

Logistiikan elinkaarianalyysit VASTE -hankkeessa

Elinkaarianalyysissä arvioidaan tuotteen tai palvelun aiheuttamat ympäristövaikutukset aina tarvittavien raaka-aineiden eristämisestä loppuunkäytetyn tuotteen hävittämiseen. Ympäristövaikutuksia arvioidaan useiden mittareiden avulla ja huomioon voidaan ottaa esimerkiksi muodostuvat kasvihuonekaasut, muut haitalliset kaasut, vesistöön päätyvät yhdisteet ja ehtyvien luonnonvarojen kuluminen. Myös tuotannon sosiaaliset vaikutukset voidaan huomioida elinkaarianalyysissä. Analysoitujen tulosten avulla voidaan edelleen laskea, miten tuotteen tai palvelun aiheuttamat ympäristövaikutukset realisoituvat. Havainnollisuuden vuoksi vaikutukset ilmaston lämpenemiseen, ihmisten terveyteen, luonnonmonimuotoisuuteen jne. esitetään usein yksittäisten kemikaalipäästöjen sijaan. Sama päästö voi aiheuttaa useita haittavaikutuksia, kun taas jokin määrällisesti suurempi päästö saattaa olla harmittomampi vaikuttaessaan vain yhteen vaikutusluokkaan. Jotta usean erilaisen päästön vaikutuksia voidaan vertailla keskenään, täytyy päästöt mitallistaa, jonkin vertailusuureen suhteen. Tunnetuin esimerkki tällaisesta mitallistamisesta on hiilidioksidiekvivalentti (CO₂ekv). 1 t CO₂ekv päästöjä tarkoittaa, että päästöt aiheuttavat saman ilmastovaikutuksen kuin 1000 kg CO₂ -päästöt aiheuttaisivat.

Tulosten normalisoinnilla pyritään havainnollistamaan ympäristövaikutusten merkitystä. Normalisointi helpottaa tulosten tulkintaa etenkin, kun useiden vaikutusluokkien tuloksia esitellään samassa kuvaajassa. Sillä erilaisten vaikutusluokkien tuloksia kuvataan erisuureilla, on harhaanjohtavaa esittää tulokset ilman suhteellistamista. Esimerkiksi vaikutuksia ilmastonlämpenemiseen kuvataan hiilidioksidiekvivalenteina, mutta erilaisten myrkkujen vaikutuksia ihmisten terveyteen DALY yksiköinä, jolla kuvataan päästöjen aiheuttamien terveyshaittojen vähentämiä/heikentämiä elinvuosia. Tuloksia on helpompi verrata, kun ne normalisoidaan esimerkiksi keskimääräisen eurooppalaisen vuosittain aiheuttamien ympäristövaikutusten suhteen. Tällainen normalisointi helpottaa samalla tavalla käsiteltyjen tulosten keskinäistä vertailua, mutta voi vaikeuttaa tulosten vertaamista muihin tutkimuksiin, sillä keskimääräisen eurooppalaisen vuosikulutus voi olla erilainen erivuosina. Lisäksi näin normalisoidut tulokset sellaisenaan saattavat vääristää käsitystä siitä, mikä on hyväksyttävä ympäristövaikutus. Ne vähättelevät sellaisia tekoja, joita tehdään yleisesti muutenkin paljon ja liioittelevat sellaisten tekojen vaikutuksia, jotka aiheuttavat harvinaista haittaa.

Tulosten painotuksella voidaan lisätä sellaisten vaikutusten painoarvoa, joista ollaan erityisen huolissaan ja vähentää sellaisten vaikutusten painoarvoa, jotka koetaan vähemmän vakaviksi. Tulosten painotuksessa on riski tieteelliseen epärehellisyyteen ja harhaanjohtavuuteen. Painotus voidaan tehdä esimerkiksi paikallisten erityispiirteiden mukaisesti, esimerkiksi vähentämällä rehevöitymisen painoarvoa alueilla, joilla sitä ei pidetä riskinä tai painottamalla sitä alueilla, jotka ovat rehevöitymiselle erityisen herkkiä. Painotusta ei yleisesti pidetä standardien mukaisena toimintana, mutta päätöksenteossa siitä voi olla hyötyä.

Koska yleensä suuriosa päästöistä muodostuu tuotteiden ja palveluiden elinkaarien alku ja loppupäässä, eikä varsinaisen käyttövaiheen aikana, lasketaan kaikki elinkaarenaikaiset ympäristövaikutukset yhteen ja jaetaan ne käyttöä kuvaavalla suurella. Elinkaarianalyysissä on tärkeää, että tuotetun palvelun tai tuotteen käyttö määritellään mielekkäällä tavalla, jotta ympäristövaikutukset voidaan jakaa käytön suhteen realistisesti. Elinkaarianalyysin funktionaalisella yksiköllä tarkoitetaan sen suureen yksikköä, jonka suhteen tuotteen tai palvelun käyttö määritellään. Kuljetuksen ympäristövaikutusten voidaan esimerkiksi sanoa olevan kuljetetun massan ja matkan funktio. Tällöin ympäristövaikutuksia voidaan kuvata esimerkiksi tonnikipometrien suhteen (/tkm). Tonnikipometrillä tarkoitetaan kuljetun massan (tonneina) ja matkan (kilometreinä) kertomaa. Kun

kyse on henkilöliikenteestä, on tavanomaista käyttää tonnikilometrien sijasta henkilökilometrejä (pkm). 1 henkilökilometri tarkoittaa yhden henkilön kuljettamista 1 kilometrin matkan. Jos matkustajia on 20 henkilöä, kertyy kilometrin matkalla 20 pkm. Funktionaalisen yksikön valinta voi vaikuttaa merkittävästi elinkaarianalyysin tuloksiin. Esimerkiksi kulkuneuvojen elinkaarianalyysissä voi toisinaan olla hyödyllisempää jakaa ympäristövaikutukset ajan suhteen, mikäli kulkuvälineen käyttöaste on niin matala, ettei kuljetettu määrä kuvaa kulutusta yhtä hyvin kuin kulkuneuvon ikä.

1. Kaupunkiliikenteen linja-autojen käyttövoimien päästövertailu

Diesel, kaasu ja sähkökäyttöisten linja-autojen kaupunkiliikenteen ympäristövaikutusten vertailussa selvitetään muodostuvien päästöjen määriä, kun käytössä on diesel-, kaasu- tai sähkökäyttöinen linja-auto. Selvityksellä pyritään tuottamaan tietoa käyttövoimavalinnan ympäristövaikutuksista. Aineistona käytetään Suomen linja-autoliikenteestä kyselyin ja internet hauin saatuja tietoja, sekä Ecoinvent 3.0 tietokannan aineistoja. Vertailulinjaksi valittiin Kokkolassa liikennöivän linja-autoyhtiö Dahlin linja 7.

Linja 7 liikennöi vaaralanmäki-halkokari väliä Kokkolan keskustan kautta. Linjan kierrospituus on noin 24 kilometriä. Bussi kiertää tämän välin arkena 11 kertaa kesäaikaan ja lauantaisin 10 kertaa, viimeisen kierroksen ollessa hieman vajaa. Talviaikaan liikennöidään iltaisin 4 kierrosta lisää. Lisäksi sunnuntaisin linja tekee 7 kierrosta talviaikaan. Kierroksella on pysäkkejä 8-9 kappaletta, riippuen reitistä. Bussi pysähtyy 9 kertaa päivässä 5 minuutin ajaksi Torille. Linja-autoyhtiö Dahlin mukaan yksi bussi liikennöi 250 km päivässä 200 päivää vuodessa ja kuljettaa päivittäin keskimäärin noin 50 matkustajaa. Bussin massa on 15 t.

1.1. RAJAUKSET

Tutkimuksessa otettiin huomioon linja-autojen raaka-ainehankintaan, valmistukseen, huoltoon, polttoaineen valmistukseen ja jakeluun, tiestön rakennukseen ja huoltoon, käyttöön ja käytön myötä tiestön kulutukseen liittyvät ympäristövaikutukset. Lisäksi linja-autojen loppusijoitus pyrittiin ottamaan huomioon yksinkertaistetusti.

