, ja Metsätehon MESI-hanke (Metsäyhtiöiden autokuljetusten sähköistäminen, 2023–2025) arvioi sähköisten metsäkuljetusten ja puutavara-autojen soveltuvuutta osaksi metsälogistiikkaa sekä sähköisen kaluston käyttöönoton teknisiä ja taloudellisia edellytyksiä (Posti Group, 2023; Metsäteho Oy, 2023). Pilotit osoittavat, että tekninen valmius on olemassa, mutta energiankulutuksen vaihtelun ymmärtäminen, erityisesti vierintävastuksen ja akselikuormituksen näkökulmasta, on edelleen puutteellista. Tämä havainto toimii perusteluna työn empiiriselle tarkastelulle.

2.2 Raskaan liikenteen energiankulutus ja lataus

Vaikka kenttäaineistot tarjoavat realistisia kulutusarvoja, ne harvoin erottelevat ajovastusten, kuten vierintävastuksen ja aerodynamiikan, suhteellisia osuuksia. Tämä rajoittaa tulosten siirrettävyyttä erilaisiin sää- ja kuormitusolosuhteisiin. Eurooppalaisista kenttäaineistoista raportoidaan tyypillisesti 90–130 kWh/100 km riippuen ajoneuvon massasta, lämpötilasta ja ajoprofiilista. Saksan reaalidatassa, 11–18 tonnin kuljetuksissa, keskimääräinen kulutus oli 96 kWh/100 km lauhassa säässä ja vähäisillä korkeuseroilla (Le Corguillé et al., 2025), kun taas 40 tonnin pitkän matkan kuljetuksissa Designwerk raportoi noin 130 kWh/100 km (Designwerk Technologies AG, 2025). Varikkolataus (22–44 kW AC) toimii perusratkaisuna, jota täydentää päivän aikana 150–350 kW DC-lataus (Lindholmen Science Park, 2024; Ferwerda et al., 2023). MCS-järjestelmien piloteissa on saavutettu noin 750 kW tehotaso, mikä osoittaa järjestelmän potentiaalin sähköisen raskaan liikenteen lataustaukojen merkittävään lyhentämiseen pitkän matkan kuljetuksissa. Standardin tekniset rajat latauspistokkeelle (1 250 V, 3 000 A) mahdollistavat kuitenkin jopa 3,75 MW lataustehoja tulevaisuudessa (Satvat, Plassmann & Hackmann, 2023; Zaiko, 2023).

2.3 Sääntely ja tukimekanismit

AFIR-asetus (EU 2023/1804) asettaa sitovia vähimmäistavoitteita raskaalle kalustolle tarkoitetulle latausverkolle: vähintään yksi 350 kW:n latauspiste on oltava 60 kilometrin välein TEN-T-ydinverkolla ja 100 kilometrin välein kattavalla verkolla vuoteen 2030 mennessä (European Commission, 2023). Suomessa tämän asetuksen toimeenpanoa tuetaan kansallisilla hankkeilla ja tiekartoilla, joissa painopiste on logistiikkasolmuissa ja varikoilla (Traficom, 2025). Sääntely- ja tukimekanismit luovat kehykset sähköisen raskaan liikenteen yleistymiselle, mutta eivät ratkaise yksittäisen ajoneuvon energiankäytön optimointia, joka jää tämän tutkimuksen keskiöön.

2.4 Tutkimusaukko

Vaikka pilotit ovat tuottaneet merkittävästi käytännön tietoa, pitkäkestoista ja korkearesoluutioista kenttädataa raskaista täyssähköyhdistelmistä talviolosuhteissa on edelleen rajallisesti saatavilla. Suuri osa aiemmasta tutkimuksesta on keskittynyt kaupunkijakelun, kansainvälisten demonstraatioiden tai mallinnuksen konteksteihin (Speth & Funke, 2021; Coalition, 2023; Circle, 2021; Mobilität, 2020).

Suomessa toteutetuissa SÄHKE- ja HCT-piloteissa on raportoitu vastaavia suuruusluokkia energiankulutuksessa eri ajoneuvotyypeillä. Esimerkiksi 20 tonnin jakeluautolla kulutus on ollut noin 80 kWh/100 km ja 29 tonnin 6×2-jakeluautolla noin 100 kWh/100 km. Raskaammilla yhdistelmillä kulutus kasvaa voimakkaasti: 44 tonnin traileriyhdistelmällä tyypillinen

kulutus on ollut 100 kWh/100 km ja 68 tonnin HCT-yhdistelmillä noin 180–190 kWh/100 km. Raskaissa ja talvisissa olosuhteissa, kuten loskassa tai jatkuvassa sateessa, kulutus voi nousta jopa 270 kWh/100 km tasolle (Siren & Traficom, 2025). Nämä tulokset vahvistavat, että energiankulutus kasvaa jyrkästi kokonaismassan ja sääolosuhteiden muuttuessa. Kuitenkin yksityiskohtainen kvantitatiivinen analyysi näiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta on toistaiseksi puuttunut.

Tässä tutkimuksessa täytetään olemassa olevan tutkimustiedon aukko tuomalla esiin pitkittäisanalyysi sähköisen täysperävaunuyhdistelmän energiankulutuksesta ja lataustavoista pohjoisissa talviolosuhteissa. Yksittäiset riippumattomat koeajot yhdessä valmistajaraporttien kanssa vahvistavat edellä esitettyjä suorituskykytietoja. Esimerkiksi 40 tonnin FH Electric -koeajossa on raportoitu energiankulutukseksi 110 kWh/100 km nopeudella 80 km/h (Volvo Trucks, 2022). Aiempi tutkimus on siis keskittynyt pääosin teknologiseen ja infrastruktuuriseen näkökulmaan, kun taas tämä työ laajentaa ymmärrystä fysikaalisista ja operatiivisista kulutustekijöistä yhdistämällä kokeellisen aikasarjan ja mallipohjaisen analyysin. Tavoitteena on tuottaa määrällinen arvio siitä, kuinka paljon ympäristön ja kuormituksen vaihtelut selittävät havaittua energiankulutuksen hajontaa todellisessa liikenneympäristössä.

2.5 Ilmastolliset olosuhteet Suomessa

Suomen maantieteellinen sijainti Pohjois-Euroopassa, yli tuhannen kilometrin matkalla etelästä pohjoiseen, luo laajan kirjon ilmasto-olosuhteita. Maan ilmastolle ovat tyypillisiä pitkät ja kylmät talvet sekä verrattain leudot kesät, ja olosuhteet vaihtelevat huomattavasti Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä. Ilmastollisten havaintojen mukaan (1991–2020) Suomessa esiintyy suurta alueellista lämpötilavaihtelua talvikaudella: päivittäiset minimilämpötilat laskevat pohjoisessa usein alle $-30\,^{\circ}\mathrm{C}$, kun taas etelässä ne vaihtelevat tyypillisesti välillä $-15\,^{\circ}\mathrm{C}$–$-5\,^{\circ}\mathrm{C}$ (Jokinen et al., 2021). Päivittäinen lämpötilavaihtelu on erityisen suurta kevät- ja syyskaudella, jolloin sisämaan alueilla lämpötila voi vaihdella $10\,^{\circ}\mathrm{C}$–$20\,^{\circ}\mathrm{C}$ vuorokauden aikana.

Lumipeite on Pohjois-Suomessa maassa tyypillisesti 4–6 kuukautta ja Etelä-Suomessa 3–4 kuukautta kalenterivuoden aikana. Loska, räntä ja märkä lumi ovat yleisiä siirtymäkausina, erityisesti Etelä-Suomessa, ja ne aiheuttavat haasteita tiekuljetuksille. Tuuliolosuhteet vaihtelevat sekä alueellisesti että ajallisesti: rannikkoalueilla ja avoimilla maastoilla keskituulennopeudet ovat suurempia kuin sisämaassa. Tyypilliset tuulennopeudet vaihtelevat 2–7 $\mathrm{m/s}$, mutta myrskypuuskat voivat ylittää 20 $\mathrm{m/s}$. Nämä vaihtelevat ja usein ankarat olosuhteet, erityisesti pakkasjaksot, erimuotoinen sademäärä sekä voimakkaat tuulet, asettavat merkittäviä haasteita raskaiden sähköajoneuvojen käytölle ja latausinfrastruktuurin toimintavarmuudelle. Tämä korostaa ilmastonmuutokseen sopeutuvien kuljetusratkaisujen suunnittelun ja toteutuksen tärkeyttä Suomessa. Erityisesti nollakelien ja märän tien yhdistelmä kasvattaa

vierintävastusta, mikä tekee Suomen olosuhteista haastavia ja samalla ideaalisen tutkimusalustan sähköisen raskaan liikenteen energiatehokkuuden analysoinnille.

3 Sähköisen ajoneuvon energiankulutuksen fysikaaliset taustatekijät

Tässä luvussa kuvataan keskeiset fysikaaliset tekijät, joiden kautta ajoneuvon energiankulutus määräytyy. Perustana on ajovastusten erottelu, jonka avulla voidaan myöhemmin arvioida, mitkä tekijät selittävät empiirisesti havaittua kulutusvaihtelua tuloksissa.

Sähköisen raskaan ajoneuvon energiankulutus määräytyy pääasiassa ajon aikaisista vastusvoimista sekä ajoneuvon kokonaismassasta. Päävastuskomponentit voidaan jakaa neljään luokkaan:

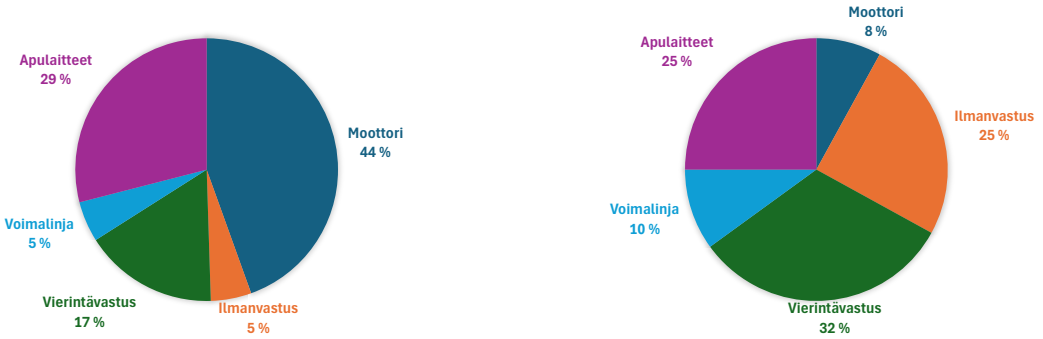
$$P_{\text{tot}} = P_{\text{rr}} + P_{\text{aero}} + P_{\text{grade}} + P_{\text{aux}}, \tag{1}$$

missä P_{rr} kuvaa vierintävastusta, P_{aero} aerodynaamista vastusta, P_{grade} kaltevuuden ja massan aiheuttamaa potentiaalista sekä inertiaalista tehoa, ja P_{aux} ajoneuvon apulaitteiden (lämmitys, ohjaus, ilmakompressorit, elektroniikka, voiman ulosotto) kulutusta (McAuliffe & Chuang, 2017).

3.1 Ajoneuvon energiahäviöiden jakauma

Sähköisten ja polttomoottorikäyttöisten ajoneuvojen energiankäyttöä voidaan havainnollistaa jakamalla kokonaisenergiankulutus eri komponentteihin. Kirjallisuudessa on esitetty useita energiabudjetteja sekä henkilöautoille että raskaalle kalustolle; kuitenkin raskaan täyssähkökaluston osalta vastaavia mitattuja jakaumia on toistaiseksi niukasti saatavilla. Skenaarioiden tarkoituksena on havainnollistaa, miten ajoneuvojen energiankulutukseen vaikuttavien komponenttien suhteellinen merkitys muuttuu ajoneuvoluokan ja käyttövoimaratkaisun mukaan. Näin voidaan vertailla polttomoottori- ja sähköajoneuvojen häviöjakaumia sekä kevyessä että raskaassa kalustossa. Hyödynnetään neljää vertailuskenaariota: henkilöauto polttomoottorilla, henkilöauto täyssähköisenä, raskas dieselkäyttöinen ajoneuvo sekä raskas täyssähköinen ajoneuvo. Henkilöauton polttomoottoriversion ja täyssähköisen jakautumat perustuvat Malikin ym. (Malik et al., 2025) tribologiseen analyysiin, jossa energiavirrat on jaettu moottorin ja voimalinjan häviöihin, vierintävastukseen, ilmanvastukseen sekä apulaitteiden kulutukseen. Raskaalle dieselkalustolle energiabudjetti muodostettiin Nylundin (Nylund, 2013) esittämien pitkän matkan raskaan liikenteen energiatehokkuuksia koskevien koosteiden perusteella. Raskaan sähköisen yhdistelmän osalta kirjallisuudesta ei löytynyt suoraa vastaavaa jakaumaa, joten se johdettiin suhteuttamalla Nylundin raskaan dieselajoneuvon ajovastusjakaumaa Malikin ym. sähköhenkilöauton voimalinja- ja apulaitehä-

viöihin. Oletuksena on, että raskaan täyssähköisen yhdistelmän aerodynaamiset ja vierintävastukset vastaavat diesel-yhdistelmän arvoja, kun taas sähkömoottorin ja tehoelektroniikan häviöt pysyvät samassa suuruusluokassa kuin henkilöauton täyssähköisessä versiossa, ja apulaitteiden suhteellinen osuus on vastaavasti hieman suurempi raskaan kaluston lisäkuormien vuoksi. Kaikki neljä jakaumaa on normalisoitu siten, että ne kuvaavat sadan prosentin osuutta ajoneuvoon syötetystä kemiallisesta tai sähköisestä energiasta.



(a) Henkilöauto polttomoottorilla.

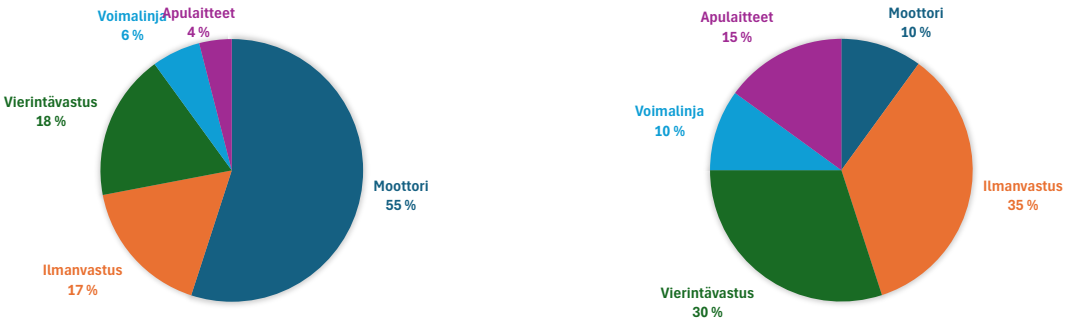
(b) Henkilöauto täyssähköisenä.

Kuva 1: Henkilöauton energiankäytön ja häviöiden jakauma polttomoottori- ja täyssähköisessä käyttövoimassa (Malik et al., 2025). Kokonaisenergiankulutus on henkilöauton polttomoottoriversiolla tyypillisesti 50–70 kWh/100 km ja täyssähköisellä 15–20 kWh/100 km.

Esitetyt energiabudjetit kuvaavat ajoneuvoon syötetyn kokonaisenergian jakautumista eri komponentteihin. Henkilöauton polttomoottorikäytössä tämä kokonaisenergia vastaa polttoaineen kemiallista energiaa, jonka kulutus maantieajossa on noin 50–70 kWh/100 km. Henkilöauton polttomoottorikäytössä kokonaisenergiankulutus vastaa tyypillisesti noin 5–7 litran dieselkulutusta 100 kilometriä kohden, mikä vastaa kemiallisena energiana noin 50–70 kWh/100 km. Täyssähköisen henkilöauton kokonaiskulutus on puolestaan noin 15–20 kWh/100 km. Raskaalla kalustolla polttomoottoriyhdistelmän polttoaineenkulutus vastaa tyypillisesti noin 340–435 kWh/100 km: tämä sisältää moottorin lämpöhäviöt, voimalinjan mekaaniset häviöt sekä ajovastusten voittamiseen käytetyn energian. Raskaalla dieselkäyttöisellä yhdistelmällä polttoaineenkulutus on tyypillisesti 35–45 l/100 km, mikä vastaa noin 340–435 kWh/100 km kemiallista energiaa. Sähköisen raskaan yhdistelmän kokonaisenergiankulutus on havaintojen mukaan noin 110–150 kWh/100 km riippuen kuormasta ja sääolosuhteista. Moottorin osuus näissä jakaumissa tarkoittaa polttomoottorilla kokonaisuutta, joka sisältää sekä termodynaamiset lämpöhäviöt että mekaaniset voimalinjan sisäiset häviöt. Toisin sanoen moottorin "kulutus"ei ole auton etenemiseen käytettävää energiaa, vaan sitä osaa polttoaineen kemiallisesta energiasta, joka ei muutu hyötytyöksi. Tämä on yhtenevä polttomoottorin hyötysuhteen kanssa, joka on vakionopeusajossa tyypillisesti 30–40 %. Siten moottorin häviöiksi merkitty osuus energiabudjetissa sisältää jo tämän hyötysuhteen ylikompensaation. Sähköajoneuvojen tapauksessa moottorin ja tehoelektroniikan häviöt ovat

vastaavasti huomattavasti pienempiä (luokkaa muutamia prosentteja), minkä vuoksi energiankäyttö painottuu voimakkaammin vierintä- ja aerodynaamisten vastusten voittamiseen.

Kuvasta 1 nähdään, että henkilöauton polttomoottorikäytössä suurin osa polttoaineen energiasta kuluu moottorin ja apulaitteiden lämpöhäviöihin, kun taas varsinaiset ajovastukset (vierintä- ja ilmanvastus) muodostavat vain noin kolmanneksen kokonaishäviöistä. Täyssähköisessä henkilöautossa tilanne muuttuu olennaisesti: moottorin ja voimalinjan häviöt vähenevät merkittävästi, ja energian käyttö keskittyy ajovastuksiin. Tämä havainnollistaa, että sähköajoneuvojen energiatehokkuuden kannalta keskeisiä tekijöitä ovat renkaat, aerodynamiikka ja ajoprofiili, kun taas voimalinjan häviöihin voidaan vaikuttaa suhteellisesti vähemmän.



(a) Dieseliä käyttövoimanaan käyttävä raskas ajoneuvoyhdistelmä.

(b) Raskas täyssähköinen kuormaautoyhdistelmä.

Kuva 2: Sähköisen raskaan ajoneuvoyhdistelmän energiankäytön ja häviöiden jakauma. Dieselajoneuvon kokonaisenergiankulutus vastaa noin 35–45 litran kulutusta 100 kilometrillä (340–435 kWh/100 km). Dieselajoneuvon jakauma perustuu Nylundin (Nylund, 2013) esittämiin energiatehokkuuslukuihin. Täyssähköisen yhdistelmän jakauma on johdettu suhteuttamalla dieselajoneuvon ajovastusjakaumaa (Malik et al., 2025).

Raskaiden ajoneuvojen tapauksessa (kuva 2) ajovastusten merkitys korostuu entisestään. Dieselkäyttöisessä yhdistelmässä moottorin häviöt ovat yhä hallitsevia, mutta vierintävastus ja ilmanvastus muodostavat merkittävän osuuden kokonaisenergiasta. Täyssähköisessä yhdistelmässä moottorin ja voimalinjan häviöt oletetaan henkilöautojen sähköajoneuvotuloksiin nojaten selvästi pienemmiksi, jolloin energian käytöstä yhä suurempi osa kohdistuu vierintä- ja aerodynaamisten vastusten voittamiseen. Tämä vertailu tukee oletusta, että sähköisessä raskaassa liikenteessä erityisesti vierintävastuksen, akselikuormien ja tienpinnan olosuhteiden kvantitatiivinen ymmärtäminen on keskeistä kokonaisenergiankulutuksen hallinnassa. Se luo perustan tämän työn myöhemmälle analyysille, jossa tarkastellaan näiden tekijöiden vaikutusta empiirisen telematiikkadatan avulla.

3.2 Vierintävastus

Vierintävastus on yksi raskaan ajoneuvon keskeisimmistä energiankulutuksen komponenteista maantieajossa, erityisesti maantienopeuksilla ja suurilla kokonaismassoilla. VTT:n (VTT Technical Research Centre of Finland) HCT-yhdistelmille tekemissä simulointi- ja kenttämittauksissa vierintävastuksen osuus ajoneuvon liikkeelle vastustavista voimista on ollut noin 55–70 % nopeusalueella 60–70 km/h, kun tarkastellaan vierintävastuksen ja ilmanvastuksen keskinäistä suhdetta (Sauna-aho et al., 2018a). Dieselkäyttöisen raskaan ajoneuvon kokonaisenergiankulutuksessa, johon sisältyvät myös aerodynamiikka, kaltevuus ja apulaitteet, vierintävastuksen osuus on kuitenkin tyypillisesti noin 25–35 % (Komnos et al., 2021; Continental Tires, 2024).

Tarvittava teho vierintävastuksen voittamiseen voidaan arvioida seuraavalla kaavalla:

$$P_{\mathrm{rr}} = C_{\mathrm{rr}}\, m\, g\, v, \tag{2}$$

missä C_{rr} on vierintävastuskerroin (tyypillisesti 0,0045–0,01 raskaan ajoneuvon renkailla), m ajoneuvon kokonaismassa, g maan vetovoiman kiihtyvyys ($9,81\ \mathrm{m/s^2}$) ja v ajonopeus. Vierintävastus kasvaa lineaarisesti ajoneuvon massan mukaan, mutta sen riippuvuus nopeudesta on vähäinen verrattuna muihin ajovastuksiin (Guiggiani, 2003). Sen sijaan vierintävastuskerroin C_{rr} riippuu merkittävästi renkaan lämpötilasta ja tien pinnan ominaisuuksista. Kylmät olosuhteet, karkea pinta tai märkyys lisäävät renkaan hysteresis-häviöitä ja kasvattavat C_{rr}-arvoa (Guiggiani, 2003). Koska P_{rr} skaalautuu suoraan akselikohtaisen kuormituksen mukaan, myös kuorman epätasainen jakautuminen yhdistelmän akseleille voi lisätä vierintähäviöitä useita prosentteja. Tästä syystä kuormasijoittelu ja akselipainojen hallinta muodostavat käytännön tason keinon energiankulutuksen optimointiin, ja niihin palataan työn tulososiossa.

Rengastusten ja akselien määrä vaikuttaa merkittävästi raskaan ajoneuvon vierintävastukseen, sillä jokainen akseli lisää renkaiden kosketuspinta-alaa ja siten myös vierintähäviöiden kokonaispinta-alaa. Moniakselisissa ajoneuvoissa vierintävastus kasvaa akselien lukumäärän ja kuormitusasteen myötä lähes lineaarisesti, vaikka yksittäisen renkaan kuormitus vähenee. Tämä vähentää renkaan ja tien välisen kosketuspinnan jännitystä sekä renkaan materiaalin sisäistä muodonmuutosenergiaa. Kun kumiseos deformoituu vähemmän jokaisella pyörähdyksellä, hystereesihäviöt pienenevät, mikä alentaa vierintävastusta ja parantaa energiatehokkuutta (Komnos et al., 2021).

Rengastyypillä on merkittävä vaikutus raskaan ajoneuvon vierintävastukseen. Leveät yksittäisrenkaat tuottavat yleensä pienemmän vierintävastuksen kuin vastaavat paripyöräratkaisut.

