



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

HANNE ALA-HARJA
PETRI HELO
REINO VIRRANKOSKI (TOIM.)

Elintarvikealan ympäristötehokas logistiikkaketju

VAASAN YLIOPISTON JULKAISUJA
SELVITYKSIÄ JA RAPORTTEJA 204

Esipuhe

Globalisoitunut elintarviketalous ja kasvavat ympäristöpaineet pakottavat elintarviketajujen toimijoita tehostamaan ekotehokkuutta. Energiankulutus on elintarviketajujen lämpösäätelytarpeen, toimitusaika- ja varmuusvaateiden ja volyymin takia. Energiatehokkuuden tehostamiseksi on kuitenkin erilaisia keinoja niin kuljetusten, terminaalitoimintojen, valmistuksen kuin varastoinninkin osalta. Käytännön tutkimushankkeita aihepiiristä on kuitenkin vähäisesti.

Tekesin Rakennettu ympäristö-ohjelma ja joukko ympäristötehokkuudesta kiinnostuneita yrityksiä rahoittivat Green LC- tutkimushankkeen. Vaasan yliopisto toteutti hankkeen vuosina 2012 – 2015. Hankkeen ohjausryhmässä toimivat Tuomo Rannila, Ari Järvimäki, Raine Sivula, Ari Jeskanen, Jukka Pajunen, Tapani Potka, Jouni Halkosaari, Kari Virtanen, Reino Virrankoski ja Petri Helo.

Kiitos hankkeen rahoittajille ja yritysten edustajille hyvästä yhteistyöstä.

Seinäjoella 20.1.2015

Hankkeen tutkijat

Sisällys

1	JOHDANTO	1
1.1	Toimitusketjujen päästöjen rakenne.....	2
1.2	Green LC- hanke.....	7
1.3	Määritelmiä	9
2	ELINTARVIKELOGISTIIKKA	12
2.1	Tavaralogistiikan määrät ja päästöt.....	12
2.2	Vihreä logistiikka ja toimitusketjujen johtaminen	12
2.3	Elintarvikelogistiikka ja -toimitusketjut.....	13
2.4	Kylmäketju elintarvikelogistiikassa.....	15
2.4	Varastojen energiankulutus.....	17
2.5	Valaistus.....	21
2.6	Hävikki ja pakkaukset.....	23
3	TEHDASLÄHETTÄMÖN ENERGIATEHOKKUUS	26
3.1	Lämpöpumput	27
3.2	Aurinkopaneelit.....	28
3.3	Asfalttilämpö.....	30
3.4	Kalliolämpöakku	31
3.5	Kaukokylmä, aurinkoviileä.....	32
3.6	Terminaalin hukkalämmön talteenotto	32
3.7	Energiatekninen laskenta	34
3.6.1	Energian käyttö	34
3.6.2	Hiilidioksidipäästöt.....	35
3.8	Tulokset.....	37
4	SIIRTOKULJETUS REKALLA TAI JUNALLA SEINÄJOELTA VUOSAAREEN.....	39
4.1	Rautatieliikenne Seinäjoelta Vuosaareen.....	41
4.2	Kuorma-autoketjun laskelmat	42
4.2.1	Kuorma-autokuljetusten kustannukset.....	42
4.2.2	Kuorma-autokuljetusten energiankulutus	43
4.2.3	Kuorma-autokuljetusten hiilidioksidipäästöt.....	44
4.3	Junaketjun laskelmat	45
4.3.1	Junakuljetusten kustannukset.....	45
4.3.2	Junakuljetusten energiankulutus	46
4.3.3	Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt.....	47
4.4	Laskelmien lähtöarvot.....	49
4.5	Tulokset.....	52
5	SIIRTOKULJETUS KUORMA-AUTOLLA TAI JUNALLA SEINÄJOELTA PIETARIIN.....	57
5.1	Rautatieliikenne Pietariin	58
5.2	Kuorma-autoketjun laskelmat	59
5.2.1	Kuorma-autokuljetusten kustannukset.....	60

5.2.2	Kuorma-autokuljetusten energiankulutus.....	60
5.2.3	Kuorma-autokuljetusten hiilidioksidipäästöt.....	61
5.3	Junaketjun laskelmat.....	61
5.3.1	Junakuljetusten kustannukset	62
5.3.2	Junakuljetusten energiankulutus.....	63
5.3.3	Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt.....	63
5.4	Laskelmien lähtöarvot	65
5.5	Tulokset	66
6	TUONTIKULJETUKSET SATAMISTA HAJAUTETUSTI KUORMA-AUTOLLA TAI KESKITETYSTI JUNALLA.....	71
6.1	Kuorma-autotuonti hajautetusti eri satamista	72
6.1.1	Hajautetun mallin kustannukset	72
6.1.2	Hajautetun mallin hiilidioksidipäästöt.....	72
6.2	Junatuonti keskitetysti yhdestä satamasta.....	72
6.2.1	Keskitetyn mallin kustannukset.....	72
6.2.2	Keskitetyn mallin hiilidioksidipäästöt.....	73
6.3	Lähtöarvot.....	73
6.4	Tulokset	74
7	YHDEN TAI USEAN KERÄILYTERMINAALIN MALLI	77
7.1	Keskitetyn keräilyterminaalien laskelmat	82
7.1.1	Kustannukset	82
7.1.2	Hiilidioksidipäästöt.....	83
7.2	Hajautettujen keräilyterminaalien laskelmat	84
7.2.1	Kustannukset	84
7.2.2	Hiilidioksidipäästöt.....	85
7.3	Lähtöarvot.....	86
7.4	Tulokset	86
7.5	Pohdintaa	89
8	OLOSUHDEMITTAUKSET JA NIIDEN HYÖDYNTMINEN	90
8.1	Jakeluauton lämpösäädely kuljetus	90
8.2	Aurinkolämmön talteenottokenttä	95
9	KAASUKÄYTTÖISEN KUORMA-AUTOLIIKENTEEN POLTTOAINEIDEN KULUTUS, PÄÄSTÖT JA KUSTANNUKSET	98
9.1	Nesteytetty maakaasu raskaassa maantieliikenteessä.....	98
9.2	Vertailu	99
	Bensamoottori (ottomoottori).....	100
	Dieselmoottori	101
9.3	Raskaan liikenteen energian kulutus	102
9.4	Polttoainekustannukset	103
9.7	Case diesel verrattuna metaanidieselkuorma-autoon Seinäjoki-Vuosaari siirtokuljetuksissa	109
9.8	Case diesel verrattuna metaanikuorma-autoan jakelukuljetuksissa.....	112

10 TERMINAALIEN LÄMMÖN TALTEENOTTO.....	114
11 ELINTARVIKKEKETJUN SÄÄSTÖPOTENTIAALIT.....	117
11.1 Kustannus- ja päästösäästöpotentiaalit.....	117
11.2 Pohdinta	121
LÄHTEET.....	124

Kuvat

Kuva 1.	Elintarvikeketjun rakenne.....	2
Kuva 2.	Päästöjen jakautuminen elintarvikeketjussa	4
Kuva 3.	Päästöjen jakautuminen ketjussa	5
Kuva 4.	Päästöjen jakautuminen ketjussa (jakelu 6 tn ajoneuvolla).....	5
Kuva 5.	Kuljetuspäästöt suhteessa elintarvikkeen CO ₂ -kuormaan (mukaiillen Weact, 2014)	6
Kuva 6.	EURO-päästöluokitukset kuorma-autoille (diesel), g/kWh (savutus: m ⁻¹)	11
Kuva 7.	Suomen elintarviketuotanto- ja myynti alueittain	14
Kuva 8.	Lämpötilat kuljetusten aikana (lähde: Evans jne 1991 James, S. J., Evans, J., & James, C., 2008:ssa).....	16
Kuva 9.	Sähkönkulutus eri rakennuksissa (Itron, 2008)	19
Kuva 10.	Ilmastovyöhykkeen vaikutus energiantensiteettiin	20
Kuva 11.	Pakastevaraston sähkönkulutuksen jakautuminen (Itron, 2008)	22
Kuva 12.	Varaston sähkönkulutuksen jakautuminen (Itron, 2008).....	22
Kuva 13.	Ruoan hävikki vaiheittain Pohjois-Amerikassa (NRDC, 2012).....	24
Kuva 14.	Aurinkopaneelien hintakehitys, 1976 – 1012 \$/W (mukaiillen Liebreich, 2013)	30
Kuva 15.	Kuva asfaltin sulanapitojärjestelmästä (Warmia, 2014).....	31
Kuva 16.	Yksinkertaistettu malli porakaivokentästä (kalliolämpöakku), jota voidaan tehokkaasti hyödyntää pitkäaikaiseen lämmön varastointiin (Underground Energy, 2014).....	33
Kuva 17.	Seinäjoki – Vuosaari rautatie ja maantiereitit (OpenStreetMap, 2014).....	40
Kuva 18.	Kuorma-autoketjun vaiheet	40
Kuva 19.	Junaketjun vaiheet	41
Kuva 20.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyyminä 40 TEU-konttia/päivä	52
Kuva 21.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyyminä 15 TEU-konttia/päivä	53
Kuva 22.	Kuorma-auto- ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyyminä 1 TEU-kontti/päivä.....	54
Kuva 23.	Päivittäisen TEU-konttivolyymin (x-akseli) vaikutus juna (katkoviivalla) - ja kuorma-autoketjun (kaksoisviivalla) TEU-	

	konttikohtaiseen energiankulutukseen, hiilidioksidipäästöihin ja kustannuksiin reitillä Seinäjoki-Vuosaari	55
Kuva 24.	Kuorma-autoketju	57
Kuva 25.	Junaketju	57
Kuva 26.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 40 TEU-konttia/päivä.....	67
Kuva 27.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 15 TEU-konttia/päivä.....	68
Kuva 28.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 1 TEU-kontti/päivä.....	69
Kuva 29.	Päivittäisen TEU-konttivolyymien (x-akseli) vaikutus juna (katkoviivalla) - ja kuorma-autoketjun (kaksoisviivalla) TEU-konttikohtaiseen energiankulutukseen, hiilidioksidipäästöihin ja kustannuksiin reitillä Seinäjoki-Pietari.	70
Kuva 30.	Hajautetun (kuorma-auto) vs. keskitetyn (juna) tuonnin vaikutus kustannuksiin ja hiilidioksidipäästöihin	75
Kuva 31.	Tuontikuljetusten kustannusvertailu (punainen=juna, sininen=kuorma-auto)	76
Kuva 32.	Keskitetyn elintarvikeketjun havainnekuva	77
Kuva 33.	Hajautetun elintarvikeketjun havainnekuva	78
Kuva 34.	Yhden valtakunnallisen keräilyterminaalin malli	79
Kuva 35.	Usean keräilyterminaalin malli	79
Kuva 36.	Lähtö- ja määränpääterminaalit kartalla (Lähde: openmap)	81
Kuva 37.	Tuotekilokohtaiset kuljetuskustannukset (pystyakseli) eri tonnikilometrihinnoilla (vaaka-akseli) skenaarioittain	88
Kuva 38.	Tuotekilokohtaiset kuljetuskustannukset (€/kg, pystyakseli) maakuntaterminaalien keräilykustannusten (€/laatikko, vaaka-akseli) vaihdellessa.....	89
Kuva 39.	Itsenäisesti toimiva langaton lämpösäädellyn kuljetuksen seurantalaitteisto jakeluautossa.	91
Kuva 40.	Kylmäkuljetusauton jakelukierrokset, joilta mittaukset tehtiin 13.-14.11.2014. Reitit on esitetty käyttäen Google Maps -sovellusta....	92
Kuva 41.	Esimerkki olosuhdemittausten graafisesta tarkastelusta Google Maps -sovelluksen avulla. Ikkunassa näkyvät paikannuspistettä 346 vastaavat lämpötilamittaukset kahdesta anturinoodista. Näkymään voidaan täydentää tietokannasta myös kyseisiä mittauksia ja paikkaa vastaava kellonaika sekä mitattu ilmankosteus.	93
Kuva 42.	Jakeluauton kuormatilan lämpötila yhden anturinoodin mittaamana kahden jakelukierroksen aikana 13.11.2014 klo 21:14 – 14.11.2014 klo 13:40.....	94
Kuva 43.	Jakeluauton kuormatilan ilmankosteus saman anturinoodin mittaamana kun lämpötila kuvassa 8.4. Mittaukset on tehty kahden jakelukierroksen aikana 13.11.2014 klo 21:14 – 14.11.2014 klo 13:40.....	94
Kuva 44.	Nestekierron viileä pää viilentää pitkällä aikavälillä myös maata. Tästä johtuvaa tehonhäviötä voisi sopivissa olosuhteissa kompensoida aurinkolämmön avulla.	95

Kuva 45.	Lämpötilamittaukset parkkipaikasta langattoman anturiverkon avulla.	96
Kuva 46.	Parkkipaikasta syyskuussa 2014 mitattu auringon lämmitysteho. ..	97
Kuva 47.	Iveco Stralis (Iveco Stralis, 2014)	100
Kuva 48.	Volvo FM MetaaniDiesel kuorma-auto (Volvo, 2014).....	101
Kuva 49.	Iveco Stralis LNG kuorma-auto, 2014	107
Kuva 50.	LNG jakeluasema (Alpo Kitinoja, 8.11.2014, St Louis).....	107
Kuva 51.	LNG pistooli (Alpo Kitinoja, 8.11.2014, St Louis).....	109
Kuva 52.	Diesel- ja metaanidieselkuorma-auton erot reitillä Seinäjoki-Helsinki (100 000 km/vuosi).....	111
Kuva 53.	Diesel ja metaanikäyttöisen (biokaasu) jakeluajoneuvon erot	113
Kuva 54.	Yksinkertaistettu malli porakaivokentästä, jota voidaan käyttää pitkäaikaiseen lämmön varastointiin (Underground Energy, 2014).	115
Kuva 55.	Espoo Logistiikka -liikelaituksen varikon katolle asennetut aurinkopaneelit (Patrick Forsblom, 2014).	116
Kuva 56.	Näkymä html-laskurista.....	121

Taulukot

Taulukko 1.	Lähtämön ja jakelukeskuksen lähtötiedot.....	4
Taulukko 2.	Tutkimuskysymykset työpaketeittain	8
Taulukko 3.	Tutkimusongelmat vaiheittain	9
Taulukko 4.	Energiankulutus erityyppisissä rakennuksissa.....	18
Taulukko 5.	Lämpökaivon vuosittainen talteenottopotentiaali.....	33
Taulukko 6.	Porakaivokentän kustannukset.....	34
Taulukko 7.	Lähtöarvot.....	37
Taulukko 8.	Terminaalienergian säästämahdollisuudet.....	38
Taulukko 9.	Kuorma-autoketjun ja junaketjun erot (lihavoituna volyymin paras vaihtoehto).....	55
Taulukko 10.	Kuorma-autoketjun ja junaketjun tuotekiloahtainen tarkastelu	56
Taulukko 11.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 40 TEU-konttia/päivä	66
Taulukko 12.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 15 TEU-konttia/päivä	67
Taulukko 13.	Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 1 TEU-kontti/päivä	68
Taulukko 14.	Tuonti satamittain	71
Taulukko 15.	Kuljetettavien määrien jakautuminen lähtöpisteittäin (%)	81
Taulukko 16.	Kuljetettavien määrien jakautuminen määränpäittäin (%)	82
Taulukko 17.	Etäisyydet lähtöpisteistä keräilyterminaaleihin	83
Taulukko 18.	Etäisyydet lähtöpisteistä keräilyterminaaliin hajautetussa mallissa	85
Taulukko 19.	Yhden keräilyterminaalimallin vuosikohtaiset tulokset	87
Taulukko 20.	Usean keräilyterminaalimallin vuosikohtaiset tulokset	87

Taulukko 21.	Yhden ja useamman keräilyterminaalimallin vaiheiden vaikutusten vertailu	87
Taulukko 22.	Iveco Stralixsen tekniset tiedot.....	101
Taulukko 23.	Volvo FM MetaaniDiesel tekniset tiedot	102
Taulukko 24.	Kuorma-auton energiankulutus eri polttoaineilla	103
Taulukko 25.	Polttoaineiden hintavertailu.....	103
Taulukko 26.	Polttoaineiden CO ₂ -päästöt.....	105
Taulukko 27.	Lähtöarvot diesel-, metaanidiesel ja metaanikuorma-auton vertailulaskelmissa	111
Taulukko 28.	Lähtötiedot laskelmissa	112
Taulukko 29.	Lämpökaivon talteenottopotentiali	115
Taulukko 30.	Porakaivokentän kustannukset	116
Taulukko 31.	Elintarvikeketjun säästöpotentialit	120

1 JOHDANTO

Petri Helo ja Hanne Ala-Harja

Logistiikan ympäristötehokkuudella tarkoitetaan perinteisten toimitusketjun parametrien, kuten kustannusten, toimitusajan ja toimitusvarmuuden (Christopher 2005) lisäksi energiatehokkuuden ja erilaisten päästöjen kuten hiilidioksidin, rikkidioksidin ja typen oksidien huomiointi suunniteltaessa teknisiä toteutusratkaisuja (Craig & Eston 2011; Coley, Howard & Winter 2009). Elintarvikelogistiikan volyymi on Suomessa noin 3 miljardia kg vuositasolla, mikä tarkoittaa vastaa 2000 kuorma-autoa päivittäisessä ajossa, useita alueellisia terminaaleja, tehtaiden lähettämöjä ja erityyppisiä tietojärjestelmiä toimitusten ja liikenteen ohjauksessa.

Ekotehokkuus voidaan ottaa huomioon suunnitteluparametrina tarkasteltaessa keräilyn, siirtokuljetusten, terminaalitoimintojen ja jakelulogiistiikan toimintoja ja logistiikkakeskusten fyysisiä, toiminnallisia ja ohjauksellisia rakenteita. Uusien mittausparametrien huomiointi investointipäätöksissä ja toiminnallisen ohjauksen kehittämisessä mahdollistaa uutta lisäarvoa perinteisille toimialoille kuten elintarviketeollisuudelle (Carter & Rogers 2005; Bowersox, Closs, Stank 2000; Cumming 2005).

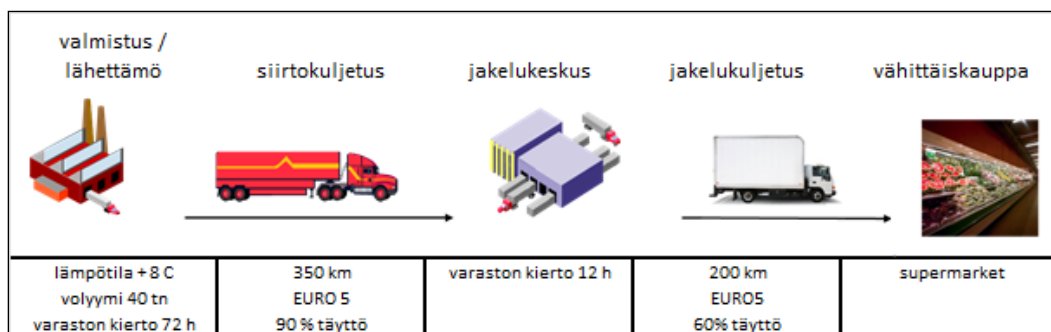
Logistiikan ympäristötehokkuutta on tutkittu viime aikoina runsaasti (Chunguag et al. 2012; Keeble et al 2003;). Uudet erityyppiset polttoaineet tekevät tuloa ja erityyppisiä skenaarioita lasketaan monesta eri näkökulmasta. Laskentatyökalut ja standardointi on tehnyt analyysien tekemisestä suoraviivaisempaa. Operatiivisella tasolla erityyppisiä kuljetusmuotoja on vertailtu samoin kuin logistiikkaverkkojen rakenteellisia vaihtoehtoja. Keskittämisen ja hajautettujen verkkoarkkitehtuurien vaikutus suoritteisiin on merkittävä. (kts. Kortelainen, Kuosmanen 2007; Murphy & Poist 2003; Lee 2008; Markley & Davis 2007; Quanriquasi et al 2007; Rao & Holt 2005)

Älykkäät, telemetriikkaan perustuvat järjestelmät, mahdollistavat kuljetusvälineiden seurannan reaali-aikaisesti. Tarkka tilannetieto autojen, konttien, puoliperävaunujen tai jopa lavatason seuranta voidaan yhdistää kuljetus-optimointiin, joka huomioi liikenteen ja sään vaikutukset. Tarkempi tieto jakelun asiakastiedoista, kuten viikonpäivä ja vuodenaikavaihteluista ja ympäristöparametreista auttaa tekemään tarkempia päivittäisiä suunnitelmia joiden avulla voidaan vähentää ajo-suoritteita ja siten polttoainekulutusta. Kun säätöä ja optimointia voidaan tehdä tosi-aikaisesti, on mahdollista mukauttaa järjestelmää hyvinkin lyhyellä aikavälillä. (Veleva et al 2003; van der Vorst et al 2009; Rodrigue et al 2001).

Logistiikkakeskusten rakentamisessa, eli tehtaiden lähettämöt ja alueelliset jakeluterminaalit, uudet energiatehokkaat ratkaisut ovat kiinnostuksen kohteina (Supply Chain Standard 2009; Saadny et al 2011). Tämä tarkoittaa käytännössä lämpöpumpputekniikoiden ja lämpökaivojen käyttöä erilaisten lämpösäädelyjen alueiden energiavirtojen ohjauksessa. Tämän tyyppisiä pilotteja on toteutettu uusissa lähettämöissä ja tuotantolaitoksissa mm. Valion tehtailla sekä osana laajempia energiatehokkaita logistiikkaratkaisuja esim. Tescon jakelukeskuspilotit Kiinassa ja US Army Corps Engineers – Europe District, Saksassa. Koska monesti välivarastointitoiminnot sijaitsevat lähellä alueita joissa on tarvetta sekä jäähdytykselle että lämmittämiseksi, on monentyyppisiä mahdollisuuksia kehittää myös logistiikkaoperaatioiden ympäristötehokkuutta esim. puhtaasti energiansäästömielissä.

1.1 Toimitusketjujen päästöjen rakenne

Jotta toimitusketjujen ympäristötehokkuutta voidaan arvioida elintarvikekuljetuksessa, on luotava kokonaiskuva tyypillisen ketjun rakenteesta ja kuormituksesta. Tätä tietoa tarvitaan jotta voidaan arvioida missä kohtaa ketjua esimerkiksi CO₂ päästöt syntyvät ja missä on suurin potentiaali erilaisille kehitystoimenpiteille. Seuraava esimerkki on tehty kuvaamaan tyypillistä kuljetusketjua tätä tarkoitusta varten. Toimitusketjujen hiilidioksidipäästöjä tarkasteltiin elintarvikekilokohtaisesti esimerkiketjussa (kuva 1) valmistuksesta vähittäiskauppaan lämpösäädelyllä tuotteella (alle +8 C). Valmistuksesta 40 tonnin tuote-erä siirrettiin keskimäärin 72 tunnin varastoinnin jälkeen 350 km jakelukeskukseen EURO5-tyyppin puoliperävaunuyhdistelmäajoneuvolla. Jakelukeskuksessa tuote keräiltiin ja keskimäärin 12 tunnin jälkeen jaettiin vähittäiskauppaan 200 kilometrin päähän.



Kuva 1. Elintarvikeketjun rakenne

Ketjun päästöt CO₂ ekv.kg/1000 kg tuotetta laskettiin vaiheittain seuraavasti:

$P = P_l + P_s + P_k + P_j$, jossa

P_l = lähettämön CO₂ ekv. päästöt (kg CO₂ ekv/1000 kg tuotetta), P_s = siirtokuljetuksen CO₂ ekv. päästöt (kg CO₂ ekv/1000 kg tuotetta), P_k = jakelukeskuksen CO₂ ekv. päästöt (kg CO₂ ekv/1000 kg tuotetta) ja P_j = jakelukuljetuksen CO₂ ekv. päästöt (kg CO₂ ekv/1000 kg tuotetta).

P_l ja P_k laskettiin seuraavasti

P_l tai $P_k = (W * t) * k_s * v$, jossa

W = kylmälaitteen keskimääräinen ottoteho volyyymille mitoitettulta alalta (kWh),
 t = kylmälaitteen käyntiaika (h/päivä), k_s = energian CO₂-kerroin (g CO₂ ekv / kWh) ja volyyymi (tonnia).

P_s ja P_j laskettiin kuljetusten osalta seuraavasti

P_s tai $P_j = (P_k + P_l)$, jossa

P_k = kuljetuksen aiheuttama CO₂ päästö (kg CO₂ ekv.) ja P_l = kuljetuksen aikaisen lämpösäätelyn aiheuttama CO₂ päästö (kg CO₂ ekv.).

P_k laskettiin seuraavasti

$P_k = (s * k) / m * v$, jossa

s = matka (km), k = päästö g CO₂ ekv / km ja m = kuljetettava määrä (kg) ja v = kuljetusvolyyymi.

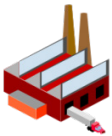
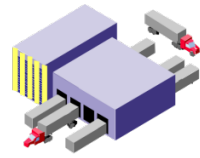
Lähettämön päästöt laskettiin seuraavasti:

$P_l = k * t / v$, jossa

k = kylmäkoneen kulutus (litraa/tunti), t = kylmäkoneen käyttöaika matkalla (tuntia), p = polttoaineen päästökerroin (kg CO₂/kg polttoainetta) ja v = kuljetuksen volyyymi (kg).

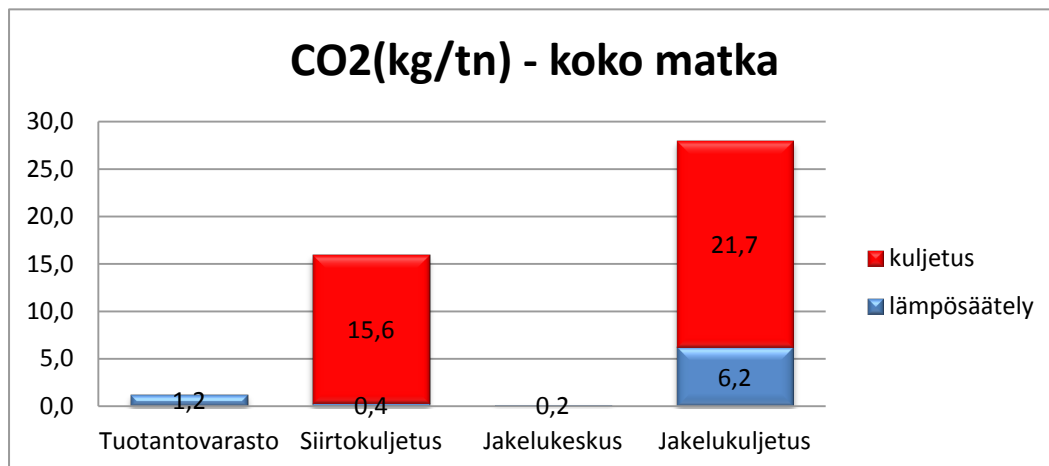
Lähtötietoina laskelmissa käytettiin taulukon 1 arvoja.

Taulukko 1. Lähettämön ja jakelukeskuksen lähtötiedot

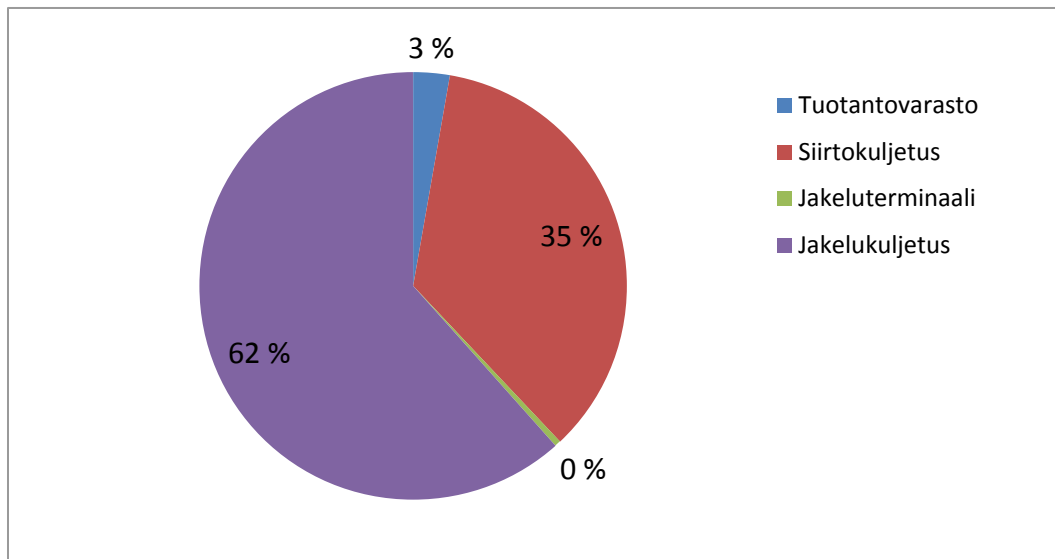
	Lähettämö	Jakelukeskus	
Sähkön co2-kerroin	260	260	g Co2 ekv/kWh
Kylmähuone	100	100	m2
Ottoteho	4	4	kW /100 m2
Käyntiaika	16	16	h/d
Vuorokauden sähkönkulutus	64	64	kWh /100m2
Varaston kiertonopeus	3	0,5	päivää
CO2 määrä	50	8	CO2
	40	40	tn/100 m2

Tulokset osoittivat (kuva 2) että hiilidioksidipäästöt tuotantovaraston, siirtokuljetuksen, jakelukeskuksen ja jakelukuljetuksen osalta olivat yhteensä 45 kg/1000 tuotekiloa. Suurimmat tuotekilokohtaiset päästöt (62 %) muodostuivat jakelukuljetuksissa.



Kuva 2. Päästöjen jakautuminen elintarvikeketjussa

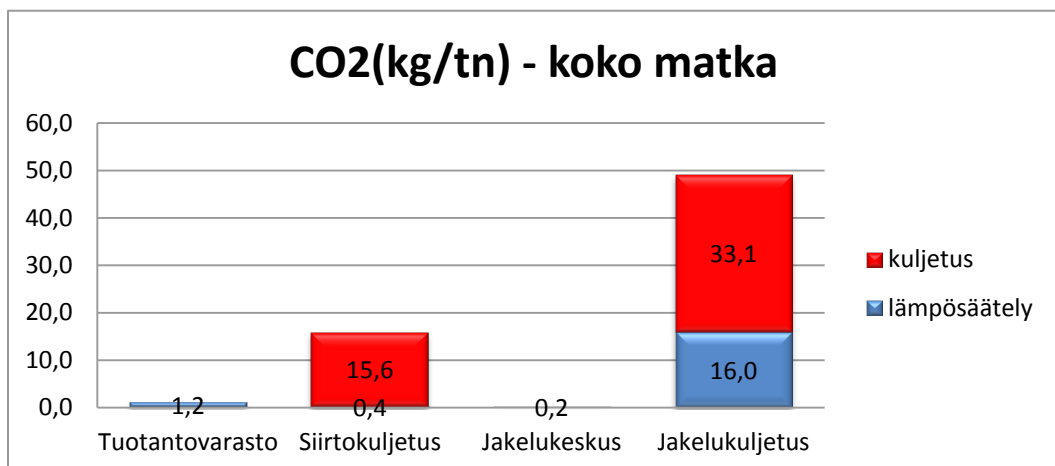
Kuljetukset muodostavat 82 % ketjun päästöistä ja lämpösäätely 18 %. Jakelukuljetuksen osuus on 62 % koko ketjun päästöistä (kuva 3).



Kuva 3. Päästöjen jakautuminen ketjussa

Kuljetuksen aikaisen lämpösäätelyn päästöt ovat merkittävästi suuremmat kuin varastossa ja terminaalissa muodostuvat päästöt.

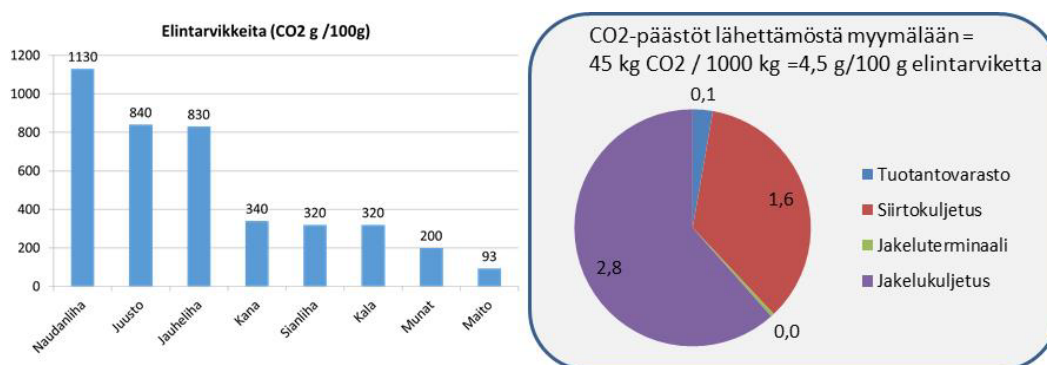
Jos jakelu tehtäisiin pienemmällä ajoneuvolla (massa 6 tn, 3,5 tn kuorma, 60 % täyttöaste) niin jakelun päästöt olisivat peräti 49 kg/1000 kg tuotetta ja koko ketjussa 67 kg/1000 kg tuotetta (kuva 4).



Kuva 4. Päästöjen jakautuminen ketjussa (jakelu 6 tn ajoneuvolla)

Jos päästöt lähettämöstä kauppaan suhteutetaan elintarvikkeen kokonaiskuormaan, niin valmiin tuotteen jakelun osuus on vähäinen.

Tuoteryhmästä riippuen kuljetuksen osuus on noin 0,4 % - 5 % (kuva 5). Vertailuna voidaan todeta että erityisesti verkkokaupan ja asiakastarpeiden lisääntyminen Unileverin tuotteiden osalta luovat Phatelin (2014) lisäpaineita erityisesti ”viimeiselle mailille”, joka on useissa tutkimuksissa todettu keskeiseksi osaksi toimitusketjun kokonaisuuden näkökulmasta .



Kuva 5. Kuljetuspäästöt suhteessa elintarvikkeen CO₂-kuormaan (mukaillen Weact, 2014)

Myymälöiden osuus energiankulutuksesta on esimerkkimyymälässä noin 0,27 kWh/m²/päivä. Esimerkkimyymälässä 360 m²:n (myyntipinta-ala noin 220 m²) lämmitysenergian tarve kaupalla 32038 kWh / vuosi, eli ominaiskulutus on 100,4 kWh/m². Pakastealtaiden vaikutus on noin 11000 kWh vuodessa. Ilman niitä lämmitysenergian tarve olisi 43404 kWh ja ominaiskulutus 120,9 kWh/m² (Suuronen, 2012)

Eläinperäisten tuotteiden kuljetuksissa osuus on vähäisempi ja kasviperäisten tuotteiden kuljetuksessa suurempi. Tämä johtuu siitä että eläinperäisten tuotteiden kokonaisympäristövaikutus on suurempi mm. laiduntavien eläimien tuottamisen metaanipäästöjen ja rehunkulutuksen takia. Kasviperäisillä tuotteilla on alkutuotannon osuus, ja siten myös koko ketjun, hiilidioksidikuorma vähäisempi. Lyhyen käyttöajan tuotteilla myös hävikin osuus on suurempi ja kuljetusaikavaade suurempi.

Kun verrataan elintarvikeketjun päästöjä esimerkiksi Unileverin (Patel, 2014) CO₂ päästöjen jakautumiseen ketjussa, voidaan todeta että Unileverin tuottamasta 400 miljoonasta vuotuisesta tonnista CO₂-päästöjä, raaka-ainevalmistus ja tuotanto tuottavat yhteensä 29 %, jakelu 2 % ja kuluttaja 68 %. Jätteenä joutuu 1 %.

1.2 Green LC- hanke

GreenLC – Ympäristötehokas elintarvikelogistiikkaketju -tutkimusprojekti kehitti uusia konsepteja elintarvikelogistiikan infrastruktuurirakentamista varten. Hanke toteutettiin aikavälillä 1.11.2012 – 31.12.2014.

GreenLC -hankkeen tutkimusongelmaksi määriteltiin ratkaisumallien löytäminen siihen, miten ympäristötehokas logistiikkajärjestelmä voidaan rakentaa elintarvikkeiden toimitusketjuihin. Tutkimusongelma operationalisoitiin useampiin tutkimuskysymyksiin:

- Kuinka suuri potentiaali viileäkuljetettavien elintarvikkejakelun alueellisessa yhdistämisessä olisi tonnakilometrien suhteen? – Esim. maito, liha toimitusketjun rakenne.
- Miten voidaan toteuttaa energiansäästö ja energianhallinta monilämpötilaterminaalissa?
- Miten ympäristötehokkuutta voidaan parantaa langattomien mittausten käyttämisessä olosuhdeseurannassa?
- Missä ekotehokkuusparannuksessa takaisinmaksu on nopein?

Elintarvikkeiden toimitusketjut tulevat kehittymään tulevaisuudessa ympäristötehokkuusnäkökulman ohjaamina. Käytännössä tämä tarkoittaa tarpeita uudentyypisille ratkaisuille rakennetussa infrastruktuurissa. Toimitusketjun analyysin on katettava elintarviketuotteen vaiheet teollisuudesta erilaisten kuljetusmuotojen ja terminaalien kautta kauppaan ja loppukuluttajille. Alalla toimivat yritykset joutuvat investoimaan muutosten takia ympäristötehokkaampiin elintarviketerminaaleihin, reaaliaikaisiin kuljetusohjausjärjestelmiin, liikenteen telemetriisiin ratkaisuihin ja tiedonkeruulaitteisiin.

Tutkimuslähtökohdista vihreän logistiikan kehittämisaspektit voidaan jakaa neljään alakategoriaan (Fraunhofer Institut / IML), joista tässä tutkimuksessa keskityttiin erityisesti kohtiin 2-4:

- (1) Kuljetusten kehittäminen: polttoaineenkulutus, ajotapa, reittioptimointi
- (2) Logistiikka rakentamisessa – energiatehokkaat valaistusjärjestelmät, jäähditys ja lämmitysteknologiat, uusiutuvan energian käyttö
- (3) Intralogistiikassa energiatehokkaat järjestelmät ohjauksessa ja toiminnoissa
- (4) Kuljetuskaluston hallinta (fleet management) – verkoston suunnittelu ja hyödyntäminen erilaisilla varastoinnin ja kuljetuksen muodoilla.

Hankkeen tutkimusongelmana oli siis ratkaisumallien löytäminen siihen, miten ympäristötehokas logistiikkajärjestelmä voidaan rakentaa elintarvikkeiden toimitusketjuihin. Tutkimusongelma operationalisoitiin useampiin tutkimuskysymyksiin ja hanke toteutettiin neljänä työpaketina (taulukko 2):

Taulukko 2. Tutkimuskysymykset työpaketeittain

Operationalisoidut tutkimusongelmat	Työpaketit
<i>Kuinka suuri potentiaali viileäkuljetettavien elintarvikkeiden jakelun alueellisessa yhdistämisessä olisi tonnakilometrien suhteen?</i>	1) Toimitusketjun ekotehokkuuden analysointi
<i>Miten voidaan toteuttaa energiansäästö ja energianhallinta monilämpötilaterminaalissa?</i>	2) Logistiikkakeskuksen energiavirrat
<i>Miten ympäristötehokkuutta voidaan parantaa langattomien mittausten käyttämisessä olosuhdeseurannassa?</i>	3) Ohjaus- ja telemetriikkainfrastruktura
<i>Missä ekotehokkuusparannuksessa takaisinmaksu on nopein?</i>	4) Liiketaloudellinen analyysi Laskentatyökalu ekotehokkuuden parantamisen vaikutuksista ja kustannuksista

Vaiheittaisessa tarkastelussa energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksista analysoitiin eri vaiheissa (taulukko 3).

Raaka-ainehankinnan osalta tarkasteltiin keskittämistä yhteen satamaan ja sieltä tuonti tehtaalte maatiekuljetuksen sijaan rautateitse. Valmistusvaiheessa tarkasteltiin lähettämön ja valmistuksen lauhdelämmön talteenottomahdollisuuksia. Siirtokuljetuksen osalta tarkastelussa oli kuorma-autoliikenteen siirtäminen osittain tai kokonaan rautateille ja dieselin korvaaminen kaasukäyttöisillä ajoneuvoilla. Terminaalien osalta tarkasteltiin lämpökaivo- ja lämmönvaihdiratkaisuja, aurinkopaneelien ja asfalttienergian talteenottoa ja kaukolämpöverkon hyödyntämistä. Keräilyn osalta tarkasteltiin keskitetyn keräilymallin muuttamista hajautetuksi malliksi.

Taulukko 3. Tutkimusongelmat vaiheittain

Vaihe	tarkasteltava skenaario	luku
Raaka- ainehankinta	Raaka-ainetuonnin keskittäminen yhteen satamaan. Maantieliikenteen korvaaminen rautatieliikenteellä	6
Valmistus ja lähettäjä	Ylijäämälämmön talteenotto ja uudelleenohjaus mm. lämmön talteenotto jätevedestä ja savukaasuista	3
Siirtokuljetus	Siirtokuljetus maantiekuljetuksen sijaan rautateitse. Dieselkäyttöisen ajoneuvon korvaaminen biodiesel tai metaanikäyttöisellä ajoneuvolla	4, 5 ja 9
Toimitusketjun rakenne	Keskustermiinalimallin korvaaminen hajautetulla jake- luterminaalimallilla	7
Terminaalit	Terminaalissa muodostuvan ylijäämälämmön talteenot- to, varastointi ja uudelleenohjaus sekä sähkön tuotan- to. Tarkastelussa mm. asfalttienergia, kaukolämmön tuotanto, aurinkosähkö ja kallioakku	10
Jakelu	Jakeluauton energiankulutus	8

Vaihtoehtoja on tarkasteltu kunkin luvun kohdalla erikseen. Yhteenvedot skenaarioista ja niiden vaikutuksista on esitetty luvussa 11.

1.3 Määritelmiä

Kontti on kuljetussäiliö, jota voidaan siirtää kuljetusvälineestä toiseen ilman sisäl-
lön uudelleenlastausta. Se on myös rahtitavaraliikenteen mittayksikkö, joka vastaa
kahdenkymmenen jalan pituista konttia. Kontteja käytetään maantie-, rautatie-,
lento- ja merikuljetuksissa. Ne on suunniteltu pinottaviksi, helposti siirrettäviksi
ja helposti kuljetusvälineeseen kiinnitettäväksi. Yleisin konttityyppi on kansainvä-
lisen standardisointijärjestön (ISO) määrittelemä ja luokittelema ISO-kontti. Se

on maailmanlaajuisesti käytetyin ja joukkotuotannosta johtuen halpa kuljetusyksikkö. Lentorahdin kuljettamiseen on omat konttityypinsä. 40 jalan kontin nimellispituus on 12 metriä. Konttien leveys on useimmiten 8 jalkaa (2,4 metriä) ja yleisin korkeus 8,5 jalkaa (2,6 metriä). Isokonttiin mahtuu 25 eurolavaa. Sisätilavuus on 64 m³.

Konteissa on oma kirjaimista ja numeroista muodostuva kansainvälinen rekisteri-numerojärjestelmä, jonka neljä ensimmäistä numeroa ilmaisevat omistajan. Suurin osa omistajista on varustamoja ja kontinvuokrausyrityksiä. Satamaan tuleva kontti säilytetään tyhjennyksen jälkeen depot-yksikössä, jossa se myös tarkastetaan. Konttien liikkeet pysyvät omistajien tiedossa rahtikirjojen avulla (Wikipedia)

Pienempien satamien konttiliikenne hoituu nk. feeder-liikenteellä. Feeder-aluksiin mahtuu 200-1000 TEU:ta. Satamassa kontit purkaa ja lastaa konttinosturi, joka liikkuu kiskoilla. Nosturi nostaa kontit alas, josta ne kuljetetaan suoraan toiseen kulkuneuvoon tai säilytettäväksi konttikentälle. Satamissa toimii lukkeja ja kurottajia. Ne ovat erikoistuneet konttien kuljettamiseen ja pinoamiseen. (Wikipedia)

Rekasta puhuttaessa voidaan tarkoittaa esimerkiksi yhdistelmäajoneuvoja tai puoliperävaunuja. Puoliperävaunu on perävaunu, joka on tarkoitettu kytkettäväksi puoliperävaunun vetoautoon tai apuvaunuun. Puoliperävaunu aiheuttaa olennaisen kohtisuoran kuormituksen vetoautoon tai apuvaunuun. (Tilastokeskus, 2014)

Pakettiauto (N1) on Trafín (2014) mukaan tavarankuljetukseen valmistettu ajoneuvo, jonka kokonaismassa on enintään 3,5 tonnia. Tavarankantavuuden tulee olla suurempi kuin henkilökantavuuden (henkilö 68 kg).