Vertailtavista linja-autoista pyrittiin rakentamaan mahdollisimman toisiaan vastaavat mallit, jotta käyttövoiman vaikutuksiin ei sekoittuisi muita käyttövoimasta riippumattomia bussinrakenteisiin tai kokoon liittyviä ympäristöön vaikuttavia tekijöitä. On kuitenkin huomioitava, että tietynlaiset rakenteelliset ominaisuudet voivat olla suositumpia tiettyä käyttövoimaa käyttävissä malleissa nimenomaan käyttövoiman vuoksi.

Keskimääräisen matkustajan ja keskimääräisen bussikuskin massaksi oletettiin 70 kg. Bussin massaksi oletettiin 15 t riippumatta käyttövoimasta. Oletettiin, että linja 7:llä matkustajat kulkevat keskimäärin 15 km matkoja päivässä. Matka vastaa matkaa Vaaralanmäeltä keskustaan ja takaisin.

Linja-autojen rakenne:

Perinteinen Diesel linja-auto koostuu korista ja rungosta, joka sisältää mm. ICE -polttomoottorin ja voimansiirto laitteiston, sekä polttoainetankin syöttöjärjestelmineen.

Dieselkäyttöisen linja-auton voi muuttaa kaasu tai sähkökäyttöiseksi pienin muutoksin.

Kaasukäyttöistä linja-autoa varten diesel käyttöisen auton polttomoottorin sytytysjärjestelmä pitää vaihtaa. Lisäksi polttoainesäiliön kokoa pitää kasvattaa huomattavasti, sillä maakaasu ja biokaasu vievät enemmän tilaa suhteessa saatavaan energiamäärään kuin diesel. Myös kaasun syöttöjärjestelmä on hieman erilainen kuin dieselin.

Diesel-käyttöisestä linja-autosta voidaan rakentaa täyssähkölinja-auto polttomoottorin poistolla ja lisäämällä auton runkoon sähkömoottori, sekä paristo. Täyssähköauto voi käyttää dieselauton voimansiirtojärjestelmää, runkoa ja korja.

Kun linja-auto poistuu kaupunkiliikenne käytöstä sitä ei useinkaan hävitetä suoraan kaatopaikalle, vaan myydään eteenpäin. Kaupunkiliikennekäytöstä poistetun linja-auton loppuelinkaaren vaiheita on kuitenkin vaikea arvioida. Linja-auto saatetaan myydä yksityiseen käyttöön, esimerkiksi keikkabussiksi tai matkailuautoksi, se voidaan hajottaa varaosiksi tai se voi päätyä ulkomaille julkisen liikenteen käyttöön maihin, joissa julkisen liikenteen linja-autoille ei aseteta yhtä suuria vaatimuksia kuin Suomessa. Näin ollen riippuen linja-auton kaupunkiliikenteen jälkeisestä käyttökohteesta ja kunnosta, saattaa se olla vielä pitkäänkin ajossa, tai päätyä hyvin vähäiselle käytölle. Elinkaarenaikaisia ympäristövaikutuksia jaettaessa koko elinkaarelle erilaisilla jatkokäyttöskenaarioilla voi olla merkittävä vaikutus absoluuttiseen tulokseen. Tässä tutkimuksessa vertaillaan erilaisia käyttövoimia ja näin ollen oletetaan bussirunkojen kaupunkiliikenteen jälkeiset elinkaaret toisiaan vastaaviksi ja niiden osalta käytetään Ecoinvent -tietokannassa ollutta mallia linja-autojen ja niiden osien käytöstä poistumisen jälkeisiin vaiheisiin. Tässä tutkimuksessa oletettiin, että pääosa linja-auton käytön aikaisista ympäristövaikutuksista muodostuisi linja-auton ollessa aktiivisessa kaupunkiliikenneajossa ja tutkimuksessa jätettiin yksinkertaistuksen vuoksi huomioimatta mahdollinen elinkaaren pidentyminen kaupunkiliikenneajon jälkeisessä liikennekäytössä.

1.2. FUNKTIONAALISEN YKSIKÖN VALINTA

Kuopion linja-autoliikenteen käyttövoima selvityksessä arvioitiin keskimääräisen kaupunkiliikenteen linja-auton toiminta-ajaksi 15 vuotta, riippumatta käyttövoimasta, mikä vastaa myös muiden lähteiden arvioita. Sähköbussissa pitää lisäksi uusia akku noin 5 vuoden välein. Ecoinvent tietokannan tietue kaupunkiliikenteen linja-autojen ympäristövaikutuksista olettaa tavallisen diesel -käyttöisen kaupunkiliikenteen linja-auton kestävän noin 239 000 henkilökilometrin kulutuksen. Ecoinventin arvio bussin elinkaarenaikaisesta käyttömatkasta on kuitenkin todella pieni suhteessa tavanomaisesti ilmoitettuihin linja-autojen käyttöikiin ja matkamittarilukemiin. Arvioita keskimääräisestä elinkaarenaikaisesta henkilökilometrimäärästä on vaikea löytää. Keskimääräisillä Suomen kaupunkiliikenteen liikennöitsijöiden myyntiin laittamalla linja-autoilla mittarilukemat ovat noin 800 000 km. [1] Tällä perusteella voisi arvioida, että henkilökilometrimäärä linja-auton elinkaaren aikana olisi huomattavasti Ecoinvent tietokannasta löydettyä arviota suurempi. Tämä voi johtua esimerkiksi maakohtaisista eroista tyyppisten pysäkkivälien pituudessa, kuskien ajotavoissa, linja-autokäyttäytymisessä, yleisessä liikennekulttuurissa ja linja-autojen huoltoväleissä. Ei ole syytä olettaa, että sähkö- tai kaasukäyttöisten linja-autojen kestävyys henkilökilometreissä olisi oleellisesti dieselkäyttöisistä poikkeava.

Linja-auton aktiivikäyttöajaksi voidaan siis arvioida noin 15 vuotta tai 800 000 km. Linja 7:llä yksi linja-auto kulkee vuodessa noin 50 000 km. 15 vuoden ikään mennessä aktiivikäytössä sen kilometrimittariin kertyisi 750 000 km, eli se poistettaisiin todennäköisesti kaupunkilinjakäytöstä ensisijaisesti ikänsä, ei kuljetun matkan perusteella. Funktionaalisiksi yksiköksi valittiin henkilökilometri.

Kokkolan linja-autolinjalla 7 matkustaa päivittäin keskimäärin 50 henkilöä/linja-auto ja yhdellä bussilla kuljetaan noin 250 km 200 päivänä vuodessa. Mikäli arvioidaan, että Kokkolan linjalla 7 päivittäin matkustavat 50 henkilöä kulkevat keskimäärin 15 km päivässä (vastaa matkaa Vaaranlamäeltä keskustaan ja takaisin) tulee vuosittaiseksi matkustajakilometrimääräksi 150 000 pkm, lisäksi bussikuski on autossa 250 km/päivä*200 päivää. Näin ollen vuosittaiseksi henkilökilometrimääräksi saadaan 200 000 pkm. 15 vuoden aikana henkilökilometrejä kertyy 3 000 000 pkm.

Vertailu linja-autona on Liikenneyhtiö Dahlin 15 t painava diesel linja-auto, jossa matkustajia on 50 kpl päivässä ja vuorokaudessa kertyy ajoa 250 km. Linja-autoa liikennöidään 200 päivää vuodessa. Vuodessa ajokilometrejä on siis noin 50 000 km ja matkustajia 10 000 henkilöä.

Linja-autoa verrataan kuvitteelliseen tilanteeseen, jossa vastaavassa käytössä olisi kaasu tai sähkökäyttöinen linja-auto. Esimerkki linja-autojen tiedot selvitettiin.

Funktionaalinen yksikkö: 1 henkilökilometri.

Tonnikilometrien laskeminen:

Bussi liikennöi 200 p vuodessa 250 km ja matkustajia on 50 kpl päivässä, joista kukin on kyydissä keskimäärin 15 km/päivä. Kuski matkustaa bussissa luonnollisesti 250 km/p. Linja-auton massa on 15 t ja keskimääräisen henkilön massa on 70 kg.

$m*s = ((\text{km ihmisen massa} * \text{henkilömäärä/päivä}) * \text{kuljettumatka/päivä} + (\text{Bussinmassa} + \text{kuskinmassa}) * \text{päivittäinen bussin matka}) * \text{päivien määrä}$

saadaan,

$(0.070 \text{ t/hlö} * 50 \text{ hlö}) * 15 \text{ km} + (15 \text{ t} + 0.070 \text{ t}) * 250 \text{ km} = 3820 \text{ tkm/p.}$ Ja elinkaarenaikaiset 11 460 000 tkm.

