UDT LIIKENNELAITTEEN ENERGIANKULUTUSLASKENTA JA VERTAILU OLEMASSA OLEVIIN LIIKENNELAITTEISIIN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

2024

Eelis Hytönen

Tarkastaja: TkT, Lassi Aarniovuori

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Eelis Hytönen

UDT LIIKENNELAITTEEN ENERGIANKULUTUSLASKENTA JA VERTAILU OLEMASSA OLEVIIN LIIKENNELAITTEISIIN

Kandidaatin työ

2024

35 sivua, 8 kuvaa ja 9 taulukkoa

Tarkastaja: TkT, Lassi Aarniovuori

Avainsanat: energiankulutuslaskenta, ilmakiskorata

Kandidaatintyössä tutkitaan ja vertaillaan Suomen pääkaupunkiseudun eri liikennemuotojen energiankulutusta. Työssä myös otetaan verrattavaksi UDT-yrityksen suunnittelema ilmakiskorata, ja tutkitaan minkälainen sen kulutus on verrattuna olemassa oleviin liikenteenmuotoihin. Energiankulutukset lasketaan kustakin muodosta sekä analysoidaan vuosien varrella tapahtuneita muutoksia kulutuksissa. Lopputuloksena saadaan nykytilanne energiankulutuksista ja nähdään minkälainen ilmakiskoradan kulutus on.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Eelis Hytönen

UDT URBAN TRACK ENERGY CONSUMPTION CALCULATION AND COMPARISON TO EXISTING TRAFFIC DEVICES

Bachelor's thesis

2024

35 pages, 8 pictures and 9 tables.

Examiner: PhD Lassi Aarniovuori

Keywords: energy consumption calculation, urban track

This bachelor's thesis studies and compares energy consumption of different traffic devices available in Helsinki-region Finland. Thesis also studies UDT's urban track transportation method by calculating its energy consumption and compares it to the existing modes. The thesis conducts calculations about each mode resulting energy consumption. In addition, it analyzes the differences in energy consumption happened in different years. The goal for this thesis was to see what the energy consumptions are in different traffic devices and to see how urban track compares to them.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	Kapselin etuosan pinta-ala [m^2]
c	Vierimisvastuskerroin
c_d	Ilmanvastuskerroin
E	Energiankulutus matkustajakilometriä kohden [kWh/matk.km]
$E_{b,\ matk.km}$	Sähköbussin energiankulutus matkustajakilometriä kohden [kWh/matk.km]
$E_{b,\ tot}$	Sähköbussien kokonaiskulutus [GWh]
E_d	Dieselbussin kulutus per kilometri [kWh]
e_d	Dieselin energiamäärä [MJ/l]
E_{km}	Sähköbussin keskimääräinen kulutus kilometriä kohden [kWh/km]
F_d	Ilmanvastusvoima [N]
F_r	Vierimisvoima [N]
F_t	Vastusvoimien summa [N]
k	Diesel bussin kulutus [l/100 km]
L_b	Bussin linjakilometrit [milj.km]
M_b	Bussin matkustajakilometrit [milj.km]
n_b	Sähköbussien osuus kyseisenä vuonna [%]
P	Moottorin teho [W]
q	Vakio joulesta kilowattitunteihin
t	Kapselin aika kulkea yksi kilometri
v	Kapselin nopeus [m/s]
W	Kapselin paino [N]
ρ	Ilman tiheys [kg/m^3]
η	Moottorin hyötysuhde [%]

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Kiitokset)

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1 Johdanto 7
2 Taustaa 9
2.1.1 Sähköajoneuvojen kasvu 9
2.1.2 Päästöt 11
3 Menetelmät 13
3.1 Lähijunat, metrot ja raitiovaunut 13
3.2 Bussit ja sähköhenkilöautot 14
3.2.1 Bussit 14
3.2.2 Sähköautot 15
3.3 Ilmakiskorata 16
4 Tulokset 17
4.1 Lähijunat, metrot ja raitiovaunut 17
4.2 Bussit ja sähköhenkilöautot 20
4.2.1 Bussit 20
4.2.2 Dieselbussit 22
4.2.3 Sähköhenkilöautot 23
4.3 Ilmakiskorata 24
4.4 Liikennemuotojen vertailu 26
5 Pohdinta 29
6 Johtopäätökset 30

Lähteet 32

1 Johdanto

Suomella on tavoitteena vähentää kasvihuonepäästöjä 60 prosenttia vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 1990 tasoon. Tämän lisäksi Suomi tavoittelee hiilineutraalisuutta vuoteen 2035 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2023). Tavoitteen saavuttaminen edellyttää suurta muutosta Suomen infrastruktuuriin. Tämän työn päätehtävä on vertailla eri liikennemuotojen energiankulutusta Suomessa sekä UDT-yrityksen ilmakiskorataa.

UDT Technologies on suomalainen yritys, joka on suunnittelemassa ja toteuttamassa ilmakiskorataan perustuvaa automaattista liikenne- ja logistiikkaekosysteemiä. Teknologian ytimessä on ilmakiskorata, jolla olisi mahdollista kuljettaa ihmisiä sekä tavaralogistiikkaa. UDT kertoo heidän sivuillaan (UDT, 2024) pyrkivän tuomaan ilmakiskoradallaan edistystä sähköiseen liikenteeseen sekä logistiikan palveluiden saatavuuteen. He mainitsevat radan matalista rakennuskustannuksista verrattuna muihin kiinteisiin ratainfrastruktuureihin sen lisäksi, että sillä on matalat operointi- ja ylläpitokustannukset. Radan ollessa ilmassa, he uskovat sen vähentävän ruuhkia kaupungissa ja lisäksi asemat olisi mahdollista integroida suoraan jo rakennettuun ympäristöön. Tämä myös vapauttaisi kaupungin maapinta-alaa muuhun käyttöön ja kehitykseen, esimerkiksi viheralueiden laajentamiseen ja yleisesti turvallisempaan ympäristöön. Ilmakiskoradan merkittäviin etuihin kuuluvat päästöttömyys, edullinen ja nopea liikuttaminen sekä turvallisuus. He uskovat tämän kasvattavan kaupunkien viihtyvyyttä sekä kannustavan liikkumaan terveellisesti ja kestävillä tavoilla.

Suomessa julkisen liikenteen valikoima on laajin pääkaupunkiseudulla ja Tampereella. Turussa on myös meneillään raitiotiehanke (Turun kaupunki, 2023). World Resources Instituten (2023) mukaan julkisen liikenteen määrää, erityisesti sähköbusseja, pitäisi lisätä maailmalla, jotta ilmastotavoitteissa pysytään kiinni. Suomessa Helsingin seudun liikenne (HSL) on lisännyt sähköbussien määrää huomattavasti. Vuonna 2018 sähköbussien osuus oli vain 1 % busseista, vuonna 2023 määrä oli noussut 34 %:iin (HSL, 2024).

Työssä vertailtavat liikennevälineet ovat lähijunat, metrot, raitiovaunut, bussit sekä henkilöautot. Lähiliikenteen osalta analyysi suoritetaan pääkaupunkiseudulta kerätystä tiedosta. Tämän lisäksi UDT:n ilmakiskoradan energiankulutuksesta esitetään laskennallinen arvio, sillä sitä ei ole vielä missään käytössä. Olemassa olevissa liikenteen muodoissa käytetään HSL:ltä

saatua dataa pohjana metron, lähijunan, raitiovaunun sekä sähköbussien laskuissa. Autoista tutkitaan kolmea eri kokoluokan mallia ja busseista analysoidaan vielä lyhyesti erikseen dieselmallia.

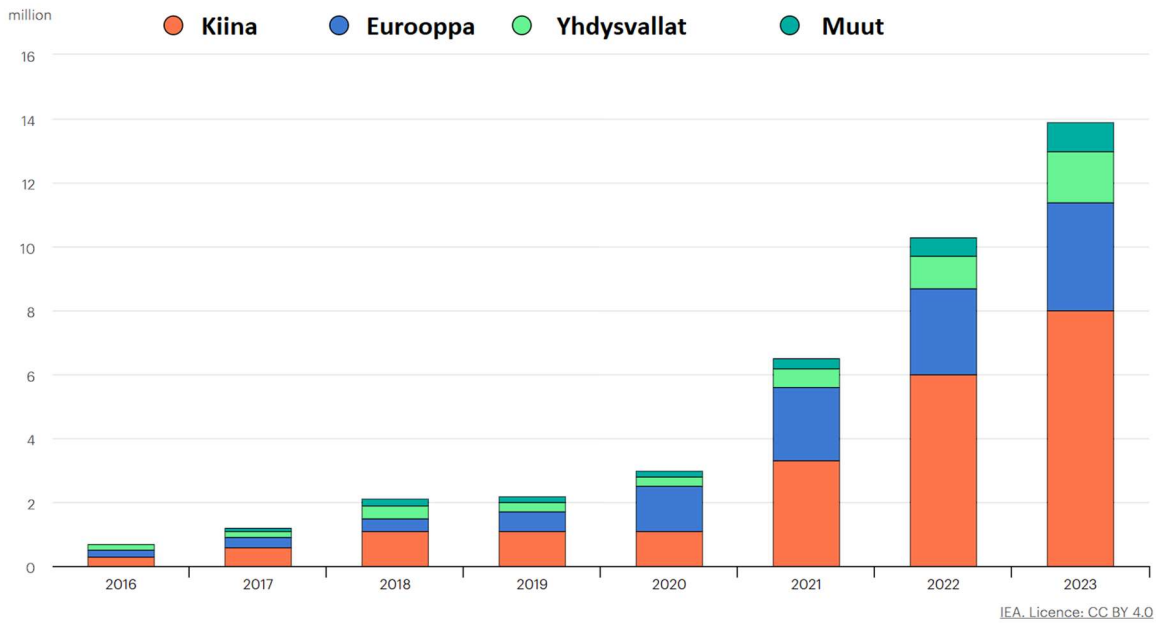
Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää eri liikennemuotojen energiankulutukset ja vertailla niitä toisiinsa. Tutkimuksessa selvitetään myös, miten energiankulutus on muuttunut vuosien varrella ja mistä muutokset ovat johtuneet. Tutkimuksen avulla saadaan selville, minkälainen energiankulutuksen taso ilmakiskoradalla on verraten nykyiseen liikennejärjestelmään.