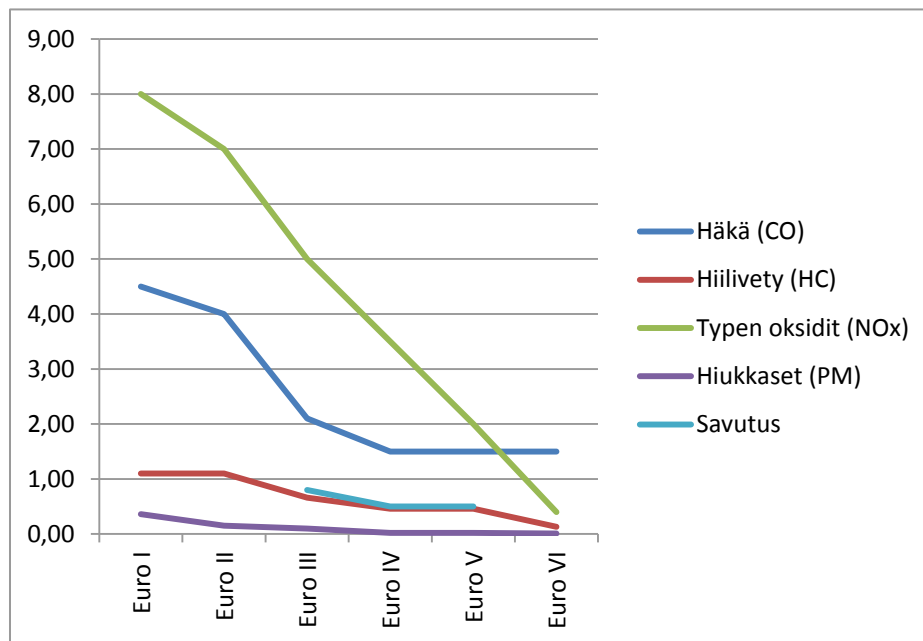
Kuorma-auto (N2 ja N3) on Trafín (2014) mukaan tavarankuljetukseen valmistettu ajoneuvo, jonka kokonaismassa on suurempi kuin 3,5 tonnia. N2-luokan ajoneuvon kokonaismassa on enintään 12 tonnia ja N3-luokan ajoneuvon yli 12 tonnia. Kuorma-autossa tulee olla kuormakoripäätöksen mukainen kuormakori. Kuorma-autossa on tilaa kuljettajan lisäksi enintään 8 matkustajalle.

Valtioneuvoston asetuksen 407/2013, 24 §:n mukaisesti auton, perävaunun ja niiden yhdistelmän pituuksille ja massoille on annettu rajoitteita esim. puoliperävaunu ja yli 22,00 metrin pituisessa ajoneuvoyhdistelmässä käytetty varsinainen perävaunu: vetotapin pysty akselista tai etuakseliston kääntöpisteestä perävaunun perään 12,00 m. Ajoneuvoyhdistelmän pituus ei saa ylittää seuraavia arvoja henkilö- tai linja-auton (M-luokka) ja muun kuin puoliperävaunun yhdistelmä sekä pakettiauton (N1-luokka) ja muun kuin puoliperävaunun yhdistelmä 18,75 m,

henkilöauton (M1-luokka) taikka paketti- tai kuorma-auton (N1-, N2- tai N3-luokka) ja puoliperävaunun yhdistelmä 16,50 m.

Kuivasatamalla tarkoitetaan intermodaalista kuljetusjärjestelmää., jossa sisämaan kuljetukset sataman sekä kuivasataman välillä hoidetaan rautateitse perinteisen kumipyöräkuljetuksen sijaan. Kuivasatamat voivat tarjota sataman kaltaisia palveluita esim. rahdin yhdistämistä, varastointia, varikkoa, konttien huoltoa sekä tullausta. Esimerkiksi kustannustehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä voidaan lisätä tällä tavalla. (Lättilä, Henttu ja Hilmola 2013)

EURO-luokat (kuva 6.) kertovat enimmäispäästöt ajoneuvoittain. Päästövaatimukset ovat kiristyneet ja esimerkiksi syyskuussa käyttöön otetun EURO VI:n mukaisesti esimerkiksi häkää saa olla 1,5 g/kWh.



Kuva 6. EURO-päästöluokitukset kuorma-autoille (diesel), g/kWh (savutus: m-1)

2 ELINTARVIKELOGISTIikka

Hanne Ala-Harja

2.1 Tavaralogistiikan määrät ja päästöt

Maantielogistiikan kuljetusmäärät olivat 8,5 miljoonaa tonnia vuonna 2010. Rautatielogistiikan vuoden 2010 markkinaosuus oli Tilastokeskuksen mukaan 24,1 % (24,8 % vuonna 2009) kotimaisesta tavaraliikenteestä. Rautatielogistiikan kuljetuksista kolmannes tulee Venäjältä ja IVY-maista. Rautatielogistiikan kuljetusmäärä oli 34,8 miljoonaa tonnia. Tästä kotimaan liikenteen osuus oli 23,5 miljoonaa tonnia ja kansainvälisen liikenteen osuus 11,3 miljoonaa tonnia.

VR Transpoint aloitti 2011 trailereiden kuljettamisen junalla Suomesta Moskovaan. Tavoitteena oli säännöllisen trailerijunaliikenteen aloittaminen vuoden 2013 aikana. (VR, 2014).

Eri kuljetusmuodoilla on merkittävästi erilaiset päästöt sekä ajoneuvo- ja tonniki-lometriperusteisesti arvioituna. Lentoliikenteen tonniki-lometrikohtaiset päästöt ovat suurimmat ja maantieliikenteen toiseksi suurimmat. Rautatie- ja meriliikenteen päästöt ovat vähäisimmät.

2.2 Vihreä logistiikka ja toimitusketjujen johtaminen

Vihreän logistiikan hyödyistä ollaan yksimielisiä (Meixell & Gargeya, 2005). Niitä ovat mm. yritysten energiankäytön väheneminen ja kustannussäästöt polttoaine- ja resurssien säästymisen kautta. Empiirisiä tutkimuksia ympäristösuorituskyvyn ja toimitusketjun suorituskyvyn välillä on vähän. Azevedo, Carvalho ja Machado (2011) tutkivat vihreän johtamisen vaikutuksia toimitusketjun suorituskykyyn casetutkimuksen keinoin. Yang jne. (2013) tutkivat taiwanilaisten konttialusten strategioita. Voiton tekeminen vaatii toimitusketjujen johtamista, jonka oleellinen osa on mittaaminen. Srivastava (2007) väittää että ympäristöasiat huomioivassa toimitusketjujen johtamisen tutkimuksessa ja käytännöissä on kasvava tarve. Myös McIntyren jne. (1998) ja Saadanyn jne. (2011) mukaan ympäristöasioita on käsitelty erillisenä toimitusketjun toiminnoista.

Rodrigue, Slack ja Claude (2001) määrittelevät vihreän logistiikan “toimitusketjujen johtamisen käytänteinä ja strategioina joiden tavoitteena on vähentää rahdin käsittelyn, jätteen käsittelyn, pakkaamisen ja kuljettamisen ympäristöjalanjälkeä

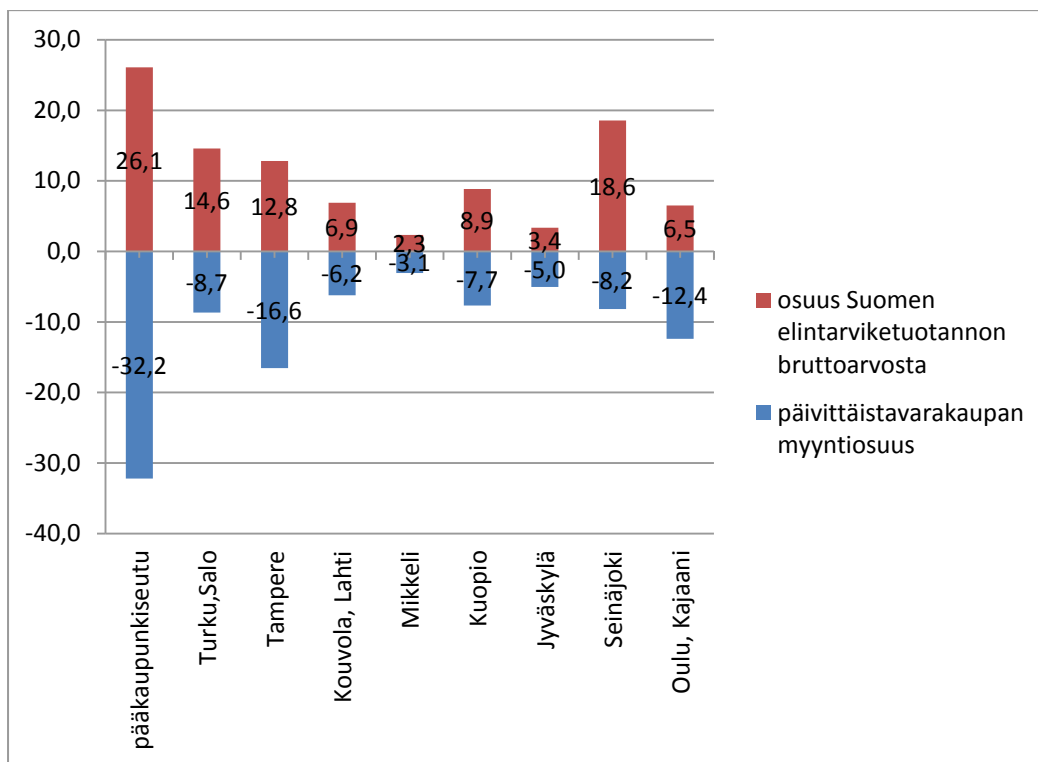
ja energiankulutusta”. Byrnen ja Deebin (1993) mukaan tavallisen ja vihreän logistiikan ero on siinä että vihreässä logistiikassa kiinnitetään huomioita ketjun kuljetusten järjestämisen, varastoinnin, pakkaamisen ja varastonhallinnan lisäksi kierrätykseen ja paluulogistiikkaan. Srivastavan (2007) mukaan vihreässä toimitusketjujen johtamisessa on huomioitu luonnonvarojen ja toimitusketjujen johtamisen väliset vaikutukset ja vuorovaikutussuhteet. Van Hoekin (1999) mukaan, vihreä logistiikka ei ole riittävä lähestymistapa, koska logistiikan johtamiseen tarvitaan myös toimitusketjunäkökulma.

2.3 Elintarvikelogistiikka ja -toimitusketjut

Elintarvikeketjut ovat keskeisessä roolissa globaalissa taloudessa (Baldwin 2012; Ghosh 2010). Elintarvikkeita tuotetaan ja kulutetaan kaikissa maailman osissa ja samalla käytetään työvoimaa ja resursseja ja aiheutetaan päästöjä. Elintarvikeketjun tuotteet edustavat ison volyymin nopeasti liikkuvia kuluttajatuotteita. Toimitusketjun johtamisen kannalta niillä on erityispiirteitä (Bourlakis & Weightman 2004) kuten lyhyt säilyvyysaika ja jälitettävyyysvaatimus ja alhaisen hinnan odotukset (Opara 2003). Cohenin ja Garretin (2010) mukaan elintarvikeketjujen haavoittuvaisuus ja ruokaturvallisuus ovat globaaleita ilmiöitä. Näistä syistä johtuen elintarvikkeiden toimitusketjut ovat kiinnostavia vihreä logistiikan tutkimuksessa.

Kuluttajat haluavat tietoa elintarvikkeiden ympäristövaikutuksista ja myös siitä syystä toimitusketjujen kestävänsuorituskyvyn arviointia tarvitaan. (Adams & Larrinaga-Gonzales 2007; Nissinen ym. 2007).

Suomessa elintarviketuotanto ja päivittäistavaroiden kulutus ovat jakautuneet epätasaisesti. Seinäjoen seudun osuus bruttoelintarviketuotannosta Suomessa on 18,6 %. Tuotantoa on eniten pääkaupunkiseudulla 26,1 %. Vastaavasti päivittäistavarakaupan myyntiluvut ovat 8,2 % ja 32,2 % (kuva 7). Elintarvikelogistiikan merkitystä Suomessa korostaa se seikka, että valtaosa eri puolilla Suomea valmistettavista elintarvikkeista kuljetetaan siirtokuljetuksina keräiltäväksi keskusliikkeiden keräilyterminaaleihin, jotka sijaitsevat pääkaupunkiseudulla. Keräilyn jälkeen tuotteet siirretään runkokuljetuksina alueterminaaleihin myymälöihin jakelua varten.



Kuva 7. Suomen elintarviketuotanto- ja myynti alueittain

Elintarvikeketjun ympäristövaikutuksista suuri osa muodostuu tuotantovaiheessa. Eri tuoteryhmien välillä päästöt vaihtelevat merkittävästi (Katajajuuri 2007). Esimerkiksi Wanhalinnan (2010) tutkimuksessa leivän CO₂ päästöt jakaantuivat maataloustuotantoon (45 %), leivontaan (40 %) ja kuluttajalle (13 %) ollen yhteensä 1,4 – 1,7 CO₂ ekvivalenttiyksikköä leipäkiloa kohti. Yhdysvalloissa ruoka on keskimäärin kulkenut 2100 km lautaselle päästyään (Miller, 2001, James ja Jamesissa, 2010). Carbon Disclosure Projectin (2006) mukaan (James ja Jamesissa, 2010) Nestlen tuotetonnin kuljettaminen on aiheuttanut 15 kilon CO₂ päästöt.

Globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä noin 13.5% on kuljetusten aiheuttamaa (World Resource Institute, 2011). Ajoneuvon tyyppi, täyttöaste, kapasiteetti, paalumatka ja kuljetusetäisyys vaikuttavat ympäristön suorituskykyyn. Käsite ruokamaili (Food Mile) (Pretty 2005) kuvaa ruoan toimitusketjun osien yhteenlasketua matkaa. Tavallisesti ruokamailit korreloivat ympäristövaikutusten kanssa. Ruokalogistiikan rakenteet ovat yhä integroituneempia (Gimenez 2006). Jakelu-keskus –runkolinjatyyppiset jakeluverkostot ovat ruokaketjuissa tavallisia.

Logistiikkakustannusten osuus ruokatuotteen myyntihinnasta on 10-15%, joten se on kiinnostava puheenaihe valmistajien, tukkuliikkeiden ja jälleenmyyjien keskuudessa. Ruokatoimitusketjujen kehittäminen kestävämmiksi on yrityksiä kiinnostava aihe (Hamprecht et al. 2005).

Päivittäistavarakaupan kasvihuonekaasupäästöt olivat Suomessa kokonaisuudessaan vuonna 2003 noin 1,2 miljoonaa CO₂ ekv. tonnia, josta 40 % eli 472 000 tonnia aiheutui terminaaleissa sekä myymälöissä käytetyn sähkön ja lämmön tuotannosta. Kuljetusten kasvihuonekaasupäästöjen osuus oli tuolloin 27 % eli 329 000 tonnia (Päivittäistavarayhdistys ry, 2004).

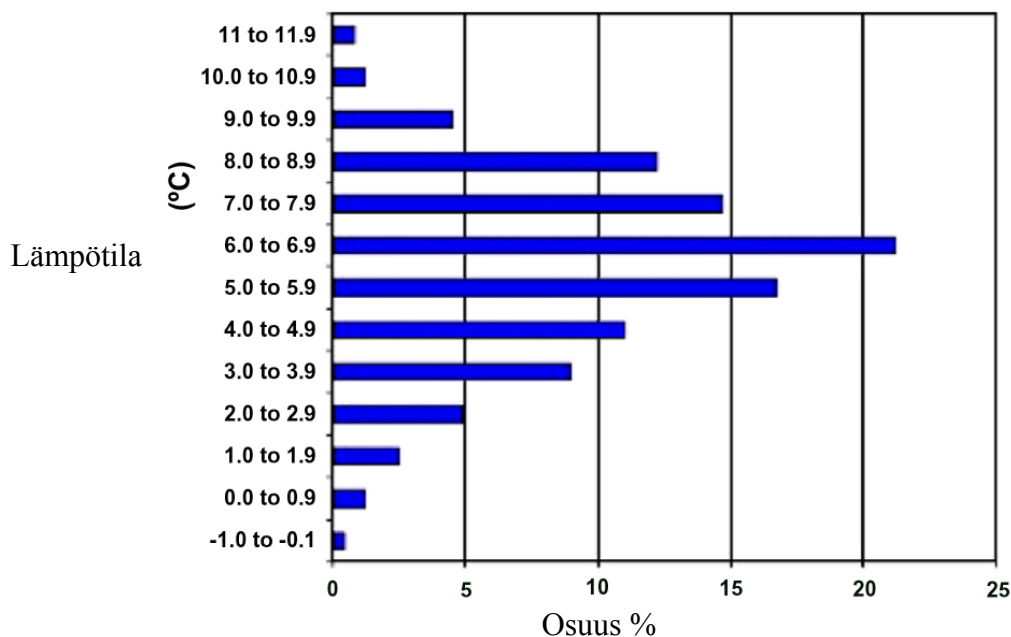
Viiden kilon ruokamäärä vaatii saman polttoainemäärän jos se kulkee 1 km henkilöauto, 43 km ilmassa, 740 km rekalla, 2400 km junalla ja 3800 km laivalla. (Brodt, Chernoh, & Feenstra, 2007 James ja Jamesissa, 2010). Samoin vaikka vain 1,5 % hedelmistä ja vihanneksista kuljetetaan lentorahtina, niin se aiheuttaa 40 % hedelmien ja vihannesten CO₂-päästöistä. (James ja James, 2010)

2.4 Kylmäketju elintarvikelogistiikassa

Kylmäketju on oleellinen osa elintarvikelogistiikkaa, sillä merkittävä osa elintarvikkeista vaatii lämpötilasäätelyä. Jamesin ja Jamesin (2010) esittämän arvion mukaan kylmäketju aiheuttaa 1 %:n maailman CO₂-päästöistä. Ilmastonlämpenemisen seurauksena myös kylmäketjuja pitää tehostaa, jolloin myös CO₂-vaikutus kasvaa. Peräti 11 % elintarvikelogistiikan CO₂-päästöistä on seurausta alle 1% ruoan kulutuksesta Iso-Britanniassa. (Heapin, 2006) arvion mukaan maailmassa on 1300 lämpösäädeltä rahtialusta, 80000 junavaunua ja 650000 lämpösäädeltä konttia ja 1,2 miljoonaa lämpösäädeltä kuorma-autoa. (James ja James, 2010).

Lämpösäätely kuluttaa Mc Kinnonin ja Campbellin, 1998 (Jamesin ja Jamesissa, 201) mukaan 40 % jakelun energiankulutuksesta ja pakasteruoan jakelu on 1,7 kertaa kuluttavampaa kuin kuivaelintarvikkeen. Samoin heidän tutkimuksestaan kävi ilmi että pakastekuljetukset ovat varastotilana viidesosan ajastaan. Evansin jne 2007 tutkimuksessa (James ja Jamesissa, 2010) ruokakaupoissa 68 % sähköstä meni jäähdytykseen (2100 MWh/vuosi/keskikokoinen myymälä) ja 23 % valaistukseen.

Ruokien optimaalinen säilytyslämpötila ei ole yksiselitteinen asia (James ja James, 2010). Toisaalta puutteelliset (kuljetus)lämpötilat ovat yleisiä kaikkialla maailmassa (James, S. J., Evans, J., & James, C., 2008) (Kuva 8).



Kuva 8. Lämpötilat kuljetusten aikana (lähde: Evans jne 1991 James, S. J., Evans, J., & James, C., 2008:ssa)

Konttien kunto ja eristykset ovat vaihtelevia, eivätkä suinkaan aina ole optimaalisia. Paksummat eristeet lämpösäädelyissä tavaratiloissa pienentävät kuljetustilaa mutta pienentäisivät energiankulutusta. Varsinkin kun kylmäkontteja käytetään myös varastotilana. Perinteisen dieselmoottorikäyttöinen höyrykompressorikäyttöinen jäähdytysjärjestelmä kuluttaa jopa 40 % ajoneuvon moottoriin verrattuna. Britanniassa kuljetetaan yli 80 % yli 33 tonnin rekoilla. Näistä moottoreista vapautuvalla lämmöllä voitaisiin tuottaa kylmää absorptiojäähdyttimellä ja ylläpitää pääosin jäähdytystä. Muita teknologioita CO₂ päästöjen vähentämiseksi ovat ilmallalla jäähdyttäminen ja hybridiratkaisut, joissa perinteistä kylmäteknikkaa on integroitu kylmävarastoon. Toisaalta nämä teknologiat vaativat vielä kehittämistä (James S.J., James C. ja J.A. Evans, 2006). Lisäksi Tassou ja Ge (2009) ovat arvioineet adsorptio-, ejektor-, ilmajäähdytys sekä kolmituotannon, Stirlingprosessiin perustuvan jäähdytyksen, kuten myös termoelementti-, termoakustista- ja magneettijäähdytyksen teknologioita.

Myös aurinkopaneeleja on käytetty kuorman viilennykseen ensimmäisen kerran Sainsburyn kuorma-autossa vuonna 1997 (Bahaj & James, 2002; Tubb, 2001 James ja Jamesissa 2010). Kuva autosta löytyy internetistä sivulta <http://www.energy.soton.ac.uk/keeping-food-chilled-by-solar-power/>. Mitsubishi ja Nippon Fruehauf ilmoittavat kehittämiensä kuorma-auton viilennysjärjestelmän energiansäästöksi 1 % polttoainekuluissa (Calfinder, 2014).

2.4. Varastojen energiankulutus

Varaston energiankulutus muodostuu suurelta osin viilennyksestä, asfalttipihojen sulana pitämisestä, ilmastoinnin sulatuksesta, materiaalinkäsittelyn aiheuttamasta energian kulutuksesta, toimistotilojen energiankulutuksesta ja valaistuksesta. Lämpösäädellyn varaston energiankulutus riippuu (Duiven & Binardin 2002 mukaan James ja Jamesissa, 2001) esimerkiksi rakennustekniikasta, lämpötiloista, tilan koosta, varaston kiertonopeudesta, saapuvan tuotteen lämpötilasta ja ulkopuolisista ympäristötekijöistä.

Energiankulutus varastoissa määritellään kilowattitunteina vuodessa varastokuutiota kohden (SEC). Varaston koon kasvaminen vähentää energiankulutusta seuraavan kaavan mukaisesti (Singh, 2008):

$$SEC = 38,978 * (35,13 * x)^{0,2275} / 35,13 \text{ jossa}$$

x= varaston tilavuus kuutiometreinä (m³)(alkuperäisessä tilavuus on kuutiojalkoina) ja energiankulutus (eli SEC) kWh/vuosi/m³.

Kalifornian elintarvikeketjujen varastoja koskevassa tutkimuksessa (Singh) selvisi, että 22 - 74 % yrityksestä käytti energiankulutuksen pienentämiseksi seuraavia tekniikoita.

- Parannettu eristys, Upgraded insulation (UI)
- Kylmäpinnoite, Cool roofs (CR)
- Energiatehokas valaistus, Efficient lighting technology (ELT)
- Tehokkaat höyrylauhduttimet, Aggressive Evaporative condenser (AEC)
- Luonnonkiertoinen öljylauhdutin, Thermo siphon oil cooling (TSC)
- Tietokoneohjattu säätö, Computer control(CC)
- Kompressoriohjattu taajuusmuunnin käyttö, Compressor variable frequency drive (Comp VFD)
- Lauhdutinohjattu taajuusmuunnin käyttö, Condenser variable frequency drive (Cond VFD)
- Höyrystinohjattu taajuusmuunninkäyttö, Evaporator variable frequency drive (Evap VFD)
- Muutuvapainekompressori, Floating head pressure (FHP)
- Anturiohjatut ovet, Sensor controlled doors (SCD)

Teknologioista yleisimmin käytetyt olivat tietokoneohjattu säätö, energiatehokas valaistus, parannettu eristys, tehokkaat höyrylauhduttimet, lauhdutinohjattu taa-juusmuuntimen käyttö.

Sayigh (2008) esittelee energiatehokkaita rakennuksia. Yhtenä esimerkkinä on konferenssikeskus Szenteredressä Unkarissa. Rakennuksessa on 140 aurinkopaneelia (PV) valjastaen 19 % teholla aurinkoenergian sähköksi. Kesäkuukausina teho on 29 kW. Toisena esimerkkinä on Deiran Freight Gate- varasto. Siellä on käytössä osittain energiansäästölamput ja osittain aurinkoenergialla toimiva valaistus. Sayinghin kirjan esittelemissä esimerkeissä on käytetty energiankulutuksen vähentämiseksi mm. verhoja, viileäkattoja ja hämäräkytkimiä.

Singhin (2008) raportin mukaan kylmävarastojen energiankulutus oli Yhdysvalloissa 1,6 kWh/ft³ (56,2 kWh/m³) ja keskihinta energialla 5,5 c/Kwh, eli pelkästään Kalifornian kylmävarastojen energiankulutus oli 39,5 miljoonaa dollaria.

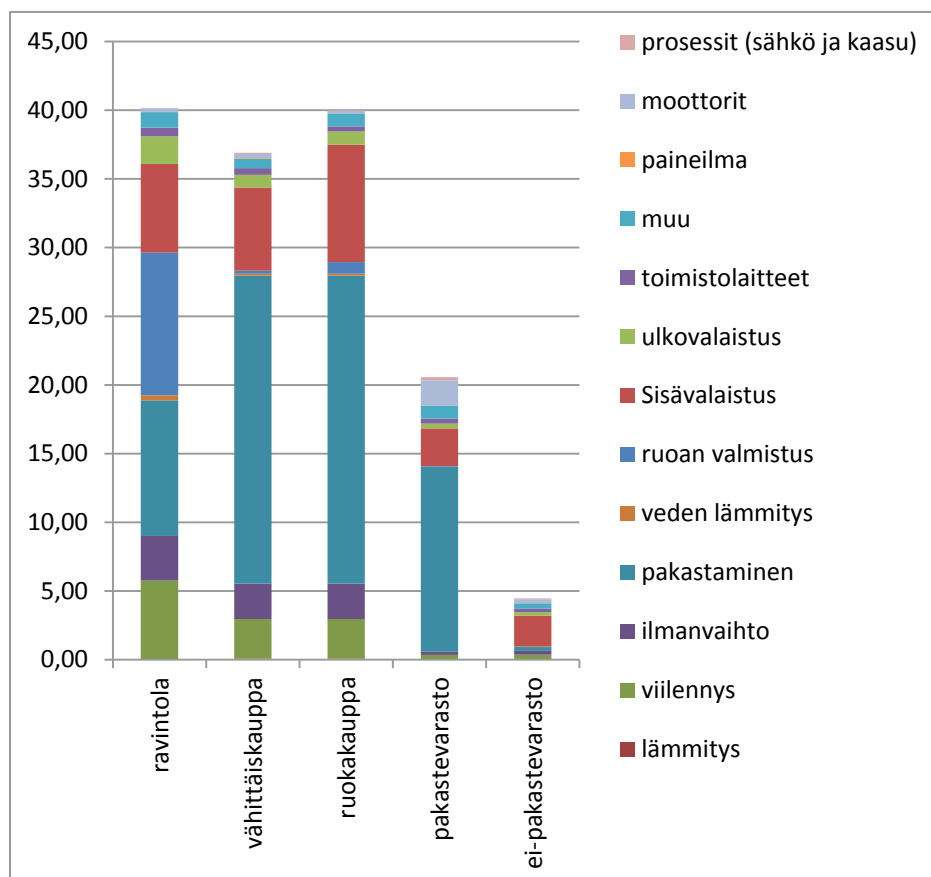
Itron (2006) on selvittänyt rakennusten energiankulutusta Yhdysvalloissa. Ravintoloiden ja ruokakauppojen energiankulutus pinta-alayksikköä (tutkimuksessa neliöjalka) kohden oli noin kaksinkertainen viileävarastoon nähden. Lämpimän varaston energiankulutus oli noin neljäsosan viileävarastosta. (Taulukko 4)

Taulukko 4. Energiankulutus erityyppisissä rakennuksissa

	lattiapinta- ala (ft ²)	vuosittainen energiaintensiteetti			kokonaiskäyttö	
		sähkö (kWh/ft ²)	Maa- kaasu (therms/ ft ²)	maa- kaasu (kBtu/ft ²)	sähkö (GWh)	maa- kaasu (Mtherms)
Ravintola	148,892	40,20	2,10	209,98	5986	312,60
Vähittäiskauppa	702,053	14,06	0,05	4,62	9871	32,50
Ruokakauppa	144,209	40,99	0,28	27,60	5911	39,80
Pakastevarasto	95,54	20,02	0,06	5,60	1913	5,30
kuivavarasto	554,166	4,45	0,03	3,07	2467	17,00

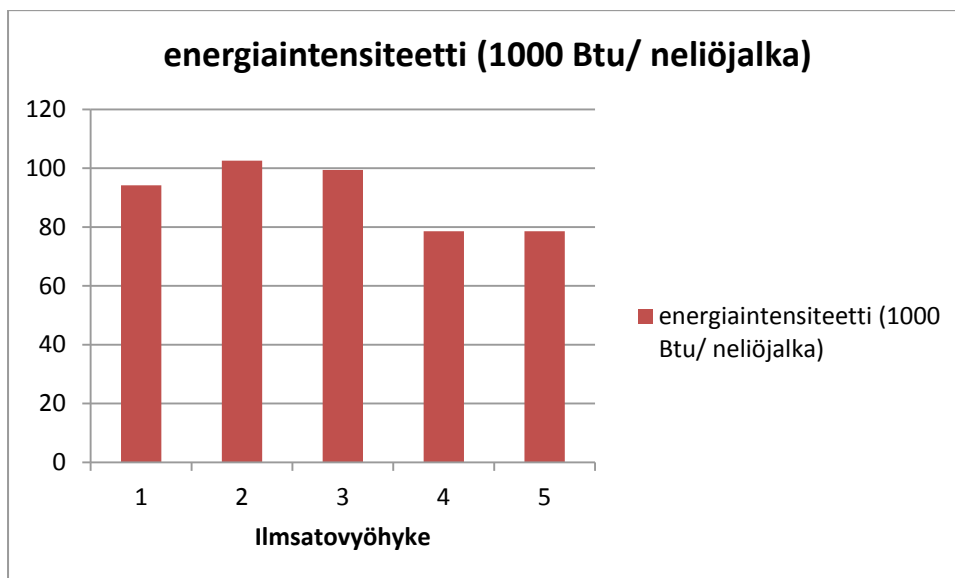
Sähköenergiasta valaistukseen kului 28,7 %, viilentämiseen 14,9 %, pakastukseen 13,4 %, ilmanvaihtoon 11,9, toimistolaitteisiin 7,1 % ja ulkovalaistukseen 5,8 %. Maakaasusta lämmitykseen kului 36,4 % , veden lämmitykseen 31,8 % ja ruoanvalmistukseen 22,6 %. (Itron, 2006)

Sähköintensiiteitään (kWh/ft²/vuosi) ruokakauppojen ja ravintoloiden sähkönkulutus pinta-alaa kohden oli suurin (n. 40 kWh/vuosi/ft²), eli noin kaksinkertainen viileävarastoon nähden. (kuva 9)



Kuva 9. Sähkönkulutus eri rakennuksissa (Itron, 2008)

EIA:n vuoden 2003 tilastojen mukaan energiaintensiiteetti muuttuu ilmasto-
vyöhykkeen mukaisesti (kuva 10).



Kuva 10. Ilmastovyöhykkeen vaikutus energiantensiteettiin

Chicagoon on rakennettu Epsteinin suunnittelema 91,300 neliöjalan (8217 m²) toimisto- ja jakelukeskus. Keskukseen energiansäästö on -67 % verrattuna tavanomaisiin ratkaisuihin. Siitä 7,600 neliöjalkaa (684 m²) on 0° -asteista, 24,700 neliöjalkaa (2223 m²) viileätilaa ja 39,000 neliöjalkaa (3510 m²) kuivavarastoa. Epsteinin mukaan rakennus on yksi kestävimmin toteutetuista teollisuusrakennuksista ja ensimmäinen LEED-NC Platinum Refrigerated- jakelukeskus (LEED-NC-platinum- sertifioidulla rakennuksella on vähintään 80 pistettä 110:stä). Rakennuksessa on myös 238 jalkaa (71,5 m) korkea tuuliturbiini ja useita muita ympäristöä, vesi- ja aurinkoa hyödyntäviä ratkaisuja. Tuuliturbiini tuottaa 750 kW teholla 25 % rakennuksessa käytetystä energiasta (880 000 kWh/vuosi). Rakennuksessa on viherkatto noin puolella alalla keräämässä vettä ja antamassa vihreää ilmettä. 159:llä PV paneelilla (5500 kWh/vuosi) lämmitetään vesi ja tarjotaan lataus työntekijöiden autoihin. Varastolla käytetään biodiesel-trukkeja. Valaistuksessa käytetään liiketunnistimia ja led-valoja. (Epstein, 2014)

James jne (2009) mukaan suurimmat potentiaalit elintarvikeketjujen energiansäästöissä ovat myymälöiden kalusteet, ammattikeittiöiden kylmäkoneet ja kuljetukset. Kylmälaitteita huoltamalla, ovien tiivisteitä korjaamalla, varmistamalla ovien sulkeutuminen, puhdistamalla lauhduttimet, korjaamalla henkilöliikenneovia, optimoimalla huurteenpoistoa, asentamalla tietynlaisia lämmönvaihtimia ja tekemällä muita pieniä korjauksia voidaan energiankulutusta alentaa merkittävästi.

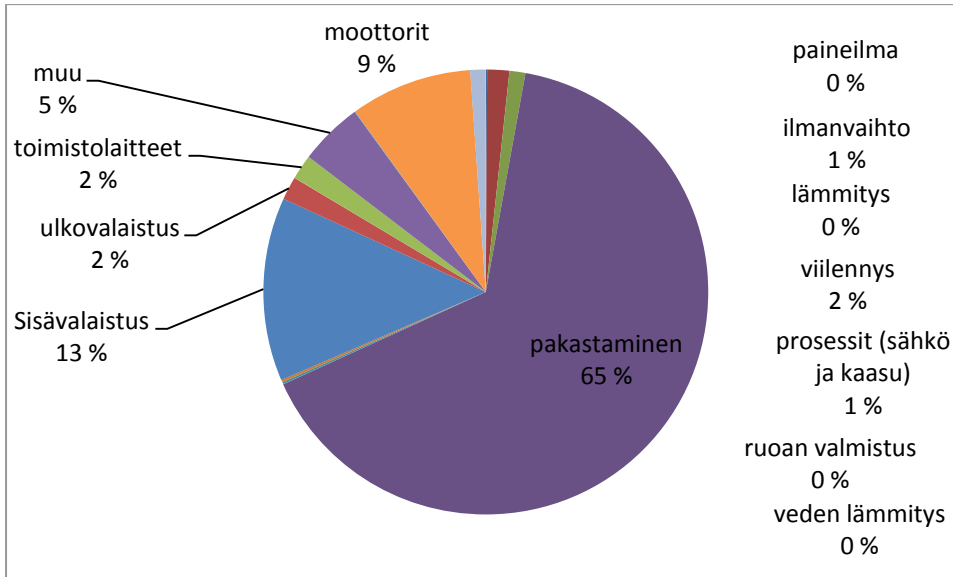
On raportoitu, että 10 vuotta vanha kylmäkone kuluttaa 2,7-kertaisesti energiaa uuteen verrattuna (Carlsson-Kanyama & Faist, 2000; James & James 2010). Lisäksi on esitetty rakennusteknisiä energiatehokkuuden parantamiskeinoja joita ovat mm. paksummat seinät ja eristeet seinissä ja katossa sekä syöttökuljettimien käyttäminen ovien sijasta, oikeanlaiset kompressorit ja jäähdytyslaitteet, niiden oikeanlainen säätö ja toiminnan valvominen ja seuranta tietotekniikan avulla. Säästöt olivat casetutkimuksissa 5-35 %:n luokkaa ja jopa yli 20 %:n säästöihin voitiin päästä ilman investointeja (Duiven & Binard, 2002; James & James, 2010).

Tassou, Lewis, Ge, Hadawey, and Chae (2009) James ja Jamesissa (2010) arvioivat seitsemän uutta tai vaihtoehtoista jäähdytysteknologiaa, joita ovat Trigeration, Air Cycle, Sorption– Adsorption Systems, Thermoelectric, Stirling Cycle, Thermoacoustic and Magnetic refrigeration. Ground heat exchangers for heating and cooling and ejector refrigeration. Näistä teollisuuskäyttöön potentiaalisimmat vaihtoehdot ovat Trigeration, Air Cycle, Sorption– Adsorption Systems ja ejector refrigeration. Magneettiviilennyksestä esimerkkinä mainittakoon Cooltech-yritys, joka on tuonut markkinoille kylmäteholtaan 700 ja 400 W:n koneet, joilla päästään +2 - -18 C:n lämpötiloihin.

EnergyStar tarjoaa referenssimallin varastojen energiankulutuksen arviointiin ja se on saatavilla osoitteesta energystar.gov. Malli perustuu vuonna 2003 tehtyyn kyselyyn rakennusten energiankulutuksesta.

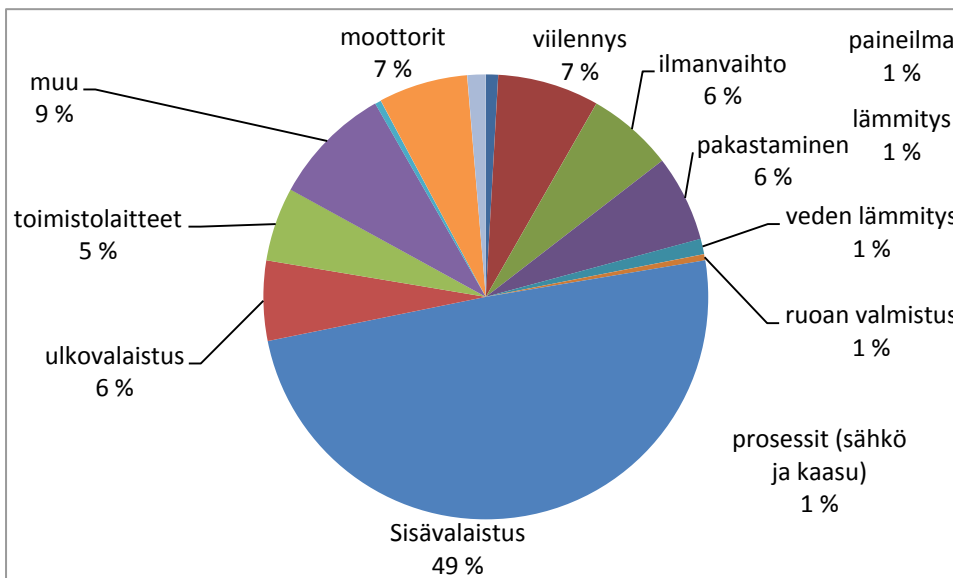
2.5 Valaistus

Ironin (2008) selvityksessä valaistus osoittautui merkittäväksi sähkönkuluttajaksi. Pakastevarastossa (kuva 11) 65 % sähköstä kului pakastamiseen, 13 % sisävalaistukseen ja loput muihin toimintoihin.



Kuva 11. Pakastevaraston sähkönkulutuksen jakautuminen (Itron, 2008)

Kuivavarastoissa (ei-pakastevarastoissa), (kuva 12) kului sähkö lähinnä valaistukseen (54 %). (Itron, 2008)



Kuva 12. Varaston sähkönkulutuksen jakautuminen (Itron, 2008)

Energiätehokkuutta voi parantaa esimerkiksi käyttämällä tehokkaampia lamppeja, käyttämällä valaistuksen automaattiohjausta ja käyttämällä eri valaistustehoja eri alueilla joilla valaistustarve on erilainen. (Green Business Light, 2014).

Valaistus on varastosta riippuen merkittävä sähköä kuluttava kohde. LED-, induktio- ja T5 loisteputki ovat T8 loisteputkien, natriumlamppujen, monimetallilamppujen ja elohopealamppujen korvaajia.

T8-loistelampun voi korvata energiatehokkaammalla **T5-adapterilla varustetulla loistelampulla** sekä led-valoputkella ilman että valaistusvoimakkuus, värin-toisto sekä luminanssitasot kärsivät. (Mäkelä, 2010). T5 loisteputkilla on samat ominaisuudet kuin T8 ja T12 loisteputkilla, mutta niissä on elektroninen ohjaus ja toiminta-aika 12000 -18000 tuntia. (Green Business Light, 2014).

Induktiolampuissa valo tuotetaan sähkömagneettisen induktion ja kaasupurkauksen avulla. Sen induktiokela aiheuttaa suurtaajuisen energiavirran elohopeakaasuun. Lamppu näyttää hehkulampulta ja valo on samanlainen, mutta se kestää 15 kertaa pidempään kuin hehkulamppu. Eletroniikkalehden 9.5.2014 mukaan induktiolamput maksavat USA:ssa alle 10 dollaria kappale, joten lehden mukaan se säästää elinaikanaan hehkulamppuun verrattuna noin 75 dollaria.

LED-lamput ovat pitkäikäisiä (50000-80000 tuntia) ja energiatehokkaita. (Green Business Light, 2014). Nekin syttyvät välittömästi, eivätkä sisällä elohopeaa. Useimpiin valaisinten kantatyyppeihin on saatavana LED-lamppuja.

2.6 Hävikki ja pakkaukset

Kolmannes (1,3 Mrd) maailmassa ihmisravinnoksi tuotetusta ruoasta joutuu jätteeksi (Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., & Meybeck, A. 2011). Hävikkiä muodostuu kaikissa ketjun vaiheissa. Ruoan valmistuksessa on käytetty luonnonvaroja kuten maata ja vettä sekä lannoitteita. Ruoan toimitusketjussa aiheutuu mm. CO₂-päästöjä, myös hävikin osalta.

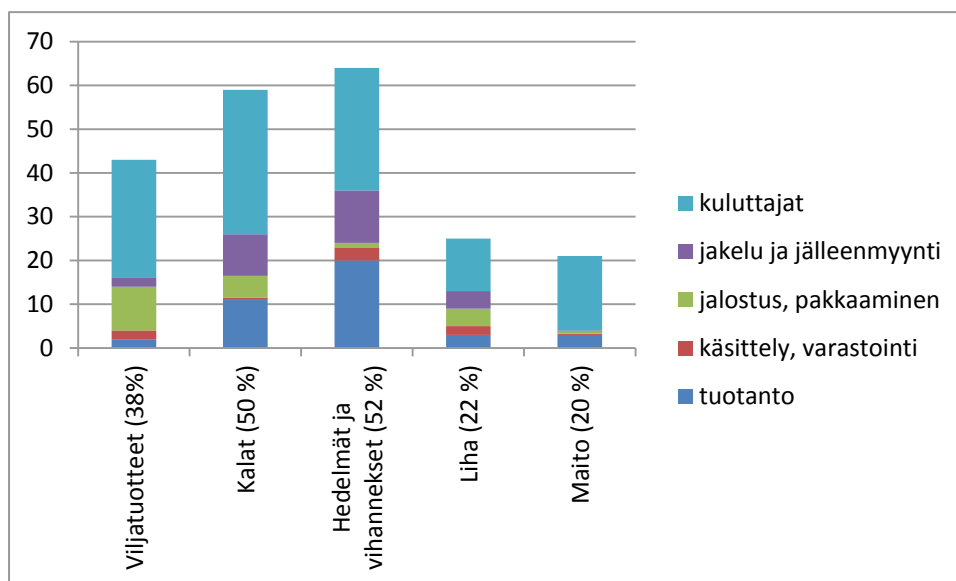
Gustavsson yms. 2011 määrittelevät ruokahävikin (food loss), (Parfittin yms. 2010) mukaisesti muodostuvaksi missä tahansa ruokaketjun osassa, kun taas ruokajäte (food waste) muodostuu jälleenmyyjien ja kuluttajien toimesta ketjun loppuvaiheessa.

Hävikki voidaan jakaa (Gustavssonin ym. 2011) mukaan kasvi- ja eläinperäiseksi, jotka edelleen kasviperäisten osalta voidaan jakaa maataloustuotannon hävikkiin (esim. mekaaninen hävikki sadonkorjuussa), sadonkorjuunjälkeiseen hävikkiin ja varastoinnin hävikkiin (jota on esim. käsittelystä johtuva pilaantuminen), prosessoinnin hävikkiin, jakelun hävikkiin ja kulutuksen hävikkiin. Eläinperäisten tuot-

teiden osalta hävikin muodostuminen voidaan jakaa maataloustuotantoon, sadonkorjuun jälkeiseen käsittely- ja varastointihävikkiin (esim. kuljetus teurastukseen, ruhojen, kalan ja maidon säilytys), prosessointihävikkiin, jakeluhävikkiin ja kulu- tushävikkiin.

Ruokatuotanto, ja sen mukaisesti myös hävikki, on Gustavssonin ym. 2011 tutki- muksessa jaettu viljatuotteisiin, juureksiin ja mukulakasveihin, öljy- ja palkokas- veihin, hedelmiin ja vihanneksiin, lihaan, kalaan ja maitotaloustuotteisiin. Hävi- kin jakautuminen ketjussa vaihtelee maittain. Keski- ja suurituloissa maissa kulu- tusvaiheessa /loppuvaiheessa ketjua muodostuva jätemäärä on suuri, mutta mata- lan tulon maissa hävikki muodostuu alku/ ja keskivaiheessa ketjua. Esimerkiksi Euroopassa ja Pohjois-Amerikassa kuluttajien aiheuttama ruokahävikki on 95 - 115 kg / henkilö / vuosi. Viljatuotteiden osalta näissä maanosissa hävikki on suu- rin, sen osuus on tuoteryhmässä 40 – 50 %. (Gustavsson ym. 2011)

NRDC:n (2012) raportin mukaan jopa yli puolet ruoasta joutuu jätteeksi Pohjois- Amerikassa (kuva 13), hedelmien ja vihannesten osalta 52 %. Kuluttajien osuus kaikkien tuoteryhmien hävikistä on kaikkein suurin.



Kuva 13. Ruoan hävikki vaiheittain Pohjois-Amerikassa (NRDC, 2012)

Hävikin syitä ovat mm. huono koordinaatio ketjussa, ylituotanto, laatustandardit, parasta ennen päiväykset, huono ostosten suunnittelu ja kuluttajakäyttäytyminen. (Gustavsson ym. 2011)

Elintarvikepakkauksen yksi tarkoitus on suojata tuotetta. Sen avulla voidaan myös mm. pienentää tuotteen hävikkiä ja parantaa tuotteen säilyvyyttä. Pakkaamisella

on merkitystä elintarvikeketjun ympäristötehokkuudelle. Pakkauksesta muodostuu jätettä, mutta toisaalta pakkaus pidentää tuotteen käyttöaikaa ja vähentää tuotteen kohdistuvia vaurioita ja hävikkiä. Ruoan pakkauksilla on oleellinen merkitys ruoan laadun ja turvallisuuden säilyttämiseksi läpi toimitusketjun. Pakkaukseen kohdistuu turvallisuus-, säilyvyysajanpidentämis-, kustannustehokkuus-, ympäristö- ja käytettävyysvaatimuksia. Pakkaus voi myös antaa informaatiota tuotteen laadusta tai jalostaa tuotetta. Pakkauksen avulla tuotteen mm. pienentää hävikkiä ja parantaa tuotteen säilyvyyttä. (Ahvenainen, 2003)

Tulevaisuudessa mahdollisuuksia ovat esim. ainesosia imevät tai vapauttavat ja antimikrobiset aktiivipakkaukset sekä älykäs pakkaaminen. Ahvenaisen (2003) mukaan tulevaisuuden elintarviketoimitusketjujen johtaminen perustuu nimenomaan langattomaan tiedonsiirtoon, aktiivisiin, älykkäisiin ja kommunikoiviin pakkauksiin.