Tämä johtuu ennen kaikkea rakenteellisista eroista: yksittäisrenkaassa on vain yksi sivuseinä, kun taas paripyörissä niitä on kaksi. Yksi sivuseinä merkitsee rakenteellisesti jäykempää rengasta, joka muuttuu vähemmän kuormituksen alla. Deformaatiolla tarkoitetaan renkaan muodon muuttumista, kun se joutuu kosketuksiin tienpinnan kanssa ja litistyy kuormituksen aiheuttamana. Tämä muodonmuutos on väistämätöntä, mutta sen suuruus vaikuttaa siihen, kuinka paljon mekaanista energiaa renkaan rakenne joutuu varastoimaan ja vapauttamaan jokaisella pyörähdyksellä. Hystereesihäviö puolestaan viittaa siihen, että kumimateriaalin muodonmuutos ei ole täysin palautuva. Kun rengas litistyy ja palaa muotoonsa, osa energiasta ei palaudu liike-energiaksi, vaan muuttuu lämmöksi renkaan sisällä. Mitä enemmän rengas joustaa ja taipuu, sitä suuremmat ovat nämä energiahäviöt. Kun renkaan muodonmuutokset (deformaatiot) pienenevät ja kumimateriaalin sisäiset hystereesihäviöt vähenevät, myös vierintävastus pienenee. Tämän seurauksena ajoneuvon energiatehokkuus paranee ja polttoaineenkulutus vähenee. Tutkimusten mukaan leveät yksittäisrenkaat voivat vähentää vierintävastusta ja polttoaineenkulutusta tyypillisesti noin viidestä yhdeksään prosenttiin verrattuna perinteisiin paripyöriin (Curry et al., 2012). Vaikka paripyörät tarjoavat parempaa kantavuutta ja ajovakautta, niiden välinen ilmanvirtaus sekä epätasainen kuormitus sisä- ja ulkorenkaan välillä lisäävät vierintävastusta. Lisäksi vetävien ja vapaasti pyörivien akseleiden välillä on huomattavia eroja. Voimansiirron momenttivälitykset ja renkaan elastinen muodonmuutos johtavat tyypillisesti vetävien akselien vierintävastuksen kasvuun viidestä kymmeneen prosenttiin (Komnos et al., 2021).

Tien pinnan olosuhteet, erityisesti vesi, lumi ja jää, voivat merkittävästi kasvattaa vierintävastusta. Jo ohut (0,3–0,8 mm) vesikalvo voi lisätä vierintävastuskerrointa 30–40 % kuivaan pintaan verrattuna nopeuksilla 50–80 km/h (Carlson & Vieira, 2021b). Lumen vaikutus riippuu sen tiheydestä ja paksuudesta: löyhä uusi lumi ($\rho \approx 150$ kg/m^3) voi kaksin- tai kolminkertaistaa vierintävastuksen, kun taas tiivis tai osittain jäinen lumi aiheuttaa pienemmän, mutta edelleen merkittävän lisäyksen. Jäätyneellä pinnalla lämpötila- ja kitkavaikutukset lisäävät myös renkaan sisäisiä energiahäviöitä. Näin ollen sekä renkaiden rakenteelliset ominaisuudet että tieolosuhteet muodostavat keskeisen epävarmuustekijän sähköisten kuorma-autojen energiankulutuksen vaihtelulle talviolosuhteissa.

3.3 Ilmanvastus

Ajoneuvon aerodynaaminen vastus aiheutuu ilman ja ajoneuvon välisestä suhteellisesta liikkeestä. Tämä vastus kasvaa jyrkästi nopeuden myötä ja muodostaa merkittävän osan energiankulutuksesta, erityisesti maantieajossa. Aerodynaaminen tehontarve voidaan esittää seuraavasti:

$$P_{\text{aero}} = \tfrac{1}{2}\rho C_{\text{d}} A v^3, \tag{3}$$

missä ρ on ilman tiheys (kg/m^3), C_{d} on ilmanvastuskerroin (yksikötön) ja A otsapinta-ala (m^2). Raskailla ajoneuvoilla $C_{\text{d}}A$ on tyypillisesti 8–10 m^2 (Khosravi et al., 2015). Koska aerodynaamisen vastuksen nopeusriippuvuus kasvaa kolmannen potenssin mukaan, aerodynamiikka on merkittävä erityisesti yli 80 km/h nopeuksilla, jolloin sen osuus voi nousta jopa 40–50 % kokonaisvastuksesta. Ilmanvastukseen vaikuttaa myös ilman tiheys, joka riippuu lämpötilasta ja ilmanpaineesta ideaalikaasun lain mukaisesti ($\rho = p/RT$). Kylmä ilma on lämpimämpää ilmaa tiheämpää, koska sen lämpötila T on alhaisempi samalla paineella p. Tämän seurauksena ilmanvastus kasvaa kylmissä olosuhteissa, sillä aerodynaaminen voima on suoraan verrannollinen ilman tiheyteen ($F_{\text{aero}} \propto \rho v^2$). Esimerkiksi ilman tiheyden kasvu 15 % talvilämpötiloissa (noin $-10\,^{\circ}\text{C}$) verrattuna kesäolosuhteisiin (noin $20\,^{\circ}\text{C}$) lisää vastaavasti ajoneuvon aerodynaamista tehontarvetta samassa suhteessa. Tämä vaikutus on erityisen merkittävä maantieajossa, jossa ilmanvastus muodostaa merkittävän osan kokonaisenergiankulutuksesta. Siten myös lämpötilan vaihtelu vuodenajan mukaan voi selittää osan sähköisten sekä polttomoottorikäyttöisten raskaiden ajoneuvojen kulutusvaihteluista talvi- ja kesäolosuhteissa.

Ajoneuvoyhdistelmän päällirakenteen muodolla on keskeinen vaikutus ilmanvastukseen. Esimerkiksi virtaviivainen säiliö- tai umpikori aiheuttaa huomattavasti pienemmän vastuksen kuin kulmikas pressukapellirakenne, jossa terävät reunat ja kuormatilan epätasaisuudet lisäävät virtauksen irtoamista sekä pyörteiden syntyä ajoneuvon takaosassa. Erilaisilla katto- ja sivuohjaimilla, peräkatteilla sekä virtaviivaisilla päällirakenteilla voidaan vähentää ilman irtoamista rungosta ja pienentää ilmanvastuskerrointa useita kymmeniä prosentteja verrattuna perusrakenteeseen (Khosravi et al., 2015).

Sivutuulen ja ajoneuvon kohtauskulman vaikutukset suhteessa tuuleen muuttavat tehokasta otsapinta-alaa ja voivat siten merkittävästi lisätä ilmanvastusta. Kenttämittausten mukaan jo lievä sivutuuli voi merkittävästi lisätä ajoneuvon aerodynaamista vastusta. Esimerkiksi kuuden asteen sivutuuli muuttaa ajoneuvoon kohdistuvan suhteellisen ilmavirran suuntaa siten, että ilmanvastus kasvaa ja ajoneuvon ylläpitämiseen tarvittava vetopyörille välittyvä teho voi nousta yli 10 %. Tämä vastaa muutosta noin $\Delta(C_{\text{d}}A) \approx 3\ \text{m}^2$ raskaalla vetoautolla (Komnos et al., 2021).

Sivutuulen vaikutus korostuu erityisesti suurikokoisilla ajoneuvoilla ja moottoritienopeuksilla, joissa ajoneuvon laaja sivupinta-ala altistuu vinosti tulevalle ilmavirralle. Vastatuuli kasvattaa ilman suhteellista virtausnopeutta ja lisää ilmanvastusta kolmannen potenssin suhtees-

sa tuulen ja ajoneuvon nopeuksien summautuvaan vaikutukseen. Suhteellinen virtausnopeus määritellään seuraavasti:

$$v_{\text{rel}} = v_{\text{veh}} + v_{\text{wind}}, \tag{4}$$

missä v_{rel} on ilman ja ajoneuvon välinen suhteellinen virtausnopeus, v_{veh} ajoneuvon nopeus ja v_{wind} ajoneuvon kulkusuuntaan vaikuttava tuulen nopeus. Vastatuuli kasvattaa v_{rel}:n arvoa, mikä johtaa merkittävästi suurempaan aerodynaamiseen vastukseen maantienopeuksissa. Myötätuuli puolestaan pienentää aerodynaamista tehoa, koska suhteellinen nopeus pienenee $(v_{\text{rel}} = v - v_{\text{wind}})$, minkä seurauksena kokonaisenergiankulutus voi laskea useita prosentteja tasaisessa myötätuulessa. Ajoneuvon kylkeen kohdistuva tuuli (90°) ei olennaisesti muuta etusuuntaista virtausnopeutta, mutta se kasvattaa ajoneuvoon kohdistuvaa sivuvoimaa ja voi lisätä renkaiden vierintävastusta sekä ajonvakauden hallinnan energiankulutusta (Komnos et al., 2021; Khosravi et al., 2015). Näin ollen sekä tuulen nopeus että suunta vaikuttavat sähköisten ja muiden käyttövoimien avulla liikkuvien raskaitten ajoneuvojen aerodynaamiseen energiankulutukseen, erityisesti avoimilla maastoalueilla ja korkeilla ajonopeuksilla.

3.4 Tien kaltevuuden ja massan hitauden vaikutus

Ajoneuvon liike-energiaan ja potentiaalienergiaan liittyvät tehot muodostavat niin sanotun kaltevuus- ja hitauskomponentin. Tämä osuus kuvaa kuinka paljon tehoa tarvitaan ylämäkeen nousemiseen tai kiihdyttämiseen sekä vastaavasti, kuinka paljon energiaa voidaan palauttaa alamäissä ja hidastuksissa. Kaltevuuden ja kiihtyvyyden vaatima teho voidaan esittää muodossa:

$$P_{\text{grade}} = mgv\sin\theta + mav, \tag{5}$$

missä m on ajoneuvon kokonaismassa (kg), g putoamiskiihtyvyys (9,81 m/s^2), v ajonopeus (m/s), θ tien kaltevuuskulma (rad), ja a ajoneuvon kiihtyvyys (m/s^2). Kaltevuuden vaikutus korostuu erityisesti pitkillä mäkisillä reiteillä, joissa tämä komponentti voi hallita hetkellistä energiankulutusta. Osa tästä energiasta voidaan palauttaa jarrutusenergian talteenoton avulla. Hyötysuhde η_{regen} vaikuttaa ainoastaan siihen, kuinka suuri osuus hidastusvaiheessa vapautuvasta energiasta voidaan palauttaa akkuun. Kirjallisuuden perusteella raskaissa sähköajoneuvoissa regeneratiivisen jarrutuksen avulla voidaan tyypillisesti palauttaa kymmeniä prosentteja jarrutuksissa syntyvästä mekaanisesta energiasta ajosyklin ja olosuhteiden (nopeusprofiili, akun lämpötila, varaustila) mukaan, tyypillisesti noin 30–60 %. Tarkkaa hyötysuhdetta ei voida yleistää kaikkiin yhdistelmätyyppeihin, mutta suuruusluokka on selvästi merkittävä energiankulutuksen kannalta (Lee et al., 2024).

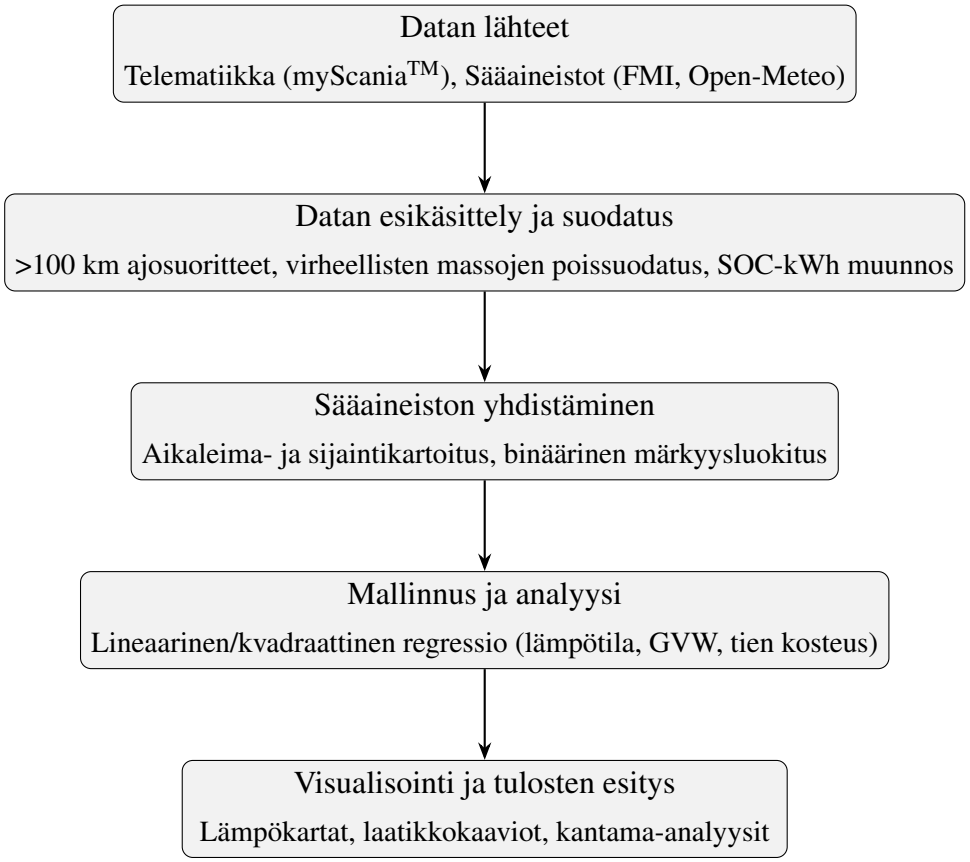
3.5 Apulaitteiden kuluttama teho

Apulaiteteho P_{aux} viittaa kaikkiin ajoneuvon järjestelmiin, jotka kuluttavat sähkötehoa, mutta eivät osallistu suoraan vetotyöhön. Tällaisia järjestelmiä ovat muun muassa lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät, paineilmakompressorit, hydrauliikka, ohjaustehostin, valaistus sekä tietojärjestelmät. Lisäksi akuston ja voimansiirron lämpöhallinta kuuluu tämän kategorian piiriin (Lajunen, Yang & Emadi, 2020).

Talviolosuhteissa ohjaamon ja akuston lämmitys muodostaa suurimman yksittäisen apukuorman, kun henkilöautojen lämmitystehon tarve on noin 5–7 kW ulkolämpötilan ollessa $-10\,^{\circ}\text{C}$ (Lajunen, Yang & Emadi, 2020). Vastaava teholuokka pätee myös raskaille ajoneuvoille, koska ohjaamon sisätilavuus ja lämpöhäviöiden suuruusluokka ovat samankaltaisia. Vaikka raskaan ajoneuvon akuston kapasiteetti on moninkertainen verrattuna henkilöautoon, ohjaamon ja akuston lämmityksen tarvitsema teho ei kasva samassa suhteessa ajoneuvon massan tai akuston koon kanssa. Tämän vuoksi lämmityksen osuus kokonaisenergiankulutuksesta korostuu erityisesti lyhyillä matkoilla ja matalanopeuksisissa ajojaksoissa, joissa ajovastusten osuus on pienempi ja apulaitteiden kuluttama energia muodostaa suuremman suhteellisen osuuden.

4 Tiedonkeruun ja -käsittelyn menetelmät

Tässä luvussa esitellään tutkimuksessa hyödynnetyt menetelmät, aineistot ja datan käsittelyvaiheet. Tutkimus etenee telematiikkadatan keruusta ja esikäsittelystä sääaineiston yhdistämiseen, energiankulutuksen mallinnukseen sekä tulosten tuottamiseen tarvittaviin laskentoihin ja visualisointeihin. Kuvassa 3 on esitetty tutkimuksen menetelmäkehikko, joka havainnollistaa aineiston käsittelyn ja laskentaprosessin päävaiheet. Menetelmät on suunniteltu vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin (TK1–TK4) ja tuottamaan pohjan myöhemmässä luvussa esitettävälle tulosten tarkastelulle.



Kuva 3: Tutkimuksen menetelmäkehikko

Lämpötilan, kokonaismassan, vierintävastuksen ja sääolosuhteiden vaikutuksia kuvataan fysikaalisiin ajovastusmalleihin perustuvien laskentojen avulla sekä hyödyntämällä telematiikkadatasta johdettuja tilastollisia jakaumia ja lämpökarttoja. Operatiivisten muuttujien, kuten kuormasijoittelun ja ajonopeuden, tarkastelu perustuu kuvaileviin tilastollisiin menetelmiin ja korrelaatiotarkasteluihin, joiden avulla muodostuu ymmärrys siitä, miten nämä tekijät voidaan ottaa huomioon energiankulutuksen arvioinnissa. Luvussa esitetyt menetelmät muodostavat perustan tulosluvussa tehtäville johtopäätöksille sekä kulutuksen vaihtelua selittävien tekijöiden arvioinnille. Menetelmä perustuu sekä tutkimukseen että havaintoihin:

telematiikka- ja säädataa käytetään kuvaamaan todellista ajoneuvon käyttäytymistä, ja näitä havaintoja verrataan fysikaalisiin malleihin, jotka selittävät, miksi kulutus muuttuu eri olosuhteissa. Tämä mahdollistaa havaittujen energiankulutustrendien selittämisen fysikaalisilla ilmiöillä, kuten vierintävastuksen muutoksilla eri lämpötila- ja märkyysluokissa.

4.1 Ajoneuvoyhdistelmä ja käyttöympäristö

Tutkimuksessa käytetty ajoneuvo on raskaan sarjan täyssähköinen täysperävaunuyhdistelmä, Scania 40R E B6x2, joka toimii kaupallisessa kuljetusliikenteessä Lounais-Suomen ja Etelä-Ruotsin välillä. Ajoneuvosta kerättiin dataa 11 kuukauden ajalta, lokakuusta 2024 heinäkuuhun 2025, kattaen tyypilliset Pohjoismaiden talviolosuhteet. Ajoalue käsitti sekä rannikkoettä sisämaan maantieverkkoa ja sisälsi sekä Suomi–Ruotsi-välisiä kuljetuksia että alueellisia kuljetusreittejä. Yhdistelmä koostuu sähköisestä vetoautosta ja dollysta, eli kaksipyöräisestä vetolaitevaunusta, johon on kytketty täysperävaunu, jonka kuormatila on pressukapellirakenteinen. Vetoauto kuului ajoneuvoluokkaan N3, joka kattaa yli 12 t kokonaismassaiset kuorma-autot, ja perävaunu luokkaan O4, joka kattaa yli 10 t kokonaismassaiset perävaunut. Yhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa on 68 t, mikä vastaa tavanomaista Suomessa ja Ruotsissa käytettävää täysperävaunuyhdistelmää. Vetoauto oli 6×2-konfiguraatiolla varustettu kolmiakselinen ajoneuvo, jossa kolmas akseli, eli teliakseli, on nostettavissa. Nousutelin avulla voitiin keventää telipainoa tai vähentää vierintävastusta kevyemmillä kuormilla edellyttäen, että akselipainot eivät ylity. Teliakselin nostaminen muuttaa ajoneuvon akselipainojen jakautumista siten, että vetävälle akselille kohdistuva normaalivoima lisääntyy. Datassa on jaoteltuna vetoauton akselimassat ensimmäisestä kolmanteen akseliin. Jos kolmannen akselin akselimassa on nolla, akseli on ollut nostettuna. Kuormaamattomana akseli on tyypillisesti ylhäällä, ja kuormattuna alhaalla, jos ajoneuvon toisen akselin kantavuus ylittyy. Tämä parantaa vetopitoa erityisesti liukkaissa tai lumisissa olosuhteissa, koska vetävän akselin ja tienpinnan välinen kitkavoima kasvaa kuormituksen myötä.

Yhdistelmän omamassat ovat seuraavat: vetoauton omamassa 16,3 t, välivaunun omamassa 2,2 t ja kapellirakenteisen puoliperävaunun omamassa 5,88 t. Näin ollen yhdistelmän kokonaisomamassa on noin 24,4 t, mikä määrittää ajosuoritteiden minimikokonaismassan ja vaikuttaa erityisesti tyhjän ja kevyesti kuormitetun ajon energiankulutukseen. Perävaunussa on yhteensä viisi akselia, jolloin koko yhdistelmän akselilukumäärä on yhteensä kahdeksan. Ajoneuvoyhdistelmä on varustettu yksittäispyörillä kaikilla ei-vetävillä akseleilla, kun taas vetävä akseli on varustettu paripyörillä varmistaakseen vetovoiman ja kuormankeston. Tällainen yhdistelmä vastaa rakenteeltaan tyypillistä 68 tonnin täysperävaunuyhdistelmää, jota käytetään laajalti Suomen sekä Ruotsin runko- ja jakeluliikenteessä. Scania 40R E -ajoneuvo on varustettu 624 kWh:n nimelliskapasiteetin akustolla, josta 468 kWh on käytettävissä ajon aikana (varauksen tila 7–82 %). Sähkömoottorin jatkuva teho on 410 kW, ja suurin DC-

latausteho on 375 kW (CCS Type 2). Ajoneuvon akseliväli on 4750 mm, ja ohjaamotyyppi on CR20H. Valmistajan ilmoittama toimintamatka ihanneolosuhteissa on noin 350 km 40 tonnin kokonaismassalla ja 250 km 64 tonnin kokonaismassalla Scania, 2025. Ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa (GVW) on 68 t, ja tutkimuksessa havaittu kuormitus vaihteli noin 24–64 tonnin välillä.

Ajot tapahtuivat pääasiassa maantie- ja valtatieolosuhteissa, tyypillisesti pitkän matkan kuljetuksina, joissa kuorma-auton nopeus ja kuormitus pysyivät vakioina. Ajoneuvo liikkuu sekä tyhjänä että täydessä kuormassa, mikä mahdollistaa ajoneuvon massan vaikutuksen huomioimisen energiamallinnuksessa. Ajoneuvo toimi testijakson aikana vaihtelevissa sääolosuhteissa, joissa lämpötila vaihteli noin -10–$25\,^{\circ}\mathrm{C}$. Käyttöolosuhteet kattoivat kuivia, märkiä, lumisia ja loskaisia teitä, jotka heijastavat aitoja talviolosuhteita Pohjoismaissa. Näin saatu aineisto kattoi laajasti sekä tyhjän että kuormitetun ajon, ja sitä hyödynnettiin ajoneuvon energiankulutuksen mallintamisessa erilaisissa ajo-olosuhteissa. Ajoneuvon nostoteli ja kahdeksan akselia mahdollistivat erilaisten kuormanjakoskenaarioiden syntymisen käytännön ajossa, mikä tekee aineistosta erityisen arvokkaan vierintävastuksen ja akselipainojen vaikutuksen arvioimiseksi. Näin ollen yhdistelmän akselistoa voidaan pitää kokeellisena alustana kuormasijoittelun vaikutuksen tarkastelulle energiankulutuksen suhteen.

4.2 Aineisto ja suodatukset

Tutkimuksen aineisto koostuu ajoneuvovalmistaja Scanian myScania$^{\mathrm{TM}}$ -telematiikkajärjestelmän tuottamasta ajoneuvodatan aikajaksosta, joka kattaa ajoneuvon toiminnan ajanjaksolla lokakuusta 2024 heinäkuuhun 2025. Järjestelmä kerää reaaliaikaista tietoa ajoneuvon ohjausyksiköistä pilvipalveluun, josta tiedot ladattiin tutkimuskäyttöön. Mittausresoluutio on yksi minuutti, mikä mahdollistaa ajoneuvon energiatehokkuuden ja kuormitusvaihteluiden tarkastelun lähes reaaliaikaisesti. Keskeiset muuttujat ovat aikaleima, ajettu matka (odometri), akun varaustila (state of charge, SOC) muutettuna kilowattitunneiksi, moottorin toimintatila (käynnissä tai sammutettu), ajoneuvon sijainti (maa ja lähin kaupunki) sekä massadata, joka käsittää kokonaismassan (gross vehicle weight, GVW), vetoauton painon ja täysperävaunun painon. Lisäksi aineisto yhdistettiin säämuuttujiin (lämpötila, tuuli ja sademäärä) tunnin resoluutiolla. Analyysiin hyväksyttiin ainoastaan yli 100 km pituiset ajosuoritteet, joiden keskinopeus ylitti 65 km/h. Tämä rajaus toteutettiin, jotta aineisto kuvaisi mahdollisimman tarkasti pitkän matkan ja maantieajon olosuhteita. Lyhyet terminaalisiirrot, pysähdykset ja taajamaliikenne jätettiin analyysin ulkopuolelle, koska näissä olosuhteissa ajonopeudet ja kulutustasot vaihtelevat voimakkaasti kuljettajan ajotavan ja liikennevirran mukaan. Maantieajossa ajonopeus ja kuormitus pysyvät huomattavasti tasaisempina, ja kuljettajat hyödyntävät useammin vakionopeudensäädintä, mikä vähentää ajotapaan liittyvää vaihtelua. Tämän vuoksi maantiesuorite tarjoaa luotettavamman perustan energiankulutuksen mallinnukselle

ja eri muuttujien vaikutusten vertailukelpoiseen arviointiin.