Tutkimuksen avulla saadaan selville mikä on liikennemuotojen nykytilanne energiankulutuksen kannalta ja minkälainen kulutus ilmakiskoradan kapselilla on niihin verrattuna.

2 Taustaa

2.1 Sähköajoneuvojen kasvu

Maailman mittakaavassa sähköinen liikenne ei ole vielä päässyt kovinkaan paljon vauhtiin. International Energy Agencyn mukaan vielä noin 91 % energian loppukäytöstä liikenteessä on öljyperäistä. Tieliikenteen sähköistäminen näyttää lupaavimmalta keinolta muuttaa tätä. (IEA, 2023). Sähköajoneuvojen määrä kuitenkin kasvaa koko ajan.

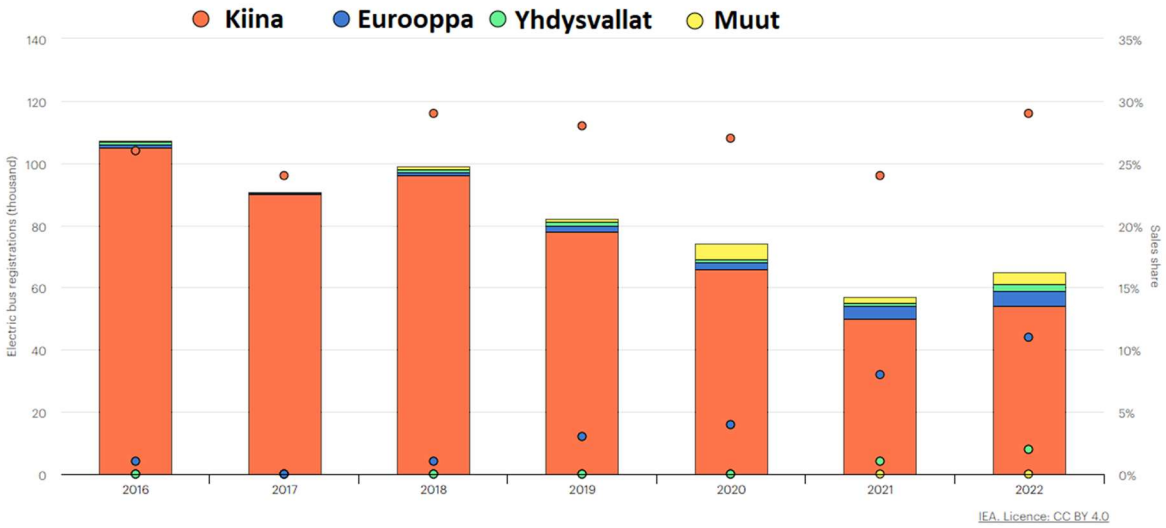


Kuva 1. Myytyjen sähköajoneuvojen markkinaosuus alueittain, 2016–2023. Kuvan muokannut [Eelis Hytönen]. Lähde: International Energy Agency (IEA), CC BY 4.0.

IEAn kuvasta voidaan nähdä, että sähköautojen osuus on kasvamassa. Vuonna 2016 sähköautoja myytiin noin miljoona, kun taas vuonna 2023 myytiin jo 14 miljoonaa. Alun perin sähköautoilla oli ongelmana niiden lyhyt kantama ja latausasemien rajallinen määrä. Tämä on ollut myös osana syytä miksi ihmiset eivät ole halunneet ostaa sähköautoja (Arenawire, 2023). Myös erilaisten valtiollisten avustuksien ja kannustimien avulla on saatu lisättyä sähköautojen ostamista (ICCT, 2020, s. 15–19).

Kuvaa 1 tulkiten Kiinassa on määrällisesti eniten myytyjä sähköautoja vuosina 2016–2023. Pelkällä sähköautojen ostolla ei kuitenkaan voida päästötavoitteita saavuttaa. Sähköautojen latauksessa käytetyn sähkön tuotantoa katsottaessa nähdään vasta, onko sähköauto oikeasti ekologinen vai ei. Esimerkiksi Norjassa likimain koko maan sähkö tuotetaan uusiutuvilla energianmuodoilla (IEA, 2022). Tämä on ideaalitilanne sähköautoille, kun ladattu sähkö on uusiutuvalla energialla tehty. Kiinan tapaus on erilainen. Siellä noin kaksi kolmasosaa sähköstä tuotetaan kivihiilellä (IEA, 2021). Ladatun sähköauton sähkö Kiinassa tuotetaan suurimmaksi osaksi fossiilisilla polttoaineilla. Tämä ei tee sähköautoista sen ympäristöystävällisempiä kuin polttomoottoriautot siellä.

Yleisin julkisen liikenteen muoto maailmassa on bussiliikenne (UITP). Vuonna 2021 7.1 % matkustajakilometreistä Euroopassa tuli busseista, autoilla tämä oli kuitenkin 79.7 % (Eurostat, 2023).



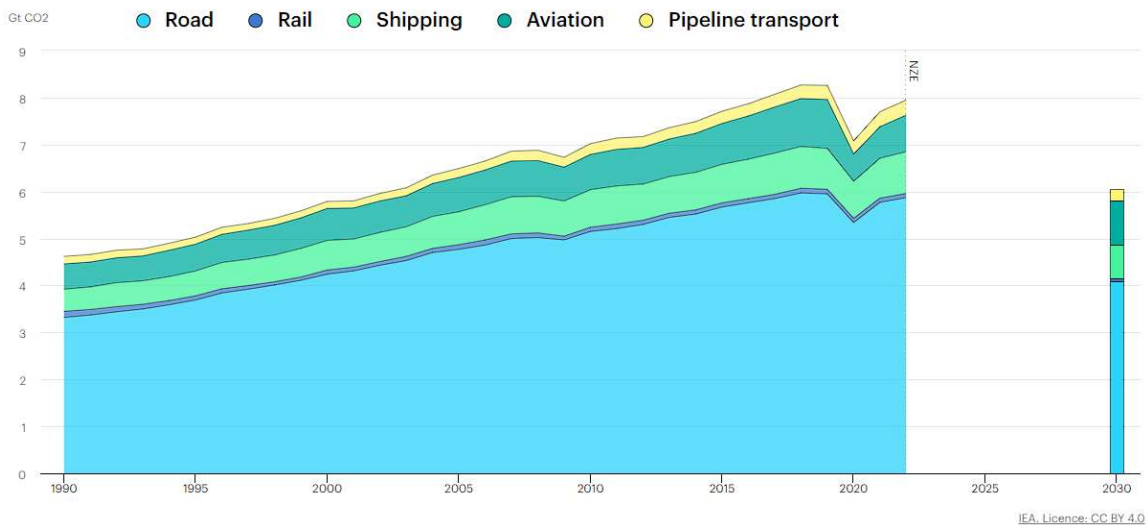
Kuva 2. Sähköbussien rekisteröinti ja myyntiosuus alueittain, 2015–2022. Kuvan muokannut [Eelis Hytönen]. Lähde: IEA, CC BY 4.0.

Tällä hetkellä Kiinassa on ylivoimaisesti eniten otettu käyttöön sähköbusseja muihin maanosiin sekä maihin verrattuna. Bussiliikenteen ollessa yleisin julkisen liikenteen muoto on tärkeää, että sitä voidaan sähköistää. Eurooppa on Yhdysvaltoihin ja muihin maihin

verrattuna kuitenkin ruvennut panostamaan enemmän sähköbussien hankintaan. Esimerkiksi Suomessa vuonna 2022 65 % bussien ostoista oli sähköbusseja (IEA, 2023).

2.2 Päästöt

Liikenteen toimiessa suurimmaksi osaksi fossiilisilla polttoaineilla on sen hiilidioksidipäästöt vielä suuret. Noin viidesosa maailman hiilidioksidipäästöistä on peräisin liikenteestä (Our World in Data, 2020).



Kuva 3. Liikenteen hiilidioksidipäästöt, 1990–2030. Lähde: IEA, CC BY 4.0

Tieliikenteellä on ylivoimaisesti suurimmat hiilidioksidipäästöt kaikista liikenteen muodoista maailmalla. Koronaviruksen vaikutus nähdään noin 1 Gt CO_2 pudotuksena, jonka jälkeen se on kuitenkin lähtenyt takaisin nousemaan. Kuvassa oleva vuoden 2030 kohta on tavoite, joka vaatisi IEA:n mukaan noin 25 % hiilidioksidipäästövähennyksen 8 Gt:sta 6 Gt:iin.