Esimerkiksi Giannakouroun ja Taoukisen mukaan (2003) TTI-teknologia, eli aika-lämpötilaintegraattorit yhdistettynä LSFO-systeemin kanssa (lyhin päiväys ensin ulos) voivat tarjota pakastetuotteiden laadun seurantaan ja toimitusketjujen johtamiseen parannusta. Seurannan avulla voidaan esimerkiksi tehostaa varaston kiertoa ja tuotteiden jakelua ja siten vähentää hävikkiä.

3 TEHDASLÄHETTÄMÖN ENERGIATEHOKKUUS

Syrjälä Tapio

Elintarvikkeille tyypillistä ovat sekä asetusten, että yritysten itse asettamat vaatimukset mm. lämpötilan ja kosteuden suhteen niin varastoissa, kuljetuksessa, valmistuksessa ja myymälässä. Yleensä elintarvikkeiden olosuhteet on vakioitava muutaman celsiusasteen tarkkuudella. Talvella se voi tarkoittaa lämmitys- tai jäähdytystarvetta ja kesällä yleensä ilman jäähdytystarvetta.

Suomessa olosuhteet ovat erilaiset eri vuodenaikoina. Terminaalien ja ajoneuvojen ovien availu aiheuttaa lämpötilavaihtelua. Kylmävarastojen ja kuljetusten jäähdytysprosesseissa muodostuu hukka- eli lauhdelämpöä, joka joudutaan poistamaan järjestelmästä. Tehostetulla lauhdelämmön talteenotolla on saavutettavissa merkittäviä säästöjä energiakustannuksissa.

Teollisuusprosesseissa syntyvää ylijäämälämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi tuotantoprosesseissa, kiinteistön lämmitykseen, jäähdytystarpeisiin, myymällä kaukolämpöverkkoon tai muuntamalla lämpöä sähköksi. Sähköä voidaan tuottaa lämmöstä esimerkiksi höyrykattilassa, ORC-laitoksella (muuttamalla kylmäainehöyryn energiaa mekaaniseksi työksi) tai lämpöpumpuilla. (Heikkilä ja Kiuru, 2014)

Elintarvikkeiden valmistusprosesseissa tarvitaan yleensä lämpöä ja esim. höyryä ja kuumia pesuvesiä, joten hukkalämpöä syntyy näissä prosesseissa ympäri vuoden. Vuorokauden aikaisen lämmön tarpeen vaihtelun vuoksi kuuman veden varastointi vesilämpöakkuun on tarpeen. Kuumavesivaraston kapasiteetin mitoitus ja kustannusvaikutukset tulee myös ottaa huomioon, kun suunnitellaan LTO kokonaisvaikutuksia.

Lauhdelämmön talteenoton osalta on oleellista lämmönvaihtimilta saatavan kuuman veden lämpötila. Elintarviketeollisuuden valmistusprosesseissa tarvitaan yli 55 °C vettä, jotta legionellabakteerit eivät pääse muodostumaan. Riittävän korkea lämpötila saavutetaan lauhteen osalta vain lämpöpumpputekniikalla. Lämpöpumpun investointikustannukset ovat melko korkeat, investoinnin takaisinmaksuaika voi silti jäädä alle kolmeen vuoteen energiatehokkuuden parantuessa todella merkittävästi.

Terminaalitilojen osalta korkeita lämpötiloja lämmön talteenottoon ja varastointiin liittyen ei välttämättä tarvita. Viileiden tilojen lämmittämiseen pakkasella, asfaltin sulana pitoon ja toimistotilojen lämmittämiseen riittää alhaisemmankin lämpötilan varasto. Kalliolämpöakkuun varastoidun ja sieltä saatavan energian

lämpötilaa on mahdollista korottaa lämpöpumpun avulla. Kalliolämpöakku on mahdollista toteuttaa myös korkeamman lämpötilan varastona, kunhan porakaivoissa lämmönsiirtonestettä kierrättävä putkisto on valmistettu korkeita lämpötiloja kestävästä materiaalista. Investointikustannukset ovat matalaenergiaa hyödynnettäessä suhteellisen suuret. Näiden energian varastointiin liittyvien investointien takaisinmaksuaika on joidenkin arvioiden mukaan 4 – 6 vuotta.

Terminaalin osalta voisi harkita myös kylmätilojen jäähdyttämistä ammoniakkin sijaan hiilidioksidilla tai hiilidioksidin ja ammoniakkin yhteiskäytöllä. Hiilidioksidi on kylmäaineena turvallisempi kuin ammoniakki ja hiilidioksidia käytettäessä lämmönsiirto on tehokkaampaa, jolloin lämmönvaihtimet saadaan pienempään kokoon. Hiilidioksidilaitteistoissa tarvittava kylmäainehöyryn paine on kuitenkin hyvin korkea. Korkeasta käyttöpaineesta johtuen hiilidioksidilaitteistojen mekaaniset rasitukset ovat suuremmat, jolloin koneikkojen käyttöikä saattaa olla lyhyempi kuin matalamman käyttöpaineen omaavilla muilla laitteistoilla.

3.1 Lämpöpumput

Lämpöpumpuilla siirretään lämpöä matalan lämpötilan omaavasta ympäristöstä korkeamman lämpötilan omaavaan ympäristöön. Lämpöä voidaan ottaa kalliosta, maasta, vedestä tai ilmasta (esim. kylmävarastoissa) ja sitä siirretään yleensä käyttöveteen, lämmitysveteen tai ilmaan. Lämpöpumppuja nimitetään sen mukaan mistä ympäristöstä lämpöä otetaan ja mihin sitä siirretään. Vesi-ilmalämpöpumpulla lämpöä otetaan vedestä ja siirretään ilmaan. Lämpökaivon tapauksessa lämpöä siirretään porakaivoon asennetun lämmönsiirtoputkiston avulla kalliosta esim. käyttö- ja lämmitysveteen. Tällöin lämpö siirtyy ensin kalliosta putkistosta kiertävään lämmönkeruunesteeseen ja siitä edelleen lämpöpumpun kylmäaineen ja lämmönvaihtimien (kylmäaineen höyrystin ja lauhtutin) siirtämänä kuumennettavaan veteen. Lämpöpumpun tehokerroin (COP) ilmaisee, kuinka suuren lämpötehon lämpöpumppu antaa ulos suhteessa sen kompressorin vaatimaan sähkötehoon.

Lämpöpumpun tehokerroin (COP) riippuu voimakkaasti siitä, kuinka suuri lämpötilaero lämmönlähteen ja lämmitettävän kohteen välillä on. Mitä korkeampi on lämmönkeruupiirin ympäristön lämpötila, sitä korkeampi on myös tehokerroin. Tyypillinen lämpökaivoon yhdistetyn lämpöpumpun tehokerroin on noin 4, kun porakaivon ympäristön keskimääräinen lämpötila noin 200 metrin syvyisessä kaivossa on 6 °C. Käytettäessä porakaivoja lämpöakkuna, nousee kallioperän lämpötila porakaivoryhmän alueella selvästi, jolloin vastaavasti lämpöpumpun COP-arvo nousee hyvin voimakkaasti.

Eli kun lämmityskohteen ympäristön lämpötila vastaavasti ei muutu, niin keruupiirin ympäristön lämpötilaa kohottamalla tehokerroin paranee merkittävästi. Kiinteässä kallioperässä lämpötila tasaantuu melko hitaasti. Vaikka vuodenaikojen vaihtelu kestää kuukausia, kallioperään varastoitu lämpö on palautettavissa parantuneesta lämpöpumpun tehokertoimesta johtuen melko korkealla keskimääräisellä hyötysuhteella.

Tässä julkaisussa arvioidaan kylmävaraston lauhdelämmön ja mahdollisen asfalttienergian sekä muiden muutoin hukkaan menevien lämpöenergioiden varastoinnista kallioperään. Kallioperään varastoitua lämpöenergiaa voidaan hyödyntää mm. terminaalin alueella asfaltin sulana pitoon ja muuhun talviaikaiseen varastointiin oleskelutilojen lämmitykseen. Kovilla pakkasilla viileitä varastoja on myös lämmitettävä, jotta niiden lämpötila pysyy vaadituissa rajoissa.

Lämpöpumpuilla tuotettava jäähdytysenergiaa tarvitaan tehtaan lähettämön kautta kulkeville elintarvikkeille keskimäärin 744 kWh tonnia kohden. Lämpöpumpun ottama sähköenergia on tällöin noin 240 kWh. Lämpöenergia, joka lauhduttimilla poistetaan, on siis keskimäärin 984 kWh. Sähköenergian keskimääräiset hiilidioksidipäästöt ovat Motivan (2012) mukaan 210 kgCO₂/MWh. Sähkönkulutuksen mukaisesti laskettuna lämpöpumpuista aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat siis noin 50 kg tuotetonna kohden.

Kun lämpöpumppujen lauhdutuksesta vapautuva lämpö käytetään mahdollisimman tarkkaan prosessivesien lämmitykseen, säästyy tältä puolelta energiaa hyvin paljon ja hiilidioksidipäästöt ovat selvästi pienemmät. Kaukolämpöä käyttäen vastaavan energiamäärän hiilidioksidipäästöt ovat noin 215 kg elintarviketonna kohden. Kun tästä vähennetään lämmön talteenotossa tarvittavan lämpöpumpun energian tarvetta vastaava hiilidioksidimäärä (50 kg), saadaan jopa 165 kg vähennys hiilidioksidipäästöissä tuotettua elintarviketonna kohden.

3.2 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneeleita tai aurinkokeräimiä on kahta tyyppiä, joiden nimeäminen ei ole täysin vakiintunutta. Aurinkopaneeleita (jotka muodostuvat sarjaan kytketyistä aurinkokennoista) käytetään tyypillisesti sähkön tuotantoon ja aurinkokeräimiä lämmön tuotantoon (aurinkolämpöjärjestelmä). Terminaalien kylmätiloista vapautuva lauhdelämpö ja asfaltin alta talteen otettava lämpöenergia riittävät terminaalien lämmöntarpeeseen, joten lämmön tuottoon aurinkokeräimiä ei liene järkevää tässä yhteydessä soveltaa.

Aurinkopaneelien hyödyntäminen sähkön tuotannossa (aurinkosähköjärjestelmä) on sen sijaan perusteltavissa. Näin toimien saadaan sähköä, jota voidaan käyttää eri tarkoituksiin kun samalla auringon säteilylämmön siirtyminen kylmätiloihin vähenee. Aurinkosähkön tuottaminen perustuu auringon säteilyenergian hyödyntämiseen. Auringonsäteily koostuu fotoneista eli hiukkasista, jotka kuljettavat auringon säteilyenergiaa. Osuessaan aurinkokennoihin fotonit luovuttavat energiansa kennojen materiaalin elektroneille. Nämä fotoneilta energiaa saaneet elektronit muodostavat sähkövirran aurinkokennojen virtajohtimiin.

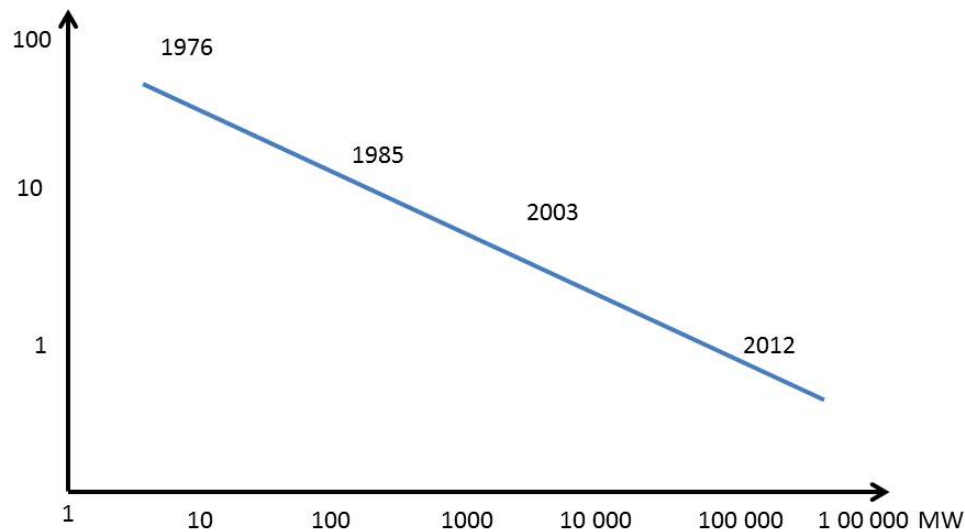
Aurinkopaneelista saatava sähkö on alun perin tasasähköä, joka muunnetaan vaihtosähköksi ja tahdistetaan kolmivaiheiseen sähköverkkoon invertterin avulla. Lisäksi tarvitaan järjestelmä, joka kytkee ja irrottaa aurinkosähkön sähköverkosta.

Auringosta saatava säteilyenergiasta voidaan muuttaa paneelien avulla sähköenergiaksi noin 13 % hyötysuhteella. Aurinkoisena päivänä auringon säteilyteho Suomessa on 1000 W/m^2 , joten tällöin neliömetriltä saatava teho olisi 130W (eli 130 Wp suurimman tehon mukaan). Auringosta saatava keskimääräinen sähköteho on vaihtelevista olosuhteista johtuen paljon pienempi. Voidaan arvioida, että päivittäin saatava teho on keskimäärin 30 % enimmäistehosta, eli em. tapauksessa keskimääräinen teho olisi noin 40 W/m^2 .

Lämpöpumppujen sähkön tarve on suurimmillaan kuumina aurinkoisina päivinä, joten hyödyksi saatava osuus on arvioitavissa keskimääräistä korkeammaksi esim. 100 W/m^2 . Tuhannen neliön alueelta saatava sähköteho olisi siis 100 kW, niinä aikoina kun jäähdytysteho on suurimmillaan.

Kehitteillä olevilla uusilla aurinkopaneelilla on arvioitu saavutettavan huomattavasti korkeampia hyötysuhteita (jopa yli 40 %), joten aurinkopaneelien osalta lienee viisasta odottaa näiden kaupallistumista, ennen laajamittaisen hankintapäätöksen tekemistä.

Aurinkopaneelien hintakehitys on ollut voimakkaasti laskussa. Yhtenä esimerkkinä sitä havainnollistaa kuva 14.



Kuva 14. Aurinkopaneelien hintakehitys, 1976 – 1012 \$/W (mukaillen Liebreich, 2013)

3.3 Asfalttilämpö

Asfalttienergian hyödyntäminen edellyttää asfaltin alta kerätyn lämmön varastointia kallioperään. Tätä lämpöenergiaa voidaan käyttää talven aikana asfaltin sulana pitoon. Asfalttienergian hyväksikäytöllä saavutettaisiin melko merkittäviä etuja. Kun kesällä lämpöä kerättäisiin asfaltin alta (kuva 15), sen pinta pysyisi viileänä ja samalla kantavana. Talvella sulana pitäminen voitaisiin toteuttaa tällä kalliokaivoihin tallennetulla energialla. Energian kulutuksen ja päästöjen vähentymisen osalta vaikutukset olisivat merkittäviä.



Kuva 15. Kuva asfaltin sulanapitojärjestelmästä (Warmia, 2014).

Kuvassa 15 on esimerkki asfaltin sulana pitoon käytetystä järjestelmästä. Samaa putkistoa voidaan periaatteessa käyttää kesäaikaan lämmön keräämiseen. Varsinkin terminaali-alueella, joka päiväaikaan on vähäisessä käytössä ja auringosta tulevalle lämpösäteilylle alttiina, tumman asfaltin alle johtuva lämpöenergiaa saadaan kerättyä tehokkaasti. Vaasan Yliopiston tutkimuksissa on todettu lämpötilan nousseen kesäaikana 0,5 m syvyydelläkin 25 °C lämpötilaan.

3.4 Kalliolämpöakku

Kalliolämpöakun hyödyntäminen lämpövarastona sopii hyvin hukkalämmön talteenottoon. Mahdollisia hukkalämmön lähteitä ovat kylmätilojen lauhdelämpö, jätevesien mukana poistuva lämpö ja savukaasujen mukana poistuva lämpö. Lisäksi asfaltin alta voidaan kesäaikaan ottaa lämpöä talteen ja varastoida se kalliolämpöakkuun, kuten myös muuta mahdollista ylijäämälämpöä (esim. aurinkokehäimien tuottama lämpö).

Kaikki sellainen lämpöenergia, jonka lämpötila on selvästi korkeampi kuin porakaivon seinämän lämpötila, on mahdollista varastoida kalliolämpöakkuun. Peruskalliossamme keskimääräinen lämpötila ilman lataamista on noin 6 °C, tällöin lämpöpumpun tehokerroin lämmityskäytössä on 3 – 4. Kun kallioerän lämpötila

saadaan lataamalla nousemaan, nousee myös tehokerroin voimakkaasti. Lämpöpumpun tehokertoimen arvo riippuessa pääosin lämmön lähteen ja kuumennettavan fluidin (yleensä ilma tai neste) lämpötilaerosta.

3.5 Kaukokylmä, aurinkoviileä

Joillain paikkakunnilla kaukolämpölaitoksilla on tarjolla myös tilojen viilennystä kaukolämpöverkon puitteissa. Myös aurinkoenergiaa voidaan käyttää viilennykseen. Kylmän tuottoon nämä ratkaisut soveltuvat huonosti, mutta ilmaston viilennyksessä niitä voitaisiin hyödyntää. Aurinkoenergialla ammoniakkaa kylmäaineena käyttäen päästäisiin riittävän alhaisiin lämpötiloihin, mutta energiantarve olisi moninkertainen tavanomaisiin kylmälaitteisiin verrattuna.

Kylmälaitteiden toimintavarmuuden takaaminen edellyttää varmistettua sähkön saantia, joten em. ratkaisut eivät siitäkään syystä ole varteenotettavia vaihtoehtoja. Aurinkopaneelilla tuotettua sähköä on mahdollista käyttää myös lämpöpumppujen käyttöenergiana, joten aurinkoenergian hyödyntäminen tällä tavoin lienee järkevämpää kuin pyrkiä tuottamaan kylmää aurinkoenergialla muulla tavoin.

3.6 Terminaalilämpöä hukkalämmön talteenotto

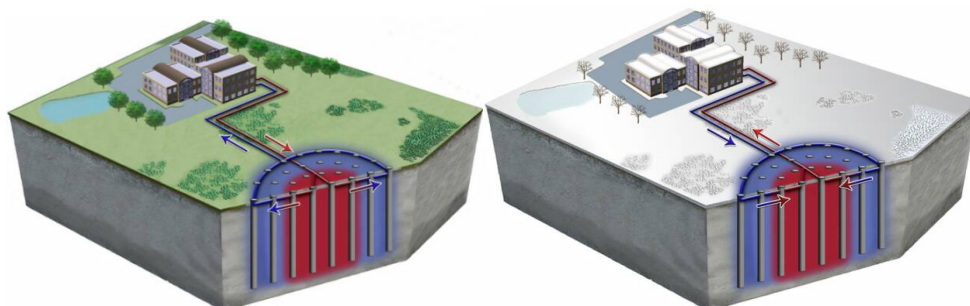
Tässä luvussa tarkastellaan lämpökaivon potentiaalia hukkalämmön talteenoton tehostamiseen liittyen. Käytännössä sillä tarkoitetaan mahdollisuuksia ottaa talteen kylmätilojen jäädytyksestä vapautuvaa energiaa ja kesäaikaan asfalttienergiaa. Asfalttilämpöä on mahdollisuus varastoida kesän aikana kallioperään.

Kallioperään porattuja lämpökaivoja voidaan käyttää lisäksi joko ilmaston viilennykseen tai lämpöpumppujen avulla lämmitykseen. Kalliolämpöakut mahdollistavat nykyistä tehokkaammin kylmätiloista vapautuvan lauhdelämmön, jätevesien ja mahdollisesti myös savukaasujen mukana poistuvan hukkalämmön hyödyntämisen.

Tätä varastoitavaa lämpöenergiaa voitaisiin hyödyntää talviaikaan viileiden tilojen, toimistotilojen ja ilmaston lämmitykseen sekä asfaltin sulana pitoon. Tarkoitusta varten lämpöenergiaa on mahdollista varastoida pitkiäkin aikoja. Tarkoitukseen soveltuu parhaiten oikein mitoitettu kalliolämpöakku.

Terminaalilämpöä voidaan ottaa talteen varastoimalla sitä esimerkiksi kalliolämpöakkuun. Kuvan 16 mukaan kesällä ilmaston jäädytyksen yhteydessä varastoitua lämpöä varastoidaan kesällä ja hyödynnetään (muun kallioperästä saatavan

lämmön lisäksi) talvella. Tuotanto ym. prosesseissa syntyvää hukkalämpöä on kalliolämpöakkuun varastoituna mahdollista hyödyntää kuitenkin aina tarvittaessa. Kalliolämpöakku, johon lämpöä on mahdollista siirtää korkeahkossa lämpötilassa, soveltuu näin ollen lyhytaikaiseenkin lämmön varastointiin.



Kuva 16. Yksinkertaistettu malli porakaivokentästä (kalliolämpöakku), jota voidaan tehokkaasti hyödyntää pitkäaikaiseen lämmön varastointiin (Underground Energy, 2014).

Lämpökaivon rakentamiseksi tulee tehdä ja eristää porakaivokenttä ja hankkia lämmönvaihtimet tai lämpöpumput kylmäkoneiden lauhdelämmön talteenottoon ja / tai hyödyntää asfalttilämpöä (kuva 10) yhdistettynä sen talteenoton ja sulana pidon toteuttamiseen. Talteenottopotentiaali on esitetty taulukossa 5 eli yhteensä noin 373 000 kWh, jonka rahallinen arvo on noin 40 000 €/vuosi.

Taulukko 5. Lämpökaivon vuosittainen talteenottopotentiaali

Viileät +2 °C	25000 kWh
Viileät +6...+8 °C	22000 kWh
Pakasteet	66000 kWh
Asfaltti	260000 kWh
Yhteensä	373000 kWh
Rahallinen arvo	40 000 €/vuosi

Porakaivokentän lämmöntallennustehokkuus on noin 200 kWh/m. Kaivojen kokonaisuusmitta on noin 1865 m, jossa 120 metrin porakaivoja on 16 kpl. Lämpökaivokustannukset n. 56 000 €. Kaivoja tulisi olla 4 keskellä ja 12 reunoilla kuuden metrin välein. Sivun pituuden ollessa $3 * 6 = 18$ m.

Eristeenä tulee olla noin 200 mm routaeristettä. Kustannus on 18 €/m², jolloin 400 m² * 18 €/m² = 7 200 €.

Lisäksi kuumuutta kestävä PEX-putket asfaltin alle maksavat noin 3 €/m. Putkia tarvitaan noin 10 000 m, jolloin kustannus on 10 000 m * 3 €/m = 30 000 euroa.

Tarvikkeiden kokonaiskustannukset ovat yhteensä noin 37 200 euroa.

Kokonaiskustannukset porakaivojen osalta ovat noin 150 000 € (taulukko 6).

Taulukko 6. Porakaivokentän kustannukset

Porakaivokenttä töineen	120 000 €
Lämmön talteenottojärjestelmän lauhduttimet n. 200 €/kW	6 000 €
Lämpöpumput 3 * 12 kW	18 000 €
Muut kustannukset arvio	6 000 €
Kustannukset yhteensä	150 000 €

Kustannusten 150 000 € ja energiasäästöpotentiaalin 40 000 €/vuosi avulla takaisinmaksuajaksi saadaan 4 vuotta ilman investointitukia ja korkoja. Investointituet (esim. 30 %) alentaisivat takaisinmaksuaikaa merkittävästi.

3.7 Energiatekninen laskenta

Lähtökohtina mallin kehittämisessä olivat energian tuotanto- ja kulutuskohteet eri muodoissaan. Laskentamallin pohjalta voidaan suorittaa vertailevia laskelmia kustannusten, energiatehokkuuden ja hiilidioksidipäästöjen osalta.

Energiankäyttö, päästöt ja kustannukset suhteutettiin tuotekiloihin.

3.6.1 Energian käyttö

Energian käytön osalta tämä tapahtui seuraavasti:

$$E_m = E_v / m, \text{ jossa}$$

E_m = energian käyttö / tuotekilo (kWh/kg), E_v = energian käyttö vuodessa (kWh/v) ja m = tuotekilot (kg/vuosi).

Lämpökaivon energian säästömahdollisuus laskettiin seuraavasti:

$E_l = E_p * h$, jossa

E_p = lämpökaivoon syötettävä energia ja h = lämpökaivoon varastoidun energian hyötysuhde (lämpöpumpun keskimääräinen tehokerroin huomioiden).

Asfalttienergian talteenotto:

$E_A = A * k_a$, jossa

A = asfalttikeräinten kattama pinta-ala (m^2) ja k_A = asfalttikeräinten potentiaali (kWh/m^2) vuodessa.

Aurinkopaneeleista saatava sähkö- tai lämpöenergia:

$E_a = A * k_a$, jossa

A = aurinkokeräinten ala (m^2) ja k_a = aurinkokeräinten potentiaali (kWh/m^2) vuodessa.

3.6.2 Hiilidioksidipäästöt

Hiilidioksidipäästöjen osalta seuraavasti:

$P_m = P_v / m$, jossa

P_m = päästöt / tuotekilo ($kg\ CO_2\ ekv./kg$), P_v = päästöt vuodessa ($CO_2\ kg\ ekv. /v$) ja m = tuotekilot ($kg/vuosi$)

Lämpökaivon säästöpotentiaali päästöjen osalta:

$P_l = E_l * e$, jossa

E_l = lämpökaivosta uudelleenkäyttävä energia (kWh), e = energian päästökerroin

Asfalttienergian säästöpotentiaali päästöjen osalta:

$P_A = E_A * e$, jossa

E_A = asfalttienergian säästöpotentiaali ($kWh/vuosi$) ja e = energian päästökerroin

Aurinkopaneelien säästöpotentiaali päästöjen osalta:

$P_a = E_a * e$, jossa

E_a = asfalttienergian säästöpotentiaali ($kWh/vuosi$) ja e = energian päästökerroin

Kaukolämpöverkkoon syöttämisen säästöpotentiaali päästöjen osalta:

$$P_k = E_k * e, \text{ jossa}$$

E_a = kaukolämpöön syöttöpotentiaali (kWh/vuosi) ja e = energian päästökerroin

3.6.3 Kustannukset

Kustannukset tuotekiloa kohden:

$$k_m = k_v / m, \text{ jossa}$$

k_m = kustannukset/ tuotekilo (€/kg), k_v = kustannukset vuodessa (€ /v) ja m = tuotekilot (kg/vuosi).

Lämpökaivon säästöpotentiaali energiakustannuksissa:

$$k_l = E_l * k, \text{ jossa}$$

E_l = lämpökaivosta uudelleenkäyttävä energia (kWh), k = energian kustannuskerroin

Asfaltinenergian kustannussäästöt:

$$k_A = E_A * k, \text{ jossa}$$

E_A = asfalttienergian säästöpotentiaali (kWh/vuosi) ja e = energian kustannuskerroin

Aurinkopaneelien säästöpotentiaali laskettiin seuraavasti:

$$k_a = E_a * k, \text{ jossa}$$

k_a = asfalttienergian säästöpotentiaali (kWh/vuosi) ja k = energian kustannuskerroin

Kaukolämpöverkkoon syöttämisen säästöpotentiaali laskettiin seuraavasti:

$$k_k = (E_k * h) - (E_k * k), \text{ jossa}$$

E_a = kaukolämpöön syöttöpotentiaali (kWh/vuosi) ja h = energian myyntihinta (€/kWh), k = kustannus kaukolämmön tuottamiseksi (€/kWh)

3.8 Tulokset

Terminaalien säästömahdollisuudet laskettiin seuraavilla lähtöarvoilla (taulukko 7).

Taulukko 7. Lähtöarvot

<i>aurinkopaneelien keruuala</i>	1 000	m ²
<i>aurinkopaneelien keruupotentiaali</i>	400	kWh/m ² /vuosi
<i>investointikustannus</i>	240 000	€
<i>kallioakun hyötysuhde (lämpöpumpulla)</i>	70	%
<i>energian syöttö kallioakkuun</i>	86 000	kWh
<i>kallioakun investointi</i>	200 000	€
<i>asfalttienergian keruuala</i>	4 000	m ²
<i>asfalttienergian keruupotentiaali</i>	80	kWh/m ² /vuosi
<i>asfalttienergian investointi</i>	150 000	€
<i>kaukolämmön syöttöpotentiaali</i>	400 000	kWh/vuosi
<i>kaukolämmön investointi</i>	30 000	€
<i>kaukolämmön tuotto</i>	0,03	€/kWh
<i>kaukolämmön tuottokustannus</i>	0,0005	€/kWh
<i>energian kustannus</i>	0,045	€/kWh
<i>sähkön kustannus</i>	0,060	€/kWh
<i>energian päästökerroin</i>	0,265	CO ₂ kg ekv/kWh

Edellä mainituilla lähtöarvoilla terminaalien säästömahdollisuudet (taulukko 8) ovat suurimmat aurinkosähkön ja asfalttienergian keräämisen suhteen (molemmilla -0,185 €/1000 kg). Lyhin takaisinmaksuaika saavutetaan kalliolämpöakulla (3,3 vuotta). Päästöjen suhteen aurinkosähkön keruulla päästään parhaisiin säästöihin (-0,49 kg CO₂ ekv / 1000 kg).

Taulukko 8. Terminaalienergian säästömahdollisuudet

energian käyttö	42	kWh/m ² /vuosi		
	investoinnit (€)	säästö-potentiaali (€/1000 kg)	takaisinmaksuaika (vuotta)	säästöpotentiaali CO ₂ (CO ₂ kg/ 1000 kg)
<i>kallioakku/ lämpökaivo</i>	200 000	0,074	3,3	0,07
<i>Aurinkosähkö</i>	240 000	0,185	6,0	0,49
<i>Asfalttienergia</i>	320 000	0,185	4,7	0,39
<i>Kaukolämpö</i>	30 000	0,000	2,5	0,49

Tulokset osoittavat että, terminaalienergian lämmön talteenotossa ja sähköntuotantomahdollisuuksissa on paljon jatkokehittämispotentiaalia. Kaukolämpö ei ole sellaisenaan sovellettavissa kylmien tilojen jäähdyttämiseen, joten siltä osin ei synny todellisia säästöjä.

4 SIIRTOKULJETUS REKALLA TAI JUNALLA SEINÄJOELTA VUOSAAREEN

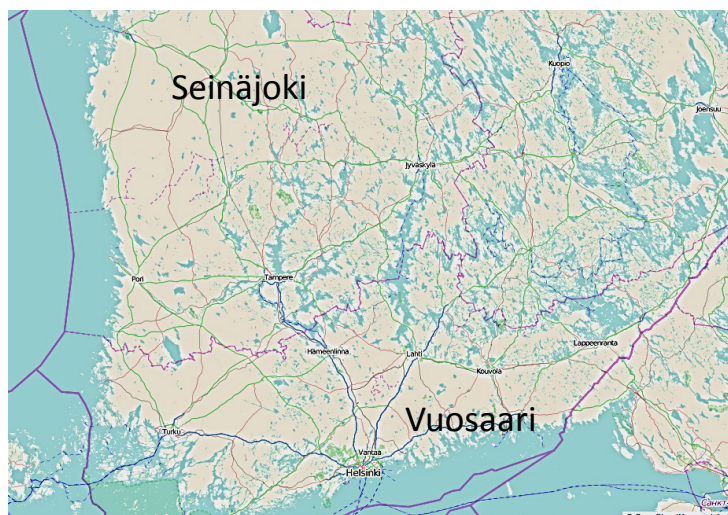
Hanne Ala-Harja

Tässä tutkimuksen osassa tavoitteena oli verrata junalla ja rekalla tapahtuvan siirtokuljetuksen eroja välillä Seinäjoki-Vuosaari (kuva 17). VR:llä ei ole tavaraliikennettä kyseisellä välillä, joten laskelmat ovat teoreettisia. Vertailua tehtiin kustannusten, hiilidioksidipäästöjen ja energiankulutuksen osalta. Kokonaistoimitusketjuun kuului kotimaan siirtokuljetuksen ja laivakuljetuksen lisäksi kansainvälisiä kuljetuksia.

Tarkasteltavana tuotteena oli lämpösäätelämätön kuivatuote ja kuljetusyksikkönä 2 TEU:n kontti. Konttien lukumääräksi arvioitiin 15 konttia päivässä. Laskelmissa on käytetty 2:n TEU:n konttia (pituus 11,998m, leveys 2,33m, ovi auki 2,286m, korkeus 2,35m, ovi auki 2,261m ja tilavuus 65 m³).

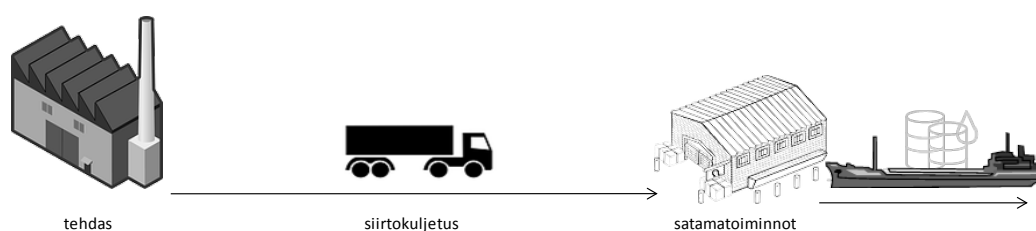
Kuljetus kuorma-autolla tapahtui puoliperävaunuyhdistelmällä (myöhemmin kuorma-autoketju) tai sähköjunalla (myöhemmin junaketju). Kuorma-autona tarkastelussa oli EUR5 puoliperävaunuaajoneuvoyhdistelmä (kantavuus 25 tonnia ja kokonaismassa 40 tonnia) ja junana Sr2 sähköveturi. Sähköveturin vetämän tavarajunan tyyppiveturina käytetyn Sr2 -veturin maksimiteho on 6100 kW ja paino 83 tonnia. Se pystyy vetämään 2000 tonnin painoisen junan ja kaksi veturia yhteen kytkettynä 4000 tonnin tai ja vastaavasti kolme veturia yhteen kytkettynä 6000 tonnin painoisen junan. Kotimaan junissa nettopaino on keskimäärin 1150 nettotonna (1 sähköveturi /raskas dieselveturi + 19 vaunua) ja junan bruttopaino noin 1650 tonnia.

Tarkastelu tehtiin tehtaalta satamaan ns. siirtokuljetuksen osalta.



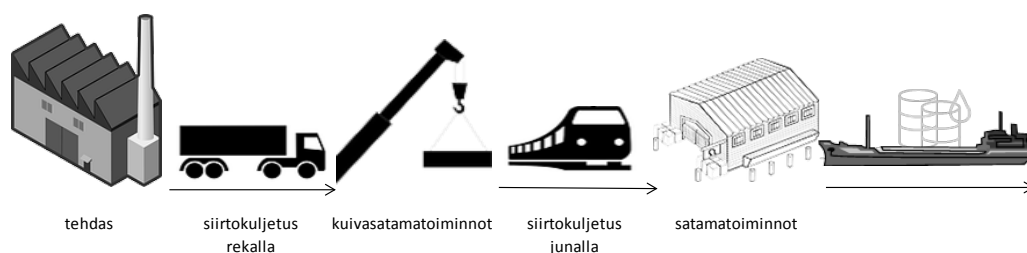
Kuva 17. Seinäjoki – Vuosaari rautatie ja maantiereitit (OpenStreetMap, 2014)

Kuorma-autoketjun vaiheita (kuva 18) olivat tyhjän kontin kuljetus tehtaalle, kontinlastaus, täyden kontin kuljetus autolla, konttien purkaminen sekä konttien säilytys ja laivaus.



Kuva 18. Kuorma-autoketjun vaiheet

Junaketjussa vaiheet (kuva 19) olivat tyhjän kontin kuljetus tehtaalle, kontinlastaus, täyden kontin kuljetus autolla, kontin kuivasatamaoperaatiot (konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan), kontin kuljetus junalla, konttien purkaminen sekä konttien säilytys ja laivaus. Kontinlastaus jätettiin laskelmissa huomiotta, koska se on vaiheena samanlainen molemmissa skenaarioissa eikä siten aiheuta skenaarioiden välille eroja.



Kuva 19. Junaketjun vaiheet

Skenaarioista laskettiin ketjujen kustannukset (€), energiankulutus (kWh/vuosi) ja (CO₂ ekv./vuosi). Tarkastelut tehtiin lopuksi myös tonnikipometreittäin ja tuotetonnikohtaisesti eli kustannukset (€/tonnikilometri), energiankulutus kWh/ tonnikilometri) ja (CO₂ ekv./ tonnikilometri) ja kustannukset (€/1000kg tuotetta), energiankulutus kWh/1000kg tuotetta) ja (CO₂ ekv./1000kg tuotetta).

Junan oletettiin lähtevän joka päivä riippumatta volyymistä riippumatta. Tavoitteena oli hakea kriittinen volyymi kustannusten, hiilidioksidipäästöjen ja energiankulutuksen osalta eli määrittellä millä määrällä juna muuttuu järkevämmäksi ratkaisuksi kullakin mittarilla mitattuna. Junakuljetusten oletettiin hoidettavaksi omilla junilla, eli ei yhdistäen muiden satamien junakuljetuksiin mm. aikataulullisista syistä (Pöyskö & Harvio, 2010).

Laskelmat on tehty kilometriperusteisina tonnikilometriperusteisen laskentatavan sijasta. Tämä valinta tehtiin mm. tyhjen konttien kuljetusten, energia-, kustannus- ja hiilidioksidilaskelmien yhdenmukaisuuden takia.

4.1 Rautatieliikenne Seinäjoelta Vuosaareen

VR ei tarjoa tällä hetkellä (vuonna 2013) kuljetuksia Seinäjoen asemalta, joten laskelmat perustuvat oletuksiin. Jos reitti toteutettaisiin, se edellyttäisi vaihtotöitä Tampereella (Forsman, 2014). VR:n mukaan (lähde x) kuljetukset ovat mahdollisia joko Riihimäelle tai Vuosaareen. VR:n ilmoittamia hintatietoja ei ollut käytettävissä. Näissä laskelmissa oletetaan että lastaus tapahtuisi jo Seinäjoen asemalla ja purku Vuosaaren satamassa. VR Transpoint tarjoaa logistiikkapalvelujen, kuten rautatiekuljetusten lisäksi kuljetusten suunnittelua ja ohjausta, kuormien lastausta ja purkua sekä kuljetusten seuranta IT-palveluineen. Tarvittaessa VR Transpoint laatii asiakirjat ja valvonnan sekä tarjoaa varastointi- ja terminaalipalvelut. (VR Transpoint, 2014). Fennia Railin tavoitteena on aloittaa tavaraliikennöinti vuonna 2015. Fennia Railin tyypillisiä palveluja ovat kuljetukset tuotantolaitoksilta satamiin, raaka-ainekuljetukset tuotantolaitoksille ja vaihtotyöt (Fennia Rail, 2014).

Rautatielogistiikan palveluja ovat mm. vaunuryhmä joka voi olla erillistilattu tai säännöllinen juna pienempi kuljetusyksikkö, yleensä noin 300 – 600 tonnin lähe-tykseen. Kokojunapalvelu soveltuu kahden aseman väliseen säännölliseen suurten mutta vaihtelevien tavaramäärien väliseen liikenteeseen. Pendeli on kahden paik-kan välillä pääsääntöisesti ilman välikäsitteilyä liikennöivä juna, jonka suuri kul-jetuskapasiteetti on kokonaan asiakkaan käytössä. Pendelin säännöllisyys mahdol-listaa kaluston pitkälle viedyn asiakaskohtaisen räätälöinnin. (VR Transpoint, 2014)

VR Transpoint ilmoittaa kotisivuillaan tarjoavansa myös kuljetusten turvallisuus-palvelua, huolintapalveluja, erikoiskuljetuksia, vaarallisten aineiden kuljetuksia, vaunuston hankintaa kansainvälisiin junakuljetuksiin, antaa kuormausohjeita, tarkastaa kuormia, suorittaa vaihtotöitä, tekee kuljetusdokumentteja, tarjoaa ICT-palveluja, punnitsee ja raportoi. (VR Transpoint, 2014)

4.2 Kuorma-autoketjun laskelmat

Laskelmat kuorma-autokuljetusten osalta on jaoteltu kustannus- energiankulutus- ja hiilidioksidipäästölaskelmiin ja ne on esitetty seuraavissa luvuissa ”ylhäältä alaspäin”.

4.2.1 Kuorma-autokuljetusten kustannukset

$K_{Rt} = K_{Rty} + K_{Rtä} + K_{Rp}$, jossa

K_{Rt} = kuorma-autokuljetusten kustannukset (€/vuosi), K_{Rty} = kustannukset tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (€/vuosi), $K_{Rtä}$ = kustannukset täyden kontin kuljetus autolla (€/vuosi), K_{Rp} = TEU-konttien purkamisen kustannukset (€/vuosi).

Edelleen tyhjien TEU-konttien kuljetukset on laskettu kilometriperusteisesti ja siinä on huomioitu tyhjien TEU-konttien osuus seuraavasti:

$$K_{Rty} = (K_{Rty\%} / 100) * V / K_{Rtyk} * K_{Rtys} * K_{RtyK}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), $K_{Rty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), K_{Rtys} = matka keskimäärin (km), K_{Rtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/auto), K_{RtyK} = kustannus (€/km)

Täyden kontin kuljetuskustannus (€/vuosi) on laskettu matkan, kustannusten ja kuljetuskapasiteetin avulla seuraavasti

$$K_{Rt\ddot{a}} = K_{Rt\ddot{a}s} * K_{Rt\ddot{a}k} * V / K_{Rt\ddot{a}K}, \text{ jossa}$$

$K_{Rt\ddot{a}s}$ = kuljetusmatka (km/sivu), $K_{Rt\ddot{a}K}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto),
 $K_{Rt\ddot{a}k}$ = kuljetuskustannus (€/km), V =volyymi (TEU-konttia/vuosi).

TEU-konttien purkamisen kustannukset (K_{Rp}), (€/vuosi) on laskettu tehon ja tunti-, päivä- ja TEU-konttikustannusten tulona seuraavasti. Kustannusten jako eri kustannustyyppisiin nähtiin tarpeellisena, koska hinnastoa ns. kuivasatamatoimintaan ei ole ja mahdollisesti kustannukset muodostuisivat eri toimijoilta. Tarvittaessa kustannustekijät voidaan summalausekkeessa jättää nollassi.

$$K_{Rp} = d * K_{Rpp} + K_{Rpt} / P * V + K_{Rpk} * V$$

d = käsittelypäivien määrä vuodessa, K_{Rpp} = päiväkohtaiset kontinkäsittelykustannukset, K_{Rpt} = tuntikohtaiset kontinkäsittelykustannukset (€/tunti), P = kontinkäsittelyteho (TEU-konttia/tunti), V =volyymi (TEU-konttia/vuosi), K_{Rpk} = TEU-konttikohtainen käsittelykustannus (€/TEU-kontti).

4.2.2 Kuorma-autokuljetusten energiankulutus

$$E_{Rf} = E_{Rty} + E_{Rt\ddot{a}} + E_{Rp}, \text{ jossa}$$

E_{Rf} = kuorma-autokuljetusten energiankulutus (kWh/vuosi), E_{Rty} = tyhjän kontin kuljetus tehtaalle energiankulutus (kWh/vuosi), $E_{Rt\ddot{a}}$ = täyden kontin kuljetus autolla energiankulutus (kWh/vuosi), E_{Rp} = TEU-konttien purkamisen energiankulutus (kWh/vuosi)

Tyhjän kontin kuljetus tehtaalle energiankulutus (E_{Rty}), (kWh/vuosi), on laskettu

$$E_{Rty} = (E_{Rty\%} / 100) * V / E_{Rtyk} * E_{Rtys} * E_{RtyE}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), $E_{Rty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), E_{Rtys} = matka keskimäärin (km), E_{Rtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/auto), E_{Rtyk} = energiankulutus (kWh/km).

Täyden kontin energiankulutus (kWh/vuosi) on laskettu matkan, energiankulutuksen ja kuljetuskapasiteetin avulla seuraavasti

$$E_{Rt\ddot{a}} = E_{Rt\ddot{a}s} * E_{Rt\ddot{a}k} * V / E_{Rt\ddot{a}K}, \text{ jossa}$$

$E_{Rt\ddot{a}s}$ = kuljetusmatka (km/sivu), $E_{Rt\ddot{a}K}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto),
 $E_{Rt\ddot{a}k}$ = energiankulutus (kWh/km), V =volyymi (TEU-konttia/vuosi).

TEU-konttien purkamisen energiankulutus (kWh/vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$E_{Rp} = V / P * E_{Rp}, \text{ jossa}$$

V= volyymi (TEU-konttia/vuosi), P= kontinkäsittelyteho (TEU-konttia/tunti),
 E_{Rp} = kuorma-auton purkamisen energiankulutus (kW/h)

4.2.3 Kuorma-autokuljetusten hiilidioksidipäästöt

Kuorma-autokuljetusten hiilidioksidipäästöt (H_{Rf}), (g CO₂ ekv /vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$H_{Rf} = H_{Rty} + H_{Rtä} + H_{Rp}, \text{ jossa}$$

H_{Rty} = tyhjän kontin kuljetus tehtaalle hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv /vuosi),
 $H_{Rtä}$ = täyden kontin kuljetus autolla hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv /vuosi),
 H_{Rp} = TEU-konttien purkamisen hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv /vuosi).

