



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ARI LAITINEN
VEDYN MAHDOLLISUUDET TIELIIKENTEESSÄ
Diplomityö

Tarkastaja: professori Risto Raiko
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Luonnontieteiden tiedekuntaneuvos-
ton kokouksessa 9.1.2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma

LAITINEN, ARI: Vedyn mahdollisuudet tieliikenteessä

Diplomityö, 108 sivua, 42 liitesivua

Maaliskuu 2013

Pääaine: Kestävä energia

Tarkastaja: professori Risto Raiko

Avainsanat: Vety, Polttokenno, Tieliikenne, Vedyn liikennekäyttö, Energiaketju, Energiatehokkuus, Ilmastovaikutus, Vetyteknologia

Vedyn liikennekäytön tulevaisuuteen vaikuttaa useampi erillinen tekijä, joista kaikki eivät ole suoraan kytköksissä vedyn liikennekäyttöön. Esimerkiksi säätämättömän tuuli- ja aurinkovoimakapasiteetin lisärakentaminen saattaa suorastaan edellyttää vedyn energiakäytön yleistymistä.

Vetyteknologia voisi tarjota merkittäviä etuja liikenteen energiahuollossa. Eräänä etuna on liikenteen energiahuollon pienempi riippuvuus fossiilisista ja hiilipitoisista primäärienergian lähteistä. Nykyisen liikenteen energiahuolto tukeutuu vahvasti näihin primäärienergian lähteisiin ja tämä on nähty ongelmalliseksi koska näiden energialajien käyttö aiheuttaa kestävämmän ympäristökuormituksen. Tämän lisäksi konventionaaliset raakaöljyvarannot ovat ehtyvä luonnonvara ja esiintymät ovat jakautuneet maantieteellisesti hyvin epätasaisesti. Näistä seuraa, että nykyisen liikenteen energiahuoltojärjestelmä on haavoittuvainen ulkoisille uhille. Euroopan unioni pyrkiikin vähentämään riippuvuutta fossiilisista liikennepolttoaineista ja pyrkii lisäksi vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä. Euroopan unioni onkin ryhtynyt poliittisiin ohjaustoimiin näihin tavoitteisiin päästäkseen. Tehdyt ja suunnitteilla olevat Euroopan unionin toimet vaikuttavat suotuisasti myös vedyn liikennekäytön tulevaisuuden näkymiin.

Vetyteknologian kehitys mahdollistaisi laajamittaisen vedyn liikennekäytön jo nykyään, mutta erilaiset kustannustekijät kuitenkin suosivat vielä konventionaalisia energiaratkaisuja. Vetykäyttöisten henkilöautojen kehitys on nykyään niin sanotussa esikaupallisessa vaiheessa ja useammat autonvalmistajat ovat aloittamassa näiden sarjatuotantoa lähivuosina. Vetyteknologiaa on demonstroitu laajasti myös kaupunkibussisegmentissä ja myös tässä segmentissä tullaan näkemään kaupallisia sovellutuksia lähitulevaisuudessa.

Vetyteknologiaa edustavat energiaketjut eivät ole itseisarvoisesti energiatehokkaampia tai vähäpäästöisempiä kuin tavanomaisempaa tekniikkaa edustavat energiaketjut. Tämän sijaan vetyteknologia mahdollistaa erittäin vähäpäästöisen energiaketjun, vieläpä ilman biomassapohjaisia primäärienergianlähteitä. Vetyteknologia mahdollistaa primäärienergian hankinnan useista eri lähteistä ja tämä nähtäneen tärkeäksi mahdollisuudeksi konventionaalisten primäärienergiavarantojen ehtyessä. Vedyn liikennekäytön yleistyminen saattaa olla välttämätöntä, ei niinkään tahdon asia.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Environmental and Energy Technology

LAITINEN, ARI: Opportunities for Hydrogen in Road Transport

Master of Science Thesis, 108 pages, 42 Appendix pages

March 2013

Major: Environmental and Energy Technology

Examiner: Professor Risto Raiko

Keywords: Hydrogen, Fuel Cell, Road Traffic, Hydrogen Utilisation in Road Transport, Energy Chain, Energy Efficiency, Climate effect, Hydrogen Technology

There are several factors that affect the future of hydrogen utilisation in road transport. For example the increasing of uncontrolled renewable electricity production could require that the energy utilisation of hydrogen increases.

Hydrogen technology could offer benefits for the road transport energy supply system. One of these benefits is the decreasing dependency of fossil and carbonic primary energy sources. The current energy supply system relies strongly on crude oil and this situation is problematic because the utilisation of this kind of energy source causes immoderate load to the global environmental system. Furthermore, conventional crude oil sources are exhaustible and depositions are located in only a few geographical areas. These factors make the future of current energy supply systems very vulnerable to external threats. The European Union aims to decrease energy dependency from crude oil based fuels and to decrease greenhouse gas emissions. The European Union has taken steps in achieve these goals by different kind of political decisions. These political decisions are favourable for the future of hydrogen utilisation in road transport.

The maturity of hydrogen technology is currently in a stage that supports wide hydrogen utilisation in road transport. There are still economic factors that are favourable for utilisation of conventional energy solutions. The technical development of fuel cell passenger vehicles is in a pre-commercial stage and some car manufacturers are considered to start commercial production of hydrogen cars in the next few years. Furthermore, also hydrogen fuelled urban bus technology has been demonstrated widely and commercial products will probably be available in the market in near future.

Hydrogen based energy chains are not always more energy efficient or more environmentally friendly than conventional energy chains. Instead hydrogen technology makes low-emission energy chains possible, even without biomass based primary energy sources. Hydrogen technology could also offer freedom to purchasing primary energy from multiple sources and this could be seen as an important factor when fossil energy sources are depleting. The road transport utilisation of hydrogen could become a necessity, not a matter of choice.

ALKUSANAT

Liikenne ja energia ovat yhdessä kiinnostava ja laaja tutkimuksen aihe. Ihmiskunta on oppinut käyttämään helppoa ja halpaa energiaa mitä moninaisimmilla tavoilla. Tästä on osaltaan seurannut ennennäkemätöntä aineellista hyvinvointia. Näyttäisi kuitenkin siltä, että helpon ja halvan energian aika ei kestä ikuisesti. Onko elintasosta ja liikkuvuudesta tinkiminen ainoa mahdollisuus helpon ja halvan energian jälkeen? Selvää on ainakin, että liikenteen energihuollon järjestäminen ei tule olemaan yksinkertaista.

Kun ryhdyin selvittämään vedyn liikennekäytön mahdollisuuksia, olin henkilökohtaisesti siinä käsityksessä että vedyn liikennekäytön puolestapuhujien argumentit pohjautuivat enemmän toiveajatteluun, kuin tosiasioihin. Käsitykseni vedyn liikennekäytön tarjoamista mahdollisuuksista on kypsynyt työtä tehdessäni. Tällä hetkellä huomaan, että vetyteknologia todella mahdollistaa osaltaan koko energiasektorin kehittymisen kestävämpien kokonaisratkaisujen suuntaan.

Tahdon kiittää ohjaajaani DI Jussi Vainikkaa sekä esimiestäni TkT Sari Siitosta tämän diplomityön mahdollistamisesta ja ohjauksesta, joita olen heiltä saanut. He ovat osoittaneet työtäni ohjatessaan kärsivällisyyttä enemmän kuin kohtuudella olisi voinut odottaa. Olen saanut merkittävää tukea lukuisilta työtovereiltani Gasum Oy:ssä ja tahdon yhteisesti kiittää kaikkia heitä. Diplomityön aihe on kiinnostava ja aiheeseen perehtyminen on ollut opettavaista ja voisin tehdä kaiken uudestaan jos oppisin siitä saman verran. Ei ole liioiteltua sanoa että olen oppinut diplomityötä tehdessäni paljon myös itsestäni.

Kiitän myös työni tarkastajaa prof. Risto Raikoa hänen tähän diplomityöhön antamista kommentteista ja kehittämisehdotuksista. Olen kokenut olleeni hänen luennoillaan todellisen asiantuntijan opetuksessa.

Useat henkilöt toimeksiantajaorganisaation ulkopuolella ovat jakaneet auliisti tietämystään sekä ymmärrystään, jota olen heiltä varovaisesti kysellyt ja heitä kiitän tässä yhteisesti. Erityiset kiitokset haluan antaa VTT:n johtavalle tutkijalle Juhani Laurikolle, oli miellyttävä saada keskustella todellisen asiantuntijan kanssa tutkimuksen aihetta sivuavista asioista. Juhani kertoi muistamansa sanonnan; *Seuratkaamme totuuden etsijöitä; välttäkäämme heitä jotka ovat sen jo löytäneet.* Tämä sanonta on todella syytä pitää mielessä tulevaisuuden ilmiöitä arvioitaessa.

Tahdon kiittää vaimoani Lauraa ymmärryksestä, jota olen saanut diplomityöni kanssa askaroidessani. Kiitän myös pientä tytärtämme Hilda Maariaa, hän on opettanut minulle että leikki ja kiireetön yhdessäolo voivat olla toisinaan tärkeämpää kuin mikään muu.