IEA arvioi, että päästöjen tulisi vähentyä noin 25 %, jotta vuoden 2030 tavoite olisi saavutettavissa liikenteen osalta. Tämä vaatii tieliikenteen nopeaa sähköistämistä, energiatehokkuustoimenpiteitä sekä vähäpäästöisten polttoaineiden käyttöönottoa meri- ja lentoliikenteessä. (IEA, 2023).

Hiilidioksidin lisäksi kulkuneuvoista tulee myös pienhiukkaspäästöjä. Pienhiukkaset voidaan jakaa pakokaasuttomiin ja pakokaasullisiin päästöihin. Polttomoottorit tuottavat pakokaasullisia pienhiukkasia, esimerkiksi typen oksideja. (EPA, 2023; OECD, 2020) Liiallinen määrä näitä oksideja voi muodostaa savusumua (EPA, 2023). Pakokaasuttomat pienhiukkaset muodostuvat laitteiden ja osien kuluessa, kuten jarrulevyjen, renkaiden ja teiden. Pienhiukkaspäästöjä on pyritty vähentämään eri säädöksillä (UN, 2023). Sähköautojen yleistyessä on huomattu niiden vaikutus pienhiukkaspäästöihin.

Liu, Y. et al. (2021) on tehnyt tutkimuksen sähköautojen ja polttomoottoriautojen pakokaasuttomista pienhiukkaspäästöistä. Tutkimuksessa arvioitiin eri kokoisten polttomoottoriautojen ja vastaavien sähköautojen pienhiukkaspäästöjä, kokoluokaltaan alle 10 μm (PM_{10}) ja alle 2.5 μm ($PM_{2.5}$). Työssä viitattiin muun muassa Hooftman et al. (2018) tutkimukseen, jossa mainittiin, että suuremman massan vuoksi sähköautot kuitenkin päästävät runsaasti pienhiukkaspäästöjä. Myös Soret et al. (2014) on arvioinut, että autojen sähköistämisellä ei olisi niinkään paljon vaikutusta pienhiukkaspäästöjen vähentämiselle. Liun (2021) tutkimuksessa oli vertailtu päästöjä erilaisissa olosuhteissa, kaupungissa, maanteillä ja moottoriteillä. Lopputuloksessa päästiin samaan tulokseen mitä Hooftman (2018) ja Soret (2014) arvioivat. Sähköautojen hiukkaspäästöt olivat suurempia polttomoottoriautoihin verrattuna, lukuun ottamatta pienien autojen $PM_{2.5}$ päästöjä. Ratkaiseva tekijä sähköautoissa oli kuitenkin regeneratiivinen jarrutus. Tämän avulla pienhiukkaskulutusta pystyttiin huomattavasti vähentämään. Keskikokoisten ja suurten autojen kokoluokassa edes regeneratiivinen jarrutus moottoriteillä ei riittänyt vähentämään PM_{10} päästöjä alle polttomoottoriautojen. Ero normaalin jarrutuksen ja regeneratiivisen jarrutuksen välillä oli kuitenkin näissäkin tapauksissa huomattava.

Rautatieliikenteessä esiintyy myös pienhiukkaspäästöjä. Abbasi et al. (2013) kertoo tutkimuksessaan muun muassa akselipainon ja junan nopeuden vaikuttavan päästömääriin. He myös puhuivat mahdollisesta pakokaasuttomasta pienhiukkaspäästöverosta, jolla saataisiin kannustettua rautatieliikenteen toimijoita sekä omistajia parantamaan kalustoaan. Aarnio et al. (2005) tekivät tutkimuksen Helsingin metron pienhiukkaspäästöistä. Heidän mukaansa

$PM_{2.5}$ päästöt olivat maanalaisilla metroasemilla noin 3–4 kertaa suuremmat kuin Runeberginkadulla ja 5–6 kertaa suuremmat kuin Kallion alueella. Pienhiukkaspäästöt olivat kuitenkin huomattavasti pienemmät esimerkiksi Lontoon metroon verrattuna, oletettavasti sähköisen jarrutuksen takia.

3 Menetelmät

Tässä osiossa käydään läpi mistä eri liikennemuotojen laskuihin tarvittavat tiedot on saatu ja laskuissa käytettyjen yhtälöiden selitys.

3.1 Lähijunat, metrot ja raitiovaunut

Aluksi on tarkoitus tehdä raideliikennemuotojen kulutuksesta vertailu keskenään. Laskelmiin on saatu HSL:ltä tiedot kokonaisenergiakulutuksesta, matkustajakilometreistä ja täyttöasteista. Kokonaisenergiankulutuksella ja matkustajakilometreillä saadaan laskettua kulutus matkustajakilometriä kohden, jonka avulla liikennemuotoja vertaillaan. Täyttöasteesta nähdään kuinka täysiä kulkumuodot ovat eri vuosina. Pienempi täyttöaste tarkoittaa huonompaa hyötysuhdetta ja suurempi täyttöaste parempaa hyötysuhdetta. HSL:n tiedot ovat vuosien 2010 ja 2022 väliltä.

Matkustajakilometreistä ja kokonaisenergiakulutuksesta on tarkoitus tehdä oma kuvaaja ja selostaa muutokset niissä. Suhteutettu kulutus ja täyttöaste tehdään samaan kuvaajaan, joten tästä voidaan vertailla liikennemuotojen kulutuksia.

3.2 Bussit ja sähköhenkilöautot

3.2.1 Bussit

Busseista ei löydy kokonaiskulutusarvoja kuin rautatieliikenteestä. Laskelmissa käytetään HSL:n sivulta löytyvää sähköbussien arvioidun kulutuksen keskiarvoa sekä käytössä olevien sähköbussien prosentuaalista määrää (HSL bussit, 2023). HSL:n antamasta tietopaketista saadaan bussien linjakilometrit, eli kilometrit, joita busseilla on ajettu yhteensä vuodessa. HSL:n sivuilta löytyy sähköbussien määrä vuosilta 2018–2023, mutta tietopaketissa ei ole tarvittavia vuoden 2023 arvoja. Tämän takia käytetään ajanjaksoa 2018–2022.

Bussin kokonaiskulutus saadaan kertomalla linjakilometrit ja HSL:n sivuilta saatu kilometrikohtainen kulutus yhteen. Tämä kerrotaan vielä sähköbussien osuudella niin saadaan pelkästään sähköbussien kokonaiskulutus. Matkustajakilometrikohtainen kulutus saadaan jakamalla kokonaiskulutus matkustajakilometrin ja sähköbussien osuuden tulolla.

$$E_{\mathrm{b,tot}} = L_{\mathrm{b}} E_{\mathrm{km}} n_{\mathrm{b}} \tag{3.1}$$

$$E_{\mathrm{b,matk.km}} = \frac{E_{\mathrm{b,tot}}}{M_{\mathrm{b}} n_{\mathrm{b}}}, \tag{3.2}$$

jossa $E_{\mathrm{b,tot}}$ on sähköbussien kokonaiskulutus (GWh), L_{b} on linjakilometrit (milj.km), E_{km} on keskimääräinen kulutus per kilometri (kWh/km), n_{b} on sähköbussien osuus kyseisenä vuonna, M_{b} on matkustajakilometrit (milj.km) ja $E_{\mathrm{b,matk.km}}$ on sähköbussin kulutus matkustajakilometriä kohden.

Todellisuudessa matkustajakilometrikohtainen kulutus voi poiketa käytetystä arvosta. Lasku ei ota huomioon, jos sähköbusseja on otettu pois käytöstä syystä tai toisesta, vaan olettaa että kyseisenä vuotena sähköbussien määrä on ollut koko ajan sama. Tämän lisäksi linja- ja matkustajakilometreissä ei ole huomioitu U-linjoja, jotka on taas voitu sisällytettyä sähköbussien määrään. HSL:n sivuilla on selitetty U-linjat seuraavasti, ” U-linjat ovat linjoja, jotka

tulevat HSL-alueen ulkopuolelta, mutta joilla kelpaavat HSL:n liput, jos matka alkaa ja päättyy HSL-alueen sisällä.” (HSL, U-linja, 2024).

HSL:llä on käytössä Kiinalaisen BYD:n, Volvon sekä Linkkerin sähköbusseja (Electrive 2021, Electrive 2022, Keybuses 2017). Sähköbusseissa on hyvä huomioida, että niissä käytetään polttoainekäyttöisiä lisälämmittimiä (Yle, 2023). Polttoainekäyttöisen lisälämmittimen energiankulutusta ei ole huomioitu.

Busseista tutkitaan lopuksi vielä lyhyesti, miten dieselbussit kuluttavat verrattuna sähköisiin.

$$E_d = \frac{ke_d}{q}, \tag{3.3}$$

jossa E_d on dieselbussin kulutus kilowattituntia per kilometri, k on dieselbussin kulutus litraa per 100 kilometri, e_d on dieselin energiamäärä megajoulea litroissa ja q on vakio muuttamaan joulet kilowattitunneiksi

3.2.2 Sähköautot

Sähköautoista tarkastellaan kolmea eri kokoluokan autoa ja niiden kulutuksia. Kulutuksen lisäksi tarvitaan auton täyttökerroin eli kuinka monta henkilöä autossa on keskimäärin, jotta voidaan laskea suhteutettu kulutus. Työssä otetaan vertailuun kolme erikokoista sähköautoa. Työssä vertailtavat autot ovat pieni Opel Corsa-e, keskikokoinen Tesla Model 3 Rear-Wheel Drive ja suuri Škoda Enyaq iV 60.