Massadata suodatettiin poistamalla epärealistiset arvot, kuten selvästi liian suuret tai pienet painot, jotka eivät vastanneet ajoneuvojen teknisiä rajoja. Nämä virheet johtuvat pääasiassa ilmajousituksen paineantureiden mittausvirheistä, jotka voivat vääristyä esimerkiksi rungolle kertyneen lumen tai jään seurauksena. Pelkästään runkoon kertynyt lumi ja jää voivat nostaa yhdistelmän massaa jopa kolme tonnia (Anttila et al., 2023). Lisäksi poistettiin havainnot, joissa SOC-muutos ei vastannut mitattua ajomatkaa, kuten datakatkokset tai latauspysähdykset. Näiden suodatusten seurauksena analyysi painottuu maantiepainotteiseen, pitkän matkan ajoon, jossa ajoneuvo liikkuu vakionopeudella ja kohtaa laajan skaalan lämpötila- ja sadesääolosuhteita. Taajamien ja äärimmäisten säätilojen, kuten rankkasateiden tai yli $-20\,^{\circ}\mathrm{C}$ pakkasten, osuus jäi vähäiseksi; tämä paransi datan vertailukelpoisuutta, mutta rajoittaa tulosten yleistettävyyttä kaikkein poikkeuksellisimmissa olosuhteissa. Suodatettu aineisto kattaa laajasti sähköisten raskaan ajoneuvon tyypilliset toimintaympäristöt Pohjoismaissa ja tarjoaa riittävän perustan energiamallien kalibroinnille ja vertailulle. Rajaukset ja suodatukset mahdollistivat vertailukelpoisen aineiston muodostamisen, jossa satunnaiset virhelähteet (antureiden lämpötilariippuvuus, rungon jääkuorma) eivät hallitse mallinnustuloksia. Tämä varmistaa mallien sisäisen validiteetin ja mahdollistaa menetelmien toistettavuuden vastaavissa kenttäolosuhteissa.

4.3 Sääaineistot ja yhdistäminen reittiin

Ajoneuvon telematiikka-aineisto yhdistettiin säähavaintoihin tuntikohtaisella resoluutiolla, jotta ympäristöolosuhteiden vaikutus energiankulutukseen voidaan arvioida mahdollisimman tarkasti. Suomen osalta lämpötila- ja sademäärätiedot haettiin Ilmatieteen laitoksen avoimen datan rajapinnasta (Finnish Meteorological Institute, 2025), joka perustuu laajaan kansalliseen havaintoasemaverkostoon. Ruotsin puolella vastaavat tiedot kerättiin Open-Meteo-rajapinnan kautta (Open-Meteo, 2025). Tämä hyödyntää numeerisia säämalleja, tutka-, satelliitti- ja maa-asemahavaintoja sekä reanalyysidataa. Molemmat lähteet tuottavat tuntikohtaisia havaintoarvoja, mikä mahdollistaa yhtenäisen ja maantieteellisesti kattavan aineiston keräämisen.

Aineistot yhdistettiin ajoneuvon telematiikkatietoihin aikaleima- ja sijaintiperusteisesti siten, että jokaiselle havaintopisteelle etsittiin lähin sääasema. Mikäli ajoneuvo liikkuu usean tunnin tai eri alueiden läpi, säämuuttujat päivitetään dynaamisesti jokaisen uuden tuntihavainnon mukaan, jolloin sääprofiili vastaa tarkasti ajonaikaisia olosuhteita. Sateen vaikutusta arvioitiin käyttämällä binääristä märkyysluokitusta, jossa ajosuorite luokiteltiin kuivaksi, jos koko ajon aikana ei havaittu sadetta, ja märäksi, jos havaittiin minkä tahansa suuruista sadetta. Tämä luokittelutapa valittiin, koska se vähentää epävarmuutta sateen intensiivisyyden ja

paikallisen vaihtelun tulkinnassa sekä mahdollistaa yksiselitteisen erottelun kuivien ja märkäpintaisten ajotapahtumien välillä. Vaikka jatkuva sadeintensiteetti (mm/h) kuvaisi olosuhteita tarkemmin, havaintojen määrä eri sademääräluokissa on rajoitettu. Tämän luokituksen avulla pystyttiin tunnistamaan märän tienpinnan vaikutus ajovastuksiin ja energiankulutukseen. Luokiteltu märkyysmuuttuja toimii tässä tutkimuksessa empiirisenä approksimaationa vierintävastuskertoimen (C_{rr}) muutokselle, mikä mahdollistaa sääolosuhteiden kvantitatiivisen kytkemisen ajovastusmalliin ja energiankulutuksen regressioanalyysiin.

4.4 Datan mittaus ja laadunvarmistus

GVW määritettiin ajoneuvon oman ilmajousitusjärjestelmän antureiden perusteella. Järjestelmä arvioi ajoneuvon kuorman painon mittaamalla jousituksen paineet kunkin akselin kohdalla, ja tulos muunnetaan kokonaismassaksi ajoneuvon ohjausyksikön kalibrointimallin kautta. Kalibrointi suoritetaan valmistajan toimesta, ja se perustuu tunnettuun tyhjän ajoneuvon painoon sekä referenssikuormiin. Talviolosuhteissa mittaustarkkuuteen vaikuttaa useita virhelähteitä. Merkittävimpiä näistä ovat rungolle ja alustoille kertyvät lumi ja jää, jotka lisäävät ajoneuvon todellista kokonaismassaa riippumatta siitä, missä massa fyysisesti sijaitsee. Lumikuorma ei siten muuta ajoneuvon hyötykuormaa tavaratilassa, mutta se lisää ajoneuvon liikuttamiseen tarvittavaa massaa samalla tavalla kuin varsinainen lisäkuorma. Lisäksi rungon ja alustarakenteiden epätasainen jää- ja lumikerros voi lisätä ilmanvastusta ja vaikuttaa ajoneuvon aerodynaamiseen käyttäytymiseen. Lisäksi ilmajousituksen anturit voivat tuottaa ajonaikaista vaihtelua painon tai viiveen suhteen lämpötilan muuttuessa, erityisesti pitkäaikaisten seisonta-aikojen jälkeen. Myös epätasainen kuormanjako akselien välillä tai perävaunun kuormausvirheet voivat vaikuttaa yksittäisten poikkeamien esiintymiseen kokonaismassan arvioissa.

Laadunvarmistuksen jälkeen aineisto käsiteltiin sekä automaattisilla tarkistuksilla että visuaalisella tarkastelulla. Automaattinen tarkistus kattoi muun muassa puuttuvien arvojen, epärealististen massapiikkien, lämpötilamittausten odottamattomien hyppyjen sekä ajonopeuden äkillisten katkosten tunnistamisen. Tämän lisäksi datan aikajanoja tarkasteltiin visuaalisesti, jolloin voitiin varmistaa, että mittaussignaalit käyttäytyivät johdonmukaisesti eikä ajoneuvon myScania$^{\mathrm{TM}}$-järjestelmästä löytynyt merkkejä anturivioista tai tiedonsiirtokatkoksista. Tarkastelujaksolla ei havaittu epäjatkuvuuksia, jotka olisivat vaarantaneet analyysin luotettavuutta. Laadunvarmistetut massahavainnot ryhmiteltiin analyysivaiheessa 10 t:n välein muodostettuihin kokonaismassaluokkiin (esimerkiksi 20–30 t, 30–40 t, 40–50 t jne.). Tällainen massaluokittelu tasoittaa yksittäisten poikkeavien havaintojen vaikutusta ja parantaa tulosten tilastollista vakautta. Lisäksi luokittelu mahdollistaa energiankulutuksen vertailun eri kuormatasojen välillä selkeällä ja tilastollisesti vertailukelpoisella tavalla, mikä on tärkeää regressiomallien luotettavuuden kannalta. Lisäksi analyysissä tarkasteltiin kahta pääasiallista

operatiivista kuormitustilannetta: kuormitettua yhdistelmää (55–65 t) ja tyhjää tai lähes tyhjää yhdistelmää (24–26 t). Eri luokkia edustavat ajoneuvon tyypilliset käyttötilanteet todellisessa liikenteessä, joissa ajovastus ja energiankulutus poikkeavat merkittävästi toisistaan. Koska vierintävastus skaalautuu lähes lineaarisesti akselipainon kanssa (vrt. yhtälö 2), massadatan tarkkuus ja virheellisten havaintojen poistaminen ovat keskeisiä tutkimuksen luotettavuuden kannalta. Vierintävastuksen lineaarinen riippuvuus normaalivoimasta korostaa, että jopa pienet epätarkkuudet kokonaismassassa voivat heijastua merkittävästi energiankulutuksen mallinnukseen ja regressiotuloksiin. Tässä työssä painodatan validointi toimii perustana vierintävastusmallin kalibroinnille ja kuormasijoittelun vaikutusten arvioinnille.

SoC on telematiikka-aineistossa ilmoitettu prosenttiyksikön tarkkuudella. Energiankulutus laskettiin SOC-muutoksen perusteella yhtälöllä:

$$E = (E_{100} - E_0) \cdot \frac{\Delta\mathrm{SoC}}{100},$$

missä E_{100} ja E_0 kuvaavat akun energia-arvoa täydellä ja tyhjällä varaustilalla, ja ΔSoC on SoC:n muutos ajon aikana. Tarkasteltavassa ajoneuvossa akun energia vaihtelee välillä 43,68–511,82 kWh, jolloin käytettävissä oleva kapasiteetti on noin 468,14 kWh. Tällä kapasiteetilla yhden prosenttiyksikön SoC-muutos vastaa noin 4,68 kWh:n energiamäärää. Mittauksen epävarmuus yksittäisessä ajossa on siten enintään ±0,5 prosenttiyksikköä, mikä vastaa noin ±2,3 kWh. Pitkissä ajosuoritteissa, joissa akun varaustila muuttuu useita kymmeniä prosenttiyksiköitä, virhe keskiarvoittuu, ja sen vaikutus kokonaiskulutukseen jää tyypillisesti alle prosentin. Lyhyissä, alle 50 km pituisissa ajomatkoissa resoluutiosta johtuva virhe voi kuitenkin muodostaa merkittävän osuuden energiankulutuksen laskentavirheestä. Tämän vuoksi analyysiin sisällytettiin vain yli 100 km pituiset ajosegmentit, mikä vähentää SoC-resoluution aiheuttamaa epävarmuutta.

4.5 Toistettavuus, eettiset seikat ja tietosuoja

Tutkimuksen aineisto koostui kaupallisen ajoneuvon telematiikkajärjestelmästä kerätystä datasta. Tämän vuoksi tietosuoja ja eettiset näkökohdat otettiin huomioon kaikissa tutkimusvaiheissa. Datan käsittely ja analyysi toteutettiin siten, ettei yksittäistä ajoneuvoa, kuljetusyritystä, kuljettaja tai reittiä voida tunnistaa. Telematiikkadata anonymisoitiin poistamalla ajoneuvon yksilöintitiedot, kuten rekisterinumero, VIN-tunnus ja yrityskohtaiset tunnisteet. Lisäksi maantieteelliset koordinaatit on raportoitu kuntatason tarkkuudella, jotta yksittäisiä lataus- tai terminaalipisteitä ei voida tarkasti paikantaa. Koska aineisto sisältää kaupallisesti luottamuksellisia tietoja, sitä ei voida julkaista avoimesti. Tutkimustulosten raportointi perustuu aggregoituihin arvoihin ja tilastollisiin tunnuslukuihin, jotka estävät yksittäisen ajoneuvon tai yrityksen tunnistamisen. Kaikki analyysit suoritettiin MATLAB-ympäristössä

(versio R2024b). Tutkimuksessa ei käsitelty henkilötietoja. Menetelmä on toistettavissa kaikilla vastaavia muuttujia sisältävillä telematiikkadatoilla, edellyttäen, että datan anonymisointi ja aggregointi suoritetaan samoilla periaatteilla. Tämä lisää tutkimuksen läpinäkyvyyttä ja sovellettavuutta tulevissa sähköisen raskaan liikenteen kenttätutkimuksissa.

Yhteenvetona menetelmäkokonaisuus muodostaa johdonmukaisen ketjun mittauksesta mallinnukseen: telematiikkadatasta ja sääaineistoista yhdistetään fysikaalisiin ajovastusmalleihin. Näiden avulla arvioidaan, kuinka paljon operatiivisesti hallittavat tekijät, kuten kuorman sijoittelu akseleille, voivat vaikuttaa sähköisen raskaan yhdistelmän energiankulutukseen eri olosuhteissa.

5 Tulokset

Tämä osio kokoaa keskeiset havainnot 11 kuukauden ajalta kerätystä todellisesta operointidatasta Scania 40R E -sähköisellä yhdistelmäajoneuvolla. Yhdistelmäajoneuvoa operoitiin Suomessa ja Ruotsissa vaihtelevissa sääolosuhteissa sekä useilla kuormitustasoilla. Ajojakso sisälsi sekä raskaita, lähes täydellä kuormalla ajettuja kuljetuksia että kevyitä tai kuormaamattomina suoritettuja siirtoajoja. GVW sijoittui tyypillisesti noin 62 t tai 25 t, mutta myös massoja näiden välillä esiintyi. Aineiston edustavuutta arvioitiin tarkastelemalla ajokertojen jakaumaa kuormituksen ja säätilan perusteella. Taulukko 1 esittää käytettyjen matkojen lukumäärän GVW-luokittain sekä kuivissa että märissä olosuhteissa. "Märkä-luokka kattaa sateen ja sohjon, mikä vastaa osiossa 4 esitettyä määritelmää. Lämpötilajakauma kattaa sekä pakkas- että plussakelit, mikä mahdollistaa kulutuksen lämpötilariippuvuuden analysoinnin.

Taulukko 1: Tuloksien analyysissa käytettyjen matkojen lukumäärä GVW-luokissa ja sääkategorioissa. "Märkä"sisältää sateen ja sohjon osion 4 määritelmän mukaisesti.

GVW (t)	Matkoja (kpl)	Märät (kpl)	Kuivat (kpl)
20–30	100	65	35
30–40	153	92	61
40–50	8	8	0
50–60	17	11	6
60–70	63	38	25
Kaikki	341	214	127

Aineiston analyysissä energiankulutuksen, lämpötilan, massan ja sääolosuhteiden välisiä suhteita tarkasteltiin useiden visuaalisten esitystapojen avulla. Lämpötilan (T) ja GVW yhteisvaikutuksia kuvattiin kaksidimensionaalisilla lämpökartoilla, joissa väri esittää energiankulutuksen suuruutta (kWh/100 km). Vastaavasti lämpötila–märkyys-yhdistelmiä visualisoitiin kaksiulotteisina pintakuvina, joissa pinnan korkeus vastaa kulutuksen keskiarvoa kyseisissä olosuhteissa. Nämä visualisoinnit mahdollistavat energiankulutuksen herkkyyden havainnollistamisen lämpötila- ja sääolosuhteiden muuttuessa eri massaluokissa sekä tukevat myöhempää mallien selitysvoiman arviointia eri sääluokissa.

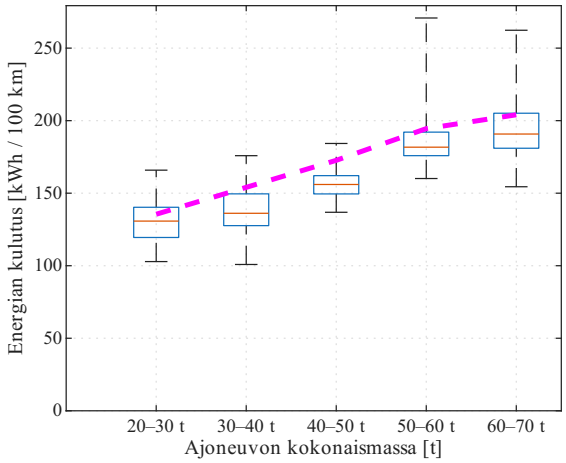
5.1 Energiankulutuksen riippuvuudet

Ajoneuvon energiankulutusta analysoitiin useiden fysikaalisesti ja operatiivisesti merkittävien muuttujien suhteen. Ensisijaisina tarkastelukohteina olivat GVW, ulkolämpötila ja sääolosuhteet, sillä nämä tekijät määrittävät suurimman osan sähköisen voimansiirron energian-

kulutuksen vaihtelusta. Tulokset esitetään järjestelmällisesti siten, että aluksi tarkastellaan kuormituksen vaikutusta sähköenergian kulutukseen kuivissa olosuhteissa. Tämän jälkeen analysoidaan lämpötilan ja massan yhteisvaikutusta, ja lopuksi tutkitaan sään (kuiva, märkä, sadeintensiteetti) vaikutusta eri kuormitusolosuhteissa. Tarkastelun tavoitteena on tunnistaa sekä systemaattiset trendit että olosuhteista johtuva hajonta, mikä mahdollistaa mallien kyvyn arvioimisen todellisen kulutuskäyttäytymisen kuvaamisessa.

5.1.1 Kuormituksen vaikutus kulutukseen

Ensimmäiseksi tarkastellaan ajoneuvon energiankulutuksen riippuvuutta kokonaismassasta kuivissa olosuhteissa. Kuvassa 4 esitetään mitattu energiankulutus kokonaismassaluokittain (laatikot) sekä kuivan kelin fysikaalisen mallin ennuste (katkoviiva). Laatikot havainnollistavat kunkin GVW-luokan mediaania, kvartiileja ja ääriarvoja, kun taas katkoviiva kuvaa mallin ennustamaa kulutuksen nousua massan kasvaessa. Mittaushavaintojen määrä ja niiden hajonta eri massaluokissa heijastavat aineiston laajuutta sekä todellisissa ajo-olosuhteissa esiintyvää kulutuksen vaihtelua.



Kuva 4: Mitattu energiankulutus eri kokonaismassaluokissa (laatikot) sekä kuivan kelin fysikaalinen kulutusmalli (katkoviiva). Laatikot esittävät kunkin GVW-luokan mediaanin, kvartiilit ja ääripisteet. Laatikot esittävät kunkin GVW-luokan mediaanin (50-percentiili), alakvartiilin (25-percentiili) ja yläkvartiilin (75-percentiili) sekä minimi- ja maksimiarvot. Mallikäyrä on laskettu kunkin massaluokan keskimääräiselle kokonaismassalle ja kyseisen luokan keskimääräiselle ajonopeudelle kuivalla tienpinnalla.

Kuivan kelin fysikaalinen mallikäyrä on laskettu luvussa 3 esitetyn ajovastuksiin perustuvan tehontarvemallin pohjalta (yhtälö 1), jossa vakionopeutta ajettaessa kokonaisteho muodostuu vierintävastuksesta, aerodynaamisesta vastuksesta ja apulaitteiden tehontarpeesta. Malliviiva on muodostettu kunkin kokonaismassaluokan keskimääräiselle massalle käyttäen parametreja ajon aikaisten keskimääräistä kokonaispainoa, $\rho = 1{,}225\,\mathrm{kg/m^3}$, $C_\mathrm{d}A = 9\,\mathrm{m^2}$, $C_\mathrm{rr,dry} = 0.006$, voimansiirron hyötysuhde $\eta_\mathrm{drv} = 0.88$ sekä massasta riippumaton apukulutus $E_\mathrm{aux} =$

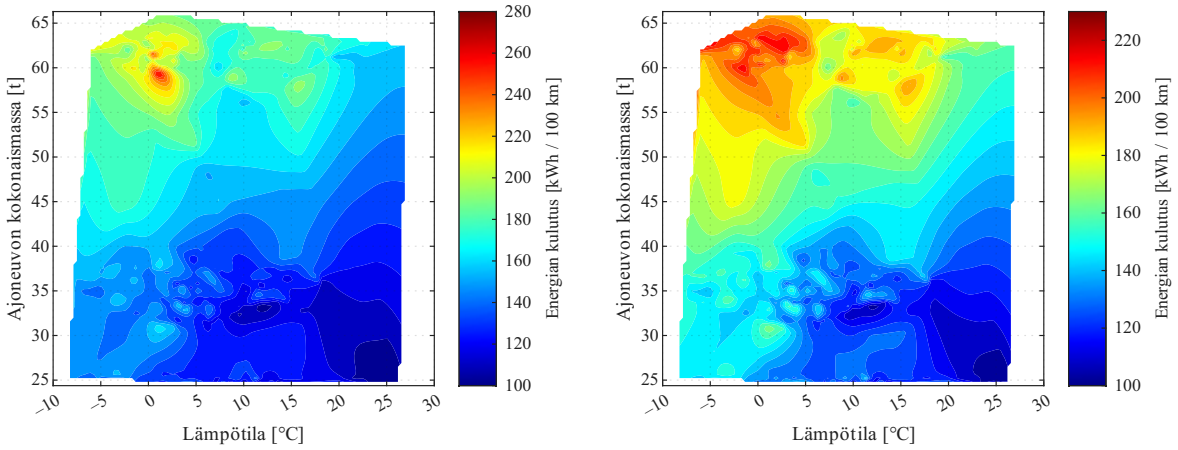
5 kWh/100km. Tällä tavoin laskettu mallikäyrä toimii ideaalisen vakionopeusajon referenssinä, johon mitattuja kulutusarvoja voidaan verrata. Fysiikkamallia ei tässä työssä erikseen kalibroitu telematiikka-aineistoon, vaan sitä käytetään yksinkertaistettuna referenssimallina, jonka avulla voidaan verrata mitattua kulutustasoa ideaaliin vakionopeusajoon. Kirjallisuuden ja luvussa 3 käsitellyn teoriataustan perusteella mallia olisi mahdollista tarkentaa kalibroimalla vierintävastus lämpötilan ja tienpinnan kosteuden funktiona $C_{\mathrm{rr}}(T, \mathrm{wetness})$, tarkentamalla aerodynaamisen vastuksen lämpötilariippuvuutta $C_{\mathrm{d}}A(T, \rho)$ sekä mallintamalla apukuorman riippuvuutta lämpötilasta ja käyttöolosuhteista. Näiden tekijöiden kvantitatiivinen kalibrointi jätetään jatkotutkimusaiheeksi, eikä niitä arvioida numeerisesti tässä työssä.