SISÄLLYS

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Termit ja niiden määritelmät	vii
1 Johdanto	1
2 Tutkimuksen taustaa.....	7
2.1 Aiempaa liikenteen energiaketjuista	7
2.2 Vedyn liikennekäyttöön liittyvä toimintaympäristö	10
3 Tutkimusmenetelmät.....	12
3.1 Energiatehokkuuden arviointimenetelmät	13
3.2 Energiaketjujen mallinnuksen yleinen logiikka	16
3.3 Mallinnuksen matemaattiset perusteet	20
3.4 Ilmastovaikutusten laskennasta.....	21
3.5 Lähtöarvojen modifioinnista	22
3.5.1 Vedyn putkisiirron energiaintensiteetin määrittäminen	23
3.5.2 Ajoneuvojen lähtötietojen modifioinnista	26
3.6 Mallinnuksen yksinkertaistuksista	30
3.7 Skenaariotarkasteluista.....	31
3.7.1 Hiilipitoiset fossiiliset primäärienergiat – skenaario	33
3.7.2 Luonnonkaasuskenaario.....	33
3.7.3 Uusiutuva sähkövoima - skenaario	33
4 Katsaus poliittisiin ohjaustoimiin ja hankkeisiin	35
4.1 Poliittiset ohjaustoimet ja hankkeet Euroopan Unionissa.....	35
4.2 Valtioiden poliittiset ohjaustoimet ja hankkeet.....	39
4.3 Muita hankkeita.....	41
5 Energiaketjujen tekninen kuvaus	44
5.1 Vedyn valmistus.....	45
5.1.1 Luonnonkaasun höyryreformointi	47
5.1.2 Kaasutusmenetelmä	48
5.1.3 Elektrolyysimenetelmä	50
5.2 Vedyn siirto- ja jakelujärjestelmä	51
5.2.1 Vedyn komprimointi.....	54
5.2.2 Vedyn nesteytys	56
5.2.3 Vedyn varastointi.....	57
5.2.4 Kuljetus.....	62
5.2.5 Väliterminaalit	64
5.2.6 Jakeluasemat	64
5.3 Vedyn loppukäyttö	72
5.3.1 Vetyautotekniikan kehityksen suuntaukset.....	72
5.3.2 Polttokennovoimalinja.....	73
5.3.3 Vedyn varastointi ajoneuvoissa	77

5.4	Turvallisuus.....	79
6	Autonvalmistajien vetystrategiat.....	82
6.1	Henkilöautonvalmistajat	82
6.2	Muut vetykäyttöiset ajoneuvot.....	84
7	Energiaketjujen vertailua	85
7.1	Henkilöautojen energiaketjujen skenaariotarkastelua.....	85
7.1.1	Hiilipitoiset fossiiliset primäärienergiat - skenaario.....	85
7.1.2	Luonnonkaasuskenaario.....	91
7.1.3	Uusiutuva sähkövoima – skenaario	92
7.2	Bussien energiaketjujen tarkastelua	95
7.2.1	Hiilipitoiset fossiiliset primäärienergiat - skenaario.....	96
7.2.2	Luonnonkaasuskenaario.....	97
7.2.3	Uusiutuva sähkövoima - skenaario.....	99
7.3	Tulosten yhteenveto	100
8	Herkkyystarkastelu.....	103
9	Pohdintaa ja loppupäätelmät	105
	Lähteet.....	109
	Liite 1: Tarkasteluiden dokumentaatio.....	126
	Liite 2: Käytetyt lähtöarvot	136
	Liite 3: Mallinnuksen vuokaaviot	161

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

Lyhenne	Merkitys
a	Ajoneuvon kiihtyvyys
A	Pinta-ala
Bensiini-ICE	Bensiinipolttomoottori
BEV	Akkusähköauto (Battery Electric Vehicle)
BMBF	Saksan koulutus- ja tutkimusministeriö
BMU	Saksan ympäristö ja ydinturvallisuusministeriö
BMWi	Saksan talous- ja teknologiaministeriö
$C H_2$	Komprimoitu vety (<i>Compressed Hydrogen</i>)
c_w	Ajoneuvon korin virtausvastuskerroin
CCS	CO_2 :n talteenotto ja loppusijoitus (<i>Carbon Capture & Storage</i>)
CHP	Yhdistetty lämmön- ja sähköntuotanto (Combined Heat and Power)
CNG	Komprimoitu luonnonkaasu (<i>Compressed Natural Gas</i>)
CNG-hybridi	Luonnonkaasuhybridi
CNG-ICE	Luonnonkaasupolttomoottori
CO_2	Hiilidioksidi
D	Putken halkaisija
Diesel-ICE	Diesel-polttomoottori
e_{CH_4}	Luonnonkaasun putkisiirtokompressorin laskennallinen komprimointityö
e_f	Ominaisenergiankulutus ($MJ_{\text{poltto kaasua}}/MJ_{\text{out}}$ tai MJ/km)
e_{H_2}	Vedyn putkisiirtokompressorin laskennallinen komprimointityö
E_{in}	Jonkin prosessin energiasyötteen määrä (MJ)
Energiaketju	Energiakonversioprosessien ketju (energianlähteeltä käyttökohteeseen)
E_{out}	Jonkin prosessin tuottaman energiatuotteen määrä (MJ)
E_p	Primäärienergia (MJ)
E_{TiW}	Ajoneuvon energiankulutus

e_{TtW}	Ajoneuvon ominaisenergiankulutus (MJ/km)
E_{WtT}	Energiantoimitusketjun energiankäyttö (ennen ajoneuvoa)
E_{WtW}	Koko energiaketjun energiankäyttö (primäärienergian kulutus)
f_R	Vierintävastuskerroin
FCEV	Polttokennoauto (<i>Fuel Cell Electric Vehicle</i>)
g	Putoamiskiihtyvyys ($9,81 \text{ m/s}^2$)
$g_{CO_2\text{-ekv.}}$	Hiilidioksidiekvivalentti (kunkin kasvihuonekaasun painotuskerroinella painotettu massa-arvo)
lauhde-GTCC	Kaasuturbiinikombilauhdevoimalaitos (Gas Turbine Combined Cycle)
GTL	Poltonesteen valmistusprosessi, joka käyttää energiasyötteenään luonnonkaasua (<i>Gas-to-Liquid</i>)
H_2	Vetymolekyyli
$H_2\text{-ICE}$	Vetypolttomoottori
HVAC	Korkeajännitteinen vaihtovirtasiirtoyhteys
HVDC	Korkeajännitteinen tasavirtasiirtoyhteys
i	Siirto- ja jakeluprosessien energiantensiivisyysluku
i_{CH_4}	Luonnonkaasun (metaani) putkisiirron energiantensiivisyysluku
i_{H_2}	Vedyn putkisiirron energiantensiivisyysluku
ICE	Polttomoottori (<i>Internal Combustion Engine</i>)
L	Putken pituus
$L H_2$	Nesteytetty vety (<i>Liquefied Hydrogen</i>)
LDV	Kevyt tieliikenneajoneuvo (<i>Light Duty Vehicle</i>)
m	Massa (kg)
MEA	Polttokennon membraani-elektrodi-kokoonpano (Membrane Electrode Assembly)
MJ_{fuel}	Polttoaineen energiasisällön yksikkö
N	Putkisiirron virtausvastusteho

NEDC	Henkilöautojen energiankulutus- ja päästöarvojen määrittämisessä käytettävä ajosykli (New European Driving Cycle)
off-shore	Merellä sijaitseva (tuulivoimapuisto tai esim. elektrolyysilaite)
PEM-polttokenno	Polymeerielektrolyyttimembraanipolttokenno (tai protoninvaihtomembraanipolttokenno)
PHEV	Ladattava hybridi (<i>Plug-In Hybrid Electric Vehicle</i>)
PPP	Julkis-kaupallinen yhteishanke tai -yritys (Public-Private Partnership)
q_{H2}	Vedyn lämpöarvo (alempi)
q_{CH4}	Metaanin lämpöarvo (alempi)
q_f	Polttoaineen lämpöarvo
Q'_f	Polttoaineteho
s	Ajosuoritteiden pituus kilometreissä
Δs_i	Ajoneuvon siirtymä tarkasteluvälillä (m)
t&k	Tutkimus ja kehitys
TtW	Energiaketjun tarkasteluväli ajoneuvon tankilta pyörille (Tank-to-Wheels)
v	Virtausnopeus
v_i	Ajoneuvon keskimääräinen nopeus tarkasteluvälillä
W_a	Kiihdytysvastuksista johtuva ajovastustyö
W_L	Aerodynaamisista vastuksista johtuva ajovastustyö
W_m	Mekaanisen pyörätyön määrä (myös $W_{m,tot}$)
$W_{m,Prius,mod}$	Modifioidun Priuksen laskennallinen mekaaninen pyörätyö
$W_{m,Prius}$	Priuksen laskennallinen pyörätyön määrä
W_R	Vierintävastuksista johtuva ajovastustyö
WtT	Energiaketjun tarkasteluväli primäärienergian lähteeltä ajoneuvon tankille (Well-to-Tank)
WtW	Energiaketjun tarkasteluväli primäärienergian lähteeltä ajoneuvon pyörille (Well-to-Wheels)

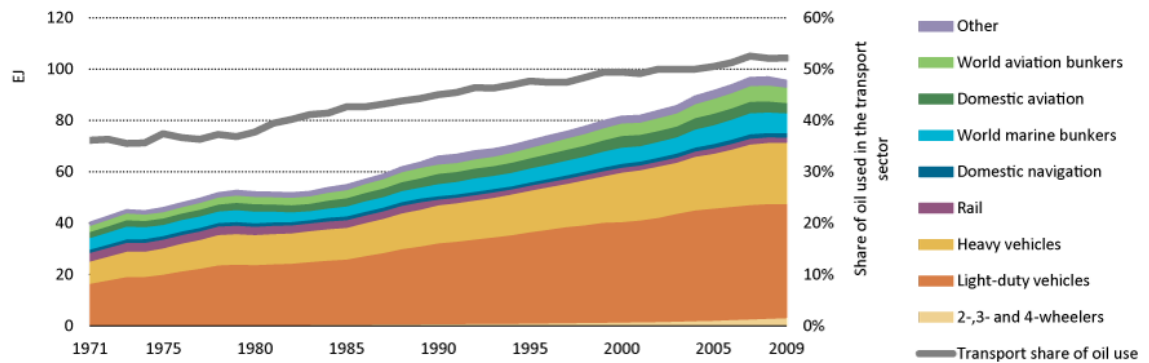
x	Siirtoprosessin siirtoetäisyysparametri
z	Prosessin energian syötön ja -tuoton välinen suhdeluku
η	Hyötysuhde
η_{prim}	Primäärienergiahyötysuhde
ξ	Putkisiirron virtausvastuskerroin (putken suhteellisen karheuden ja Reynoldsin luvun funktiona)
ρ	Tiheys (kg/m^3)

1 JOHDANTO

Energiahuollon tulevaisuutta ja nykytilaa koskeva julkinen keskustelu on värittänyt ilmastomuutokseen, toimitusvarmuuteen sekä taloudelliseen kehitykseen liittyvillä huolenaiheilla (IEA, 2010a, s. 45). Ilmastomuutos on yhdistetty ihmisen aiheuttamiin (antropogeenisiin) kasvihuonekaasupäästöihin ja erityisesti hiilidioksidipäästöihin (CO_2). Nykyisistä kaikista antropogeenisistä kasvihuonekaasupäästöistä noin 65 % on peräisin energiahuollosta ja energian käytöstä. Vastaavista CO_2 -päästöistä noin 84 % on puolestaan lähtöisin energiantuotannosta ja -käytöstä. (IEA, 2010a, s. 54.) CO_2 -päästöjen osuus kasvihuonekaasupäästöjen ilmastomuutosvaikutuksesta on noin 64 % ja niin ollen hiilidioksidi on merkittävin yksittäinen kasvihuonekaasu (IEA, 2011, s. 211).