3.3 Ilmakiskorata

UDT:llä ei ole vielä käytössä ilmakiskorataa tai sen kapselia, jonka takia sen kulutus arvioidaan analyyttisen laskennan perusteella. Työssä lasketaan ilmakiskoradan kapselin moottorin tarvitsema teho sen liikkuessa 60 km/h. Tästä pystytään sen jälkeen laskemaan ja arvioimaan kapselin kulutusta ja vertailemaan sitä muihin liikennemuotoihin.

Radassa olevien ylä- ja alamäkien vaikutus energiankulutuksessa voidaan olettaa olevan minimaalinen regeneratiivisen jarrutuksen avulla. Tässä työssä oletetaan kapselin liikkuvan vakionopeudella, jolloin kiihtyvyyttä ei tarvitse huomioida.

$$F_{\mathrm{d}} = c_{\mathrm{d}} \frac{1}{2} \rho v^2 A \tag{3.4}$$

$$F_{\mathrm{r}} = cW \tag{3.5}$$

$$F_{\mathrm{T}} = F_{\mathrm{r}} + F_{\mathrm{d}} \tag{3.6}$$

$$P = \frac{F_{\mathrm{T}} v}{\eta} \tag{3.7}$$

$$E = Pt, \tag{3.8}$$

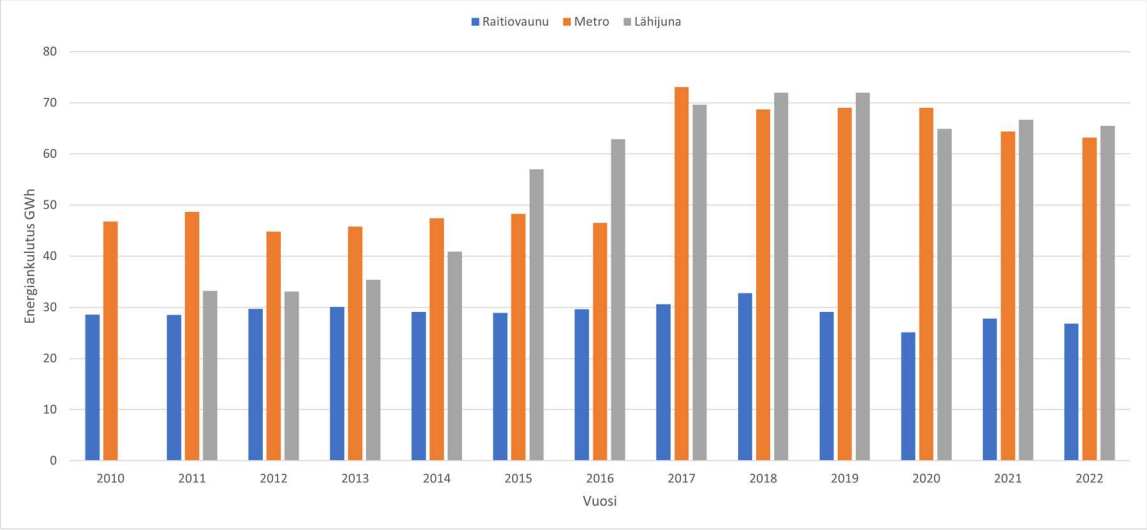
jossa F_{d} on ilmanvastusvoima, c_{d} on ilmanvastuskerroin, ρ on ilman tiheys, v on nopeus, A on etuosan pinta-ala, F_{r} on vierimisvoima, c on vierimisvastuskerroin, W on paino, F_{T} on vastusvoimien summa, P on moottorin teho, η on moottorin hyötysuhde, E on energiankulutus per matkustajakilometri ja t on aika, jolloin kapseli on liikkunut yhden kilometrin matkan. Oletuksena on, että kapselissa on yksi henkilö matkustamassa, jonka takia energiankulutus per kilometri ja per matkustajakilometri on sama tässä tapauksessa.

4 Tulokset

Tässä osiossa käydään läpi eri liikenteenmuotojen laskut, niiden tulokset sekä analysointi. Osaan liikennemuodoista kuuluu myös lyhyt kirjallisuuskatsaus muiden tekemistä töistä ja niiden tulosten vertailu tästä työstä saatuihin tuloksiin.

4.1 Lähijunat, metrot ja raitiovaunut

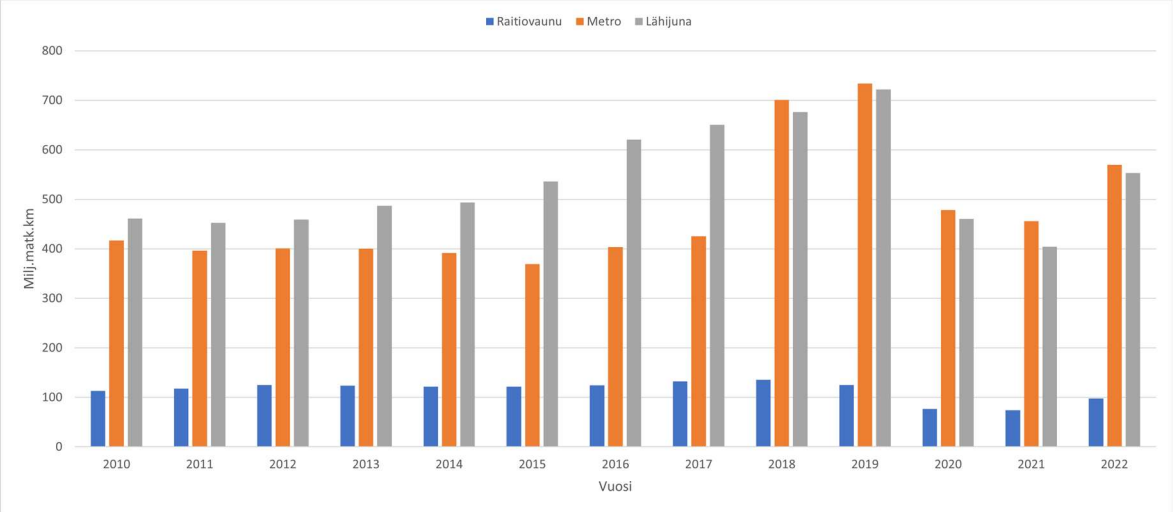
HSL:ltä saadusta datasta saadaan tehtyä seuraavanlaiset taulukot kokonaiskulutuksesta Kuva 4, matkustajakilometreistä Kuva 5 sekä suhteutetusta kulutuksesta Kuva 6.



Kuva 4. Raitiovaunu-, metro- ja lähijunaliikenteen kokonaisenergiankulutus vuosina 2010–2022

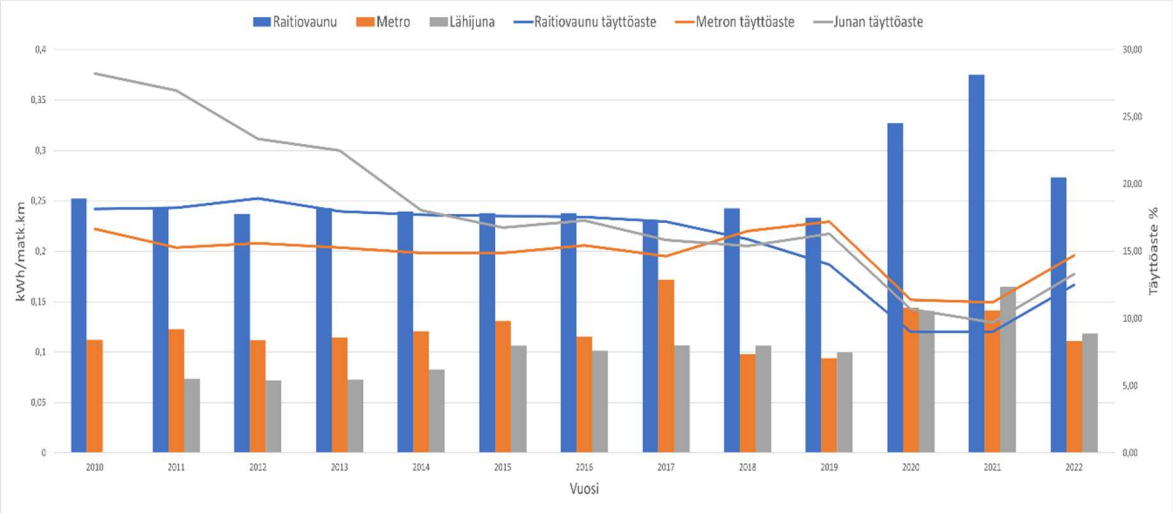
Lähijunasta ei ollut dataa vuodelta 2010. Taulukosta nähdään lähijunien kohdalla, että vuodesta 2014 lähtien sen kokonaiskulutus on noussut huomattavasti vuoteen 2017 asti. Tämä johtuu siitä, että Kehärata otettiin käyttöön vuoden 2015 heinäkuussa.