Tyhjän kontin kuljetus tehtaalle hiilidioksidipäästöt (H_{Rty}), (g CO₂ ekv /vuosi), on laskettu seuraavasti:

$$H_{Rty} = (H_{Rty\%} / 100) * V / H_{Rtyk} * H_{Rtys} * H_{RtyH}$$

V= volyymi (TEU-konttia/vuosi), $H_{Rty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), H_{Rtys} = matka keskimäärin (km), H_{Rtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/auto),
 H_{RtyK} = hiilidioksidiekvivalenttipäästö (g CO₂ ekv./ km)

Täyden kontin päästö (€/vuosi) on laskettu matkan, yksikköpäästöjen ja kuljetus-kapasiteetin avulla seuraavasti

$$H_{Rtä} = H_{Rtäs} * H_{Rtäk} * V / H_{RtäH}, \text{ jossa}$$

$H_{Rtäs}$ = kuljetusmatka (km/sivu), $H_{Rtäk}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto),
 $H_{Rtäk}$ = yksikköpäästö(g CO₂ ekv./km), V=volyyymi (TEU-konttia/vuosi).

TEU-konttien purkamisen päästöt (K_{Rp}), (g CO₂ ekv./vuosi) on laskettu tehon ja yksikköpäästöjen tulona.

$$K_{Rp} = V / P * K_{RpK}$$

P= kontinkäsittelyteho (TEU-konttia/tunti), V=volyyymi (TEU-konttia/vuosi),
 K_{RpK} = yksikköpäästöt (g CO₂ ekv/tunti).

4.3 Junaketjun laskelmat

Kuorma-auto- ja junaketjujen laskentaperusteet ovat monilta osin samanlaisia, mutta junaketjussa vaiheita on enemmän. Siksi junaketjua koskevat laskelmat on esitetty kokonaisuudessaan tämän luvun alla.

4.3.1 Junakuljetusten kustannukset

$K_{Jr} = K_{Jty} + K_{Jtä} + K_{Jp} + K_{Jk} + K_{Jj}$, jossa

K_{Jr} = Junakuljetusten kustannukset (€/vuosi), K_{Jty} = kustannukset tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (€/vuosi), $K_{Jtä}$ = kustannukset täyden kontin kuljetus autolla (€/vuosi), K_{Jp} = TEU-konttien purkamisen kustannukset (€/vuosi), K_{Jks} = kontin kuivasatamaoperaatiot (TEU-konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan), K_{Jk} = kontin kuljetus junalla.

Edelleen tyhjien TEU-konttien kuljetukset on laskettu kilometriperusteisesti ja siinä on huomioitu tyhjien TEU-konttien osuus seuraavasti:

$$K_{Jty} = (K_{Jty\%} / 100) * V / K_{Jtyk} * K_{Jtys} * K_{JtyK}$$

V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi), $K_{Jty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), K_{Jtys} = matka keskimäärin (km), K_{Jtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/auto), K_{JtyK} = kustannus (€/km)

Täyden kontin kuljetuskustannus (€/vuosi) on laskettu matkan, kustannusten ja kuljetuskapasiteetin avulla seuraavasti

$$K_{Jtä} = K_{JtäS} * K_{Jtäk} * V / K_{JtäK}, \text{ jossa}$$

$K_{JtäS}$ = kuljetusmatka (km/sivu), $K_{JtäK}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/juna), $K_{Jtäk}$ = kuljetuskustannus (€/km), V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi).

TEU-konttien purkamisen kustannukset (K_{Jp}), (€/vuosi) on laskettu tehon ja tunti-, päivä- ja TEU-konttikustannusten tulona seuraavasti. Tarvittaessa kustannustekijät voidaan summalausekkeessa jättää nollassi, jos esim. TEU-konttialueen päiväveloitusta ei peritä lyhyen säilytysajan takia tai kustannukset ovat TEU-konttikohtaisia.

$$K_{Jp} = d * K_{Jpp} + K_{Jpt} / P * V + K_{Jpk} * V$$

d = käsittelypäivien määrä vuodessa, K_{Jpp} = päiväkohtaiset kontinkäsittelykustannukset, K_{Jpt} = tuntikohtaiset kontinkäsittelykustannukset (€/tunti), P = kontinkäsit-

telyteho (TEU-konttia/tunti), V =volyymi (TEU-konttia/vuosi), K_{Jpk} = TEU-konttikohmainen käsittelykustannus (€/TEU-kontti).

Kontin kuivasatamaoperaatioiden kustannukset (TEU-konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan, K_{Jks}) osalta laskettiin tehon ja tunti-, päivä- ja TEU-konttikustannusten tulona. Kustannusten jako eri kustannustyyppisiin nähtiin tarpeellisenä, koska hinnasto ns. kuivasatamatoimintaan ei ole ja mahdollisesti kustannukset muodostuisivat eri toimijoilta. Tarvittaessa kustannustekijät voidaan summalausekkeessa jättää nolllaksi.

$$K_{Jks} = d * K_{Jkspp} + K_{Jkspt} / P_{ks} * V + K_{Jks} * V$$

d = käsittelypäivien määrä vuodessa, K_{Jkspp} = päiväkohtaiset kontinkäsittelykustannukset, K_{Jkspt} = tunti-kohtaiset kontinkäsittelykustannukset (€/tunti), P_{ks} = kontinkäsittelyteho (TEU-konttia/tunti), V =volyymi (TEU-konttia/vuosi), K_{Jks} = TEU-konttikohmainen käsittelykustannus (€/TEU-kontti).

Kustannukset (K_{Jk}) kontin junakuljetuksen osalta laskettiin seuraavasti:

$$K_{Jk} = V / V_p * s * K_{Jkm}, \text{ jossa}$$

V = volyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl), kuljetettava matka (km), kustannus junakilometriä kohti (€/km).

4.3.2 Junakuljetusten energiankulutus

Junakuljetusten energiankulutus, E_{Jr} , (kWh/vuosi) on laskettu eri vaiheiden summana seuraavasti:

$$E_{Jr} = E_{Jty} + E_{Jj} + E_{Jr} + E_{Jp} + E_{Jk}, \text{ jossa}$$

E_{Jty} = energiankulutus tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (kWh/vuosi), E_{Jj} = energiankulutus täyden kontin kuljetus junalla (kWh/vuosi), E_{Jr} = energiankulutus täyden kontin kuljetus kuorma-autolla (kWh/vuosi), E_{Jp} = TEU-konttien purkamisen energiankulutus (kWh/vuosi), E_{Jk} = energiankulutus kontin kuivasatamaoperaatiot (TEU-konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan), jossa

Tyhjän kontin kuljetus tehtaalle energiankulutus (E_{Jty}), (kWh/vuosi), on laskettu

$$E_{Jty} = (E_{Jty\%} / 100) * V / E_{Jtyk} * E_{Jtys} * E_{JtyE}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), $E_{Jty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), E_{Jtys} = matka keskimäärin (km), E_{Jtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/juna), E_{Jtyk} = energiankulutus (kWh/km).

Junakuljetusten energiankulutus (kWh/vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$E_{Jj} = V / V_p * s * K_{Jkm}, \text{ jossa}$$

V = volyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl)(kun volyymi alle junakohtaisen maksimikapasiteetin, laskelmissa enintään 50), kuljetettava matka (km), energiankulutus junakilometriä kohti (kWh/km).

Energiankulutus täyden kontin kuljetuksen kuorma-autolla (E_{Jr}) osalta (kWh/vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$E_{Jr} = E_{Jtäs} * E_{Jtäk} * V / E_{JtäK}, \text{ jossa}$$

$E_{Jtäs}$ = kuljetusmatka (km), $E_{JtäK}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto), $E_{Jtäk}$ = energiankulutus (kWh/km), V = volyymi (TEU-konttia/vuosi).

TEU-konttien purkamisen ja muiden satamaoperaatioiden osalta energiankulutus (E_{Jp}), (kWh/vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$E_{Jp} = V / P_{Jp} * E_{Jp}, \text{ jossa}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), P_{Jp} = kontinkäsittelyteho satamassa (TEU-konttia/tunti), E_{Jp} = kuorma-auton purkamisen energiankulutus (kW/h)

Energiankulutus kontin kuivasatamaoperaatioiden (TEU-konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan) osalta (E_{Jk}) (kWh/vuosi) on laskettu seuraavasti jossa

$$E_{Jk} = V / P_{Jks} * E_{Jks}, \text{ jossa}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), P_{Jks} = kontinkäsittelyteho kuivasatamassa (TEU-konttia/tunti), E_{Jks} = kuivasatamatoimintojen energiankulutus (kW/h)

4.3.3 Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt

Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt (H_{Jr}), (g CO₂ ekv. / vuosi) on laskettu laskelmissa seuraavasti:

$H_{Jr} = H_{Jty} + H_{Jtä} + H_{Jp} + H_{Jk} + H_{Jj}$, jossa

H_{Jty} = päästöt tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (g CO₂ ekv. / vuosi), $H_{Jtä}$ = hiilidioksidipäästöt täyden kontin kuljetus autolla (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{Jp} = TEU-konttien purkamisen hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{Jk} = kontin kuivasatamaoperaatiot (TEU-konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan) (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{Jj} = kontin kuljetus junalla hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi).

Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt (H_{Jr}), (g CO₂ ekv. / vuosi) on laskettu laskelmissa seuraavasti:

$H_{Jr} = H_{Jty} + H_{Jtä} + H_{Jp} + H_{Jk} + H_{Jj}$, jossa

H_{Jty} = päästöt tyhjiä TEU-konttien kuljetus tehtaalle (g CO₂ ekv. / vuosi), $H_{Jtä}$ = hiilidioksidipäästöt täyden kontin kuljetus autolla (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{Jp} = TEU-konttien purkamisen hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{Jk} = kontin kuivasatamaoperaatiot (TEU-konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan) (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{Jj} = kontin kuljetus junalla hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi).

Hiilidioksidipäästöt aiheutuen tyhjiä TEU-konttien kuljetuksesta tehtaalle (H_{Jty}), (g CO₂ ekv. / vuosi), on laskettu seuraavasti

$H_{Jty} = (H_{Jty\%} / 100) * V / H_{Jtyk} * H_{Jtys} * H_{JtyH}$

V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi), $E_{Jty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), H_{Jtys} = matka keskimäärin (km), H_{Jtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/juna), H_{JtyH} = Hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / km).

Hiilidioksidipäästöt junaketjussa täyden kontin kuljetuksen kuorma-autolla ($H_{Jtä}$) osalta (g CO₂ ekv. / vuosi) on laskettu seuraavasti:

$H_{Jtä} = H_{Jtäsr} / E_{Jtäk} * V * E_{JtäK}$, jossa

$E_{Jtäsr}$ = kuljetusmatka kuorma-autolla (km), $E_{Jtäk}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto), $H_{Jtäk}$ = kuorma-auton hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / km), V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi).

TEU-konttien purkamisen hiilidioksidipäästöt (H_{Jp}), (g CO₂ ekv. / vuosi) on laskettu seuraavasti:

$H_{Jp} = V / H_{Jp} * H_{Jp}$, jossa

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), P_{Jp} = kontinkäsittelyteho satamassa (TEU-konttia/tunti), E_{Jp} = junan purkamisen energiankulutus (g CO₂ ekv. / tunti)

Kontin kuivasatamaoperaatioiden (H_{Jk}), (TEU-konttien purkaminen autosta ja lastaaminen junaan) hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$H_{Jk} = V / P_{Jks} * H_{Jks}, \text{ jossa}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), P_{Jks} = kontinkäsittelyteho kuivasatamassa (TEU-konttia/tunti), H_{Jks} = kuivasatamatoimintojen energiankulutus (g CO₂ ekv. / tunti)

Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi), on laskettu seuraavasti:

$$H_{Jj} = V / V_p * s * H_{Jkm}, \text{ jossa}$$

V = volyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl)(kun volyymi alle junakohtaisen maksimikapasiteetin, laskelmissa enintään 50), kuljetettava matka (km), hiilidioksidiekvivalentit päästöt (g CO₂ ekv. / vuosi) junakilometriä kohti.

4.4 Laskelmien lähtöarvot

Tässä luvussa esitellään laskelmissa käytetyt arvot ja määritelmät. TEU-kontti on laskelmissa 2 TEUn 40 jalan TEU-kontti ja kuorma-auto on laskelmissa EUR5-luokan puoliperävaunu, jonka kulutus ja päästötiedoissa on käytetty 70% täyttöasteen tietoja. Ajoneuvojen päästö- ja kulutustiedot saatiin Lipasto-tietokannasta.

<i>Kuorma-auton energiankulutus</i>	3,8	<i>kWh/km,</i>
<i>Kuorma-auton päästöt</i>	949	<i>g CO₂ ekv/km, (Lipasto)</i>
<i>Kuljetuskustannukset kuorma-autolla</i>	0,70	<i>€/km</i>

Tyhjien TEU-konttien kuljetusten lähtöarvoina:

<i>tyhjinä tulevien TEU-konttien osuus</i>	30	<i>%</i>
<i>matka</i>	350	<i>km</i>
<i>kuorma-auton kapasiteetti</i>	1	<i>TEU-konttia/auto</i>
<i>kuorma-auton energiankulutus</i>	3,8	<i>kWh/km (Lipasto, 70%)</i>
<i>junan matka</i>	350	<i>km</i>
<i>junan kapasiteetti</i>	50	<i>TEU-konttia/juna</i>
<i>junan energiankulutus</i>	19,4	<i>kWh/km (Lipasto)</i>

<i>junan CO₂-kerroin</i>	4701	g CO ₂ ekv/km	
<i>junan kustannus</i>	10	€/km	
<i>(http://www.liikenteensuunta.fi/fi/artikkelit/tk/junien-liikennoinnin-kustannukset/)</i>			
<i>kontin kuljetus autolla</i>	0,7	€/km	
<i>kuljetusvolyymi</i>	14600	TEU-konttia/vuosi	
<i>TEU-konttilikin teho</i>	10	TEU-konttia/tunti	<i>Cargotec</i>
<i>TEU-konttilikin käyttökapasiteetti</i>	4000	h/vuosi	<i>Cargotec</i>
<i>kulutus</i>	20	litraa/tunti	<i>Cargotec</i>
<i>TEU-konttilikin yksikkökulutus</i>	2	litraa/TEU-kontti	
<i>TEU-konttilikin päästö</i>	5	kg CO ₂ ekv/TEU-kontti	

Rautatieliikenteen hintatietoa ei ole saatavilla. Forsmanin (2014) mukaan, kokojunan myyntihintaan vaikuttaa useampi muuttuja, mm. kuljetuserän kokonaispaino, vaunumäärä, vaunutyyppi, asiakkaan raiteistoratkaisut määrä- ja lähtöasemalla, kuljetustiheys, kuljetettava tuote ym.

Rautatieliikenteen kustannukset muodostuvat Iikkasen (2013) mukaan matka-ajasta ja matkan pituudesta riippuvista kustannuksista ja yleiskustannuksista. Matka-ajasta riippuvia kustannuksia ovat kaluston pääomakustannukset, junahenkilöstön työvoimakustannukset. Matkan pituudesta riippuvia kustannuksia ovat energia-kustannukset sekä kaluston kunnossapidon ja korjauksen kustannukset. Yleiskustannuksia ovat hallinnon, suunnittelun, lipunmyynnin yms. kustannukset.

Veturi maksaa noin 4 500 000 € ja sille kertyy käyttötunteja noin 3900 vuodessa. Tuntikustannus on noin 106 €. Vaunu maksaa keskimäärin 150 000 € ja sen vuotuiset käyttötunnit on noin 7200 tuntikustannuksen ollessa 1,2 €. Veturinkuljettajan tehollisen työajan työkustannuksiksi on Iikkasen (2013) mukaan arvioitu 98 e/tunti. Tavarajunan energian yksikkökustannukset ovat noin 0,31 €/km junan osalta eli noin 0,06 €/km vaunun osalta. Kunnossapidon osalta kustannukset ovat veturilla 0,9 €/km ja vaunujen osalta noin 0,025 €/km. Vaihtotyön kustannus on noin 17 €/vaunu. Yleiskustannukset ovat noin 15 % aika ja matkaperusteisten kustannusten ja vaihtotyökustannusten summasta. Näistä luvuista on laskettu sähköveturin 235 €:n tuntikustannukset (toisen ja kolmannen veturin kustannukset ovat noin 122 €/h). Ilman vaihtotöitä kilometrikustannus on noin 1,39 €/km. Ratamaksut (ja polttoaineverot) sähköjunalla ovat yhteensä noin 0,15 €/km. (Iikkänen, 2013)

Keskimääräisiksi veturikustannuksiksi on siten saatu 3,27 €/km ja vaunukustannuksiksi 0,15 €/km. Junakustannuksina on käytetty Rambollin laatimaa rautatiekustannusmallia, josta käytettiin näissä laskelmissa sähköveturin vetämän 40-vaunuisen junan tietoja. Tyypiksi valittiin Sr2-veturi (teho 6100 kW). Vaunujen

mallina on ollut neliakselinen vaunu. Nopeutena niissä on käytetty 70 km/h, sähkönhintana 6 senttiä/kWh. Kustannukset ilman veroja ja ratamaksuja olisivat n. 5,5 €/km ja niiden kanssa noin 10 €/km. (Iikkanen, 2013)

Rautatierahdin hinnat kansainvälisesti vaihtelevat. Suomessa rahtihintaa ei ole saatavilla, vaan laskelmissa on käytetty oletuksia. Kiinassa hinta oli (\$1.51 cents) tonnikiilometrilta ja maanteitse (\$6.59 senttiä) per tonnikiilometri, joka on siis yli nelinkertainen rautatierahdin hintaan nähden (Global Times, 2009). Isossa Britanniassa ratamaksut vaihtelevat esim. 150 mailin matkalla intermodaalijunan 800 tonnin kuorman £ 207:sta 2448 aggregaattijunan tonnin kuorman £ 1150:aan (Network Rail, 2014) ollen ensimmäisessä tapauksessa 1,1 €/km ja jälkimmäisessä 6,09 €/km.

Tyhjien TEU-konttien hankinnan osalta laskelmissa oletetaan paluukuljetuksien tapahtuvan vastaavalla käyttöasteella jolloin kustannus- energia ja ympäristövaikutukset voidaan kohdentaa täysin toisensuuntaisen kuljetuksen tuotteille. Lipaston lähteissä junakuljetusten tietoihin tämä on sisällytetty automaattisesti

TEU-konttien käsittelyn osalta tietoina käytettiin Kalmarin TEU-konttikurottajan (Kalmar DRF420-450S) tietoja. Sillä voidaan käsitellä täysiä kontteja nopeasti ja tehokkaasti kapeissakin tiloissa samalla.

auton purku ja junan lastaus

<i>teho</i>	10	<i>TEU-konttia/tunti</i>
<i>energiankulutus</i>	200	<i>kW/h</i>
<i>CO2 kerroin</i>	5000	<i>g/CO2 ekv./tunti</i>
<i>kustannus</i>	853	<i>€/tunti</i>

TEU-konttien purkaminen, säilytys ja laivaus

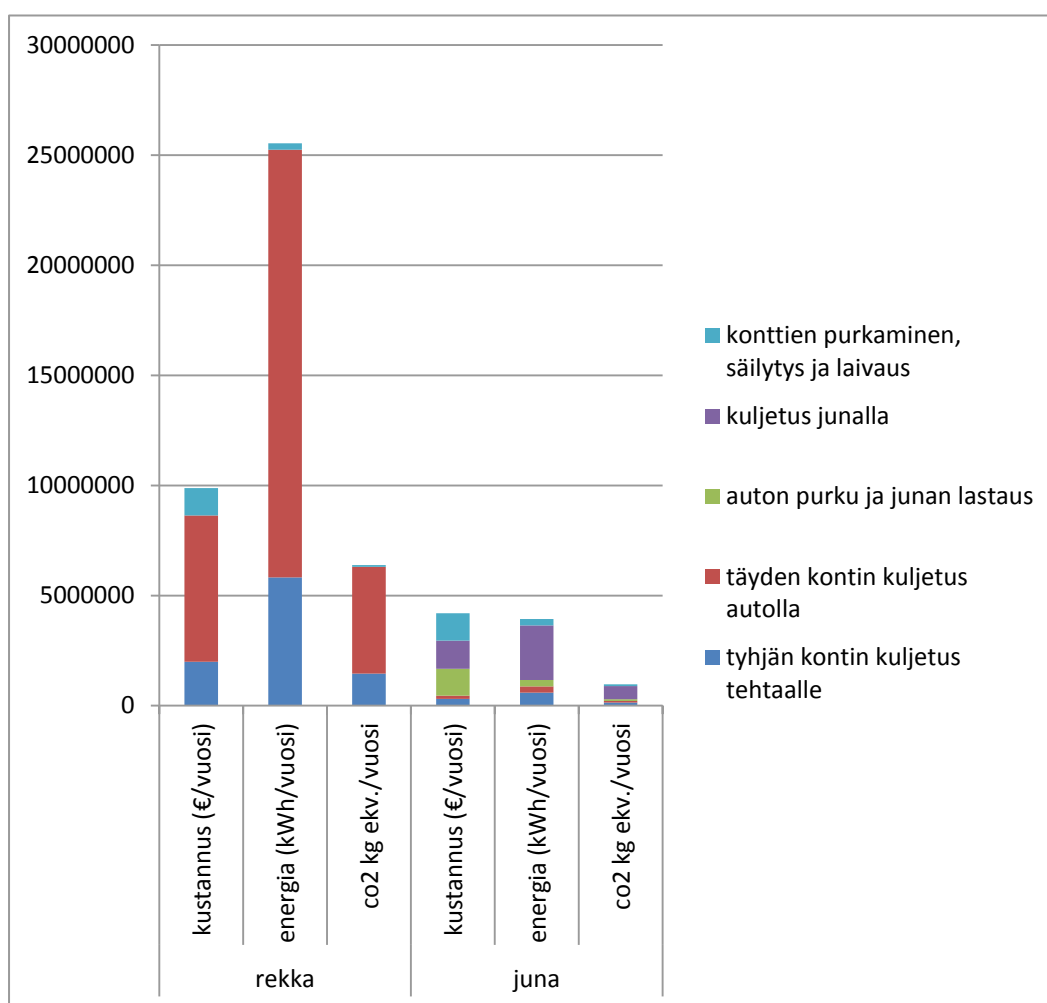
<i>kokonaisteho</i>	10	<i>TEU-konttia/tunti</i>
<i>energiankulutus</i>	200	<i>kW/h</i>
<i>CO2 kerroin</i>	5000	<i>g/CO2 ekv./tunti</i>
<i>tuntikustannus</i>	0	<i>€/tunti</i>
<i>TEU-konttikustannus</i>	85,30	<i>€/TEU-kontti, (Vuosaari hinnasto 1.1.2014)</i>
<i>päiväkustannus</i>	0	<i>€/päivä</i>

Laskelmissa käytettyihin TEU-konttikustannuksiin ei sisälly lämpösäädelyjen TEU-konttien maksua, tullausmaksua eikä yli viikon kenttävuokria.

4.5 Tulokset

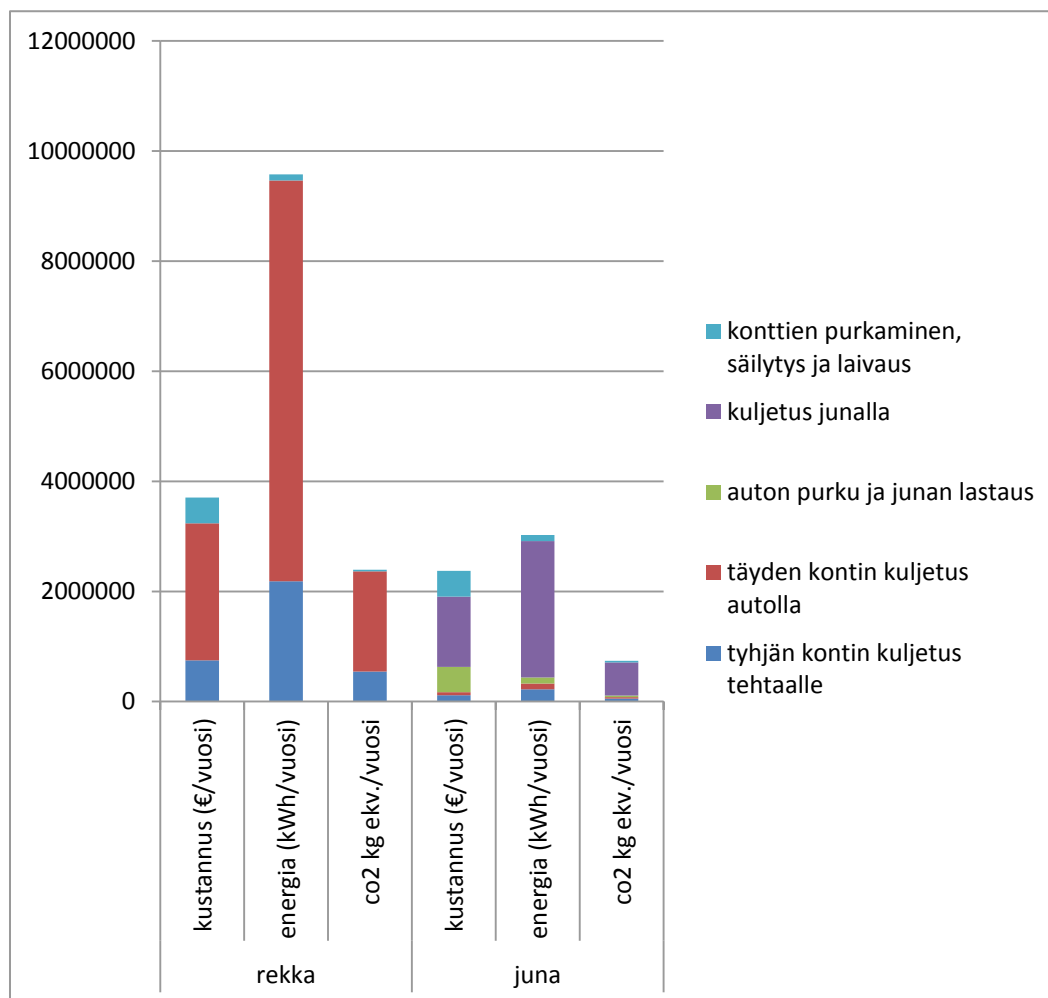
Tulokset laskettiin kustannusten, hiilidioksidipäästöjen, ja energian kulutuksen osalta eri TEU-konttivolyyymeille. Laskelmissa oletuksena on yksi päivittäinen juna volyymista (0-50 TEU-konttia/päivä) riippumatta. Oletus oli että junaan mahtuisi 50 TEU-konttia ja junan päästö-, -kustannus tai energiankulutus on sama riippumatta kuljettaako se 1 vai 50 TEU-konttia. PaluuTEU-konttien oletettiin saapuvan 50 TEU-konttia kerralla junaskenaariossa, joista edellä mainittu 30% olisi tyhjiä.

40:llä kontilla junan kustannukset olisivat 58 % ja päästöt noin 85 % pienemmät kuin kuorma-auton vastaavat (kuva 20).



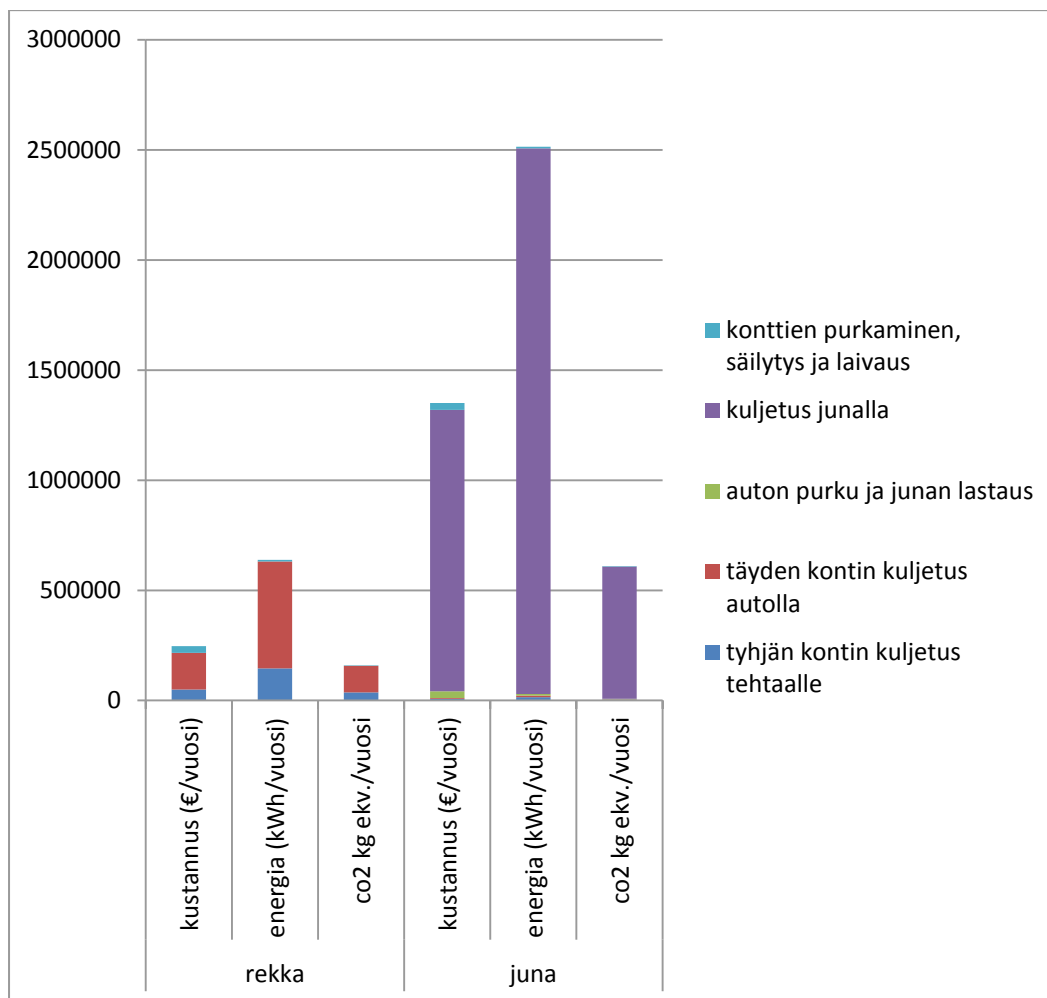
Kuva 20. Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 40 TEU-konttia/päivä

15:llä kontilla junan kustannukset olisivat 36 % ja päästöt noin 69 % pienemmät kuin kuorma-auton vastaavat (kuva 21).



Kuva 21. Kuorma-auto ja junaskaarioiden erot vaiheittain volyymillä 15 TEU-konttia/päivä

1:llä kontilla junan kustannukset olisivat nelinkertaiset ja päästöt noin kolminkertaiset kuorma-auton vastaaviin verrattuna (kuva 22).



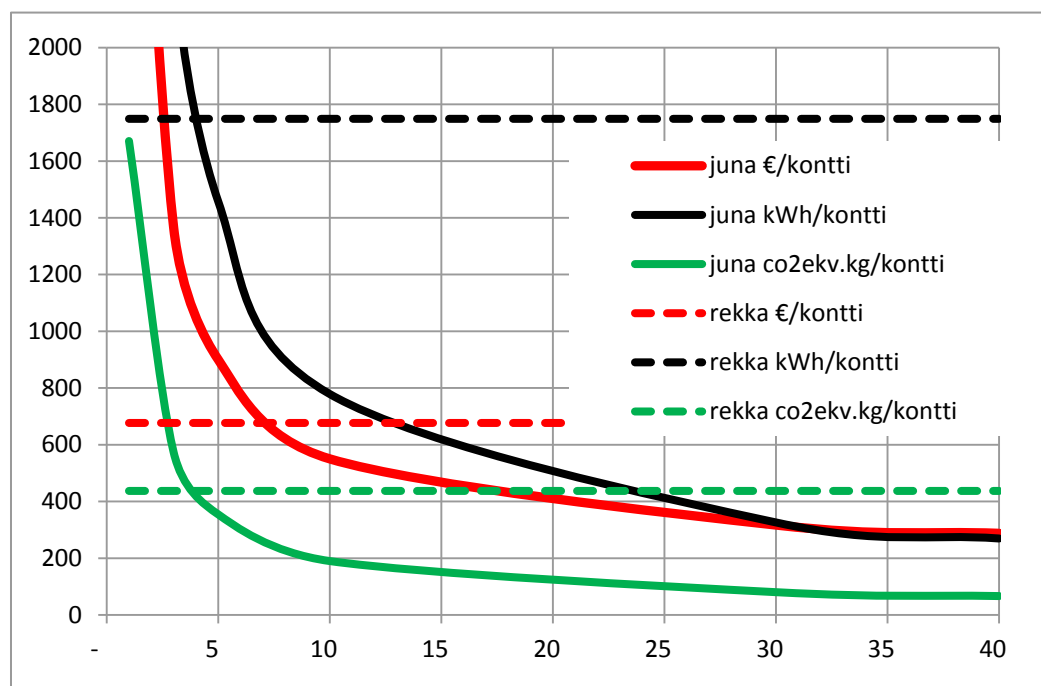
Kuva 22. Kuorma-auto- ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 1 TEU-kontti/päivä

Junakuljetukset osoittautuivat laskelmissa (Taulukko 9) taloudellisimmiksi kun junakohtaisten TEU-konttien määrä oli suurempi kuin 7. 8 kontin erissä kuljetettaessa TEU-konttikohtaiset kustannukset olivat kuorma-autolla 677 € ja junalla 638 €. Samaan aikaan energiankäytön osuudeksi muodostui 1749 kWh ja 948 kWh ja hiilidioksidivaikutuksen 437 kg CO₂ ekv ja 231 kg CO₂ ekv junan ollessa energiatehokkaampi ja hiilidioksidivaikutuksiltaan vähäisempi.

Taulukko 9. Kuorma-autoketjun ja junaketjun erot (lihavoituna volyymin paras vaihtoehto)

	Kuorma-auto			juna			
	€/ TEU-kontti	kWh/ TEU-kontti	CO2ekv.kg / TEU-kontti	0 €/ TEU-kontti	kWh/ TEU-kontti	CO2ekv.kg / TEU-kontti	
1	677	1749	437	1	3700	6890	1671
3	677	1749	437	3	1367	2363	574
5	677	1749	437	5	900	1458	354
10	677	1749	437	10	550	779	190
30	677	1749	437	30	317	326	80
40	677	1749	437	40	288	269	67

Energiatohokkuuden ja päästötöhdokkuuden osalta kriittiseksi pisteeksi muodostui 4 TEU-konttia (kuva 23).



Kuva 23. Päivittäisen TEU-konttivolyymin (x-akseli) vaikutus juna (katkoviivalla) - ja kuorma-autoketjun (kaksoisviivalla) TEU-konttikohtaiseen energiankulutukseen, hiilidioksidipäästöihin ja kustannuksiin reitillä Seinäjoki-Vuosaari

Kuorma-autoketjussa siirtokuljetuksen päästöksi muodostui 40 kontin päivävolyymillä ja 35 tonnin kontin täyttömäärällä 12,5 g CO₂ ekv/tuotekilo ja junaketjussa 1,9 g CO₂ ekv/tuotekilo. Energiankäytön suhteen erot olivat 0,050 kWh/tuotekilo kuorma-autoketjussa ja junaketjussa 0,008 kWh/tuotekilo. Kustannusten osalta junaketju oli 1,1 senttiä kilolta edullisempi verrattuna kuorma-autoketjun 0,019 sentin siirtokuljetuksen kustannukseen. 10 kontin volyymillä erot kapenivat mutta olivat silti junan eduksi (taulukko 10).

Taulukko 10. Kuorma-autoketjun ja junaketjun tuotekilokohtainen tarkastelu

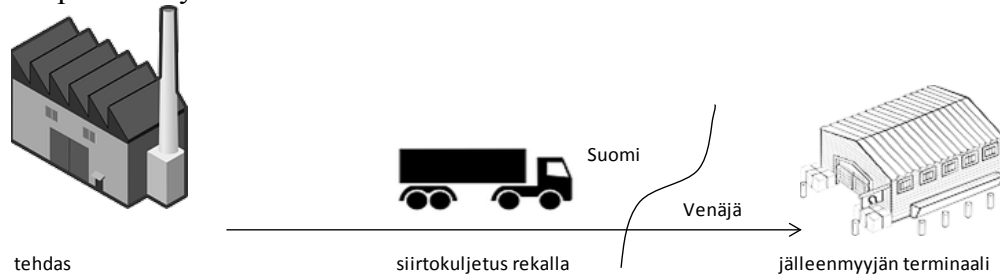
kontteja kpl/päivä		kustannus (€/kg)	energia (kWh/kg)	Päästöt CO ₂ g ekv/kg
	kuorma-			
40	auto	0,0193	0,0500	0,0125
40	juna	0,0082	0,0077	0,0019
	kuorma-			
20	auto	0,0193	0,0500	0,0125
20	juna	0,0107	0,0125	0,0031
	kuorma-			
10	auto	0,0193	0,0500	0,0125
10	juna	0,0157	0,0222	0,0054
	kuorma-			
1	auto	0,0193	0,0500	0,0125
1	juna	0,1057	0,1968	0,0477

Tarkastelut on tehty pendelijunamallilla. Pienempien vaunumäärien ollessa kyseessä taloudellisempiin ja ekologisempiin ratkaisuihin pääsisi vaunuryhmään käyttäen.

5 SIIRTOKULJETUS KUORMA-AUTOLLA TAI JUNALLA SEINÄJOELTA PIETARIIN

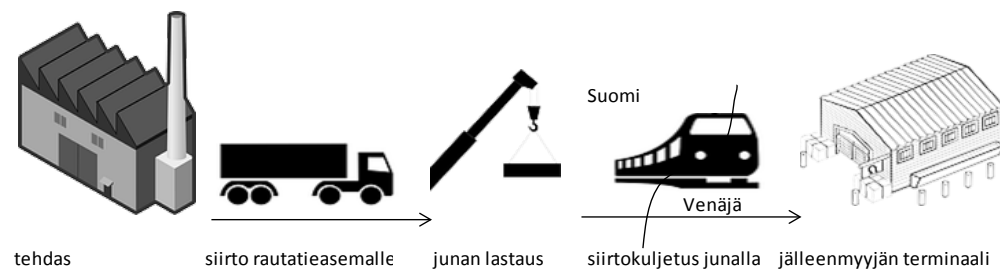
Hanne Ala-Harja

Tässä tutkimuksen osassa tavoitteena oli verrata junalla ja kuorma-autolla (kuva 24) tapahtuvan siirtokuljetuksen eroja välillä Seinäjoki-Pietari kustannusten, hiili- dioksidipäästöjen ja energiankulutuksen osalta. Tuotteena oli kontissa kuljetettava lämpösäädelytuote.



Kuva 24. Kuorma-autoketju

Kuljetus kuorma-autolla (kuva 24) tapahtui puoliperävaunuyhdistelmällä (myöhemmin kuorma-autoketju) tai sähköjunalla (kuva 25) (myöhemmin junaketju). Tarkastelu tehtiin tehtaalta Pietariin ns. siirtokuljetuksen osalta. Laskelmat tehtiin keväällä 2013.



Kuva 25. Junaketju

Kuorma-autoketjun vaiheita olivat tyhjän kontin kuljetus tehtaalle, jonka oletettiin tapahtuvan Helsingistä Seinäjoelle, kontinlastaus tehtaalla ja täyden kontin kuljetus autolla. Junaketjussa vaiheet olivat tyhjän kontin kuljetus Helsingistä tehtaalle, kontinlastaus, täyden kontin kuljetus autolla, kontin junakuljetus kotimaassa Kouvolaan ja sieltä Vainikkalan asemalle ja kontin kuljetus junalla Venäjällä. Venäjällä kuljetus tapahtuisi dieselveturilla Viipuriin (220 km), josta edelleen Pietariin (130 km) joko sähkö- tai dieselveturilla. (Ijäs, 2014)

Kontinlastaus jätettiin laskelmissa huomiotta, koska se on vaiheena samanlainen molemmissa skenaarioissa eikä siten aiheuta skenaarioiden välille eroja.

Skenaarioista laskettiin ketjujen kustannukset (€), (energiankulutus kWh/vuosi) ja (CO₂ ekv./vuosi). Tarkastelut tehtiin lopuksi myös TEU-konttikohtaisesti eli kustannukset (€/TEU-kontti), energiankulutus kWh/ TEU-kontti) ja (CO₂ ekv./ TEU-kontti).

Junan oletettiin lähtevän joka päivä riippumatta volyymistä riippumatta. Tavoitteena oli hakea kriittinen volyymi kustannusten, hiilidioksidipäästöjen ja energiankulutuksen osalta eli määritellä millä määrillä juna muuttuu järkevämmäksi ratkaisuksi kullakin mittarilla mitattuna. Laskelmat on tehty kilometriperusteisina tonnikilometri perusteisen laskentatavan sijasta. Tämä valinta tehtiin mm. tyhjien TEU-konttien kuljetusten, energia-, kustannus- ja hiilidioksidilaskelmien yhdenmukaisuuden takia.

5.1 Rautatieliikenne Pietariin

VR ei tarjoa lämpösäädelyjä kuljetuksia Venäjälle, mutta voivat ottaa kuljetettavaksi ja lastattavaksi asiakkaan hankkimia vaunuja. Fennia Rail (2014) odottaa Suomen ja Venäjän välisen yhdysliikenteen avautuvan kilpailulle lähitulevaisuudessa. Fennia Rail tulee antamansa informaation perusteella olemaan aktiivinen toimija myös yhdysliikenteen palvelujen tuottajana (Fennia Rail, 2014). VR:lle on tällä hetkellä mahdollista lastata Venäjän vientivaunut Kouvolan terminaalissa. Siellä vaihtotöitä tehdään ma-pe ja etäisyys sieltä on 93 km Vainikkalaan rajasemalle. Tuontijunan rajamuodollisuudet vievät Vainikkalassa tavallisesti noin 8 tuntia. VR operoi päivittäin Venäjälle. Container Trans Scandinavia on VR:n ja venäläisten operaattoreiden yhteisyritys. Refservice- yritys tarjoaa lämpösäädelyjä vaunuja. (Viinamäki, 2014).

Ijäksen (2014) mukaan lämpösäädelyssä kontissa on itsenäisesti toimiva gensetti, joka kuluttaa 3 l / h, ja voi tankata dieselillä tai polttoöljyllä. Tankin koko on n. 475 litraa, eli sitä riittää reiluun 6 vuorokauteen. Ongelmana, että generaattori on aina päällä, eli se ei sammuta itsensä sen jälkeen, kun tavoitelämpötila on saavutettu, vaikka kontissa oleva puhalluskone sammuu. Tämän takia kulutus on käytännössä aina vakio, olipa ulkolämpötila mikä tahansa, tai ovet avataan tai pidetään suljettuina.

Suomen ja Venäjän liikenteen yhdysliikenteen kuljetusehdoissa todetaan mm. että elintarvikkeita tai muita tuotteita, jotka tarvitsevat kuljetuksen aikana lämpötilan-

valvontaa tai tuuletusta, voidaan kuljettaa kuljetukseen osallistuvien rautateiden sopiessa asiasta ainoastaan sellaisissa konteissa, jotka on erityisesti varustettu tällaisten tavaroiden kuljetuksia varten. (VR Transpoint, 2014a)

Rautateiden omistamissa konteissa TEU-konttiin kuormatun yhden tavarakollin paino saa olla enintään 1500 kg. Lähettäjän on kuormattava tavara TEU-konttiin siten, että sen ovet voidaan vapaasti avata ja sulkea. (VR Transpoint, 2014a)

Kontit voidaan kuljettaa konteissa suorina vaunuina (vaunuun kuormatut kontit ovat menossa yhdelle määräasemalle yhdelle vastaanottajalle) tai suorina keräilyvaunuina (vaunuun kuormatut kontit ovat menossa yhdelle määräasemalle eri vastaanottajille) ilman kuljetuksen aikana tapahtuvaa lajittelua tai jos riittävää TEU-konttimäärää ei ole suoran vaunun tai suoran keräilyvaunun muodostamiseksi, tavarat voidaan kuljettaa konteissa siirtokuormattavina keräilyvaunuina. Lähettäjän on laadittava jokaiselle kuormatulle ja tyhjälle kontille rahtikirjan. Lisäksi kuormatut kontit otetaan kuljetettavaksi vain, jos niissä on lähettäjän sinetit. Sinetit laitetaan termosvaunussa ovien salpalaitteisiin vaunun kummallekin puolelle. Sinetointi tehdään lukkosineteillä, metallisilla nauhasineteillä tai lyijykeillä, joiden käyttöön on erilliset ohjeet. (VR Transpoint a ja d, 2014)

TEU-konttien kuljetuksesta säädetään mm. että TEU-konttien tulee olla pituudeltaan 20, 30 tai 40 jalkaa. Kuitenkin Sankt-Peterburg-Passazhirskej-Baltijskijiin asemalle ja Sankt-Peterburg-Passazhirskej-Finljandskijiin asemalle voi kuljettaa enintään 20 teun kontteja joiden bruttopaino on enintään 24,0 tonnia. Sankt-Peterburg-Tovarnyj-Vitebskijin ja Sankt-Peterburg-Varshavskijin asemalle voi kuljettaa 20:n ja 40:n teun kontteja bruttopainon ollessa 40. Asiakasraiteilla Pietarin asemilla toimii Okt. VR Transpoint (2014a ja c).