Maailmanlaajuisesti energiankäyttö ja sen aiheuttamat CO_2 -päästöt ovat kasvurallalla. Globaaleista energiankäytön CO_2 -päästöistä noin neljännes oli vuonna 2005 peräisin liikennesektorilta. Liikennesektorin päästöosuuden odotetaan yhä kasvavan sektorin energiantarpeen kasvukehityksen mukaisesti. (IEA, 2009, s. 44.) Niin ollen myös liikennesektorin energiankäytön päästöihin on alettu kiinnittää huomiota ja tämän sektorin halutaan olevan mukana ilmastomuutoskamppailussa (IEA, 2009, s. 29).

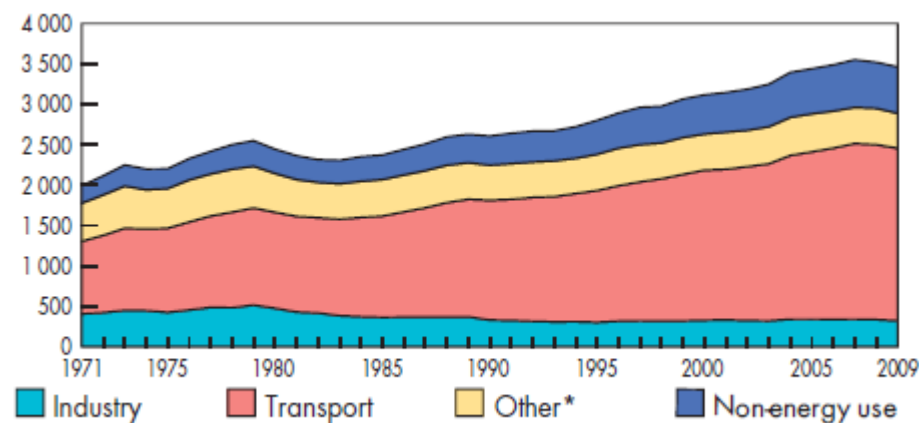
Globaalista primäärienergian käytöstä noin viidesosa kulutettiin vuonna 2009 liikennesektorilla, joka käsittää maaliikenteen lisäksi myös meriliikenteen ja ilmailun. Liikennesektorin osuus globaalista energiaperäisestä hiilidioksidipäästöstä oli noin neljäsosan. (IEA, 2012.) Liikennesektorin energiahuolto on maailmanlaajuisesti tarkasteltuna hyvin riippuvainen hiilipitoisista fossiilisista primäärienergianlähteistä. Fossiilisten primäärienergiälajien osuus on noin 93-prosenttia energianhankinnan kokonaismäärästä. (IEA, 2012.) Kevyiden, alle 3,5 tonnia painavien maantieajoneuvojen segmentti on suurin yksittäinen energiankäyttäjäsegmentti koko liikennesektorilla. Liikennesektorin energian loppukäyttö on yli kaksinkertaistunut vuodesta 1971 vuoteen 2009 tullessa ja samalla sen osuus globaalista öljynkulutuksesta on kasvanut noin 37 prosentista noin 52 prosenttiin (Kuva 1.1). (IEA, 2012, s. 424.)



Kuva 1.1 Globaali liikennesektorin energian loppukäyttö vuosilta 1971-2009 liikennemuodon mukaan ja liikennesektorin osuus globaalista öljynkulutuksesta. Light duty vehicles sisältää henkilö- ja tavara-autot 3,5 tonnin kokonaismassaan saakka. (IEA, 2012, s. 425)

Globaalisti tarkasteltuna liikenteen energiantarpeen on nähty kehittyvän samansuuntaisesti taloudellisen kehityksen kanssa. Tätä pidetään yhtenä syynä voimakkaaseen energiankäytön kasvuun tulevaisuudessa, kun kehittyvissä maissa yhä useammalla on mahdollista ostaa henkilöauto tai jokin muu polttoaineita kuluttava kulkuväline. Uusien ajoneuvojen ominaisenergiankulutuksen ennustetaan yhä pienenevän, mutta ajosuoritteiden lisääntymisen odotetaan aiheuttavan liikennesektorin kokonaispäästömäärän lisääntymisen. (IEA, 2009).

Liikennesektorin energiahuolto perustuu lähes yksinomaan fossiilisiin tisetuotteisiin, kuten bensiiniin ja dieseliin (*petroleum fuels*). Alle 5 % liikennesektorin polttoaineista on muita kuin edellä mainittuja tiseitä. (IEA, 2009, s. 72.) Kuvasta 1.2 havaitaan, että suuri osa maailman raakaöljystä jalostetaan liikennesektorin polttoaineiksi (kuva 1.2) (IEA, 2009, s. 47).



Kuva 1.2 Raakaöljyn loppukäyttö (Mtoe) sektoreittain, vuodesta 1971 vuoteen 2009 (IEA, 2011, s. 33)

Liikennesektorin osuus maailman primääriöljynkulutuksesta oli vuonna 2009 noin 52 % (IEA, 2010b, s. 106). Lisäksi IEA (2009, s. 83) toteaa mainittujen tisetuotteiden yhdeksi heikkoudeksi mahdolliset toimitusvaikeudet. Öljyvarantojen epätasaisen

maantieteellisen jakauman voi nähdä lisäksi jopa uhkaavan maailmanrauhaa (Scott, 2004). Öljyriippuvuus on näistä syistä johtuen epätoivottava ilmiö.

Edellä esitetyt tosiasiat motivoivat etsimään vaihtoehtoisia energiahuollon järjestelmiä ja energiaketjuja (*energy chains*) tieliikenteen energiantarpeen tyydyttämiseksi siten, että ympäristövaikutukset sekä energian toimitusvarmuutta koskevat näkökohdat tulevat huomioiduksi. Vedyn käyttöä tieliikenteen polttoaineena on pidetty kiinnostavana tutkimuskohteena, koska vetypolttolaitteella on mahdollista saavuttaa nollassa ajoneuvon paikallisissa kasvihuonekaasupäästöissä. (Friedrich & Büchi, 2008, s. 335). Lisäksi on ajateltu, että mikäli tieliikenteen energiahuolto olisi mahdollista toteuttaa vedyllä, niin liikenteen energiahuollossa olisi mahdollista saavuttaa riippumattomuus yhdestä primäärienergianlähteestä, kuten öljystä (IEA, 2009, s. 29).

Vetyteknologiaan pohjautuva tieliikenteen energiahuolto on nähty eräänä mahdollisuutena sähköistää (*electrification*) tieliikenteen energiahuolto. Tieliikenteen sähköistäminen tarjoaa mahdollisuuden myös tieliikenteen CO₂-päästöjen leikkaamiseen, koska energia on mahdollista tuottaa keskitetysti esimerkiksi ydinvoimalla. Vety voisi palvella tieliikenteen sähköistämistä energiantantajana samoin kuin akkuparistot. (Scott, 2004, s. 22-23.) Tieliikenteen sähköistäminen on toteutettavissa ajoneuvoteknisesti siten että vety muunnetaan polttokennoissa sähkövirraksi ja edelleen mekaaniseksi energiaksi ajoneuvon sähkömoottoreissa. Polttokennoautojen etuina on paikallisen päästöttömyyden lisäksi myös voimalinjan verrattain hyvä hyötysuhde konventionaalisiin voimalinjaratkaisuihin nähden. (IEA, 2009, s. 150.)

On oleellista huomata, että vety on mahdollinen ratkaisu energian varastointiin ja toimitukseen eikä niinkään energiantuotantoon. Vety on tuotettava jostakin energianlähteestä ja toimitettava käyttöpaikalle jossa sen sisältämä kemiallinen energia muunnetaan sopivaan muotoon. Tässä mielessä vety toimii *energiantantajana* kuten muutkin liikennepolttoaineet, ei energian lähteenä (Speight, 2008, IEA, 2010b, s. 357). Esimerkiksi vedyn ja sähkön välillä onkin nähtävissä tietty analogia, kuten Scott (2004) toteaa. Molemmat ovat muutettavissa toisikseen (elektrolyysin sekä polttokennon avulla) ja valmistettavissa mistä tahansa energianlähteestä. Tässä on kuitenkin syytä huomata, että energialajien väliset konversiot eivät tapahdu häviöttömästi (Speight, 2008). Vetyä on mahdollista varastoida suuria määriä, toisin kuin sähköenergiaa. Varastoitavuusnäkökulma saattaa osaltaan edistää vedyn yleistymistä energiantantajana.