Metroliikenteessä on samanlainen ilmiö tapahtunut. Länsimetron ensimmäinen vaihe Ruoholahdesta Matinkylään otettiin käyttöön vuoden 2017 marraskuussa, mikä näkyy kokonaiskulutuksen kasvussa.



Kuva 5. Raitiovaunu-, metro- ja lähijunaliikenteen matkustajakilometrit vuosina 2010–2022

Uusien ratojen avaus näkyy metron ja lähijunan matkustajakilometreissä, kehärata vuonna 2015 ja länsimetro vuonna 2018. Vuoden 2020 alussa Suomeen tullut koronavirus epidemia vähensi julkiseen liikenteen matkustajamääriä paljon. Etätöiden lisääntyminen myös vähensi samalla liikenteen käyttöä. Vuoden 2022 matkustajakilometreissä nähdään, että tilanne lähtee palaamaan entiselleen.



Kuva 6. Raitiovaunu-, metro- ja lähijunaliikenteen energiankulutus matkustajakilometriä kohden sekä täyttöasteet vuosina 2010–2022

Kulutus suhteutettuna matkustajakilometreihin antaa paremman näkymän siitä, miten nämä kolme eri raitioliikennemuotoa kuluttavat. Raitiovaunu oli kokonaisenergiankulutuksessa pienin, mutta kun otetaan matkustajakilometrit huomioon, nähdään sen kulutuksen olevan noin kaksinkertainen metroon ja lähijunaan verrattuna. Koronaepidemian vaikutus suhteutetussa kulutuksessa nähdään myös Kuvasta 3 pienenä nousuna.

Pérez-Martínez ja Sorba (2010) pohtivat omassa artikkelissaan eri liikennemuotojen kulutusta Euroopassa ja Espanjassa, viitaten Garcían (2005a) havaintoihin. Heidän arvionsa lähijunien kulutuksesta Espanjassa oli 0.13 kWh/matk.km. HSL:n lähijunien kulutus on hieman vähäisempää lukuun ottamatta korona-aikaa. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että heidän artikkelinsa mainitut arvot ovat peräisin 2000-luvun alusta. Siinä vaiheessa vanhempia junien malleja on mahdollisesti korvattu uudemmilla malleilla, samalla tavalla kuin Suomessa.

Anderson ja Lukaszewicz (2006) teoksessa he tutkivat matkustajajunien energiankulutusta ja ilmansaasteita Skandinaviassa. Tutkittavana oli sekä lähijunia että kaukojunia. Lähijunista

he tutkivat viittä eri junaa, joissa kulutus vaihteli junan mukaan 0.069–0.182 kWh/matk.km välillä.

Brannigan et al. (2017) tekemässä tutkimuksessa kaupunkiliikenteestä Euroopan komissiolle on verrattu eri kulkumuotojen energiankulutusta yleisestä metropolialueesta. Tutkimuksessa on otettu huomioon ruuhka-ajan kulutus sekä sen ulkopuolella oleva kulutus. Kevytraide- ja raitiovaunuliikenteen kulutus vaihtelee 0.17–0.42 kWh/matk.km välillä riippuen ajasta, keskiarvoltaan 0,29 kWh/matk.km. Metroliikenteessä kulutus vaihtelee 0,11–0,42 kWh/matk.km välillä ja keskiarvo 0,26 kWh/matk.km. Junaliikenteessä kulutus on 0,06–0,08 kWh/matk.km välillä ja sen keskiarvo 0,07 kWh/matk.km. Tutkimuksessa käytettiin junaliikenteestä sanaa raskasraideliikenne, joka voi tarkoittaa sitä, että laskuissa on otettu myös kaukoliikenne mukaan.

4.2 Bussit ja sähköhenkilöautot

4.2.1 Bussit

HSL on ilmoittanut sähköbussien kulutuksen olevan 1.0 ja 1.5 kWh/km välillä, riippuen sään, teiden ja matkustajamäärien mukaan (HSL, 2024). Työssä käytetään näiden arvojen keskiarvoa eli 1.25 kWh/km.

Linjakilometrit ja matkustajakilometrit ovat saatu HSL:n antamassa datassa. Kulutus ja sähköbussien osuus on otettu HSL:n sähköbussi-sivulta (HSL, 2024). Kokonaiskulutus saadaan kertomalla linjakilometrit kilometrikohtaisella kulutuksella sekä kertomalla sähköbussien osuudella. Kokonaiskulutuksesta saadaan matkustajakilometrikohtainen kulutus jakamalla se matkustajakilometrin ja sähköbussien osuuksien tulolla.

Taulukko 1. Sähköbussin kokonaiskulutuksen arvot

Vuosi	L_b [milj.km]	E_{km} [kWh/km]	n_b [%]	$E_{b,tot}$ [GWh]
2018	90.98	1.25	1.0	1.14
2019	95.45	1.25	30	3.58
2020	93.89	1.25	5.0	5.87
2021	92.89	1.25	14.0	16.26
2022	93.94	1.25	24.0	28.18

Taulukko 2. Sähköussin matkustajakilometrikohtainen kulutus

Vuosi	$E_{b,tot}$ [GWh]	Mb [milj. km]	n_b [%]	$E_{b,matk.km}$ [kWh/matk.km]
2018	1.14	881.37	1.0	0.13
2019	3.58	957.32	3.0	0.12
2020	5.87	596.55	5.0	0.20
2021	16.26	570.09	14.0	0.20
2022	28.18	709.44	24.0	0.17

Sähköbussien kulutuksessa nähdään samanlainen trendi, kuin raideliikenteellä. Vuosina 2020 ja 2021 kulutus on selkeästi suurempi muita vuosia ja syynä koronaviruksen aiheuttamat sulut ja matkustuksen väheneminen. Tämä nähdään matkustajakilometrien laskussa myös vuosina 2020 ja 2021. Vuonna 2022 nähdään, että bussiliikennekin on palautumassa normaaliin tasoon päin.

Würtz et al. (2024) tekivät tutkimuksen sähköbusseista Saksan Göttingenin kaupungissa. He huomioivat tutkimuksessaan useita asioita, joilla on vaikutusta energiankulutukseen, kuten korkeus, ilman lämpötila, täyttöaste ja ajotavat. Noin vuoden ajan tehdyistä mittauksista he saivat keskimääräiseksi kulutukseksi 0.09 kWh/matk.km. Matkustajia bussissa oli keskiarvoltaan noin 19, ruuhka-aikana matkustajamäärä ylitti välillä 145 ihmisen maksimikapasiteetin.

4.2.2 Dieselbussit

Nylund, Erkkilä ja Hartikka (2007) tekivät VTT:llä tutkimuksen kaupunkibussien polttoainekulutuksesta ja pakokaasupäästöistä. He käyttivät mittauksissa kolmea todellista ajoa kuvaavaa sykliä, Braunscheig-, Helsinki 2- ja Helsinki 3 -sykliä. Braunscheig-sykli on keskusta-ajoa kuvaava bussisykli, joka on Saksassa kehitetty. Helsinki 2 – sykli vastaa sitä, kun taas Helsinki 3 – sykli kuvaa väylätyyppistä ajoa. Tutkimuksessa käytettiin useampia bussimalleja, sekä riippuen akselikoosta 1500 kg tai 2000 kg kuormaa. Yhtälöllä 3.3 saadaan seuraavanlainen Taulukko 3 kulutuksista.

Taulukko 3. Dieselbussien kulutus eri sykleissä

Sykli	Kulutus kaksiakselinen [l/100 km]	Kulutus kolmiakselinen [l/100 km]	Kulutus kaksiakselinen [kWh/km]	Kulutus kolmiakselinen [kWh/km]
Braunschweig	41	50	4.33	5.28
Helsinki 2	44	54	4.64	5.70
Helsinki 3	33	40	3.48	4.22

Dieselbussien kilometrikohtainen kulutus ei pääse sähköbussien 1–1.5 kWh/km tasolle. Tosin HSL ei maininnut matkustajamäärästä näissä lukemissa. Jos esimerkiksi Helsinki 3 syklin kaksiakselisen bussin kyydissä on 20 henkilöä, tippuu sen kulutus noin 0.17 kWh/matk.km, lähemmäksi sähköbussin arvoa.

4.2.3 Sähköhenkilöautot

Opel on antanut sivuillaan Corsa-e:n kulutukseksi 16.8 kWh/100 km (Opel, 2024). Moottori-sivuston (Moottori, 2020) koeajossa kulutus oli noin 17 kWh/100 km, Teknavin koeajossa (Teknavi, 2021) päästiin samaan kulutuslukemaan.

Teslan sivujen mukaan Model 3 Rear-Wheel Driven kulutus olisi 13.2 kWh/100 km (Tesla, 2024). Electric Vehicle Database on arvioinut Model 3 kulutukseksi 13.9 kWh/100 km (EV database, 2023). SDA Dan Cars Youtube kanava (SDA Dan Cars, 2024) oli tehnyt 20 minuutin kestoisen matkan Tesla Model 3:lla Sveitsissä maaliskuussa 2024. Hän oli saanut kulutukseksi 12.1 kWh/100 km jättämällä ilmastoinnin ja penkkien lämmitykset pois, sekä asettamalla kiihtyvyyden Chill-modeen.