Pelkästä telematiikkadatan kulutusajasta ei ole mahdollista luotettavasti erotella vierintävastuksen, ilmanvastuksen ja apulaitteiden osuuksia, koska ajoneuvon kokonaiskulutus on näiden tekijöiden yhdistelmä eikä mittausdata sisällä erillisiä voima- tai tehkomponentteja. Raskaiden ajoneuvojen energiabudjeteissa vierintävastus ja aerodynamiikka muodostavat kirjallisuuden perusteella noin 60–70 % kokonaisenergiantarpeesta, mutta tätä jakaumaa ei voida johtaa suoraan tästä aineistosta ilman erillisiä mittauksia (esimerkiksi coastdown-kokeita, tuulitunnelimittauksia tai renkaiden lämpötilariippuvuuden määritystä). Tämän vuoksi mallin tarkempi parametrisointi ei ole tässä työssä toteutettavissa pelkän ajoneuvon käyttödatan perusteella. Lisäksi vierintävastukseen vaikuttaa joukko tekijöitä, joita ei telematiikkadatan perusteella voida havaita. Esimerkiksi yksittäisen pyörän jarrusatulan lievä laahaus, laakerikitka, renkaiden lämpötila ja käyttöikä sekä tienpinnan pienipiirteinen karheus muuttavat rullaushäviöitä satunnaisesti ajon aikana. Vastaavasti aerodynaamiseen vastukseen vaikuttavat paikalliset tuuliolosuhteet: puusto, maastonmuodot, sillat ja ajoneuvon ohitukset muuttavat hetkellistä virtauskuviota tavalla, jota ei voida rekonstruoida pelkkien keskituulitietojen perusteella. Nämä tekijät lisäävät kulutuksen luonnollista vaihtelua ilman että ne näkyvät malliparametreissa. Koska kokonaismassa ei jakaudu tasaisesti akseleille kaikissa kuormitustilanteissa, myös akselipainojen epätasaisuus voi teoriassa lisätä vierintähäviöitä ja kasvattaa kulutusta erityisesti raskaissa yhdistelmissä. Tätä ilmiötä ei tässä työssä analysoida erillisenä muuttujana, mutta sen suuruusluokka on kirjallisuuden perusteella muutaman prosentin luokkaa verrattuna tasaisesti jakautuneeseen kuormaan (ks. vierintävastusta käsittelevä alaluku ja viitteet Komnos et al., 2021; Guiggiani, 2003). Tämän vuoksi kuormasijoittelua voidaan pitää käytännön tason keinona vaikuttaa ajoneuvon energiatehokkuuteen ilman teknisiä muutoksia ajoneuvoon, vaikka sen vaikutusta ei tässä työssä telematiikkadatan pohjalta erikseen kvantifioida.

5.1.2 Lämpötilan ja kuormituksen yhteisvaikutus

Seuraavaksi tarkastellaan energiankulutuksen riippuvuutta kahdesta keskeisestä muuttujasta: ajoneuvon kokonaismassasta ja ulkolämpötilasta. Lämpökartat kuvassa 5 kuvaavat keski-

määräisen energiankulutuksen vaihtelua näiden muuttujien funktiona sekä koko aineistossa että poikkeavien ajojen suodattamisen jälkeen. Kulutuksen esitys väreinä on rakennettu siten, että tummemmat punaisen sävyt kuvastavat suurempaa energiankulutusta. Tumman sininen puolestaan kuvaa pienempää energiankulutusta.



(a) Kaikkien matkojen keskimääräinen energiankulutus ympäristön lämpötilan ja ajoneuvon kokonaismassan funktiona.

(b) Poikkeavat ajot suodatettuna pois kuvasta (energiankulutus yli 230 kWh/100 km): energiankulutus ympäristön lämpötilan ja kokonaismassan funktiona.

Kuva 5: Energiankulutuksen riippuvuus ympäristön lämpötilasta ja ajoneuvon kokonaismassasta. Kuvassa (a) esitetään kaikki matkat, ja kuvassa (b) vastaava lämpökartta poikkeavat ajot suodatettuna.

Suodatettu versio (kuva 5b) on muodostettu poistamalla yksittäiset poikkeavat ajot, joissa energiankulutus ylittää 230 kWh/100 km. Nämä havainnot liittyvät pääasiassa loskakeleihin, joissa tienpinnan märkyys ja sohjo kasvattavat vierintävastusta ja hidastavat etenemistä. Kulutus nousee kuitenkin myös voimakkaassa vastatuulessa, joka lisää ilmanvastusvoimaa ja korostuu erityisesti raskaan yhdistelmän suurella otsapinta-alalla. Suodatuksen tarkoituksena ei ollut poistaa todellisia ääritilanteita, vaan parantaa yleisten trendien luettavuutta sekä estää yksittäisten, ei-tyypillisten ajokertojen ylikorostumista keskiarvoissa. Näin muodostettu kuva heijastaa tarkemmin tavanomaisia olosuhteita, joissa kuljetus tapahtuu ilman poikkeuksellisen raskaita kelirikko-olosuhteita.

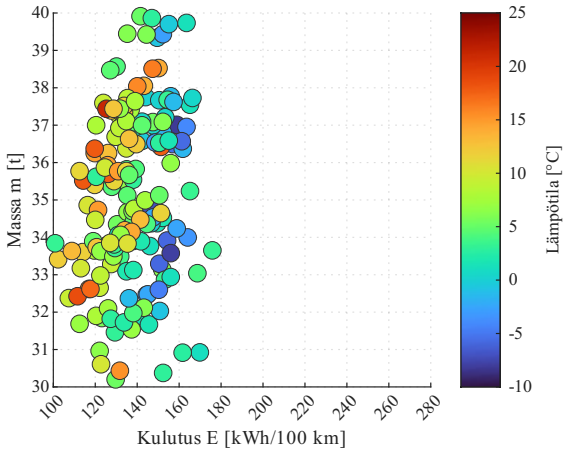
Kuvien 5a ja 5b väri-intensiteetti osoittaa, että energiankulutus riippuu voimakkaasti kahdesta tekijästä: ajoneuvon kokonaismassasta ja ulkolämpötilasta. Kulutus kasvaa massan kasvaessa ja lämpötilan laskiessa, mikä ilmenee kulutuksen systemaattisena kohoamisena kohti oikeaa alakulmaa lämpökartoissa. Kulutus on alhaisimmillaan lämpimissä olosuhteissa ja kevyillä kuormilla, ja se kasvaa merkittävästi sekä massan että ympäristön lämpötilan noustessa. Erityisen huomionarvoinen piirre on havaittavissa nollan asteen tuntumassa, jossa esiintyy kulutushuippu lähes kaikilla massatasoilla. Tämä ilmiö ei johdu pelkästään lämpöti-

lasta, vaan todennäköisesti ajokeliolosuhteista: nollan asteen ympäristössä tienpinta on usein märkä, sohjoinen tai osittain jäinen, mikä lisää vierintä- ja roiskevastuksia sekä heikentää ajoneuvon energiatehokkuutta. Näissä olosuhteissa ajonopeus voi laskea turvallisuussyistä, mutta tällä ei ole olennaista vaikutusta tässä analyysissä tehtyihin johtopäätöksiin, koska energiankulutuksen tarkastelu perustuu keskimääräiseen kulutukseen vakioidulla matkalla (kWh/100 km), ei kuljetun matkan aikasuoritukseen.

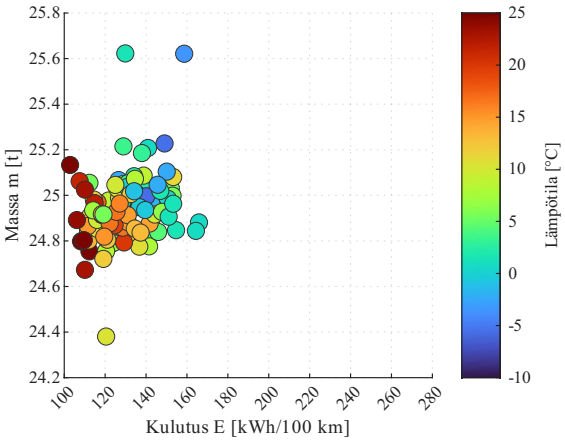
Pakkasen kiristyessä $-10\,^{\circ}\mathrm{C}$–$-5\,^{\circ}\mathrm{C}$ energian kulutus monilla ajoalueilla jopa hieman pienenee verrattuna nollakeliin. Tämä viittaa siihen, että kylmä, mutta kuiva tienpinta aiheuttaa vähemmän vierintävastusta kuin märkä tai sohjoinen pinta. Tämä lämpötilan epälineaarinen vaikutus ilmenee selkeämmin suodatetussa lämpökartassa (kuva b), jossa yksittäiset poikkeavat ajot on poistettu ja kulutuksen rakenteelliset trendit korostuvat. Massan suhteen gradientti on lähes lineaarinen koko lämpötila-alueella: kevyillä kuormilla kulutus asettuu tyypillisesti 120–150 kWh/100 km, kun taas raskaimmilla yhdistelmillä ($>60\,\mathrm{t}$) kulutus nousee yli 200 kWh/100 km. Näin ollen kuorman vaikutus on määräävä tekijä. Lämpötilan ja kelin yhteisvaikutus voi aiheuttaa jopa 20 %–30 % poikkeaman keskimääräisestä kulutuksesta nollakelien ja kuivien olosuhteiden välillä. Havaittu epälineaarisuus nollan asteen ympärillä korostaa tarvetta malleille, jotka huomioivat lämpötilan sekä tienpinnan olomuodon muutokset. Vierintävastuskerroin C_{rr} ei ole pelkästään materiaaliparametri, vaan sen vaihtelu heijastaa käytännön keliluokkia. Näin ollen fysikaalisesti perusteltu $C_{\mathrm{rr}}(T, \mathrm{wetness})$-malli voisi merkittävästi parantaa nykyisten energiankulutusmallien tarkkuutta talviolosuhteissa.

5.2 Energiankulutuksen riippuvuus massasta ja lämpötilasta

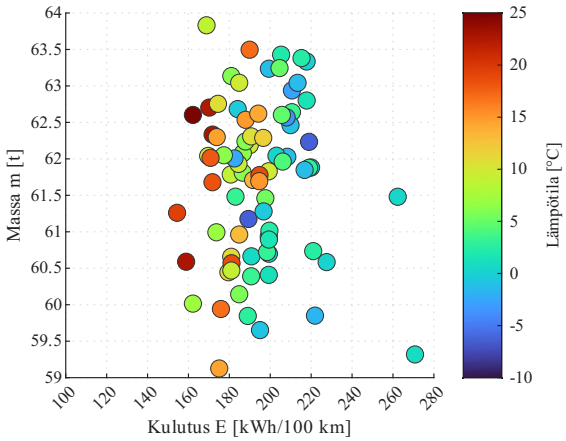
Sähköisen täysperävaunuyhdistelmän energiankulutusta tarkasteltiin kolmessa eri kuormitustilanteessa: kuormaamattomana (24 t–26 t), osakuormaisena (30 t–40 t) ja täysin kuormattuna (59 t–64 t). Kuvassa 6 esitetään energiankulutuksen ja kokonaismassan välinen riippuvuus näissä olosuhteissa siten, että väri kuvaa ajon keskilämpötilaa.



(a) Osakuormattu yhdistelmä (30 t–40 t).



(b) Kuormaamaton yhdistelmä (24 t–26 t).



(c) Täysin kuormattu yhdistelmä (59 t–64 t).

Kuva 6: Energiankulutus massan ja lämpötilan funktiona kolmessa eri kuormitustilanteessa. Väri kuvaa ulkolämpötilaa.

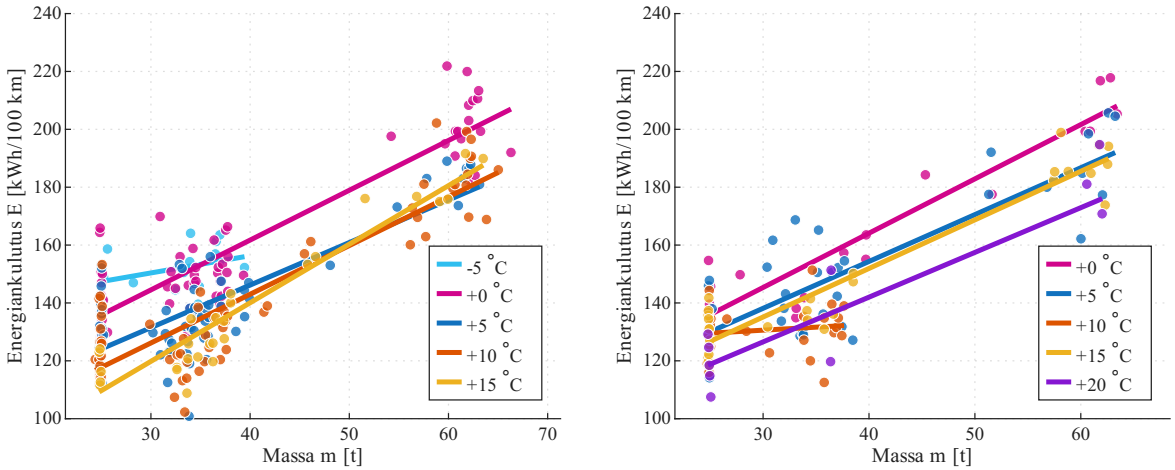
Kuva 6 osoittaa kulutuksen systemaattista kasvua massan kasvaessa, mutta samalla myös sen, että energiankulutuksessa esiintyy merkittävää hajontaa saman massan ja lämpötilan sisällä. Hajonta selittyy erityisesti sää- ja keliolosuhteiden vaihtelulla sekä ajonopeuden ja tuuliolosuhteiden vaikutuksilla. Nämä tekijät korostuvat erityisesti osakuormatussa ja täysin kuormatussa yhdistelmässä, joissa kuormitus lisää vetovastuksia ja herkistää kulutuksen ulkoisille olosuhteille. Kuormaamattomalla yhdistelmällä (24 t–26 t) massan vaikutus energiankulutukseen on suhteellisen pieni, kuten kuva 6b osoittaa. Sen sijaan lämpötilan vaikutus erottuu selvästi: lämpimissä olosuhteissa ($T > +10$ °C) kulutus on pienempi, kun taas kylmissä keleissä kulutus kasvaa noin 10–15 %. Hajonta saman lämpötilan sisällä on kuitenkin edelleen merkittävää. Vastatuuli voi kasvattaa aerodynaamista vastusta useita kymmeniä prosentteja, ja kostea tienpinta lisää vierintähäviöitä. Kumpikaan ilmiö ei näy suoraan pelkän lämpötilan perusteella. Tämä selittää datapisteiden leviämistä erityisesti nollakelien läheisyydessä.

Osakuormaisella yhdistelmällä (30 t–40 t) massan vaikutus korostuu kuormaamattomaan ajoneuvoon verrattuna, ja hajonta on suurempaa koko lämpötila-alueella, kuten kuva 6a osoittaa. Tässä kuormitusluokassa ajoneuvon nopeusvaihtelut, tuuli, tienpinnan märkyys sekä vaihtelevat ajolinjat vaikuttavat suhteellisesti enemmän kulutukseen, mikä ilmenee selvästi datapisteiden hajonnasta. Täysin kuormatussa yhdistelmässä (59 t–64 t) energiankulutus nousee odotetusti korkeammalle tasolle (tyypillisesti 180–250 kWh/100 km), kuten kuva 6c osoittaa. Lämpötilariippuvuus on samansuuntainen kuin kevyemmillä kuormilla, mutta nollalämpötilan tuntumassa havaitaan selvästi suurempi kulutuspiikki. Tämä viittaa loskaisista ja märistä tieolosuhteista johtuvaan vierintävastuksen kasvuun. Lisäksi sekä sateen että tuulen vaikutukset aiheuttavat hajontaa kulutuksessa: vastatuuli kasvattaa ajoneuvon aerodynaamista vastusta kolmannen potenssin mukaan $(v + v_{\text{wind}})^3$, mikä selittää korkeita yksittäisiä datapisteitä myös lämpimissä olosuhteissa.

Kylmissä mutta kuivissa olosuhteissa ($< -5\ ^\circ\text{C}$) kulutus on raskaalla yhdistelmällä yllättävän tasaista. Tämä tukee tulkintaa, että epälineaariset kulutuspiikit liittyvät ennen kaikkea tienpinnan märkyyteen eivätkä pelkästään ilman lämpötilaan. Lämpötilan, tuulen ja tienpinnan yhteisvaikutus muodostaa siten merkittävän epävarmuustekijän energiankulutusennusteille ja selittää, miksi yksittäiset ajot voivat poiketa 15–25 % keskimääräisestä kulutusmallista ilman, että kuormitus tai lämpötila muuttuvat merkittävästi.

5.2.1 Kuivat ja märät olosuhteet

Seuraavaksi verrataan energiankulutusta kuivissa ja märissä olosuhteissa. Kuvassa 7 esitetään kulutuksen riippuvuus kokonaismassasta ja lämpötilasta erikseen kuiville ja märille keleille. Kuvissa 7a ja 7b käyrät kuvaavat eri lämpötilatasoja, ja pystyakselilla esitetään ajoneuvon kokonaismassa. Regressiokäyrä on muodostettu sovittamalla kullekin lämpötilaluokalle lineaarinen regressiomalli, joka kuvaa energiankulutuksen keskimääräistä riippuvuutta ajoneuvon kokonaismassasta kyseisellä ympäristön lämpötilalla.



(a) Kuiva keli.

(b) Märkä keli.

Kuva 7: Energiankulutuksen riippuvuus kokonaismassasta ja lämpötilasta kuivissa (a) ja märissä (b) keliolosuhteissa. Lämpötilakohtaiset regressioviivat on sovitettu ±2,5 °C leveisiin lämpötilaluokkiin, jotta samaan lämpötila-alueeseen kuuluvat havainnot voidaan esittää yhtenäisenä trendinä.

Kuvista 7a ja 7b havaitaan, että energiankulutus kasvaa johdonmukaisesti ajoneuvon kokonaismassan lisääntyessä sekä kuivissa että märissä olosuhteissa. Märällä kelillä kulutustaso on kauttaaltaan korkeampi kaikissa tarkastelluissa lämpötiloissa, erityisesti suurilla massoilla ja matalissa lämpötiloissa. Tämä viittaa siihen, että tienpinnan kosteus, sohjo ja renkaiden edessä syrjäytettävä vesimassa lisäävät sekä vierintä- että roiskevastuksia, mikä kasvattaa kokonaisenergiankulutusta merkittävästi.

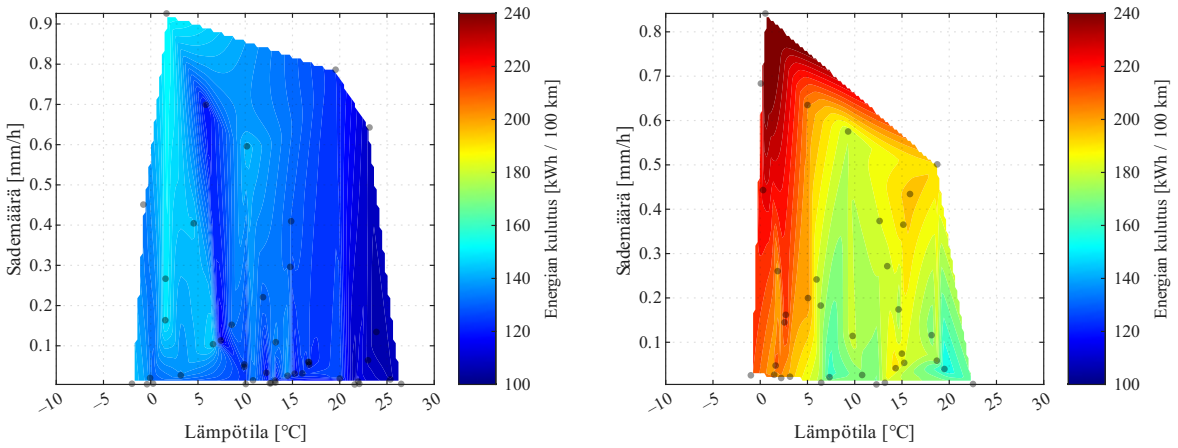
Kuvissa esitetyt regressiosuorat kuvaavat lämpötilatasojen keskimääräistä kulutustrendiä. Sovitukset muodostetaan lineaarisella mallilla niille lämpötila-alueille $T \pm 2{,}5$ °C, joissa datapisteitä on vähintään kymmenen. Harmaat taustapisteet kuvaavat muuta dataa, joka ei täytä sovituskriteerejä eikä siksi sisälly regressioihin. Tämä menettely vähentää tilannetta, jossa sovite perustuisi vain muutamaan pisteeseen eikä olisi tilastollisesti pätevä. Joissakin lämpötila–massa-yhdistelmissä aineistoa on kuitenkin rajoitetusti, erityisesti märän kelin tapauksissa, jolloin sovite edustaa vain kyseisen lämpötila-alueen sisäistä keskimääräistä lineaarista riippuvuutta. Kuivissa olosuhteissa lämpötilan vaikutus ilmenee loivasti: kulutus pienenee lähes lineaarisesti lämpötilan noustessa, mikä vastaa vierintävastuksen ja lämmitystarpeen vähenemistä. Märissä olosuhteissa lämpötilan vaikutus on selvästi monimutkaisempi, erityisesti nollakelien läheisyydessä. Tällä alueella havaitaan huomattavaa kulutuksen hajontaa, mikä todennäköisesti liittyy vaihteleviin olosuhteisiin kuten sohjoon, ohueen vesikalvoon ja jäätyviin pintoihin. Lisäksi tuuliolosuhteet voivat kasvattaa kulutuksen vaihtelua merkittävästi: vastatuuli lisää aerodynaamista vastusta suhteessa suhteelliseen nopeuteen $(v + v_{\text{wind}})^3$, mikä selittää yksittäisiä korkeita kulutushuippuja tilanteissa, joissa lämpötilan

perusteella olosuhteiden voisi odottaa olevan suotuisat.

Korkeammissa lämpötiloissa (yli noin 10 °C) erot kuivaan keliin nähden pienenevät. Märän kelin aineistossa kulutuskäyrien jyrkempi nousu massan suhteen osoittaa kuitenkin, että tienpinnan kitkan, vesipatjan ja vedenpoistotarpeen aiheuttama lisävastus korostuu raskaissa yhdistelmissä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että renkaiden kunto, rengaspaineet ja kuormanjako akseleille muodostavat märissä olosuhteissa yhtä keskeisiä kulutustekijöitä kuin ajonopeus tai latausstrategia. Niiden vaikutus on huomattava erityisesti silloin, kun tienpinta on vetinen tai sohjoinen ja ajoneuvo toimii lähellä suurimman sallitun massansa ylärajaa.

5.2.2 Sateen ja lämpötilan vaikutus energiankulutukseen eri kuormilla

Edellä tarkasteltiin kuivien ja märkien olosuhteiden yleisiä eroja. Tässä alaluvussa analysoidaan tarkemmin sateen intensiteetin ja lämpötilan yhteisvaikutusta energiankulutukseen kahdella eri kuormitustasolla: kevyellä (24 t–26 t) ja raskaalla (55 t–65 t) yhdistelmällä. Kuvassa 8 esitetään energiankulutus lämpötilan ja sateen intensiteetin (mm/h) funktiona erikseen näille kahdelle massaluokalle.



(a) Kevyt yhdistelmä (24 t–26 t), keskikulutus sateella 128,7 kwh/100km 44 mittapisteessä.

(b) Raskas yhdistelmä (55 t–65 t), keskikulutus sateella 193,3 kwh/100km 35 mittapisteessä.

Kuva 8: Energiankulutus lämpötilan ja sateen intensiteetin funktiona kevyellä (a) ja raskaalla (b) yhdistelmällä. Harmaat pisteet ovat havaintopisteitä, joita yhteensä 79 kappaletta.

Kevyellä yhdistelmällä (kuva 8a) energiankulutus kasvaa selvästi sateen intensiteetin lisääntyessä, erityisesti lämpötiloissa lähellä nollapistettä. Tällä lämpötila-alueella tienpinta on usein vetinen tai osittain sohjoinen, mikä lisää vierintävastusta sekä heikentää renkaiden mekaanista hyötysuhdetta. Kevyessä yhdistelmässä sateen aiheuttama lisävastus muodostaa suuren suhteellisen osuuden kokonaisenergiankulutuksesta, minkä vuoksi kulutuksen nousu sateen funktiona on jyrkempi kuin raskaalla yhdistelmällä.

Raskaalla yhdistelmällä (kuva 8b) havaitaan samansuuntaisia trendejä, mutta kokonaiskulutus on kauttaaltaan selvästi korkeampaa ja sateen aiheuttama gradientti loivempi. Tämä osoittaa, että massasta johtuva perusvierintävastus on raskaassa yhdistelmässä kulutuksen dominoiva tekijä, jolloin sateen aiheuttama lisäkuormitus näkyy suhteellisesti pienempinä muutoksina energiankulutuksessa. Suurilla sademäärillä ($>0{,}5\,\mathrm{mm/h}$) kulutus kasvaa kuitenkin jyrkästi myös raskaalla yhdistelmällä, mikä kertoo veden ja sohjon kumuloituvasta vaikutuksesta suurilla akselipainoilla ja leveillä rengaspinnoilla.