Vety on ajoneuvoteknisessä mielessä hankala energiantantaja ja liikennepolttoaine. Vedyn erittäin matala tiheys ja sitä kautta matala tilavuusperusteinen lämpöarvo aiheuttavat merkittäviä ongelmia vetykaasun varastoinnissa tieliikenteen ajoneuvosovelluksissa. Züttelin mukaan vetykaasun tilavuusperusteinen lämpöarvo on ainoastaan luokkaa 36 % maakaasun vastaavasta arvosta samanlaisissa lämpötila- ja paineolosuhteissa. Järkevän toimintasäteen mahdollistava vetykaasun määrä vaatiikin totutuista tekniikoista poikkeavia varastointimenetelmiä. (Züttel, 2008b.)

Vedyn varastointiin on kehitteillä erinäisiä tekniikoita ja nykyisistä tekniikoista yleisimpänä Züttel mainitsee korkeapaineiset säiliöt, joissa painetaso on korkeintaan 800 bar. (Züttel, 2008b) Vedyllä on pienestä molekyyylimassasta ja -koosta johtuen tai-

pumus diffuntoitua tiettyjen metallisten materiaalien läpi ja vuotaa pienimmästäkin säröstä tai reiästä. Tämän kaltaiset ominaisuudet asettavat omat erityiset haasteensa vedyn varastointi- ja kuljetustekniikalle. Näiden lisäksi vedyllä on totutuista liikennepolttoaineista poikkeavat syttymis- ja palamisominaisuudet; poikkeavan laaja syttymisalue sekä erittäin pieni syttymisenergian tarve. Aineominaisuuksista voi seurata myös joitain turvallisuushyötyjä. Vety pyrkii ilmaa kevyempänä kaasuna nousemaan ylöspäin eikä jää avomaastossa onnettomuuspaikalle aiheuttamaan pitkäaikaista vaaraa. (Züttel, 2008a.)

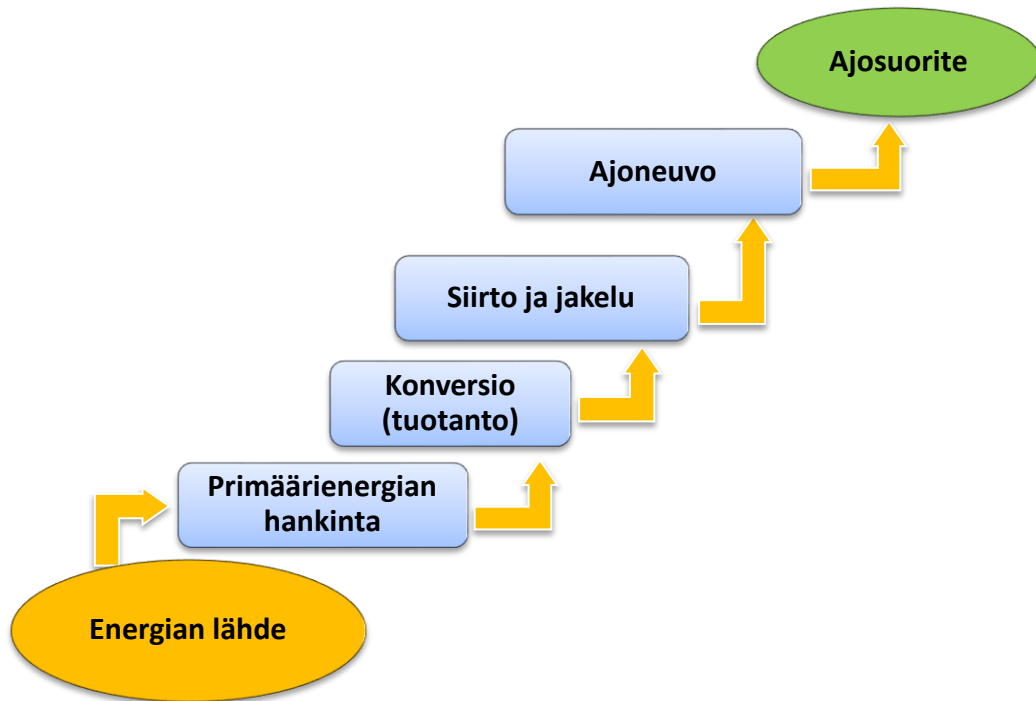
Vedyn polttaminen ei itsessään tuota CO_2 -päästöjä mutta sen elinkaaren aikana voi muodostua päästöjä. Päästöjen määrä riippuu muun muassa siitä, mistä energianlähteestä vety on valmistettu. Züttel & Borgschulte (2008) toteavat että vety valmistetaan nykyisin pääasiassa hiilipitoisista fossiilisista primäärienergian lajeista. Näitä primäärienergian lajeja ovat muun muassa maakaasu ja raakaöljy, joskin vetyä on mahdollista valmistaa myös muista primäärienergian lähteistä. Vetyä syntyy erillisen vedyntuotannon lisäksi myös sivutuotteena joissain teollisuuden prosesseissa. Nykyään vetyä käytetään pääasiassa kemianteollisuuden raaka-aineena eikä niinkään energiankantajana. (Wittstadt, 2008.)

Eräänä lisänäkökulmana liikenteen energiahuoltoon liittyen on, että vetyteknologia voi mahdollistaa laajemman säätämättömän sähköntuotantokapasiteetin käyttöönoton. Vety on nähty mahdollisena tapana varastoida suuria määriä uusiutuvaa sähköenergiaa. Tuuli- ja aurinkosähköntuotannon perustavaa laatua olevana ongelmana on, että sähköntuotannon tehokapasiteetti vaihtelee lähes ennakoimattomasti. Jos johonkin sähköverkkoon kytkettäisiin paljon säätämätöntä sähköntuotantokapasiteettia, verkossa voisi olla hetkittäin liikaa sähköntuotantotehoa kulutustehoon nähden. Lisäseurauksena olisi että sähköntuotantoteho ei olisi aina saatavilla kun sitä tarvittaisiin. Vedyn elektrolyysituotanto mahdollistaisi sähköverkon kuormituksen säädön. Polttokennot tai muu vedylle soveltuva sähköntuotantotekniikka voisi puolestaan mahdollistaa myös tuotantuopuolen tehoreservin. Kuormitussäädössä muodostuvaa vetyä olisi mahdollista käyttää esimerkiksi tieliikenteen polttoaineena. Vetyteknologiaan pohjautuvaa energianvarastointimenetelmää on kuitenkin kritisoitu epäkelvölliseksi johtuen verrattain huonosta kokonaishyötysuhteesta muihin menetelmiin nähden. (IEA, 2012.)

Erilaiset vedynvalmistusprosessit, kuten elektrolyysi ja erilaiset hiilivetyjen reformointi- sekä kaasutusmenetelmät ovat teollisuudessa varsin tunnettua tekniikkaa (Speight, 2008, Borgschulte & Züttel, 2008, Wittstadt, 2008). Vetyä on mahdollista tuottaa lähes kaikista primäärienergian lajeista joko yksi- tai useampiportaisilla prosesseilla. Kullekin valmistusmenetelmälle on soveltuvat käyttökohteensa ja esimerkiksi elektrolyysivety kelpaa tuotepuhtautensa puolesta herkkiin erityissovelluksiin kuten polttokennoihin (Wittstadt, 2008). Jotkin epäpuhtauksia sietävät kemianprosessit puolestaan voivat käyttää kaikilla tuotantotavoilla tuotettua vetyä. IEA:n tietojen mukaan vuoden 2003 vedyntuotantokapasiteetista vain noin 4 % oli elektrolyysilaitteistoja ja loput hiilelle tai hiilivedyille sopivia prosesseja (IEA, 2009, s. 95). Vetyä on mahdollista tuottaa myös ajoneuvoihin asennettavilla reformointilaitteistoilla soveltuvista hiilive-

ty-yhdisteistä (IEA, 2009, s. 94 – 95). Keskeisimmät vedynvalmistusteknologiat esitellään tarkemmin varsinaisessa kirjallisuustutkimusosiossa.

Energiantoimitusketju voidaan jakaa vedyn tapauksessa neljään pääkomponenttiin, joita ovat primäärienergian hankinta, vedynvalmistus, -jakelu sekä loppukäyttö (Speight, 2008). Tämä kokonaisuus on havainnollisemmin nähtävissä kuvasta 1.3. Jokainen edellä mainituista vaiheista on toteutettavissa useammalla eri tavalla (mm. Odgen, 2004; Page & Krumdieck, 2008).



Kuva 1.3 Havainnekuva vetyteknologiaan pohjautuvasta energiaketjusta

Vetypolttoaineen käytön yleistymisen esteenä on selkeästi eräs perustavaa laatua oleva ongelma, jota on kuvattu joissain lähteissä sanonnalla muna-kana-ongelma. Tässä asiayhteydessä tällä tarkoitetaan tilannetta jossa vetykäyttöiset ajoneuvot eivät voi yleistyä ennen kuin polttoaineen tuotanto- ja jakeluinfrastruktuuri mahdollistaa tämän. Toisaalta myöskään tuotanto- ja jakeluinfrastruktuuri ei voi laajeta ennen kuin vetykäyttöisten ajoneuvojen määrä antaa tähän aihetta.

On arveltu että vetyinfrastruktuuri jäisi rakentamatta pelkästään taloudellisen kannusteen ajamana, joka tulisi vetypolttoaineen kysynnän lisääntymisestä. Infrastruktuurin rakentamiseen tarvitaan poliittista tahtoa. (IEA, 2009, s. 95 - 96, s. 151.) Toisaalta on arveltu myös, että fossiilisista primäärienergianlähteistä ei kyetä irtautumaan hallitusti ilman vetyteknologiaa. Jos liikenteen energiahuolto järjestettäisiin pelkästään biopohjaisilla polttoaineilla ja tavallisella ajoneuvotekniikalla niin ruoka- ja energiahuolto saattaisivat joutua kilpailemaan samoista raaka-aineista. Vetyteknologia puolestaan mahdollistaisi liikenteen energiahuollon järjestämisen jopa niin että energianhankinta tapahtuu pelkästään uusiutuvalla sähköntuotantokapasiteetilla. (Wietschel & Ball, 2009.)