Škodan sivuilla (Škoda, 2023) on kerrottu Enyaq auton kuluttavan noin 16.3 kWh/100 km. Arenaev:n mukaan (Arenaev, 2024) kulutus on hieman pienempi 15.9 kWh/100 km. Saksalainen sivusto Spritmonitor (2023) antaa kulutukseksi 19,6 kWh/100 km.

Suomen henkilöautoliikenteen täyttöaste saadaan Traficomin laskemasta vuoden 2021 Suomen kansallisesta matkustuskyselystä. Kaupunkiliikenteessä alle 100 km matkalla täyttöaste on 1.4 henkilöä per auto. Tähän arvoon sisältyy jokaisen viikonpäivän matkalukemat sekä tässä ei ole ikärajoitusta. (Traficom, 2023).

Taulukko 4. Autojen kulutus kWh/100 km

Auto	Opel	Tesla	Škoda
Kulutus 1	16.8 kWh/100 km	13.2 kWh/100 km	16.3 kWh/100 km
Kulutus 2	17.0 kWh/100 km	13.9 kWh/100 km	15.9 kWh/100 km
Kulutus 3	17.0 kWh/100 km	12.1 kWh/100 km	19.6 kWh/100 km
Keskiarvo	16.93 kWh/100 km	13.06 kWh/100 km	17.27 kWh/100 km

Taulukko 5. Automallien keskiarvo sekä niistä otettu keskiarvo

Auto	Opel	Tesla	Škoda	Keskiarvo
Kulutus per henkilö	0.12 kWh/ km*hlö	0.09 kWh/ km*hlö	0.12 kWh/ km*hlö	0.11 kWh/ km*hlö

Autojen kulutus on hyvin lähellä metron ja lähijunan tasoa.

4.3 Ilmakiskorata

Ilmakiskoradan tehonlaskennassa on käytetty Engineering Toolbox – sivustoa apuna. Sen avulla on saatu tarvittavia yhtälöitä, joista luvussa 3.3 kerrottiin.

Kapseli on muodoltaan virtaviivaisen kappaleen ja pallon välimuoto. NASAn (2023) sivuilla on kerrottu pallon ilmavastuskertoimen olevan 0.07 ja 0.5 välillä. Tätä varten ilmavastuskerrointa ei saa täysin arvioitua. Tällöin mittaus voidaan suorittaa useammalla ilmavastuskertoimen arvolla. Käytetään tässä työssä arvoja 0.1, 0.15 ja 0.3. Engineering toolbox:n (2024) mukaan kerroin 0.1 kuuluu pitkälle virtaviivaiselle kappaleelle, autoilla kerroin vaihtelee 0.2 ja 0.3 välillä. Nesteen tiheys eli tässä tapauksessa ilma on 1.2 kg/m^3 NTP olosuhteissa. Ilmakiskoradan nopeus on 60 km/h, tämä on muutettu metreihin sekunnissa ja korotettu toiseen potenssiin. A on tässä tapauksessa etuosan pinta-ala, noin 1.2 m^2. Lasketaan yhtälön 3.2 mukaisesti.

Taulukko 6. Kapselin kitkavoima eri kitkakertoimilla.

c_d	ρ [kg/m^3]	v^2 [m^2/s^2]	A [m^2]	F_d [N]
0.1	1.2	277.78	1.2	20
0.15	1.2	277.78	1.2	30
0.3	1.2	277.78	1.2	60

Kitkavoimaksi saadaan 20 N, 30 N ja 60 N, riippuen mikä ilmavastuskerroin on käytössä.

Vierimisvastuskertoimena käytetty arvo c vastaa teräspyöriä teräskiskoilla, ikään kuin junalla. W on ilmakiskorataan kohdistuva paino. Kapselin massa on noin 500 kg. Yhtälöllä 3.3 saadaan laskettua vierimisvastus.

Taulukko 7. Kapselin vierimisvastus

c	W [N]	F_r [N]
0.002	4905	9.81 N

Vierimisvastukseksi saadaan 9.81 N.

Tarvittava teho liikuttamaan ilmakiskoradan kapselia 60 km/h saadaan laskettua. Käytetään hyötysuhteena arvoa 0.9.

Taulukko 8. Tarvittava teho liikuttamaan kapselia

F_T [N]	v [m/s]	η	P [W]
29.81	16.67	0.9	552.04
39.81	16.67	0.9	737.22
69.81	16.67	0.9	1298.03

Huomataan että tehon tarve lisääntyy paljon ilmanvastuskertoimen kasvaessa.

Nyt voidaan määrittää energiankulutus kapselille. Oletuksena oli, että kapselin täyttöaste on 1 eli yksi henkilö per kapseli. Aikana käytetään sitä hetkeä, joka kapselilla menee liikkua yhden kilometrin.

Taulukko 9. Kapselin kulutus matkustajakilometriä kohden.

P [W]	*t* [h]	*E* [Wh/matk.km]	*E* [kWh/matk.km]
552.04	0.01667	9.20	0.0092
737.22	0.01667	12.29	0.0123
1298.03	0.01667	21.55	0.0215

Kapselin kulutus on hyvin alhainen. Samalla laskentatavalla tehty energiankulutusarvio Tesla Model 3 Rear-Wheel Drive autolle antaa tulokseksi noin 0.057 kWh/matk.km. Kohdassa 4.2.3 saatu Teslan tulos 0.09 kWh/matk.km on noin 60 % suurempi, kuin kapselin laskentatavalla. Vaikka kapselin arvoihin lisättäisiin 60 % se ei silti muuttaisi lopputulosta paljon, suurin arvo 0.0215 muuttuisi noin 0.034:ään.

4.4 Liikennemuotojen vertailu

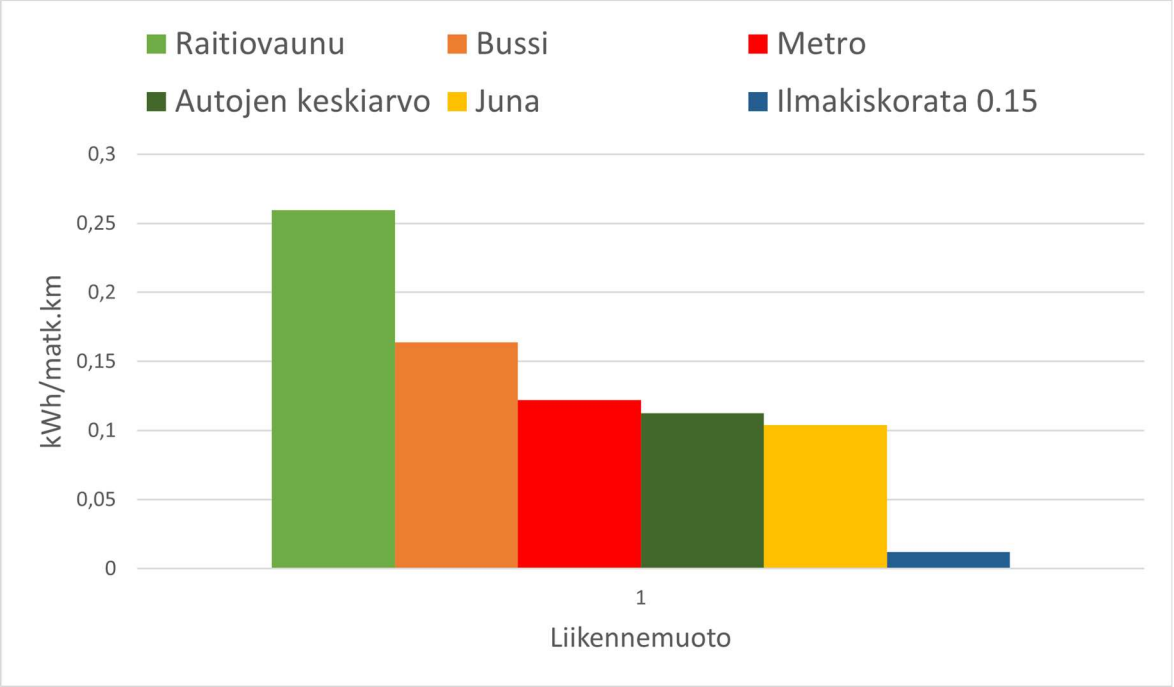
Liikennemuodoista on otettu keskiarvot niiden lasketuilta vuosilta. Täyttöasteista on myös otettu keskiarvot. Lähijunasta 18.03 %, metrosta 14.90 %, raitiovaunusta 15.67 % ja bussista 11.52 %. Autoissa oli käytetty täyttökertoimena 1.4 matkustajaa, ilmakiskoradassa 1.

