



Tapio Myllymäki

# Sähkölinja-auton R744- ja R134a- HVAC-järjestelmien vertailu lämmitystilanteessa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

13.4.2024

# Tiivistelmä

Tekijä:	Tapio Myllymäki
Otsikko:	Sähkölinja-auton R744- ja R134a-HVAC-järjestelmien vertailu lämmitystilanteessa
Sivumäärä:	26 sivua + 4 liitettä
Aika:	13.4.2024
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Jälkimarkkinapäällikkö Matias Pitkänen, Volvo Lehtori Pasi Kovanen

---

Tässä opinnäytetyössä perehdytään Volvon sähkölinja-autojen kokonaisenergiankulutukseen sekä erityisesti ajonaikaisen lämmityksen ja ilmastoinnin energiankulutukseen. Opinnäytetyössä vertaillaan myös eri ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmillä varustettuja sähkölinja-autoja. Vertailtavat järjestelmät ovat R134a-ilmastointi ja R744-ilmastointi. Testijakso ajoittuu joulukuuhun 2023, kahdelle peräkkäiselle viikolle, 4.12.2023–17.12.2023 jolloin R744-ilmastoinnin vesi-ilmalämpöpumpputekniikkaa on otollinen hyödyntää.

Opinnäytetyön alussa tarkastellaan lämpöpumpun teoriaa, jonka jälkeen syvennyttään R744-ilmastoinnin eri kylmäainekiertoihin.

Pääasiallinen tutkimus perustuu Volvon telematiikkasovellukseen, Volvo Connectiin. Kokonaisenergiankulutuksen kannalta on tärkeää myös polttoainekäyttöisen lisälämmittimen polttoaineenkulutus lämmitystilanteessa, ja siksi kulutusluvut on pyydetty liikennöitsijöiltä erikseen.

Yhteenvedossa on vertailtu kahdella edellä mainitulla ilmastointijärjestelmällä varustettujen, Volvon sähkölinja-autojen sähkön- ja dieselöljyn kulutuksia. Lopuksi todetaan, että R744-ilmastointijärjestelmä kulutti testijakson aikana hieman enemmän sähköenergiaa R134a-ilmastointijärjestelmään verrattuna, mutta säästi polttoainetta merkittävästi. Vertailu tarkkoine kulutuslukuineen jää Volvon sisäiseen käyttöön.

Avainsanat: Volvo, sähkölinja-auto, energiankulutus, HVAC, R744

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Tapio Myllymäki  
Title: Comparison of R744 and R134a HVAC Systems of an Electric Bus in a Heating Situation  
Number of Pages: 26 pages + 4 appendices  
Date: 13 March 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Automotive Engineering  
Professional Major: Automotive Electronics Engineering  
Supervisors: Matias Pitkänen, Aftersales Manager  
Pasi Kovanen, Lecturer

---

The aim of this Bachelor's thesis is to study the overall energy consumption of Volvo electric buses with focus on the energy consumption of heating and air conditioning. Electric buses with different air conditioning systems are also compared in this thesis. The compared systems are R134a air conditioning system and R744 air conditioning system. The field trial takes place in December 2023 in two consecutive weeks, 4.12.2023–17.12.2023 where it is favorable to utilize the R744 air conditioning systems water-to-air heat pump technology.

The basic theory of heat pump is introduced in the beginning of this thesis, after which the different R744 refrigerant circuits are reviewed thoroughly.

The main research is processed through Volvo's telematics application Volvo Connect. The fuel consumption of the auxiliary heater is important factor in to the overall energy consumption of a heating situation and therefore those consumption values have been asked separately from the traffic contractors.

In the summary, the Volvo electric buses equipped with the two previously mentioned air conditioning systems are compared from the perspective of electric and fuel consumptions. In conclusion, the R744 air conditioning system consumed slightly more electrical energy during the field trial compared to the R134a air conditioning system but was significantly more fuel-efficient. The comparison and the absolute consumption values remain for Volvo's internal use.

Keywords: Volvo, electric bus, energy consumption, HVAC, R744

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämpöpumpun teoriaa	2
2.1	Lämpöpumppu	2
2.2	Carnot-prosessi	3
2.3	COP-kerroin	4
3	R744-ilmastointijärjestelmän rakenne	4
3.1	Kriittinen piste	5
3.2	Transkriittinen sykli	5
3.3	R744 verrattuna R134a:han	6
3.4	GWP-arvot	7
3.5	R744:n viilennyskierto	9
3.6	R744:n lämmityskierto	10
3.7	R744:n lämmityskierto etulaitteen jäähdytyksellä	11
3.8	R744:n jäänpoistokierto eli de-icing mode	13
3.9	Lämpötilan mittaaminen	14
4	Volvo Connect	15
5	Vertailtavat linja-autot	16
5.1	Tutkimuksen linja-autojen eroavaisuudet	17
5.2	Ilmastointijärjestelmät	17
5.3	Lisälämmittimet	17
6	Vertailutesti	19
6.1	Tutkimustaulukko	19
6.2	Testiin vaikuttavat muut muuttujat	21
6.3	Säätiedot testijaksolta	22
6.4	600 voltin järjestelmän energiankulutus	22
6.5	Polttoainekulutustiedot	23
6.6	Sähkön kustannus testijaksolla	23
6.7	Polttoaineen kustannus testijaksolla	24

6.8 Taulukosta poistetut linja-autot

24

Lähteet

25

Liitteet

Liite 1: Helsingin ilmastotiedot testijaksolta

Liite 2: Vantaan ilmastotiedot testijaksolta

Liite 3: Excel-tilauskassa (vain työn tilaajan käyttöön)

Liite 4: Tulokset (vain työn tilaajan käyttöön)

## Lyhenteet

HVAC: *Heating, ventilation, and air conditioning.* Lämmitys, ilmanvaihto ja ilmastointi.

COP: *Coefficient of performance.* Lämpökerroin, joka ilmaisee lämpöpumpun hyötysuhteen.

GWP: *Global warming potential.* Kasvihuonekaasun lämmityspotentiaali ilmakehään vuotaessaan.

## 1 Johdanto

Volvo on ruotsalainen linja- ja kuorma- autojen, maanrakennuskoneiden ja merimoottoreiden valmistaja ja on ollut jo vuosikymmeniä yksi alansa johtavia yrityksiä maailmassa. Volvo perustettiin Göteborgissa vuonna 1927, ja vuotta myöhemmin valmistui Volvon ensimmäinen linja-auto. (Volvo Buses.)

Viime vuosien aikana Volvo on tuonut markkinoille sähköisen linja-auton, mallia BOE 7900E. Volvon uusia sähkölinja-autoja on saatavilla nivellinja-autona ja 2-akselisena. Nivelmalli on aina 3-ovinen, mutta 2-akselista mallia on saatavilla 2- tai 3-ovisena. Nivelmallissa on kuusi akkua ja CCS-pistokkeen lisäksi joko latauskiskot tai pantografi katon etuosassa pikalatausta varten. 2-akselista mallia on saatavilla varustettuna kuudella akulla ja CCS-pistokkeella tai viidellä akulla ja CCS-pistokkeella ja joko latauskiskoilla tai pantografilla. Linja-autoja on saatavilla myös kahdella eri ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmällä.

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan ja vertaillaan Volvon 2-akselisten, sähkölinja-autojen eri ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmien tehokkuutta. Tutkittavat järjestelmät ovat R134a-kylmäaineella toimiva perinteisempi ilmastointijärjestelmä, jonka lämmityspuolesta vastaa Valeon yhdistelmälisälämmitin sekä R744-kylmäaineella toimiva CO<sub>2</sub>-ilmastointijärjestelmä, jonka lämmityspuolesta taas vastaavat polttoainelisälämmitin ja ulkoiset sähkölämmittimet.

Eryisesti painotettavia seurantalukuja ovat lämmitys- ja ilmastointijärjestelmän energiankulutus ja lisälämmittimen polttoaineenkulutus. Näitä parametreja tarkkaillaan pääasiassa Volvon telematiikkajärjestelmän, Volvo Connectin avulla.

## 2 Lämpöpumpun teoriaa

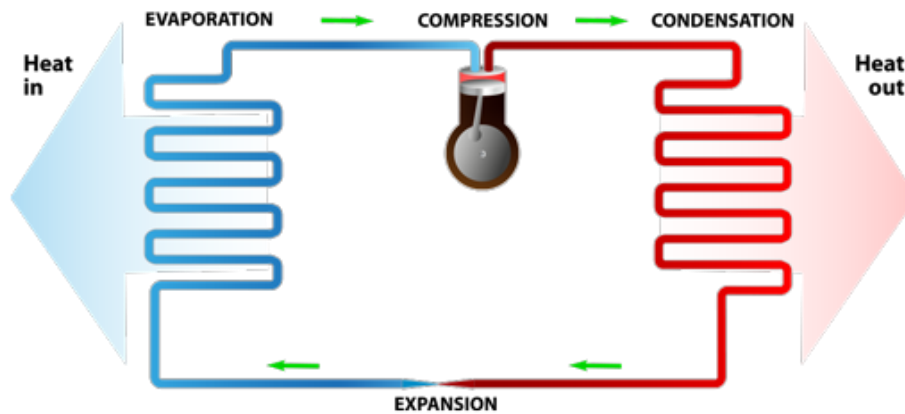
R744-ilmastointijärjestelmän vesi-ilmalämpöpumpun toiminnan ymmärtämiseksi on tärkeää tarkastella lämpöpumpun toimintaa yleisesti. R744-järjestelmän toiminta perustuu suoraan lämpöpumpputekniikkaan.