Lämpimissä olosuhteissa tienpinta myös kuivuu ja vesipatjan korkeus laskee nopeammin kuin kylmissä lämpötiloissa. Hetkellinen sademäärä ei siten aina kuvaa tien todellista märkyyttä. Lisäksi sateen luonne vaikuttaa kulutukseen: kuurosateessa tie ehtii ajoittain kuivua, kun taas pitkäkestoisen sateen aikana renkaiden syrjäytettävä vesimäärä kasvaa jatkuvasti. Tien pinnan uraisuus, vedenpoistokyky ja liikennemäärä määrittävät yhdessä, kuinka paljon vettä ajoneuvon renkaat tosiasiallisesti joutuvat siirtämään. Näiden tekijöiden vaihtelu voi johtaa siihen, että suurten sadearvojen havaintopisteet sijoittuvat olosuhteisiin, joissa tien todellinen vesimäärä on pieni ja vierintävastus siten alhaisempi kuin kylmissä, loskaisissa keleissä.

Ilmiö korostuu raskaassa yhdistelmässä, koska suuri perusvierintävastus peittää alleen sateen suhteellisen vaikutuksen. Lisäksi suurilla sadearvoilla havaintojen määrä on pienempi, mikä vahvistaa interpoloinnin tuottamia paikallisia laskusuuntia. Näin ollen havaittu kulutuksen pieneneminen ei ole fysikaalinen sade-etu, vaan seurausta lämpötilan, sateen ja tien todellisen vesimäärän epätasaisesta yhteisjakaumasta aineistossa.

Kuvassa 8 korostuu nollan asteen ympärillä esiintyvä kulutushuippu. Tämä vahvistaa edellä esitetyn havainnon, jonka mukaan loskakelit muodostavat tarkastelluista olosuhteista kuormittavimman keliluokan: renkaiden eteen kerääntyvä vesi ja sohjo nostavat vierintävastuksen poikkeuksellisen korkeaksi, ja veden poistaminen renkaan alta vaatii merkittävää mekaanista työtä. Näissä olosuhteissa energiankulutus voi nousta jopa 20 %–30 % verrattuna kuivaan pakkaskeliin tai lämpimiin olosuhteisiin. On myös huomattava, että kulutus voi olla koholla tilanteissa, joissa hetkellinen sademäärä on 0 mm/h. Tämä viittaa siihen, että tien pinnalla voi edelleen olla vettä tai lunta edellisten tuntien sateista, eikä kelin todellinen märkyys siten näy pelkästään hetkellisestä sadetiedosta.

Sateen vaikutus energiankulutukseen ei ole lineaarinen sademäärän suhteen. Tien vedenpoistokyky, liikennemäärä ja edellä ajavien ajoneuvojen syrjäyttämä vesimassa vaikuttavat siihen, kuinka paljon vettä tarkasteltavan ajoneuvon renkaat joutuvat siirtämään. Vilkkaasti liikennöidyllä tiellä renkaiden kohtaama vesipatsas voi olla pienempi kuin harvaan liikennöidyllä tiellä, vaikka sademäärä olisi sama. Toisaalta urautuneilla kaistoilla ja hitaassa lii-

kenteessä vedenpoisto on heikompaa, mikä lisää vierintävastusta huomattavasti. Sateen ja lämpötilan yhteisvaikutuksen epälineaarisuus korostaa, että energiankulutusta ei voida mallintaa pelkän sademäärän avulla. Vaikutus riippuu myös ajonopeudesta, tienpinnan geometriasta sekä vedenpoiston ja liikenteen tuottaman veden siirtymisen dynamiikasta. Näin ollen sateen vaikutus muodostaa kontekstisidonnaisen ilmiön, joka haastaa yksinkertaisten regressiomallien käytön energiankulutuksen mallinnuksessa.

5.3 Toimintamatka eri olosuhteissa

Energiankulutuksen muutokset erilaisissa lämpötila- ja sääolosuhteissa heijastuvat suoraan ajoneuvon toimintamatkaan, koska tarkastelujaksolla käytettävissä oleva akkuenergia on lähes vakio. Tässä osiossa tarkastellaan, kuinka ulkolämpötila, kuormitus ja sää vaikuttavat käytännössä saavutettavaan toimintamatkaan eri massaluokissa. Toimintamatka laskettiin mitattujen tai mallinnettujen energiankulutusarvojen perusteella seuraavalla kaavalla:

$$R = \frac{E_{\text{usable}}}{C} \times 100, \tag{6}$$

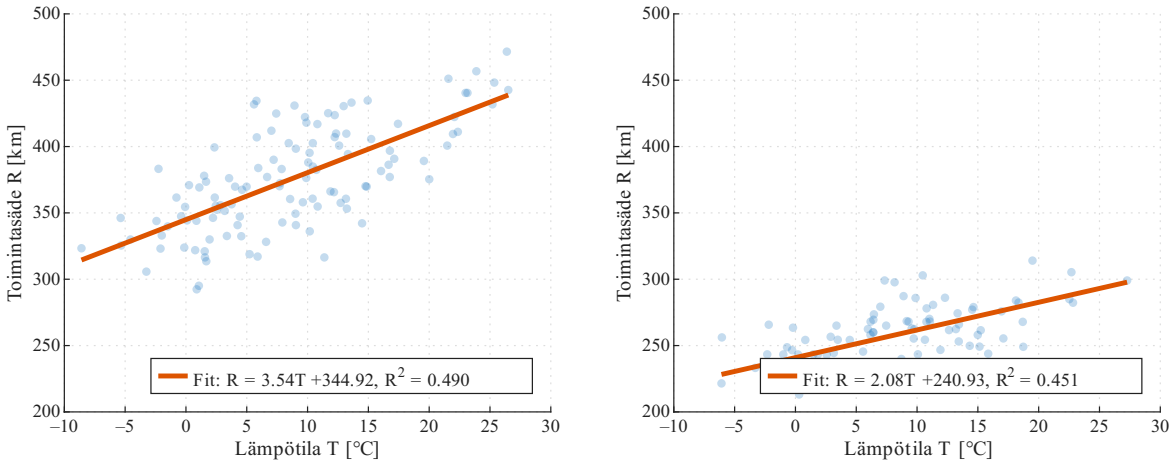
missä E_{usable} on käytettävissä oleva akuston energia ja C kyseisissä olosuhteissa mitattu tai mallinnettu energiankulutus yksikössä kWh/100km. Tarkasteltavassa ajoneuvossa akun energia vaihtelee välillä 43,68–511,82 kWh, jolloin käytettävissä oleva kapasiteetti on noin 468,14 kWh. Näin ollen yhtälö 6 kuvaa suoraa ja fysikaalisesti yksinkertaista suhdetta energiankulutuksen ja toimintamatkan välillä: kun kulutus kasvaa, toimintamatka lyhenee käänteisesti verrannollisesti.

Toimintamatka-analyysit toteutettiin erikseen kuormituksen (kuormaamaton vs. kuormattu yhdistelmäajoneuvo) sekä sääluokkien (kuiva, märkä) suhteen, jotta lämpötilan, märkyyden ja massan vaikutus toimintamatkaan voitiin erottaa toisistaan. Seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan ensin lämpötilan vaikutusta toimintamatkaan tyhjällä ja täydellä yhdistelmällä, minkä jälkeen analysoidaan toimintamatkan vaihtelua eri kuormituksilla kuivissa ja märissä olosuhteissa. Tulokset esitetään regressioviivoina, joissa toimintamatkan ja lämpötilan välistä yhteyttä on mallinnettu lineaarisella sovitteella kuvaamaan sekä kylmän sään aiheuttamaa jyrkkää alenemaa että lämpimissä olosuhteissa havaittua lievää tasoittumista.

5.3.1 Lämpötilan vaikutus toimintamatkaan (kuormaamaton vs. täyteen lastattu ajoneuvoyhdistelmä)

Seuraavaksi tarkastellaan lämpötilan vaikutusta ajoneuvon toimintamatkaan kahdella eri kuormitustasolla: tyhjällä (25 t) ja täydellä (62 t) yhdistelmällä. Kuvassa 9 esitetään mitattu toi-

mintamatka lämpötilan funktiona, ja kumpaankin aineistoon on sovitettu lineaarinen referenssisuora havainnollistamaan epälineaarisuutta kylmissä olosuhteissa.



(a) Kuormaamaton yhdistelmä (25 t). (b) Kuormattu yhdistelmä (62 t).

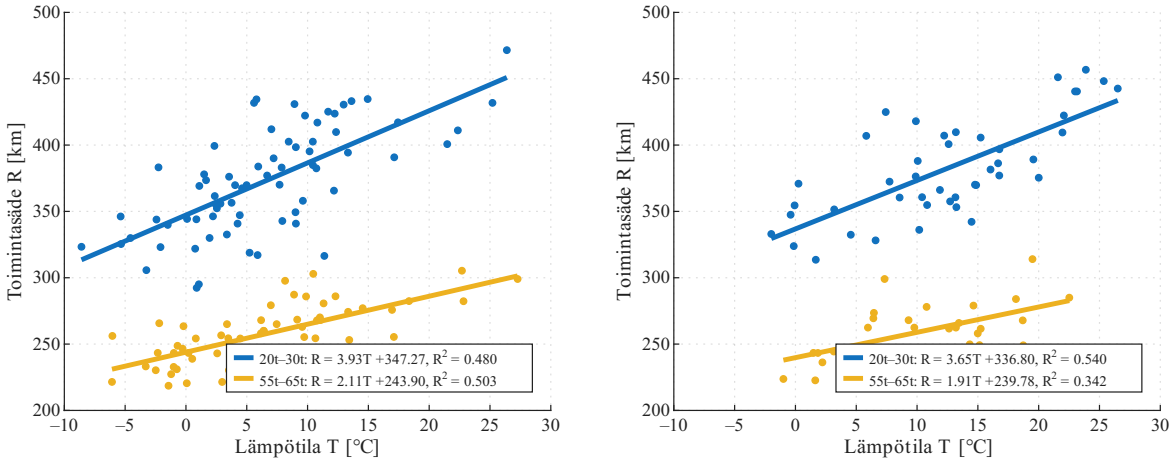
Kuva 9: Toimintamatkan riippuvuus lämpötilasta kuormaamattomalla (a) ja täydellä (b) ajoneuvoyhdistelmällä. Punainen viiva kuvaa lineaarista sovitusta.

Kuvista 9a ja 9b havaitaan, että toimintamatka kasvaa lämpötilan noustessa molemmilla kuormitustasoilla. Lämpötilan vaikutus on kuitenkin selvästi voimakkaampi kuormittamattomalla yhdistelmällä: kylmissä olosuhteissa ($-10\,^{\circ}\mathrm{C}$) toimintamatka jää noin 280 km, mutta lämpimässä säässä ($25\,^{\circ}\mathrm{C}$) se voi ylittää 440 km. Täydellä kuormalla vaihteluväli on pienempi, noin 200 km–320 km, mikä osoittaa, että massan aiheuttama vetovastus hallitsee kokonaiskulutusta ja peittää alleen osan lämpötilan vaikutuksesta. Toisen asteen käyrä paljastaa lievää epälineaarisuutta erityisesti matalissa lämpötiloissa, joissa akun sisäinen resistanssi kasvaa, lämmityksen energiantarve lisääntyy ja vierintävastus kohoaa renkaan jäykistymisen seurauksena. Nämä tekijät heikentävät hyötysuhdetta suhteellisesti enemmän kylmissä olosuhteissa, mikä johtaa toimintamatkan kylmemmän osuuden voimakkaampaan laskuun. Tilastollinen analyysi osoitti kuitenkin, että lineaarinen malli antoi korkeimman selitysasteen (R^2) kummallekin massaluokalle. Tämä tarkoittaa, että toimintamatkan ja lämpötilan välinen riippuvuus on käytännössä lähes lineaarinen koko tarkastellulla lämpötila-alueella, vaikka fysikaalisia epälineaarisia mekanismeja on tunnistettavissa erityisesti alle $0\,^{\circ}\mathrm{C}$ lämpötiloissa. Lineaarinen malli soveltuu näin ollen hyvin keskimääräisen trendin kuvaamiseen ja myöhempää mallinnusta varten. Kuormituksen vaikutus ilmenee siten, että tyhjän ja täyden yhdistelmän välinen toimintamatkaero on koko lämpötila-alueella lähes vakio. Tämä osoittaa, että kuorman tuottama lisätehontarve on likimain lineaarinen massan suhteen, kun taas lämpötilan vaikutus on voimakkaasti epälineaarinen erityisesti kylmissä ja kosteissa olosuhteissa. Näiden kahden tekijän eriluonteinen vaikutus selittää toimintamatkan suuren hajonnan talviolosuhteissa ja korostaa tarvetta erilliselle lämpötilaan ja keliin perustuvalla kor-

jaustermille energiankulutusmalleissa.

5.3.2 Toimintamatka kuormituksen ja sään mukaan

Toimintamatkaa tarkasteltiin lämpötilan funktiona kahdessa sääluokassa, kuivissa ja märissä olosuhteissa. Kuvassa 10 esitetään tulokset kahdelle massaluokalle, kevyelle (20 t–30 t) ja raskaalle (55 t–65 t). Molempiin alakuvioihin on sovitettu lineaarinen regressiomallit kuvaamaan havaittua lämpötilariippuvuutta.



(a) Kuivat ajo olosuhteet

(b) Märät ajo olosuhteet

Kuva 10: Toimintamatka lämpötilan funktiona kahdella massaluokalla: (a) kuivat olosuhteet ja (b) märät olosuhteet.

Kuvista 10a ja 10b käy ilmi, että toimintamatka kasvaa lämpötilan noustessa kaikilla tarkastelluilla massoilla ja sääluokilla. Sääolosuhteiden vaikutus on kuitenkin merkittävä: märissä olosuhteissa toimintamatka on systemaattisesti lyhyempi kuin kuivissa, ja ero kasvaa erityisesti matalissa lämpötiloissa. Tämä on yhdenmukaista aiemmin havaittujen vierintävastuksen ja apulaitteiden kulutuksen lisääntymisen kanssa vetisissä ja loskaisissa olosuhteissa.

Kevyen yhdistelmän toimintamatka vaihtelee kuivalla kelillä noin 340 km–440 km, kun taas märissä olosuhteissa vaihteluväli supistuu noin 300 km–400 km. Raskaan yhdistelmän vastaavat arvot ovat kuivalla kelillä 240 km–320 km ja märällä 220 km–300 km. Näin ollen märkyyden vaikutus pienentää toimintamatkaa keskimäärin noin 10 %–15 %. Vaikutus on suhteellisesti suurempi kevyellä massalla, mikä viittaa siihen, että ympäristöolosuhteiden osuus kokonaiskulutuksesta kasvaa, kun massariippuvaisen peruskuormituksen taso on alhaisempi. Lämpötilan ja toimintamatkan välinen riippuvuus tarkastellulla lämpötila-alueella on lähes lineaarinen. Useiden regressiomallien vertailu osoitti, että lineaarinen malli tuottaa korkeimman selityskertoimen (R^2) sekä kuivissa että märissä olosuhteissa, mikä osoittaa, että toimintamatkan lämpötilariippuvuus voidaan mallintaa luotettavasti lineaarisella approksi-

maatiolla. Raskaalla yhdistelmällä lämpötila- ja sääkomponenttien suhteellinen vaikutus on pienempi, koska massan aiheuttama perusenergiankulutus dominoi kokonaiskulutusta. Kevyillä yhdistelmillä apulaitteiden kulutus ja tienpinnan märkyydestä johtuva vierintävastuksen kasvu muodostavat suuremman osuuden kokonaisenergiankulutuksesta, mikä tekee toimintamatkasta herkemmän ulkoisille olosuhdetekijöille.

5.4 Operointikortti: energiankulutuksen arviointi massan, lämpötilan ja kelin mukaan

Tässä alaluvussa muodostetaan käytännön operointikortti mitatun datan perusteella, jonka avulla ajojärjestelijä tai kuljettaja voi arvioida sähköisten raskaan ajoneuvon energiankulutusta eri massa-, lämpötila- ja keliolosuhteissa. Operointikortin tavoitteena on tarjota nopeasti käytettävä työkalu reittisuunnitteluun, energiabudjetointiin sekä lataustarpeen ennakointiin ilman erillistä simulointia.

5.4.1 Menetelmä ja mallinnusperiaatteet

Operointikortti muodostettiin telematiikkadatasta johdettujen regressiomallien perusteella. Aiemmissa luvuissa esitettyjen lämpökarttojen, paino-kulutuskuvaajien sekä lämpötila-kulutuskäyrien pohjalta määritettiin kullekin keliluokalle (kuiva, märkä ja sohjokeli) energiankulutusta kuvaavat approksimaatiofunktiot. Mallinnuksessa arvioitiin massan ja lämpötilan yhteisvaikutusta. Erityisesti huomioitiin tien pinnan fysikaalinen käyttäytyminen eri olosuhteissa. Kuivalle kelille sovitettiin toisen asteen regressiomalli lämpötilan suhteen, joka vastaa havaittua kulutuksen epälineaarista pienenemistä lämpötilan noustessa sekä vierintävastuksen lievää kasvua äärilämpötiloissa. Kuivan kelin energiankulutusmalli on:

$$E_{\text{dry}}(M,T) = 107 + 1.71\,M - 1.0\,T, \tag{7}$$

missä M on ajoneuvon kokonaismassa (t kg), T ympäristön lämpötila (°C) ja E energiankulutus (kWh/100 km). Märän kelin mallinnuksessa hyödynnettiin havaintoa, jonka mukaan pakkasella sateen olomuoto on lunta eikä vesisadetta, joten vesikalvon aiheuttama vierintävastus ilmenee käytännössä vain plussakeleillä. Tämän vuoksi märän kelin malliin lisättiin lämpötilasidonnainen termi vain $T > 0$°C tilanteissa:

$$E_{\text{wet}}(M,T) = E_{\text{dry}}(M,T) + \begin{cases} 0, & T \le -5, \\ 4 + 0.6\,T, & T > -5. \end{cases} \tag{8}$$

Sohjokeli mallinnettiin erillisellä, vain rajatulla lämpötila-alueella toimivalla funktiolla. Koska sohjo esiintyy käytännössä ainoastaan lämpötila-alueella noin $-1\,^{\circ}\mathrm{C}$–$1\,^{\circ}\mathrm{C}$, energiankulutus määriteltiin kahdella eri mallilla:

$$E_{\text{slush}}(M,T) = \begin{cases} 1.25\big(85 + 2.25\,M\big) \;-\; 2T^2, & -1 \le T \le 1, \\ 85 + 2.25\,M \;-\; 0.5\,T, & T < -1 \text{ tai } T > 1, \end{cases} \tag{9}$$

Ensimmäinen lauseke kuvaa sohjon aiheuttamaa lisävastusta, joka on suurimmillaan lähellä $T = 0^{\circ}\mathrm{C}$ ja pienenee nopeasti, kun olosuhteet muuttuvat joko pakkaskeliksi tai lämpimäksi vesikeliksi. Tämän lämpötilaikkunan ulkopuolella kulutus lähestyy märkäkelin arvoja, minkä vuoksi käytettiin märkäkelille sovitettua lineaarista mallia.

5.4.2 Operointikortin rakenne

Operointikortti esitetään värillisinä taulukoina, joissa pystyakselina on ympäristön lämpötila välillä $-30\,^{\circ}\mathrm{C}$–$30\,^{\circ}\mathrm{C}$ ja vaaka-akselilla massa välillä 20–70 t. Kunkin solun arvo on laskettu funktion 7–9 mukaisesti käytetyn energiankulutuksen perusteella.

Lämpötila (°C) \ Yhdistelmän kokonaismassa (t)	20	30	40	50	60	70
−30	171	188	205	223	240	257
−25	166	183	200	218	235	252
−20	161	178	195	213	230	247
−15	156	173	190	208	225	242
−10	151	168	185	203	220	237
−5	146	163	180	198	215	232
0	141	158	175	193	210	227
5	136	153	170	188	205	222
10	131	148	165	183	200	217
15	126	143	160	178	195	212
20	121	138	155	173	190	207
25	116	133	150	168	185	202
30	111	128	145	163	180	197

Kuva 11: Operointikortti kuivalle kelille. Energiankulutus kWh/100 km lämpötilan ja massan funktiona.

Lämpötila (°C) \ Yhdistelmän kokonaismassa (t)	20	30	40	50	60	70
−30	171	188	205	223	240	257
−25	166	183	200	218	235	252
−20	161	178	195	213	230	247
−15	156	173	190	208	225	242
−10	151	168	185	203	220	237
−5	146	163	180	198	215	232
0	145	162	179	197	214	231
5	143	160	177	195	212	229
10	141	158	175	193	210	227
15	139	156	173	191	208	225
20	137	154	171	189	206	223
25	135	152	169	187	204	221
30	133	150	167	185	202	219

Kuva 12: Operointikortti märälle kelille. Energiankulutus kWh/100 km lämpötilan ja massan funktiona.

Lämpötila (°C) \ Yhdistelmän kokonaismassa (t)	20	30	40	50	60	70
−30	145	168	190	213	235	258
−25	143	165	188	210	233	255
−20	140	163	185	208	230	253
−15	138	160	183	205	228	250
−10	135	158	180	203	225	248
−5	133	155	178	200	223	245
−1	161	189	217	245	273	301
0	163	191	219	247	275	303
1	161	189	217	245	273	301
5	128	150	173	195	218	240
10	125	148	170	193	215	238
15	123	145	168	190	213	235
20	120	143	165	188	210	233
25	118	140	163	185	208	230
30	115	138	160	183	205	228

Kuva 13: Operointikortti sohjokelille. Energiankulutus kWh/100 km lämpötilan ja massan funktiona.

Operointikortit osoittavat, että massan, lämpötilan ja kelin yhteisvaikutukset ovat merkittäviä erityisesti suurilla kokonaismassoilla ja nollakelien epäsuotuisissa olosuhteissa. Kuivalla kelillä kulutus noudattaa lähes lineaarista massariippuvuutta ja hyötyy selvästi lämpötilan noususta aina noin $+20^{\circ}$C saakka. Märällä kelillä kulutus kasvaa erityisesti plussakeleillä veden muodostaman vierintävastuksen vuoksi, mutta pakkasella märkyys ei lisää kulutusta, koska tienpinta ei muodosta vesikerrosta. Sohjo-olosuhteissa kulutus on korkeimmillaan $-1\,^{\circ}$C–$1\,^{\circ}$C lämpötila-alueella, jolloin loskan mekaaninen vastus on suurimmillaan. Esitetty operointikortti soveltuu suuntaa antavasti käytännön ajojärjestelyyn ja energiabudjetointiin, tarjoten määrällisesti perustellun arvion kulutuksesta laajalla olosuhdealueella.

On tärkeää huomata, että operointikortin funktiot ja sitä kautta muodostetut energiankulutusarviot perustuvat yhden ajoneuvoyhdistelmän 11 kuukauden telematiikka-aineistoon. Vaikka aineisto on laaja ja kattaa merkittävän määrän erilaisia ajosuoritteita ja sääolosuhteita, mallit kuvaavat ennen kaikkea käytetyn eHDV-yhdistelmän (Scania 40R E B6x2-perävaunu-

kokoonpanon) ominaiskäyttäytymistä. Tästä seuraa kaksi rajoitusta: ensinnäkin operointikorttia ei tule sellaisenaan yleistää kaikkiin sähköisiin raskaisiin ajoneuvoihin, sillä kulutukseen vaikuttavat myös aerodynamiikka, rengastus, akuston hallintastrategiat sekä voimansiirron hyötysuhteet, jotka vaihtelevat ajoneuvomallien välillä. Toiseksi sää- ja keliluokkien vaikutus perustuu havaittuihin keskimääräisiin olosuhteisiin, eikä malleissa erotella esimerkiksi saderintamien intensiivisyyttä, lumipoljennetta tai tien hoitoluokkaa, jotka voivat vaikuttaa kulutukseen hetkellisesti huomattavasti. Näistä rajoitteista huolimatta malleja voidaan pitää luotettavina ja käytännönläheisinä ensiarvioina energiankulutuksesta tavallisissa ajo- ja sääolosuhteissa vastaavanlaisille raskaille sähköajoneuvovälineille.