Raitiovaunuliikenne kuluttaa tutkimuksen perusteella eniten ja Tesla Model 3 vähiten olemassa olevista liikenteen muodoista. Tosin Opelin ja Skodan auto vertailussa kuluttaa likimain yhtä paljon kuin metro, eli vain hieman enemmän. Autoissa ajotapa vaikuttaa paljon siihen, kuinka paljon se kuluttaa energiaa, toki myös automerkeissä on huomattaviakin eroja. Koronaviruksen seurauksena vähemmän ihmisiä käytti julkisia kulkuneuvoja, mikä

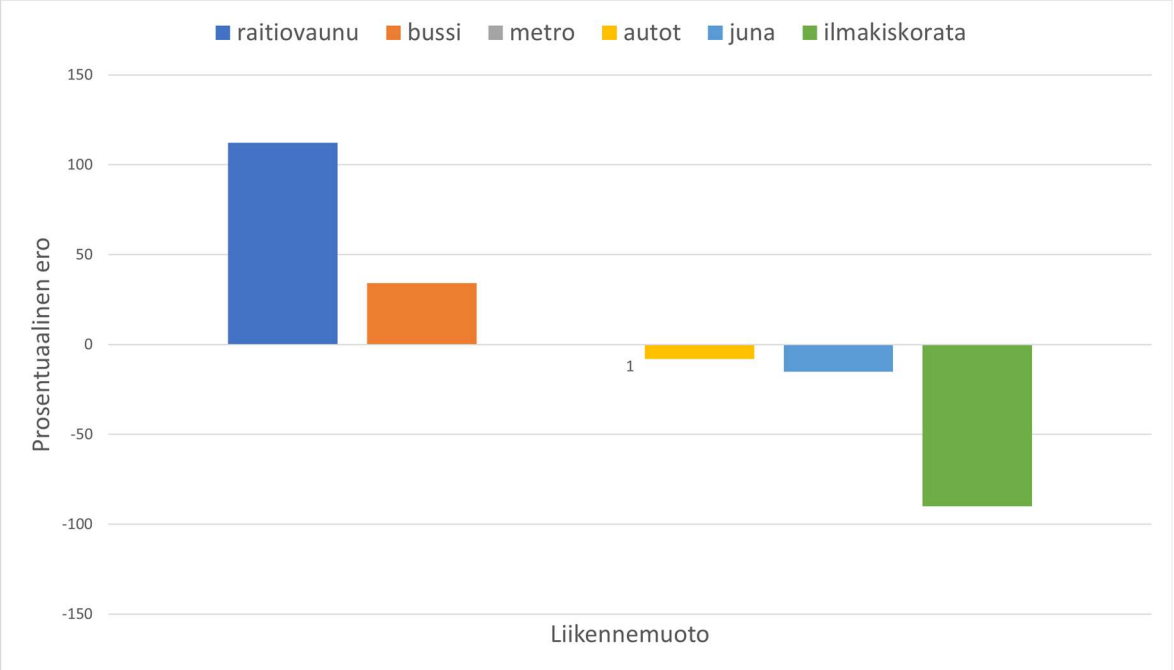
puolestaan vähensi niiden tehokkuutta. Esimerkiksi junalla oli vuonna 2021 sen alhaisin täyttöaste 9.7 %, kun taas vuonna 2011 se oli 26.95 %. Korona-ajan jättäminen pois laskuista tai tulosten uudelleenkatsominen muutaman vuoden päästä alentaisi julkisen liikenteen kulutuksia. Toisaalta sähköautojen kulutus laskisi varmasti myös kehityksen avulla.

Bussien kulutuksissa sähköbussit kuluttavat vähemmän kuin dieselmallit. Sähköbusseilla kulutus kilometriä kohtaan oli noin 1–1.5 kWh/km kun taas dieselbusseissa kulutus oli 3.48–5.70 kWh/km välillä.

Ilmakiskorata otettuna mukaan voittaa vertailun ollessa alhaisimpana kulutuksessa. Sen laskentatapa ei kuitenkaan ollut täydellinen, kun esimerkiksi kiihdytystä ei huomioitu. Tämän takia vertaukseen otettiin vielä saman Tesla Model 3 mallin arvot laskettuna samalla tavalla kuin ilmakiskoradan kapselin. Teslan varsinainen arvo oli noin 60 % suurempi mitä kapselin laskentatavalla. Se ei kuitenkaan pois lue sitä, että kapselin kulutus tällä lisäykselläkin on pienin muihin verrattuina. Kapselissa myös vaikuttaa sen ilmanvastuskerroin muodon mukaan. Kertoimien 0.1 ja 0.3 välillä on kuitenkin eroa kulutuksessa noin kaksinkertaisesti. Kulutuksen kannalta ilmakiskoradan idea vaikuttaa hyvin mahdolliselta.



Kuva 7. Eri liikennemuotojen kulutus keskiarvoltaan



Kuva 8. Prosentuaalinen vertailu liikennemuotojen välillä

5 Pohdinta

Liikennemuotojen energiankulutuksen vertailussa nähtiin suuriakin eroja eri liikennemuotojen välillä. Huomattavimmat olivat raitiovaunu ja ilmakiskoradan kapseli, jotka kuvasivat kumpaakin ääripäätä kulutuksessa. Raitiovaunussa oli alhainen matkustajakilometrimäärä, mutta samantasoinen täyttöaste metroon ja junaan verrattuna. Tämä viittaisi siihen, että raitiovaunulla tehdyt matkat olivat lyhyitä keskimäärin. Metro ja juna kattavat suuremman pinta-alan pääkaupunkiseudulta, jolloin niillä tehdyt matkat ovat pidempiä, kerryttäen matkustajakilometrejä. Työssä ei ollut vielä uuden Raide-Jokeri raitiovaunuradan tietoja mukana. Tämä olisi mielenkiintoista ottaa mukaan ja nähdä onko sillä ollut kuinka suurta vaikutusta matkustajakilometrien määrään. Samaa voi myös sanoa Länsimetron Kivenlahden jatkeesta, jota ei myöskään tutkimuksessa käytetyt tiedot näyttäneet. Länsimetron ensimmäinen vaihe Matinkylään melkein kaksinkertaisti metron matkustajakilometrimäärän. Verrattuna toisiin tutkimuksiin, metro-, raitiovaunu- sekä lähijunaliikenteen kulutus vastasi tämän tutkimuksen tuloksia.

Kuten kohdassa 3.2.1 mainittiin, sähköbussien todellinen kulutuksen arvo on luultavammin hieman erilainen. Käytettävästä tiedosta saatiin lukumäärä eli kuinka monta sähköbussia on, mutta ei tiedetty oliko osa sähköbusseista käyttämättä. Tästä seuraa se, että sähköbusseissa käytetyt matkustajakilometrit voivat sisältää muun kuin sähköbussien kerryttämiä matkustajakilometrejä. Saadut tulokset olivat kuitenkin lähellä saksalaisen tutkimuksen tekemiä arvoja, joten tämän perusteella virheet eivät ole suuria.

Sähköautojen kulutukseksi saatiin likimain sama kuin metrolla ja lähijunalla. Kaikilla autoilla on kuitenkin huonona puolena niiden matkustajakapasiteetti. Verrattuna muihin liikennemuotoihin kuten bussiin tai junaan, autot pystyvät kuljettamaan vain vähän ihmisiä niihin verrattuna.

Ilmakiskoradan kapselin kulutus oli hyvin vähäinen. Noin kymmenen kapselia vastaa yhden junamatkustajan verran kulutusta tai noin 25 kapselia verrattuna raitiovaunun matkustajaan. Kapselissa on myös samanlainen ongelma kuin autoissa eli sen matkustajakapasiteetti on rajallinen. Kapseliin mahtuu kaksi henkilöä enimmillään ja riippuen sen saatavuudesta,

ruuhka-aikana voisi kuvitella joutuvan jonottamaan siihen pääsyä. Toisaalta mitä esimerkiksi junat ja bussit eivät pysty tekemään on se, että mitoittamalla matkustajien määrän yhteen tai kahteen kapselia kohden on se turvallisempi pandemian aikana.

6 Johtopäätökset

Tässä työssä oli tarkoituksena verrata eri liikenteenmuotojen energiankulutuksia sekä miten ne ovat eri vuosina muuttuneet ja miksi. Tämän lisäksi työssä määriteltiin myös ilmakiskoradan kapselin kulutus, jota vertailtiin muiden liikenteenmuotojen arvoihin. Tämän avulla saatiin parempi näkemys sekä olemassa olevien liikenteenmuotojen kulutuksesta sekä miten uuden liikenteenmuodon kulutus vertautuisi niihin. Työssä katsottiin myös lyhyesti sähköajoneuvojen määrän kasvua sekä liikenteestä tulevia hiilidioksidi- ja pienhiukkaspäästöjä.

Työhön tarvittava data suurimmaksi osaksi saatiin HSL:ltä. Autoista valittiin kolmen eri kokoluokan mallit ja etsittiin niiden kulutustietoja eri lähteistä. Dieselbusseista tarkasteltiin toisten tekemiä tutkimuksia niiden kulutuksesta. Ilmakiskoradan kapselin tiedoista osa saatiin UDT:ltä ja loput määriteltiin itse.

Tuloksista saatiin selville eri liikenteenmuotojen kulutus. Raitiovaunulla oli suurin kulutus ja ilmakiskoradan kapselilla pienin. Kuvaajista pystyttiin selvittämään syitä muutoksille ja tuloksille. Esimerkiksi koronaepidemian vuosina tehokkuus laski, koska vähemmän ihmisiä käytti julkisia kulkuneuvoja. Toisaalta esimerkiksi länsimetron ensimmäisen vaiheen avaus paransi metron tehokkuutta hieman lisääntyneen matkustajamäärän ansiosta. Raitiovaunun alhaisen tehokkuuden tapauksessa syynä oli alhainen matkustajakilometrimäärä.

Tutkimuksen perusteella eri liikennemuodoissa on suuriakin eroja energiankulutuksessa. Ratkaiseva tekijä oli matkustajakilometrit, joka esimerkiksi raitiovaunulla oli noin neljänneksen pienempi mitä metrolla. Länsimetron tullen tämä ero kasvoi entisestään. Ilmakiskoradan kapselin kulutus näyttää eri liikennemuotoihin verrattuna tehokkaalta.