RZD:n omistamien, VR:lle rautateitse luovutettujen TEU-konttien viipymäajalta Suomen rataverkolla peritään VR:ltä yhteisesti sovitun suuruista käyttömaksua. Tavaroiden kuljetus konteissa Venäjältä Suomen kautta kolmansiin maihin on sallittu vain yksityisissä tai vuokratuissa konteissa. Helposti pilaantuvat tavarat kuljetetaan vaunuormalähettyksinä tai TEU-konttilähettyksinä (reefer-konteissa) Lähettäjän on liitettävä rahtikirjaan helposti pilaantuvien tavaroiden laatutodistus (VR Transpoint, 2014 b)

5.2 Kuorma-autoketjun laskelmat

Laskelmat kuorma-autokuljetusten osalta on jaoteltu kustannus- energiankulutus- ja hiilidioksidipäästölaskelmiin ja ne on esitetty seuraavissa luvuissa ”ylhäältä alaspäin”.

5.2.1 Kuorma-autokuljetusten kustannukset

Kuorma-autokuljetusten kustannukset K_{Rr} , (€/vuosi) laskettiin seuraavasti

$$K_{Rr} = K_{Rty} + K_{Rtä} \text{ jossa}$$

K_{Rty} = kustannukset tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (€/vuosi), $K_{Rtä}$ = kustannukset täyden kontin kuljetus autolla (€/vuosi),

Edelleen tyhjiä TEU-konttien kuljetukset on laskettu kilometriperusteisesti ja siinä on huomioitu tyhjiä TEU-konttien osuus seuraavasti:

$$K_{Rty} = (K_{Rty\%} / 100) * V / K_{Rtyk} * K_{Rtys} * K_{RtyK}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), $K_{Rty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), K_{Rtys} = matka keskimäärin (km), K_{Rtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/auto), K_{RtyK} = kustannus (€/km)

Täyden kontin kuljetuskustannus (€/vuosi) on laskettu matkan, kustannusten ja kuljetuskapasiteetin avulla seuraavasti

$$K_{Rtä} = K_{RtäS} * V / K_{RtäK} * K_{Rtäk} + K_{Rk}, \text{ jossa}$$

$K_{RtäS}$ = kuljetusmatka (km) (tässä huomioitu mahdollisesti tyhjän paluumatkan osuus), $K_{RtäK}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto), $K_{Rtäk}$ = kuljetuskustannus (€/km), V = volyymi (TEU-konttia/vuosi) ja K_{Rk} = kiinteä kuljetuskustannus (€/TEU-kontti).

5.2.2 Kuorma-autokuljetusten energiankulutus

$$E_{Rr} = E_{Rty} + E_{Rtä}, \text{ jossa}$$

E_{Rr} = kuorma-autokuljetusten energiankulutus (kWh/vuosi), E_{Rty} = tyhjän kontin kuljetus tehtaalle energiankulutus (kWh/vuosi), $E_{Rtä}$ = täyden kontin kuljetus autolla energiankulutus (kWh/vuosi),

Tyhjän kontin kuljetus tehtaalle energiankulutus (E_{Rty}), (kWh/vuosi), on laskettu

$$E_{Rty} = V / E_{Rtyk} * E_{Rtys} * E_{RtyE}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), (%), E_{Rtys} = matka keskimäärin (km), E_{Rtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/auto), E_{RtyE} = energiankulutus (kWh/km).

Täyden kontin energiankulutus (kWh/vuosi) on laskettu matkan, energiankulutuksen ja kuljetuskapasiteetin avulla seuraavasti

$$E_{Rt\grave{a}} = E_{Rt\grave{a}s} * E_{Rt\grave{a}k} * V / E_{Rt\grave{a}K}, \text{ jossa}$$

$E_{Rt\grave{a}s}$ = kuljetusmatka (km/sivu), $E_{Rt\grave{a}K}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto),
 $E_{Rt\grave{a}k}$ = energiankulutus (kWh/km), V =volyymi (TEU-konttia/vuosi).

5.2.3 Kuorma-autokuljetusten hiilidioksidipäästöt

Kuorma-autokuljetusten hiilidioksidipäästöt (H_{Rr}), (g CO2 ekv /vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$H_{Rr} = H_{Rty} + H_{Rt\grave{a}}, \text{ jossa}$$

H_{Rty} = tyhjän kontin kuljetus tehtaalle hiilidioksidipäästöt (g CO2 ekv /vuosi),
 $H_{Rt\grave{a}}$ = täyden kontin kuljetus autolla hiilidioksidipäästöt (g CO2 ekv /vuosi)

Tyhjän kontin kuljetus tehtaalle hiilidioksidipäästöt (H_{Rty}), (g CO2 ekv /vuosi), on laskettu seuraavasti:

$$H_{Rty} = V / H_{Rtyk} * H_{Rtys} * H_{RtyH}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), H_{Rtys} = matka keskimäärin (km), H_{Rtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/auto), H_{RtyK} = hiilidioksidiekvivalenttipäästö (g CO2 ekv./km)

Täyden kontin päästö (€/vuosi) on laskettu matkan, yksikköpäästöjen ja kuljetuskapasiteetin avulla seuraavasti

$$H_{Rt\grave{a}} = H_{Rt\grave{a}s} * H_{Rt\grave{a}k} * V / H_{Rt\grave{a}H}, \text{ jossa}$$

$H_{Rt\grave{a}s}$ = kuljetusmatka (km/sivu), $H_{Rt\grave{a}K}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto),
 $H_{Rt\grave{a}k}$ = yksikköpäästö(g CO2 ekv./km), V =volyymi (TEU-konttia/vuosi).

5.3 Junaketjun laskelmat

Kuorma-auto- ja junaketjujen laskentaperusteet ovat monilta osin samanlaisia, mutta junaketjussa vaiheita on enemmän. Siksi junaketjua koskevat laskelmat on esitetty kokonaisuudessaan tämän luvun alla.

5.3.1 Junakuljetusten kustannukset

$K_{Jr} = K_{Jty} + K_{Jtä} + K_{Jk} + K_{Jj}$, jossa

K_{Jr} = Junakuljetusten kustannukset (€/vuosi), K_{Jty} = kustannukset tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (€/vuosi), $K_{Jtä}$ = kustannukset täyden kontin kuljetus autolla (€/vuosi), K_{Js} = junakuljetuskustannus kotimaassa, K_{Jv} = junakuljetuskustannus Venäjällä.

Edelleen tyhjien TEU-konttien kuljetukset on laskettu kilometriperusteisesti ja siinä on huomioitu tyhjien TEU-konttien osuus seuraavasti:

$$K_{Jty} = V / K_{Jtyk} * K_{Jtys} * K_{Jtyk}$$

V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi), (%), K_{Jtys} = matka keskimäärin (km), K_{Jtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/juna), K_{Jtyk} = kustannus (€/km)

Täyden kontin kuljetuskustannus kuorma-autolla $K_{Jtä}$, (€/vuosi) on laskettu matkan, kustannusten ja kuljetuskapasiteetin avulla seuraavasti

$$K_{Jtä} = K_{JtäS} * K_{Jtäk} * V / K_{Jtäk}$$
, jossa

$K_{JtäS}$ = kuljetusmatka (km), $K_{Jtäk}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto), $K_{Jtäk}$ = kuljetuskustannus (€/km), V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi).

Kustannukset (K_{Js}) kontin junakuljetuksen osalta Suomessa laskettiin seuraavasti:

$$K_{Js} = V / V_p * s * K_{Jkm}$$
, jossa

V = volyyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl), kuljetettava matka (km), kustannus junakilometriä kohti Suomessa (€/km).

Kustannukset (K_{Jv}) kontin junakuljetuksen osalta Venäjällä laskettiin seuraavasti:

$$K_{Jv} = K_{JKv} + V / V_p * s * K_{Jkm}$$
, jossa

K_{JKv} = kiinteä kustannus (€/juna) Venäjän junassa, V = volyyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl), kuljetettava matka (km), kustannus junakilometriä kohti Venäjällä (€/km).

5.3.2 Junakuljetusten energiankulutus

Junakuljetusten energiankulutus, E_{Jr} , (kWh/vuosi) on laskettu eri vaiheiden summana seuraavasti:

$$E_{Jr} = E_{Jty} + E_{Jj} + E_{Jr} + E_{Jp} + E_{Jk}, \text{ jossa}$$

E_{Jty} = energiankulutus tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (kWh/vuosi), E_{Jj} = energiankulutus täyden kontin kuljetus junalla (kWh/vuosi), E_{Jr} = energiankulutus täyden kontin kuljetus kuorma-autolla (kWh/vuosi), E_{Js} = junakuljetuksen energiankulutus Suomessa (kWh/vuosi), E_{Jv} = junakuljetuksen energiankulutus Venäjällä, jossa

Tyhjän kontin kuljetus tehtaalle energiankulutus (E_{Jty}), (kWh/vuosi), on laskettu

$$E_{Jty} = V / E_{Jtyk} * E_{Jtys} * E_{JtyE}$$

V = volyymi (TEU-konttia/vuosi), E_{Jtys} = matka keskimäärin (km), E_{Jtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/juna), E_{JtyE} = energiankulutus (kWh/km).

Junakuljetusten energiankulutus (kWh/vuosi) on laskettu sekä Venäjän että Suomen junakuljetusten osalta seuraavasti:

$$E_{Jj} = (V / V_p * s * K_{JDkm}) + (V / V_p * s * K_{JSkm}), \text{ jossa}$$

V = volyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl) (kun volyymi alle junakohtaisen maksimikapasiteetin, laskelmissa enintään 50), kuljetettava matka (km), K_{JSkm} = energiankulutus junakilometriä kohti (kWh/km) sähköjunalla, K_{JDkm} = energiankulutus junakilometriä kohti (kWh/km) dieseljunalla.

Energiankulutus täyden kontin kuljetuksen kuorma-autolla (E_{Jr}) osalta (kWh/vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$E_{Jr} = E_{Jtäs} * E_{Jtäk} * V / E_{JtäK}, \text{ jossa}$$

$E_{Jtäs}$ = kuljetusmatka (km), $E_{JtäK}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto), $E_{Jtäk}$ = energiankulutus (kWh/km), V = volyymi (TEU-konttia/vuosi).

5.3.3 Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt

Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt (H_{Jr}), (g CO₂ ekv. / vuosi) on laskettu laskelmissa seuraavasti:

$H_{Jr} = H_{Jty} + H_{Jtä} + H_{JS} + H_{JV}$, jossa

H_{Jty} = päästöt tyhjän kontin kuljetus tehtaalle (g CO₂ ekv. / vuosi), $H_{Jtä}$ = hiilidioksidipäästöt täyden kontin kuljetus autolla (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{JS} = kontin kuljetus Suomessa junalla hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi), H_{JV} = kontin kuljetus Venäjällä junalla hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / vuosi), jossa

Päästöt tyhjien TEU-konttien kuljetus tehtaalle H_{Jty} , (g CO₂ ekv. / vuosi) laskettiin seuraavasti:

$$H_{Jty} = V / H_{tyk} * H_{Jtys} * H_{JtyH}$$

V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi), $E_{Jty\%}$ = tyhjänä saapuvien TEU-konttien osuus (%), H_{Jtys} = matka keskimäärin (km), H_{Jtyk} = kapasiteetti (TEU-konttia/juna), H_{JtyH} = Hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / km).

Hiilidioksidipäästöt junaketjussa täyden kontin kuljetuksen kuorma-autolla ($H_{Jtä}$) osalta (g CO₂ ekv. / vuosi) on laskettu seuraavasti:

$$H_{Jtä} = H_{Jtäsr} / E_{Jtär} * V * E_{JtäK}$$
, jossa

$E_{Jtäsr}$ = kuljetusmatka kuorma-autolla (km), $E_{Jtär}$ = kuljetuskapasiteetti (TEU-konttia/auto), $H_{JtäK}$ = kuorma-auton hiilidioksidipäästöt (g CO₂ ekv. / km), V = volyyymi (TEU-konttia/vuosi).

Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt Venäjällä H_{JV} , (g CO₂ ekv. / vuosi), on laskettu seuraavasti:

$$H_{JV} = V / V_p * s_v * H_{JkmV}$$
, jossa

V = volyyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl)(kun volyyymi alle junakohtaisen maksimikapasiteetin, laskelmissa enintään 50), junalla kuljetettava matka (km) Suomessa, hiilidioksidiekvivalentit päästöt (g CO₂ ekv. / vuosi) junakilometriä kohti Venäjällä, jossa

$$H_{JV} = S_s * H_{JSkm} + S_D * H_{JDkm}$$

H_{JSkm} = päästöt junakilometriä kohti (g CO₂ ekv. / km) sähköjunalla, H_{JDkm} = päästöt junakilometriä kohti (g CO₂ ekv. / km) dieseljunalla, S_s = matka dieseljunalla (km/vuosi), S_D = matka sähköjunalla (km/vuosi)

Junakuljetusten hiilidioksidipäästöt Suomessa H_{JS} , (g CO₂ ekv. / vuosi), on laskettu seuraavasti:

$H_{JS} = V / V_p * s_s * H_{JkmS}$, jossa

V= volyymi, eli TEU-konttien määrä vuodessa (kpl/vuosi), V_p = volyymi, TEU-konttien määrä päivässä (kpl)(kun volyymi alle junakohtaisen maksimikapasiteetin, laskelmissa enintään 50), junalla kuljetettava matka (km) Suomessa, hiilidioksidiekvivalentit päästöt (g CO₂ ekv. / vuosi) junakilometriä kohti Suomessa.

5.4 Laskelmien lähtöarvot

Tässä luvussa esitellään laskelmissa käytetyt arvot ja määritelmät. TEU-kontti on laskelmissa 2 TEUn 40 jalan TEU-kontti ja kuorma-auto on laskelmissa EUR5-luokan puoliperävaunu, jonka kulutus ja päästötiedoissa on käytetty 70% täyttöasteen tietoja. Ajoneuvojen päästö- ja kulutustiedot saatiin Lipasto-tietokannasta ja energiankulutus ja päästötietoihin lisättiin 10 % lämpösäätelytarpeen takia.

<i>Kuorma-auton energiankulutus</i>	4,18	<i>kWh/km</i>
<i>Kuorma-auton päästöt</i>	1044	<i>g CO₂ ekv/km, (Lipasto+ 10 %)</i>
<i>Kuljetuskustannukset kuorma-autolla</i>	1,3	<i>€/km</i>

Tyhjien TEU-konttien kuljetusten lähtöarvoina:

<i>tyhjinä tulevien TEU-konttien osuus</i>	100	<i>%</i>
<i>matka</i>	350	<i>km</i>
<i>kuorma-auton kapasiteetti</i>	1	<i>TEU-konttia/auto</i>
<i>kuorma-auton energiankulutus</i>	4,18	<i>kWh/km (Lipasto, 70%)</i>
<i>kuorma-auton matka junaketjussa</i>	360	<i>km</i>
<i>kuorma-auton matka kuorma-autoketjussa</i>	620	<i>km</i>
<i>junan matka Suomessa</i>	110	<i>km</i>
<i>junan matka Venällä sähköllä</i>	130	<i>km</i>
<i>junan matka Venällä dieselillä</i>	220	<i>km</i>
<i>kuorma-auton täytenä kulkema matka</i>	620	<i>km</i>
<i>junan kapasiteetti</i>	50	<i>TEU-konttia/juna</i>
<i>sähköjunan energiankulutus</i>	21,3	<i>kWh/km (Lipasto)</i>
<i>dieseljunan energiankulutus</i>	60	<i>kWh/km</i>
<i>sähköjunan CO₂-kerroin</i>	5 171	<i>g CO₂ekv/km (Lipasto)</i>
<i>dieseljunan CO₂-kerroin</i>	14 568	<i>g CO₂ekv/km</i>
<i>junan kustannus</i>	10	<i>€/km</i>
<i>(http://www.liikenteensuunta.fi/fi/artikkelit/tk/junien-liikennoinnin-kustannukset/)</i>		
<i>kontin kuljetus autolla</i>	1,3	<i>€/km</i>
<i>kuljetusvolyyymi</i>	14600	<i>TEU-konttia/vuosi</i>

Junakustannuksina on käytetty Rambollin laatimaa rautatiekustannusmallia, josta käytettiin näissä laskelmissa sähköveturin vetämän 40-vaunuisen junan tietoja. Tiedot perustuvat tyyppin Sr2-veturiin (teho 6100 kW). Vaunujen mallina on ollut neliakselinen vaunu. Nopeutena niissä on käytetty 70 km/h, sähkönhintana 6 senttiä/kWh. Kustannukset ilman veroja ja ratamaksuja olisivat n. 5,5 €/km ja niiden kanssa noin 10 €/km. Paluukuljetusten osuus otetaan huomioon muuttamalla matkaa. Tyhjät kontit oletetaan hankittavan Helsingistä

auton purku ja junan lastaus

<i>teho</i>	<i>10</i>	<i>TEU-konttia/tunti</i>
<i>energiankulutus</i>	<i>200</i>	<i>kW/h</i>
<i>CO2 kerroin</i>	<i>50000</i>	<i>g/CO2 ekv./tunti</i>
<i>kustannus</i>	<i>880</i>	<i>€/tunti</i>

5.5 Tulokset

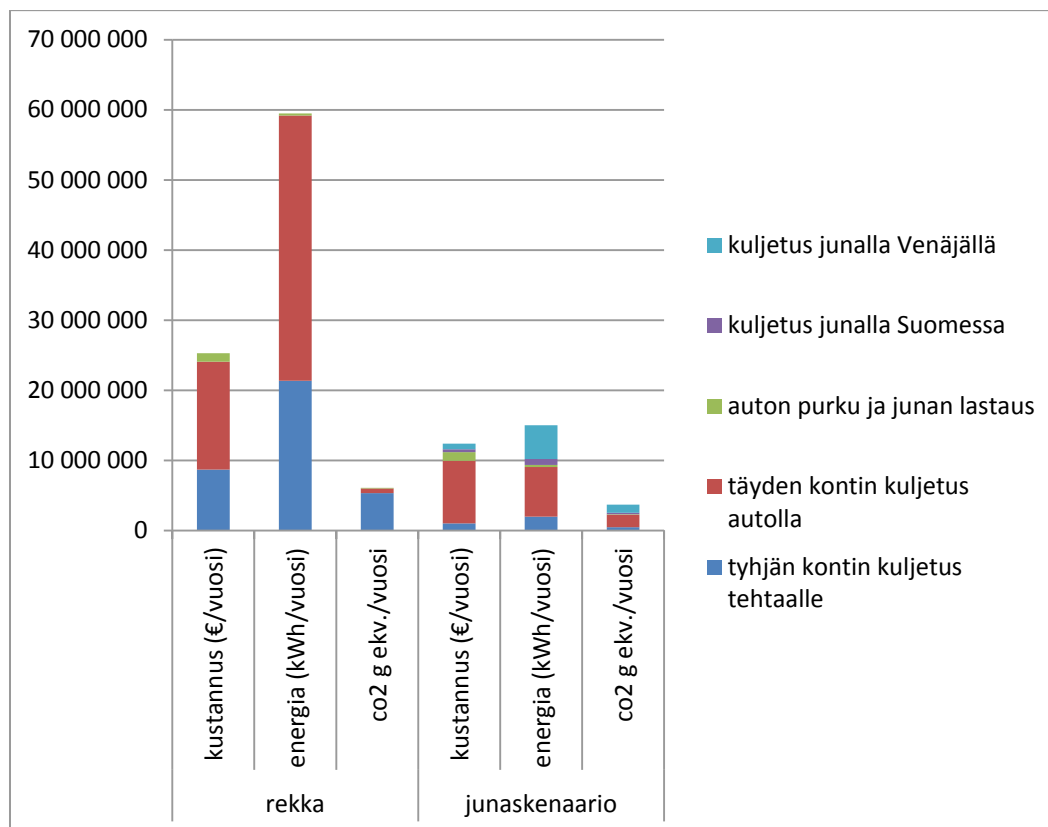
Tulokset laskettiin kustannusten, hiilidioksidipäästöjen, ja energian kulutuksen osalta eri TEU-konttivolyyymille 40 TEU-konttia päivässä. Laskelmissa oletuksena on yksi päivittäinen juna volyyymista (0-50 TEU-konttia/päivä) riippumatta. Oletus oli että junaan mahtuisi 50 TEU-konttia ja junan päästö, -kustannus tai energiankulutus on sama riippumatta kuljettaako se 1 vai 50 TEU-konttia. Paluu-TEU-konttien oletettiin saapuvan tyhjinä 50 TEU-konttia kerralla junaskenaariosa ja yksittäin kuorma-autoskenaariossa.

40 kontin päivävolyymillä TEU-konttikohtaiset kustannukset olivat 1733 kuorma-autolla ja junalla 848 € päästöjen ja energiankulutuksen ollessa kuorma-autolla 6 083 kg / 59 489 kWh ja junalla 3697 kg / 15 022 kWh (taulukko 11).

Taulukko 11. Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyyymillä 40 TEU-konttia/päivä

	rekka			junaskenaario		
	kustannus (€/vuosi)	energia (kWh/vuosi)	co2 g ekv./vuosi	kustannus (€/vuosi)	energia (kWh/vuosi)	co2 g ekv./vuosi
tyhjän kontin kuljetus tehtaalle	8 687 000	21 359 800	5 334 329	1 022 000	1 982 680	480 442
täyden kontin kuljetus autolla	15 388 400	37 837 360	675 696	8 935 200	7 074 065	1 766 824
auton purku ja junan lastaus	1 224 940	292 000	73 000	1 224 940	292 000	73 000
kuljetus junalla Suomessa	0	0	0	401 500	855 195	207 616
kuljetus dieseljunalla Venäjällä	0	0	0	803 000	4 818 518	1 169 814
kuljetus sähköjunalla Venäjällä	0	0	0	18 980 000	40 427 400	9 814 747 800
yhteensä	25 300 340	59 489 160	6 083 025	12 386 640	15 022 458	3 697 696
konttikohtainen	1 733	4 075	417	848	1 029	253

Erot junaskenaarion eduksi ovat selkeät kaikilla käytetyillä mittareilla (kuva 26)

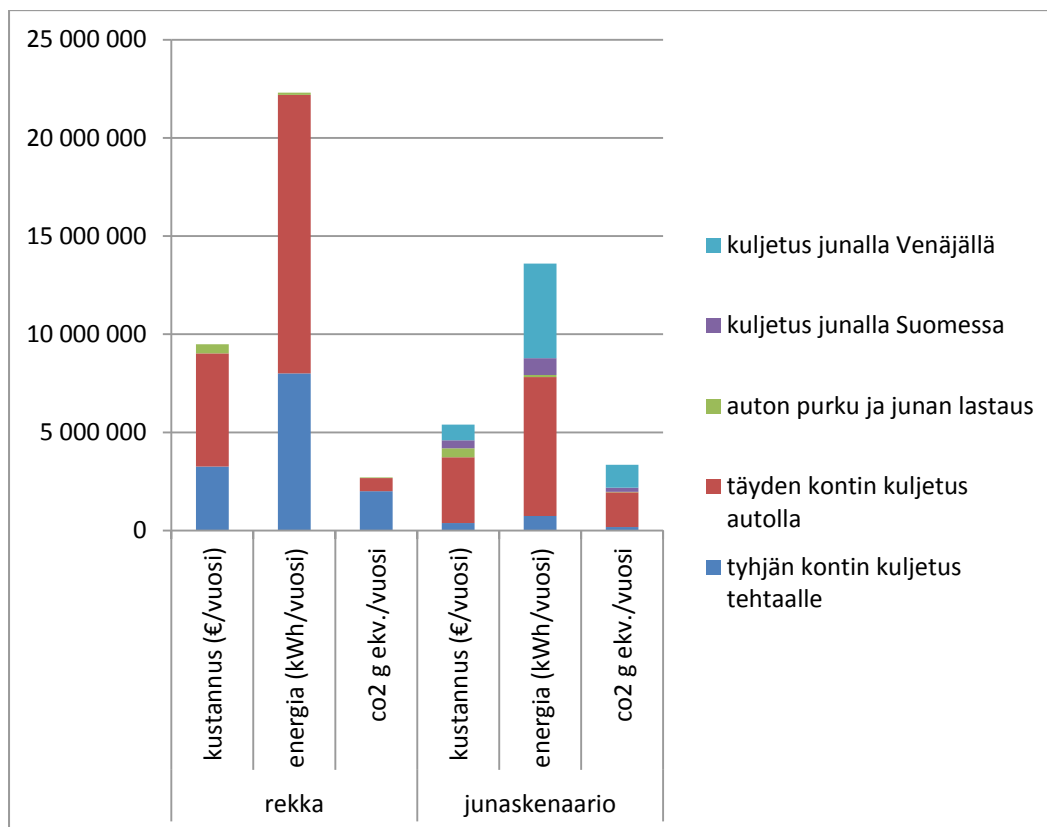


Kuva 26. Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 40 TEU-konttia/päivä

15 kontin päivävolyymillä TEU-konttikohtaiset kustannukset olivat junaskenaariossa 986 € päästöjen ja energiankulutuksen ollessa 612 kg / 2484 kWh (taulukko 12 ja kuva 27). Kuorma-autolla TEU-konttikohtaisissa tuloksissa ei ole eroa.

Taulukko 12. Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 15 TEU-konttia/päivä

	rekka			junaskenaario		
	kustannus (€/vuosi)	energia (kWh/vuosi)	co2 g ekv./vuosi	kustannus (€/vuosi)	energia (kWh/vuosi)	co2 g ekv./vuosi
tyhjän kontin kuljetus tehtaalle	3 257 625	8 009 925	2 000 373	383 250	743 505	180 166
täyden kontin kuljetus autolla	5 770 650	14 189 010	675 696	3 350 700	7 074 065	1 766 824
auton purku ja junan lastaus	459 353	109 500	27 375	459 353	109 500	27 375
kuljetus junalla Suomessa	0	0	0	401 500	855 195	207 616
kuljetus dieseljunalla Venäjällä	0	0	0	803 000	4 818 518	1 169 814
kuljetus sähköjunalla Venäjällä	0	0	0	7 117 500	15 160 275	3 680 530 425
yhteensä	9 487 628	22 308 435	2 703 444	5 397 803	13 600 783	3 351 794
konttikohtainen	1 733	4 075	494	986	2 484	612

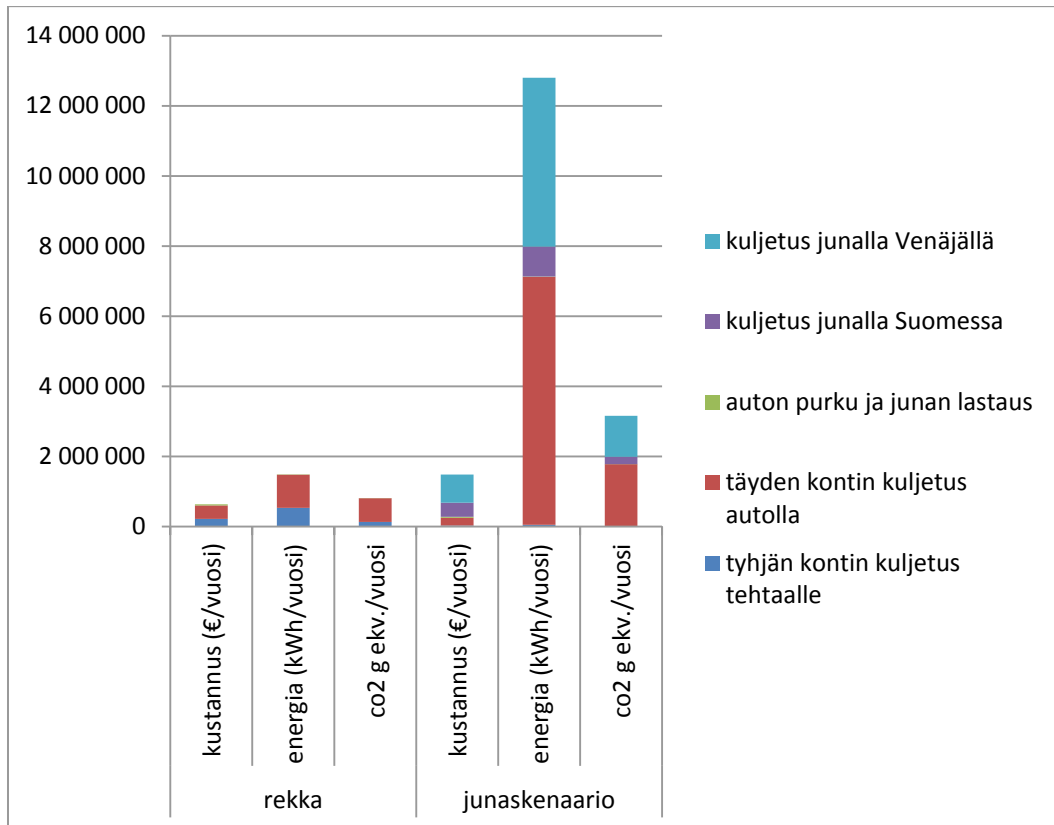


Kuva 27. Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 15 TEU-konttia/päivä

Yhdenkontin päivävolyymillä TEU-konttikohtaiset kustannukset olivat junaskenaariossa 1733 € päästöjen ja energiankulutuksen ollessa 8652 kg / 35 081 kWh (taulukko 13 ja kuva 28).

Taulukko 13. Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 1 TEU-kontti/päivä

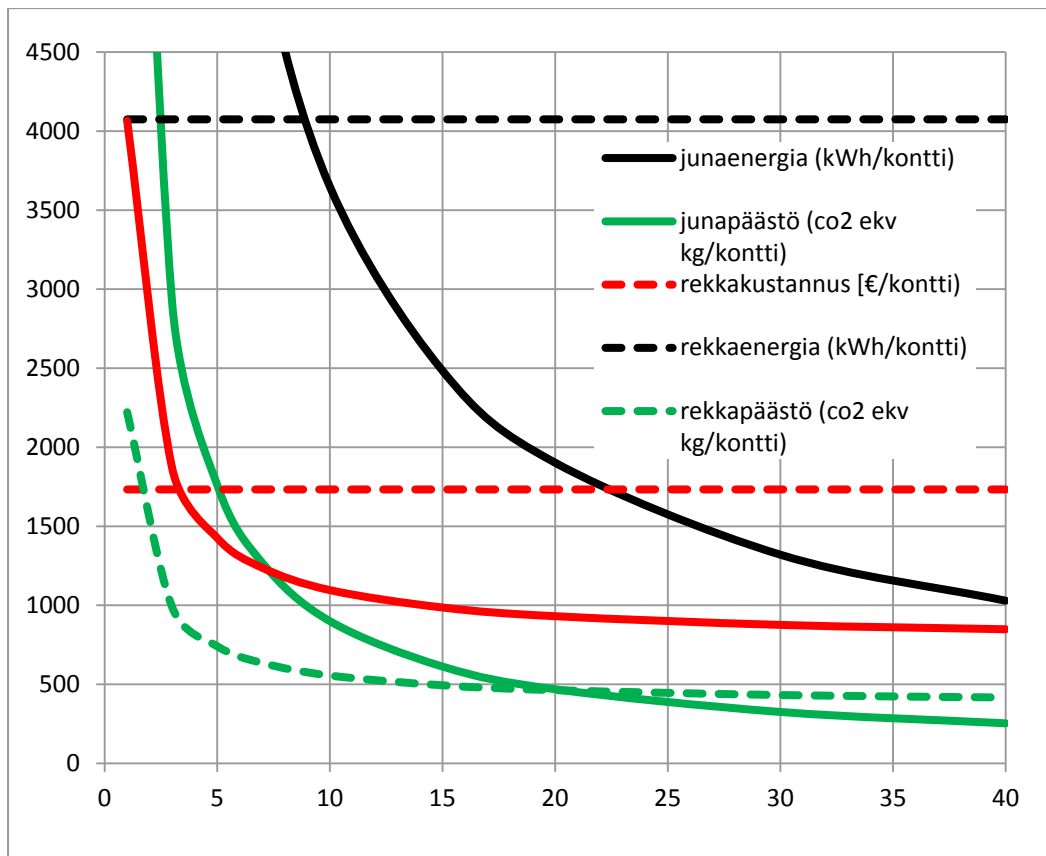
	rekka			junaskenaario		
	kustannus (€/vuosi)	energia (kWh/vuosi)	CO2 g ekv./vuosi	kustannus (€/vuosi)	energia (kWh/vuosi)	CO2 g ekv./vuosi
tyhjän kontin kuljetus tehtaalle	217 175	533 995	133 358	25 550	49 567	12 011
täyden kontin kuljetus autolla	384 710	945 934	675 696	223 380	7 074 065	1 766 824
auton purku ja junan lastaus	30 624	7 300	1 825	30 624	7 300	1 825
kuljetus junalla Suomessa	0	0	0	401 500	855 195	207 616
kuljetus dieseljunalla Venäjällä	0	0	0	803 000	4 818 518	1 169 814
kuljetus sähköjunalla Venäjällä	0	0	0	474 500	1 010 685	245 368 695
yhteensä	632 509	1 487 229	810 879	1 484 054	12 804 645	3 158 090
konttikohtainen	1 733	4 075	2 222	4 066	35 081	8 652



Kuva 28. Kuorma-auto ja junaskenaarioiden erot vaiheittain volyymillä 1 TEU-kontti/päivä

Junakuljetukset osoittautuivat laskelmissa taloudellisimmiksi kun kuljetettavien TEU-konttien määrä oli vähintään 4. Tällöin neljän kontin erissä kuljetettaessa TEU-konttikohtaiset kustannukset olivat kuorma-autolla 1733 € ja junalla 1591 €. Samaan aikaan energiankäytön osuudeksi muodostui 4075 kWh ja 8887 kWh ja hiilidioksidivaikutuksen 833 kg CO2 ekv ja 2192 kg CO2 ekv junan kuluttaessa enemmän energiaa ja tuottaessa enemmän päästöjä.

Energiatohokkuuden osalta kriittiseksi pisteeksi muodostui 9 TEU-konttia ja hiilidioksiditehokkuuden kannalta 21 TEU-konttia (kuva 29).



Kuva 29. Päivittäisen TEU-konttivolyymin (x-akseli) vaikutus juna (katkoviivalla) - ja kuorma-autoketjun (kaksoisviivalla) TEU-konttikohtaiseen energiankulutukseen, hiilidioksidipäästöihin ja kustannuksiin reitillä Seinäjoki-Pietari.

6 TUONTIKULJETUKSET SATAMISTA HAJAUTETUSTI KUORMA-AUTOLLA TAI KESKITETYSTI JUNALLA

Hanne Ala-Harja

Tässä tutkimuksen osassa tavoitteena oli arvioida läntisistä satamista Etelä-Pohjanmaalle tuotavan irtotavaran ekotehokkuutta. Ensimmäisessä laskelmassa oletettiin tuonnin hajautuneen läntisten Suomen satamien toiminta-asteen mukaisesti eri satamien kautta kulkeväksi. Satamista kuljetus määränpäähän tapahtui täysperävaunuajoneuvolla. Toisessa laskelmassa oletettiin irtotavaran tuonnin keskittyvän yhteen satamaan ja sieltä siirtokuljetus rautateitse Etelä-Pohjanmaalle. Vertailtavana olivat kustannukset ja hiilidioksidipäästöt.

Tarkasteltaviksi satamiksi valittiin läntisen Suomen satamat Kokkola, Vaasa, Kaskinen, Kalajoki, Uusikaupunki ja Pori. Etelä-Pohjanmaata edustavaksi toimituspaikaksi valittiin Seinäjoki.

Rajaukset ja oletuksia tehtiin laskelmien osalta. Tarkasteltaviksi satamiksi valittiin läntisen Suomen satamat ja tarkasteltavaksi määräksi 175 000 000 kg /vuosi. Tuonnin oletettiin jakautuvan kokonaistuontimäärän mukaisesti eri satamiin taulukon 14 mukaisesti. Kokkolan ja Vaasan tuonnin osuudet tarkasteltavien satamien osalta on 82,7 %. Kokkolan osuutena tarkasteltiin noin 129 miljoonaa kiloa, Vaasan osalta 16 miljoonaa kiloa, Kaskisten ja Uudenkaupungin osalta 11 miljoonaa kiloa ja Kalajoen osalta 8 miljoonaa kiloa.

Taulukko 14. Tuonti satamittain

	Kokkola	vaasa	kaskinen	kalajoki	uusikaupunki	pori	yht
osuus tuonnista %	74	9	6	5	6	0	
määrä (1000kg)	128663	16175	11028	8087	11028	18	175000
etäisyys tehtaasta (km)	142	81	153	209	274	172	

Skenaarioita verrattiin vuosittaisten kustannusten ja hiilidioksidipäästöjen osalta ja arvioitiin skenaarion kannattavuutta eri kustannustiedoilla

6.1 Kuorma-autotuonti hajautetusti eri satamista

6.1.1 Hajautetun mallin kustannukset

Kuljetusten kustannukset laskettiin matkan, massan ja yksikkökustannusten tulona seuraavasti:

$$K_x = \sum v_x * s_x * k_{kmx}, \text{ jossa}$$

v = vuosittainen volyymi reitillä x (tonnia/vuosi), s = matka reitillä x (km), k_{km} = keskimääräinen yksikkökustannus reitillä x jossa huomioitu yhdensuuntaiset kuljetukset (€/tonnikilometri)

6.1.2 Hajautetun mallin hiilidioksidipäästöt

Kuljetusten kustannukset laskettiin matkan, massan ja yksikköpäästöjen tulona seuraavasti:

$$K_x = \sum v_x * s_x * k_{kmx}, \text{ jossa}$$

v = vuosittainen volyymi reitillä x (tonnia/vuosi), s = matka reitillä x (km) sisältäen mahdollisen tyhjän kuljetuksen, k_{km} = yksikköpäästö jossa huomioitu yhdensuuntaiset kuljetukset (g CO₂ ekv /tonnikilometri)

6.2 Junatuonti keskitetysti yhdestä satamasta

6.2.1 Keskitetyn mallin kustannukset

$$K_j = v_j * s_j * k_{jkm}, \text{ jossa}$$

v_j = vuosittainen volyymi satamaan (tonnia/vuosi), s_j = matka reitillä (km), k_{jkm} = keskimääräinen yksikkökustannus reitillä jossa huomioitu yhdensuuntaiset kuljetukset (€/tonnikilometri)

6.2.2 Keskitetyn mallin hiilidioksidipäästöt

Keskitetyn kuljetuksen päästöt laskettiin matkan, massan ja yksikköpäästöjen tulona seuraavasti:

$K_j = v_j * s_j * k_{jkm}$, jossa

v_j = vuosittainen volyymi junalla reitillä (tonnia/vuosi), s_j = junamatka reitillä (km) sisältäen mahdollisen tyhjän kuljetuksen, k_{jkm} = yksikköpäästö jossa huomioitu yhdensuuntaiset kuljetukset (g CO₂ ekv /tonnikilometri)

6.3 Lähtöarvot

Laskelmissa käytettiin lähtöarvoina:

<i>tuontimäärä</i>	<i>175 000 tonnia/vuosi,</i>	
<i>junaliikenne (sähkö)</i>		
<i>toimituseräkoko</i>	<i>1500</i>	<i>1000 kg/toimitus</i>
<i>kustannus</i>	<i>20</i>	<i>€/km</i>
<i>päästö</i>	<i>4701</i>	<i>g CO₂ eqv./km</i>
<i>kuorma-autoliikenne</i>		
<i>toimituseräkoko</i>	<i>40</i>	<i>1000 kg/toimitus</i>
<i>kustannus</i>	<i>1,7</i>	<i>€/km</i>
<i>päästö</i>	<i>1260</i>	<i>g CO₂ eqv./km</i>
<i>päästö</i>	<i>32</i>	<i>g CO₂ eqv./tnkm</i>
<i>laivan kapasiteetti</i>	<i>1000</i>	<i>tonnia</i>

Rautatieliikenteen kustannukset muodostuvat Iikkasen (2013) mukaan matka-ajasta ja matkan pituudesta riippuvista kustannuksista ja yleiskustannuksista. Matka-ajasta riippuvia kustannuksia ovat kaluston pääomakustannukset, junahenkilöstön työvoimakustannukset. Matkan pituudesta riippuvia kustannuksia ovat energia-kustannukset sekä kaluston kunnossapidon ja korjauksen kustannukset. Yleiskustannuksia ovat hallinnon, suunnittelun, lipunmyynnin yms. kustannukset.

Veturi maksaa noin 4 500 000 € ja sille kertyy käyttötunteja noin 3900 vuodessa. Tuntikustannus on noin 106 €. Vaunu maksaa keskimäärin 150 000 € ja sen vuotuiset käyttötunnit on noin 7200 tuntikustannuksen ollessa 1,2 €. Veturinkuljettajan tehollisen työajan työkustannuksiksi on Iikkasen (2013) mukaan arvioitu 98 e/tunti. Tavarajunan energian yksikkökustannukset ovat noin 0,31 €/km junan osalta eli noin 0,06 €/km vaunun osalta. Kunnossapidon osalta kustannukset ovat veturilla 0,9 €/km ja vaunujen osalta noin 0,025 €/km. Vaihtotyön kustannus on noin 17 €/vaunu. Yleiskustannukset ovat noin 15 % aika ja matkaperusteisten kus-

tannusten ja vaihtotyökustannusten summasta. Näistä luvuista on laskettu sähköveturin 235 €:n tuntikustannukset (toisen ja kolmannen veturin kustannukset ovat noin 122 €/h). Ilman vaihtotöitä kilometrikustannus on noin 1,39 €/km. Rata-maksut (ja polttoaineverot) sähköjunalla ovat yhteensä noin 0,15 €/km. (Iikkanen, 2013)

Keskimääräisiksi veturikustannuksiksi on siten saatu 3,27 €/km ja vaunukustannuksiksi 0,15 €/km. Junakustannuksina on käytetty Rambollin laatimaa rautatiekustannusmallia, josta käytettiin näissä laskelmissa sähköveturin vetämän 40-vaunuisen junan tietoja. Tyypiksi valittiin Sr2-veturi (teho 6100 kW). Vaunujen mallina on ollut neliakselinen vaunu. Nopeutena niissä on käytetty 70 km/h, sähkönhintana 6 senttiä/kWh. Kustannukset ilman veroja ja ratamaksuja olisivat n. 5,5 €/km ja niiden kanssa noin 10 €/km. (Iikkanen, 2013)

Rautatierahdin hinnat kansainvälisesti vaihtelevat. Kiinassa hinta oli (\$1.51 cents) tonnikipometrilta ja maanteitse (\$6.59 senttiä) per tonnikipometri, joka on siis yli nelinkertainen rautatierahdin hintaan nähden (Global Times, 2009). Isossa Britanniassa ratamaksut vaihtelevat esim. 150 mailin matkalla intermodaalijunan 800 tonnin kuorman £ 207:sta 2448 aggregaattijunan tonnin kuorman £ 1150:aan (Network Rail, 2014) ollen ensimmäisessä tapauksessa 1,1 €/km ja jälkimmäisessä 6,09 €/km.

Näissä laskelmissa on rautatieliikenteen kustannuksiin sisällytetty investointien aiheuttamat kustannukset. Todelliset rautatiekustannukset eivät ole selvillä koska skenaarion toteutuminen vaatisi investointeja. Investointikustannukset eivät ole tiedossa ja siksi ensimmäisessä laskelmassa on käytetty 20 €:n kilometrikustannusta ja toisessa laskelmassa on vertailtu kannattavuutta eri kilometrikustannuksilla.

6.4 Tulokset

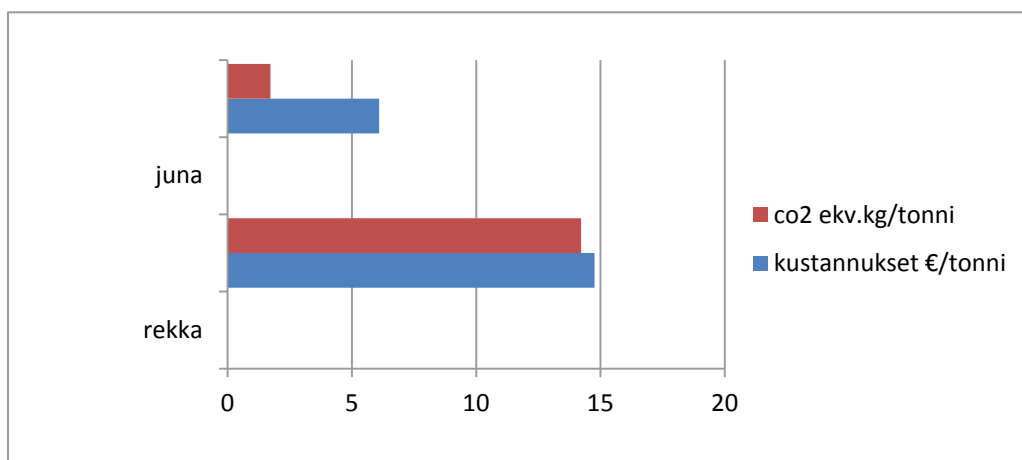
Toimitusmäärät olivat 238 laivaa vuodessa, joka kokonaisuksi laivoiksi muutettuina olisivat Kokkolaan 129 laivaa, Vaasaan 16 laivaa, Kaskisiin 11 laivaa, Kalajoelle 8 laivaa ja Uuteenkaupunkiin 11 kokonaista laivaa.

Kokonaisuksi täysperävaunuajoneuvoyhdistelmiksi muutettuina tämä tarkoittaa Kokkolasta 9342 täysperävaunuajoneuvoyhdistelmää, Vaasasta 404 täysperävaunuajoneuvoyhdistelmää, Kaskisista 276 täysperävaunuajoneuvoyhdistelmää, Kalajoelta 202 täysperävaunuajoneuvoyhdistelmää ja Uudestakaupungista 286 täysperävaunuajoneuvoyhdistelmää.

Keskitettyssä mallissa täysiä junia olisi 117.