6 Keskustelu

Keskeistä tarkastelussa on havaintojen epäsymmetrinen jakauma eri lämpötiloissa. Suhteuttamalla massan, lämpötilan ja kelin vaikutukset aiempaan kirjallisuuteen osoitetaan, missä kohdin raskaan maantiekaluston käyttäytyminen poikkeaa henkilöautoista ja busseista. Tämän jälkeen tarkastellaan epälineaarisuuksia ja ääriolosuhteita, erityisesti nollakelien loskariskiä, sekä perustellaan, miksi pelkkiin keskiarvomalleihin nojaava suunnittelu on riittämätöntä erityisesti sähköisen raskaan liikenteen osalta. Kolmanneksi esitetään käytännön ohjeita reitti- ja lataussuunnitteluun sekä kuvataan, miten luvun 5 regressioista voidaan muodostaa operoinnissa käytettäviä korjauskertoimia. Tämän jälkeen tarkastellaan, missä määrin tulokset voidaan yleistää eri nopeuksille, reiteille ja kuormitusjakaumille. Lopuksi kootaan työn keskeiset rajoitteet ja esitetään suosituksia jatkotutkimukselle. Kaikissa tulkinnoissa pysytään havaintoaineiston kattavuuden rajoissa, eikä johtopäätöksiä venytetä alueille, joista ei ole havaintoja (erityisesti lämpötiloissa alle $-10\,^{\circ}\mathrm{C}$). Tilanteita, joissa ulkolämpötila alittaa noin $-10\,^{\circ}\mathrm{C}$, on niukasti. Aineisto kuvaa raskaan akkusähköisen täysperävaunuyhdistelmän todellista käyttöä Suomen ja Ruotsin tieverkolla yhdentoista kuukauden ajalta, kattaen tyypilliset talvi-, kevät- ja kesäolosuhteet Lounais-Suomessa. Tulokset osoittavat, että erityisesti loskakelissä ja märällä tiellä kulutus poikkeaa merkittävästi kuivista olosuhteista riippumatta kuormituksesta. Lämpimämmässä säässä vaihtelu sen sijaan tasaantuu sekä apukuormien vähenemisen että vierintä- ja roiskevastusten pienenemisen seurauksena. Tämä havainto täsmentää perinteistä "kylmä lyhentää kantamaa-narratiivia korostamalla tienpinnan tilan ensisijaisuutta nollan asteen tuntumassa: kulutuspiikki ei ole pelkästään lämpötilailmiö, vaan keliluokkaan kytkeytyvä vastusten kasvu.

6.1 Tulkinta suhteessa kirjallisuuteen

Tulokset vahvistavat, että ajoneuvon kokonaismassa, ulkolämpötila ja sääolosuhteet ovat keskeiset tekijät raskaan akkusähköisen kaluston energiankulutuksessa ja toimintamatkassa. Havaitut kulutustrendit ovat pääsääntöisesti yhdenmukaisia aiemman sähköajoneuvokirjallisuuden kanssa; kuitenkin vaikutusten suuruus ja keskinäiset suhteet poikkeavat henkilöautoihin ja kaupunkibusseihin verrattuna. Tämä ero johtuu ensisijaisesti massaperusteisten vastusvoimien hallitsevasta roolista energiankulutuksessa sekä siitä, että raskas maantieliikenne toimii vähemmän kontrolloiduissa ja keliltään vaihtelevissa olosuhteissa. Henkilöautotutkimuksissa on toistuvasti osoitettu, että kylmä sää lisää energiankulutusta pääasiassa akuston sisäisen resistanssin ja apukuormien, kuten akuston lämmityksen, matkustamon lämmityksen ja huurteenpoiston kautta (Lee et al., 2024; Yüksel & Michalek, 2015). Näiden vaikutusten suhteellinen osuus on kuitenkin pienempi raskaassa kalustossa, sillä ajoneuvon ilman- ja vierintävastus muodostavat huomattavasti suuremman osan kokonaisenergian kulutukses-

ta. Tästä seuraa, että vaikka absoluuttinen kulutuksen kasvu märässä tai kylmässä säässä on suuri, suhteellinen kulutuksen nousu on usein loivempaa kuin kevyissä ajoneuvoissa. Tämä havainto on linjassa pohjoismaisissa pilottitutkimuksissa tehtyjen arvioiden kanssa, joissa raskaan kuljetuskaluston kantamahäviöt talviolosuhteissa sijoittuvat tyypillisesti 15–30 % välille (Würtz et al., 2024; Gu, Liao & Zhang, 2025). Nollan asteen tuntumassa havaittu kulutushuippu täydentää aiempaa ymmärrystä sähköisten ajoneuvojen talvikäyttäytymisestä. Kirjallisuudessa on yleisesti viitattu kylmän ilman vaikutukseen akuston hyötysuhteeseen ja lämmitystarpeeseen. Kuitenkin tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että kulutuksen äkillinen kasvu nollakelissä liittyy ennen kaikkea tienpinnan laatuun. Sohjon ja veden muodostama pehmeä kerros lisää vierintävastusta ja vesiroiskeiden aiheuttamaa vastusta sekä heikentää renkaiden pyörimistehokkuutta. Tämä ilmiö eroaa fysikaalisesti pelkästä lämpötilan vaikutuksesta, minkä vuoksi eri keliolosuhteet on tarpeen käsitellä selvästi erillisinä tapauksina energiankulutusmalleissa.

Märkyys voi heikentää myös regeneratiivisen jarrutuksen hyötysuhdetta, sillä pienempi kitka renkaan ja tien välillä rajoittaa sähkömoottorin kautta toteutettavissa olevaa jarrutusmomenttia. Kun renkaan ja tien välinen kitka ei riitä välittämään sähkömoottorin tuottamaa hidastusta, joudutaan tukeutumaan mekaanisiin jarruihin. Ajoneuvon konfiguraatiosta riippuen regeneratiivinen jarrutus kohdistuu tyypillisesti vain yhdelle vetävälle akselille, ja erityisesti avoimella tasauspyörästöllä käytännössä vain yhden puolen paripyörä vastaa moottorijarrutuksesta. Mekaaniset jarrut sen sijaan ovat käytettävissä kaikilla akseleilla, jolloin niiden tuottama jarrutusteho on moninkertainen regeneratiiviseen jarrutukseen verrattuna. Tämä johtaa siihen, että märissä ja liukkaissa olosuhteissa jarrutusenergia siirtyy entistä useammin mekaanisille jarruille ja muuttuu hukkalämmöksi sen sijaan, että se palautuisi akkuun. Vaikka järjestelmät kuten tuulilasinpyyhkimet, ohjaustehostin, paineilmajärjestelmä ja apulämmittimet kuluttavat sähköä, niiden vaikutus raskaan ajoneuvon kokonaisenergiankulutukseen on pääsääntöisesti pieni verrattuna ajovastuksiin (vierintä- ja ilmanvastus) tai korkeaan ajomassaan liittyviin kuormituksiin. Ajonvakautus ja luistonesto voivat kuitenkin kasvattaa energiantarvetta epäsuorasti: jos järjestelmät jarruttavat yksittäisiä pyöriä veto- tai luistoneston yhteydessä, ne lisäävät hetkellisesti vierintävastusta ja pienentävät regeneratiivisen jarrutuksen mahdollisuuksia. Näiden vaikutus näkyy kuitenkin selvimmin alhaisissa nopeuksissa ja liukkaissa olosuhteissa, ei normaalissa maantieajossa. Täten pienten sähkölaitteiden ja ajoavustimien rooli korostuu lähinnä hyvin lyhyillä matkoilla, toistuvassa pysähdy–kiihdytys-ajossa tai kevyillä kuormilla, jolloin kokonaiskulutus on muutenkin matala ja pienetkin lisäkuormat muodostavat suuremman suhteellisen osuuden energiankulutuksesta. Tulosten ja kirjallisuuden välinen vertailu osoittaa, että säätekijöiden vaikutus raskaassa kalustossa on voimakkaasti kontekstisidonnainen. Tämä tarkoittaa sitä, että saman sademäärän tai lämpötilan energiavaikutus voi vaihdella huomattavasti toimintaympäristön

mukaan. Esimerkiksi tien uraisuus, vedenpoistokyky, liikennemäärä, kuljettajan ajotapa, ajonopeus ja edeltävät säätilat määrittävät, kuinka paljon vettä tai sohjoa renkaan on tosiasiallisesti siirrettävä. Tämän vuoksi sateen intensiteetti ei yksin riitä kuvaamaan energiankulutusta, vaan vaikutus syntyy useiden samanaikaisten olosuhdetekijöiden yhteisvaikutuksesta. Nollakelin ja loskan aiheuttama kulutuslisä on merkittävä erityisesti silloin, kun tienpinta pysyy pitkään vetisenä ja lämpötila vaihtelee nollan molemmin puolin. Toisaalta kuivassa pakkasessa energiankulutus voi olla alhaisempi kuin nollakelissä, vaikka akuston hyötysuhde heikkenisi, sillä vierintävastus ja vedenpoistotarve pienenevät. Näin ollen tulokset tukevat näkemystä, jonka mukaan tienpinnan olosuhteet voivat vaikuttaa energiankulutukseen jopa enemmän kuin ilman lämpötila yksinään. Tämä havainto korostaa tarvetta kehittää sääperusteisia energiankulutusmalleja, joissa lämpötilan ja kelin vaikutus käsitellään erillisinä mutta toisiaan vahvistavina tekijöinä.

Nollakelin kulutushuipun selittäminen tienpinnan tilan kautta täydentää aiempaa kirjallisuutta, jossa kylmän haitta on usein tulkittu pääosin akku- ja lämmitystekniseksi ilmiöksi. Tässä tutkimuksessa vaikutus kytketään nimenomaisesti fysikaalisiin tienpintaolosuhteisiin perustuvaan vierintävastusmalliin, jossa massan, lämpötilan ja keliluokan yhteisvaikutus selittää kulutuksen nousun.

6.2 Epälineaarisuus ja ääriolosuhteet

Tulosten perusteella ajoneuvon energiankulutuksen riippuvuus kokonaismassasta ja lämpötilasta ei ole täysin lineaarinen, vaikka keskimääräinen trendi voidaan kuvata lineaarisella mallilla koko tarkastelualueella. Epälineaarisuus korostuu erityisesti kylmissä ja märissä olosuhteissa, joissa useat fysikaaliset ja operatiiviset tekijät vaikuttavat samanaikaisesti energiankulutukseen. Tämä näkyy erityisesti raskailla massoilla nollan asteen läheisyydessä, missä energiankulutuksen kasvu on selvästi jyrkempää kuin lämpötilan perusteella lineaarisesti ennustettu. Vastaava ilmiö havaitaan myös lämpötilan ja sateen yhteisvaikutuksessa: kulutus ei kasva tasaisesti sademäärän funktiona, vaan tietyn kynnyksen jälkeen, kun tienpinnan vesikalvo muuttuu jatkuvaksi tai osittain sohjoiseksi, kulutus nousee äkillisesti. Lisäksi tien geometrialla ja veden poistumisella on merkitystä. Urautuneella tiellä vesi kerääntyy ajouriin, jolloin renkaiden on jatkuvasti syrjäytettävä nestettä, mikä lisää vierintä- ja roiskevastuksia. Vilkkaassa liikenteessä veden siirtyminen edellä kulkevien ajoneuvojen vaikutuksesta voi kuitenkin tilapäisesti vähentää yksittäisen ajoneuvon kohtaamaa vesimäärää ja siten energiankulutusta. Auringonsäteilyn vaikutus voi myös muokata sateen ja tienpinnan olomuodon välistä suhdetta. Kirjallisuuden perusteella kirkkaassa säässä tienpinnan lämpötila voi nousta ilman lämpötilaa korkeammaksi, mikä nopeuttaa veden haihtumista ja vähentää loskan muodostumisen todennäköisyyttä. Tätä ilmiötä ei voitu suoraan havaita tässä aineistossa, mutta se tarjoaa yhden selitysmekanismin sille, miksi sateen intensiivisyys ja

energiankulutus eivät aina esiinny lineaarisessa suhteessa lämpötilaan nähden. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus selittää, miksi loskakeli aiheuttaa voimakkaan, mutta epäsäännöllisen kulutushuipun, jota yksinkertainen sademäärään tai lämpötilaan perustuva malli ei pysty kuvaamaan tarkasti.

Havaittu käyttäytyminen noudattaa pääosin lineaarista suhdetta lämpötilan ja energiankulutuksen välillä, erityisesti kuivissa olosuhteissa ja kevyillä kuormilla. Sohjoisissa ja vetisissä nollakelin olosuhteissa renkaan täytyy syrjäyttää paitsi vettä myös jäätyneitä vesi-jääseoksia, joilla on viskoplastisia ominaisuuksia eli sekä nesteen että heikon kiinteän aineen käyttäytymistä. Tällöin renkaan eteen muodostuva materiaalipatti kasvaa nopeuden myötä, mikä voi lisätä vierintävastusta nopeammin kuin lineaarisessa mallissa oletetaan. Tämä mekanismi voi teoriassa tuottaa epälineaarista tai jopa jyrkästi kiihtyvää kulutuskäyttäytymistä, mutta sen esiintyminen edellyttää olosuhteita, joita tässä tutkimuksessa oli vain satunnaisesti eikä riittävän laajasti. Kuivalla kelillä kulutus kasvoi massan funktiona lineaarisesti, ja märän kelin kulutuslisä oli suhteellisen vakio eri massaluokissa. Teoreettisesti renkaan kontaktipinnan kasvu ja syrjäytettävän vesimäärän lisääntyminen voisivat voimistaa märän kelin lisävastusta raskailla yhdistelmillä, mutta tätä ei aineistossa havaittu johdonmukaisesti.

Lämpökartasta saatavan analyysin perusteella loskakeli muodostaa poikkeukselliset kulutusolosuhteet, joissa energiankulutus kasvaa merkittävästi verrattuna kuivaan ja kylmään pakkaskeliin. Nollan asteen ympäristössä kulutus on tyypillisesti 40–50 % suurempaa kuin kuivassa pakkasessa, erityisesti raskailla yhdistelmillä. Ilmiö ei johdu ainoastaan lämpötilasta, vaan se on myös sidoksissa tienpinnan vetiseen ja osin sohjoiseen tilaan, mikä lisää vierintävastusta ja heikentää voimansiirron hyötysuhdetta. Käytännön näkökulmasta pienetkin lämpötilan muutokset nollan ympärillä voivat aiheuttaa merkittäviä eroja energiantarpeessa ja siten vaikuttaa suoraan toimintamatkan ennustettavuuteen. Käytännön sovelluksissa, kuten reitti- ja lataussuunnittelussa, on välttämätöntä huomioida keliluokan vaihtelu nimenomaisesti, jotta energiapuskurit ja toimintamatka-arviot eivät perustu tilastollisesti "laimennettuun"normaaliolosuhteeseen. Loskaisissa olosuhteissa havaittu jyrkkä kulutuksen kasvu viittaa kynnysilmiöön: kun tien pinnalle kertyvän vesikalvon tai sohjon paksuus ylittää tietyn rajan, vierintävastus kasvaa epälineaarisesti ja toimintamatka lyhenee suhteettomasti. Tämän vuoksi mallit, joissa sade esiintyy vain intensiteettinä (mm/h), jäävät vajaiksi ilman selkeästi määriteltyä keliluokkaa tai tien vedenpoistokykyä kuvaavaa tekijää.

6.3 Operointiin kohdistuvat käytännön vaikutukset

Tulokset osoittavat, että lämpötilan, kuorman ja kelin yhteisvaikutus heijastuu suoraan ajoneuvon käytettävyyteen ja energianhallintaan, mikä tekee sää- ja massariippuvaisesta suunnittelusta olennaisen osan sähköisen raskaan kaluston operointia. Reitti- ja aikataulusuunnit-

telussa tämä tarkoittaa, että raskaasti kuormatut ajot tulisi mahdollisuuksien mukaan aikatauluttaa lämpimämpiin ja kuiviin ajankohtiin, kun taas loskakelillä tai jatkuvan sateen aikana on varattava suurempi energiapuskurin osuus tai vaihtoehtoisesti lisättävä lataustaukojen määrää. Märissä olosuhteissa ajonopeuden hallinta nousee keskeiseksi: maltillisempi nopeus vähentää roiskevastusta ja tasoittaa kulutuksen hajontaa, vaikka se pidentää kokonaisaikaa. Latausten suunnittelun kannalta lämpötilan ja kelin vaikutukset korostavat tarvetta hallita akun lämpötilaa ennakoivasti, jotta latausteho ja energiatehokkuus säilyvät optimaalisina eri olosuhteissa. Akuston sekä ajoneuvon ohjaamon esilämmitys ennen ajoa ja varikkolatauksen hyödyntäminen lämpimissä sisätiloissa voivat pienentää akun sisäisiä häviöitä ja parantaa lataushyötysuhdetta, erityisesti nollakelien ja pakkassään siirtymävaiheissa. Vastaavasti kylmänä tehtyjen välilatausten energiatehokkuus on usein heikompi verrattuna esilämmitettyyn akkuun, mikä tulee huomioida reittikohtaisissa lataussuunnitelmissa (**??**). Käytännön energiabudjetointia varten Tulokset-luvussa (kuvat 11–13) esitettiin yksinkertaistetut operointikorttit, jotka kokoavat tutkimuksen regressioanalyysien perusteella johdetut korjauskertoimet lämpötilan, kuorman ja keliluokan mukaan. Kortti mahdollistaa energiantarpeen nopean arvioinnin ilman monimutkaista simulointia ja soveltuu siten sekä kuljetusten reitti- ja lataussuunnitteluun että kaluston päivittäiseen hallintaan. Operointikortti perustuu havaintoon, että lämpötilan ja toimintamatkan välinen riippuvuus on pääosin lineaarinen koko tarkastellulla alueella. Märän ja loskaisen kelin olosuhteet kuitenkin poikkeavat tästä lineaarisuudesta, minkä vuoksi niille on määritetty erillinen korjaustermi. Näin muodostettu malli mahdollistaa sään, massan ja lämpötilan vaikutusten huomioimisen yhdellä yhtenäisellä menettelyllä, jota voidaan käyttää käytännön energiabudjetoinnin ja operatiivisen päätöksenteon tukena.

Koska vierintävastusteho P_{rr} skaalautuu akselikohtaisen kuorman kautta, epätasainen painonjako voi lisätä vierintähäviöitä useita prosentteja erityisesti >50 t massoilla. Käytännössä tämä tarkoittaa: (i) raskaita yksikköjä ei tule keskittää yhdelle akseliryhmälle, (ii) nostotelin käyttöä kevyillä kuormilla voidaan hyödyntää vain akselipainorajat huomioiden, ja (iii) renkaiden paineiden optimointi on syytä sitoa kuormaan ja keliin. Nämä toimenpiteet ovat teknologisesti neutraaleja ja vaikuttavat suoraan energiabudjettiin.

6.4 Ulkoistettavuus ja yleistettävyys

Tutkimuksen tulokset ovat ensisijaisesti yleistettävissä maantiepainotteiseen raskaan kaluston käyttöön, jossa ajonopeudet ja kuormat vastaavat tyypillisiä pitkän matkan kuljetuksia Pohjoismaiden olosuhteissa. Tällaisessa toimintaympäristössä kokonaismassan, lämpötilan ja kelin vaikutukset energiankulutukseen ovat todennäköisesti samansuuntaisia myös muissa täyssähköisissä yhdistelmissä. Tulosten perusteella ajoneuvon massan vaikutus on lähes lineaarinen, kun taas sään ja lämpötilan yhteisvaikutus heijastaa nimenomaan pohjoisten ilmastovyöhykkeiden vaihtelua, jossa nollakelien märät olosuhteet ovat yleisiä. Yleistettävyys

heikkenee ympäristöissä, joissa ajoprofiili poikkeaa merkittävästi maantieliikenteestä. Kaupunkimaisessa ajossa toistuvat kiihdytys- ja jarrutussyklit, alhaiset keskinopeudet sekä suurempi lisäkuormien osuus muuttavat energiatasapainoa siten, että lämpötilan ja kelin vaikutus jää suhteellisesti pienemmäksi. Samoin mäkisessä maastossa ja jyrkässä topografiassa energiatase määräytyy enemmän potentiaalienergian vaihteluista kuin ympäristötekijöistä.

On myös huomattava, että tutkimusaineisto perustuu yhden ajoneuvon 11 kuukauden telematiikkadatasta. Aineisto kattaa laajan joukon lämpötila- ja keliolosuhteita, mutta havaintojen rajoitteisuus tarkoittaa, että yksittäiset säätilat, harvinaiset keliyhdistelmät ja äärimmäiset kuormitustilanteet voivat olla aliedustettuina. Tämä rajoittaa tulosten tilastollista kattavuutta ja korostaa tarvetta varovaiselle tulkinnalle, erityisesti silloin, kun tuloksia pyritään siirtämään erilaisiin ajoympäristöihin, ajoneuvotyyppeihin tai kuljettajakäyttäytymisiin. Yleistettävyys on vahvin maantieteellisessä perusprofiilissa, jossa ajonopeus on vakaa ja siirtymät ovat pitkiä. Mäkisessä maastossa energiankulutusta määrää suurempi osuus potentiaalienergian vaihtelusta, jolloin ympäristötekijöiden ja kelin suhteellinen vaikutus pienenee. Kaupunkisyklissä kiihdytysten, jarrutusten ja apujärjestelmien suurempi osuus kokonaisenergiasta muuttaa kulutuksen rakennetta, minkä vuoksi tässä tutkimuksessa havaitut kelitrendit eivät siirry suoraan ilman erillistä kalibrointia. Näin ollen tuloksia ei tule suoraan ekstrapoloida esimerkiksi kaupunkibussien tai jakeluliikenteen käyttöön ilman lisäkalibrointia. Siirrettävyys muihin ajoneuvotyyppeihin riippuu erityisesti ajoneuvon aerodynamiikasta, rengastuksesta ja voimansiirron mitoituksesta. Suurimassaisissa sähkökuorma-autoissa, joiden aerodynaaminen pinta-ala ja ajonopeus ovat lähellä tässä tarkasteltua yhdistelmää, kulutustrendit ovat todennäköisesti vertailukelpoisia. Sen sijaan kevyempiin ajoneuvoluokkiin tai linja-autoihin vaikutukset eivät skaalaudu suoraan, sillä apujärjestelmien energiankulutus ja lämpökuormat muodostavat niissä suuremman suhteellisen osuuden. On myös huomattava, että tutkimuksen aineisto perustuu yhden ajoneuvon operointiin. Vaikka havaintoja on kerätty laajasti eri sää- ja kuormitusolosuhteissa, yleistettävyys muihin reitteihin, ajonopeusprofiileihin ja kuljettajakohtaisiin toimintatapoihin on rajallista. Tuloksia tulisi siksi tarkastella osana kasvavaa kokeellisen tutkimuksen näyttöä, joka kuvaa raskaiden akkusähköajoneuvojen energiankulutuksen herkkyyttä ympäristöolosuhteille, mutta ei vielä kata kaikkia käyttötilanteita. Yleistettävyys on vahvin maantien perusprofiileissa (vakaa nopeus, pitkät siirtymät); kaupunkisyklissä ja jyrkässä topografiassa kelivaikutus jää suhteellisesti pienemmäksi, mikä edellyttää erillistä kalibrointia.