1.3. MALLIN LUONTI

Sillä saatavilla olevassa tietokannassa ei ollut suoraa tietuetta täyssähkölinja-autolle tai kaasukäyttöiselle linja-autolle, rakennettiin kaikki vertailtavat linja-autot tavanomaisen bussin runkoon perustuen. Malli luotiin käyttäen systeemin laajennukseen perustuvaa menetelmää, jossa perinteisestä dieselkäyttöisen bussin rungosta poistettiin sellaiset osat, joita ko. käyttövoimaa hyödyntävä linja-auto ei tarvitse ja lisättiin sellaiset, joita ko. käyttövoima tarvitsee tai jotka kuvaavat paremmin käyttövoiman tarpeita.

Esimerkiksi sähkölinja-auton malli rakennettiin poistamalla diesel -käyttöisestä linja-autosta polttomoottori, moottorin testaukseen käytettävä diesel ja diesel tankkia vastaava määrä terästä. Näiden tilalle sähkölinja-auton malliin lisättiin sähköauton voimansiirtojärjestelmä, johon kuului mm. kaapeleita ja sähkömoottori. Lisäksi malliin lisättiin ladattava akku.

Mallien rakenne:

Alla on kuvattu kuhunkin malliin valitut tietueet, sekä malliin syötetyt arvot hakasuluissa.

SÄHKÖBUSSI ILMAN PARISTOA (KPL):

Outputs to the technosphere:

Products and co-products: Electric bus, without battery {GLO}, market for I Conseq, U [1 kpl]

Avoided products: Internal combustion engine for passenger car {GLO} I market for Internal combustion engine I Conseq, U [590 kg] *

Diesel {RER} market group for conseq. U. [167*0,3306 kg]

Diesel {RoW} market group for Conseq U [167*0,6694 kg]

Sheet rolling Steel {GLO} I market for, (diesel tankin massa 400 kg) [400 kg]

*Tietue on tehty henkilöautojen moottorien valmistuksen päästöille ja sen arvioitiin olevan lähinnä tilannetta vastaava. Tietueessa on käytetty malliesimerkkinä Volkswagen Golf A4 moottoria, jonka massa on 275 kg. Bussin moottorin kuivapaino arvioitiin Volvo 8900 -kaupunkiliikenne bussin käyttämän moottorin kuivapainon mukaan olevan 590 kg. Oletettiin moottorin tuotannon ja hävittämisen aiheuttamien ympäristövaikutusten korreloivan lineaarisesti moottorin massaan. Tietueessa on otettu huomioon moottorin valmistus ja valmistuksen aiheuttamien jätteiden käsittely, sekä tuotantolaitoksen infrastruktuurin aiheuttamat päästöt ja käytetyn moottorin jätteiden käsittely.

Inputs from the technosphere materials&fuels:

Bus {GLO} I market for I Conseq, U [1 kpl] Tietue huomioi bussien tuotantomäärät ja ympäristövaikutukset eripuolilla maailmaa yhtä bussia kohden. Bussien valmistukseen tarvittavien materiaalien, veden ja energian määrä, sekä valmistuksen aikaiset päästöt ja käytetyn bussin jätteiden käsittely on huomioitu. Myös tehdasinfrastruktuurin rakentaminen on otettu huomioon.

Powertrain, for electric passenger car {GLO} market for [80,22 kg] sis. sähkömoottori (53 kg max 100 kW); Konvertteri (4,5 kg); Invertteri (9,5 kg); Laturi (6,2 kg) (Joillakin busseilla laturi on huomattavasti painavampi (esim. BYD 30 kg)); Voimanjakoyksiköt (3,9 kg); Kaapelit (3 kg). Tietue sisältää yo. komponenttien valmistuksen ja käytetyn voimansiirtoyksikön jätteiden käsittelyn.

Inputs from the technosphere: electricity/heat:

RENKAIDEN JA JARRUJEN PÄÄSTÖT:

Outputs to the technosphere:

Products and co-products: transportation, non-exhaustemissions [1 pkm]

Outputs to technosphere: Waste and emissions to treatment:

Brake wear emissions, lorry {RER} treatment of I Conseq, U $[(8,13 * 10^{-9} \text{ kg/kgkm} * 11\,460\,000\,000 \text{ kgkm})/3\,000\,000 \text{ pkm}] \approx 3,11 * 10^{-5} \text{ kg/pkm}$

Tyre wear emissions, lorry {RER} treatment of I Conseq, U $[(8,055 * 10^{-8} \text{ kg/kgkm} * 11\,460\,000\,000 \text{ kgkm})/3\,000\,000 \text{ pkm}] \approx 0,000308 \text{ kg/pkm}$

KULJETUS SÄHKÖBUSSILLA (/PKM):

Electric bus, without battery {GLO}, market for I Conseq, U [1 kpl/3000000 pkm]

Battery, Li-ion, rechargeable, prismatic [(3,2 t*3 kpl)/3000000 pkm]

Road {CH}, market for I Conseq, U Suositusarvo kuljetusseteissä on tien kulutukselle $5,37 * 10^{-4} \text{ my/tkm}$ (kuljetusjärjestelmän kokonaismassan mukaan). $[(5,37 * 10^{-4} \text{ my/tkm} * 11\,460\,000 \text{ tkm})/3000000 \text{ pkm}]$

Electricity low voltage {FI} I market for I Conseq, U $[(1,16 \text{ kWh/km} * 750\,000 \text{ km})/3000000 \text{ pkm}]$

Sähköbussikuljetus kuluttaa keskimäärin 1.16 kWh/km (VTT); 0.804 kWh/km, tai 0,929 kWh/km (Aalto energies 2018); 0.7 kWh/km (International battery, hybrid and fuel cell electric vehicle symposium (espoo)) $[(0,8 \text{ kWh} * 750\,000 \text{ km})/3000000 \text{ pkm}]$

Maintenance, bus {CH} processing käytetään kaikkiin busseihin samaa. Arvio huolto 1v välein. [1 kpl/200 000 pkm]

transportation, non-exhaust emissions [1 pkm]

DIESEL-BUSSI:

Outputs to the technosphere:

Products and co-products: Transport regular bus {CH} | Processing | Conseq, U [1 pkm]

Inputs from the technosphere materials&fuels:

Bus {GLO} market for | Conseq, U [1 kpl/3 000 000 pkm]

Maintenance, bus {GLO} market for [1 kpl/200 000 pkm]

Road {CH}, market for road $[(0,000537 \cdot 11\,460\,000 \text{ tkm})/3\,000\,000 \text{ pkm}]$

Diesel low-sulfur {CH} market for $[(0,336 \text{ l/km} \cdot 750\,000 \text{ km} \cdot 0,835 \text{ kg/l})/3\,000\,000 \text{ pkm}]$

emissions to air, water & soil:

Pidettiin alkuperäistä tietuetta vastaavina. (lista saatavilla)

Tietue rakennettiin valmiin kaupunkiliikenteen linja-auto tietueen pohjalta muuttaen käyttöikä, sillä linja-auton käyttöikä oli reilusti aliarvioitu suhteessa siihen, miten pitkään linja-autot yleensä Suomessa pysyvät käyttökelpoisina. Tieinfrastruktuurin rakennuksen ja ylläpidon, palamisen päästöjen ja energian kulutuksen päästöt huomioitiin.