Euroopan unionilla on tavoitteenaan vähentää riippuvuutta tuontienergiasta. Toisena tavoitteena on kasvihuonekaasupäästöjen merkittävä vähennys unionin alueella. Euroopan unioni onkin sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä viidenneksellä vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi Euroopan unioni on asettanut tavoitteekseen vähentää primäärienergian käyttöä 20 prosentilla unionin alueella. Euroopan unioni on myös asettanut tavoitteekseen lisätä uusiutuvien energianmuotojen käyttöä viidennekseen energian loppukulutuksesta. (EC, 2010.) Liikennekäyttöä koskeva uusiutuvien energianmuotojen osuuden vähimmäistavoite on kullakin jäsenmaalla 10 prosenttia liikennepolttoainesten loppukäytöstä (EY, 2009b).

Näiden lisäksi Euroopan unionilla on tavoitteena saavuttaa 80 - 95 prosentin kasvihuonekaasupäästövähennys vuoteen 2050 mennessä unionin alueella (EN, 2011). Energiatehokkuuden parantaminen on eräs keskeinen keino kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Tämä siitä syystä, että vain käytettävä energia täytyy hankkia ja muuntaa loppukäyttöön soveltuvaan muotoon (IEA, 2012, s. 43).

2 TUTKIMUKSEN TAUSTAA

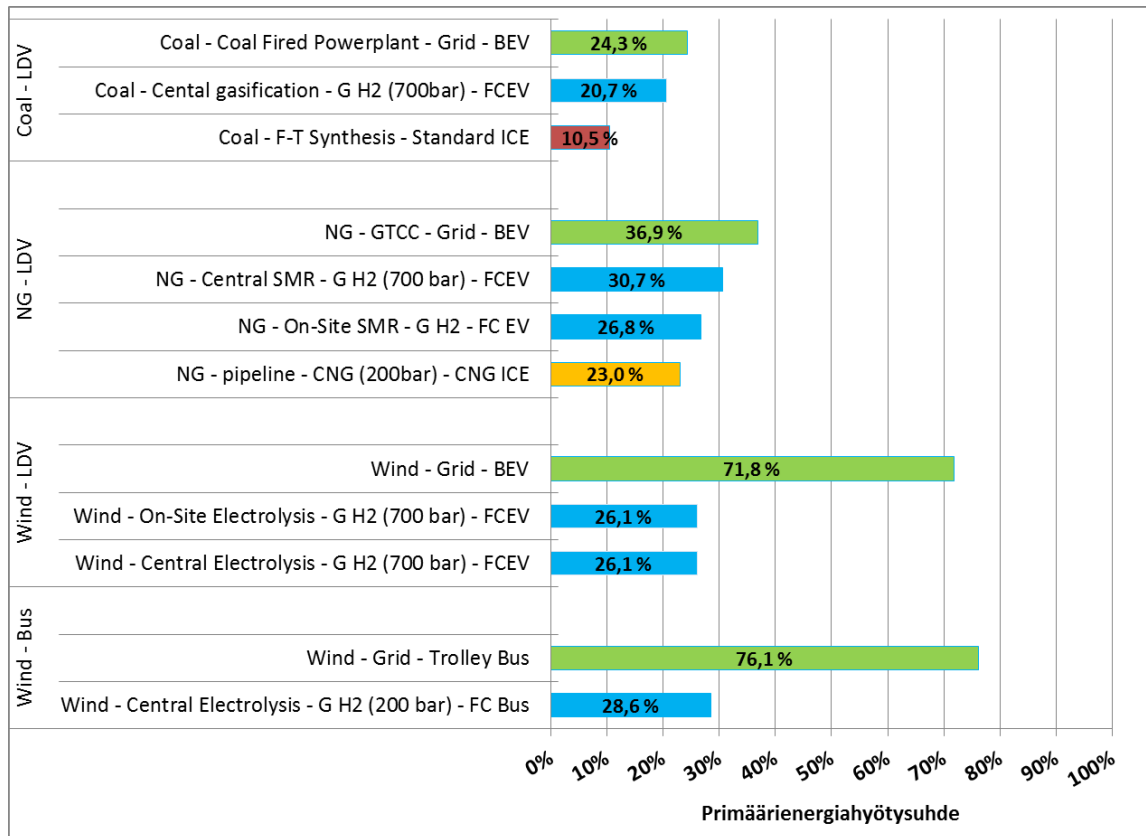
Vetyatomi tunnetaan alkuainetaulukon keveimpänä aineena ja vetymolekyylillä (H₂) on myös pienin mahdollinen molekyylirakenne ja pienin molekyylimassa. Pienestä molekyylin koosta johtuen vedyllä on taipumus diffuntoitua joidenkin metallisten materiaalien läpi samalla haurastuttaen näitä. Tämä ilmiö tunnetaan materiaalitekniikassa nimellä vetyhaurastuminen. Mainittu diffuntoitumisilmiö johtaa siihen, että materiaalivalintoihin on kiinnitettävä erityistä huomiota erityisesti kohteissa, joissa vety on kaasumaisessa olomuodossa paineenalaisessa tilassa, kuten putkistoissa ja kaasumaisen vedyn varastosäiliöissä. (Klell, 2010; Gao & Krishnamurthy, 2009.)

Kaasumaisella vedyllä on taipumuksena vuotaa pienimmästäkin reiästä paineenalaisessa tilassa ollessaan. Pienestä molekyylimassasta johtuen vety pyrkii kohoamaan ulkoilmassa voimakkaasti ylöspäin. Vety diffuntoituu erittäin nopeasti kaasumaisiin tai nestemäisiin aineisiin ja muodostaa syttymiskelpoisen seoksen hyvin nopeasti joutuessaan kosketuksiin ilman kanssa. Palorintaman etenemisnopeus on vetyilmaseokselle luokkaa 3,5 m/s kun sama arvo esimerkiksi bensiinille on luokkaa 1,8 m/s. Kaasumaisella vedyllä on poikkeavan laaja syttymisalue ilmassa, alempi syttymisraja on noin 4 % ja ylempi 75 %. Esimerkiksi metaanille samat raja-arvot ovat 5,3 % ja 15 %. (Züttel, 2008a.)

Kaasumainen vety tunnetaan ajoneuvoteknisesti haastavana polttoaineena, koska tämän tiheys ja volumetrinen lämpöarvo ovat verrattain alhaisia muihin tunnettuihin polttoaineisiin nähden. Jos vetykäyttöisellä autolla halutaan saavuttaa esimerkiksi 500 kilometrin toimintasäde järkevän kokoisella polttoainesäiliöllä, on kaasumainen vety paineistettava 700 bar:n säiliöpaineeseen (Züttel, 2008b). Esimerkiksi luonnokaasukäyttöisten henkilöautojen säiliöpaineeksi riittää 250 bar. Näistä näkökulmasta tarkastellen vety on teknisesti varsin haastava liikennepolttoaine.

2.1 Aiempaa liikenteen energiaketjuista

Page & Krumdieck (2009) toteavat, että vetypolttokennoihin perustuvien energiaketjujen energiatehokkuuden tunnusluvut ovat varsin kehoja, kun näitä verrataan akkusähköisten henkilöautojen tai johdinbussien vastaaviin ketjuihin (Kuva 2.1).

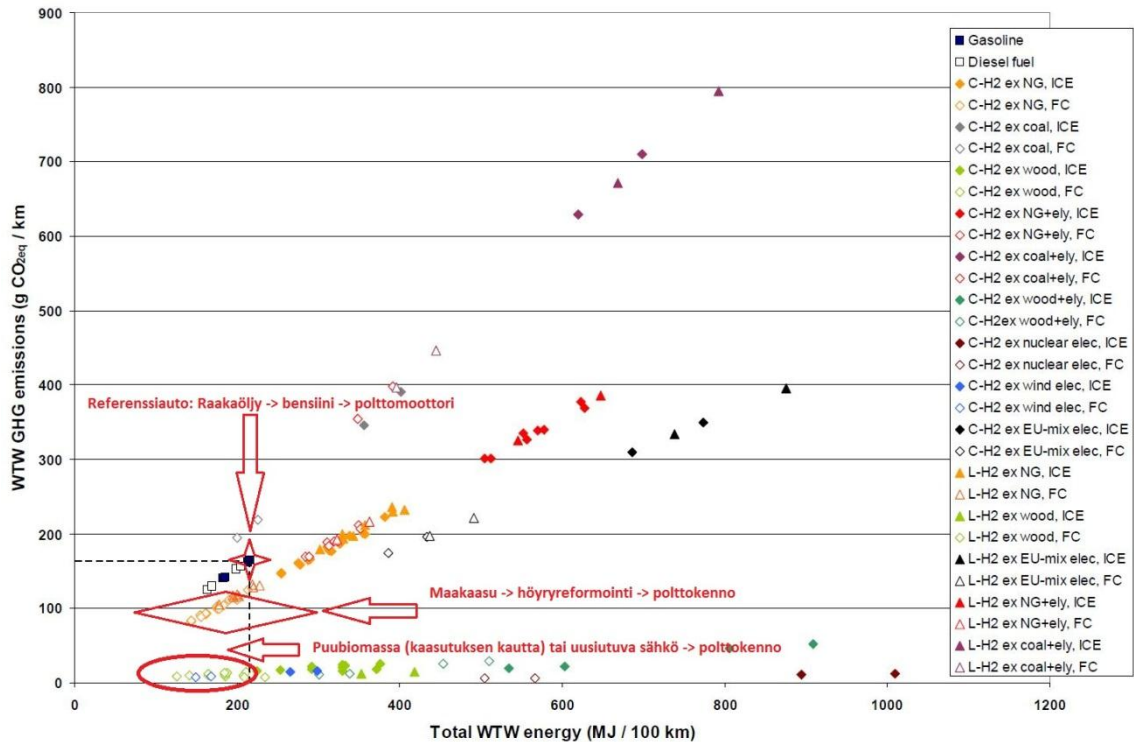


Kuva 2.1 Energiaketjujen dimensiottomien primäärienergian kulutuslukujen vertailua. Selitteet: LDV: Keyyt ajoneuvo, BEV: akkusähköajoneuvo, FCEV: polttokennoajoneuvo, ICE: polttomoottoriajoneuvo, Trolley Bus: Ajojohdinbussi (mukaillen Page & Krumdieck, 2009)

Page & Krumdieck toteavat (Kuva 2.1) että ajojohdinbussien (Trolley Bus) energiaketjuilla päästään jopa 2,6 -kertaiseen primäärienergiahyötysuhteeseen (76,1 %) verrattuna polttokennobussien (FC Bus) vastaavaan arvoon nähden, kun primäärienergiana on tuulisähkö. Akkusähköisillä henkilöautoilla (BEV) puolestaan päästään jopa 2,7 -kertaiseen hyötysuhteen arvoon (71,8 %) polttokennoautojen (FCEV) vastaavaan hyötysuhteen arvoon nähden, kun primäärienergiana on tuulisähkö. Muilla primäärienergioilla energiaketjujen erot ovat huomattavasti pienempiä. Tämän tarkastelun (Kuva 2.1) perusteella liikenteen energiahuolto olisi järkevintä toteuttaa sähkökäyttöisillä ajoneuvoilla aina silloin kuin se on mahdollista.