### 2.1 Lämpöpumppu

Lämpöpumppujärjestelmä koostuu yksinkertaisimmillaan neljästä komponentista: kompressori, paisuntaventtiili sekä kaksi lämmönvaihdinta, jotka ovat lauhdutin ja höyrystin (kuva 1). Lauhduttimen puolesta järjestelmässä puhutaan lämpimänä puolena tai korkeapainepuolena ja höyrystimen puolesta kylmäpuolena tai matalapainepuolena. Edellä mainitun neljän komponentin lisäksi tarvitaan jonkinlainen linja, joka koostuu usein putkista tai letkuista ja jossa virtaa kylmäaine. Kylmäaineita on erilaisia eri käyttötarkoituksia varten. Kylmäaine virtaa kylmäkierron vaiheesta riippuen järjestelmässä nesteinä tai kaasuna. Kylmäaineen kiertoa voidaan lämpöpumppujärjestelmässä hyödyntää sekä lämmittämiseen että jäähdyttämiseen. (Çengel ym. 2015: 283–286.)

Kierto alkaa kompressorilta, joka imupuolelleen muodostaa riittävän matalapaineen. Kompressorin läpivirtaava kylmäaine puristetaan kasaan, minkä seurauksena kylmäaine lämpenee voimakkaasti. Kompressorilta kylmäaine etenee lauhduttimeen. Lauhduttimessa kuuma, korkeapaineinen kylmäaine luovuttaa lämpöenergiaa ympäristöönsä. Lauhduttimelta jäähtynyt kylmäaine etenee paisuntaventtiilille, jossa se laajenee ja jäähtyy entisestään. Paisuntaventtiililtä kylmä kylmäaine etenee höyrystimeen, jossa ympäristö luovuttaa lämpöenergiaa kylmäaineeseen. Höyrystimeltä lämmennyt kylmäaine etenee takaisin kompressorin imupuolelle, ja kierto alkaa alusta. (Çengel ym. 2015: 283–286.)





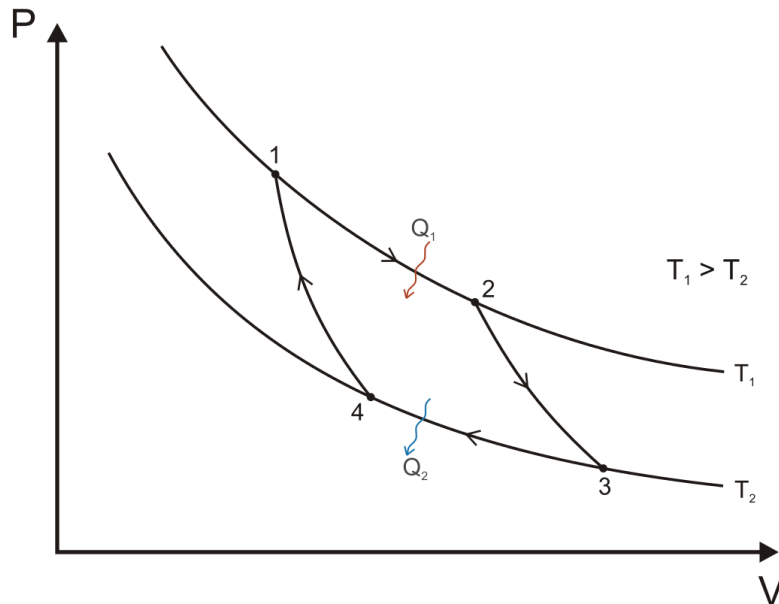
Kuva 1. Kaaviokuva lämpöpumpusta (How a Heat Pump Works.)

## 2.2 Carnot-prosessi

Lämpövoimakone perustuu ranskalaisen fyysikon Sadi Carnot'n vuonna 1824 esittämään idealisaatioon. Carnot'n teoriassa tavoiteltiin lämpövoimakoneen maksimaalista hyötysuhdetta. Carnot-prosessista käytetään myös nimitystä Carnot'n lämpövoimakone. Carnot-prosessista oletetaan kaikkien kierron vaiheiden olevan reversiibeilitä eli, että ne ovat peruutettavissa ja voivat kulkea päinvastaiseen suuntaan. Carnot'n lämpövoimakone on kuitenkin mahdoton toteuttaa käytännössä, sillä siinä ei huomioida kitkaa ja siinä oletetaan systeemin olevan täydellisesti eristetty, estäen lämmön johtumisen pois järjestelmästä. Carnot'n kierto on kuitenkin ollut tärkeä teoria modernien lämpövoimakoneiden kehityksen kannalta. (Perttula 2000: 20–22.)

Carnot-prosessista koostuu neljästä vaiheesta: kahdesta adiabaattisesta vaiheesta, joissa kaasu ei luovuta eikä vastaanota energiaa ja kahdesta isotermissä vaiheesta, joissa kaasun lämpötila pysyy vakiona. Kierron ensimmäinen vaihe on reversiibeli isoterminen laajentuminen, jossa kaasu laajenee, paine laskee ja lämpötila on vakio. Kierron toinen vaihe on reversiibeli adiabaattinen laajentuminen, jossa kaasu laajenee tehden työtä ympäristöönsä ja samalla kaasun lämpötila laskee. Kierron kolmas vaihe on reversiibeli isoterminen puristus, jossa kaasua puristetaan kasaan ja sen tilavuus pienenee ja paine kasvaa. Tässä vaiheessa lämpötila on vakio. Neljäs ja viimeinen vaihe on reversiibeli

adiabaattinen puristus, jossa lämpötila nousee, tilavuus pienenee entisestään ja paine kasvaa entisestään. (Perttula. 2000: 20–22.) Carnot-prosessia on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Carnot-prosessi ilmaistuna paineen suhteessa tilavuuteen.

### 2.3 COP-kerroin

COP-luvulla tarkoitetaan lämpöpumppujen lämmityksen hyötysuhdetta. Tällä luvulla siis kuvataan tuotetun lämpöenergian suhdetta pumpun käyttämään sähköenergiaan. Niin kutsutusta COP-kertoimesta puhutaan silloin, kun lämpöpumppu tuottaa enemmän lämmitysenergiaa verrattuna pumpun ottamaan sähköenergiaan eli kun hyötysuhde on enemmän kuin 1. (Çengel ym. 2015: 285–287.)

## 3 R744-ilmastointijärjestelmän rakenne

Suomessa yleinen ajomatkavaatimus uusille sähkölinja-autoille on 300–500 kilometriä yhdellä latauksella.

Tämä edellyttää seuraavia asioita:

- 300–500 kilowattituntisen akkukapasiteetin
- esilämmitystä ja -jäähdytystä ennen linjalle lähtöä eli Ready to Run -toimintoa
- talvella alempaa sisälämpötilaa ja kesällä korkeampaa sisälämpötilaa verrattuna polttomoottorikäyttöisiin linja-autoihin
- täysautomaattista HVAC-järjestelmää, jossa kuljettajalle ei anneta mahdollisuutta manipuloida säätöä
- polttoainekäyttöisen lisälämmittimen käyttöä sähkön säästämiseksi, ulkolämpötilan alittaessa 0 celsiusastetta.

Yhtenä kehityskohteena näihin vaatimuksiin pääsemiseksi on R744-kylmäaineeseen siirtyminen ja lämpöpumpputekniikan hyödyntäminen energiankulutuksen optimoimiseksi. (Volvo-kaupunkisähkölinja-auton HVAC-kurssi 2022.)

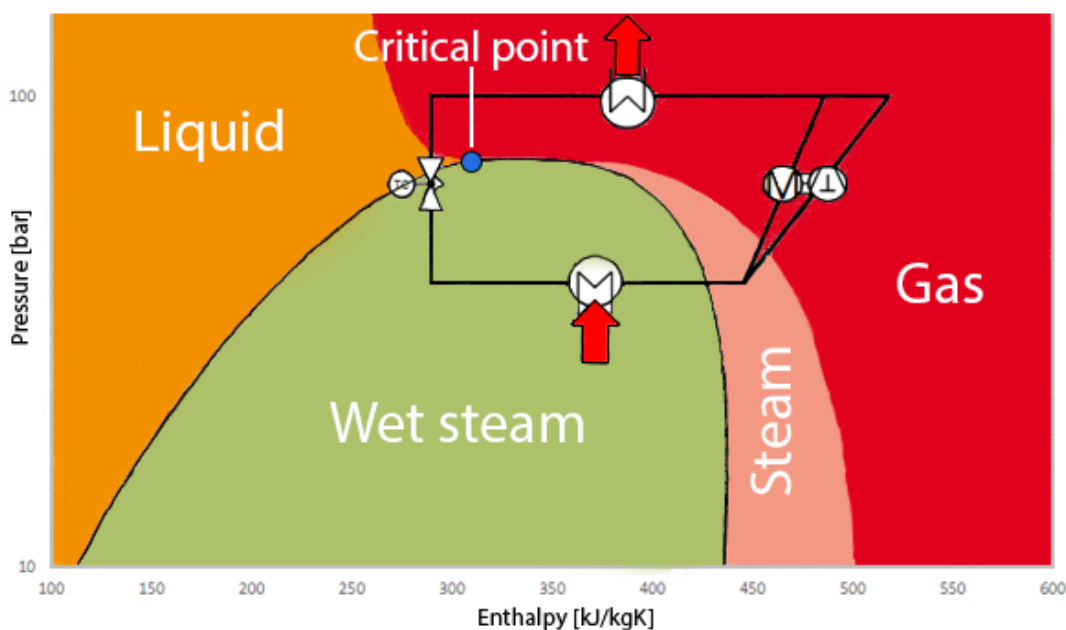
### 3.1 Kriittinen piste

Kriittinen piste saavutetaan, kun neste- ja kaasufaasien tiheydet tasoittuvat siinä määrin, että niiden koostumuksien välille ei jää enää eroa. Kun tämä kriittinen piste ylittyy, järjestelmää kutsutaan transkriittiseksi järjestelmäksi. Vastaavasti alikriittisessä järjestelmässä kriittistä pistettä ei ylitetä. R744-kylmäaineen kriittisen pisteen lämpötila on +31 °C ja paine on 73,8 bar. (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023.) R134a-kylmäaineen kriittisen pisteen lämpötila on +101 °C ja paine on 40,6 bar. (Freon 134a Thermodynamic Properties 2018.)