KULJETUS DIESEL LINJA-AUTO:

Transport regular bus {CH} | Processing Vaste kirjastosta (linja-auton käyttöikä mukautettu) [1 pkm]

transportation, non-exhaust emissions [1 pkm]

KAASUBUSSI:

Outputs to the technosphere:

Products and co-products: Gas bus, {GLO} road transportation market process

Avoided products:

Diesel {RoW} market for | Conseq, U $[167 \text{ kg} \cdot 0,6694 \approx 112 \text{ kg}]$

Diesel {ReR} | market for | Conseq, U $[167 \cdot 0,3306 \approx 55,2 \text{ kg}]$

Sheet rolling Steel {GLO} | market for, (diesel tankin massa 400 kg) [400 kg]

Inputs from the technosphere materials&fuels:

Bus {GLO} [1 kpl]

Storage, 650 l mini HCP plant (kaasusäiliö) [2 kpl]

Methane, 96% by volume, from biogas, from high pressure network, at service station {GLO} market for | Conseq. U (moottorin testausta varten) [167 kg]

KAASUBUSSIN POLTTOAINEPÄÄSTÖT (/PKM):

Outputs to the technosphere:

Products and co-products: Exhaust emissions, transportation, gas bus

[1 pkm]

Emissions to air:

toluene

NMVOG

Mercury

Nitrogen oxides

sulphur dioxide

Carbon dioxide

Ammonia

Benzene

Particulates < 2,5 µm

Carbon monoxide, fossil

Dinitrogen monoxide

Methane

polttoaineen palamisen päästöt laskettu suuren maakaasukäyttöisen henkilöauton polttoainepäästöistä (tietokanta transport passangercar large size natural gas, euro 5) suhteuttamalla päästöt arvioituun polttoainekulutukseen, tälle tehty oma tietueensa Exhaust emissions, transportation, gas bus.

KULJETUS KAASUBUSSILLA (/PKM):

Materials/Assemblies: Methane, 96% by volume, from biogas, from high pressure network, at service station {GLO} market for I Conseq. U * [(0,43 kg/km*750 000 km)/3000000 pkm]

*Kaasutietue ottaa huomioon kaasuaseman infrastruktuurin ja kaasun jakelun, sekä jakelunaikaiset päästöt, sekä kaasun tuotannosta ja puhdistuksesta aiheutuvan ympäristökuormituksen. Huom, tietue on globaalilla tasolla, paikallisesti tuotettuna säästettäisiin todennäköisesti hieman.

Processes: Gas bus {GLO} I Conseq, U [1 kpl/3000000 pkm]

transportation, non-exhaust emissions [1 pkm]

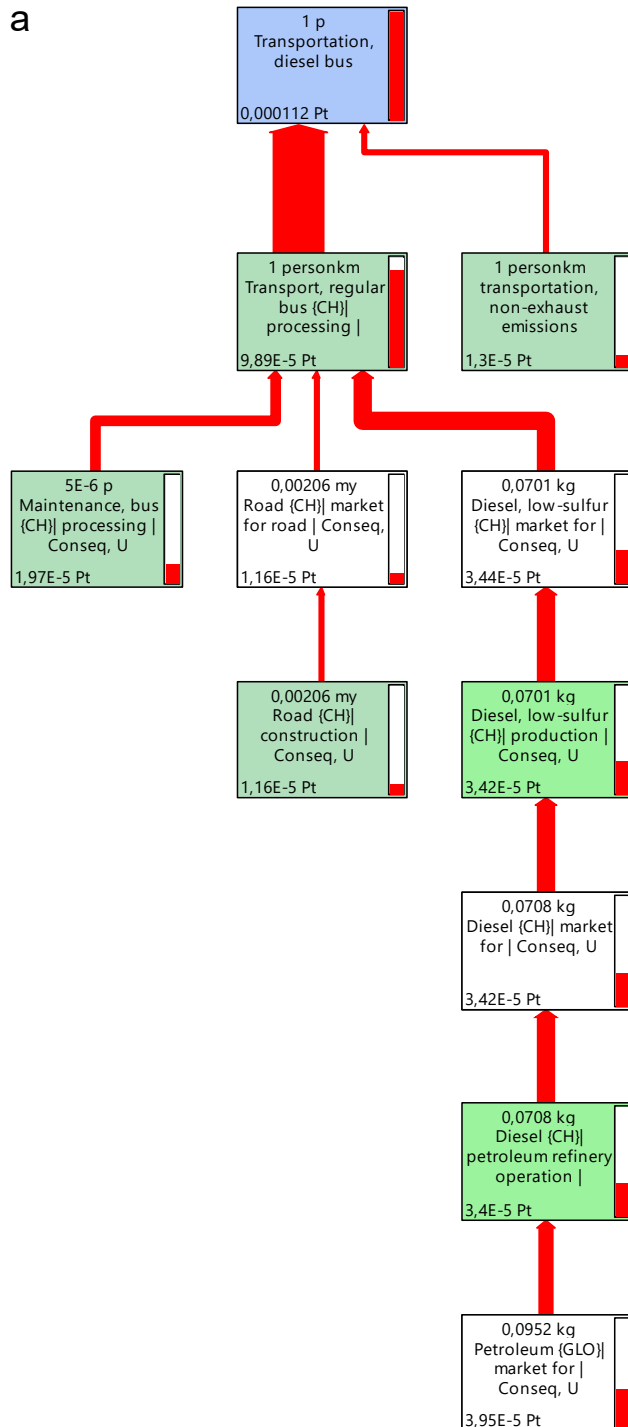
Exhaust emissions, transportation, gas bus [1 pkm]

1.4. ANALYYSIMENETELMÄN VALINTA:

Tulokset analysoitiin käyttäen Sima pro -ohjelman valmista impact 2002 + menetelmää (v 2.14). Impact 2002 + on hyvin tunnettu ja arvostettu eurooppalaiseen käyttöön soveltuva menetelmä, joka ottaa huomioon vaikutukset ihmisten terveyteen, ekosysteemien laatuun, ilmaston muutokseen ja maapallon resursseihin. Menetelmän todettiin huomioivan riittävän hyvin logistiikan kannalta olennaiset päästö- ja kuormituslähteet. Selvityksessä oltiin erityisen kiinnostuneita vaikutuksista ilmastoon, joten keskityttiin lähinnä niin kutsuttuun midpoint analyysiin.

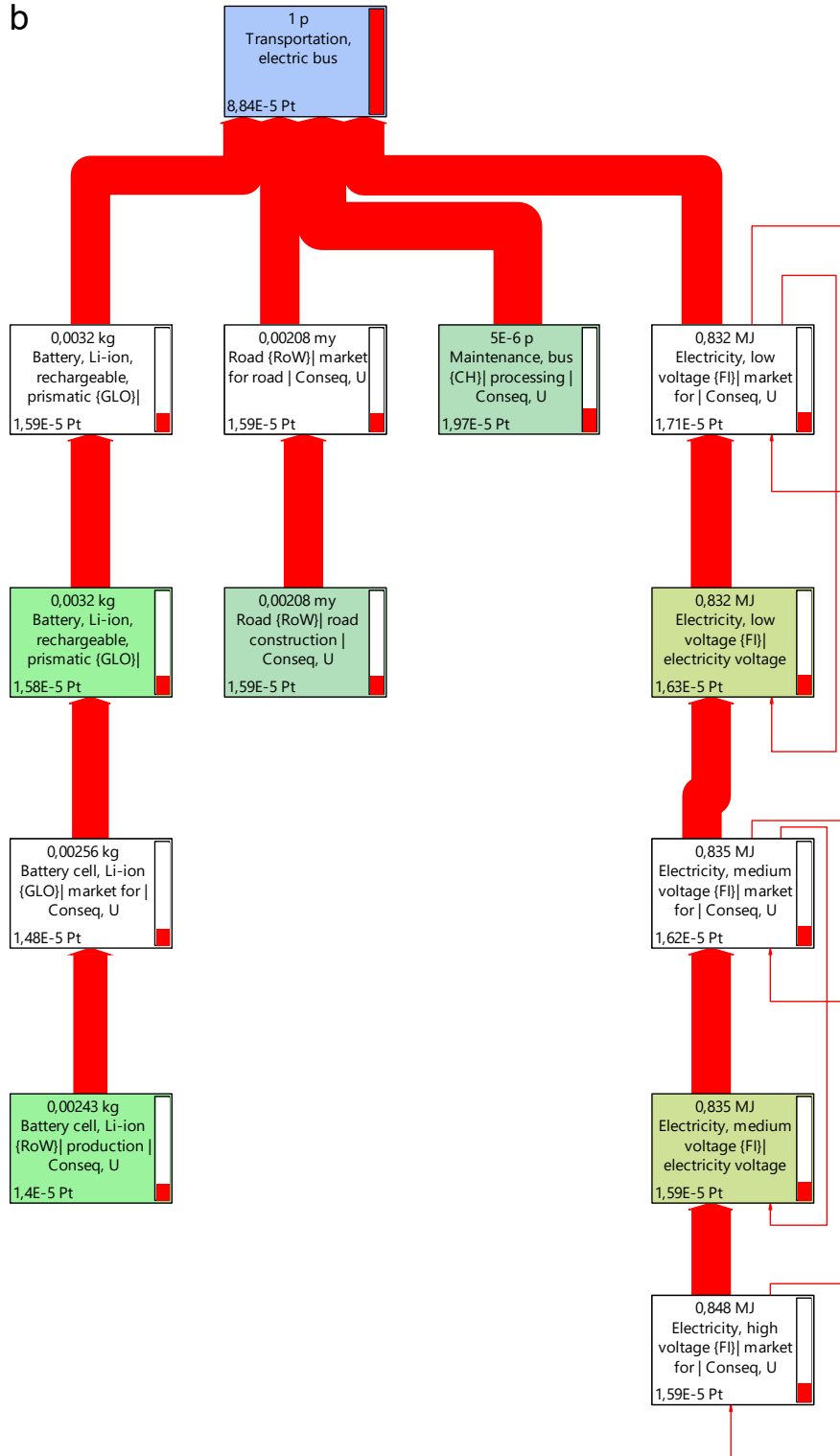
1.5. TULOKSET:

Kuvissa 1 a–c on esitetty tavanomaisen dieselbussin (a), sähkö- (b) ja biokaasukäyttöisten (c) linja-autojen elinkaarien yksinkertaistetut rakenteet. Yksinkertaistuksen vuoksi kuvissa on jätetty huomioitta päästö- ja säästölähteet, jotka aiheuttavat alle 10 % (diesel), 15 % (sähkö) tai 45 % (kaasu) kokonaisympäristövaikutuksista. Kuvissa prosesseja ja materiaaleja yhdistävien nuolien paksuudet kuvaavat ympäristövaikutusten osuutta jonka, ko. materiaali tai prosessi aiheuttaa. Nuolen väri ilmaisee, onko ympäristövaikutus luonteeltaan ympäristökuormitusta vähentävä (vihreä) vai ympäristöä kuormittava (punainen).

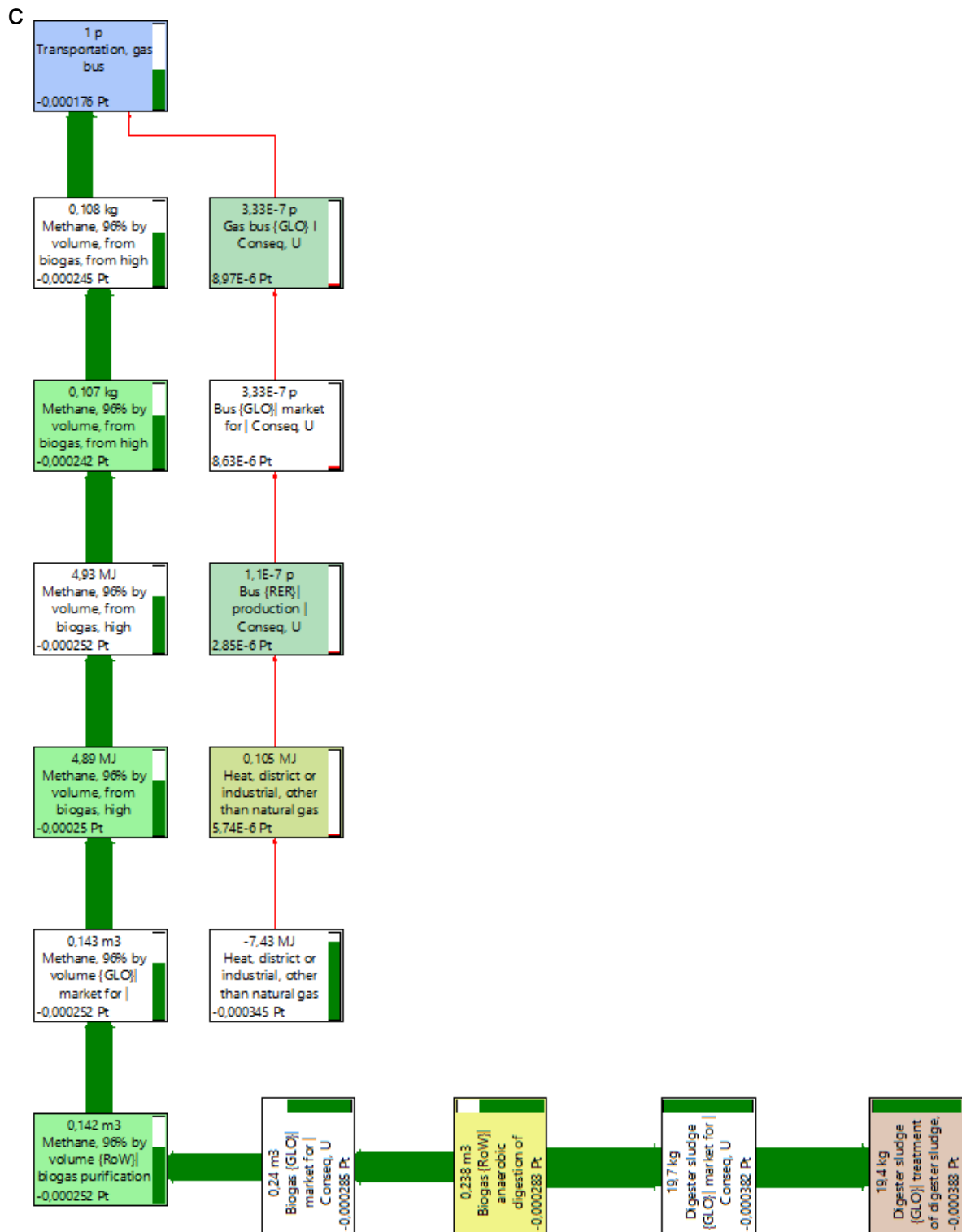


Kuva 1 a. Diesel linja-auton elinkaarenaikainen päästörakenne. Päästölähteet jotka aiheuttavat alle 10 % elinkaarenaikaisista päästöistä on jätetty kuvassa huomioitta.

b



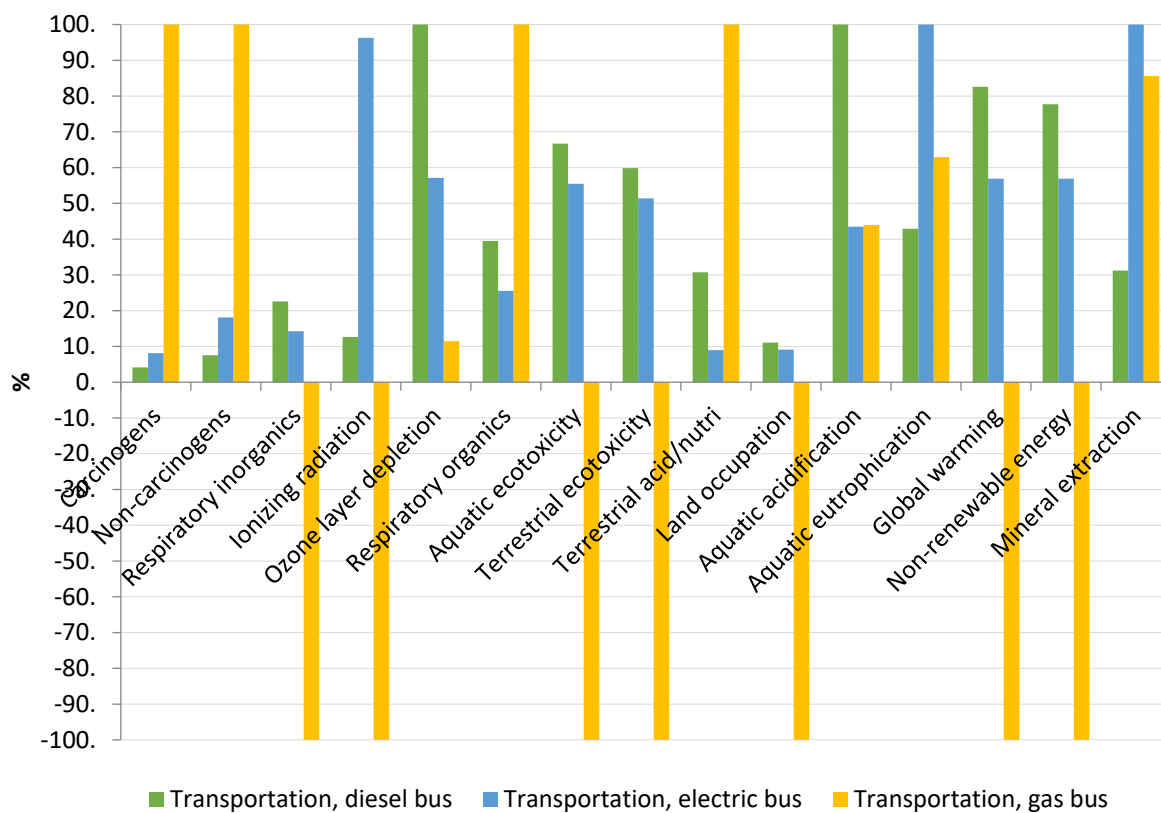
Kuva 1b. Sähkölinja-auton elinkaarenaikainen päästörakenne. Päästölähteet jotka aiheuttavat alle 15 % elinkaarenaikaisista päästöistä on jätetty kuvassa huomioitta.