6.5 Rajoitteet ja epävarmuustekijät

Tutkimuksen tulokset tarjoavat kuvan yhden raskaan akkusähköyhdistelmän energiankulutuksesta todellisessa operoinnissa. Kuitenkin niihin liittyy useita rajoitteita, jotka on otettava huomioon tulkinnassa ja mallien soveltamisessa. Merkittävin rajoite liittyy aineiston raken-

teeseen: analyysi perustuu yhden ajoneuvon pitkäkestoiseen seurantaan tietyllä kuljetusreitillä. Tämä mahdollistaa yksityiskohtaisen tarkastelun, mutta rajoittaa yleistettävyyttä muihin reitteihin, ajonopeuksiin ja kuljettajakohtaisiin toimintatapoihin. Erityisesti kuljettajan ajotapa, kuorman jakautuminen sekä ajoajankohdan sää voivat aiheuttaa vaihtelua, jota ei voida täysin eristää mallinnuksessa. Energiankulutuksen määritys perustui akun SOC-muutokseen, joka muunnettiin energiaksi olettamalla akun kapasiteetin pysyvän vakiona. SOC on ajoneuvojärjestelmän tuottama estimaatti käytettävissä olevasta energiasta, mutta sen ja todellisen energiasisällön välinen suhde ei ole täysin yksikäsitteinen. Akun jännite–SOC-käyrä on epälineaarinen, ja kylmä lämpötila sekä suuret purkuvirrat pienentävät hetkellisesti käytettävissä olevaa kapasiteettia. Näiden ilmiöiden vuoksi SOC-muutokseen perustuva energiankulutus voi joissakin yksittäisissä ajojaksoissa poiketa todellisesta akusta otetusta energiasta, jos akku on ollut epätasapainossa lämpötilan tai kuormituksen suhteen. Vastaavasti akun sisäisen resistanssin muutokset eri lämpötiloissa eivät sisälly laskentamalliin, mikä voi vaikuttaa kulutuksen ja lämpötilan välisen riippuvuuden tarkkuuteen.

Ajoneuvon kokonaismassa estimoitiin ilmajousituksen paineantureista johdetun datan perusteella, mikä on yleinen mutta rajoitetun tarkkuuden menetelmä. Dynaamiset tekijät, kuten tien kaltevuus, sivuttaisnoja tai lumen ja jään kertyminen ajoneuvon rakenteisiin, voivat vaikuttaa painearvoihin ja siten massaestimaatin tarkkuuteen. Nämä virhelähteet lisäävät hajontaa erityisesti välimassaluokissa ja voivat osittain selittää, miksi mallien selityskertoimet jäävät maltillisiksi. Tarkempi massa-arvio edellyttäisi kalibrointia kuormatietojen tai akselikohtaisten punnitusten avulla. Sääluokitus toteutettiin perusanalyysissa kaksiluokkaisena (kuiva-märkä), jolloin tavoitteena oli erottaa märkien olosuhteiden keskimääräinen vaikutus energiankulutukseen verrattuna kuiviin keleihin. Tämä jaottelu ei pyri kuvaamaan sateen tai tienpinnan olosuhteiden koko vaihtelua, vaan tarjoaa yksinkertaisen vertailupohjan keliluokkien välisille eroille. Tarkemmassa analyysissa sateen vaikutusta tarkasteltiin erikseen jatkuvana muuttujana (mm/h), näin voidaan nähdä, miten kulutus muuttuu sateen intensiteetin kasvaessa aina loskakeleihin asti, vaikka perusluokitus itsessään ei tee erottelua kevyen sateen, jatkuvan vesisateen ja loskan välillä. Tämän seurauksena nollakelien ympärillä esiintyvä kulutuspiikki voi olla todellisuudessa vielä jyrkempi kuin mallinnettu.

Fysikaalista kulutusmallia käytettiin tässä työssä ainoastaan viitepisteenä havainnollistamaan, miten perusajovastukset muuttuvat lämpötilan ja massan vaihtelun myötä. Malli olettaa vakionopeuden, kuivan kelin sekä vakiot vierintävastus- ja ilmanvastuskertoimet, eikä sitä kalibroitu mitattuun dataan tai sovitettu parametreiltaan. Työssä esitetty viitekäyrä kuvaa pelkästään mallin teoreettista käyttäytymistä ideaalitapauksessa; täydellinen parametrien määritys ja mallin sovitus havaintoaineistoon olisi vaatinut erillisen mallinnusosuuden. Tätä lähestymistapaa ei tule soveltaa märkiin olosuhteisiin, sillä malli kuvaa nimenomaan kuivassa ke-

lissä vallitsevia vastusvoimia. Märissä olosuhteissa vierintävastus ja apukuormat kasvavat selvästi, eikä kuivalle kelille sovitettu malli siten kykene kuvaamaan todellista energiankulutusta. Oikea tulkinta ei siis ole, että malli aliarvioisi kulutusta, vaan että sitä ei ole tarkoitettu märän kelin ennustamiseen. Raskaissa kuormissa havaittu mitatun ja mallinnetun kulutuksen ero tukee käsitystä, että staattiset mallit eivät kuvaa ympäristöherkkyyttä riittävän tarkasti. Parannuksia voitaisiin saavuttaa dynaamisemmilla ajoneuvomalleilla, joissa otetaan huomioon nopeusprofiilin, tien kaltevuuden ja keliluokan vaikutus vierintävastukseen ja apukuormiin. Lopuksi on syytä todeta, että havaintoja yli 25 °C lämpötiloista tai alle −10 °C pakkasista on vähän. Näin ollen analyysi kuvaa ennen kaikkea Lounais-Suomen ja Etelä-Ruotsin tyypillisten vaihtelevien sääolosuhteiden vaikutuksia, mutta ei kata koko vuoden aikavaihtelua. Jatkossa laajempi, useita ajoneuvoja ja kesäkauden ajoja kattava aineisto mahdollistaisi sekä mallien validoinnin että sääriippuvuuksien paremman erottelun.

6.6 Jatkokehitys

Tämän tutkimuksen perusteella jatkotyön keskeinen painopiste tulisi olla fysikaalisen mallin muodostamisessa ja mittausdatan sovittamisessa siihen. Nykyinen regressiopohjainen lähestymistapa tarjoaa selkeän ja tulkittavan kuvan lämpötilan, massan ja kelin vaikutuksista, mutta se olettaa riippuvuuksien olevan pääosin lineaarisia ja erillisiä. Todellisuudessa ympäristötekijät, ajonopeus ja kuormitus ovat usein vuorovaikutuksessa keskenään, mikä edellyttää monimuuttujaisia ja epälineaarisia mallinnusmenetelmiä.

Mallien tarkkuutta voidaan parantaa lisäämällä uusia selittäviä muuttujia, kuten tuulennopeus ja -suunta, tien kaltevuus, topografia, ilman kosteus sekä säteilyolosuhteet. Näiden muuttujien yhdistäminen nykyiseen ajoneuvodataan mahdollistaisi paremman ymmärryksen siitä, milloin kulutuksen vaihtelu johtuu ulkoisista tekijöistä eikä ajoneuvon sisäisistä ominaisuuksista. Erityisen hyödyllistä olisi erottaa aerodynaamiset ja vierintävastusperäiset kulutuslisät sekä mallintaa niiden riippuvuus tienpinnan olosuhteista. Tämä edellyttää tarkempaa rengas- ja akselipainodataa sekä mahdollisesti rengaspaineiden ja lämpötilojen jatkuvaa seurantaa. Sateen ja tienpinnan kosteuden kuvaamiseen tarvitaan nykyistä tarkempia luokituksia. Työssä käytetty kuiva–märkä -jaottelu on perusteltu ensimmäinen lähestymistapa, mutta sen laajentaminen esimerkiksi sateen intensiteettiin ja tien pinnan vedenpoistokykyyn mahdollistaisi keliriippuvuuden voimakkuuden tarkemman arvioinnin. Samoin nollakelien ympäristössä loskan viskoelastisen käyttäytymisen mallintaminen fysikaalisena prosessina voisi parantaa kulutusennusteiden tarkkuutta.

Laajempi aineisto useista ajoneuvoista ja eri vuodenaikoina mahdollistaisi mallien validoinnin sekä sääherkkyyden arvioinnin eri ajotyypeissä. Erityisen tärkeää olisi sisällyttää kesäkauden olosuhteet ja korkeat lämpötilat, jotta voidaan arvioida koko vuoden energiankulu-

tusprofiilia ja kantamavaihtelua. Yhteistyö kuljetusyritysten ja ajoneuvovalmistajien kanssa voisi tuottaa pitkäkestoisia, standardoidulla mittaustekniikalla kerättyjä tietoaineistoja, jotka parantavat mallien luotettavuutta ja mahdollistavat vertailun eri kalustoluokkien välillä. Käytännön sovellusten osalta seuraava askel olisi analyysin tuloksiin perustuvan dynaamisen operointityökalun kehittäminen. Tällainen järjestelmä voisi yhdistää reaaliaikaisen säädatan, reittiprofiilit ja ajoneuvon kuormitustiedot, ja tuottaa kuljettajalle sekä reitti- että lataussuunnittelun tueksi ennakoivan energiankulutusarvion. Mallien tuloksista johdettavat korjauskertoimet niin sanottu ”operointikortti” voidaan siten integroida osaksi käytännön päätöksentekoa, jolloin sää-, massa- ja lämpötilavaikutukset voidaan huomioida automaattisesti osana päivittäistä kuljetussuunnittelua.

7 Johtopäätökset

Tässä työssä analysoitiin sähköisen raskaan ajoneuvon energiankulutusta pohjoismaisissa olosuhteissa yhdistämällä telematiikka- ja sääaineisto. Tarkastelun kohteena oli, kuinka ympäristön lämpötila, tienpinnan märkyys sekä ajoneuvon kokonaismassa vaikuttavat energiankulutukseen ja saavutettavaan toimintamatkaan todellisessa maantiekuljetuksessa. Tutkimus yhdisti empiirisen datan analyysin ja yksinkertaisen fysikaalisen vertailumallin, jonka avulla voitiin arvioida mallien selitysvoimaa ja käytännön sovellettavuutta. Työn tavoitteena oli tuottaa systemaattinen ja määrällisesti perusteltu kuva sähköisen raskaan liikenteen energiankäytön vaihtelusta pohjoisissa sääolosuhteissa sekä tunnistaa keskeiset tekijät, jotka vaikuttavat ajoneuvon energiatehokkuuteen ja toimintamatkaan. Tulokset osoittavat, että ajoneuvon massa, lämpötila ja keliluokka selittävät yhdessä merkittävän osan kulutuksen vaihtelusta, kuitenkin niiden vaikutukset eivät ole lineaarisia. Erityisesti nollakelien loska ja märkyys muodostavat poikkeuksellisen toimintaympäristön, jossa kulutus kasvaa huomattavasti enemmän kuin lämpötilan perusteella voitaisiin ennakoida.

Tutkimus täydentää aiempaa kirjallisuutta tarjoamalla kokeellista tutkimuksen näyttöä raskaiden sähköajoneuvojen energiankulutuksesta reaalisessa operoinnissa ja osoittamalla, miten sääolosuhteiden, kuorman ja apukuormien yhteisvaikutus määrittää energiatehokkuuden vaihtelua. Tuloksia voidaan hyödyntää sekä kuljetusyritysten reitti- ja lataussuunnittelussa että mallipohjaisessa infrastruktuurisuunnittelussa, jossa tarvitaan realistisia arvioita energiantarpeesta vaihtelevissa sää- ja kuormitusolosuhteissa. Seuraavissa alaluvuissa esitetään työn keskeiset havainnot, vastaukset tutkimuskysymyksiin, käytännön suositukset ja tieteellinen kontribuutio sekä arvioidaan rajoitteita ja jatkokehityksen suuntia.

7.1 Keskeiset havainnot

Empiirinen analyysi osoitti, että sähköisen raskaan yhdistelmäajoneuvon energiankulutukseen vaikuttavat merkittävimmin ulkolämpötila, tienpinnan olosuhteet ja ajoneuvon kokonaismassa. Näiden tekijöiden yhteisvaikutus selittää valtaosan kulutuksen ja toimintamatkan vaihtelusta tarkastellulla aineistolla. Lämpötilan vaikutus osoittautui merkittäväksi ja epälineaariseksi. Kulutus kasvaa merkittävästi kylmenevän sään myötä, mutta suurimmat lisäykset havaittiin nollan asteen ympäristössä, missä tienpinta on usein vetinen tai sohjoinen. Tämä kulutushuippu on selvästi erillinen ilmiö, joka ei johdu ainoastaan akun lämpötilasta tai lämmitysenergian tarpeesta, vaan ennen kaikkea tienpinnan tilasta ja sen vaikutuksesta vierintävastukseen. Kuivassa pakkasessa kulutus oli alhaisempaa, mikä viittaa siihen, että renkaiden ja tien välinen vuorovaikutus on merkittävämpi energiatehokkuuden kannalta kuin pelkkä ilman lämpötila. Märkyys ja sohjo lisäsivät energiankulutusta kaikissa lämpötiloissa, erityisesti nollakelissä ja raskailla kuormilla. Loskakelissä kulutus kasvoi keskimäärin 40–

50 % verrattuna kuivaan pakkaseen. Märkyyden vaikutus oli suhteellisesti voimakkaampi kevyillä kuormilla, kun taas raskaissa yhdistelmissä kulutuslisä oli suurempi absoluuttisesti, mutta loivempi suhteellisesti. Tämä ero selittyy sillä, että suurimman massan aiheuttama vetovastus hallitsee kokonaiskulutusta, jolloin sään vaikutus näkyy suhteessa pienempänä.

Ajoneuvon kokonaismassa vaikutti energiankulutukseen lähes lineaarisesti koko tarkastelualueella. Kuitenkin märissä olosuhteissa kulutuksen kasvu massan suhteen oli jyrkempää kuin kuivalla tiellä. Tämä viittaa siihen, että vierintävastus ei kasva ainoastaan normaalivoiman mukaisesti, vaan myös kosteuden ja tienpinnan rakenteen yhteisvaikutuksesta. Kuivalla tiellä yksinkertainen fysikaalinen malli, joka sisältää vierintä-, ilmanvastus- ja apukuormakomponentit, vastasi hyvin mitattuja mediaaniarvoja, mutta aliarvioi kulutusta raskailla kuormilla sekä kylmissä olosuhteissa. Ero selittyy apukuormien kasvulla ja vierintävastuksen aliarvioinnilla, mikä korostaa mallien kalibroinnin tarvetta. Toimintamatka vaihteli samojen tekijöiden mukaisesti; lämpötilan noustessa ja kelin kuivuessa toimintamatka piteni lähes lineaarisesti. Kylmissä ja märissä olosuhteissa kantama lyheni jopa kolmanneksen verrattuna optimiolosuhteisiin. Kevyillä yhdistelmillä vaihtelu oli suhteellisesti suurempaa, mikä osoittaa, että apujärjestelmien kuorma ja tienpinnan vaikutukset muodostavat merkittävän osuuden kokonaisenergiasta, erityisesti silloin, kun vetovastus on pieni. Tulokset korostavat, että näissä tilanteissa ajoneuvon energiatehokkuutta ei voida kuvata yksinkertaisella lämpötilamallilla, vaan tarvitaan sääluokan ja massan yhteisvaikutuksen huomioivaa lähestymistapaa.

7.2 Vastaukset tutkimuskysymyksiin

TK1: *Miten ympäristön lämpötila vaikuttaa energiankulutukseen ja mikä on lämmönhallinnan rooli?*

Lämpötila vaikuttaa energiankulutukseen sekä mekaanisten että sähköisten ilmiöiden kautta. Suurin kulutuslisä syntyy nollakelien märissä ja sohjoisissa olosuhteissa, joissa vierintävastus kasvaa voimakkaasti ja muodostaa selkeimmin havaittavan lisäkuorman. Pakkasella akuston sisäinen resistanssi kasvaa ja lisää sähköisiä häviöitä, kun taas ohjaamon lämmityksen vaikutus raskaassa kalustossa on suhteellisen pieni. Tyypillinen 5–7 kW lämmitysteho vastaa maantienopeuksilla noin 6–9 kWh/100 km energiankulutusta, mikä on vain muutamia prosentteja yhdistelmän kokonaiskulutuksesta (tyypillisesti 150–200 kWh/100 km). Lämpimissä ja kuivissa oloissa kulutus noudattaa lähes lineaarista trendiä, mutta nollakelien ympärillä syntyy selvä epäjatkuvuus tienpinnan tilan muuttuessa.

TK2: *Kuinka merkittävä on ajoneuvon kokonaismassan vaikutus energiankulutukseen suhteessa ajonopeuteen ja maaston muotoon?*

Kokonaismassa oli tutkimuksessa yksi johdonmukaisimmista energiankulutuksen määräävistä tekijöistä. Kuivissa olosuhteissa kulutus kasvoi massan funktiona lähes lineaarisesti koko tarkastelualueella, mikä vastaa ajoneuvodynamiikan perusperiaatteita. Märällä tiellä tai loskassa gradientti oli kuitenkin jyrkempi, mikä viittaa siihen, että vierintävastus kasvaa normaalivoimaa nopeammin. Tulokset osoittavat, että massan vaikutus hallitsee energiabudjettia erityisesti raskaissa yhdistelmissä, kun taas kevyillä kuormilla apujärjestelmien ja säätekijöiden suhteellinen merkitys korostuu. Maaston vaihtelut ja ajonopeuden vaikutus eivät sisältyneet erillisinä muuttujina analyysiin, mutta niiden voidaan olettaa muuttavan lähinnä kokonaiskulutuksen tasoa, ei sen massariippuvuutta.

TK3: *Miten tienpinnan olosuhteet ja aerodynaamiset tekijät vaikuttavat kulutukseen ja miten vaikutus skaalautuu nopeuden kasvaessa?*

Tienpinnan märkyys ja loskakerros vaikuttivat merkittävästi energiankulutukseen kaikissa lämpötiloissa ja kuormituksissa. Märällä tiellä energiankulutus kasvoi keskimäärin 20–30 % ja loskaisissa olosuhteissa jopa 40–50 % verrattuna kuivaan pakkaskeliin. Aerodynaamisten vastusten muutokset olivat toissijaisia verrattuna tienpinnan vaikutukseen. Vaikka aerodynamiikan osuus voi kasvaa korkeilla nopeuksilla ja voimakkaassa tuulessa, tätä ilmiötä ei ollut mahdollista arvioida tässä aineistossa, joten sen merkitys jää tulkittavaksi aiemman kirjallisuuden perusteella. Tulosten perusteella keliluokka on lähes yhtä merkittävä vaikuttava tekijä kuin lämpötila tarkastellulla massa- ja lämpötila-alueella, ja se tulisi sisällyttää energiankulutusennusteisiin. Laajemmat johtopäätökset esimerkiksi tuulen vaikutuksesta edellyttäisivät erillistä analyysia tai aineistoa, jossa tuulen vaikutusta on analysoitu.

TK4: *Kuinka operatiiviset keinot voivat vähentää energiankulutusta ilman teknisiä muutoksia ajoneuvoon?*

Operatiiviset toimet, kuten esilämmitys, reittien ja latausvälisten optimointi sekä ajonopeuden sopeuttaminen keliolosuhteisiin, tarjoavat keinoja energiankulutuksen hallintaan ilman ajoneuvon teknisiä muutoksia. Akuston esilämmitys kuluttaa energiaa, mutta se voi alentaa ajonaikaista kulutusta kylmissä olosuhteissa, koska lämmin akku toimii korkeammalla hyötysuhteella ja lataus- sekä purkuhäviöt pienenevät. Samaan periaatteeseen perustuen varikkolataus ja sisätilojen lämmitys eivät vähennä kokonaisenergiantarvetta, mutta siirtävät lämmitykseen tarvittavan energian ajoneuvon ulkopuolelle, jolloin akkuun kohdistuva kuormitus ajon aikana pienenee ja toimintamatka kasvaa erityisesti pakkaskeleillä. Operatiivisesti suurin potentiaali liittyy kuitenkin ajonopeuteen ja kuormituksen ajoittamiseen: raskaimmat ajot kannattaa mahdollisuuksien mukaan suorittaa kuivissa ja lämpimissä olosuhteissa, joissa vierintävastus ja sähköiset häviöt ovat pienimmillään.

7.3 Käytännön suositukset

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että sähköisen raskaan kaluston energiankulutus on herkkä ympäristöolosuhteille, mutta siihen voidaan vaikuttaa merkittävästi operatiivisilla keinoilla. Reitti- ja aikataulusuunnittelussa suurimman energiansäästöpotentiaalin tarjoavat kuljetusten ajoitus, kuorman hallinta ja ajonopeuden optimointi sään mukaan. Raskaimmat kuljetukset olisi suositeltavaa ajoittaa kuivempiin ja lämpimämpiin jaksoihin aina, kun se on logistisesti mahdollista. Nollakelien ja loskan aikana on varauduttava 40–50 % suurempaan kulutukseen kuin kuivassa pakkasessa, ja lataussuunnitelmat tulisi mitoittaa sen mukaisesti. Märissä olosuhteissa maltillisempi nopeus vähentää vierintä- ja roiskevastuksia, pienentää energiankulutuksen hajontaa ja parantaa myös liikenneturvallisuutta.

Latausten suunnittelun näkökulmasta on keskeistä huomioida sääolosuhteista johtuvat erot ajoneuvon energiantarpeessa. Tämän työn perusteella laaditut operointikortit jäsentävät kulutuksen riippuvuuden massasta ja lämpötilasta erikseen kuivissa, märissä ja sohjokelien olosuhteissa. Kolme erillistä korttia tekee mallista käyttökelpoisen vaihtelevissa säätilanteissa, sillä tienpinnan kunto vaikuttaa kulutukseen yhtä paljon tai enemmän kuin pelkkä lämpötila. Korttien avulla energiabudjetointi voidaan toteuttaa suoraan massan, lämpötilan ja keliluokan perusteella valitsemalla tilanteeseen sopiva kortti ja lukemalla siitä kulutusarvio. Malli kuvaa luotettavasti tarkasteltua lämpötila- ja massa-aluetta (noin $-10\,^{\circ}\mathrm{C}$–$20\,^{\circ}\mathrm{C}$, 20 t–65 t). Näiden rajojen ulkopuolella arvio perustuu mallin jatkamiseen alueille, joista ei ole havaintoaineistoa, jolloin tulokset ovat vain suuntaa antavia. Operointikortit tarjoavat käytännön työkalun reitti- ja lataussuunnitteluun, ja niiden jatkokehitys on mahdollista kattavammalla aineistolla tai eri ajoneuvomalleille.

Kaluston ylläpidon näkökulmasta tulokset korostavat renkaiden ja rengaspaineiden hallinnan merkitystä. Kokeelliset havainnot osoittavat, että renkaiden lämpötilan ja paineen nousu voi pienentää vierintävastusta useita prosentteja. Esimerkiksi talviolosuhteissa suoritetut mittaukset raportoivat jopa $7,7$ % vähennyksen vierintävastuksessa, kun renkaan lämpeneminen vähensi kumimateriaalin deformaatioon liittyvää energiankulutusta (Hyttinen et al., 2024). Tämä vaikutus korostuu erityisesti kylmissä olosuhteissa, joissa renkaiden jäykistyminen muutoin lisää vierintävastusta. Kokonaisuutena operatiiviset suositukset tukevat käsitystä, että energiatehokkuuden parantaminen ei välttämättä edellytä teknisiä muutoksia ajoneuvoon, vaan sen voi saavuttaa järjestelmällisellä suunnittelulla ja dataperusteisella päätöksenteolla. Reittien, latauksen ja lämpöhallinnan yhdistäminen sääolosuhteiden mukaan tarjoaa nopeimman ja kustannustehokkaimman tavan parantaa sähköisen raskaan kaluston käytettävyyttä pohjoisissa toimintaympäristöissä.