### 3.2 Transkriittinen sykli

Transkriittinen sykli alkaa, kun CO<sub>2</sub>-kylmäaine nesteytetään korkeapainepuolella. Lauhduttimessa alle 100 baarin paineessa CO<sub>2</sub>-kylmäaineen olomuoto muuttuu hetkellisesti kaasumaisesta nestemäiseksi. Paisuntaventtiilissä CO<sub>2</sub>-kylmäaine taas laajenee ja muuttuu olomuodoltaan märäksi höyryksi. Märkä höyry on pääasiallisesti kaasumainen olomuoto, mutta siinä on mukana nesteeksi tiivistyneitä kylmäainepisaroita. Höyrystimessä CO<sub>2</sub>-kylmäaine olomuotonaan märkä höyry, ottaa lämpöä vastaan ilmasta ja muuttuu höyryksi. Kierron

lopussa kompressorori kasvattaa CO<sub>2</sub>-kylmäaineen painetta. Tämän seurauksesta CO<sub>2</sub>-kylmäaine muuttuu olomuodoltaan kaasumaiseksi. Täyden kierron jälkeen transkriittinen sykli alkaa alusta ja toistaa itseään. (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023.) Transkriittisen syklin kaaviokuva on näkyvillä kuvassa 3.

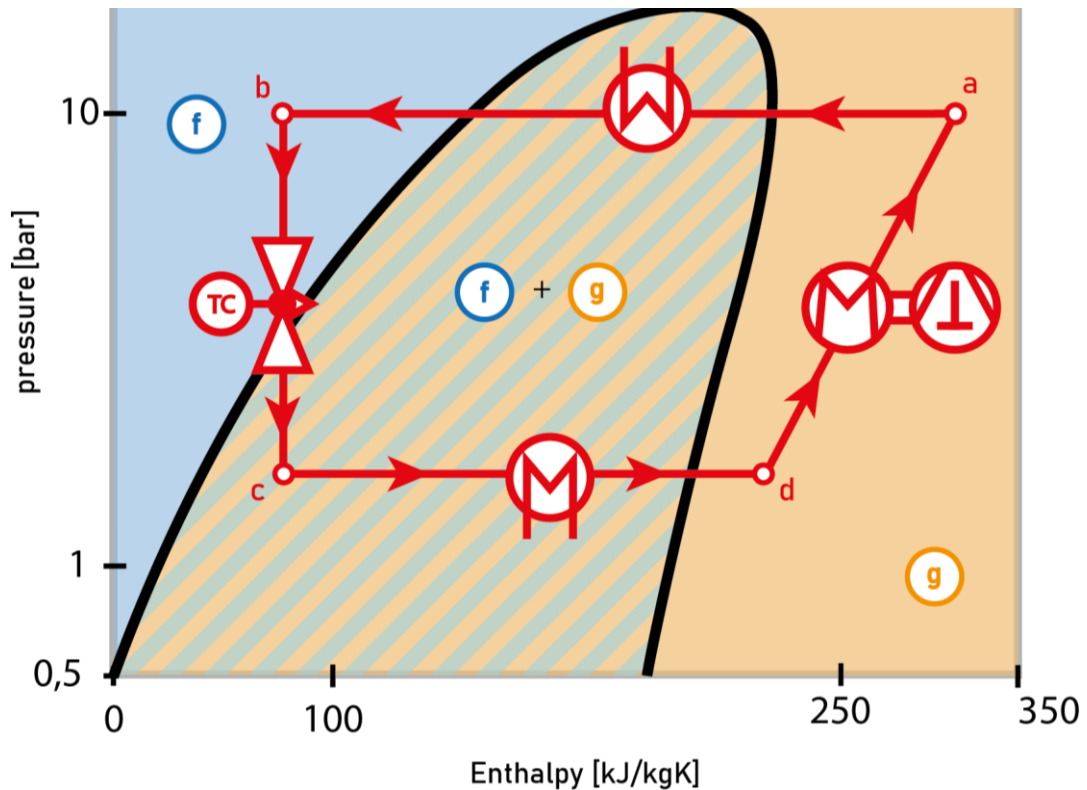


Kuva 3. R744-kylmäainejärjestelmän transkriittisen syklin kaaviokuva (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023).

### 3.3 R744 verrattuna R134a:han

Suurin ero transkriittisen R744-kylmäainejärjestelmän ja alikriittisen R134a-kylmäainejärjestelmän välillä on paine. Alikriittisen kylmäainejärjestelmän tavanomainen käyttöpaine on välillä 10–40 bar, kun taas transkriittisen kylmäainejärjestelmän tavanomainen käyttöpaine on välillä 90–130 bar. Huomioitavaa on myös se, että R134a-kylmäaine vaihtaa kierron aikana olomuotoaan nestemäisestä kaasuksi, kun taas R744-kylmäaine pysyy pääasiallisesti koko kierron aikana kaasumaisena järjestelmän korkeamman paineen vuoksi. R744-kylmäainejärjestelmässä puristus ja lämmönvaihto ulkoisessa lämmönvaihtimessa on yli kriittisen pisteen ja näistä syistä johtuen kaasua ei kyseisissä olosuhteissa

voi nesteyttää. R744-kylmäaineen jäähdytysteho on parempi, kuin R134a-kylmäaineen ja tämä taas antaa mahdollisuuden saavuttaa parempi järjestelmän hyötysuhde. (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023.) R134a-kylmäainejärjestelmän alikriittinen sykli on näkyvillä kuvassa 4.



Kuva 4. R134a-kylmäainejärjestelmän alikriittisen syklin kaaviokuva (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023).

### 3.4 GWP-arvot

Tarkasteltavien kylmäaineiden vaikutus maapallon ilmakehän otsonikerroksen vahingoittumisessa on eroja: R744 on otsonineutraali, joten sen GWP-arvo eli Global Warming Potential on 1, kun taas R134a-kylmäaineen GWP-arvo on 1430 ja se vahingoittaa otsonikerrosta huomattavasti enemmän. Tämän takia tilanteissa, joissa kylmäainetta vuotaa ilmakehään, on R744 paljon ympäristöystävällisempi vertailtavista kylmäaineista. Alhaisemman GWP-luvun ansiosta R744 on myös huoltoystävällisempää, sillä ilmastointijärjestelmää tyhjentäessä voidaan kylmäaine päästää vuotamaan hallitusti suoraan ilmakehään, kun taas

R134a:n tapauksessa on tyhjennettävä kylmäaine otettava huolellisesti talteen, ilman vuotoja. (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023.)

Toinen mainittava GWP-arvoltaan matalan autoalalla käytössä oleva kylmäaine on R1234yf. R1234yf-kylmäaineen GWP-arvo on myös 1, mutta tällä kylmäaineella on muita haitallisia ominaisuuksia. R1234yf:n käyttöturvallisuustiedoissa kerrotaan sen olevan erittäin helposti syttyvä, tukahduttava ja paleltumia aiheuttava kemikaali. (Kylmäainetta R1234yf käsiteltävä huolellisesti autojen ilmastointilaitteiden huollossa 2012.)

Vertailun vuoksi mainittakoon freonin (R12), jonka käyttö on kielletty vuodesta 2010 asti, vastaava GWP-arvo, 10900. Lisäksi maininnan arvoinen kylmäaine on vielä autoalallakin käytössä oleva kylmäaine R407A, jonka GWP-arvo on 2107. (High-GWP Refrigerants. California Air Resources Board 2018.) Taulukossa 1 on lueteltuna eri kylmäaineita ja niiden GWP-arvot.

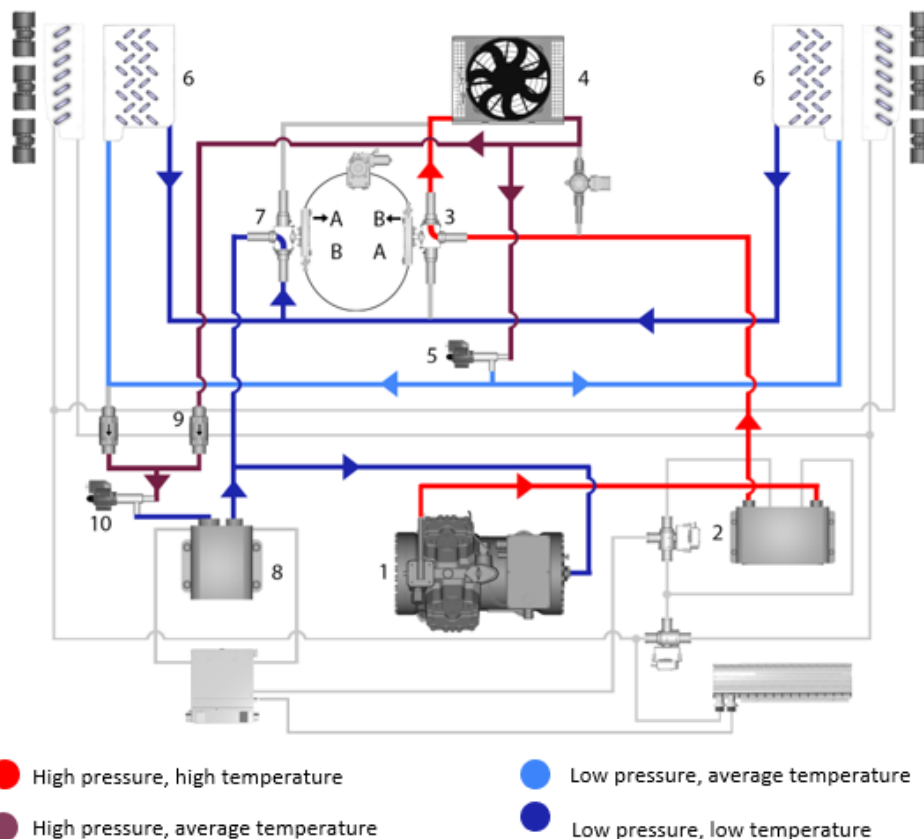
Taulukko 1. Mainittuja kylmäaineita taulukoituna GWP-arvon mukaan, suurimmasta pienimpään (High-GWP Refrigerants. California Air Resources Board 2018).