Kuva 1 c. Biokaasulinja-auton elinkaarenaikainen päästörakenne. Päästölähteet jotka aiheuttavat alle 45 % elinkaarenaikaisista päästöistä tai päästösäästöistä on jätetty kuvassa huomioitta.

Kuten huomataan kuvaajista 1 a–c, on biokaasukäyttöisen linja-auton ympäristövaikutukset luonteeltaan pääosin positiivisia, eli ympäristö kuormitusta vähentäviä, kun taas diesel- ja sähkökäyttöisten linja-autojen ympäristövaikutukset ovat luonteeltaan ympäristöä kuormittavia. Biokaasukäyttöisen linja-auton ympäristökuormitusta vähentävä vaikutus johtuu siitä, että joka tapauksessa muodostuvan biokaasun talteenotto ja hyötykäyttö vähentää merkittävästi suoria metaanipäästöjä ilmakehään. Biokaasun palaessa muodostuu toki muita ympäristölle haitallisia kaasuja, mutta niiden ympäristövaikutukset ovat pienemmät, kuin suorat metaanipäästöt olisivat. Tuloksia tulkitessa tulee huomioida se, että biokaasua voidaan käyttää myös esimerkiksi lämmittämiseen, jolloin saavutetaan vastaavat ympäristöhyödyt. Tämän selvityksen mukaiset hyödyt saavutetaan vain kun käytetään biokaasuna metaania, joka muuten jäisi käyttämättä.

Kuvassa 2 on esitetty diesel-, sähkö- ja kaasukäyttöisten linja-autojen päästöjen ympäristövaikutukset vaikutusluokittain. Sillä tutkimuksessa oltiin erityisen kiinnostuneita kasvihuonekaasupäästöistä, taulukkoon 1 on koottu lisäksi kuljetuksesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt.



Kuva 2. Diesel-, kaasukäyttöisten ja sähkökäyttöisten linja-autojen ympäristövaikutusten suhteellinen vertailu. Tulokset on esitetty suhteellisesti kussakin vaikutusluokassa siten, että vaikutusluokassa eniten vaikuttava linja-auto on 100 % ja muiden vaikutukset ovat esitettyinä suhteessa siihen.

Kuvasta 2 havaitaan, että vaikka kaasukäyttöisellä linja-autolla on paljon edullisia ympäristövaikutuksia, on se myös joidenkin vaikutusluokkien osalta ympäristölle diesel- tai sähkökäyttöistä linja-autoa haitallisempi liikenneväline. Kaasukäyttöinen linja-auto aiheuttaa diesel- ja sähkökäyttöisiä linja-autoja enemmän karsinogeenisia ja ei-karsinogeenisia päästöjä, hengitysilman orgaanisia päästöjä, sekä lisää maan ravinnekuormitusta. Toisaalta ainoastaan biokaasukäyttöinen linja-auto vähentää ympäristökuormitusta vähentämällä hengitysilman epäorgaanisia partikkeleita, ionisoivan säteilyn määrää, maa- ja vesieliöstön myrkytyksiä, maankäyttöä, ilmaston lämpenemistä ja

uusiutumattomien energiavarojen käyttöä. Diesel- ja sähkökäyttöisillä linja-autoilla vaikutukset ovat monissa vaikutusluokissa samantyyppisiä. Sähkölinja-auto kuluttaa enemmän mineraaleja, lisää ioinisoivaa säteilyä ja vesistöjen rehevöitymistä, mutta on muuten useimmissa vaikutusluokissa diesel-linja-autoa haitattomampi.

Taulukko 1. Linja-autojen käytön aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt

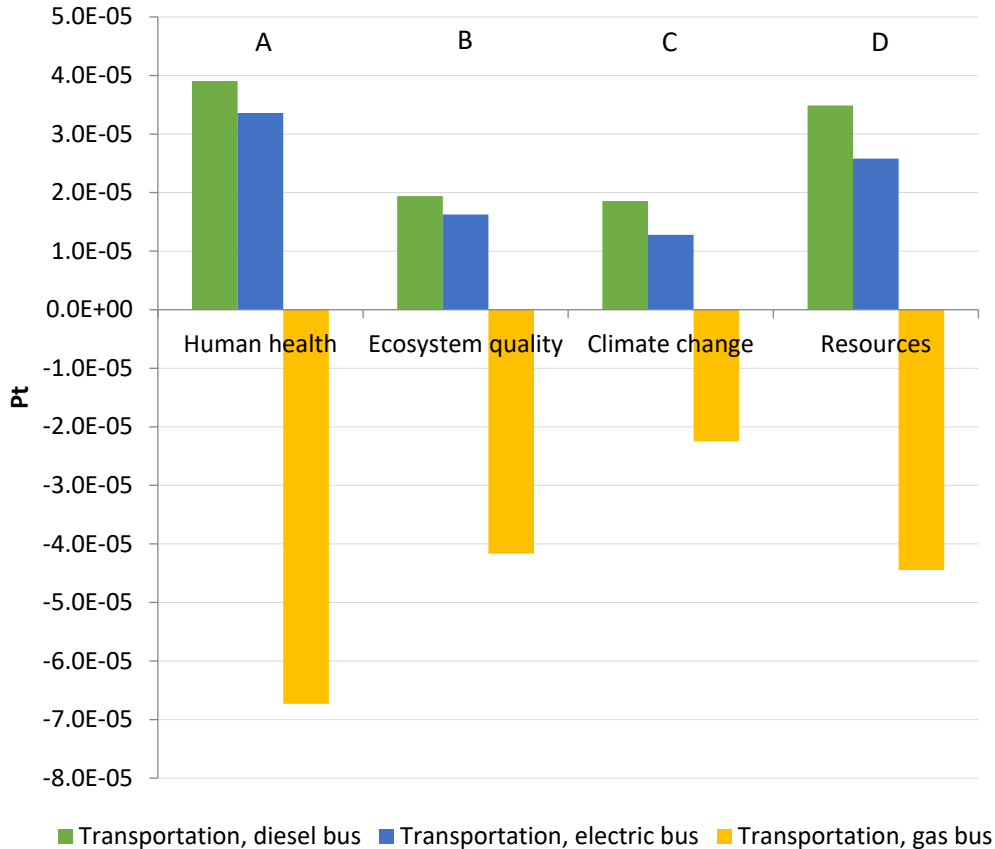
Käyttövoima	Diesel	Sähkö	Biokaasu
kasvihuonekaasupäästöt (kg CO ₂ ekv/pkm)	0.184	0.127	-0.223
kasvihuonekaasupäästöt (kg CO ₂ ekv/v bussi)	36 800	25 400	-44 600

Keskimääräisen suomalaisen hiilijalanjälki on vuositasolla noin 10 t CO₂ ekv (vuoden 2009 tieto), josta noin 20 % (2 t CO₂ ekv) arvioidaan tulevan kotimaan liikenteestä. Kotimaan liikenteen päästöistä noin 45 % muodostuu henkilöautoliikenteestä ja noin 13 % lentoliikenteestä. Mikäli loput kotimaan liikenteen päästöt (840 kg CO₂ ekv) muodostuisivat linja-autoliikenteestä, tarkoittaisi se yksittäiselle matkustajalle keskimäärin päivittäin noin 12,5 km matkaa diesel linja-autolla tai noin 18 km matkaa sähkölinja-autolla linja 7:ää vastaavissa oloissa. Matkustamalla 10 km biokaasubussilla, hyvittäisi ilmastonäkökulmasta 12,5 km diesel-linja-autolla.