Ilmakiskoradan kapselin yhtenä etuna on sen pieni koko ja sitä kautta massa verrattuna muihin liikenteen muotoihin. Tämän takia se ei vaadi yhtä paljon energiaa liikkuakseen

verrattuna vaikka sähköautoon. Auton tavoin se on pandemiaturvallinen, koska kapselissa voi olla joko yksi tai kaksi henkilöä kerralla.

Tämä tutkimus oli rajattu Helsingin seudun alueelle. Tutkimusta voisi laajentaa ottamalla muita Suomen kaupunkeja ja niiden liikennemuotoja mukaan. Tulevaisuudessa on myös hyvä huomioida minkälaisia sähköisen liikenteen pienhiukkaspäästöt ovat ja miten niitä tulisi vähentää. Tämän lisäksi ilmakiskorataa voisi tutkia tarkemmin ottamalla sen mahdollisia toimintoja ja ratkaisuja mukaan kaupungin kehityksen kannalta.

Lähteet

1. Abbasi, S., Jansson, A., Sellgren, U., & Olofsson, U. (2013). Particle Emissions From Rail Traffic: A Literature Review. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 43(23), 2511–2544. [Viitattu 20.4.2024]

Saatavissa: https://doi.org/10.1080/10643389.2012.685348

2. Aarnio, P. et al. (2005) The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM 2.5) in the Helsinki subway system. Atmospheric environment (1994). [Online] 39 (28), 5059–5066. [Viitattu 22.4.2024]

3. Alberto García Álvarez, 2005. EL TREN DE ALTA VELOCIDAD NO ES UN DEPREDADOR DE ENERGIA [Viitattu 22.3.2024]

Saatavissa: https://www.revistadyna.com/Documentos/pdfs%5C2005%5C200505jun%5C891DYNAINDEX.pdf

4. Arenaev, 2024. Skoda Enyaq iV 60 [Viitattu 15.3.2024]

Saatavissa: https://www.arenaev.com/skoda_enyaq_iv_60_2020-specs-85.php

5. Brannigan, C., Biedka. M., Hitchcock, G., Fiorello, D., 2017. Study on urban mobility – Assessing and improving the accessibility of urban areas [Viitattu 8.4.2024]

Saatavissa: https://docs.confebus.org/CE_MovilidadUrbana_MI-04-16-271-EN-N.pdf

6. Electric Vehicle Database, 2023. Tesla Model 3 [Viitattu 3.3.2024]

Saatavissa: https://ev-database.org/car/1991/Tesla-Model-3

7. Electrive, 2021. BYD delivers 76 electric buses to Nobina in Finland [Viitattu 29.2.2024]

Saatavissa: https://www.electrive.com/2021/08/11/byd-delivers-76-electric-buses-to-nobina-in-finland/

8. Electrive, 2022. Finland to get 81 of Volvo's 7900 Electric bus [Viitattu 29.2.2024]

Saatavissa: https://www.electrive.com/2022/02/24/finland-to-get-81-of-volvos-7900-electric-bus/

9. EPA, 2023. Particulate Matter (PM) Basics [Viitattu 1.6.2024]

Saatavissa: https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics

10. Evert Andersson, Piotr Lukaszewicz, 2006. Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains [Viitattu 24.3.2024]

Saatavissa: https://www.kth.se/polopoly_fs/1.179879.1600688474!/Menu/general/column-content/attachment/Energy_060925_full_pdf.pdf

11. HSL, 2024. Sähköbussit [Viitattu 28.2.2024]

Saatavissa: https://www.hsl.fi/hsl/sahkobussit

12. International Energy Agency, 2021. Energy system of China [Viitattu 1.6.2024]

Saatavissa: https://www.iea.org/countries/china

13. International Energy Agency, 2022. Energy system of Norway [Viitattu 1.6.2024]

Saatavissa: https://www.iea.org/countries/norway

14. International Energy Agency, 2023. Transport [Viitattu 18.3.2024]

Saatavissa: https://www.iea.org/energy-system/transport

15. Keybuses, 2017. Helsinki launches Finland's first fleet of electric buses [Viitattu 29.2.2024]

Saatavissa: https://www.keybuses.com/article/helsinki-launches-finlands-first-fleet-electric-buses

16. Liu, Y. et al. (2021) Comparative analysis of non-exhaust airborne particles from electric and internal combustion engine vehicles. Journal of hazardous materials. [Online] 420126626–126626.

17. Moottori, 2020. Opel Corsa-e koeajo [Viitattu 13.3.2024]

Saatavissa: https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/koejao-tavallinen-sahkoauto-opel-corsa-e/

18. NASA, 2023. Shape effects on drag. [Viitattu 11.4.2024]

Saatavissa: https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/shape-effects-on-drag/

19. Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge (2020), OECD iLibrary. [Viitattu 1.6.2024]

Saatavissa: https://www.oecd-ilibrary.org/sites/05538f81-en/index.html?itemId=/content/component/05538f81-en

20. Nylund, N-O., Erkkilä, K., Hartikka, T. (2007) Kaupunkibussien polttoaineenkulutus ja pakokaasupäästöt. [Viitattu 25.4.2024]

Saatavissa: https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2007/T2372.pdf

21. Opel, 2024. Sähköautojen sähkönkulutus [Viitattu 13.3.2024]

Saatavissa: https://www.opel.fi/sahkoinen-liikkuminen/lataaminen-ja-toimintasade/energiankulutus.html

22. Our World in Data, 2020. Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from? [Viitattu 15.4.2024]

Saatavissa: https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport

23. Pérez-Martínez, P. J. and Sorba, I. A., 2010. Energy Consumption of Passenger Land Transport Modes. Energy & Environment, 21(6), pp. 577-600 [Viitattu 22.3.2024]

24. Pollution Action Note – Data you need to know (2023), UN Environment Programme [Viitattu 1.6.2024]

Saatavissa: https://www.unep.org/interactives/air-pollution-note/

25. Sandra Wappelhorst, Dale Hall, Mike Nicholas, Nic Lutsey (2020). Analyzing Policies To Grow The Electric Vehicle Market In European Cities, ICCT [Viitattu 1.6.2024]

Saatavissa: https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV_city_policies_white_paper_fv_20200224.pdf

26. SDA Dan Cars, 2024. Tesla Model 3 Highland RWD Consumption Test – Better then Long Range? [Viitattu 14.3.2024]

Saatavissa: https://www.youtube.com/watch?v=1yVA5x73Cps

27. Škoda, 2023. Enyaq BusinessLine [Viitattu 15.3.2024]

Saatavissa: https://www.skoda.fi/autot/enyaq/enyaq?gad_source=1&gclid=Cj0KCQjwht-WvBhD9ARIsAOP0Gojb1IlDmKFl6VL1wXqZ0LUy8IgvhbJ3J9As-SOiU5TzlCG2Mmp3W5KkaAivJEALw_wcB

28. Spritmonitor, 2023. Skoda Enyaq iV 60. [Viitattu 10.4.2024]

Saatavissa: https://www.spritmonitor.de/en/detail/1242570.html

29. Teknavi, 2021. Koeajossa Opel Corsa-e [Viitattu 13.3.2024]

Saatavissa: https://teknavi.fi/autot/ajettu-autot/koeajossa-opel-corsa-e-nappara-sahkoauto-ja-yksi-iso-haaste/

30. Traficom, 2023. Finnish National Travel Survey 2021 [Viitattu 16.3.2024]

Saatavissa: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/HLT2021_Fact%20sheet_Eurostat.pdf

31. Turun kaupunki, 2024. Turun raitiotie. [Viitattu 8.2.2024]

Saatavissa: https://www.turku.fi/raitiotie

32. UITP, 2017. Statistics Brief, Urban Public Transport In The 21st Century. [Viitattu 20.4.2024]

Saatavissa: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/08/UITP_Statistic-Brief_national-PT-stats.pdf

33. UDT Technologies, 2024. Kotisivu [Viitattu 13.3.2024]

Saatavissa: https://www.udt.fi/

34. World Resources Institute, 2024. Post-pandemic, Public Transport Needs to Get Back on Track to Meet Global Climate Goals [Viitattu 28.2.2024]

Saatavissa: https://www.wri.org/insights/current-state-of-public-transport-climate-goals

35. Würtz, S., Bogenberger, K., Göhner, U., & Rupp, A. (2024) 'Towards Efficient Battery Electric Bus Operations: A Novel Energy Forecasting Framework', World Electric Vehicle Journal, 15(1)

Saatavissa: https://doi.org/10.3390/wevj15010027

36. Webster, A. (2023) Why are people reluctant to buy EVs? Arenawire. [Viitattu 1.6]

Saatavissa: https://arena.gov.au/blog/why-are-people-reluctant-to-buy-evs/

37. Yle, 2023. Kylmä hiipii sähköbusseihin kovilla pakkasilla, ja jopa lattiat jäätyvät – veto tuntuu kuljettajien luissa ja ytimissä [Viitattu 3.3.2024]

Saatavissa: https://yle.fi/a/74-20063122

38. Ympäristöministeriö, 2024. Ilmastolainsäädäntö. [Viitattu 16.1.2024]

Saatavissa: https://ym.fi/ilmastolainsaadanto