Kylmäaine	GWP-arvo
R12	10200
R407A	2107
R134a	1430
R1234yf	1
R744	1

### 3.5 R744:n viilennyskierto

CO<sub>2</sub>-kylmäaine puristetaan kompressorilla kasaan, josta se etenee kuuman veden lämmönvaihtimeen. Kuuman veden lämmönvaihtimessa kylmäaine lämmitteää vettä, minkä jälkeen 3/2-venttiili ohjaa vieläkin korkeassa lämpötilassa ja korkeassa paineessa olevan kylmäaineen ulkoiselle lämmönvaihtimelle, jossa lämpö siirtyy ulkoilmaan, kylmentäen kylmäainetta. Viilentynyt kylmäaine virtaa paisuntaventtiiliin, minä aikana kylmäaine laajenee ja kylmenee entisestään. Paisuntaventtiililtä kylmä ja matalapaineinen CO<sub>2</sub> ohjataan matkustamon lämmönvaihtimeen, jossa lämmin sisäilma siirtyy kylmäaineeseen. Tämän jälkeen lämmennyt kylmäaine palaa toisen 3/2-venttiilin kautta kompressorille. Kierron lopussa viileä kylmäaine voidaan ohjata takaiskuventtiiliin kautta etulaitteen paisuntaventtiiliin, jossa se laajenee ja viilenee entisestään. Paisuntaventtiililtä erittäin kylmä kylmäaine etenee etulaitteen lämmönvaihtimeen, jossa se jäähdyttää vettä. Lämmönvaihtimelta hieman lämmennyt kylmäaine palaa kompressorille. (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023.) R744:n viilennyskiertoa on havainnollistettu kuvassa 5.

## R744 circuit for cooling mode



Kuva 5. R744-ilmastoinnin viilennyskierto (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023).

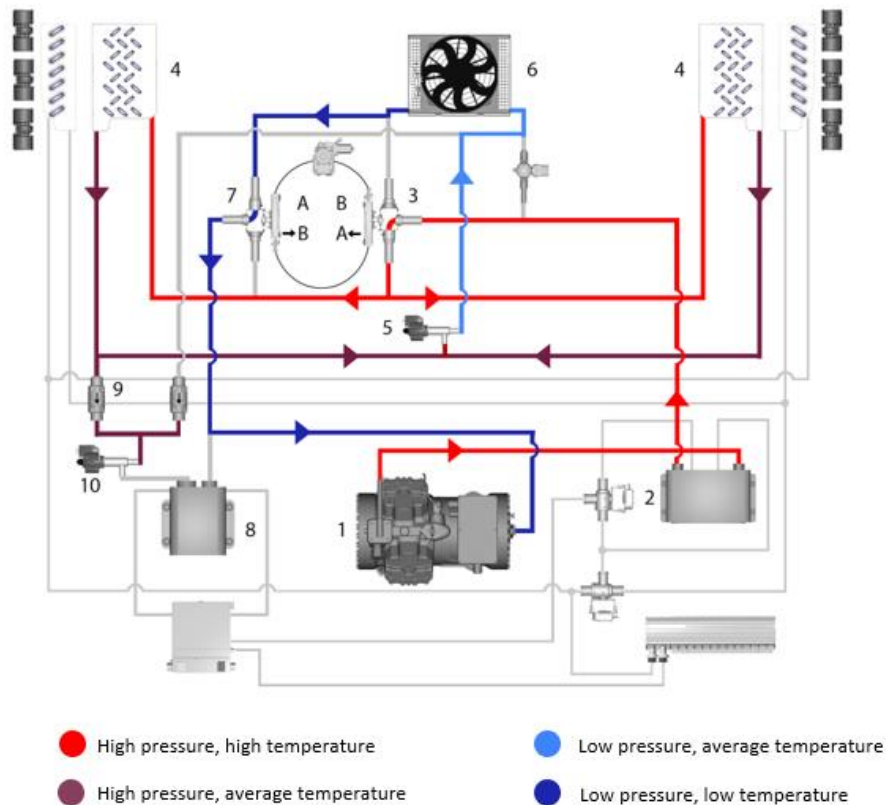
### 3.6 R744:n lämmityskierto

Kuten viilennyskierrossakin, ensimmäisenä CO<sub>2</sub>-kylmäaine puristetaan kasaan, mistä se etenee kuumen veden lämmönvaihtimeen, jossa se lämmittää vettä. Veden lämmityksen jälkeen, edelleen korkeapaineinen ja korkealämpöinen kylmäaine ohjataan 3/2-venttiilin kautta suoraan matkustamon lämmönvaihtimelle, joissa lämpöä luovutetaan matkustamon sisäilmaan. Tämän jälkeen viilentynyt kylmäaine ohjataan paisuntaventtiilille, jossa se laajenee ja viilenee entisestään. Erittäin kylmä kylmäaine etenee paisuntaventtiililtä ulkoiseen lämmönvaihtimeen, jossa siihen siirtyy ulkoilmasta lämpöä. Lopuksi hieman lämmennyt kylmäaine ohjataan toisen 3/2-venttiilin kautta takaisin kompressorille. (REVO-E



HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023.) R744:n lämmityskiertoa on havainnollistettu kuvassa 6.

R744 circuit for heating mode



Kuva 6. R744-ilmastoinnin lämmityskierto (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023).

### 3.7 R744:n lämmityskierto etulaitteen jäähdytyksellä

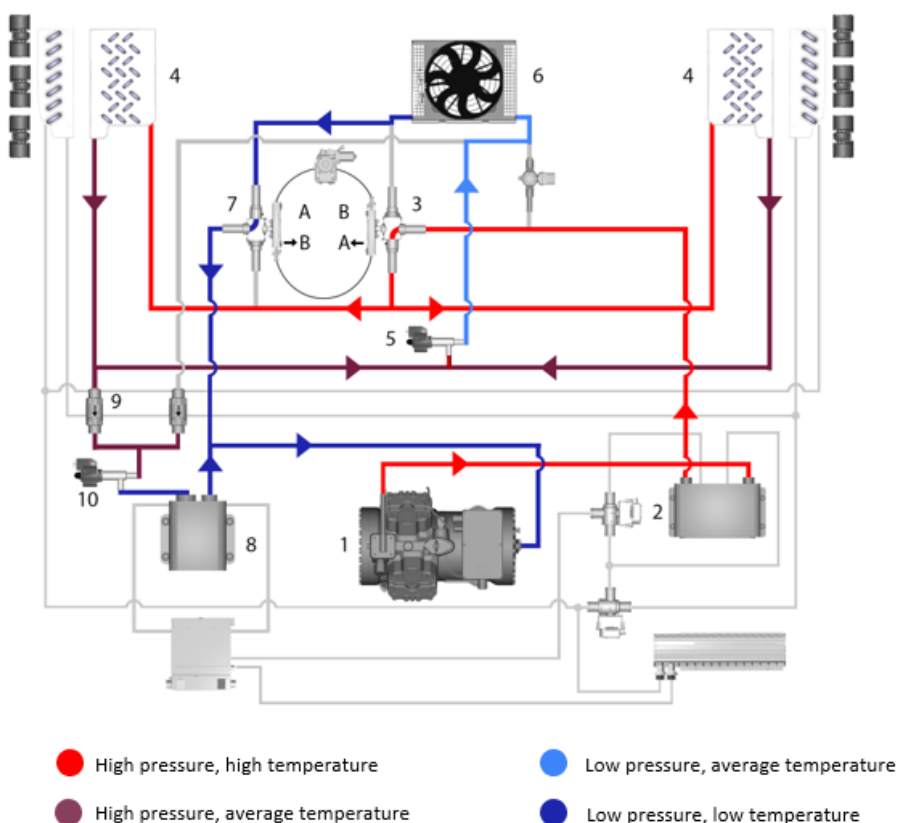
Tilanteessa, jossa on tarve lämmittää matkustamo, mutta kuljettaja haluaa omaan aitoonsa jäähdytystä, tarvitaan omanlainen kiertonsa. Tämä kierto yhdistelee lämmitys- ja jäähdytyskiertoja.

Kierro alkaa kompressorilta, jossa kylmäaine puristetaan kasaan ja josta se etenee kuuman veden lämmönvaihtimeen, jossa se lämmittää vettä. Veden lämmityksen jälkeen, edelleen korkeapaineinen ja korkealämpöinen kylmäaine ohjataan 3/2-venttiiliin kautta suoraan matkustamon lämmönvaihtimelle, jossa lämpöä luovutetaan matkustamon sisäilmaan. Tämän jälkeen viilentynyt kylmäaine

ohjataan paisuntaventtiilille, jossa se laajenee ja viilenee entisestään. Erittäin kylmä kylmäaine etenee paisuntaventtiililtä ulkoiseen lämmönvaihtimeen, jossa siihen siirtyy ulkoilmasta lämpöä. Lopuksi hieman lämmennyt kylmäaine ohjataan toisen 3/2-venttiilin kautta takaisin kompressorille.

Kierron lopussa viileä kylmäaine voidaan ohjata takaiskuventtiiliin kautta etulaitteen paisuntaventtiiliin, jossa se laajenee ja viilenee entisestään. Paisuntaventtiililtä erittäin kylmä kylmäaine etenee etulaitteen lämmönvaihtimeen, jossa se jäädyttää vettä. Lämmönvaihtimelta hieman lämmennyt kylmäaine palaa kompressorille. (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction. 2023.) R744:n lämmityskiertoa etulaitteen jäädytyksellä on havainnollistettu kuvassa 7.

R744 circuit for heating mode (front box cooling)



Kuva 7. R744-ilmastoinnin lämmityskierto etulaitteen viilennyksellä (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023).