Esimerkiksi yhden maitolitrin ilmastovaikutukset ovat noin 1 kg CO₂ ekv, vastaava päästö muodostuu, jos ajaa dieselbussilla 5,4 km tai sähköbussilla noin 8 km. Ilmastonäkökulmasta kaasubussia dieselbussin sijasta käyttävä voi juoda peräti 4 dl maitoa jokaista ajettua kilometriä kohden ilman lisääntyttä negatiivista vaikutusta ilmastoon.

Hiilineutraaliuteen pyrkivä linja-autoyhtiö voi korvata osan dieselkäyttöisestä kalustostaan kaasulinja-autoilla. Jo 5 biokaasukäyttöistä linja-autoa kumoaa kuuden diesel-linja-auton kasvihuonekaasu päästöt, mikäli linja-autojen käyttöaste on sama. Vaasassa on kokeiltu kaasukäyttöisiä linja-autoja hyvin tuloksin. Kaasu-autojen käyttöönoton jälkeen linja-autoyhtiö huomasi matkustajamäärien lisääntyneen. [2]

Kuvassa 3. on esitetty normalisoidut yhden henkilökilometrin matkan aiheuttamat ympäristövaikutukset diesel-, kaasu- ja sähkökäyttöisillä linja-autoilla. Tulokset on normalisoitu keskimääräisen eurooppalaisen vuosikulutuksen/altistuksen mukaan.



Kuva 3. Yhden henkilökilometrin matkan kulkemisesta diesel-, sähkö-, ja kaasukäyttöisellä linja-autolla aiheutuvat vaikutukset ihmisten terveyteen (a), ekosysteemien laatuun (b), ilmaston muutokseen (c) ja resursseihin (d).

Kuvan 3 tulokset on normalisoitu keskimääräisen eurooppalaisen vuosikulutuksen mukaisesti (ekosysteemien laatu, ilmaston muutos ja resurssit). Ihmisten terveysvaikutuksissa normalisointi on kuitenkin toteutettu suhteessa keskimääräisen eurooppalaisen vuositason kokemuksiin (ei aiheuttamiin) terveysvaikutuksiin.

Esimerkiksi 1 henkilökilometri diesel linja-autolla vaikuttaa ilmastonmuutokseen 18,6 μ Pt, mikä vastaa suunnilleen keskimääräisen eurooppalaisen vajaan 10 minuutin ajassa aiheuttamia vaikutuksia ilmastonmuutokseen. Vastaavasti 53 763 henkilökilometriä diesel linja-autolla lisää ilmastonmuutosta yhtä paljon kuin keskimääräinen eurooppalainen vuodessa kokonaiskulutuksellaan. Tämä vastaa vuodelle jaettuna noin 147 km matkaa päivittäin. Sähköbussilla voi sen sijaan matkustaa vuodessa jopa 24 362 km enemmän, kunnes vastaava rajapyykki tulee vastaan (vajaan 67 pkm/päivä enemmän). Kaasubussia käyttämällä voi sen sijaan jopa hyvittää ilmastovaikutuksensa, mikäli matkustaa tarkoituksenmukaisesti yli 44 444 henkilökilometriä vuodessa tai 122 pkm päivässä.

Yllä olevat esimerkit ottivat huomioon vain vaikutukset ilmaston muutokseen. Muiden vaikutusluokkien osalta tulokset ovat samansuuntaiset, diesel linja-auto kuormittaa ympäristöä eniten, sähkökäyttöinen linja-auto hieman vähemmän, kun taas biokaasulla kulkeva linja-auto vähentää ympäristökuormitusta kaikissa vaikutusluokissa.

2. Jätteenkuljetuksen optimoinnin ympäristövaikutukset

Vaste hankkeessa suunnitellaan järjestelmää, jossa jätteenkuljetuslaitokset voisivat seurata jätelaatikoissa olevien jätteiden määrää laatikoihin asennettavilla antureilla. Anturit mahdollistavat jätteiden kuljetuksen suunnittelun niin, että jätteet haetaan vasta kun laatikot ovat täynnä. Näin voidaan välttää turhia tarkastusmatkoja, kun jätelaatikat ovat tyhjiä tai vajaasti täytettyjä. Kuljetusmatkojen lyhentämisellä pyritään paitsi rahallisiin säästöihin, myös vähentämään ympäristökuormitusta.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää jätteenkuljetuksen optimoinnista mahdollisesti muodostuvien ympäristöhyötyjen määrä, sekä se, missä vaiheessa hyödyistä tulee merkittäviä. Näin voidaan arvioida, kuinka paljon kuljetussa matkassa tulisi säästää, jotta järjestelmästä tulisi ympäristönäkökulmasta kannattava.

2.1. RAJAUKSET

Selvitys on luonteeltaan ennakoarvio, eikä näin ollen perustu kaikilta osin todelliseen sovellukseen. Selvityksessä hyödynnetään SimaPro -ohjelman Ecoinvent -tietokannan tietoja, jotka perustuvat pääosin sveitsiläisiin aineistoihin. Suomalaisen jätteen kuljetuksen oletetaan soveltuvien osin olevan verrattavissa sveitsiläiseen.

2.2. FUNKTIONAALISEN YKSIKÖN VALINTA JA MUUT TARPEELLISET YKSIKÖT

Jätteenkuljetuksen funktionaalisenä yksikkönä on tonnikilometri (tkm). Lisäksi verrataan päästöjä useamman tonnikilometrin matkaan. Jäteauton massa voi olla täytenä jopa 25,5 t (tyhjänä 13,2 t) [3], jolloin voidaan arvioida 1 km säästön vastaavan noin 19 tkm matkaa. Ja $1 \text{ tkm} \approx 52,6 \text{ m}$.

2.3. MALLIN LUONTI

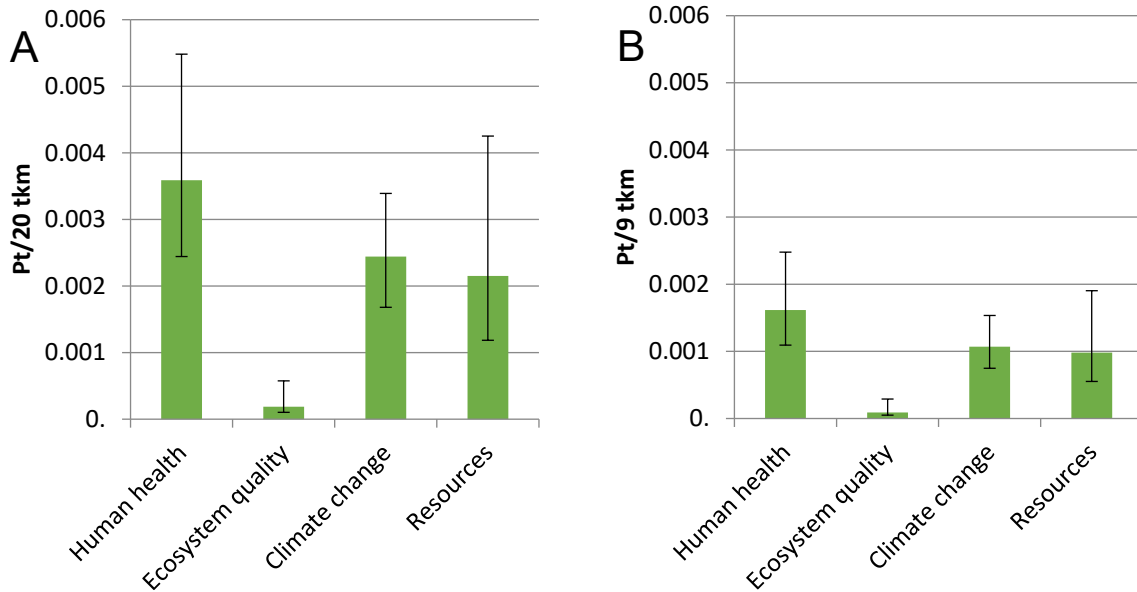
Jätteenkuljetuksen mallina käytetään Ecoinvent -tietokannan valmista jätteenkuljetustietuetta, joka ottaa huomioon jätteenkuljetuskaluston lisäksi, kulutetun polttoaineen määrän, tieinfrastruktuurin, sekä jarruista, renkaan kulutuksesta ja polttoaineen palamisesta aiheutuvat päästöt.