7.4 Rajoitteet

Tutkimuksen päätulokset perustuvat yhden ajoneuvoyhdistelmän pitkittäisseurantaan, mikä mahdollistaa tarkan ja ajallisesti johdonmukaisen analyysin, mutta rajoittaa yleistettävyyttä muihin reitteihin, ajoneuvoihin ja kuljettajiin. Aineisto edustaa tyypillisiä maantieliikenteen olosuhteita Suomessa ja Ruotsissa, mutta se ei kata kaupunkimaista ajoa eikä jyrkkiä topografisia vaihteluita. Näin ollen havaintoja on tulkittava ensisijaisesti runkoliikenteen kontekstissa. Energiankulutuksen laskenta perustui akun varaustilan (SOC) muutokseen sekä lineaariseen kapasiteettioletukseen, mikä ei täysin huomioi lämpötilan ja kuormituksen vaikutusta akun jännitekäyrään sekä todelliseen käytettävissä olevaan energiaan. Tämä voi johtaa pieneen systemaattiseen virheeseen erityisesti kylmissä olosuhteissa. Massa-arvio puolestaan perustui ilmajousituksen paineantureihin, joiden tarkkuus riippuu muun muassa kaltevuudesta, akselikuormituksen jakautumisesta sekä mahdollisista ympäristötekijöistä, kuten lumesta ja jäästä ajoneuvon rakenteissa. Sääluokitus toteutettiin kaksiluokkaisena (kuiva–märkä), mikä yksinkertaistaa olosuhteiden jatkuvaa vaihtelua. Tämä lähestymistapa riittää tunnistamaan märkyyden yleisen vaikutussuunnan, mutta ei erota sateen intensiteettiä, tienpinnan vedenpoistokykyä tai loskan syvyyttä. Lisäksi tuuli, tien kaltevuus ja topografiset vaihtelut jäivät analyysin ulkopuolelle, vaikka ne voivat paikoin vaikuttaa energiankulutukseen huomattavasti. Aineisto painottuu kylmiin vuodenaikoihin eikä sisältänyt riittävästi havaintoja alle $-10\,^{\circ}\mathrm{C}$ tai yli $25\,^{\circ}\mathrm{C}$ lämpötiloista. Tämän vuoksi ääriolosuhteiden vaikutuksia ei voitu arvioida kattavasti, ja tulokset kuvaavat ensisijaisesti tavanomaisia pohjoismaisia käyttöolosuhteita.

7.5 Jatkokehitys

Jatkossa tutkimusta tulisi laajentaa sekä aineiston että mallinnuksen osalta. Ensimmäinen kehityssuunta on havaintoaineiston laajentaminen useampaan ajoneuvoon ja eri vuodenaikoihin, jotta voidaan arvioida sekä talvi- että kesäolosuhteiden vaikutuksia sekä validoida havaitut trendit eri kalustotyypeillä. Mallinnuksen osalta jatkotyö tulisi suunnata monimuuttujaisiin ja epälineaarisiin menetelmiin, jotka kykenevät tunnistamaan ympäristötekijöiden yhteisvaikutuksia ilman vahvoja ennakko-oletuksia. Esimerkiksi gradienttivahvistus- ja osittaisriippuvuuksiin perustuvat mallit voivat parantaa selitysvoimaa ja samalla tarjota tulkittavan rakenteen. Sääluokitusta voitaisiin tarkentaa kuvaamalla sateen intensiivisyys ja tienpinnan vedenpoistokyky jatkuvina muuttujina. Nollakelien ympärillä loskan fysikaalinen mallintaminen viskoelastisena materiaalina voisi selittää havaittua epälineaarista kulutushuippua. Lisäksi rengaspaine- ja akselipainodatan hyödyntäminen mahdollistaisi vierintävastuskerrointen kalibroinnin suoraan mittausten perusteella. Soveltavan tutkimuksen kannalta seuraava askel on analyysin tuloksiin perustuvan dynaamisen työkalun kehittäminen, joka yhdistää sääennusteet, reittiprofiilit ja kuormitustiedot reaaliaikaiseen energiankulutusarvioon.

Tällainen operointikorttiin perustuva järjestelmä voisi toimia käytännön päätöksenteon tukena reitti- ja lataussuunnittelussa, mahdollistaen sää-, massa- ja lämpötilariippuvien korjauskertoimien automaattisen huomioimisen osana päivittäistä kuljetusohjausta. Laajempana jatkokehityssuuntana voidaan nähdä myös ennustemallien kehittäminen, jotka arvioivat energiankulutusta eri ajoneuvotyypeille ja ajosuunnille vallitsevien sää- ja keliolosuhteiden perusteella. Tällainen järjestelmä voisi yhdistää meteorologisen datan, tieverkon topografian ja ajoneuvokohtaiset ominaisuudet tuottaen ennusteita energiankulutuksesta ja toimintamatkasta jopa useita tunteja tai vuorokausia eteenpäin. Ennustemallin avulla olisi mahdollista optimoida ajoneuvokaluston reititys ja latauskapasiteetin käyttö säätilanteen mukaan, mikä tukisi sekä energiatehokkuutta että kuljetusten aikataulupitoa erityisesti vaihtelevissa pohjoismaisissa olosuhteissa.

8 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin sähköisen raskaan yhdistelmäajoneuvon energiankulutusta pohjoismaisissa sää- ja käyttöolosuhteissa hyödyntämällä ajoneuvon keräämää telematiikkadataa sekä siihen yhdistettyjä säätietoja. Tulokset osoittavat, että kulutuksen vaihtelu selittyy pääosin kolmen tekijän yhteisvaikutuksella: ajoneuvon kokonaismassa, ympäristön lämpötila ja tienpinnan kunto. Massan vaikutus on lähes suoraviivainen, mutta lämpötilan ja kelin vaikutus muuttuu erityisesti nollakelien ympärillä, jolloin tienpinta on usein märkä tai sohjoinen, ja vierintävastus kasvaa huomattavasti. Analyysi osoittaa, että vetinen ja sohjoinen tienpinta muodostaa olosuhteen, jossa energiankulutus voi nousta jopa kymmeniä prosentteja verrattuna kuiviin pakkasolosuhteisiin. Tämä ei johdu pelkästään akun lämpötilasta tai ohjaamon lämmitystarpeesta, vaan ennen kaikkea siitä, että renkaiden on syrjäytettävä märkä lumi-vesiseos, mikä lisää vastusvoimia. Tämän vuoksi tienpinnan tila on tunnistettava omana keliluokkanaan pelkän lämpötilan sijaan. Tutkimuksessa yhdistettiin mittauksiin perustuva analyysi ja yksinkertainen fysiikkaan perustuva ajovastusmalli, minkä avulla voitiin tulkita havaittujen kulutustrendien syitä. Tätä menetelmää hyödyntäen laadittiin kolme erillistä operointikorttia kuiville, märille ja sohjokelien olosuhteille. Kortit tarjoavat käytännöllisen tavan arvioida energiankulutusta massan ja lämpötilan perusteella ilman erillistä simulointia, ja ne soveltuvat suoraan reitti- ja lataussuunnittelun tueksi maantiekäytössä. Tulokset korostavat, että sähköisen raskaan liikenteen energiatehokkuus määräytyy ei ainoastaan akkutekniikan, vaan myös ympäristön ja ajotavan vaikutuksesta. Kuljetusten ajoittaminen kuivempaan ja lämpimämpään säähän, maltillinen ajonopeus märissä olosuhteissa sekä kuorman ja rengaspaineiden hallinta ovat keinoja, joilla energiankulutusta voidaan vähentää ilman kaluston teknisiä muutoksia. Työ antaa myös lähtökohdan jatkotutkimukselle, jossa kulutusmallit voidaan laajentaa useampiin ajoneuvoihin, vuodenaikoihin ja reittiprofiileihin sekä liittää osaksi dynaamisia reitti- ja latausennusteita.

Lähdeluettelo

Ahola Transport (syyskuu 2024). *Naantalin uusi latausasema tukee vihreää siirtymää*. URL: https://www.aholatransport.com/fi/artikkelit/naantalin-uusi-latausasema-tukee-vihreaa-siirtymaa/ (viitattu 17. 10. 2025).

Anttila, P., Tuomas, N., Kari, V. & Juha, L. (2023). The effect of winter weather on timber truck tare weights. en. *Silva Fennica* 57(5), s. 10385. DOI: 10.14214/sf.10385. URL: https://doi.org/10.14214/sf.10385.

Carlson, A. & Vieira, T. (2021a). *The effect of water and snow on the road surface on rolling resistance*. en. Tekninen raportti VTI rapport 971A. Linköping, Sweden: Swedish National Road ja Transport Research Institute (VTI). URL: https://vti.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1542142&dswid=-3648.

Carlson, A. & Vieira, T. (2021b). *The effect of water and snow on the road surface on rolling resistance*. Tekninen raportti VTI rapport 971A. Linköping, Sweden: Swedish National Road ja Transport Research Institute (VTI). URL: https://www.vti.se/en/publications.

Circle, P. (2021). *Electrification and charging of heavy transport*. Tekninen raportti. Power Circle.

Coalition, E. (2023). *Piloting the Transition to Freight Electrification: Lessons Learned in Electrifying On-Road Medium- and Heavy-Duty Vehicles*. Tekninen raportti. Electrification Coalition.

Continental Tires (2024). *The Importance of Rolling Resistance for Fleets*. URL: https://www.continental-tires.com/us/en/b2b/truck/resources/insights/the-importance-of-rolling-resistance-for-fleets/ (viitattu 17. 10. 2025).

Curry, T., Liberman, I., Hoffman-Andrews, L. & Lowell, D. (2012). *Reducing Aerodynamic Drag and Rolling Resistance from Heavy-Duty Trucks: Summary of Available Technologies and Applicability to Chinese Trucks*. Tekninen raportti. M.J. Bradley & Associates LLC for the International Council on Clean Transportation (ICCT). URL: https://theicct.org/publication/reducing-aerodynamic-drag-and-rolling-resistance-from-heavy-duty-trucks/.

DB Schenker Finland (lokakuu 2023). *DB Schenkerin täyssähköinen HCT-yhdistelmä aloitti liikennöinnin Suomessa*. URL: https://pulse.dbschenker.com/fi/db-schenker-tayssahkoinen-hct-yhdistelma/ (viitattu 17. 10. 2025).

Designwerk Technologies AG (maaliskuu 2025). *From real operations: consumption values of electric trucks in special applications*. URL: https://www.designwerk.com/en/post/e-truck/from-real-operation-consumption-values-of-electric-trucks-in-special-applications/.

European Commission (2023). *Regulation (EU) 2023/1804 - Deployment of Alternative Fuels Infrastructure (AFIR)*. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1804 (viitattu 10. 06. 2025).

Feng, G., Rindt, C. R. & Ritchie, S. G. (kesäkuu 2025). From diesel to electric: potential of drayage trucks transition in Southern California. en. *iScience* 28(6), s. 112629. ISSN: 25890042. DOI: 10.1016/j.isci.2025.112629. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589004225008909 (viitattu 25. 06. 2025).

Ferwerda, R., Hoed, R. van den, Scheffer, S., Cillessen, R. & Vos, R. (2023). Requirements for Public Fast-Charging Network for Logistics Companies. Teoksessa: *EVS36 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*. Sacramento, California, USA.

Finnish Meteorological Institute (helmikuu 2025). *FMI Open Data*. English. Weather data retrieved from the Finnish Meteorological Institute (FMI) open data portal under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). Modifications were made by the authors. URL: https://en.ilmatieteenlaitos.fi/open-data (viitattu 18. 02. 2025).

Gu, J., Liao, Q. & Zhang, K. M. (elokuu 2025). Assessing the cold weather impact on battery electric transit buses. en. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 145, s. 104809. ISSN: 13619209. DOI: 10.1016/j.trd.2025.104809. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1361920925002196 (viitattu 23. 06. 2025).

Guiggiani, M. (2003). *Tire Rolling Resistance*. Tekninen raportti. Michelin & University of Pisa. URL: https://docenti.ing.unipi.it/guiggiani-m/Michelin_Tire_Rolling_Resistance.pdf (viitattu 17. 10. 2025).

Hiltunen, T., Tuviala, E., Meriläinen, A., Kauranen, P. & Ahola, J. (2025). *Sähköisen raskaan liikenteen pilotteja Pohjoismaissa ja Euroopassa*. LUT Scientific and Expertise Publications / Raportit ja selvitykset – Reports 140. Lappeenranta: LUT-yliopisto. ISBN: 978-952-412-303-7. URL: https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-412-303-7.

Hovi, I. B., Pinchasik, D. R., Figenbaum, E. & Thorne, R. J. (2020). Experiences from Battery-Electric Truck Users in Norway. *World Electric Vehicle Journal* 11(5). DOI: 10.3390/wevj11010005. URL: https://doi.org/10.3390/wevj11010005.

Hovi, I. B., Pinchasik, D. R., Thorne, R. & Figenbaum, E. (2019). *User experiences from the early adopters of heavy-duty zero-emission vehicles in Norway: Barriers and opportunities*. Tekninen raportti TØI Report 1734/2019. Institute of Transport Economics (TØI). URL: https://www.toi.no.

Hyttinen, J., Nokka, J., Lång, P. & Laitinen, T. (2024). Impact of an Enclosed Wheelhouse on Truck Tyre Temperatures and Rolling Resistance in Winter Conditions. *Energies* 17(16), s. 6030. DOI: 10.3390/en17166030. URL: https://doi.org/10.3390/en17166030.

Jokinen, P., Pirinen, P., Kaukoranta, J.-P., Kangas, A., Alenius, P., Eriksson, P., Johansson, M. & Wilkman, S. (lokakuu 2021). *Climatological and oceanographic statistics of Finland 1991–2020*. fi. Tekninen raportti. Finnish Meteorological Institute. DOI: 10.35614/isbn.9789523361485. URL: http://hdl.handle.net/10138/336063 (viitattu 11. 06. 2025).

Karam, A. & Rich, J. (elokuu 2025). Planning the transition to electric trucks: An optimization framework for line-haul logistics. en. *Research in Transportation Business & Management* 61, s. 101413. ISSN: 22105395. DOI: 10.1016/j.rtbm.2025.101413. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210539525001282 (viitattu 25. 06. 2025).

Khosravi, M., Mosaddeghi, F., Oveisi, M. & Khodayari-B, A. (joulukuu 2015). Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis. en. *Journal of Central South University* 22(12), s. 4645–4652. ISSN: 2095-2899, 2227-5223. DOI: 10.1007/s11771-015-3015-7. URL: http://link.springer.com/10.1007/s11771-015-3015-7 (viitattu 17. 04. 2024).

Komnos, D., Fagerberg, P., Sandberg, U. & Jonsson, P. (2021). In-Use Determination of Aerodynamic and Rolling Resistance of Heavy-Duty Vehicles Using Road Tests and Machine Learning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 97, s. 102923. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102923.

Lajunen, A., Yang, Y. & Emadi, A. (kesäkuu 2020). Review of Cabin Thermal Management for Electrified Passenger Vehicles. en. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 69(6), s. 6025–6040. ISSN: 0018-9545, 1939-9359. DOI: 10.1109/TVT.2020.2988468. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9072601/ (viitattu 25. 10. 2024).

Le Corguillé, J., Hacker, F., Göckeler, K., Mottschall, M. & Dolinga, T. (heinäkuu 2025). *Real-world data analysis of energy consumption, activity and charging patterns of battery electric trucks operating in Germany: 2nd report of the ELV-LIVE research project*. Tekninen raportti. Berlin: Öko-Institut e.V. URL: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Real-world-data-analysis-of-battery-electric-trucks.pdf.

Lee, G., Song, J., Lim, Y. & Park, S. (huhtikuu 2024). Energy consumption evaluation of passenger electric vehicle based on ambient temperature under Real-World driving conditions. en. *Energy Conversion and Management* 306, s. 118289. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118289. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890424002309 (viitattu 23. 06. 2025).

Lindholmen Science Park, C. at (2022). *REEL Report based on Interviews with Logistics Actors (1st Edition)*. Tekninen raportti. Lindholmen Science Park.

Lindholmen Science Park, C. at (2023). *REEL Case Overview Report*. Tekninen raportti. Lindholmen Science Park.

Lindholmen Science Park, C. at (2024). *REEL Charging Infrastructure for Trucks*. Tekninen raportti. Lindholmen Science Park.

Malik, M. A. I., Kalam, M. A., Ikram, A., Zeeshan, S. & Zahidi, S. Q. R. (2025). Energy transition towards electric vehicle technology: Recent advancements. *Energy Reports* 13, s. 2958–2996. DOI: 10.1016/j.egyr.2025.02.029. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484725001118.

McAuliffe, B. R. & Chuang, D. (2017). *Coast-down and Constant-speed Testing of a Tractor-trailer Combination in Support of Regulatory Developments for Greenhouse Gas Emissions*. Tekninen raportti LTR-AL-2016-0019-R. National Research Council Canada, Aerospace - Aerodynamics Laboratory. DOI: 10.4224/23001919.

Metsäteho Oy (2023). *MESI – Metsäyhtiöiden autokuljetusten sähköistäminen*. URL: https://www.metsateho.fi/mesi/ (viitattu 17. 10. 2025).

Mobilität, N. P. Z. der (2020). *WERKSTATTBERICHT ANTRIEBSWECHSEL NUTZFAHRZEUGE: Wege zur Dekarbonisierung schwerer LKW mit Fokus der Elektrifizierung*. Tekninen raportti. AG 1 Klimaschutz im Verkehr.

Nylund, N.-O. (toukokuu 2013). *Vehicle energy efficiencies*. Presentation at IEA EGRD Workshop "Mobility: Technology Priorities and Strategic Urban Planning". Viitattu 14.11.2025. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/252/Nylund_Vehicle_energy_efficiencies.pdf.

Nåbo, A., Abrahamsson, M., Bhatti, H. J., Björklund, M., Daniels, D., Danilovic, M., Haugland, P., Huddén, P., Hylander, J. P., Käck, S., Lindahl, P., Liu, J. L. & Sallnäs, U. (2024). *Battery-Swapping for Heavy Duty Vehicles: A Feasibility Study on Up-Scaling in Sweden*. Tekninen raportti VTI rapport 1199A. Swedish National Road ja Transport Research Institute (VTI). URL: https://www.vti.se/en/publications.

Open-Meteo (maaliskuu 2025). *Open-Meteo Weather Data*. English. Weather data retrieved from Open-Meteo.com under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0). Modifications were made by the authors. URL: https://open-meteo.com/ (viitattu 10. 03. 2025).

Pinchasik, D. R., Figenbaum, E. & Hovi, I. B. (2022). *User experiences from the first series-produced battery-electric trucks: Interviews in 2021 with the first Norwegian users*. Tekninen raportti TØI Report 1908/2022. Institute of Transport Economics (TØI). URL: https://www.toi.no.

Posti Group (marraskuu 2023). *Case: Konversio kuorma-auto dieselistä sähköiseksi*. URL: https://www.posti.com/case-konversio-kuorma-auto-dieselista-sahkoiseksi (viitattu 17. 10. 2025).

Regulation (EU) 2018/858 (2018). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/858/oj/eng. Official Journal of the European Union, L 151, 14.6.2018, p. 1–218.

Ritchie, H. & Roser, M. (maaliskuu 2020). Cars, planes, trains: where do CO_2 emissions from transport come from? *Our World in Data*. URL: https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport (viitattu 20. 05. 2024).

Satvat, B., Plassmann, J. & Hackmann, M. (2023). Challenges and requirements of megawatt charging infrastructure for long-haul trucks. Teoksessa: *36th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS36)*. Sacramento, California, USA.

Sauna-aho, J., Koskinen, O. H., Sauna-aho, P. & Rivanti, T. (2018a). *HCT- ja normaaliajoneuvojen energiankäyttö, hiilidioksidipäästöt ja tiekuormitus*. Finnish. Tekninen raportti 51/2018. Liikennevirasto. URL: https://www.finna.fi/Record/vaylavirasto.10024_163959?sid=3482635405 (viitattu 20. 04. 2025).

Sauna-aho, J., Koskinen, O. H., Sauna-aho, P. & Rivanti, T. (2018b). *HCT- ja normaaliajoneuvojen energiankäyttö, hiilidioksidipäästöt ja tiekuormitus*. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 51/2018. Helsinki: Liikennevirasto. URL: https://www.liikennevirasto.fi/.

Scania (toukokuu 2025). *Scania Electric trucks*. English. URL: https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html.

Seo, J., Vijayagopal, R., Kim, N., Rousseau, A. & Stutenberg, K. (helmikuu 2025). Effects of ambient temperature on electric vehicle range considering battery Performance, powertrain Efficiency, and HVAC load. en. *Energy Conversion and Management* 326, s. 119493. ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2025.119493. URL: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890425000160 (viitattu 11. 06. 2025).

Seppälä, J., Liimatainen, H., Ollikainen, M., Weaver, S., Ahlvik, L., Karttunen, M., Halonen, J., Viri, R., Suomalainen, E., Markkanen, J. & Hänninen, O. (2024). *Tieliikenteen päästövähennystoimet ja niiden vaikutukset*. fi. Suomen ilmastopaneelin raportti. Series: Suomen ilmastopaneelin raportti. Suomen ilmastopaneeli. DOI: 10.31885/9789527457313. URL: http://hdl.handle.net/10138/588741 (viitattu 28. 05. 2025).

Siren, J. & Traficom (2025). *SÄHKE-hanke: Raskaiden sähköajoneuvojen pilotit ja energiankulutus Suomessa*. Viitattu 6.11.2025. URL: https://traficom.fi/sites/default/files/media/file/Jukka%20Siren%20Traficom%20S%C3%84HKE-hanke%20Volvo%20Finland_esitysmateriaali.pdf.

Speth, D. & Funke, S. Á. (2021). Comparing Options to Electrify Heavy-Duty Vehicles: Findings of German Pilot Projects. *World Electric Vehicle Journal* 12(67). DOI: 10.3390/wevj12020067. URL: https://doi.org/10.3390/wevj12020067.

SSAB Europe (tammikuu 2025). *Lähitoimitukset sähkörekoilla SSAB:ltä Hämeenlinnasta käynnistyivät*. URL: https://www.ssab.com/fi-fi/uutiset/2025/01/lhitoimitukset-shkrekoilla-ssablt-hmeenlinnasta-kynnistyivt (viitattu 17. 10. 2025).

Traficom (2024). *ACE-hanke – Ilmastoratkaisujen vauhdittaja (2024–2030)*. URL: https://www.traficom.fi/fi/ace-hanke (viitattu 17. 10. 2025).

Traficom (2025). *Sähköinen liikenne – raskas kalusto*. URL: https://www.traficom.fi/fi/sahkoinenliikenne (viitattu 10. 06. 2025).

Volvo Trucks (tammikuu 2022). *Volvo's heavy-duty electric truck is put to the test — excels in both range and energy efficiency*. Press release / news page. URL: https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2022/jan/volvos-heavy-duty-electric-truck-is-put-to-the-test-excels-in-both-range-and-energy-efficiency.html.

Würtz, S., Bogenberger, K., Göhner, U. & Rupp, A. (tammikuu 2024). Towards Efficient Battery Electric Bus Operations: A Novel Energy Forecasting Framework. en. *World Electric Vehicle Journal* 15(1), s. 27. ISSN: 2032-6653. DOI: 10.3390/wevj15010027. URL: https://www.mdpi.com/2032-6653/15/1/27 (viitattu 25. 06. 2025).

Yüksel, T. & Michalek, J. J. (2015). Effects of Regional Temperature on Electric Vehicle Efficiency, Range, and Use-Phase Power Plant CO_2 Emissions. *Environmental Science & Technology* 49(6), s. 3974–3980. DOI: 10.1021/es505621s. URL: https://www.cmu.edu/me/ddl/publications/2015-EST-Yuksel-Michalek-EV-Weather.pdf.

Zaiko, N. (2023). E-Charge: System demonstration of long-haul battery electric trucks with megawatt charging system (MCS). Teoksessa: *36th International Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS36)*. Sacramento, California, USA.