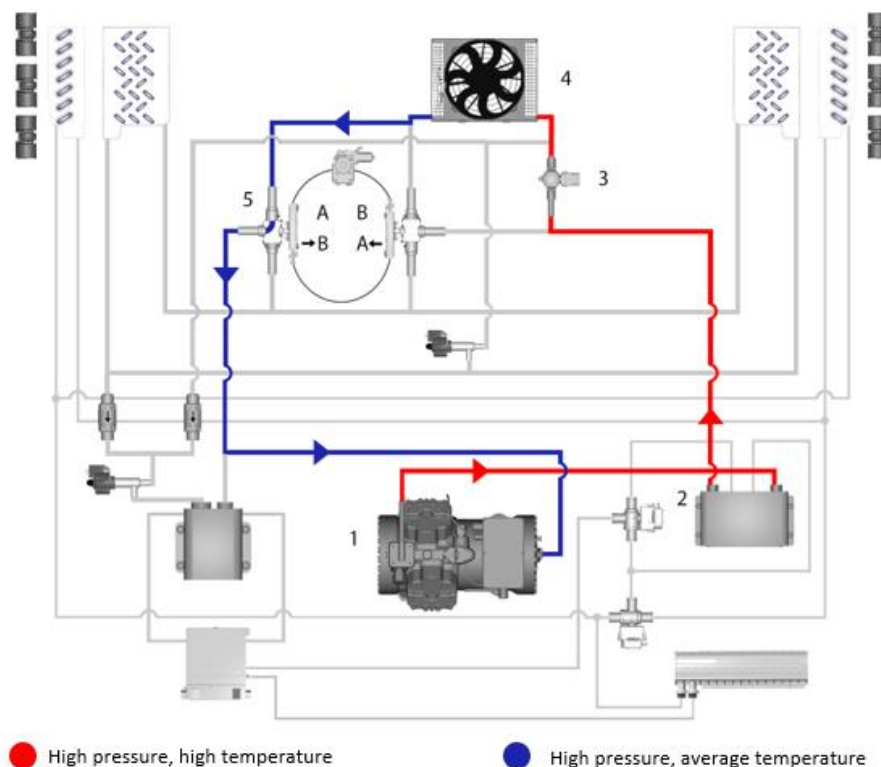
### 3.8 R744:n jäänpoistokierto eli de-icing mode

Korkea ulkoilman kosteusprosentti voi aiheuttaa ulkoisen lämmönvaihtimen kylmäaineputkien jäätymistä ja siitä seuraten järjestelmän tehokkuuden heikkene-  
misen. Pahimmillaan kylmäaineputkien jäätyminen voi estää ulkoilman läpikulun  
lämmönvaihtimista ja näin ollen estää ilmastointijärjestelmän toiminnan koko-  
naan. Suurin riskitilanne jäätymiselle on säätilanne, jossa ulkolämpötila on 5–10  
celsiusastetta ja ilman suhteellinen kosteus on yli 75 %. Näissä tilanteissa jään-  
poisto eli de-icing mode kytketään päälle automattisesti.

Jäänpoistokierto alkaa kompressorilta, jossa kylmäaine puristetaan kasaan ja  
josta se etenee kuumen veden lämmönvaihtimelle. Kuumen veden lämmön-  
vaihtimelta kuuma kylmäaine etenee suoraan sähkömagneettisesti ohjatun ohi-  
tusventtiilin kautta ulkoiselle lämmönvaihtimelle, jossa jäänpoisto tapahtuu.  
Kuuma kylmäaine virtaa ulkoisen lämmönvaihtimen läpi kauttaaltaan, jossa se  
sulattaa lämmönvaihtimen putket. Tämän jälkeen, kylmäaine ohjataan 3/2-vent-  
tiilin kautta takaisin kompressorille.

R744-kylmäainejärjestelmän jäänpoisto on hyvin nopea toimenpide korkean toi-  
mintalämpötilansa takia. Jäänpoisto voidaan suorittaa jopa 130 celsiusasteen  
lämpöisellä kylmäaineella. Nopean jäänpoistosyklin jälkeen matkustamon läm-  
mittämistä voidaan taas jatkaa. (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical  
Introduction 2023.) R744:n jäänpoistokiertoa on havainnollistettu kuvassa 8.

## De-icing mode



Kuva 8. R744-ilmastoinnin jäänpoistokierto (REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction 2023).

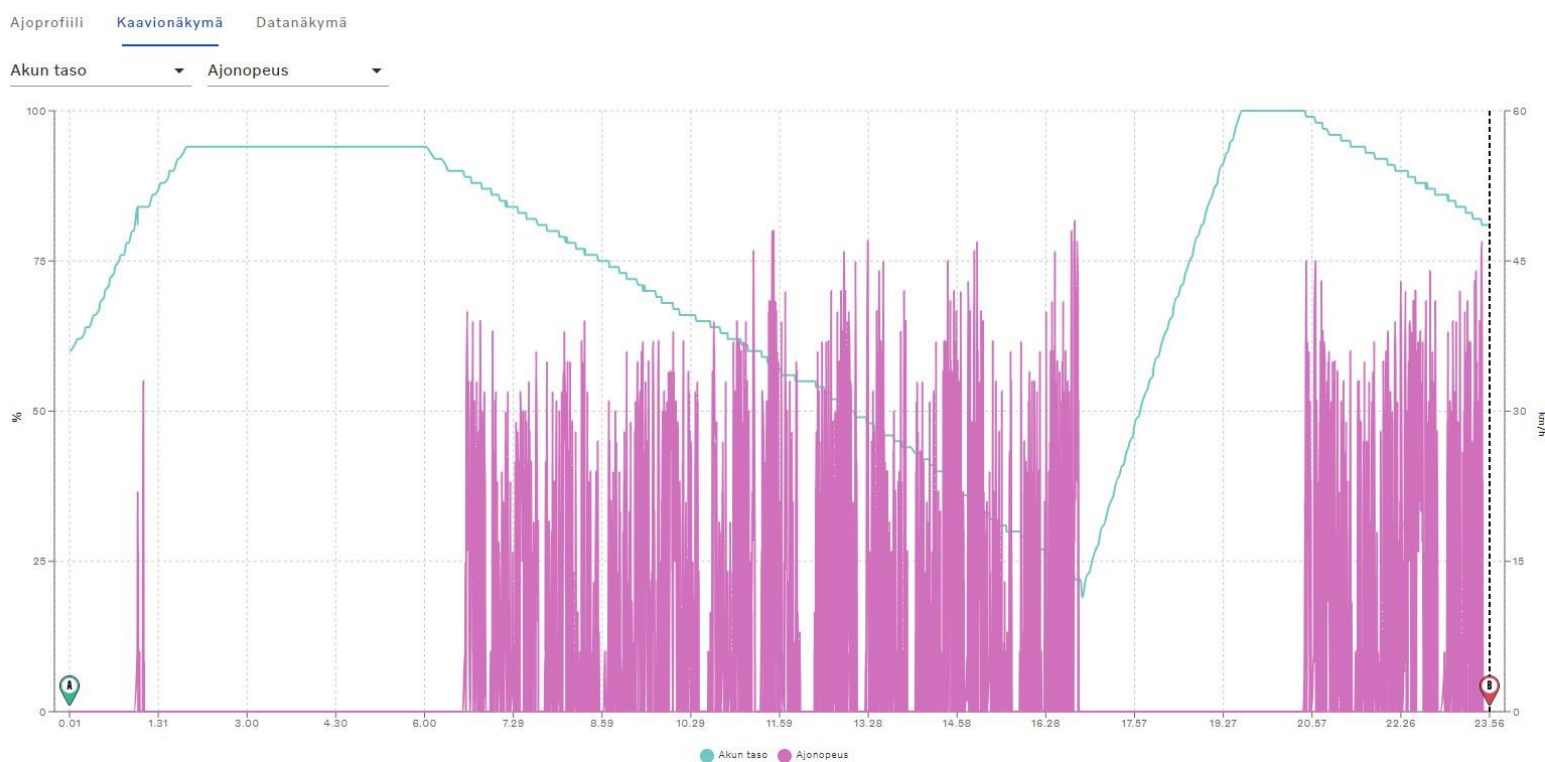
### 3.9 Lämpötilan mittaaminen

Linja-auton sisälämpötilaa säädetään eri sisälämpötila-antureiden välisen painotetun keskiarvon avulla. Kaksiakselisessa autossa lämpötila-antureita on kaksi, yksi matkustamon takaosassa yhden istuimen alla ja yksi kattokanavassa. Nivelautossa lämpötila-antureita on kahden ilmastoalueen takia neljä samalla tavalla sijoiteltuna: yksi istuimen alla oleva anturi ja yksi anturi kattokanavassa per ilmastoalue. Painotettu keskiarvo vertailee kattokanavan ja lattiatason antureita ja reagoi ulko- ja sisälämpötilaan sekä siihen, ovatko ovet auki vai kiinni. Johtuen siitä, että lämmin ilma nousee ylöspäin, ovien ollessa kiinni, lämpimässä ulkolämpötilassa painotetussa keskiarvossa painotetaan lattiatasossa sijaitsevaa anturia ja kylmässä ulkolämpötilassa taas painotetaan kattokanavassa sijaitsevaa anturia. Ulkolämpötilaa mitataan etupuskurin takana sijaitsevalla lämpötila-anturilla. (Volvo Impact varaosakirjasto 2024.)