2.4. ANALYYSIMENETELMÄN VALINTA

Tulosten analysoinnissa päätettiin käyttää Ecoinvent -tietokannan impact 2002 + menetelmää ja Monte Carlo simulaatioita.

2.5. TULOKSET

Kuvassa 4 on esitetty (A) 20 tonnikilometrin (n. 1 km) ja (B) 9 tkm (n. 0,5 km) aiheuttamat ympäristövaikutukset jätteenkuljetuksessa, sekä ympäristövaikutusten virhearvio 95 % luotettavuusvälillä. Virhearviosta voidaan päätellä, miten lyhyiden matkojen säästöllä saavutetaan merkittäviä ympäristöetuja.



Kuva 4. 20 tkm (A) ja 9 tkm (B) jätteenkuljetuksen aiheuttamat ympäristöhaitat 95 % luotettavuusvälillä. 20 tkm vastaa reilun kilometrin jätteen kuljetusmatkaa.

Kuvasta 4 A ja B voidaan havaita, että mikäli 1 km matka lyhenee 0,5 km matkaksi on kuljetetun matkan ympäristövaikutukset suurimmassa osassa vaikutusluokkia jo selvästi pienemmät mahdollisista poikkeamista huolimatta.

Selvitettiin myös ilmastolämpenemiseen vaikuttavien kasvihuonepäästöjen määrä. 19 tkm (1 km) matkan aiheuttamat kasvihuonepäästöt keskivirheineen ovat $23,2 \pm 0,181$ kg CO₂ ekv. 1 km päästöt vastaavat 23 maitolitrin kokonaispäästöjä.

3. Taksiliikenteen energian säästöt Vaste -hankkeen reittioptimoinnin seurauksena

Kokkolan aluetaksi on käyttänyt Vastehankkeessa kehitettyä reittioptimointi sovellusta (VASTE-sovellus) toimintansa tehostamiseksi. Aluetaksin arvion mukaan VASTE-sovelluksella on säästetty kaikkiaan noin 15 % kertyvistä ajokilometreistä, mikä tekee vuodessa noin 50 000 km. Aluetaksilla on käytössään useita tilatakseja (1-8 hlö) ja pikkutakseja (1-4 hlö).

3.1. FUNKTIONAALINEN YKSIKKÖ

Funktionaaliseksi yksiköksi valittiin säästetyt ajokilometrit, mikä tarkoittaa tässä tapauksessa 50 000 km.

3.2. MALLI

Käytetään Ecoinvent -tietokannan valmiita henkilöautoliikenteen kilometriperustaisia tietueita keskikokoiselle ja suurelle henkilöliikenteen autolle. Tietueet yhdistetään malliksi, niin, että arvioidaan, että puolet säästöstä tulee keskikokoisella henkilöautolla ja puolet tilataksilla. Keskikokoisella henkilöliikenteen autolla tarkoitetaan autoa, jonka moottorin tilavuus on 1,4–2 l ja massa noin 1600 kg ja suurella henkilöliikenteen autolla autoa, jonka moottorin tilavuus on yli 2 l ja

massa noin 2000 kg. Arvioitiin näiden kuvaavan riittävän hyvin aluetaksin käyttämiä autoja. Autojen päästöluokaksi arvioitiin EURO 5.

3.3. Analyysimenetelmän valinta

Valittiin analyysimenetelmäksi CED (Cumulative energy demand), joka ottaa huomioon kaiken tuotteen tai palvelun tuottamiseen kuluvan energian.

3.4. TULOKSET

Hankkeessa säästettyjen 50 000 km voidaan arvioida säästäneen energiaa 269 GJ eli noin 74,7 MWh. Säästetty energiamäärä riittäisi esimerkiksi neljän nelihenkisen perheen vuoden sähkönkulutukseen ja neljän noin 120 m² omakotitalon lämmitykseen vuoden ympäri.

4. Vastepisteiden pakettipalveluiden energian säästö

Vaste -hankkeessa järjestetään pakettipalvelutoimintaa erillisten vastepisteiden kautta. Lähetettävän paketin voi jättää Vastepisteelle, josta paketti toimitetaan muun kuljetusliikenteen mukana toiseen vastepisteeseen. Kuljettava taho kulkee valitulla reitillä ensisijaisesti muista syistä (esim. henkilö tai tavaraliikenne). Vasteen pakettipalveluilla säästetään normaalin pakettitoimituksen matkojen verran luontoa, energiaa ja aikaa.

Hankkeessa on 8.8.2019 mennessä toimitettu erillistoimituksina yhteensä 8 pakettia testitoimitusten lisäksi. Selvityksen tavoitteena on laskea hankkeen seurauksena näin säästetty energia määrä. Taulukossa 2 on esitetty kuljetettujen pakettien toimitusmatkat.

Taulukko 2. Vaste -hankkeessa toimitetut paketit

Reitti	Matka (km)	Toimituskerrat (kpl)	Yhteensä (km)
Tehtaankatu, Kok - Perho	100	2	200
Port Tower, Kok - Tehtaankatu, Kok	3.6	4	14.4
Terveystie, Kaustinen - Tehtaankatu, Kok	47.2	1	47.2
Toholampi - Kok	67	1	67
Yhteensä		8	328.6

Kun otetaan huomioon säästetyn energian määrä, lasketaan matkat edestakaisin. Paketit ovat mitoiltaan pieniä ja ne olisi voitu kuljettaa esim. henkilöautossa. Hankkeessa on siis säästetty yhteensä 657,2 km matkat henkilöautoliikennettä. Paketit olivat myös kevyitä, joten niiden massa jätettiin huomioita laskuissa.

4.1. FUNKTIONAALISEN YKSIKÖN VALINTA

Pakettikuljetusten ilmastovaikutuksissa käytetään funktionaalisen yksikönä säästettyjä ajokilometrejä (km).

4.2. MALLIN LUONTI

Käytetään Ecoinvent tietokannan valmista henkilöautoliikenteen kilometriperustaista tietuetta.

4.3. ANALYYSIMENETELMÄN VALINTA

Valittiin analyysimenetelmäksi CED (Cumulative energy demand), joka ottaa huomioon kaiken tuotteen tai palvelun tuottamiseen kuluvan energian.

4.4. TULOKSET

Hankkeessa säästetyt 657,2 km ovat säästäneet energiaa yhteensä 3,27 GJ, mikä vastaa noin 0,9 MWh:ta. Mikäli pakettipalveluiden menekki kasvaa esimerkiksi yhteen toimitettuun pakettiin päivässä (matkat keskimäärin 41 km/paketti, 200 päivää vuodessa), saadaan vuoden aikana energian säästöjä yhteensä 81,75 GJ. Tämä vastaa suunnilleen 22,7 MWh:a. Säästetty energiamäärä riittäisi esimerkiksi nelihenkisen perheen vuoden sähkönkulutukseen ja noin 120 m² omakotitalon lämmitykseen vuoden ympäri. [4]

5. Viitteet

- [1] "[https://www.nettikone.com/listAdvSearchFindAgent.php?id=14352631&tb=tmp_find_agent&PN\[0\]=adv_search&PL\[0\]=advSearch.php?brand_type=kuljetuskalusto@ad_status=linja-auto@more=more?id=14352631@tb=tmp_find_agent](https://www.nettikone.com/listAdvSearchFindAgent.php?id=14352631&tb=tmp_find_agent&PN[0]=adv_search&PL[0]=advSearch.php?brand_type=kuljetuskalusto@ad_status=linja-auto@more=more?id=14352631@tb=tmp_find_agent)," NettiX Oy. [Online]. [Haettu 21 5 2019].
- [2] Scania, "<https://www.scania.com/fi/fi/home/experience-scania/news-and-events/News/vaasan-biokaasubussit-osoittautuneet-ennakoitua-taloudellisimmik.html>," Scania. [Online]. [Haettu 2019].
- [3] S. P. 450, "<https://www.mascus.fi/kuljetuskalusto/jateautot/scania-p-450-6x2-4-ntm-pakkari/hiklhdc.html>," [Online]. [Haettu 8 2019].
- [4] Vattenfall, "<https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/sahkonkulutus/>," [Online]. [Haettu 2019].