Myös IEA arvioi energiaketjuvertailussaan, että suora sähkönkäyttö akkuparistoajoneuvoissa on yli kaksi kertaa tehokkaampaa polttokennoautojen tapaukseen nähden. Tämä siis siinä tapauksessa että vety tuotettaisiin sähköstä elektrolyysillä. (IEA, 2012, s. 254).

JEC-tutkimuskonsortion julkaiseman raportin mukaan vedyn liikennekäyttö ei vähennä automaattisesti primäärienergiankulutusta tai kasvihuonekaasupäästöjä. Vetyyn pohjautuvien energiaketjujen energiankäyttö sekä päästöt riippuvat voimakkaasti energiaketjun kokoonpanosta. (JEC, 2011c.)



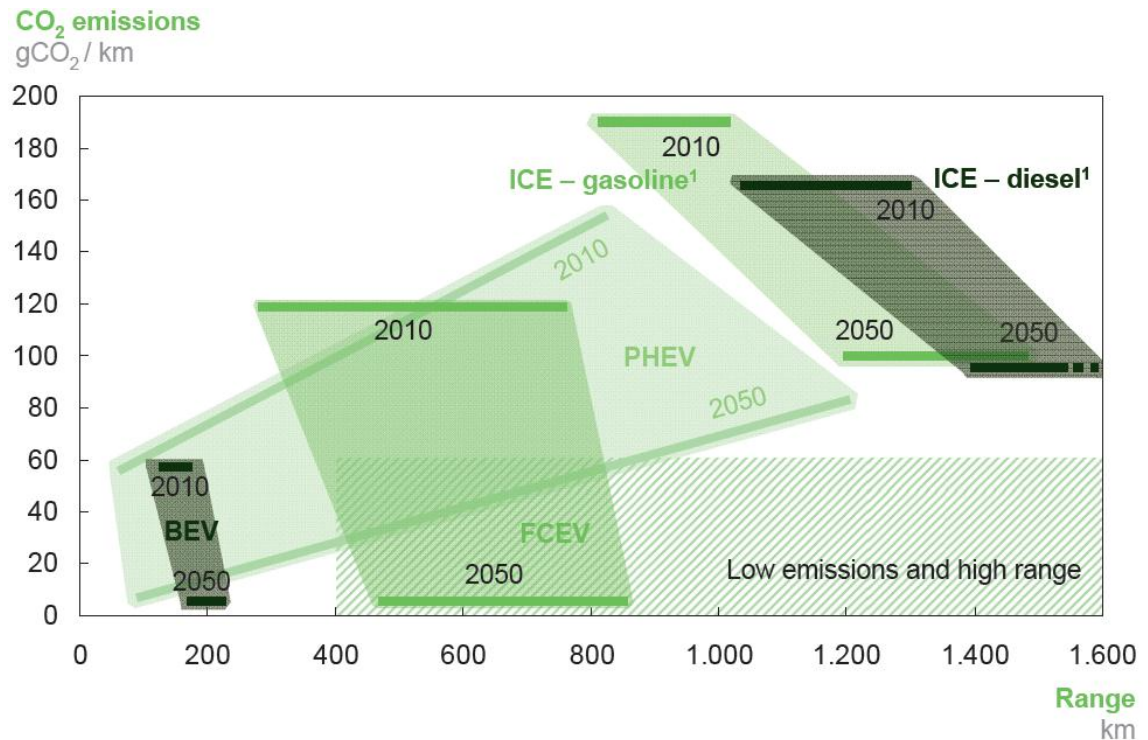
Kuva 2.2 Yhteenvetokuva vetyteknologiaan pohjautuvien energiaketjujen primäärienergiankäytöstä ja kasvihuonekaasupäästöistä. Selitteet: C-H2: Compressed Hydrogen, L-H2 Liquefied Hydrogen, NG: Natural Gas, ely: Electrolysis (JEC, 2011c.)

JEC-raportin (2011c) mukaan vetypolttoaineeseen pohjautuvilla energiaketjuilla on kuitenkin mahdollista päästä tavanomaisia ratkaisuja pienempiin energiankäytön arvoihin sekä kasvihuonekaasupäästöihin. Tämä on mahdollista silloin kun primäärienergiana on esimerkiksi tuulivoima tai puubiomassa. Myös jotkin hiileen sekä maakaasuun perustuvat energiaketjut mahdollistavat samanaikaisesti päästöjen että energiankäytön vähenemän, mutta näissä ketjuissa tuotantoprosessit on varustettu CCS:llä (*Carbon Capture & Storage*). (JEC, 2011c.)

Pelkästään kasvihuonekaasupäästöjen vähenemää tavoiteltaessa vetypolttoaineratkaisuilla on mahdollista saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä myös muilla hiiletömillä energiaketjuilla. Jos sähkö tuotetaan ydinvoimalla ja edelleen muunnetaan elektrolyyysillä vedyksi, ilmastovaikutukset lähenevät nollaa. Tällöin primäärienergian käyttö tosin lisääntyy konventionaalisiin polttoaineratkaisuihin nähden.

Vetyteknologiaan pohjautuvan energiaketjun primäärienergian käyttö sekä kasvihuonekaasupäästöt voivat olla pahimmillaan moninkertaisia konventionaalisiin polttoaineratkaisuihin nähden. Esimerkiksi vetykäyttöinen polttomoottorivoimalinja yhdistettynä hiilivoimalla tuotettuun elektrolyyysivetyyn, aiheuttaa noin 3,8-kertaisen primäärienergian kulutuksen ja yli 4,6-kertaisen kasvihuonekaasupäästön bensiniikäyttöisen referenssiauton ketjun arvoihin nähden. (JEC, 2011c.)

McKinsey (2010) puolestaan toteaa, että polttokennovoimainjoiden lisäksi myös jotkin muut voimainjaratkaisut mahdollistavat pienet energiaketjun kokonaispäästöt.



Kuva 2.3 Eri voimalinjatekniikoiden mahdollistamat ilmastopäästövaikutusten ja toimintasäteiden tyypilliset odotusarvovälit. (McKinsey, 2010)

McKinseyn esittämän tuloksen mukaan (Kuva 2.3) fossiilista dieseliä ja bensiiniä käyttävien ajoneuvojen päästövähennäpotentiaali on vaatimaton uudempaa tekniikkaa edustaviin voimalinjaratkaisuihin nähden. Tämä siitäkin huolimatta, että fossiilista polttoainetta seostettaisiin biokomponentilla jopa 24 prosenttiosuuteen saakka. Näiden toimintasäde on kuitenkin tyypillisesti suurempi kuin uudempaa tekniikkaa edustavilla voimalinjaratkaisuilla. McKinsey arvelee, että polttokennovoimalinjat voisivat mahdollistaa jopa yli 800 kilometrin toimintasäteen kun diesel-voimalinjoille toimintasäde voisi olla jopa 1600 kilometriä. Kokonaan oma kysymyksensä onkin, että onko yli 800 kilometrin toimintasäteellä sellaista arvoa, jonka vuoksi esimerkiksi autonostajat jättäisivät päästöttömän polttokennoauton hankkimatta.

Myös akkusähköiset ratkaisut mahdollistavat pienet energiaketjun ilmastovaikutukset, mutta näiden toimintasäde on totuttuun nähden varsin vaatimaton. Myös ladattava hybridi mahdollistaa näiden tulosten mukaan verrattain pienipäästöisen energiaketjun. Ladattava hybridi ei kuitenkaan mahdollista nollapäästöistä energiaketjua ilman biopolttoaineita. (McKinsey, 2010.)

2.2 Vedyn liikennekäyttöön liittyvä toimintaympäristö

Vedyn yleistyminen ja yleistymiskehityksen nopeus sekä käytön laaja-alaisuus riippuu myös laajemmasta energiasektorin kehityksestä. Mikäli tulevaisuuden energiahuolto nojautuu merkittävässä määrin säätämättömään uusiutuvaan sähköntuotantokapasiteettiin (aurinko- ja tuulivoimaan), vedyllä voi olla ratkaisevan tärkeä rooli energiajärjes-

telmässä toimitusvarmuuden takaajana. Tällaisessa tapauksessa vedyn rooli olisi nimenomaan pitkän aikavälin sähköenergian tuotanto- ja kulutuserojen tasapainottamisessa. Vetyteknologia saattaa olla ratkaisu myös energiansiirtoon liittyviin pulmiin, jos energiaa joudutaan siirtämään pitkien etäisyyksien yli. (IEA, 2012; Beaudin et al., 2010; Rasmussen et al., 2012.)