## 4 Volvo Connect

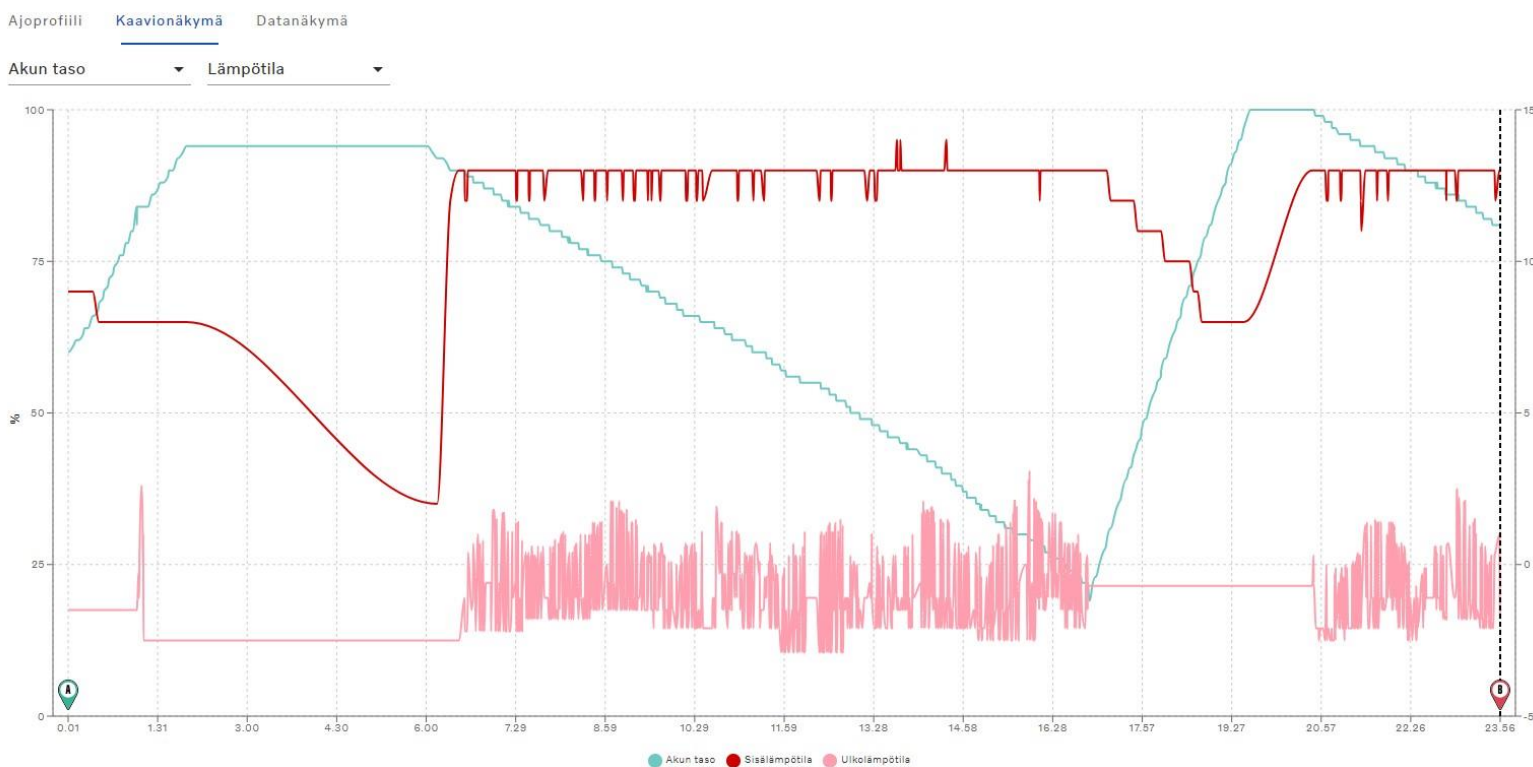
Volvo Connect on Volvon tarjoama telematiikkasovellus niin asiakkaan, kuin korjaamoiden ja jälkimarkkinahenkilökunnankin käyttöön. Volvo Connect näyttää muun muassa ajoneuvon sijainnin kartalla, aktiiviset vikakoodit ja erilaisia ajotapaan liittyviä lukemia, kuten keskinopeuden, keskikulutuksen, vaki-  
onopeussäätimen käyttöajan prosentteina koko ajoajasta ja hidastimen käytön jarrutustilanteissa. Lisäksi lämmityspuolta tarkkailtaessa, Volvo Connectista on nähtävissä ajoneuvon ulko- ja sisälämpötilat reaaliajassa.

Sähkölinja-autojen tarkkailemiseen Volvo Connect on tärkeä apuväline, sillä sen avulla pystyy seuraamaan sähköautolle ominaisia parametreja, kuten SOC-käyrä, ajamisen energiankulutus, 24 voltin järjestelmän energiankulutus ja 600 voltin järjestelmän energiankulutus. Vianhauissa erityisesti SOC-käyrän seuraminen ajo- ja lataustapahtumien aikana on tärkeää tietoa (kuva 9).



Kuva 9. Erään linja-auton vuorokauden ajotapahtumat, tarkasteltavina parametreina ajojänniteakkujen varaustaso ja ajonopeus. Kuvakaappaus Volvo Connectista.

Kuten edellä mainittu, Volvo Connectista on luettavissa linja-auton reaaliaikainen sisä- ja ulkolämpötila. Tämä on hyödyllistä tietoa linja-autojen HVAC-järjestelmän toimivuuden tarkkailussa sekä vianhaussa mutta myös tärkeä osa-alue tämän opinnäytetyön kannalta. Näitä käyriä seuraamalla voidaan tarkkailla linja-autojen lämmitys- ja viilennyskiertoja eri sisä- ja ulkolämpötilojen vallitessa sekä erilaisten ajotapahtumien aikana (kuva 10).



Kuva 10. Erään linja-auton vuorokauden ajotapahtumat, tarkasteltavina parametreina ajojänniteakkujen varaustaso ja linja-auton sekä sisä- että ulkolämpötilat. Kuvakaappaus Volvo Connectista.

## 5 Vertailtavat linja-autot

Tässä opinnäytetyössä vertaillaan kahden liikennöitsijän Volvo sähkölinja-autoja. Opinnäytetyön tarkastelun alaiset linja-autot on valittu, siten, että tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoiset. Linja-autot ajavat mahdollisimman samankaltaisia linjoja ja mahdollisimman samoissa sää- sekä liikenneolosuhteissa.

HSL-alueella liikennöitsijöiden välinen tarjouskilpailu on keskeisessä asemassa liikennöitsijöiden toiminassa, ja siksi liikennöitsijöiden pyynnöstä yrityksistä ei käytetä niiden oikeita nimiä, jottei tutkimuksen perusteella saataisi kilpailuetua puolin tai toisin. Liikennöitsijöiden anonymiteetin säilyttämiseksi tässä opinnäytetyössä käytetään termejä ”Liikennöitsijä A” ja ”Liikennöitsijä B”.

## 5.1 Tutkimuksen linja-autojen eroavaisuudet

Molempien liikennöitsijöiden tutkittavat linja-autot ovat Volvon kaksiakselisia B0E 7900E -sähkölinja-autoja. Olennaisin rakenteellinen ero on se, että Liikennöitsijän A linja-autot on varustettu kolmella poistumisovella, kun taas liikennöitsijän B linja-autot on varustettu vain kahdella poistumisovella. Muita merkittäviä rakenteellisia eroja tutkittavien linja-autojen välillä ei ole lukuun ottamatta ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmää.

## 5.2 Ilmastointijärjestelmät

Liikennöitsijän A linja-autoissa on Valeon Revo E HP R744 -ilmastointijärjestelmä, joka toimii R744- kylmäaineella eli hiilidioksidilla. Valeon Revo E HP R744 -järjestelmän nimellisviilennysteho on 38 kW ja lämpöpumpputoiminnon nimellisteho on 26 kW.

Liikennöitsijän B linja-autoissa on Valeon Revo E G2+ -ilmastointijärjestelmä, joka toimii R134a-kylmäaineella. Valeon Revo E G2+ -järjestelmän nimellisviilennysteho on 25 kW ja lämpöpumpputoiminnon nimellisteho on 16 kW. (Volvo kaupunkisähkölinja-auton HVAC-kurssi 2022.)

## 5.3 Lisälämmittimet

Liikennöitsijän A on linja-autoissa Valeon Thermo Plus 230 -polttoainelisälämmitin (kuva 11), joka on pelkkä polttoainelisälämmitin, mutta tämän lisäksi linja-autoon on kytketty kaksi kappaletta ulkoisia 12 kW:n portaattomasti säädettäviä

sähkölämmittimiä. Sähkölämmittimet ovat kuitenkin rajoitettu käyttämään enintään 10 kW:n tehoa yli -20 °C:n ulkolämpötilan vallitessa.



Kuva 11. Valeon Thermo Plus 230 -polttoainelämmitin.

Liikennöitsijän B linja-autoissa on Valeon Thermo H 230 -yhdistelmälämmitin (kuva 12). Thermo H 230 -lämmittimeen on integroitu polttoainepuolen lisäksi kaksi kappaletta 7 kW:n sähkölämmitysvastuksia. Sähkölämmitysvastukset on kuitenkin rajoitettu käyttämään enintään 7 kW:n tehoa yli -20 °C:n ulkolämpötilan vallitessa.



Kuva 12. Valeon Thermo H 230 yhdistelmälämmitin.



Kummankin lisälämmittimen polttoainepuolien nimellisteho on 23 kW, ja molempien lämmitysjärjestelmien sähkölämmityskomponentit toimivat 600 voltin jännitteellä. (Volvo-kaupunkisähkölinja-auton HVAC-kurssi 2022.)

## 6 Vertailutesti

### 6.1 Tutkimustaulukko

Tässä opinnäytetyössä tuotettiin Excel-taulukko, jonka avulla tarkastellaan sähkölinja-autojen energiankulutusta. Pääasiallinen energiankulutuksen yksikkö on sähköenergian kulutus suhteessa ajomatkaan eli kilowattituntia per kilometri (kWh/km). Taulukon arvot on valtaosin otettu Volvo Connectista, mutta polttoainetiedot on pyydetty liikennöitsijöiltä tätä tutkimusta varten.