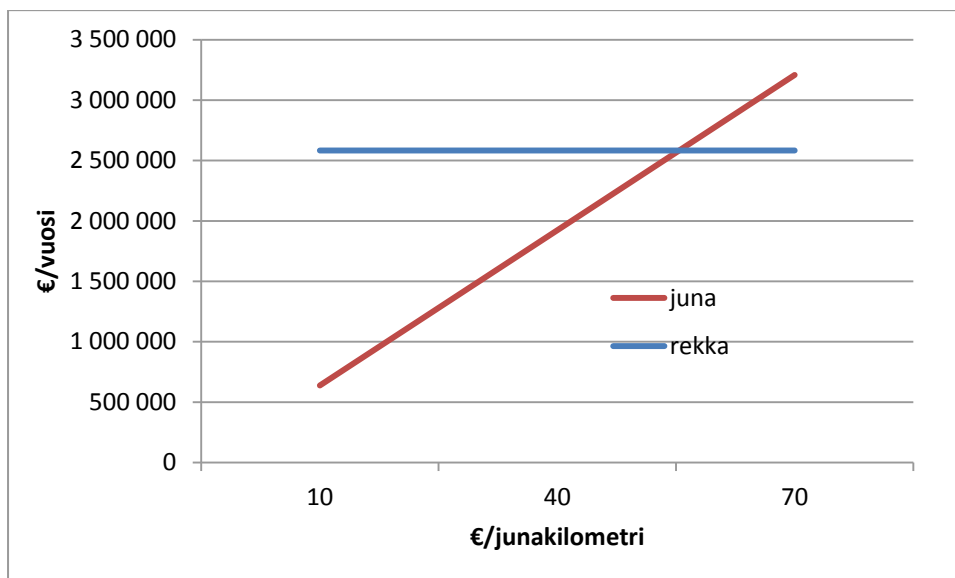
Kustannuksissa hajautetussa mallissa tämä olisi noin 2,6 miljoonaa euroa/vuosi ja keskitettyssä mallissa noin 2,4 miljoonaa euroa / vuosi. Hiilidioksidipäästöjen osalta ero oli hajautetun noin 2,5 miljoonaa kiloa CO₂ ekvivalenttiyksikköä vs. keskitetyn 0,3 miljoonaa kiloa CO₂ ekvivalenttiyksikköä vuodessa (kuva 30).

Tämä tarkoittaa hajautetussa 15 €/ 1000 kg ja 14 kg CO₂ ekv/ 1000 kg ja keskitettyssä 6 €/ 1000 kg ja 2 kg CO₂ ekv/ 1000 kg tuotetta. Prosentteina ero on laskelmien mukaan keskityn eduksi kustannuksissa - 59 % ja päästöissä peräti - 88%.



Kuva 30. Hajautetun (kuorma-auto) vs. keskitetyn (juna) tuonnin vaikutus kustannuksiin ja hiilidioksidipäästöihin

Rautatieliikenteen kustannuksina oli käytetty 20 €/km. Rautatiekustannusten vaikutus kokonaiskannattavuuteen on merkittävä. Tässä yhteydessä rautatieliikennekustannuksiin on sisällytetty mahdolliset radan ja varikon rakentamisesta aiheutuvat investointikustannukset. Rautatie muuttuu taloudellisesti kannattamattomaksi keskimääräisten rautatieliikenteen kokonaiskustannusten ylittäessä 55 €/junakilometri (kuva 31).



Kuva 31. Tuontikuljetusten kustannusvertailu (punainen=juna, sininen=kuorma-auto)

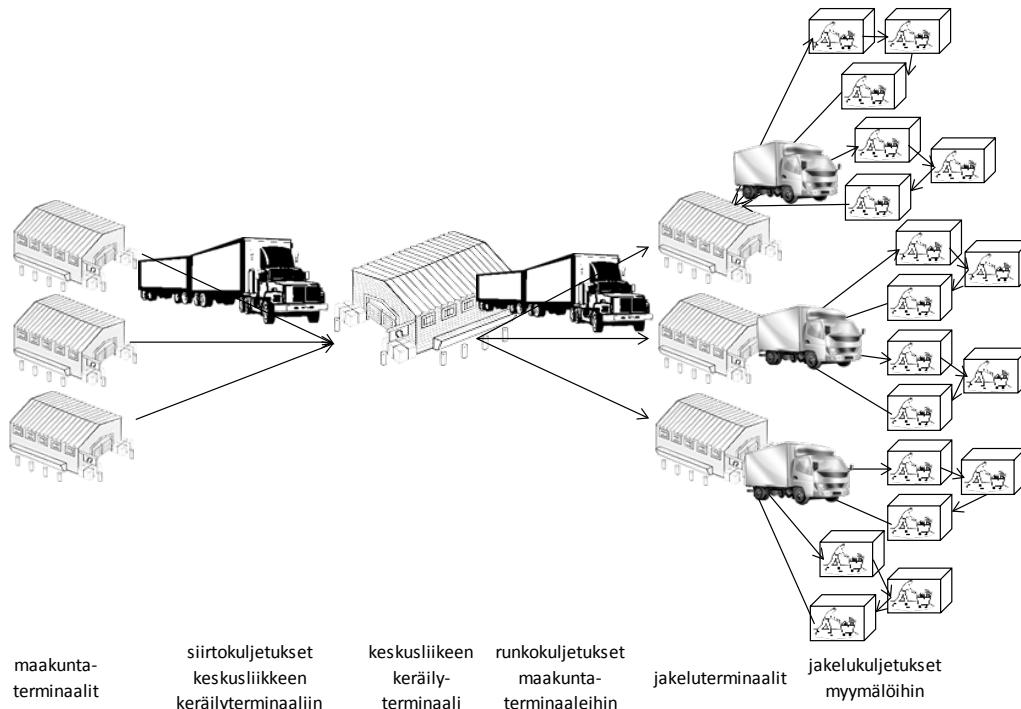
7 YHDEN TAI USEAN KERÄILYTERMINAALIN MALLI

Hanne Ala-Harja

Tässä tutkimuksen osassa selvitettiin miten yhden valtakunnallisen keräilyterminaalin malli, kuva x, (myöhemmin keskitetty) poikkeaa energia- kustannus- ja hiilidioksidipäästöiltään maakuntakeskuksiin keskittyneiden keräilyterminaalien mallista kuva x, (myöhemmin hajautettu).

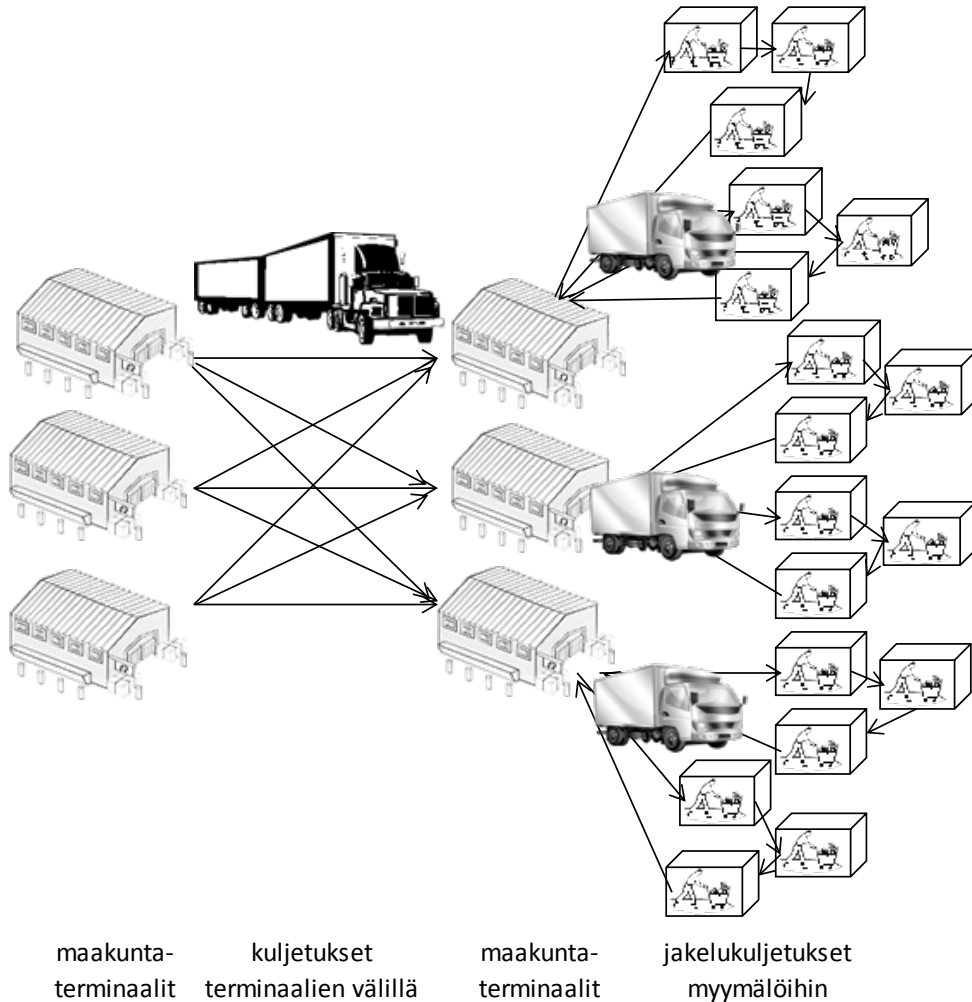
Suomen päivittäistavarakaupasta kahden valtakunnallisen ketjun osuus on yli 80 %. Pt-kaupan hintataso on eurooppalaisiin pt-kauppoihin nähden korkea. Kannattavuus on hyvää. Keskiarvoinen myyntikate myymälöiden kokoluokittain vuonna 2010 vaihteli 23,8 %:sta 26,5 %:iin. (Björkroth, Frostelius, Kajova, Palo 2012)

Isoimmilla ketjuilla on omat keräilyterminaalit pääkaupunkiseudulla. Suuri osa eri puolella Suomea valmistettavista elintarvikkeista, ja tuontielintarvikkeet, kuljetetaan siirtokuljetuksena näihin keräilyterminaaleihin. Keräilyssä tuotteet kerätään maakuntaterminaaleittain runkokuljetuksiin. Osa varsinkin isompien myymälöiden jakelusta tapahtuu runkokuljetusten yhteydessä. Muut jakelut tehdään maakuntaterminaaleista (kuva 32).



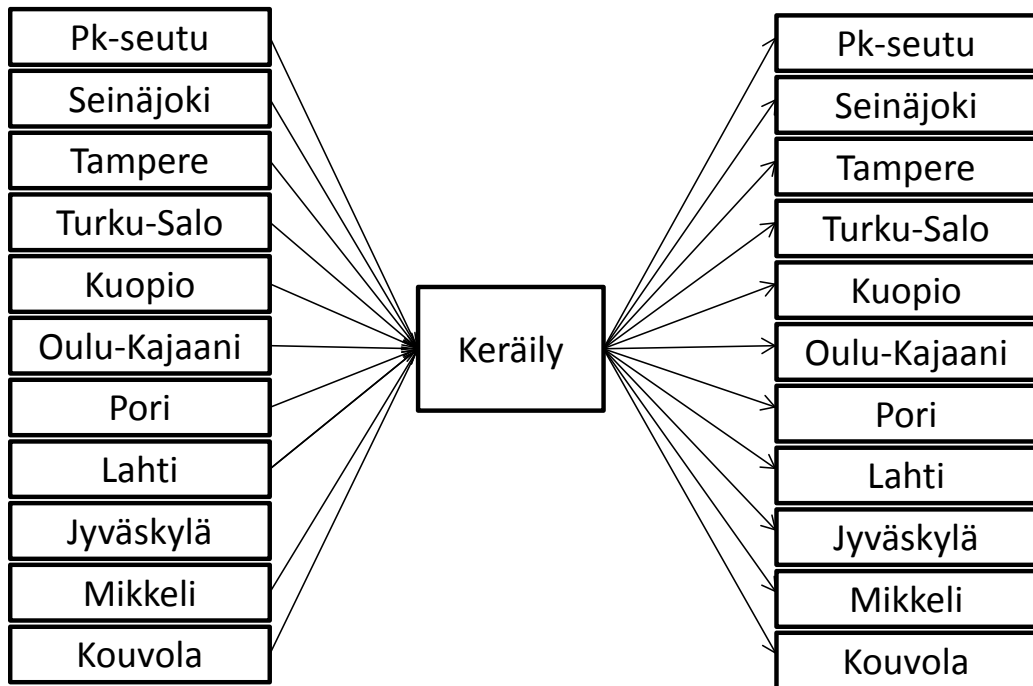
Kuva 32. Keskitetyn elintarvikeketjun havainnekuva

Hajautetussa mallissa on oletettu että alueen tuotanto kerätään ensiksi aluetermiinalliin. Hajautetussa mallissa ei ole erikseen huomioitu synergiaa joka muodostuisi esimerkiksi yhdistelemällä samaan suuntaan meneviä kuljetuksia, vaan täytöasteet (ja edelleen tonnakilometrikustannukset) on oletettu vastaaviksi kummasakin tarkastelussa (kuva 33).

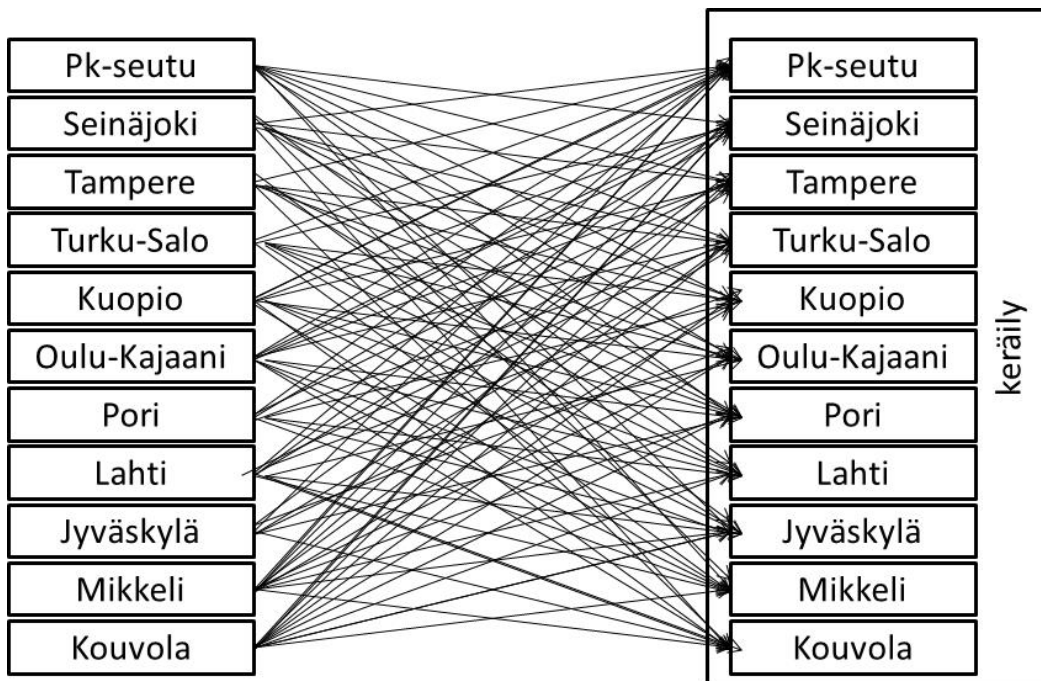


Kuva 33. Hajautetun elintarvikeketjun havainnekuva

Tarkastelun ulkopuolelle on rajattu jakelu myymälöihin. Todellisuudessa useat toimittajat toimittavat suoraan nykymallissa keskusliikkeiden terminaaliin (kuva 34). Hajautettu malli (kuva 35) perustuu pitkälti siihen, että valtaosa valtakunnallisista tuotevirroista olisi järjestelmässä mukana. Tarkastelussa ei ole myöskään huomioitu sitä, että runkokuljetukset keskitetyssä mallissa jakavat usein suuret myymälät ilman aluetermiinalliin kautta kulkemista.



Kuva 34. Yhden valtakunnallisen keräilyterminaalin malli



Kuva 35. Usean keräilyterminaalin malli

Tutkimuksessa tarkasteltavana olivat vaiheet

- kuljetus lähtöpisteestä keräilyyn
- keräily ja
- kuljetus keräilystä päätepisteeseen.

Lähtöpisteiksi määritettiin (kuva 36)

- pk-seutu
- Seinäjoki
- Tampere
- Turku-Salo
- Kuopio
- Oulu-Kajaani
- Pori
- Lahti
- Jyväskylä
- Mikkeli
- Kouvola

Ahvenanmaa jätettiin tarkastelun ulkopuolelle.



Kuva 36. Lähtö- ja määränpääterminaalit kartalla (Lähde: openmap)

Samat kaupungit valittiin päätepisteiksi useamman maakuntakeskuksen mallissa. Kuljetettävien määrien lähtöpisteistä keräilyterminaaleihin oletettiin jakautuvan vastaavasti kuin tuotannon (taulukko 15).

Taulukko 15. Kuljetettävien määrien jakautuminen lähtöpisteittäin (%)

paikkakunta	%
pk-seutu	26,1
Seinäjoki	18,6
Tampere	12,8
Turku-Salo	9,2
Kuopio	8,9
Oulu-Kajaani	6,5
Pori	5,4
Lahti	5,2
Jyväskylä	3,4
Mikkeli	2,3
Kouvola	1,7

Päätepisteisiin saapuvien määrien oletettiin jakautuvan vastaavasti kuin pk-kaupan myynnin (taulukko 16). Pori ja Lahti yhdistettiin määränpäättarkastelussa muihin määränpäihin.

Taulukko 16. Kuljetettavien määrien jakautuminen määränpäittäin (%)

pk-seutu	Seinäjoki	Tampere	Turku-Salo	Kuopio	Oulu-Kajaani	Jyväskylä	Mikkeli	Kouvola	%
32,2	8,2	16,6	8,7	7,7	12,4	5	3,1	6,2	%

Laskennat tehtiin tonnikiperusteisina.

7.1 Keskitetyn keräilyterminaalin laskelmat

7.1.1. Kustannukset

Keskitetyn mallin kustannukset (€/vuosi) laskettiin seuraavasti:

$$K_k = k_{kk1} + k_{kk} + k_{kk2}, \text{ jossa}$$

k_{kk1} = kuljetuskustannukset lähtöpisteestä keräilyyn (€/vuosi), k_{kk} = keräilykustannukset (€/vuosi) ja k_{kk2} = kuljetuskustannukset keräilystä päätepiesteeseen (€/vuosi).

Kuljetuskustannukset laskettiin reiteittäin (k_{kk1-11}) ja lisättiin ne toisiinsa. Kuljetuskustannukset lähtöpisteestä keräilyyn kullakin reitillä (1-11) laskettiin seuraavasti:

$$k_{kk1x} = v_{kk1x} * k_{kk1x} * s_{kk1x}, \text{ jossa}$$

v_{kk1x} = volyyymi (1000kg/vuosi), k_{kk1x} = yksikkökustannus reitillä x (€/tonnikilometri) ja s_{kk1x} = matka reitillä x (km).

Keräilykustannukset (€/vuosi) määritettiin seuraavasti:

$$k_{kkx} = k_{lx} * v_{lx}, \text{ jossa}$$

k_{lx} = laatikon yksikkökäsittelykustannus (€/laatikko) ja v_{lx} = laatikkomäärä (kpl/vuosi), jossa laatikkomäärä (kpl/vuosi) laskettiin,

$$v_{lx} = v_x / (k_l * t_l / 100), \text{ jossa}$$

v_x = tuotantovolyymi (kg/vuosi), k_l = laatikon kapasiteetti (kg/laatikko), t_l = laatikon täyttöaste (%).

Kuljetuskustannukset keräilystä päätepiesteeseen (k_{kk2}) laskettiin jokainen reitti yhteen summaten. Reittikohtaiset (keräily-jakeluterminaali) laskettiin reitillä x seuraavasti:

Kuljetuskustannukset laskettiin reiteittäin ($k_{kk2(1-11)}$) ja lisättiin ne toisiinsa. Kuljetuskustannukset lähtöpisteestä keräilyyn kullakin reitillä (1-11) laskettiin seuraavasti:

$$k_{kk2x} = v_{kk2x} * k_{kk2x} * s_{kk2x}, \text{ jossa}$$

v_{kk2x} = volyyymi (1000kg/vuosi), k_{kk2x} = yksikkökustannus reitillä x (€/tonnikilometri) ja s_{kk2x} = matka reitillä x (km), katso taulukko 17.

Taulukko 17. Etäisyydet lähtöpisteistä keräilyterminaaleihin

pk-seutu	Seinäjoke	Tampere	Turku-Salo	Kuopio	Oulu-Kajaani	Pori	Lahti	Jyväskylä	Mikkeli	Kouvola	km
20	350	171	174	375	599	235	96	260	221	128	

7.1.2. Hiilidioksidipäästöt

Päästöt laskettiin seuraavasti:

Keskitetyn mallin päästöt (g CO₂ ekv./vuosi) laskettiin seuraavasti:

$$h_k = h_{kk1} + h_{kk} + h_{kk2}, \text{ jossa}$$

h_{kk1} = päästöt lähtöpisteestä keräilyyn (g CO₂ ekv./vuosi), h_{kk} = keräilyn päästöt (g CO₂ ekv./vuosi) ja h_{kk2} = kuljetuksen päästöt keräilystä päätepiesteeseen (g CO₂ ekv./vuosi).

Päästöt laskettiin reiteittäin (k_{kk1-11}) ja lisättiin ne toisiinsa. Päästöt lähtöpisteestä keräilyyn kullakin reitillä (1-11) laskettiin seuraavasti:

$h_{hk1x} = v_{kk1x} * h_{kk1x} * s_{kk1x}$, jossa

v_{kk1x} =volyyymi (1000kg/vuosi), h_{kk1x} = yksikköpäästö reitillä x (g CO₂ ekv./tonnikilometri) ja s_{kk1x} = matka reitillä x (km).

Päästöt keräilyssä (g CO₂ ekv./vuosi) laskettiin energiankulutuksen ja energian yksikköpäästön tulona seuraavasti:

$h_{kk} = V * h_{kk} * E_{kk}$, jossa

V= määrä (laatikkoa/vuosi), h_{kk} = energian päästökerroin (g CO₂ ekv/kWh), E_{kk} =energiankulutus keskimäärin (kWh/laatikko).

Päästöt keräilystä päätepuoleisiin (g CO₂ ekv./vuosi) laskettiin reiteittäin ($k_{kk2(1-11)}$) ja lisättiin ne toisiinsa. Päästöt lähtöpisteestä keräilyyn kullakin reitillä (1-11) laskettiin seuraavasti:

$h_{hk2x} = v_{kk2x} * h_{kk2x} * s_{kk2x}$, jossa

v_{kk1x} =volyyymi (1000kg/vuosi), h_{kk1x} = yksikköpäästö reitillä x (g CO₂ ekv./tonnikilometri) ja s_{kk1x} = matka reitillä x (km).

7.2 Hajautettujen keräilyterminaalien laskelmat

7.2.1 Kustannukset

Hajautetun mallin kustannukset (€/vuosi) laskettiin seuraavasti:

$K_k = k_{hk1} + k_{hk} + k_{hk2}$, jossa

k_{hk1} =kuljetuskustannukset lähtöpisteistä päätepuoleiden keräilyihin (€/vuosi), k_{hk} =keräilykustannukset (€/vuosi)

Kuljetuskustannukset keräilyterminaaleihin ($k_{hk(1-11)}$) laskettiin yhteen laskien kuljetuskustannus kustakin (11 kpl) lähtöpisteestä kuhunkin keräilyterminaaliin (11kpl). Kuljetuskustannukset lähtöpisteestä keräilyyn kullakin reitillä x laskettiin seuraavasti:

$k_{hk1x} = v_{hk1x} * k_{hk1x} * s_{hk1x}$, jossa

v_{kk1x} =volyyymi reitillä x (1000kg/vuosi), k_{kk1x} = yksikkökustannus reitillä x (€/tonnikilometri) ja s_{kk1x} = matka reitillä x (km).

Keräilykustannukset (€/vuosi) määritettiin yhteen laskien keräilykustannus kussakin (11 kpl) keräilyterminaalissa seuraavasti:

$$k_{hkx} = k_{lx} * v_{lx}, \text{ jossa}$$

k_{lx} = laatikon yksikkökäsittelykustannus (€/laatikko) ja v_{lx} = laatikkomäärä (kpl/vuosi), jossa laatikkomäärä (kpl/vuosi) laskettiin,

$$v_{lx} = v_x / (k_l * t_l / 100), \text{ jossa}$$

v_x = volyyymi terminaaliin x (kg/vuosi), (taulukko 18), k_l = laatikon kapasiteetti (kg/laatikko), t_l = laatikon täyttöaste (%) reitillä x.

Taulukko 18. Etäisyydet lähtöpisteistä keräilyterminaaliin hajautetussa mallissa

	Seinäjäjoki	Tampere	Turku- Salo	Kuopio	Oulu- Kajaani	Pori	Lahti	Jyväskylä	Mikkeli	Kouvola
pk-seutu	350	171	174	375	599	235	96	260	221	128
Seinäjäjoki		177	310	319	326	183	313	195	309	373
Tampere			164	394	483	112	128	149	256	192
Turku-Salo				455	633	140	216	310	367	297
Kuopio					389	413	285	146	162	268
Oulu-Kajaani						506	509	341	449	532
Pori							246	266	380	310
Lahti								172	133	61
Jyväskylä									116	195
Mikkeli										107

7.2.2. Hiilidioksidipäästöt

Päästöt laskettiin seuraavasti:

Hajautetun mallin päästöt (g CO2 ekv./vuosi) laskettiin seuraavasti:

$$h_h = h_{hkl} + h_{hk}, \text{ jossa}$$

h_{hkl} = päästöt lähtöpisteestä keräilyyn (g CO2 ekv./vuosi), h_{hk} = keräilyn päästöt (g CO2 ekv./vuosi)

Päästöt laskettiin reiteittäin ($k_{kk(x)}$) ja lisättiin ne toisiinsa. Päästöt lähtöpisteestä keräilyyn kullakin reitillä ($x=1-11$) laskettiin seuraavasti:

$$h_{hk1x} = v_{hk1x} * h_{kk1x} * s_{hk1x}, \text{ jossa}$$

v_{hk1x} = volyyymi (1000kg/vuosi), h_{kk1x} = yksikköpäästö reitillä x (g CO2 ekv./tonnikilometri) ja s_{kk1x} = matka reitillä x (km).

Päästöt keräilyssä (g CO₂ ekv./ vuosi) laskettiin kunkin keräilyterminaalin (y) osalta ja laskettiin lopuksi yhteen. Yhden keräilyterminaalin päästövaikutus laskettiin energiankulutuksen ja energian yksikköpäästön tulona seuraavasti:

$$h_{kky} = V_y * h_{kk} * E_{kky}, \text{ jossa}$$

V = määrä (laatikkoa/vuosi), h_{kk} = energian päästökerroin (g CO₂ ekv/kWh),
 E_{kk} = energiankulutus keskimäärin (kWh/laatikko).

7.3 Lähtöarvot

Lähtötietoina käytettiin seuraavia tietoja:

<i>keräily määrä</i>	<i>12 000 000 kg/vuosi</i>
<i>auton kapasiteetti</i>	<i>40 000 kg/auto</i>
<i>kuljetus määrä</i>	<i>300 kuorma-autoa/vuosi</i>
<i>täyttöaste</i>	<i>100 %</i>
<i>auton yksikkökustannus</i>	<i>1,6 €/kilometri</i>
<i>täyttöaste muunnossa</i>	<i>30 tonnia/ajoneuvokilometri → 1,6€/30 = x €/tonnikilometri</i>
<i>auton yksikköpäästö</i>	<i>40 g CO₂ / tonnikilometri</i>
<i>laatikon täyttöaste</i>	<i>90 %</i>
<i>laatikon kapasiteetti</i>	<i>15 kg/laatikko</i>
<i>auton kuljetuskapasiteetti</i>	<i>1400 laatikkoa/auto</i>
<i>kapasiteetti</i>	<i>30 laatikkoa/minuutti</i>
<i>lajittelun kustannukset</i>	<i>0,10 €/laatikko</i>
<i>lajittelun energian kulutus</i>	<i>0,05 kWh/laatikko</i>
<i>energian päästö</i>	<i>0,25 g CO₂ ekv/kWh</i>

7.4. Tulokset

Tulokset laskettiin kustannusten ja päästöjen osalta sekä vuosi-, että tuotekilokoh-
 taisena. Vuosikohtaisessa tarkastelussa (taulukot 19 ja 20) usean terminaalin malli
 osoittautui - 62 % edullisemmaksi ratkaisuksi ja hiilidioksidipäästöjen osalta ero
 oli - 89 %.

Taulukko 19. Yhden keräilyterminaalimallin vuosikohtaiset tulokset

Yhden keräilyterminaalimalli

	€/v	kg co2 ekv./v
lähtöpiste->keräily	109 098	1 261 920
keräily	88 889	11 111
keräily->päätepiste	212 929	133 081
yhteensä	410 916	1 406 112

Taulukko 20. Usean keräilyterminaalimallin vuosikohtaiset tulokset

Usean keräilyterminaalimalli

	€/v	kg co2 ekv./v
lähtöpisteet->päätepisteet	153 346	143 762
keräily	88 889	11 111
yht.	155 978	154 873

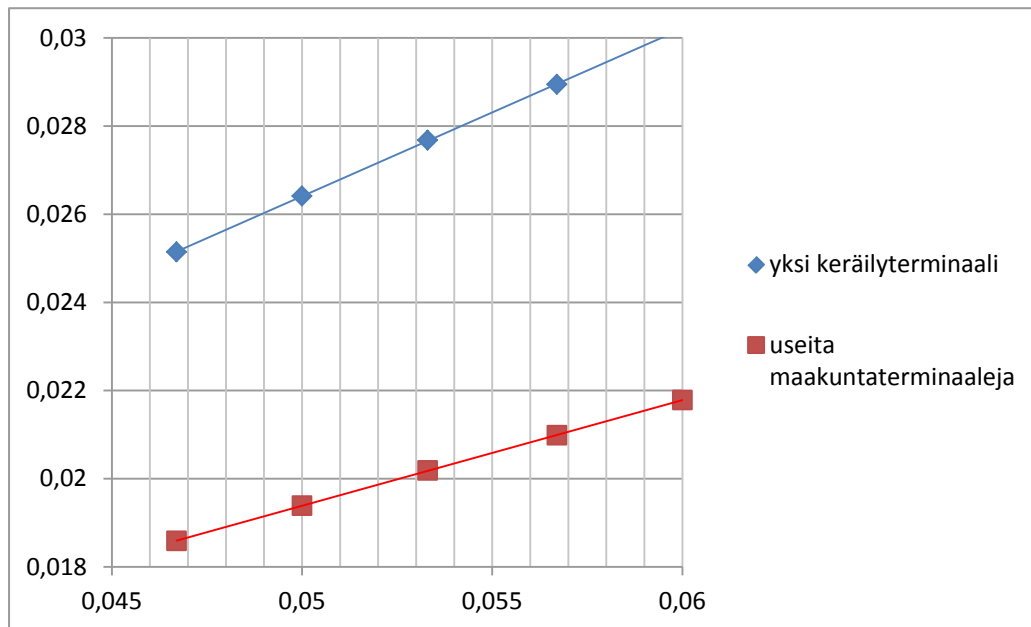
Tuotekiloihin suhteutettuna yhden terminaalimallissa kustannuksiksi tarkastellulla toimitusketjun välillä muodostui 2,8 senttiä/tuotekilo ja usean terminaalimallissa 2,0 senttiä/tuotekilo. Hiilidioksidipäästöjen osalta tuotekohtaiset hiilidioksidipäästöt olivat 9,1 grammaa hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä/ tuotekilo ja usean terminaalimallissa 1,3 grammaa hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä/ tuotekilo.

Yhden ja useamman keräilyterminaalimallin vaiheiden vaikutusten vertailussa (taulukko 21) keräily- ja kuljetusten kustannukset jakautuivat tasaisemmin yhden terminaalimallissa 22 / 78 % ja usean terminaalimallissa 57 / 43 %. Hiilidioksidipäästöjen osalta kuljetukset muodostivat suurimman osan päästöistä kummasakin skenaariossa.

Taulukko 21. Yhden ja useamman keräilyterminaalimallin vaiheiden vaikutusten vertailu

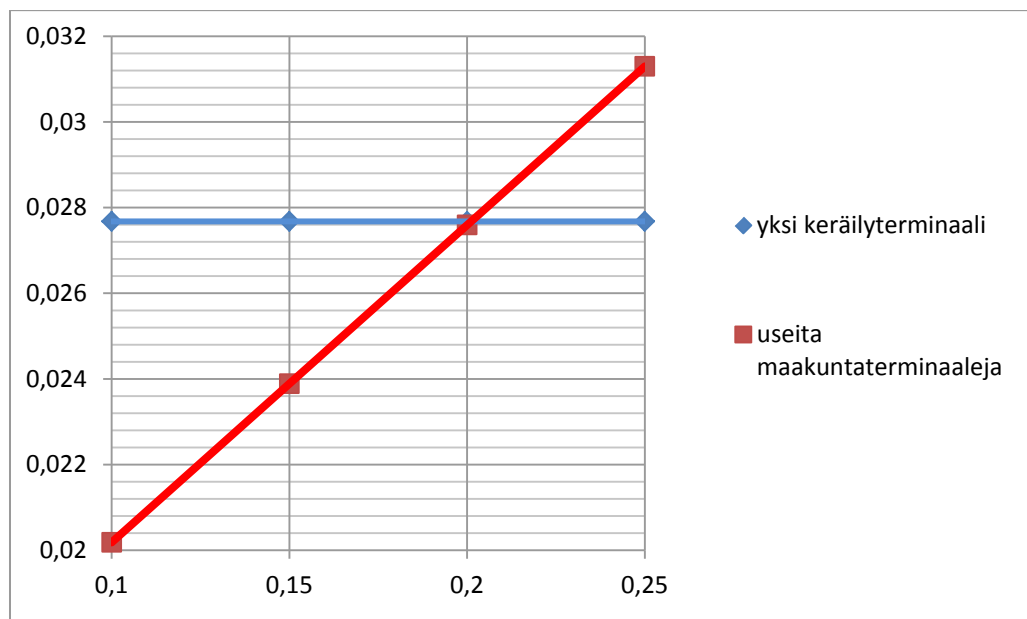
	Yhden keräilyterminaalimalli			Usean keräilyterminaalimalli		
	€/v	kg co2 ekv./v		€/v	kg co2 ekv./v	
keräilyosuus	22	1	%	57	7	%
kuljetusten osuus	78	99	%	43	93	%

Eri kuljetuksen tonnikilometrikohtaisilla kustannuksilla tarkasteltuna usean maakuntaterminaalin malli oli sitä ylivoimaisempi, mitä suuremmiksi tonnikilometrikohtaiset kuljetuskustannukset muodostuivat (kuva 38).



Kuva 37. Tuotekilo-kohtaiset kuljetuskustannukset (pysty akseli) eri tonnikilometrihinnoilla (vaaka-akseli) skenaarioittain

Verrattaessa keskitetyn terminaalin mallin kustannuksia hajautettujen keräilyterminaalien keräilykustannuksiin tapauksessa jossa hajautetun mallin kustannukset olisivat keskitetyn mallin ratkaisusta poikkeavat, kriittiseksi pisteeksi muodostui 20 senttiä/laatikko. Sitä kalliimmilla laatikkokeräilykustannuksilla usean terminaalin malli olisi kokonaiskustannuksiltaan kalliimpi. Tällöin kokonaiskustannus olisi 0,028 €/tuotekilo (kuva 38).



Kuva 38. Tuotekilo kohtaiset kuljetuskustannukset (€/kg, pystyakseli) maakuntaterminaalien keräilykustannusten (€/laatikko, vaakakseli) vaihdellessa

7.5 Pohdintaa

Laskelmissa oletuksena olivat samansuuruiset tonnikipometrikohtaiset kustannukset (ja vastaavasti päästöt) olisivat saman vertailtavassa mallissa. Todellisuudessa kustannuksissa saattaisi olla esimerkiksi täyttöasteiden aiheuttamaa kustannusvaihtelua. Reittejä olisi enemmän ja saman täyttöasteen (ja tonnikipometrikustannusten) saavuttamiseksi olisi tarpeen yhdistellä kuljetuksia ja suunnitella reittejä. Maakuntiin hajautettujen terminaalien mallissa arvo muodostuisi aiemmissa ketjun vaiheissa, lähempänä tuotteen alkuperää tuotantoa, kuin yhden terminaalin mallissa.

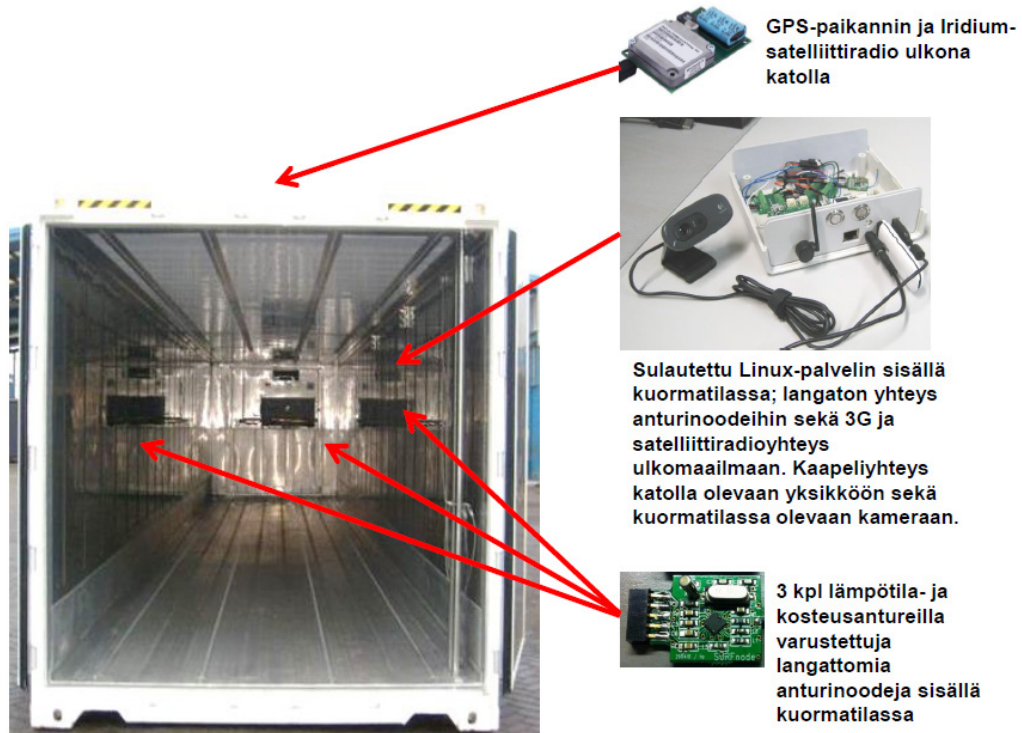
8 OLOSUHDEMITTAUKSET JA NIIDEN HYÖDYNTMINEN

Peilin Zhang, Tomi Voltti, Markus Madetoja, Caner Cuhac, Petri Hänninen ja Reino Virrankoski

Projektissa tutkittiin langattomien anturijärjestelmien käyttöä olosuhteiden mittaamiseen sekä mittaustiedon hyödyntämismahdollisuuksia. Mittauksia kerättiin jakeluauton lämpösäädelystä kuljetuksesta sekä aurinkolämmön talteenottokenhältä. Jälkimmäistä tekniikkaa voidaan hyödyntää myös mm. pakastevaraston olosuhteiden mittaamiseen ja seurantaan.

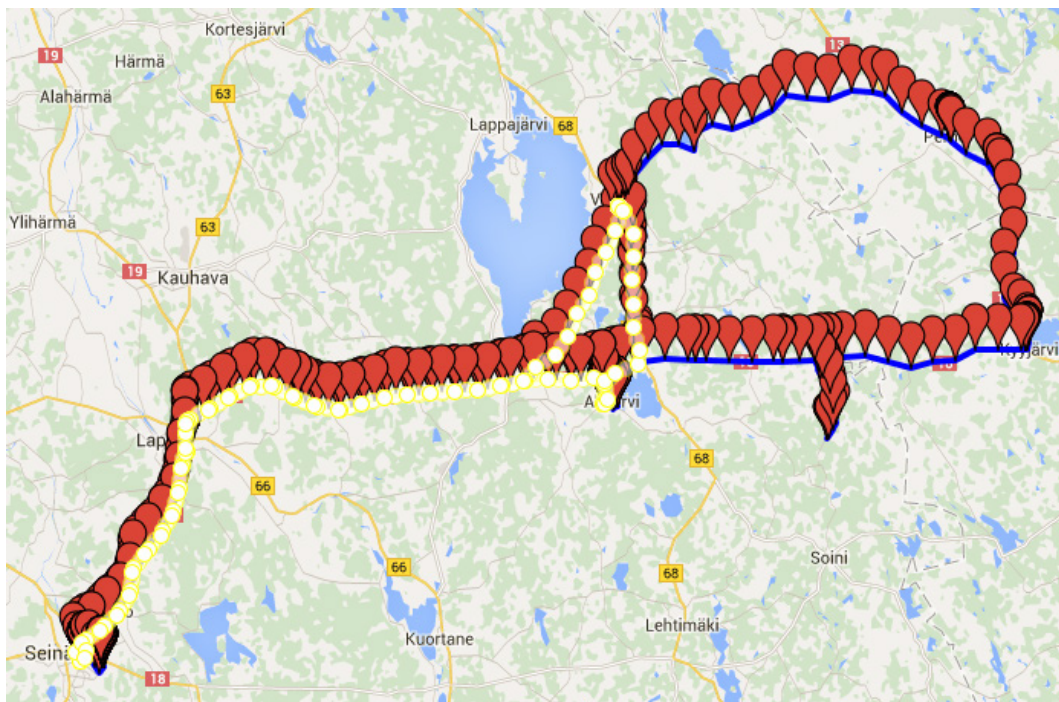
8.1 Jakeluauton lämpösäädely kuljetus

Jakeluauton lämpösäädelyä kuljetusta seurattiin laitteistolla, johon kuuluvat lämpösäädelyyn kuormatilaan sijoitettavat langattomat anturinoodit, auton katolle sijoitettava GPS-paikantimella ja satelliittiradiolla varustettu yksikkö sekä kuormatilaan sijoitettu sulautettu Linux-palvelin (kuva 39). Sulautetulla palvelimella on oma tietokanta, johon mittausdata tallennetaan aika- ja paikkaleimattuna. Näin tiedetään jokaista mittausta vastaava kellonaika, ja jakeluauton sijainti kyseisellä hetkellä. Palvelimelle voidaan muodostaa reaaliaikainen yhteys joko matkapuhelinverkon kautta 3G-modeemin välityksellä tai sitten Iridium-satelliittiradion avulla.



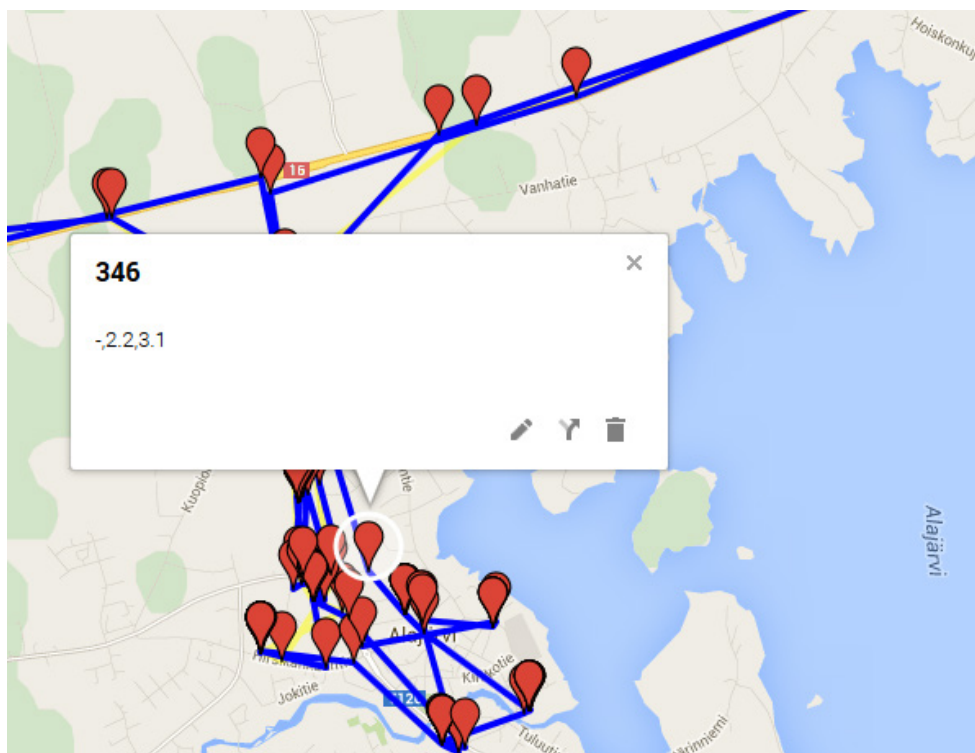
Kuva 39. Itsenäisesti toimiva langaton lämpösäädellyn kuljetuksen seurantalaitteisto jakeluautossa.

Mittauksia kerättiin vajaan vuorokauden ajalta. Tuona aikana kylmäkuljetusauto lastattiin kahdesti jakeluterminaalista Seinäjoelta, ja se teki kaksi jakelukierrosta. Toisen jakelukierroksen pituus oli 164 km ja toisen 285 km. Jakelureitit on esitetty kartalla kuvassa 40.



Kuva 40. Kylmäkuljetusauton jakelukierrokset, joilta mittaukset tehtiin 13.-14.11.2014. Reitit on esitetty käyttäen Google Maps -sovellusta.