Vetyteknologia mahdollistaa energiantuotannon ja -käytön välisen ajallisen jouston. Vedyn varastointikapasiteetilla ei ole teoreettisesti määriteltyä ylärajaa, vaan vetyä voidaan varastoida suurina erityisesti nestemäisessä olomuodossa. Tämän lisäksi vetyä on mahdollista myös kuljettaa suurina määrinä pitkiä etäisyyksiä, kun taas suuren sähkötehon siirto pitkien etäisyyksien yli on vielä hankalaa. IEA näkee, että vedyn mahdollistamat hyödyt sähköverkon sekä kulutus- että käyttöpuolen säätökapasiteetissa saattaisivat jo sinänsä olla hyviä perusteita investoida suuriakin summia vetyinfrastruktuuriin. Mikäli verkkoon kytketyn säätämättömän sähköntuotantokapasiteetin osuus nousee hyvin merkittäväksi, niin suuren varastokapasiteetin tuoma hyöty voi olla suurempi kuin menetelmän huonon hyötysuhteen aiheuttama haitta (Grünwald et al., 2011). IEA toteaa, että verkon energiankulutuksen säädön yhteydessä muodostuva vety olla järkevää käyttää liikennepolttoaineena sen sijaan että koko varastokapasiteetti muunnettaisiin takaisin sähköksi. (IEA, 2012, s. 223 – 237; 254.)

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä työssä tutkimuskysymys on: Yleistyykö vety tieliikenteen polttoaineena? Tähän tutkimuskysymykseen on pyritty vastaamaan kaksiosaisella tutkimusmenettelyllä joita ovat kirjallisuustutkimusosio ja vetyteknologiaan perustuvien energiaketjujen energiatehokkuus- ja ilmastovaikutustarkastelu.

Kirjallisuustutkimusosiossa kartoitettiin vedyn liikennekäytön yleistymiseen liittyvää toimintaympäristöä ja poliittista ilmapiiriä Euroopan Unionin tasolla. Kirjallisuustutkimusosiossa selvitettiin myös vedyn liikennekäyttöön liittyvän teknologian kypsyyttä sekä autonvalmistajien vetyteknologiaan liittyviä aikeita. Kirjallisuusosiossa luotiin tarkempi katsaus vedyn jakeluinfrastruktuurin teknologiseen kehitykseen, koska infrastruktuurin teknologian kypsyys vaikuttaa oleellisesti vedyn liikennekäytön yleistymiseen. Lisäksi tämä erityinen aihealue on Suomessa vielä varsin tuntematonta aluetta.

Toisessa tutkimusosiossa selvitettiin, onko vedyn liikennekäytön yleistymisen perusteltavissa energiatehokkuus- ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseen liittyvillä näkökohdilla. Vetykäyttöisten ajoneuvojen mahdollistamia energiaketjuja vertailtiin muiden voimalinjaratkaisujen mahdollistamiin energiaketjuihin skenaariotarkasteluiden avulla. Energiaketjujen tarkasteluun ja vertailuun kehitettiin mallinnustyökalu. Mallinnustyökalu mahdollisti eri energiaketjujen energiatehokkuuden sekä ilmastovaikutusten vertailun tarkasteluskenaarioiden avulla.

Energiatehokkuuden määritelmiä ja arviointimenetelmiä käsitellään yleisellä tasolla julkaisuissa (Patterson, 1996) ja (Soimakallio & Manninen, 2007). Liikenteen energiaketjujen arviointimenetelmiä käsitellään yleisellä tasolla julkaisuissa (Laurikko & Ikonen, 2007) ja Grube et al (2010). (An & Santini, 2003) käsittelevät erityisesti ajoneuvojen energiankäytön arviointimenetelmiä ja tulosten vertailtavuutta.

Liikenteen energiaketjujen energiankäytön arviointi- ja vertailututkimusta WtW-menetelmällä on tehty aiemmin henkilöautojen osalta esimerkiksi laajassa JEC-tutkimuskonsortion selvityksessä (JEC, 2011a; JEC, 2011b ja JEC, 2011c). Myös Åhman on tehnyt vastaavaa selvitystä, mutta edellisestä poikkeavalla tarkastelumetodiikalla (Åhman, 2001). Bussien osalta arviointia ja vertailua ovat tehneet aiemmin esimerkiksi Nylund & Koponen (2012) ja FCH JU (2012b). Lisäksi myös Page & Krumdieck (2009) ovat raportoineet henkilöautojen sekä kaupunkibussien energiaketjujen energiatehokkuusvertailusta.

Weiss et al. (2000) ja Simonsen & Walnum (2011) ovat käsitelleet aiemmin erityisesti liikenteen energiaketjujen mallinnusta. Eräs toteutettu ja vapaasti saatavilla oleva tieliikenteen energiaketjujen mallinnukseen soveltuva työkalu on GREET-malli, jonka on toteuttanut National Argonne Laboratory (GREET, 2012). Kaupallinen, myös

Termodynaaminen menetelmä on erittäin käypä menetelmä esimerkiksi sähköntuotannon energiaketjuja tarkasteltaessa. Tällöin kunkin energiaketjun tarkastelun lukuarvoksi tulisi dimensioton energiahyötysuhde tai sen käänteisluku, valinnasta riippuen. Tämän menetelmän käyttäminen edellyttää, että tarkasteltavan prosessiketjun tuoton sekä syötön arvot edustavat samaa dimensiota. Yleisiä dimensioita ovat tässä tapauksessa esimerkiksi megajoule tai jokin muu termodynamiikassa tuttu dimensio. Primäärienergiahyötysuhde η_p olisi määrittävissä kunkin energiaketjun tapauksessa tuotetun sähköenergian ja käytetyn primäärienergian suhdelukuna yhtälön 3.2 mukaisesti:

$$\eta_p = \frac{E_{\text{out}}}{E_p}, \quad (3.2)$$

Edellä E_{out} on energiaketjusta ulos saatava käyttökelpoisen energian määrä ja E_p tarvittavan primäärienergian määrä. Sähköntuotannon eri energiaketjuja vertailtaessa energiatehokkain ketju on se, jolla on vertailun paras primäärienergiahyötysuhteen arvo. Tätä menetelmää sovelletaan tässä diplomityössä eri konversioprosessien energiasyötteiden arvojen laskentaan.

Edellä esitettyä menetelmää voi soveltaa myös liikenteen energiaketjujen tarkasteluun, mutta menetelmä kertoo ainoastaan kuinka hyvin primäärienergia pystytään muuntamaan konversioketjussa vetävien pyörien mekaaniseksi energiaksi. Tämä menetelmä ei sovellu kovin hyvin ajoneuvojen toteutuvan energiankäytön vertailuun, koska menetelmä jättää huomiotta osan energiankulutukseen vaikuttavista muuttujista. (An & Santini, 2003.) Tätä menetelmää käytettäessä on muistettava, että eri ajoneuvoilla on tyypillisesti erisuuruiset ajovastukset, jotka osaltaan johtuvat eri voimalinjatyypien erisuuruisista massoista. Kahdella erimassaisella ajoneuvolla voi olla samansuuruiset voimalinjan hyötysuhteet, mutta näiden polttoaineen kulutukset voivat poiketa toisistaan paljonkin. Tästä seuraa että myös primäärienergiatarpeet voivat erota toisistaan huomattavan paljon, mutta primäärienergiahyötysuhteiden lukuarvot voisivat olla siitä huolimatta samat.

Jotta edellä mainitulla menetelmällä saadut tulokset olisivat suoraan vertailukelpoisia, tulisi kaikkien vertailtavien ajoneuvojen ajovastusten olla täsmälleen samansuuruisia. Tästä seuraa, että myös ajovastuksiin vaikuttavien fyysisten dimensioiden tulisi olla täsmälleen samansuuruisia (Åhman, 2001). Edellä esitetty kriteeri ei ole mielekäs vaatimus eri voimalinjateknikoin toteutetuille ajoneuvoille, koska eri voimalinjatyyppejä edustavilla ajoneuvoilla on tyypillisesti erisuuruiset oma- ja kokonaismassat. Tästä seuraten myös testaussyklin aikaisetkin massat poikkeavat tyypillisesti toisistaan eri voimalinjateknikkaa edustavien ajoneuvojen tapauksessa vaikka korimalli olisi sama (JEC, 2011b). Ei ole siis tarkoituksenmukaista vaatia, että tarkasteltavien ajoneuvojen oma- tai kokonaismassat olisivat täsmälleen jonkin suuruisia. Merkitsevämpää on, kuinka esimerkiksi auton kiihtyvyys ja sisätilat vastaavat päivittäisiin normaalin ajon tarpeisiin.

Ajoneuvojen voimalinjojen energiatarkesteluun ja vertailuun on tarkoituksenmukaisempaa käyttää *fyysis-termodynaamisia* arviointimenetelmiä. Tällöin tarkastellaan energian loppukäytön määrää, eikä niinkään energiasta–energiaksi–konversioprosessin hyötysuhdetta (Patterson, 1996). Näin huomioidaan eri voimalinjaratkaisujen mukanaan tuoma massaero ja siitä seuraavat eriävät ajovastustyöt eri ajoneuvoissa (JEC, 2011b). Ajoneuvon käyttäjänhän on mielekäästä arvottaa ajoneuvonsa energiankäyttöä sen energiankulutuksen ja toteutuneen ajosuorituksen välisenä suhdelukuna (Patterson, 1996). Lisäksi fyysis-termodynaaminen menetelmä antaa vapauksia päättää vertailukelpoisuuden kriteereistä käytännönläheisemmin kuin termodynaaminen arviointimenetelmä. Tarkasteltavien ajoneuvojen kriteeriksi voidaan asettaa esimerkiksi, että kaikkien vertailtavien ajoneuvojen koriparametrien (otsapinta-ala ja ilmanvastuskerroin) tulee olla identtisiä. Tarkasteltavien ajoneuvojen massat saavat puolestaan olla sellaisia kuin ne kullakin voimalinjaratkaisulla luonnostaan on. Lisäkriteereiksi voidaan asettaa, että vertailtavien ajoneuvojen tulee soveltua samaan käyttötarkoitukseen ja näiden suorituskykyarvojen tulee täyttää jotkin vähimmäiskriteerit (JEC, 2011b, s. 9). Lisäkriteereinä vertailtavuudelle voidaan määrittää että tarkasteltavien ajoneuvojen ovien ja matkustajapaikkojen lukumäärän sekä varustetason ja kokoluokan tulee vastata toisiaan (JEC, 2011b, s. 8). Tällaiset vertailtavuus-kriteerit ovat myös ajoneuvon käyttäjän näkökulmasta järkevämpiä kriteerejä kuin aiemmin mainittu kriteeri samansuuruisista ajovastuksista.