Vasemmasta laidasta lähtien ensimmäisessä sarakkeessa A on linja-autot listattuna kylkinumeron mukaan nousevassa järjestyksessä. Sarakkeessa B on listattuna testijakson aikainen kokonaisenergiankulutus. Sarake C taas ilmaisee testijakson aikana ajamiseen kuluneen energian. Sarakkeessa D on ilmaistuna testijakson aikana ajettu matka. Näitä kolmea viimeksi edellä mainittuja arvoja vertaillaan seuraavassa kahdessa sarakkeessa: "Kulutus KA", sarake E, tarkastelee testijakson kokonaisenergiankulutusta suhteessa ajomatkaan ja taas "Kulutus", sarake F tarkastelee testijakson ajamisen aikana kulunutta energiaa suhteessa ajomatkaan. Sarakkeessa G on listattu sähkömoottorin kuluttama energia testijakson ajalta. Sarakkeessa H on listattu 24 voltin järjestelmän kuluttama energia, joka sisältää kaiken 24 voltin sähkönkäytön aina ohjausyksiköiden viestinnästä 24 voltin käyttölaitteisiin. Seuraavana on tämän opinnäytetyön kannalta tärkein tarkasteltava eli 600 voltin järjestelmän kuluttama energia, sarakkeessa I, joka kuten aikaisemmin jo mainittu, sisältää sähköisen paineilmakompressorin kuluttaman energian ja HVAC-järjestelmän kuluttaman energian. Sähköisen paineilmakompressorin keskimääräinen energiankulutus on jälkeenpäin vähennetty pois taulukosta, jotta voidaan keskittyä tarkastelemaan pelkkää HVAC-järjestelmän energiankulutusta. Mainittakoon toki, että sekä paineilmakompressorin ja HVAC-järjestelmää ohjataan 24 voltilla, mutta siihen kuuluva

energia on määrältään pientä, ettei se ole tämän opinnäytetyön kannalta relevanttia ja se löytyykin taulukosta lähinnä mainintana sisällytettynä 24 voltin järjestelmän energiankulutussarakkeesta. Sarake J tarkastelee sähkömoottorilla talteen otettavaa energiamäärää jarrutustilanteissa per kilometri. Sarakkeessa K on listattuna sähkömoottorin kuluttama energiamäärä, kun siitä on vähennetty talteen otettu energia. Sarakkeessa L on prosentuaalinen suhdeluku, talteen otettu energia jaettuna sähkömoottorin kuluttamalla energialla.

Sarakkeessa M on listattuna teoreettinen ajomatka, joka saadaan jakamalla akkujen nimellinen maksimiamatka vuorokauden ajamiseen kuluneella energialla. Sarakkeessa N on listattuna teoreettinen ajomatka 7 vuoden päästä samalla kaavalla, mutta tähän on arvioitu mukaan 7 vuoden aikana tapahtuva akkujen kulumisesta johtuva ajomatkan väheneminen. Tämä teoreettinen ajomatka 7 vuoden kuluttua on olennainen lukuarvo Volvon asiakkaille annetun akkulupauksen suhteen. Ajoakkujen maksimiamatkan alittaessa tietyn ennalta sovitun lukeman, on Volvo sitoutunut korjaamaan linja-auton niin, että tavoitelukemaan päästään.

Linja-auton käytön energiankulutusta vertailutilanteessa tarkkaillessa olisi puutteellista suhteuttaa kulunutta energiaa vain ajettuihin kilometreihin. Energiaa kuuluu lämmitykseen myös silloin, kun linja-auto on pysähtyneenä ja etenkin, kun poistumisovet ovat auki. Myös ajonopeus sekä jarrutukset, että kiihdytykset vaikuttavat energiankulutukseen huomattavasti. Siis liikenneruuhkat, matkustajien lukumäärä ja muut poikkeavat liikenneolosuhteet vaikuttavat myös kokonaisenergiankulutukseen. Varianssia on minimoitu valitsemalla mahdollisimman identtisiä linjoja ajavat testiautot, mutta kaikkia muuttujia ei saa otettua huomioon, kun tarkastellaan lukuarvoja telematiikan pohjalta. Nämä seikat huomioon ottaen taulukkoon on luotu sarake O eli ajamisen aikaisen kokonaisenergiankulutuksen suhteessa ajoaikaan, yksikkönä kilowattituntia per tunti (kWh/h) ja sarake P, jossa on listattuna linja-autojen testijakson aikainen keskinopeus.

Seuraavat kolme saraketta liittyvät polttoainelisälämmittimien kuluttamiin polttoainelukemiin. Lukemat on erikseen koostettu erillisen taulukon avulla ja tuotu

tähän samaan kokonaisuuteen mukaan vertailun helpottamiseksi. Sarakkeessa Q on listattu testijakson aikana tankattujen litrojen summa. Sarakkeessa R tarkastellaan polttoaineen kulutusta suhteessa ajettuun ajomatkaan yksiköllä litraa per kilometri. Sarakkeessa S tarkastellaan polttoaineen kulutusta suhteessa ajoaikaan yksiköllä litraa per tunti.

Viimeiseen kuuteen sarakkeeseen on listattu linja-autojen lämmittämiseen kuluneita kustannuksia. Kustannuksia tarkastellaan testijakson ajalta erikseen sähköllä lämmittämiseen kuluneen rahamäärän ja polttoaineella lämmittämiseen kuluneen rahamäärän osilta. Kustannusmäärät ovat jaettu pienempiin osiin koko testijakson kustannuksien summista ja ovat siis keskiarvoja testijaksolta. Testijakson aikaisia lämmityskustannuksia havainnollistetaan keskiarvoisella kilometrikohtaisella kustannuksella, keskiarvallisella päiväkohtaisella kustannuksella sekä keskiarvoisella viikkokohtaisella kustannuksella. Sähköllä lämmittämisen kustannuksia on tarkasteltu sarakkeessa T yksiköllä euroa per ajettu kilometri, sarakkeessa U yksiköllä euroa per päivä sekä sarakkeessa V yksiköllä euroa per viikko. Polttoaineella lämmittämisen kustannuksia on tarkasteltu vastaavasti sarakkeessa W yksiköllä euroa per kilometri, sarakkeessa X yksiköllä euroa per päivä sekä Sarakkeessa Y yksiköllä euroa per viikko.

## 6.2 Testiin vaikuttavat muut muuttujat

Linja-autojen käytössä on silti vielä lisää muuttujia ja kaikkea on mahdoton ottaa huomioon. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun ulkopuolella ajavien autojen keskinopeus on suurempi, pysähtymisprosentti pienempi ja ovien aukioloaika pienempi, kuin Helsingin keskustassa ajavien linja-autojen vastaavat luvut. Tästä seuraakin, että Helsingin keskustassa ajavien linja-autojen sähköenergian kulutus on huomattavasti suurempi, kuin pääkaupunkiseudun ulkopuolella ajavien linja-autojen.

Kuitenkin vaikka kaikki edellä mainitut asiat ottaa huomioon, jää linja-autojen ja liikennöitsijöiden välille eroja, kuten eri kuljettajien erilaiset ajotavat, esilämmityksen käyttö ja linja-auton säilytyspaikka. On tiedossa, että eräs liikennöitsijä

säilyttää linja-autojaan sisätiloissa, jolloin jo lähtötilanteessa linja-autojen sisälämpötila on liikennöintiin riittävällä tasolla. Tässä tilanteessa säästetään matkustamon lämmittämiseen kuluva sähköenergian käytössä huomattavasti. Kyseisen liikennöitsijän linja-autoja ei ole kuitenkaan tässä opinnäytetyössä tarkasteltavana.

Näistä syistä opinnäytetyössä tarkastellaan vain linja-autoja, jotka lähtevät samanlaisista lähtötilanteista ja joilla ajetaan samankaltaisia linjoja. Taulukon jatkokäytössä on nämä seikat kuitenkin otettava huomioon, kun vertaillaan erilaisella käytöllä olevia linja-autoja keskenään.

### 6.3 Säätiiedot testijaksolta

Opinnäytetyön lopputuloksen kannalta on tärkeää huomioida tarkasteltavien päivien tarkat sääolosuhteet. Testijakson aikaiset ilmastotiedot on ladattu Ilmatieteenlaitoksen ilmastohistoriasta. Ilmastotiedoissa on huomioitu päiväkohtainen ilman keskilämpötila sekä päiväkohtainen ylin ja alin lämpötila. Ilmastotiedot on ladattu kahden eri sääaseman, Helsinki Kaisaniemi ja Vantaa Helsinki-Vantaan lentoasema, mittaustuloksista, sillä testin alaiset linja-autot liikennöivät sekä Helsingissä että Vantaalla. Testijakson ilmastotiedot ovat näkyvissä taulukoista 2 ja 3 (liite 1). Keskilämpötiloista laskemalla saadut koko testijakson keskilämpötilat olivat Helsinki Kaisaniemi -sääasemalta  $-4,4\text{ °C}$  ja vastaavasti Vantaa Helsinki-Vantaan lentoasema -sääasemalta  $-6,1\text{ °C}$  (liite 1).

### 6.4 600 voltin järjestelmän energiankulutus

600 voltin järjestelmän energiankulutus on lukema, jota tarkkaillaan tämän opinnäytetyön aikana erityisesti. Koska ajamisen energiankulutus on oma lukemansa, 600 voltin järjestelmän energiankulutus pitää sisällään vain sähköisen paineilmakompressorin sekä ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmän kuluttaman energian. Kun tästä lukemasta on poissuljettu keskimääräinen paineilmakompressorin kuluttama energia, voidaan vertailla ja tarkastella puhtaasti vain ja ainoastaan ilmastointi- ja lämmitysjärjestelmän energiankulutusta.

Paineilmakompressorin kuluttaman sähköenergian määrän selvittämiseen on käytetty testikäyttöön tarkoitettua korin ohjelmistoa, joka ilmoitti 600 voltin järjestelmän kulutuksen kohdalla Volvo Connectiin vain paineilmakompressorin kuluttaman energiamäärän. Kyseinen testiohjelmisto oli käytössä vain Liikennöitsijän A linja-autoissa lokakuussa 2023, mutta koska testin kaikissa linja-autoissa on identtinen paineilmakompressorin, voidaan todeta tämä kyseinen lukema luotettavaksi arvoksi molempien liikennöitsijöiden linja-autoja tarkastellessa. Tämän niin sanotun nollakohdan hakemiseksi on valittu lokakuusta 2023 viisi peräkkäistä päivää ja näiden päivien aikana ajaneiden linja-autojen 600 voltin järjestelmän energiankulutuksien keskiarvon laskemalla saadaan kirjattua ylös tyypillinen sähköisen paineilmakompressorin kuluttama energiamäärä per kilometri. Sähköisen paineilmakompressorin keskimääräiseksi kulutukseksi tilastoitiin 0,06 kWh/km. Tämän nollakohdan määrittämisen ajankohta oli 16. –20.10.2023.