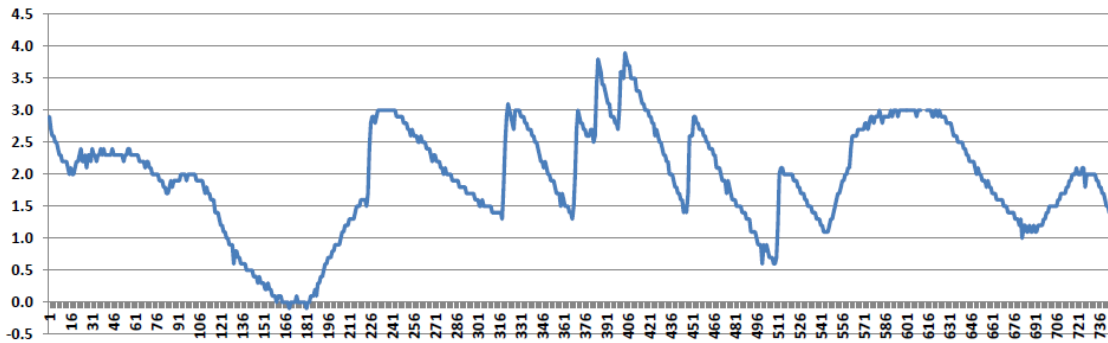
Olosuhdemittauksia voidaan tarkastella graafisesti esimerkiksi Google Maps -sovelluksen avulla. GPS:n paikannuspisteitä vastaavat kuormatilan lämpötila- ja kosteusmittausarvot saadaan näkyviin klikkaamalla kyseistä mittauspistettä. Näkymään voidaan lisätä myös kyseistä mittauspaikkaa vastaava kellonaika, joka on muistissa sulautetun Linux-palvelimen tietokannassa. Esimerkki mittauksen graafisesta tarkastelusta on esitetty kuvassa 41.



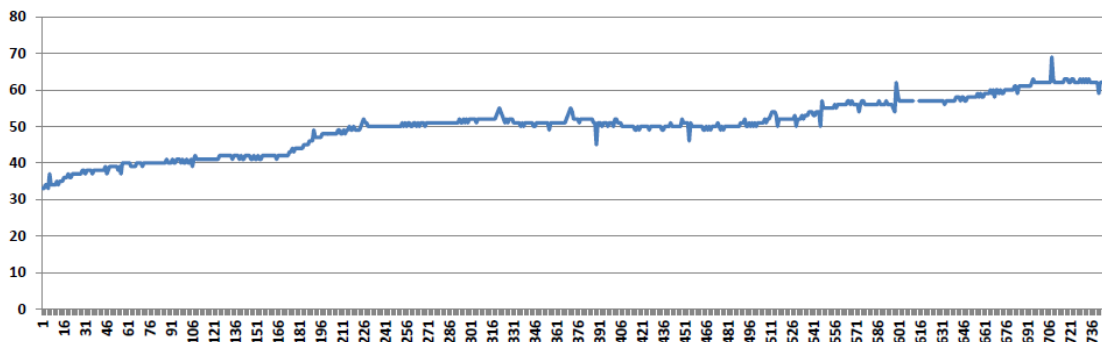
Kuva 41. Esimerkki olosuhdemittausten graafisesta tarkastelusta Google Maps-sovelluksen avulla. Ikkunassa näkyvät paikannuspistettä 346 vastaavat lämpötilamittaukset kahdesta anturinoodista. Näkymään voidaan täydentää tietokannasta myös kyseisiä mittauksia ja paikkaa vastaava kellonaika sekä mitattu ilmankosteus.

Mittausdataa tarkasteltaessa havaittiin kuljetustilan ilmankosteuden kasvavan tasaisesti koko kuljetuksen ajan (kuva 43), mutta lämpötilan tekevän sahaavaa liikettä (kuva 42). Lämpötilan vaihteluun vaikuttaa kylmäkoneen käyttötapa (automaatioasetukset), mutta myös se että aika ajoin jakelun aikana ovet ovat auki ja sisällä olevan tavaran määrä vähenee, kun lastia puretaan jakelupaikoille. Tekemällä lisämittauksia ja hankkimalla tarkka tieto kylmäkoneen toiminnasta, voidaan muodostaa tarkempi malli lämpötilan vaihtelusta lämpösäädelyssä tilassa ja jäähdyttämisen kustannuksista. Sen tiedon perusteella voidaan muodostaa malli siitä, miten lämpösäädelyyn kuljetuksen (kylmäkuljetuksen) lasti olisi kaikkein taloudellisinta jäähdyttää. Auton kylmäkoneen erilaisten käyttötapojen lisäksi on mahdollista jäähdyttää lastia etukäteen jakeluterminaalissa ennen sen lastaamista nykyistä kylmemmäksi, jolloin auton kylmäkoneen käyttötarve pienenesi. Toisaalta terminaalissa jäädyttäminenkin maksaa, joten optimaalinen jäähdytystapa pitää ratkaista lähtötietojen (lastin sisältö, Eviran määräykset, jäähdytyskustannukset terminaalissa ja autossa jne.) ja olosuhdemittausdatan avulla.

Kuvassa 8.4 on kuvaaja yhden anturinoodin mittauksista jakeluauton kuormatilan lämpötilan vaihtelusta Kuvassa 8.2 esitettyjen jakelukierrosten aikana. Saman anturinoodin mittaama ilmankosteus samalla aikavälillä 13.11.2014 klo 21:14 alkaen 14.11.2014 klo 13:40 asti on esitetty Kuvassa 8.5.



Kuva 42. Jakeluauton kuormatilan lämpötila yhden anturinoodin mittaamana kahden jakelukierroksen aikana 13.11.2014 klo 21:14 – 14.11.2014 klo 13:40.



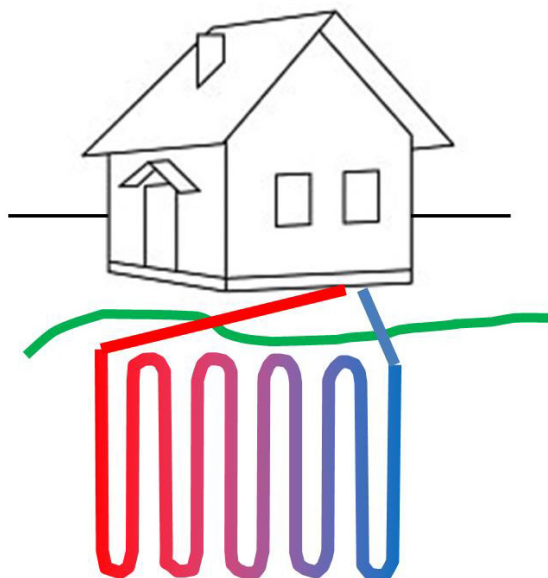
Kuva 43. Jakeluauton kuormatilan ilmankosteus saman anturinoodin mittaamana kun lämpötila kuvassa 8.4. Mittaukset on tehty kahden jakelukierroksen aikana 13.11.2014 klo 21:14 – 14.11.2014 klo 13:40.

Jakeluauton jäädytyksen optimoinnin ohella olosuhdemittausdataa voidaan hyödyntää lämpösäädelyjen kuljetusten seurannassa ja valvonnassa. Kuljetuksen mukana kulkevaan sulautettuun Linux-palvelimeen voi olla reaaliaikainen yhteys matkapuhelinverkon tai satelliittiradion kautta, tai sitten palvelimelle voidaan tarvittaessa tehdä kyselyitä em. yhteysmuotoja käyttäen. Joka tapauksessa kaikki mittausdata tallennetaan palvelimen tietokantaan, jolloin kuljetuksen saavuttua määränpäähensä voidaan automaattisesti tarkistaa, ovatko olosuhteet lämpösäädelyssä tilassa olleet koko kuljetuksen ajan säännösten edellyttämät, vai onko jossain vaiheessa tapahtunut jotain poikkeavaa. Seurantaominaisuus on erityisen hyödyllinen pitkän matkan kuljetuksissa, jossa myös lämpösäädelyn perävaunun

vetoauto voi vaihtua. Projektissa oli alun perin tarkoitus suorittaa laitteistolla yksi testaus Valion maitotuotekuljetuksella välillä Seinäjoki-Moskova, mutta se ei valitettavasti ollut mahdollista koska maitotuotteiden vienti Venäjälle on toistaiseksi pysähdyksissä maailmanpoliittisen tilanteen vuoksi.

8.2 Aurinkolämmön talteenottoa

Auringon tuottamaa lämpöä voitaisiin käyttää erilaisten lämpökeräimien, kuten maalämmön, hyötysuhteen parantamiseen (kuva 44). Tavanomaisessa käytössä nestekierron viileä pää viilentää myös maata, joka aiheuttaa pidemmällä aikavälillä tehonhäviötä. Tätä hävikkiä voitaisiin sopivissa olosuhteissa kompensoida aurinkolämmön avulla.



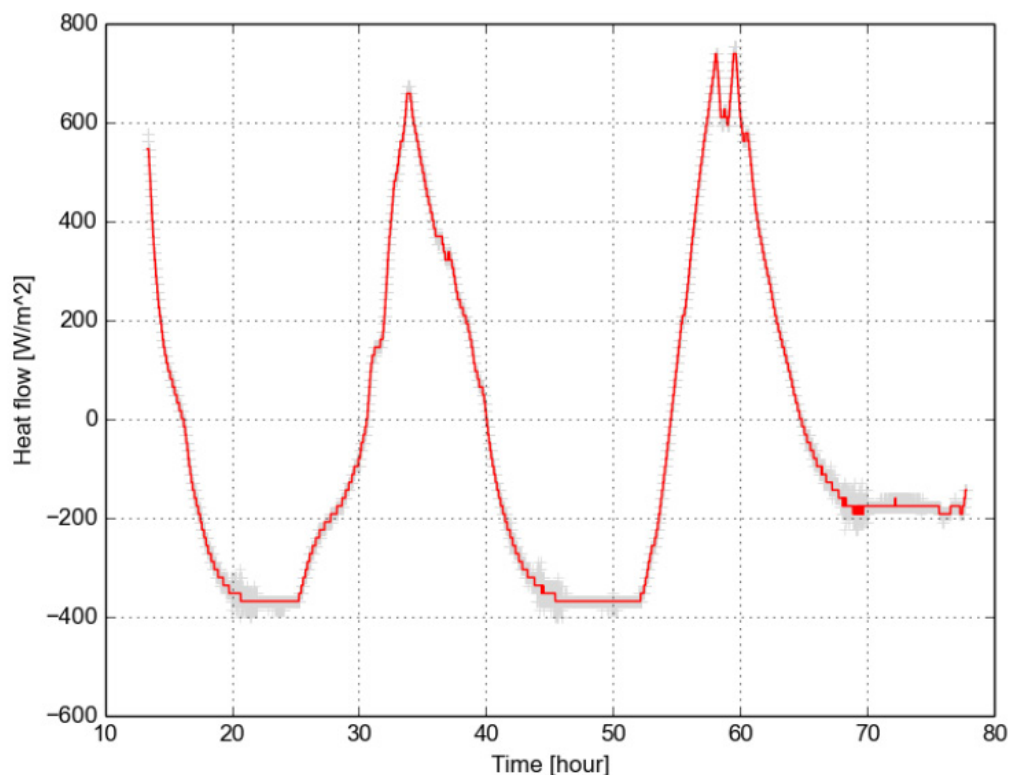
Kuva 44. Nestekierron viileä pää viilentää pitkällä aikavälillä myös maata. Tästä johtuvaa tehonhäviötä voisi sopivissa olosuhteissa kompensoida aurinkolämmön avulla.

Erityisen hyvissä olosuhteissa voitaisiin harkita myös ns. lämpökaivoja, eli kerätyn aurinkolämmön varastoimista maa- tai kallioperään kylmempien aikojen varalle. Sen kannattavuuden selvittäminen edellyttää kuitenkin tarkkoja mittauksia, jotta erityyppisille maa- tai kallioperille saadaan realistiset lämpenemis- ja lämmönsiirtomallit, jota voidaan sitten käyttää järjestelmän jatkosuunnittelun pohjana.

Langaton anturiverkko soveltuu hyvin lämpötilanmittauksia varten, koska langattomat anturinoodit voidaan levittää tutkittavalla alueella ja lämpötilamittaukset voidaan sitten kerätä niistä pidemmällä aikavälillä, jolloin koko alueen lämpötilanmuutoksista ja lämmönvarauskyvystä saadaan mittausten perusteella käsitys. Samaa anturiverkkotekniikkaa voidaan käyttää myös ilmastoltaan kontrolloidussa tiloissa, kuten kasvihuoneissa tai pakastevarastoissa. Tällöin verkon mittausten avulla voidaan selvittää mm. lämpötilanvaihtelut rakennuksen sisällä sekä mahdolliset vuotokohdat. Pilottiesimerkkinä käytettiin parkkipaikkaa, josta tehtiin lämpötilamittauksia langattomien antureitten avulla (kuva 45).



Kuva 45. Lämpötilamittaukset parkkipaikasta langattoman anturiverkon avulla.



Kuva 46. Parkkipaikasta syyskuussa 2014 mitattu auringon lämmitysteho.

Syyskuussa 2014 tehty mittauskampanja osoitti, että vielä siihen aikaan vuodesta aurinko tuotti parkkipaikalla lämpöä parhaimmillaan lähes 800 Wattia neliometriä kohti (kuva 46). Kyseisellä lämmitysteholla on lähtökohtaisesti mahdollista suunnitella maalämpö siten, että nestekierron viileän pään tehonhävikkiä voidaan kompensoida. Seuraava askel on selvittää samalla mittaus- tekniikalla, onko mahdollista kannattavasti varastoida elintarviketeollisuuden ja -logistiikan prosesseissa syntyvää lauhdelämpöä maa- tai kallioperään siten, että sitä voisi sitten hyödyntää vuoden kylmempinä aikoina.

9 KAASUKÄYTTÖISEN KUORMA-AUTOLIIKENTEEN POLTTOAINEIDEN KULUTUS, PÄÄSTÖT JA KUSTANNUKSET

Alpo Kitinoja ja Hanne Ala-Harja

9.1. Nesteytetty maakaasu raskaassa maantieliikenteessä

Erityisesti meriliikenteen ja teollisuuden polttoaine, nesteytetty maakaasu eli LNG, on leviämässä myös raskaiden ajoneuvojen puhtaammaksi polttoaineeksi. Suomeen suunnitellut LNG:n tuontiterminaalit voivatkin valmistuttuaan palvella myös raskasta maantieliikennettä. Esimerkiksi Kiinassa oli viime vuonna 51 000 raskasta ajoneuvoa, jotka kulkevat LNG:llä. Tavoite vuodelle 2015 on lähes viisinkertaistaa määrää 247 000 ajoneuvoon. LNG vähentäisi riippuvuutta öljystä ja helpottaisi myös Kiinan saasteongelmia, jotka ovat monissa Kiinan kaupungeissa vakava terveysriski etenkin pienhiukkasten osalta. Myös Yhdysvallat ja Iso-Britannia panostavat jo vahvasti raskaan liikenteen LNG-käyttöön: Yhdysvalloissa Obaman uusi energiastrategia ja Shell-yhtiön suunnitelmat vauhdittavat kehitystä tähän suuntaan.

Nesteytetyn maakaasun käyttöä raskaan maantiekaluston polttoaineena tukee EU:n energiastrategia, joka velvoittaa rakentamaan sekä paineistetun maakaasun (CNG) että LNG:n tankkausasemia ympäri Eurooppaa. LNG -asemia tulisi 400 kilometrin välein Euroopan laajuiseen ydinverkkoon kuuluvilla teillä vuoteen 2020 mennessä. Alkuvuonna 2013 koko EU:n alueella oli vasta 38 maantieliikenteen LNG -tankkausasemaa, mutta uuden strategian myötä määrä tulisi kasvamään huomattavasti.

Maa- ja biokaasu soveltuvat hyvin raskaan liikenteen käyttöön, koska niiden ansiosta autoista ei synny hiukkaspäästöjä lainkaan. Tällä hetkellä maa- ja biokaasua on Suomessa käytetty raskaassa liikenteessä lähinnä bussien polttoaineena. Muuhun raskaaseen liikenteeseen maa- ja biokaasun käyttö ei ole toistaiseksi Suomessa laajentunut. Tulevaisuudessa LNG, nesteytetty maakaasu, on todellinen vaihtoehto keskipitkän ja pitkän matkan maantiekuljetuksiin Euroopassa. Tämän tavoitteen edistämiseksi Euroopan komissiossa on tehty suunnitelma LNG Blue Corridors -asemaverkoston luomisesta. Projektin tavoitteena on 14 uuden LNG- tai L-CNG -tankkausaseman rakentaminen eurooppalaisten valtateiden tärkeisiin solmukohtiin. Ensimmäisessä vaiheessa on myös tarkoitus hankkia noin sata raskaan liikenteen LNG -kuorma-autoa. Projektia rahoittaa Euroopan komissio sekä 27 kumppania, joista kaikki ovat myös NGVA Europen jäseniä.

LNG on turvallinen polttoaine vaihtoehto, sillä maakaasun syttymisalue ilmassa on kapeampi ja syttymislämpötila korkeampi kuin öljypohjaisilla polttoaineilla. Mahdollisen vuodon sattuessa LNG höyrystyy välittömästi ja haihtuu ilmaan (www.gasum.fi).

9.2. Vertailu

Tässä tutkimuksen osassa verrattiin käyttövoimanaan dieseliä, maa-/biokaasua (myöhemmin CNG/CBG) ja nestemäistä metaania (myöhemmin LNG/LBG) käytettäviä hyötyajoneuvoja energiankulutuksen, kustannusten ja CO₂- päästöjen osalta.

CNG/CBG, Compressed natural gas/Compressed biogas on n. 250 bar paineessa olevaa metaanikaasua. Se on hyvin ajoneuvoihin sopivaa energiaa, mutta sen ongelma on varastoitavuus itse autossa sekä kuljetus jakelupaikalle. Määrät eivät voi olla kovin suuria johtuen kaasupullojen tilavuudesta sekä painosta.

LNG/LBG, Liquefied natural gas/Liquefied biogas on nestemäistä metaania. Jäähdyttämällä metaani -162 asteeseen se muuttuu nestemäiseen olomuotoon. Tuotteen tilavuus jää nestemäisenä vain kuudessadasosaan normaaliolotilassa olevan kaasun tilavuudesta. Polttoaineena LNG/LBG:llä on samat ominaisuudet kuin metaanikaasulla. Se on hajuton, mauton ja myrkytön kaasu, joka ei aiheuta korroosiota eikä se ole syövyttävä. Se ei sisällä rikkiä, pienhiukkasia tai raskasmetalleja. Energiasisällöltään 310 litraa nestemäistä metaania vastaa öljybarrelia eli 159 litraa. Sen hinta on pysynyt jatkuvasti vakaampana ja sen hintakehitys on ollut maltillisempaa kuin raskaan ja kevyen polttoöljyn hintakehitys.

Vaihtoehtoisena polttoaineena jakelu-, bussi- ja kaupungin sisäinen jäteautoliikenne käyttävät USA:ssa pääsääntöisesti käyttövoimanaan kaasumaista metaania, jolloin ajoneuvon moottori on bensamoottori tyyppinen ottomoottori. Pitkän ja keskipitkän matkan siirtokuljetuksissa raskaat ajoneuvot puolestaan käyttävät vaihtoehtoisena polttoaineenaan nestemäistä metaania (LNG/LBG), jota on helppompaa varastoida ja se riittää pitempiin matkoihin. Tällöin moottorina käytetään perinteistä dieselmoottoria, jota kutsutaan Dual Fuel moottoriksi, koska se joutuu käyttämään mm. käynnistyksen yhteydessä diesel polttoainetta. Yleisin näistä moottorityypeistä käyttää 80% nestemäistä metaania ja 20% dieseliä. Markkinoilla on myös moottorityyppiä suhteella 50/50 ja 95/5.

Nestemäinen metaani on hyvin kylmää (-162 °C), mutta pieni paineista nestettä. Lämpötilan noustessa säiliössä, myös paine kasvaa. Tämän johdosta ajoneuvon

säiliö pitää ajaa tyhjäksi n. kahden viikon kuluessa tankkauksesta. Säiliössä on ylivuotoventtiili ylipaineen varalle, joten turvallisuus on kunnossa. Ylivuodon seurauksena kuitenkin energiaa kuluu hukkaan ja vuotava metaani on päästöiltään hiilidioksidia voimakkaampi kasvihuonekaasu. Tämän vuoksi nykyisin neste-mäistä metaania käytetään pääsääntöisesti pitkillä ja keskipitkillä matkoilla ras-kaassa liikenteessä. (<http://www.cleanenergyfuels.com/>)

Bensamoottori (ottomoottori)

Puhtaalla metaanilla (bio- tai maakaasu) käyvän raskaan ajoneuvon (ottomoottori) energiankulutus on noin 30 % suurempi kuin vastaavan dieselmoottorin energian- kulutus. Puhdas kaasumoottori toimii bensiinimoottorin lailla, ja tästä syystä sen hyötysuhde on dieselmoottoria huonompi. Metaanin (maakaasu) lämpöarvoon suhteutettu hiilidioksidin omaispäästö on kuitenkin alempi kuin dieselpolttoai- neella (56 g CO₂/MJ vastaan 72 g CO₂/MJ). Tästä syystä hiilidioksidipäästöt ovat maakaasumoottoreilla yhtä suuret kuin fossiilisilla dieselmoottoreilla. Jäte- pohjaisen biokaasun hiilidioksiditase on puolestaan erittäin edullinen, koska polt- toainetta syntyy uusiutuvasta lähteestä tavallaan itsestään. Biokaasua syntyy mm. kaatopaikoilla ja jätevedenpuhdistamoilla (Lehmuskoski, Saari ja Nylund, 2007). http://www.hel.fi/hel2/ymk/ohjelmat/Ymp_yst_joukkoliikenne.pdf

Ottomoottorilla (bensiinimoottori) toimiva maakaasua käyttövoimanaan käyttävä hyötyajoneuvo on esimerkiksi Iveco Stralis (kuva 47), jonka moottorina on käy- tetty F1C-EEV moottoria (taulukko 22).



Kuva 47. Iveco Stralis (Iveco Stralis, 2014)

Taulukko 22. Iveco Stralixen tekniset tiedot

Iveco Stralis kuorma-auton tekniset tiedot	
55S17WD	
Sylinterit	3.01, 4
Moottori	F1C-EEV
Teho	170 hp, 2990 -3500 rpm
Vääntömomentti	400 Nm, 1250 - 2990 rpm
Vaihteisto	6 vaihdetta, FPT 2840,6
Akseliväli	3400 mm

Dieselmoottori

Volvo FM MetaaniDiesel on esimerkki hyötyajoneuvosta, joka kulkee nestemäisellä kaasulla (kuva 48.). Ajoneuvossa on diesel moottori, joka käyttää metaania. Moottoria kutsutaan Dual Fuel moottoriksi, koska siinä on oltava myös diesel mahdollisuus. Eri moottorivalmistajat käyttävät erilaisia metaani/diesel suhteita (80/20, 50/50, 95/5)

**Kuva 48.** Volvo FM MetaaniDiesel kuorma-auto (Volvo, 2014)

Kun dieselprosessissa käytetään nestemäistä kaasua, kuormia voidaan suurentaa ja matkoja pidentää. Tämä on ainutlaatuisia kaasukäyttöisten kuorma-autojen

keskuudessa. Perinteisiin kaasukäyttöisiin ajoneuvoihin (bensinimoottori) verrattuna energiatehokkuus on 30–40 prosenttia parempi, joten polttoaineen kulutus pienenee noin 25 prosenttia. Jos kaasua ei syystä tai toisesta ole saatavilla, kuorma-auto käy myös dieselillä. Taulukossa 23 on tekniset ominaisuudet.

Taulukko 23. Volvo FM MetaaniDiesel tekniset tiedot

Volvo FM MetaaniDiesel -kuorma-auton tekniset tiedot	
D13C-Gas, 460 hv	
Sylinterien lukumäärä	6
Tilavuus	12,6 dm ³
Iskun pituus	158 mm
Sylinterin halkaisija	131 mm
Puristussuhde 17.8:1	17.8:1
Suurin teho	1400 - 1850 rpm 338 kW
Suurin vääntö	1100 - 14000 rpm 2300 kW
Taloudellinen kierroslukualue	1100 - 1500 rpm
Pakokaasujarrun teho	(2300)rpm 185 kW
Teho – VEB+	(2300)rpm 375 kW
Öllyntäytösmäärä mkl. Suodattimet	noin 33 l
Jäähdytysjärjestelmä, vetoisuus	noin 38 l
<u>VEB+ saatavana lisävarusteena kaikkiin D13C-Gas-moottoreihin</u>	
<u>Öljynsuodattimet, 2 päävirtasuodatinta, 1 ohivirtausuodatin</u>	

9.3. Raskaan liikenteen energian kulutus

Täysperävaunukuorma-auton (varsinaisella perävaunulla varustetut yhdistelmät, joiden kokonaismassa on 60 t ja kantavuus 40 t maantieajossa) energian kulutus dieselinä keskimäärin v. 2011 oli **5,1 kWh/km** (Lipasto, 2014).

Pelkällä metaanilla ottomoottorin (bensa-) energiankulutus on noin 30 % suurempi kuin vastaavan dieselmoottorin, koska sen hyötysuhde on dieselmoottoria huonompi.

Täten $5,1 \text{ kWh/km} \times 1,30 = \mathbf{6,63 \text{ kWh/km}}$

Metaanidiesel käyttövoimaisen (Volvo FM metaani diesel) Dual Fuel kuorma-auton kulutus on 25% pienempi (Volvon esitteen mukaan) kuin kaasukäyttöisen ottomoottorin. Täten $6,63 \text{ kWh/km} \times 0,75 = \mathbf{4,97 \text{ kWh/km}}$. (Taulukko 24)

Metaani energiana vastaa:

1 m³ metaania = 0,72 kg metaania <> 1 litra diesel <> 1,12 litraa bensiiniä <>
10 kWh

Suuntaa antava esimerkki investoinnin takaisinmaksuajasta

Oletus: kaasukäyttöisen kuorma-auton ostohinta on 40 000 € kalliimpi kuin dieselkäyttöisen kuorma-auton. Huolto- ja muita kustannuksia ei ole otettu huomioon, jotka ovat kaasurekassa suuremmat.

Jos kuorma-autolla ajetaan 100 000 kilometriä vuodessa, niin:

Dieselmoottorin polttoainekustannukset ovat 5,1 kWh/km x 100 000 km x 0,124 €/kWh = **63 240 €**.

Ottomoottorin (metaanikaasu) vastaavat ovat 6,63 kWh/km x 100 000 km x 0,08 €/kWh = **53 040 €**.

Metaanidieselmoottorin vastaavat ovat (diesel käyttö 20%)

4,97 kWh/km x 100 000 km x (0,8*0,08 + 0,2*0,124) €/kWh = **44 134 €**.

Metaanidieselmoottorin polttoainekulujen säästö vuodessa on 63 200 € - 44 134 € = 19 066 €. Takaisinmaksuaika on 40 000€/19 066 € = **2,1 vuotta**

Ottomoottorin (metaanikaasu) polttoainekulujen säästö vuodessa on 63 200 € - 53 040 € = 10 160 €. Takaisinmaksuaika on 40 000 €/10 160 € = **3,9 vuotta**

9.5 Päästöt

Diesel polttoaineella toimivan kuorma-auton päästöt ovat täydellä 40 tn kuormalla **1260 CO₂ ekv. [g/km]** (Lipasto, 2014). Metaanikaasulla (metaanidiesel) toimivan vastaavan raskaan ajoneuvon dieselmoottorin energiankulutus on samaa tasoa kuin dieselillä toimivan moottorin energian kulutus. Metaanin eli maakaasun ominaispäästöstä johtuen päästö on kuitenkin pienempi eli noin **882 CO₂ ekv. [g/km]**. (Lehmuskoski ym. 2007)

Metaanikaasulla toimivan vastaavan raskaan ajoneuvon ns. ottomoottorin (bensamoottorin) energiakulutus on n. 30 % suurempi kuin vastaavan diesel moottorin. Täten maakaasubussin ja esim. Iveco Stralis kaasukuorma-auton, jotka toimi-

vat bensamoottorin lailla, päästöt ovat siten samat kuin vastaavien diesel autojen eli 1260 CO₂ ekv. [g/km]. (Lehmuskoski ym. 2007)

Metaanikaasulla (**biokaasu**) toimivan raskaan ajoneuvon laskennassa käytettävät hiilidioksidipäästöt ovat yhteisen sopimuksen mukaan nolla. YK:n ilmastosopimuksen mukaisissa valtioiden kasvihuonekaasupäästöjen inventaarioraporteissa CO₂-päästöille sovelletaan ns. nettolaskentatapaa. Se tarkoittaa, että mikäli bioenergian käyttö ei ole aiheuttanut metsähävikkiä, biopolttoaineen poltto vapauttaa vain sen verran hiilidioksidia, jonka sen sisältämät kasvit ovat kasvaessaan ilmakehästä sitoneet. Hiilidioksidin ilmakehän pitoisuus ei siis muutu, joten nettopäästöt ovat nolla. (http://biokaasuyhdistys.net/media/UE-autojen_kasvihuonekaasupaastot.pdf)

Fossiilisen tai biopolttoaineen palaessa moottorissa syntyy aina CO₂:ta (taulukko 26). Koko polttoaineketjun päästövaikutukset määräytyvät sen mukaan, paljonko päästöjä syntyy polttoaineen tuotannossa ja se, käytetäänkö fossiilista vai uusiutuvaa energiaa. Liikenteen CO₂-päästöjen laskennassa biopolttoaineiden käyttö lasketaan hiilineutraaliksi, koska biomassassa on kasvaessaan sitonut hiiltä saman verran kuin sitä palaessa vapautuu ja tämä vapautuva hiilidioksidi sitoutuu uudelleen luonnon kiertokulkuun. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2013)

Taulukko 26. Polttoaineiden CO₂-päästöt

	moottori	päästö CO ₂ ekv g/km
Diesel	diesel	1260
Metaanidiesel=maakaasu	diesel	882
Metaani=maakaasu	otto-/bensamoottori	1260
Metaani=biokaasu	otto-/bensamoottori	0

9.6. LNG polttoaineen jakelu

Gasum tarjoaa Suomessakin nesteytettyä maakaasua LNG:tä (Liquified natural gas) kaasumoottoreiden tuotekehitys- ja testaustarkoituksiin, teollisuuden tarpeisiin, liikenteen polttoaineeksi sekä maa- ja biokaasun varapolttoaineeksi. LNG:tä voidaan toimittaa kaasuverkoston ulkopuolella oleviin käyttökohteisiin erikoisvalmisteisilla säiliöperävaunuilla. Gasumin tavoitteena on saada LNG Itämeren laivaliikenteen käyttöön. LNG sopii niin eri kokoisille rahti- ja matkustajaluksille kuin yhteysliikenteenkin aluksille. Gasumin tavoitteena on aloittaa myös

LNG:n tuonti Suomeen säiliöaluksilla, jolloin yhdellä laivarahdilla voidaan tuoda maahan jopa kymmeniä tuhansia tonneja LNG:tä.

Gasum selvittää LNG:n tuontiterminaalin rakentamista joko Inkooseen tai Tolkkiisiin sekä mahdollisuuksia rakentaa LNG:n varastosäiliö Turkuun. Porvoon Kilpilahden teollisuusalueella sijaitsee LNG:n tuotantolaitos, joka valmistui kesäkuussa 2010. Laitoksen tuotantokapasiteetti on 20 000 t/a ja sen yhteydessä on LNG-varasto, jonka tilavuus on 700 tonnia.

Tuontiterminaalin kautta Suomeen voidaan tuoda nesteytettyä maakaasua (LNG), joka hankitaan maailmanmarkkinoilta ja tuodaan Suomen terminaaliin erikoisvalmisteisilla laivoilla. Terminaalissa LNG höyrystetään kaasuksi ja syötetään maakaasuverkostoon. Lisäksi LNG:tä voidaan toimittaa terminaalista nestemäisessä muodossa proomuilla tai säiliöautoilla uusiin käyttökohteisiin, kuten laivojen polttoaineeksi tai teollisuuden käyttöön. Tuontiterminaali monipuolistaa ja joustavoittaa maakaasun hankintaa ja mahdollistaa kaasun käytön uusissa kohteissa kaasuverkoston ulkopuolella. Lisäksi terminaalin yhteyteen rakennettavat varastosäiliöt toimivat tuotevarastoina ja edistävät kaasuverkoston huoltovarmuutta kustannustehokkaasti.

Gasumin tavoitteena on LNG -terminaalin valmistuminen täydellä tuonti-, varastointi- ja verkkoon syöttökapasiteetilla vuoden 2018 loppuun mennessä. Terminaali voidaan myös rakentaa ja ottaa käyttöön vaiheittain, jolloin LNG:n tuonti mm. meriliikenteen tarpeisiin voidaan aloittaa jo vuoden 2015 lopussa.

Tornioon, Poriin ja Raumalle on myönnetty Työ- ja elinkeinoministeriön toimesta yhteensä 65,2 miljoonaa investointitukina 18.9.2014. Yhteishankkeena valmistuksessa oleva Suomen ja Viron LNG -terminaali on vielä isompi ja se vaatii vielä suurempia investointitukia. Niiden avulla voitaisiin tuoda ja viedä myös LBG:tä, mutta ne on tarkoitettu tällä hetkellä kuitenkin pelkästään LNG:n ja muiden nesteytettyjen fossiilisten metaanilajien tuontia varten.



Kuva 49. Iveco Stralis LNG kuorma-auto, 2014

Kuvassa 49 on Iveco Stralis LNG kuorma-auto, jonka suomalainen Containership Oy on hankkinut käyttöönsä. Auto toimii Vuosaaren satamasta käsin. He ovat hankkineet käyttöönsä myös oheisen siirrettävän LNG tankkausaseman, josta kuorma-autoa tankataan, lähinnä Vuosaaren sataman ympäristössä.



Kuva 50. LNG jakeluasema (Alpo Kitinoja, 8.11.2014, St Louis)

Kuvissa 50 ja 51 on LNG jakeluasema. Kuvat on GreenLC projektin toimesta otettu 8.11.2014 USA:n St Louis kaupungin Clean Energy Fuels Corp. yrityksen raskaan liikenteen jakeluasemalta. <http://www.cleanenergyfuels.com/>

Asema on ns. LCNG tankkauspaikka, jossa voidaan tankata yhteensä neljällä eri pistoolilla sekä kaasumaista maakaasua että nestemäistä maakaasua. Kaasun tankkaus tapahtuu kuljettajan toimesta. Kaasujoneuvojen tankkaus on helpompaa ja turvallisempaa kuin bensiini- tai dieselajoneuvojen tankkaus. Se kestää suurin

piirtein saman ajan, mutta siinä ei tule pahanhajuisia tahroja kenkiin eikä tankkauksen aikana läiky aineita ympäristöön.

Tankkausprosessit eroavat toisistaan vain vähän. Riippuen siitä tankkaatko CNG (paineistettua) vai LNG (nesteytettyä) kaasua. Samalla tavalla kuin dieseliä tankattaessa kuljettaja tankkaa ajoneuvon liittimen avulla. Tankkausliitin yksinkertaisesti asennetaan ajoneuvon ja sen jälkeen tankataan. Kun tankki on täynnä, annostelija sulkeutuu automaattisesti ja voit ottaa liittimen pois autosta. Nestemäistä LNG:tä tankattaessa pitää käyttää käsineitä, koska lämpötila on niin alhainen (-162°C) ja liitin on hyvin kylmä. Yleensä tankkausasemia on kolmenlaisia, julkisia, varikolla olevia ja koti asemia. Näiden tankkausasemien erot liittyvät hintaan, äänekkyteen, nopeuteen sekä maksuvälineeseen.

Varikolla tapahtuva tankkaus palvelee yleensä tiettyä määrää esim. kaupungin ajoneuvoja. Varikolla tankkaus voi olla joko ns. hidas tankkausta tai nopeaa tankkausta. Nopea tankkaus täyttää tankin normaalissa ajassa eli noin viidessä minuutissa tai jopa nopeammin. Hidas tankkaus vie pidemmän aikaa ja tapahtuu usein yön aikana. Ajoneuvoilla on tietty ajoaika, mutta myös tietty seisonta aika, esim. jäteautot, lähettipalveluautot, yksityisautot, muuttoautot jne.

Hidas tankkausasema on selvästi edullisempi kuin nopea tankkaus asema. Nopea tankkaus vaatii ylimääräisen varaston, joka ”esi-” varastoi kaasun paineessa, joka sitten johdetaan jakelulaitteeseen. Hitaassa tankkauksessa kaasu johdetaan suoraan kompressorilta auton tankkaussäiliöön. Tämän vuoksi tarvitaan vähemmän tilaa laitteille sekä laite- ja huoltokustannukset ovat pienemmät. Polttoainetankin pienempi paino mahdollistaa suuremman polttoainekuorman. Siten LNG on ihan-teellinen polttoaine pitkän matkan rekoille ja vähän pysäytyksiä vaativille matkoille.



Kuva 51. LNG pistooli (Alpo Kitinoja, 8.11.2014, St Louis)

9.7 Case diesel verrattuna metaanidieselkuorma-autoon Seinäjoki-Vuosaari siirtokuljetuksissa

Tutkimuksessa verrattiin diesel- ja metaanidieselkuorma-autoa energiankulutuksen, hiilidioksidipäästöjen ja kustannusten osalta. Oletuksena oli että kuljetusmäärä on 40 000 kg/auto.

Kustannukset (€/vuosi) K_d (diesel) ja K_k (metaanidiesel) laskettiin

$K_x = s \cdot v \cdot k_x$, jossa

s = matka (km), v = kuljetuksia/vuosi ja k_x = polttoaineen yksikkökustannus €/km.

$$K_d = 400 \cdot 250 \cdot 0,632 = 63\,200 \text{ €/vuosi}$$

$$K_k = 400 \cdot 250 \cdot 0,441 = 44\,100 \text{ €/vuosi}$$

Päästöt (g CO₂ ekv/vuosi) C_d (diesel) ja C_k (metaanidiesel) laskettiin

$$C_x = s \cdot v \cdot c_x, \text{ jossa}$$

s = matka (km), v = kuljetuksia/vuosi ja c_x = yksikköpäästö g CO₂ ekv/km.

$$C_d = 400 \cdot 250 \cdot 1260 = 126\,000\,000 \text{ g CO}_2\text{ekv/km}$$

$$C_k = 400 \cdot 250 \cdot 882 = 88\,200\,000 \text{ g CO}_2\text{ekv/km}$$

Energiankulutus (kWh/vuosi) E_d (diesel) ja E_k (metaanidiesel) laskettiin

$$E_x = s \cdot v \cdot e_x, \text{ jossa}$$

s = matka (km), v = kuljetuksia/vuosi ja e_x = energiankulutus kWh/km.

$$E_d = 400 \cdot 250 \cdot 5,1 = 510\,000 \text{ kWh}$$

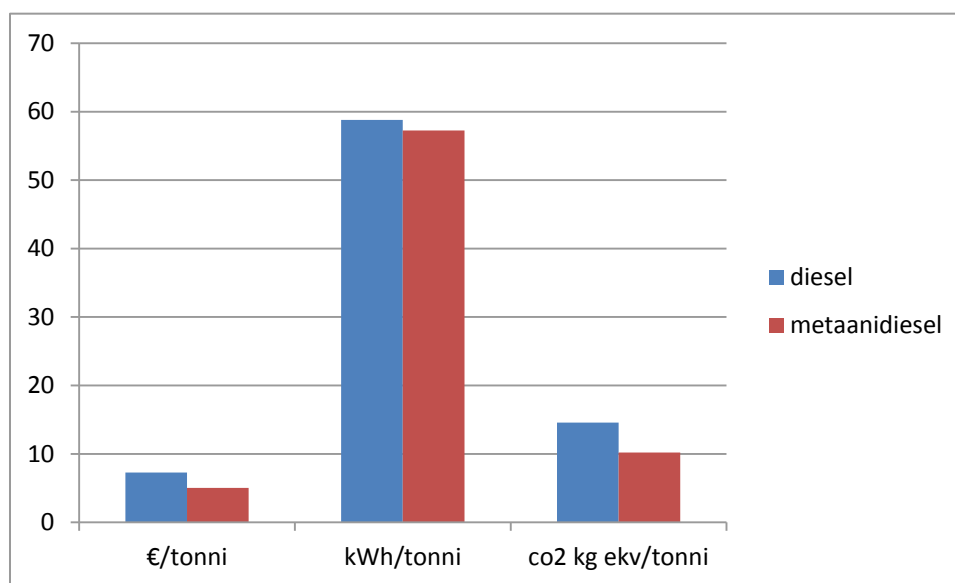
$$E_k = 400 \cdot 250 \cdot 4,97 = 497\,000 \text{ kWh}$$

Lähtöarvoina käytettiin taulukon 27 arvoja.

Taulukko 27. Lähtöarvot diesel-, metaanidiesel ja metaanikuorma-auton vertailulaskelmissa

	Diesel	Metaani – diesel (nest.)	Metaani (kaasu)	
Energiankulutus	5,1	4,97	6,63	kWh/km
CO ₂ -kerroin, tyhjä	1014	710	1014	g CO ₂ ekv/km
CO ₂ -kerroin, täysi	1260	882	1260	g CO ₂ ekv/km
Polttoainekustannus	0,632	0,441	0,53	€/km

Kustannuserot vuodessa muodostuivat käytetyillä lähtöarvoilla 19 100 euroa metaanin eduksi. Hiilidioksidipäästöjen osalta metaanidiesel oli noin 38 tuhatta kilogrammaa tehokkaampi ja käytti noin 13 tuhatta kilowattituntia vähemmän energiaa (kuva 52).

**Kuva 52.** Diesel- ja metaanidieselkuorma-auton erot reitillä Seinäjoki-Helsinki (100 000 km/vuosi)

Metaanikaasulla (**biokaasu**) toimivan raskaan ajoneuvon laskennassa käytettävät hiilidioksidipäästöt ovat yhteisen sopimuksen mukaan nolla. Kustannuksiltaan (riippuu ostopaikasta) ja energiakulutukseltaan biokaasu puhdistettuna vastaa maakaasua.

(http://biokaasuyhdistys.net/media/UE-autojen_kasvihuonekaasupaastot.pdf)

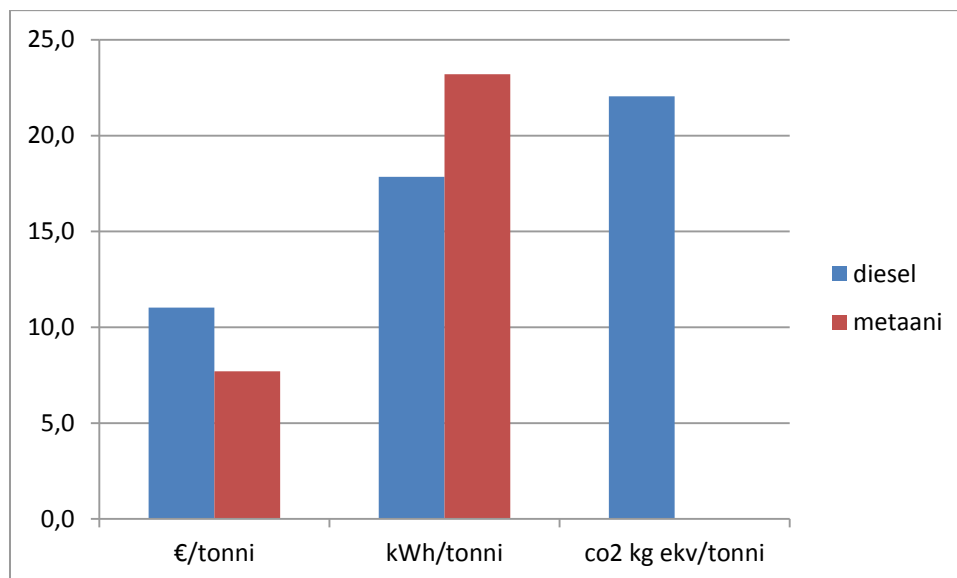
9.8 Case diesel verrattuna metaanikuorma-autoan jakelukuljetuksissa

Näissä laskelmissa on vertailtu diesel- ja biokaasukäyttöisen jakeluauton kustannuksia, energiankulutusta ja päästöjä. Lähtötietoina on käytetty taulukon 28 tietoja.

Taulukko 28. Lähtötiedot laskelmissa

	diesel	metaani (biokaasu)	
jaeltava määrä	50000	50000	tonnia/vuosi
auton kapasiteetti	40	40	tonnia &/auto
reitti keskimäärin	700	700	Km
täyttöaste keskimäärin	100	100	%
reittejä/päivä	5	5	reittiä/päivä
Energiankulutus	5,1	6,63	kWh/km
CO ₂ -kerroin	1260	0	g CO ₂ ekv/km
Polttoainekustannus	0,63	0,53	€/km

Tulosten (kuvassa 53) mukaan metaani on edullisempaa polttoainehinnoiltaan kuin diesel (dieselin 11,0 vs. metaanin 9,3 €/tonni), mutta kuluttaa enemmän energiaa (dieselin 17,9 vs. metaanin 23,2 kWh/tonni). Hiilidioksidipäästöjen osalta metaanin päästöt ovat biokaasua käytettäessä laskennallisesti nolla ja dieselillä 22,1 CO₂ kg ekv/tonni. Maakaasua käytettäessä hiilidioksidipäästöt ovat samaa luokkaa kuin dieselillä eli 22,1 CO₂ kg ekv/tonni.