## 6.5 Polttoainekulutustiedot

Polttoainekulutukset tätä opinnäytetyötä varten on pyydetty suoraan liikennöitsijöiltä. Lukemat saatiin Excel-tiedostoina, formaatissa testijakson aikana tehdyt yksittäiset tankkaukset ja näiden litramäärät. Tankatut litrat on sittemmin koostettu ensin koko testijakson summaksi sekä jaettu päivä-, kilometri- ja tuntikohtaisesti testijakson ajalta.

## 6.6 Sähkön kustannus testijaksolla

Sähköenergian ja polttoaineen hinnat ovat liikennöitsijöille keskeisiä liikesalaisuuksia ja tästä syystä tässä opinnäytetyössä hintatietoina käytetään yleistiedossa olevaa tilastoitua pörssisähkön verotonta keskihintaa sekä uusiutuvan polttoöljyn laskennallista verotonta keskihintaa. Testijaksolla sähköenergian arvonlisäveroton keskihinta oli 7,63 snt/kWh. (Pörssisähkön keskihinta 2024.)

## 6.7 Polttoaineen kustannus testijaksolla

HSL velvoittaa liikennöitsijöitä käyttämään sähkölinja-autojen polttoainelisälämmittimissä biopohjaista polttoainetta. Polttoainetta ei kuitenkaan käytetä ajamiseen, joten on sallittua käyttää lisälämmittimiä tankatessa biopohjaista polttoöljyä. Biopohjainen uusiutuva polttoöljy taas on biodieselöljyyn verrattuna halvempaa verotuksen takia. (Nestemäisten polttoaineiden verotaulukot. 2024.) Koska uusiutuvan polttoöljyn tilastoitu keskihintaa ei ollut tämän opinnäytetyön tekohetkellä saatavilla, on hinta määritetty laskennallisesti. Uusiutuvan ja fossiilisen polttoöljyn hintaeron muodostaa käytännössä verotus. Kun tiedossa on fossiilisen polttoöljyn tilastoitu testijakson aikainen keskihinta ja saman toimittajan myymät sekä fossiilisen että uusiutuvan polttoöljyn tämänhetkiset hinnat, voidaan verrannon avulla laskea testijakson aikainen oletettu uusiutuvan polttoöljyn hinta-arvio. Hinta-arvioon käytetään tässä opinnäytetyössä Nesteen polttoöljyä. Verrannossa käytettävät hinta-arvot ovat Neste Tempera fossiilinen polttoöljy, talvilaatu, jonka verollinen hinta opinnäytetyön tekohetkellä 1,471 €/l ja Neste MY uusiutuva polttoöljy, talvilaatu, jonka verollinen hinta opinnäytetyön tekohetkellä oli 1,727 €/l (Neste lämmitysöljy ja polttoöljy. Hankkija.fi). Testijakson aikana kevyen polttoöljyn keskihinta oli 1,41 €/l. Verrannolla laskettuna testijakson uusiutuvan polttoöljyn verolliseksi hinnaksi muodostui 1,655 €/l ja kun tästä vähennetään arvonlisävero, hinnaksi saadaan 1,33 €/l.

## 6.8 Taulukosta poistetut linja-autot

Lopullisesta taulukosta on poistettu tiettyjä linja-autoja, joiden tietyt lukemat olivat selkeitä poikkeamia. Vikojen tai ajamattomien linjojen vaikutus muuttaisi taulukon autojen keskiarvoa väärään suuntaa. Taulukosta on poistettu yksi linja-auto, joka ei testijakson aikana ajanut ollenkaan ja neljä linja-autoa, joilla testijakson aikainen ajo oli niin vähäistä, että sähkökulutus oli suuri poikkeama sisärautoihin verrattuna. Kaksi linja-autoa on myös poistettu taulukosta toimimattomien polttoainelisälämmittimien takia.

## Lähteet

A history of forward thinking. 2021. Verkkoaineisto. Volvo Buses Global. <<https://www.volvobuses.com/en/why-volvo/about-us/our-history.html>>. Päivitetty 26.5.2021. Luettu 13.3.2024.

Çengel, Yunus & Boles, Michael. 2015. Thermodynamics: An Engineering Approach. Eighth Edition in SI Units. Singapore: McGraw-Hill Education.

Freon 134a Thermodynamic Properties. 2018. Verkkoaineisto. Freon. <<https://www.freon.com/en/-/media/files/freon/freon-134a-si-thermodynamic-properties.pdf?rev=7519d264dfd74fe68c04c9e119f7361f>>. Päivitetty 2018. Luettu 18.3.2024.

GT2800733 REVO-E HP R744 CLIMATE UNIT Technical Introduction. 2023. Yrityksen sisäinen dokumentti.

Havaintojen lataus. 2024. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>>. Päivitetty 18.3.2024. Luettu 18.3.2024.

High-GWP Refrigerants. 2018. Verkkoaineisto. California Air Resources Board. <<https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/high-gwp-refrigerants>>. Päivitetty 17.7.2018. Luettu 13.3.2024.

Kylmäainetta R1234yf käsiteltävä huolellisesti autojen ilmastointilaitteiden huollossa. 2012. Verkkoaineisto. Tukes. <<https://tukes.fi/-/kylmaainetta-r1234yf-kasiteltava-huolellisesti-autojen-ilmastointilaitteiden-huollos-1>>. Päivitetty 5.11.2012. Luettu 18.3.2024.

Nestemäisten polttoaineiden verotaulukot. 2023. Verkkoaineisto. Verohallinto. <<https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/nestemaiset-polttoaineet/verotaulukot/>>. Päivitetty 21.12.2023. Luettu 15.3.2024.

Neste lämmitysöljy ja polttoöljy. 2024. Verkkoaineisto. Hankkija.  
<<https://www.hankkija.fi/tuotantopanokset/polttoaineet-ja-lammitysoljy/tr-neste-lammitysoljy-ja-polttooljy-3568#f>>. Päivitetty 15.3.2024. Luettu 15.3.2024.

Perttula, Jarmo. 2000. Energiatekniikka. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Polttonesteiden keskihintoja, kuukausitiedot. 2024. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <[https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_khi/statfin\\_khi\\_pxt\\_11xx.px/table/tableViewLayout1/](https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__khi/statfin_khi_pxt_11xx.px/table/tableViewLayout1/)>. Päivitetty 29.2.2024. Luettu 6.3.2024.

Pörssisähkön keskihinta. 2024. Verkkoaineisto. Pörssisähkö.fi. Verkkoaineisto, <<https://www.porssisahkoa.fi/>>. Päivitetty 15.3.2024. Luettu 15.3.2024.

Volvo Impact varaosakirjasto. 2024. Yrityksen sisäinen dokumentti

Volvo-kaupunkisähkölinja-auton HVAC-kurssi. 2022. Yrityksen sisäinen dokumentti.



## Helsingin ilmastotiedot testijaksolta

**Taulukko 2. Testijakson ilmastotiedot Helsinki Kaisaniemi -sääasemalta 4. -17.12.2023**

Havainto- asema	Vuosi	Kuu- kausi	Päivä	Aika [Paikalli- nen aika]	Alin lämpö- tila [°C]	Ylin lämpö- tila [°C]	Ilman kes- kilämpötila [°C]
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	4	02:00	-13,2	-8,6	-10,3
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	5	02:00	-12,3	-7,1	-8,9
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	6	02:00	-7,2	-2,7	-3,5
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	7	02:00	-3,5	-1,4	-2,2
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	8	02:00	-5,3	-2,1	-4,5
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	9	02:00	-8,9	-4,4	-6,7
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	10	02:00	-4,6	-3,5	-3,9
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	11	02:00	-6,6	-1,9	-4,1
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	12	02:00	-7,5	-6,1	-6,6
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	13	02:00	-6,1	-3,2	-4
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	14	02:00	-5,4	-2,9	-4,1
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	15	02:00	-7	-2,8	-4,6
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	16	02:00	-7,2	2,6	-0,3
Helsinki Kaisaniemi	2023	12	17	02:00	0,7	4,6	2,3

## Vantaan ilmastotiedot testijaksolta

**Taulukko 3. Testijakson ilmastotiedot Vantaa Helsinki-Vantaan lentoasema -sääsasemalta 4.–17.12.2023**

Havaintoasema	Vuosi	Kuukausi	Päivä	Aika [Pai- kallinen aika]	Alin läm- pötila [°C]	Ylin läm- pötila [°C]	Ilman keski- lämpötila [°C]
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	4	02:00	-15,3	-9,3	-11,2
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	5	02:00	-17,1	-9	-11,9
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	6	02:00	-14,1	-4,6	-8,7
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	7	02:00	-6	-3,4	-4,2
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	8	02:00	-7,9	-3,4	-5,3
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	9	02:00	-10,4	-7,7	-9,1
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	10	02:00	-7,7	-4,4	-5,8
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	11	02:00	-7,8	-4,5	-6,3
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	12	02:00	-8,8	-6,8	-7,6
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	13	02:00	-6,8	-4,2	-5
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	14	02:00	-6,3	-3,6	-5
Vantaa Hel- sinki-Vantaan lentoasema	2023	12	15	02:00	-7,6	-3,5	-4,7

Vantaa Helsinki-Vantaan lentoasema	2023	12	16	02:00	-6,2	2,4	-1,3
Vantaa Helsinki-Vantaan lentoasema	2023	12	17	02:00	-3,1	4,2	1,3