Kuva 53. Diesel ja metaanikäyttöisen (biokaasu) jakelujoneuvon erot

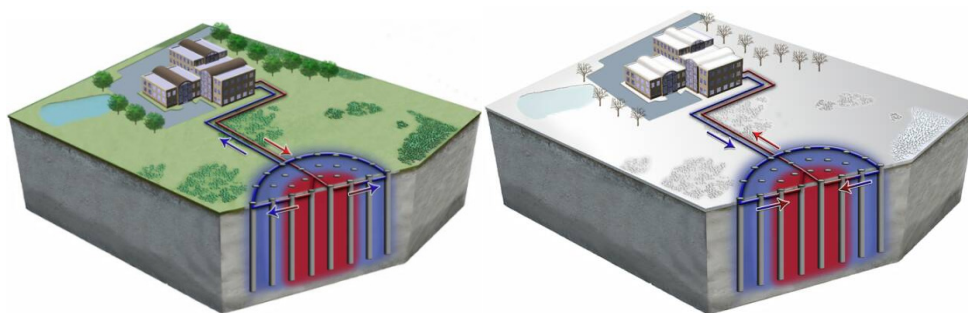
10 TERMINAALIEN LÄMMÖN TALTEENOTTO

Tapio Syrjälä

Kylmäterminaalien osalta lämpöä voitaisiin rakennusten osalta kerätä talteen lähinnä kylmäkoneiden ja ilmastoinnin lauhdeesta. Muu terminaali-alueilta yleisesti saatava lämpöenergia koostuu auringon säteilystä ja lämpimistä ilmajirroista. Auringon tuottaman lämpöenergian kerääminen on tällöin mahdollista toteuttaa aurinkopaneeleilla ja asfaltin alle sijoitetuilla putkistoilla, joissa kierrätetään lämmönsiirtonestettä. Lämpöenergian hyödyntäminen edellyttää terminaalin osalta lämmön pitkäaikaisvarastointia.

Osassa 3 (Tehdaslähettämön energiatehokkuus) esitelty kalliolämpöakku (kuva 54) on potentiaalinen vaihtoehto terminaalien lämmön talteenoton tehostamisessa. Kylmätilojen jäädytyksestä vapautuvaa lauhdelämpöä ja kesäaikaan asfalttienergiaa tai esim. auringon säteilystä saatavaa lämpöä olisi järkevää varastoida kalliolämpöakkuun. Lisäksi lämpökaivoja olisi mahdollista hyödyntää muiden tilojen osalta ilmastoinnin jäädytykseen. Kesällä kylmän tuottoon ja ilmastoinnin jäädyttämiseen käytettäviä kylmäkoneita voidaan talvella käyttää käänteisesti lämpöpumppuina. Näin ollen ei myöskään vaadita merkittäviä lisäinvestointeja lämpöpumppujen osalta. Investoinnit koostuvatkin lähinnä porakaivoryhmästä, sekä kiertovesipumppuista ja putkistosta.

Lämpökaivoon varastoitua lämpöenergiaa voitaisiin näin hyödyntää pakkasella viileiden tilojen ja toimistotilojen sekä ilmastoinnin lämmitykseen. Vastaavasti kesällä varastoitua asfalttilämpöä voitaisiin talvella käyttää asfaltin sulana pitoon. Lämpöenergian pitkäaikainen varastoiminen on yleensä hankalaa tai kallista. Parhaiten tähän tarkoitukseen soveltuu em. kalliolämpöakku. Vaikka lämpö jossain määrin hajaantuu kallioperässä, varastoitu lämpöenergia voidaan pääosin palauttaa lämpöpumppujen avulla. Kalliolämpöpumpun tehokerroin nousee jopa kaksinkertaiseksi, kun lämpöä varastoidaan lämpökaivoryhmään.



Kuva 54. Yksinkertaistettu malli porakaivokentästä, jota voidaan käyttää pitkäaikaiseen lämmön varastointiin (Underground Energy, 2014).

Lämpökaivon rakentamiseksi tulee tehdä ja eristää porakaivokenttä ja hankkia lämmönvaihtimet tai lämpöpumput kylmäkoneiden lauhdelämmön talteenottoon ja / tai hyödyntää asfalttilämpöä lämmön (kuva 55) talteenoton ja sulana pidon toteuttamiseen. Talteenottopotentiaali on esitetty taulukossa 29 eli yhteensä noin 373000 kWh, jonka rahallinen arvo on noin 40000 €/vuosi.

Taulukko 29. Lämpökaivon talteenottopotentiaali

+2 asteiset tilat	25 000 kWh
+6...+8 asteiset	22 000 kWh
Pakasteet	66 000 kWh
Asfaltti	260 000 kWh
Yhteensä	373 000 kWh

rahassa arvo noin 40 000 €/vuosi

Porakaivokentän lämmöntallennustehoarvio on noin 200 kWh/m. Kaivojen kokonaismitta on noin 1865 m, jossa 120 metrin porakaivoja on 16 kpl. Lämpökaivokustannukset n. 56 000 €. Kaivoja tulisi olla 4 keskellä ja 12 reunoilla kuuden metrin välein. Sivun pituuden ollessa $3 * 6 = 18$ m.

Routaeristeen tulee olla noin 200 mm paksuinen. Kustannus tältä osin on 18 €/m², jolloin $400 \text{ m}^2 * 18 \text{ €/m}^2 = 7 200 \text{ €}$.

Lisäksi PEX – asfalttiputket maksavat n. 3 €/m. Putkia tarvitaan 10 000 m, jolloin kustannus on $10 000 \text{ m} * 3 \text{ €/m} = 30 000 \text{ €}$

Tarvikkeet maksavat siten yhteensä 37 200 €

Kokonaiskustannukset porakaivon osalta ovat taulukossa 30 esitetyt 150 000 €.

Taulukko 30. Porakaivokentän kustannukset

Porakaivokenttä töineen	120 000 €
Muu tekniikka, lämmön talteenottojärjestelmä lauhduttimet n. 200 €/kW	6 000 €
Lämpöpumppu 3 * 12 kW	18 000 €
Muut kustannukset arvio	6 000 €
Kustannukset yhteensä	150 000 €

Kustannusten (150 000 €) ja energiasäästöpotentiaalın (40 000 €/vuosi) avulla takaisinmaksuajaksi saadaan 4 vuotta ilman investointitukia ja korkoja. Investointituet (esim. 30 %) alentaisivat takaisinmaksuaikaa merkittävästi.



Kuva 55. Espoo Logistiikka -liikelaitoksen varikon katolle asennetut aurinkopaneelit (Patrick Forsblom, 2014).

Kuten osassa 3 (Tehdaslähettämön energiatehokkuus) esitettiin, aurinkopaneelien teho olisi aurinkoisena päivänä noin 130 W/m^2 , Sääolosuhteiden ja vuorokauden aikojen vaihtelun myötä auringosta saatava keskimääräinen sähköteho on vastaavasti noin 40 W/m^2 . Toisaalta kylmäterminaalissa lämpöpumppujen sähkön tarve on suurimmillaan juuri kuumina aurinkoisina päivinä, joten myös hyödyksi saatava osuus aurinkopaneelisen tuottamasta sähkötehosta on keskimääräistä korkeampi, arviolta 100 W/m^2 . Tuhannen neliön alueelta saatava sähköteho olisi suunnilleen 100 kW, niinä aikoina kun jäähdytystehon tarvekin on suurimmillaan.

Lisäksi on syytä huomioida aurinkopaneelien tarjoaman varjostuksen vähentävä vaikutus kylmävaraston lämpökuormaan. Näin ollen sähköä tuottavien aurinkopaneelien hankinta kylmävaraston katolle on kannattavaa mielekkäällä aikavälillä. Investoinnin takaisinmaksuaika, joka yleensä on melko pitkä, jää siis tässä tapauksessa selvästi lyhyemmäksi.

11 ELINTARVIKEKETJUN SÄÄSTÖPOTENTIAALIT

Hanne Ala-Harja ja Ville Tuomi

Tässä luvussa tuodaan tiivistetysti esiin eri vaiheiden merkitys koko elintarvike-toimitusketjun näkökulmasta. Tarkastelut tehdään kustannusten ja hiilidioksidipäästöjen osalta suhteutettuna tuotekiloon. Muutosta tarkastellaan myös prosentteina. Tarkasteltavia vaiheita ovat hankintakuljetus satamasta tehtaalle, tehdas, lähettäjä, siirtokuljetus, keräily sekä runko- ja jakelukuljetukset (taulukko x). Saatuja tuloksia verrataan eri tutkimusten tuloksiin ja tulosten vertailtavuutta pohditaan eri tuoteryhmiin.

11.1 Kustannus- ja päästösäästöpotentiaalit

Voiton tekeminen vaatii toimitusketjujen johtamista, jonka oleellinen osa on mitaaminen (Yang ym., 2013). Tässä tutkimuksessa lisättiin ymmärrystä elintarvike-toimitusketjuista ja kehitettiin niitä käytännön tarpeisiin, joka mm. Srivastavan (2007) McIntyren jne. (1998) ja Saadanyn jne (2011) mukaan on tarpeellista.

Päivittäistavarakaupan kasvihuonekaasupäästöt ovat Suomessa kokonaisuudessaan noin 1,2 miljoonaa CO₂ ekv. tonnia, josta 40 % eli 472 000 tonnia aiheutui terminaaleissa sekä myymälöissä käytetyn sähkön ja lämmön tuotannosta. 27 % eli 329 000 tonnia oli kuljetusten kasvihuonekaasupäästöjen osuus (Päivittäistavarayhdistys ry, 2004). Tuloksia ei voi suoraan verrata Green LC-tutkimushankkeen tuloksiin, koska hankkeessa arvioitiin logistiikan osuutta ja siihen sisällytettiin terminaali- ja varastotoiminnot kuljetusten lisäksi.

Word resource instituten (2011) mukaan globaaleista kasvihuonepäästöistä 13,5 % on aiheutunut kuljetuksista. Yhdysvalloissa ruoka on keskimäärin kulkenut 2100 km lautaselle päästyään (Miller 2001; James & James 2010). Esimerkiksi Nestlen tuotetonnin kuljettaminen on arvioitu aiheuttaneen 15 kilon CO₂ päästöt (James & James 2010). Näihin tuloksiin voidaan verrata tässä tutkimuksessa arvioitua lämpösäädellyn tuotteen 45 kg kiloa hiilidioksidiekvivalenteja päästöjä / tuotetonna.

Lämpötilasäätelyn osuus päästöistä arvioitiin tässä tutkimuksessa noin viidesosan suuruiseksi. Lämpösäätely kuluttaa McKinnonin ja Campbellin (1998) sekä Jamesin ja Jamesin (2010) mukaan 40 % jakelun energiankulutuksesta ja pakasteruoan jakelu on peräti 1,7 kertaa energiaa kuluttavampaa kuin kuivaelintarvikkeen jakelu. Lämpimän varaston energiankulutus oli Itronin (2006) mukaan noin neljäsosan viileävaraston energiankulutuksesta. Varaston lämpösäätelyn osuus ai-

emmissä tutkimuksissa on ollut merkittävä. Tämän tutkimuksen perusteella vaikuttaisi että varastojen osuus kokonaisenergiankulutuksesta on kuitenkin varsin kohtuullinen, kun sitä vertaa kuljetuksen aikaisen lämpösäätelyn energiankulutukseen.

Tässä tutkimuksessa siirtokuljetuksen osalta verrattiin kuorma-autokuljetuksen TEU-konttiliikenteen korvaamista junakuljetuksella ja tulokset olivat -0,0046 €/kg, eli 40 % vähemmän rautateitse ja hiilidioksidipäästöjen osalta -11g/kg, eli 87 % vähemmän rautateitse kuin kuorma-autolla. Suomessa maantiekuljetuksen osuus on suurta ja rautatiekuljetus vähäistä ja yhdistettyjen kuljetusten osuus on pieni. Globaaleissa ketjuissa yhdistettyjen kuljetusten päästöjä osaltaan laskenevat meri- ja rautatiekuljetukset. Viiden kilon ruokamäärä vaatii saman polttoainemäärän jos se kulkee 1 km henkilöautolla, 43 km ilmassa, 740 km kuorma-autolla, 2400 km junalla tai 3800 km laivalla. (Brodt, Chernoh, & Feenstra 2007; James & James 2010).

Energiankulutus- ja päästöt korreloivat tämän kuten useiden aiempienkin tutkimusten tuloksissa. Kuljetusten osalta kustannukset korreloivat myös monin osin päästöjen ja energiankulutuksen. Biometaanin käyttö energiana muodostaa tästä poikkeuksen, sillä on yleisesti sovittu että biometaanin päästöt ovat 0.

Dieselkäyttöisen ajoneuvon korvaaminen metaanidieselkäyttöisellä ajoneuvolla osoittautui tämän tutkimuksen mukaan energia-, päästö- ja kustannustehokkaaksi ratkaisuksi siirtokuljetuksissa (n 0,003 kg CO₂ ekv ja 0,002 € tuotekiloon suhteutettuna metaanidieselin eduksi). Jakelukuljetusten osalta metaanikäyttöinen ottomootorilla varustettu ajoneuvo osoittautui kustannus- ja päästötehokkaammaksi kuin dieselkäyttöinen ajoneuvo.

Jamesin ja Jamesin (2010) tutkimuksesta kävi ilmi että pakastekuljetukset ovat varastotilana viidesosan ajastaan. Tässä tutkimuksessa on todettu että kuljetuksen aikainen lämpösäätelyn aiheuttama energiankulutus on suurta verrattuna terminaalien lämpösäätelyn aiheuttamaan energiankulutukseen. Toisaalta ovien avaaminen aiheuttaa energiankulutuksen lisääntymistä. Singhin (2008) mukaan varaston koon kasvaminen vähentää energiankulutusta joten säilytys suurissa varastoissa on perusteltua myös siten.

Evansin jne. (2007) tutkimuksessa (James & James 2010) ruokakaupoissa 68 % sähköstä meni jäädytykseen (2100 MWh/vuosi/keskikokoinen myymälä) ja 23 % valaistukseen. Myymälöiden energiankulutusta ei arvioitu Green Lc-hankkeessa.

Jätteen merkitys elintarvikkeiden kokonaispäästöjen kannalta on merkittävä. Jakelun ja jälleenmyynnin sekä käsittelyn ja varastoinnin osuus hevi-, kala- ja liha-tuotteissa on noin kymmenen prosentin luokkaa Yhdysvalloissa. Kuluttajan osuus muiden paitsi lihan osalta on siihen verrattuna noin kolminkertaista.

Hankintalogistiikassa tarkasteltiin irtotavararaaka-ainetuonnin keskittämistä yhteen satamaan ja kuorma-autokuljetuksen korvaamista junakuljetuksella sen sijaan että tuonti tapahtuisi eri satamiin, joista kuorma-autolla tehtaalle. Keskittäminen yhteen satamaan ja sieltä tuonti junalla tehtaalle mahdollistaisi 55 %:n kustannussäästöt ja 91 %:n hiilidioksidipäästösäästöt. Raaka-ainetuotekiloa kohti säästö oli laskelmien mukaan 0,0024 euroa ja 5,4 CO₂ ekv kg / tuotekilo.

Keräilyn sekä siirto-, runko- ja jakelukuljetusten osalta verrattiin keskitettyä keräilyterminaalimallia hajautettuun maakuntakeräilyterminaalien mallin. Kustannusten osalta ero oli 0,0075 € / kg eli 27 % ja päästöjen osalta 0,078 g CO₂ ekv/kg 86 %. Keskittämisen ja hajautettujen verkkoarkkitehtuurien vaikutus suoritteisiin todettiin merkittäväksi kuten monessa tutkimuksessa (Kortelainen & Kuosmanen 2007; Murphy & Poist 2003; Lee 2008; Markley & Davis 2007; Quanriquasi ym. 2007; Rao & Holt 2005) on todettu.

Tehtaan ja sen yhteydessä toimivan lähettämön osalta tarkasteltavana oli hukkalämmön hyödyntäminen. Hukkalämpöä hyödynnettiin jo, mutta jäteveden hukkalämmön talteenotto mukaan lukien kokonaissäästöpotentiaali olisi 64 % eli n. 0,029 €/tuotekilo ja 0,169 CO₂ ekv/tuotekilo.

Terminaalin lämmön talteenoton- ja varastoinnin toisilleen osittain tai kokonaan vaihtoehtoisia mahdollisuuksia oli useita. Lämpökaivon osalta säästöpotentiaali oli 0,074 €/tuotekilo ja 0,07 CO₂ kg/tuotekilo, aurinkosähkön osalta 0,185 €/tuotekilo ja 0,49 CO₂ kg/tuotekilo ja asfalttilämmön osalta 0,185 €/tuotekilo ja 0,39 CO₂ kg/tuotekilo.

Tämän tutkimuksen energiansäästöpotentiaalit on kerätty taulukkoon 31. Taulukosta näkyy, kuinka junakuljetusten kannattavuus lisääntyy, kun kuljetettavien TEU-konttien määrää lisätään. Säästöpotentiaalia löytyy myös ajoneuvojen muuttamisesta, lämmön talteenotosta, hukkalämmön hyödyntämisestä ja tehdaslähettämön eri energiantuotantomuodoista.

Taulukko 31. Elintarvikeketjun säästöpotentiaalit

	Kustannukset (€)	Säästöpotentiaali	Takaisinmaksuaika (v.)	Säästöpotentiaali CO2
Tehdaslähettämö	(Invest.)	(€/1000kg)		(CO2/1000kg)
- Kallioakku/ lämpökaivo	200 000	0,074	3,3	0,07
- Aurinkosähkö	240 000	0,185	6,0	0,49
- Asfalttienergia	320 000	0,185	4,7	0,39
- Kaukolämpö	30 000	0,000	2,5	0,49
Kuorma-auto junaksi, Seinäjoki – Vuosaari siirtokulj.		(% muutosta)	Ei arvioitavissa, laskelma teoreettinen	(% muutosta)
- 40 TEU-konttia		58 pienem.		85 pienem.
- 15 TEU-konttia		36 pienem.		69 pienem.
- 7-8 TEU-konttia		ei juuri eroa		pienempi
Kuorma-auto junaksi, Seinäjoki – Pietari		Junan edullisuus kasvaa, kun kuljetuksen määrä lisääntyy	Ei arvioitavissa, laskelma teoreettinen	(Kg/kWh)
- 40 TEU-konttia/pv				- 3697/15022
- - juna	848			- 6083/59489
- - kuorma-auto	1733			-
- 4 TEU-konttia/pv				-
- - juna	1591			-
- - kuorma-auto	1733			-
Dieselajoneuvo metaanidieselajoneuvoksi siirtokuljetuksissa	40 000 suurempi	30 %	2,1	M kaasu 30% B kaasu 100%
Dieselajoneuvo metaanijoneuvoksi jakelukuljetuksissa	40 000 suurempi	15 %	3,9	M kaasu 0 % B kaasu 100 %
Lämmön talteenotto, porakaivokenttä	150 000	40 000 €/vuosi	4 (ilman investointitukia)	
Lähettämön hukkalämmön hyödyntäminen		64 %, n. 0,029 €/tuotekilo		0,169 CO2 ekv/tuotekilo

Hankkeessa vertailtiin takaisinmaksuaikoja investointien osalta. Kallioakun takaisinmaksuajaksi saatiin 3,3 vuotta, aurinkosähkön 6 vuotta ja asfalttienergian 4,7 vuotta. Metaanidieselkuorma-auton käyttöönoton takaisinmaksuajaksi saatiin 2,1 vuotta ja metaanikaasukuorma-auton 3,9 vuotta.

Kustannus-, päästö- ja energiankulutussäästömahdollisuuksista tehtiin Spreadsheetconverter-ohjelmaa hyödyntäen laskuri jolla säästömahdollisuuksia voidaan arvioida (kuva 55). Laskuri on html-pohjainen. Laskurissa on käytetty hankkeessa hyödynnetty keskeisiä tuloksia. Säästömahdollisuudet on esitetty oikean puoleisissa sarakkeissa ja käyttö- ja lähtötiedot ovat vasemmalla. Ketjun vaiheet on esitetty riveittäin.

	Lämpö	Sähkö		säästöpotentiaali				
				eurot (€/vuosi)		päästöt (co2 kg/vuosi)		energiankulutus (kWh/vuosi)
Energian hinta	0,045	0,035	€/kWh	lämpö	sähkö	lämpö	sähkö	lämpö
Tehdas / lähettämö (energian käyttö)	100 000	2 000 000	kWh/vuosi					
*josta ylijäämälämpöä	20	45	%					
*jonka hyödyntämispotentiaali	5	50	%	45	15 750	265	119 250	1 000
**tarvittava investointi	10 000	10 000	€/vuosi					
*muut säästömahdollisuudet	3	15	%	135	10 500	795	79 500	3 000
**tarvittava investointi	5 000	15 000	€/vuosi					
Terminaali/varasto (energian käyttö)	50 000	4 000 000	kWh/vuosi					
*säästömahdollisuudet	10	30	%	225	42 000	1 325	318 000	5 000
**tarvittava investointi	5 000	1 000	€/vuosi					
Siirtokuljetus (tonnikilometrit)	7 000 000		tkm					
*metaanidieselin mahdollinen osuus	60		%					
**tarvittava investointi	25000		€/vuosi					
*raideliikenteen mahdollinen osuus	10		%	34 087		224 000		94500

Update Reset Print Submit

Kuva 56. Näkymä html-laskurista

11.2 Pohdinta

Green LC- tutkimushanke lisäksi ymmärrystä elintarviketoimitusketjujen päästöjen jakautumisesta eri ketjujen vaiheisiin. Arvovirtauksen kuvaaminen eli value stream mapping (VSM) tarkoittaa toiminnan kuvaamista alkaen asiakkaan tarpeesta ja päättyen asiakkaan saamaan tuotteeseen tai palveluun. Tässä tutkimuksessa kuvattiin elintarvikekuljetusten arvoketjua ja kuljetuksen aikana käytettyä energiaa ja päästöjä. Ekotehokas arvovirtaus kuvattiin pelkistetysti tonnikilometreihin perustuen.

Eri vaiheissa tunnistettiin sekä kustannus-, energia- että hiilidioksidin osalta merkittäviä lähteitä. Jakelun, lämpötilasäätelyn ja ylijäämälämpöjen hyödyntämismahdollisuuksien merkitys todettiin yleisesti erittäin merkitykselliseksi. Yksittä-

set vaiheet saattoivat osoittautua kokonaisuuden kannalta vähemmän merkitykselliseksi kustannus- päästö tai hiilidioksidilähteiksi, mutta niissä tehtävät tehostamismahdollisuudet osoittautuivat silti kokonaisuuden kannalta merkittäviksi.

Keskusvarastokeskeinen logistiikkaverkosto mahdollistaa täyttöasteeltaan suuret kuormat ja tehokkaan maantielogistiikan. Kuljetusmäärät maakuntakohtaisesti tarkasteltuina osoittautuivat kuitenkin niin suuriksi, että myös suorat kuljetukset maakuntien välillä olisivat karkeassa tarkastelussa sekä kustannus- että ympäristötehokkaita mikäli täyttöaste onnistuttaisiin pitämään kaikilla reiteillä korkeana esim. kuljetuksia yhdistelemällä.

Ajoneuvojen osalta tarkasteltiin vaihtoehtoisia energialähteitä ja eri kuljetusratkaisuja. Huomioon otettiin kontit, kaasukäyttöiset ajoneuvot ja rautatieliikenne. TEU-konttien ja trailereiden hyödyntäminen kuljetuksessa, etenkin vientikuljetuksissa osoittautui kiinnostavaksi tulevaisuuden tutkimuskohteeksi. Rautatieliikenteen käyttäminen osoittautui teoriassa hyvinkin kustannus- ja päästötehokkaaksi. Käytännössä junan käyttö voi kuitenkin olla vaikeaa. Rautatiekuljetuspalvelua ei ole saatavilla. Toisaalta elintarvikekuljetusten luonteen vuoksi eli siksi, että elintarvikkeita on kuljetettava kotimaassa pienissä erissä ja monta kertaa vuorokaudessa ja kuljetukset tehtailta alihankkijoille edellyttävät kuljetusten joustavuutta, sillä tuotanto ei ole aina minuutilleen aikataulussa ja toisaalta junan pitäisi lähteä ja kulkea ajallaan.

Tutkimuksessa osoittautui merkitykselliseksi huomioida vuodenaikavaihtelu, viikonpäivä-, asiakas- ja kellonaikavaihtelu, sekä myös kuljettajakohtainen vaihtelu logistiikan suunnittelussa. Tämä auttaa vähentämään ajosuoritteita ja siten kokonaispäästöjä, -kustannuksia ja energiankäyttöä.

Lämpösäädelyjen kuljetusten energiankulutus on suurta verrattuna terminaalissa tapahtuvaan lämpösäätelyyn. Näin ollen tulevaisuudessa voisi tutkia esimerkiksi tuotteiden terminaalissa yliviilentämisen vaikutuksia tuotteen laatuun ja sen energiansäästöpotentiaalia.

Green LC projektissa on arvioitu erilaisia taloudellisia säästömahdollisuuksia, joita siirtymisellä rekoissa toisenlaisiin polttoaineisiin, maantiekuljetusten korvaamisella ainakin osittain junaliikenteellä ja erilaisilla uusiutuvan energian hyödyntämisen ratkaisuilla voidaan saavuttaa. Raportin laskelmat sisälsivät oletuksia, mutta tulosten laskentatavat on selostettu raportissa ja siten tutkimusta voi pitää suhteellisen luotettavana. Kunkin ratkaisun kannattavuuteen voivat vaikuttaa tulevaisuudessakin kuitenkin poliittiset päätökset ja virkamiesten päätökset, sekä infrastruktuurin kehittyminen. Infrastruktuurin kehittymisestä esimerk-

kinä on tankkauspisteiden yleistyminen kaasurekoille eri puolelle Suomea. Käytön lisääntyminen vaikuttanee hintatasoon.

Poliittisilla päätöksillä säädetään uusiutuvaa energiantuotantoa koskevia lakeja ja poliittisilla päätöksillä ohjataan myös virkamiesten toimintaa. Tästä on GreenLC projektissakin tutkittavana ollut aurinkovoima, johon tullin antama viranomaisohje vaikutti lamaanuttavasti estäen yritysten investointeja aurinkovoimaan, koska aurinkovoimalle säädettiin 100 kvA:n sijaan 50 kVA:n raja, jonka yli tuotetusta energiasta yritys joutuisi maksamaan veroa. Näin takaisinmaksuajasta tuli liian pitkä (HS 18.8.2014). Alle puolen vuoden päästä 14.1.2015 kerrottiin kuitenkin, että eduskunnalle on annettu lakiesitys, jonka mukaan verovapauden rajan nostettaisiin takaisin 100 kvA:iin ja sitäkin tehokkaammat voimalaitokset saisivat verovapauden, jos niiden vuosituotanto jäisi alle 800 megawattitunnin (HS 14.1.2015). Yleensä poliittisia päätöksiä siitä seuraavaa lainsäädäntöä ja viranomaisten toimintaa pidetään tempoilevana ja monenlaisia energiaan kohdistuvia tukia eri energiamuotojen kannattavuuteen paljonkin vaikuttavina, kuten useassa hajautettua energiantuotantoa koskevassa puheenvuorossa esim. Hajautettu energiantuotanto kestävän kasvun moottorina– työpajassa (19.1.2015) tuli ilmi. Tempoilevuus vaikeuttaa kannattavuuden ennustamista eikä asiaa helpota esim. eduskuntavaalien läheisyys. Tuista on tietoa mm. Energiaviraston (6.2.2015) internet-sivustolla ja työ- ja elinkeinoministeriön julkaisussa (Pienimuotoisen energiantuotannon edistämistyöryhmä 2014).

Tutkimuskysymysten osalta voidaankin todeta että viileäkuljetettavien elintarvikkejakelun alueellisessa yhdistämisessä olisi suuri potentiaali ja myös rakenteellisesti erilaisia mahdollisuuksia. Energiansäästöön monilämpötilaterminaalissa löydettiin säästömahdollisuuksia ja useiden ratkaisujen takaisinmaksuajat ovat nopeita. Ympäristötehokkuutta voidaan myös parantaa langattomien mittausten käyttämisessä olosuhdeseurannassa kun optimointia voidaan tehdä reaaliajassa mm. vuodenaika ja päiväkohtaisesti.

LÄHTEET

Ahvenainen, R. (Ed.). (2003). *Novel food packaging techniques*. Elsevier.

Bahaj A. S., & James, P. A. B. (2002). Economics of solar powered refrigeration transport applications. In Proceedings of the 29th IEEE PV specialists conference. New Orleans, USA, 21–24 May 2002 (pp. 1561–1564)

Björkroth, Frostelius, Kajova, Palo (2012). Kilpailuviraston päivittäistavarakaup-
paa koskeva selvitys. Kuinka kaupan ostovoima vaikuttaa kaupan ja teollisuuden
välisiin suhteisiin?. Kilpailuviraston selvityksiä 1/2012.

Bowersox, D., Closs, D. and Stank, S. (2000), “Ten mega-trends that will revolu-
tionize supply chain logistics”, *Journal of Business Logistics*, Vol. 21, No. 2, pp.
1-16.

Brodt, S., Chernoh, E., & Feenstra, G. (2007). Assessment of energy use and
greenhouse gas emissions in the food system: A literature review Agricultural
Sustainability Institute, University of California Davis. <
[http://asi.ucdavis.edu/Research/Literature_Review_Assessment_of_Energy_Use
_and_Greenhouse_Gas_Emissions_in_the_Food_system_Nov_2007.pdf](http://asi.ucdavis.edu/Research/Literature_Review_Assessment_of_Energy_Use_and_Greenhouse_Gas_Emissions_in_the_Food_system_Nov_2007.pdf)

Calfinder (2014). New Solar-Powered "Idling-Stop" Air-Conditioning for Trucks.
[http://solar.calfinder.com/blog/products/new-solar-powered-idling-stop-air-
conditioning-for-trucks](http://solar.calfinder.com/blog/products/new-solar-powered-idling-stop-air-conditioning-for-trucks)

Carbon Disclosure Project (2006) Carbon disclosure project report global FT500
<http://www.cdproject.net/CDPResults/CDP5_FT500_Report.pdf>. London:
Carbon Disclosure Project.

Carter, Graig & D. Rogers (2005). A framework of sustainable supply chain man-
agement: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribu-
tion & Logistic Management*. Vol. 38, No. 5. pp 360 - 387.

Christopher, Martin (2005). *Logistics and supply chain management. Creating
value-adding networks*. Prentice Hall, Financial Times. Pearson Education Lim-
ited.

Chunguang Bai, Joseph Sarkis, Xiaopeng Wei, Lenny Koh, (2012). Evaluating
ecological sustainable performance measures for supply chain management, *Sup-
ply Chain Management: An International Journal*, Vol. 17 Iss: 1, pp.78 – 92

Cooltech, 2014. Magnetic Refrigeration Principle. saatavilla:
<http://www.cooltech-applications.com/magnetic-refrigeration-principle.html>

Craig R. Carter, P. Liane Easton, (2011) Sustainable supply chain management:
evolution and future directions, *International Journal of Physical Distribution &
Logistics Management*, Vol. 41 Iss: 1, pp.46 - 62

Coley D, Howard M and M. Winter (2009). Local food, food miles and carbon emissions: A comparison of farm shop and mass distribution approaches. *Food Policy*, Vol. 34, No 2, 2009. pp 150 – 155.

Cumming, J. F. (2005). Making the intangible count - counting the intangible: A report on current learning from a UK food retailer. *International Journal of Productivity and Performance Management* 54, no. 3/4, (April 1): 288-292. <http://www.proquest.com/> (accessed November 27, 2009).

Direktiivi 2009/33/EY

Duiven, J. E., & Binard, P. (2002). Refrigerated storage: New developments. *Bulletin of the IIR* [2002-2].

EIA Energy Information Administration *2014(.Table C10A. Consumption and Gross Energy Intensity by Climate Zone^a for All Buildings, 2003Saataavilla> http://www.eia.gov/consumption/commercial/data/archive/cbecs/cbecs2003/detail_ed_tables_2003/2003set14/2003html/c10a.html

Eletroniikkalehti (2014). Uusi induktiolamppu haastaa ledilamput. 9.5.2014

Energiavirasto (6.2.2015): Tuotantotuki. Saataavilla: <http://www.energiavirasto.fi/fi/tuotantotuki1>

Energystar *2014. ENERGY STAR®Performance Ratings Technical Methodology for Warehouse. Saataavilla> http://www.energystar.gov/ia/business/evaluate_performance/warehouse_tech_desc.pdf

Epstein (2014). *Testa Produce, Inc. Headquarters and Produce Distribution Facility*. <http://www.epsteinglobal.com/case-studies/testa-produce-inc-headquarters-and-produce-distribution-facility>

Evans, J. A., Scarcelli, S., & Swain, M. V. L. (2007). Temperature and energy performance of refrigerated retail display and commercial catering cabinets under test conditions. *International Journal of Refrigeration*, 30, 398–408.

Fennia Rail (2014). Palvelumme. <http://www.fenniarail.fi/palvelut.html>

Forsman, Pasi (2014). VR Transpoint. Henkilökohtainen tiedonanto.

Gasum (2014). Lähde: <http://www.gasum.fi/Puhtaampi-liikenne/Liikennekaasun-hinta/Hintavertailu/>

Giannakourou M.C ja P.S. Taoukis (2003). Application of a TTI-based Distribution Management System for Quality Optimization of Frozen Vegetables at the Consumer End. *Journal of Food Science*. Vol 68, No 1.

Global Times, 2009. Railway freight tariff raised 7.3 percent.

Green Business Light (2014). Energy saving lighting solutions for logistics & distribution centres, large commercial storage facilities. Saatavilla: <http://www.greenbusinesslight.com/page/75/about-us.htm>

Gustavsson, J., Cederberg, C., Sonesson, U., Van Otterdijk, R., & Meybeck, A. (2011). Global food losses and food waste. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom.

Hajautettu energiantuotanto kestävä kasvun moottorina –työpaja. (19.1.2015). Tilaisuus alan toimijoille ja asiantuntijoille Vaasan yliopistossa. Järjestäjinä Vaasan yliopiston Levón-instituutti, Lähienergialiitto ja Maaseutupolitiikan yhteistyöryhmä.

HS 18.8.2015. Aurinkovoiman alku sulii viranomaisohjeeseen – tehdas jäihin Salossa. Www: http://yle.fi/uutiset/aurinkovoiman_alku_sulii_viranomaisohjeeseen__tehdas_jaihin_salossa/7409778

HS 14.1.2015. Oman sähkön tuottaminen helpottuu – "Sitten painetaan nappia ja investoidaan". Www: http://yle.fi/uutiset/oman_sahkon_tuottaminen_helpottuu__sitten_painetaan_nappia_ja_investoidaan/7737933

Heap, R. D. (2006). Cold chain performance issues now and in the future. Innovative equipment and systems for comfort and food preservation, meeting of IIRcommissions B2, E1 with C2, D1, D2, Auckland, New Zealand. Paris: International Institute of Refrigeration.

Heikkilä, Ilkka ja Kiuru Tomi (2014). Ylijäämälämmön taloudellinen Hyödyntäminen. Ylijäämälämpöenergia-analyysit. Motiva. Saatavilla: http://www.motiva.fi/files/8808/Ylijaamalammon_taloudellinen_hyodyntaminen_-_ylijaamalampoenergia-analyysit.pdf viitattu 10.11.2014

Iikkanen Pekka (2013). Rautatieliikenteen kustannusmallit. Liikennevirasto, liikennesuunnitteluosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 15/2013. 53 sivua ja 1 liite. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-283-9.

Ijäs, Juhani (2014). VR Transpoint. Henkilökohtainen tiedonanto. 4.11.2014.

Itron (2006). California Commercial End-use Survey. Consultant report. California Commercial End-use Survey, Itron, Inc

James, S. J., Evans, J., & James, C. (2008). A review of the performance of domestic refrigerators. *Journal of Food Engineering*, 87(1), 2-10.

James S.J., James C. ja J.A. Evans (2006). Modelling of food transportation systems – a review. *International Journal of Refrigeration*. Volume 29, Issue 6, September 2006, Pages 947–957 Issue with Special Emphasis on Data and Models on Food Refrigeration

James, S. J., & James, C. (2010). The food cold-chain and climate change. *Food Research International*, 43(7), 1944-1956.

James, S. J., Swain, M. J., Brown, T., Evans, J. A., Tassou, S. A., Ge, Y. T., et al. (2009). Improving the energy efficiency of food refrigeration operations. In *Proceedings of the institute of refrigeration* [Session 2008-09, 5-1-5-8].

Keeble Justin J, Sophie Topiol, and Simon Berkeley. 2003. Using indicators to measure sustainability performance at a corporate and project level. *Journal of Business Ethics* 44, no. 2/3, (May 1): 149-158. <http://www.proquest.com/> (accessed November 27, 2009).

Konepörssi (2014). Bio-DME:llä lupaava tulevaisuus. Uutinen julkaistu 28.03.2012. Saatavilla: <http://www.koneporssi.com/uutiset/bio-dme-lla-lupaava-tulevaisuus/>. Lainattu 3.10.2014

Kortelainen, Mika & Kuosmanen, Timo. (2007). Eco-efficiency analysis of consumer durables using absolute shadow prices. *Journal of Productivity Analysis*, 28(1-2), 57-69.

Lee, H. 2008. Embedding sustainability: lessons from the front line. *International Commerce Review : ECR Journal* 8, no. 1, (October 1): 10-20. <http://libts.seamk.fi:2125/> (accessed October 14, 2009).

Lehmuskoski Ville, Saari Petri ja Nils-Olof Nylund (2007). Ympäristöystävällisen kaupunkiliikenteen kehittäminen Helsingissä. HELSINGIN KAUPUNKI LIIKENNELAITOS Suunnitteluyksikkö. D: 9/2007. Saatavilla: http://www.hel.fi/hel2/ympk/ohjelmat/Ymp_yst_joukkoliikenne.pdf

Liikenne- ja viestintäministeriö (2013). Tulevaisuuden käyttövoimat liikenteessä. Työryhmän loppuraportti. 8.5.2013. ISSN (verkkójulkaisu) 1798-4045. saatavilla: <http://www.lvm.fi/julkaisu/4147323/tulevaisuuden-kayttovoimat-liikenteessa-tyoryhman-loppuraportti>, s.42

Lättilä, Lauri, Ville Henttu & Olli-Pekka Hilmola (2013). Hinterland operations of sea ports do matter: Dry port usage effects on transportation costs and CO2 emissions, *Transportation Research Part E*, Vol. 55, pp. 23-42.

Markley, Melissa J. & Davis, Lenita. (2007). Exploring future competitive advantage through sustainable supply chains. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(9), 763-774.

Miller, G. T. (2001). *Environmental science* (8th ed.). Brook/Cole

McIntyre, K., Smith, H.A., Henham, A. & Pretlove, J. (1998). Logistics performance measurement and greening supply chains: Diverging mindsets. *The Journal of Logistics Management*, Vol. 9, Iss. 1, pp. 57-68.

McKinnon, A., & Campbell, J. (1998). Quick-response in the frozen food supply chain: The manufacturers' perspective . Christian Salvesen logistics research paper no. 2, Heriot-Watt University, UK.

Motiva Oy. (2014). Espoo Logistiikka liikelaitos / aurinkosähkö. Saatavilla: http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/aurinkoenergia/aurinkosahko/kokemuksia_aurinkosahkosta/esimerkkikohteita/espoo_logistiikka_-liikelaitos_espoo

Murphy, Paul and Poist, Richard (2003). Green perspectives and practices: a "comparative logistics" study. *Supply Chain Management: An International Journal*, Vol. 8 Iss: 2, pp.122 – 131

Mäntylä, Riku (2000). Led-valoputket ja T5-loistelamput T8-loistelamppujen korvaajana. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Insinööriyö

Network Rail (2014). The cost of using rail freight. Saatavilla: <http://www.networkrail.co.uk/Freight/The-cost-of-using-rail-freight/> . Viitattu 10.11.2014

NRDC report, 2012. *Wasted: How America is Losing up to 40 Percent of its Food from Farm to Fork to Landfill*. Saatavilla: http://www.truthstudio.com/viz_2012_food_waste.html. Viitattu 28.8.2014

Patel, Dhivant (2014). Capturing value from global networks: implications for manufacturing, supply chains and industrial policy. 18th Cambridge International Manufacturing Symposium | 11-12 September 2014. Abstracts. Patel: eCommerce - Changing Shopper Habits and the impact on international manufacturing

Pienimuotoisen energiantuotannon edistämistyöryhmä (2014). Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. *Energia ja ilmasto* 55/2015. Edita. Helsinki. Saatavilla: https://www.tem.fi/files/41632/TEMjul_55_2014_web_16122014.pdf

Päivittäistavarakauppa ry (2004). Logistiikka- ja ympäristöasiat osana päivittäistavarakaupan kestävästä kehityksestä. Saatavilla: http://www.ptv.fi/fileadmin/user_upload/tiedostot/Julkaisut/Muut_julkaisut/Logistiikka_ja_ymparisto_2004.pdf

Quanrriquasi J.G.F., Bloemhof J., van Nunen J.A.A. and van Heck E. 2007. Designing and evaluating sustainable logistic networks, International Journal of production economics. Vol 111, pp. 195 – 208.

Rao, Purba & Holt, Diane. (2005). Do green supply chains lead to competitiveness and economic performance? International Journal of Operations & Production Management, 25(9/10), 898-916.

Rodrigue, Jean-Paul; Slack, Brian and Comtois Claude (2001). Green Logistics (The Paradoxes of). Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research, Seoul.

Saadany A.M.A. El, Jaber M.Y. and Bonney M. (2011). Environmental performance measures for supply chains. Management Research.Review, Vol. 34 Iss: 11 pp. 1202 –1221.

Sayigh, A. (2013). *Sustainability, Energy and Architecture: Case Studies in Realizing Green Buildings*. Academic Press.

Singh, R. Paul. 2008. Benchmarking Study of the Refrigerated Warehousing Industry Sector In California. Public Interest Energy Research (PIER) Program Contract and Research Project Reports. California Energy Commission, PIER Program

Srivastava (2007)

Suomen energiaverotus (HE 147/2010)

SUPPLY CHAIN STANDARD: Take the green route out of the red. 2009. Logistics Manager, May 1, 28. <http://www.proquest.com/> (accessed August 10, 2009).

Suuronen, Henry (2012). LAUHDELÄMMÖN HYÖDYNTÄMINEN KAUPAN KYLMÄKONEISTOISTA Opinnäytetyö Talotekniikka. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Saatavilla: http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/47847/Suuronen_Henry.pdf?sequence=1

Tassou S.A; De-Lille G ja Y.T. Ge (2009). Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport. Applied Thermal Engineering. Volume 29, Issues 8–9, June 2009, Pages 1467–1477

Tilastokeskus, 2014. Käsitteet ja määritelmät. Viitattu 12.9.2014. http://www.tilastokeskus.fi/meta/kas/puo_peravaunu.html

Trafi, 2014. Liikenteen turvallisuusvirasto. Ajoneuvoluokat. <http://www.trafi.fi/tieliikenne/katsastukset/ajoneuvoluokat>. Viitattu 12.9.2014.

Tsita, Katerina G. ja Pilavachi Petros A. (2014) Evaluation of next generation biomass derived fuels for the transport sector

Tubb N. (2001). The commercialisation of solar powered transport refrigeration. ETSU S/P2/00317/REP, DTI/Pub URN 01/1017.

Underground Energy, LLC. (2014). Kalliolämpöakun toimintaperiaate. Saatavilla: <http://www.underground-energy.com>

Valtioneuvoston asetus 407/2013, 24 §

Warmia Oy. (2014). Asfaltin sulanapito, putkiston asennuskuva. Saatavilla: <http://www.warmia.fi/media/uploads/sisaltokuvat/tuotteet/sulanapitoputkia.jpg>

Weact, 2014. Weact students AG web-material. Zurich. Saatavilla: http://www.ethz.weact.ch/sites/ethz.weact.ch/files/website/downloads/1.3_Food_emission_factors.pdf

Whitman B, Johnson B, Tomczyk J, ja Silberstein E. (2012). Refrigeration and Air Conditioning Technology.

Veleva, Vesela; Hart, Maureen; Greiner, Tim & Crumbley, Cathy (2003). Indicators for measuring environmental sustainability: A case study of the pharmaceutical industry. *Benchmarking*, 10(2), 107-119.

Venkat K. ja Wakeland W. (2006). Is Lean Necessarily Green?

van der Vorst J.G.A.J., Tromp S-O and Zee D-J (2009) Simulation modelling for food supply chain redesign; integrated decision making on product quality, sustainability and logistics. *International Journal of Production Research*. Volume 47, Issue 23, 2009.

Viinamäki, Lea (2014). VR transpoint, myyntipalvelu. Henkilökohtainen tiedonanto. 27.10.2014.

Volvo 2014, <http://www.volvotrucks.com/trucks/finland-market/finland/trucks/volvo-fm-methanodiesel/Pages/volvo-fm-methanodiesel.aspx>

Word resource institute (2011)

VR, 2014. Hallituksen toimintakertomus. Saatavilla: <http://www.VRgroupraportti.fi/talous-2011/hallituksen-toimintakertomus/logistiikka-1>. Viitattu 20.8.2014

VR Transpoint (2014). Rautatielogistiikan palvelut. Saatavilla: http://www.VRtranspoint.fi/fi/VR-transpoint/palvelumme/rautatielogistiikan_palvelut/ Viitattu 10.11.2014

VR Transpoint (2014a). TEU-KONTTIEN KULJETUSMÄÄRÄYKSET, Kuljetusehtojen liite 5, (3 art. 5 §)

VR Transpoint (2014b). HELPOSTI PILAANTUVIEN TAVAROIDEN KULJETUSMÄÄRÄYKSET, Kuljetusehtojen liite 6, (5 art. 2 § ja 6 art. 1 §)

VR Transpoint (2014c). VENÄJÄN RAUTATEIDEN TEU-KONTTIASEMALUETTELO. Kuljetusehtojen liite 5.1

VR Transpoint (2014d). VAUNUJEN SINETÖINTIOHJEET. Kuljetusehtojen liite 12. (14 art. 6 §)

VTT (2014), Lipasto-tietokanta.

Yang, C-S., Lu, C-S., Haider, J.J. & Marlow, P.B. (2013). The effect of green supply chain management on green performance and firm competitiveness in the context of container shipping in Taiwan. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. Vol. 55, August 2013, pp. 55-73.