Koska tieliikenneajoneuvojen polttoaineen kulutus on monen muuttujan funktio, näiden energiankulutus määritellään jonkin vertailuajosyklin aikaisen polttoaineenkulutuksen kautta. Euroopassa henkilöautojen energiankäytön tunnusluvut määritellään NEDC-ajosyklillä, jossa ajoneuvon tulee selvittää sekä kaupunki- että maantieajoa jäljittelevästä ajosyklistä alustadynamometrillä (JEC, 2011b). Tällä menetelmällä mitattu polttoaineenkulutustieto on vertailukelpoinen muiden ajoneuvomallien energiankulutustietojen kanssa, mikäli ne on määritetty samalla syklillä.

Koko energiaketjun primäärienergian käyttö E_p määritetään yhtälön 3.3 mukaisesti:

$$E_p = E_{WtW} = E_{TtW} * E_{WtT} \quad (3.3)$$

jossa E_{TtW} ajoneuvon energiankäyttö ja E_{WtT} energianhankinta- ja konversio- sekä siirtoprosessien yhteenlaskettu energiankäyttö (Grube et al, 2010). E_{WtW} on toinen nimi primäärienergiankäytölle (E_p).

Tämän työn energiaketjujen energiatehokkuustarkastelussa käytetään pääasiassa fyysis-termodynaamista arviointimenetelmää, jolloin tulokset ovat muotoa MJ/km. Tulosten tarkasteluissa näytetään menetelmävertailun vuoksi myös termodynaamisella menetelmällä saatavia tuloksia (primäärienergiahyötysuhde). Fyysis-termodynaamisella menetelmällä saatavat tulokset ovat tässä työssä ensisijaisia ja termodynaamisella menetelmällä saatavat tulokset toissijaisia.

3.2 Energiaketjujen mallinnuksen yleinen logiikka

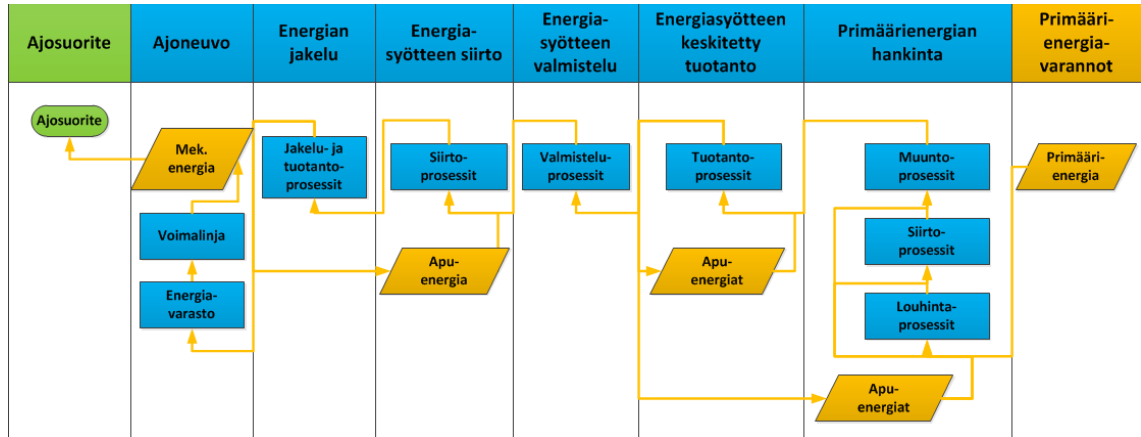
Energiaketjujen tarkastelu ja vertailu suoritetaan tässä diplomityössä mallinnustyökalulla, joka kehitettiin nimenomaisesti tämän työn tarkasteluita varten. Mallinnustyökalu on toteutettu taulukkolaskentaohjelmalla (*MS Excel*). Mallinnustyökalu on toteutettu siten, että se antaa mahdollisuuden tarkastella liikenteen energiaketjujen energiankäytön ja ilmastovaikutusten tunnuslukuja ja vertailla näitä muiden energiaketjujen tunnuslukujen kanssa. Mallinnustyökaluun on sisällytetty tarkasteltavien energiaketjujen vaadittavat konversioprosessit aina primäärienergian hankinnasta ajoneuvojen ajosuoritteeseen saakka. Tässä työssä ei näytetä kaikkia mallinnustyökalun prosesseja, mutta työkalun monipuolisuudesta saa käsityksen mallinnustyökalun vuo- ja logiikkakaaviosta (LIITE 3). Malliin on sisällytetty henkilöautojen sekä kaupunkibussien segmenteistä useita erilaisia voimalinjaratkaisuja. Kaupunkibussit on sisällytetty malliin sekä tarkasteluihin, koska vetypolttoaineen käyttö voi hyvinkin yleistyä ensimmäiseksi kaupunkibusseissa (IEA, 2012, s. 249).

Malli mahdollistaa myös eri tavoin toteutettujen yksittäisten energiantoimitusketjujen energiankäytön ja ilmastovaikutusten tunnuslukujen herkkyystarkastelun. Herkkyystarkastelun voi toteuttaa kunkin energiaketjun tapauksessa muuttelemalla niin sanottuja kiinnittämättömiä parametreja. Herkkyystarkastelu tehdään tässä diplomityössä vain vetypolttokennoauton energiaketjulle. Tässä herkkyystarkastelussa tutkitaan, kuinka paljon vedyn siirto- ja jakelumenetelmän valinta vaikuttaa polttokennoauton energiaketjun energiankäyttöön ja ilmastovaikutuksiin kun kaikki muut mahdolliset parametrit on vakioitu. Malli mahdollistaa myös esimerkiksi akkusähköisen ajoneuvon energiaketjun herkkyystarkastelun esimerkiksi sähköntuotantotavan suhteen. Malli mahdollistaa myös eri energiaketjujen tulosten keskinäisen herkkyystarkastelun erilaisilla ajosuoritteiden pituuksilla.

Tässä diplomityössä kehitetyssä mallissa ajoneuvojen energiankäytön arvot on ilmoitettu muodossa $MJ/100\ km$, jossa MJ on ajoneuvon todellinen energiankäyttö ajosuoritteiden pituutta kohden. Myös tuloksina esitetyt primäärienergiankäytön arvot edustavat samaa dimensiota. Tässä on syytä huomioida, että tämän työn kaikki tarkastelut on tehty ajosuoritteiden pituudella 100 kilometriä. Ladattavan hybridin akkusähköön ja bensiininkulutuslukemien keskinäinen suhde muuttuu ajosuoritteiden pituuden suhteen. Näin ollen tässä työssä esitettävät tulokset ovat ladattavan hybridin osalta erityistuloksia, jotka eivät skaalaudu kaikille ajosuoritteiden pituuksille. Mallinnuksen tulokset eri ketjujen ilmastovaikutuksista ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttigrammoina ajosuoritteiden pituutta kohden (g_{CO_2-ekv}/km).

Malli on koostettu laskentamoduuleista, jotka kuvaavat energiaketjun eri vaiheita maantieteellisesti loppukäytöstä energianhankintaan päin tarkasteltaessa (Kuva 3.1). Kukin laskentamoduuli puolestaan koostuu useammasta konversioprosessista, jotka ovat tarpeen energiavirtojen konversion aikaansaamiseksi. Mainittu käsite *konversio-prosessi* kattaa laajasti sekä energialajien väliset konversiot sekä sellaiset konversiot, jotka ovat tarpeen jonkin energialajin siirtämiseksi, paineistamiseksi, varastoitamiseksi

taikka jakelemiseksi. Jotkin konversioprosessit tekevät energiavirtaan vain yhden konversion, kun joissain tapauksissa yhteen prosessiin on kytketty useampia toisiinsa oleellisesti liittyviä konversioita. Yhdistetyistä konversioprosesseista esimerkkinä mainittakoon hajautettu vedyn höyryreformointi sekä komprimointi tankkauspaineseen.



Kuva 3.1 Energiaketjujen mallinnuksen laskentamoduulit rajauksineen. Kuvassa on näkyvisä myös takaisinkytkennällä toteutetut apuenergiavirrät.

Useammat konversioprosessit vaativat toimiakseen apuenergiaa, joka on toista energialajia kuin energian pääasiallinen energiasyötteen virta. Mallinnustyökalu käsittelee useampia samanaikaisia energiavirtoja suvereenisti. *Alavirrasta ylävirtaan* otettavat apuenergiavirrät on toteutettu iteratiivisella takaisinkytkennällä. *Alavirrasta ylävirtaan* otetut apuenergiavirrät on mallissa allokoitu siirtohäviöineen niille laskentamoduuleille, joihin apuenergiavirrät siirrettiin. Tapausesimerkkinä takaisinkytkennällä toteutetusta apuenergiavirrasta mainittakoon jonkin maantiekuljetuksen vaatima diesel-apuenergia, joka otetaan jakeluasemalta. Maantiekuljetus toimittaa kuormansa jakeluasemalle ja tankataan samaiselta jakeluasemalta. Kun jakeluasemalta jaeltavan polttoaineen määrä kasvaa kuljetusyksikön ottamaa energiamäärää vastaavalla lukuarvolla, myös toimitettavan energian määrä kasvaa. Tämä edelleen johtaa maantiekuljetusyksikön energiankäytön lisääntymiseen ja edelleen jaeltavan poltonesteen määrän lisääntymiseen. Tämän tyyppinen takaisinkytkentä on ratkaistu mallissa iteratiivisella menetelmällä konvergenssirajan ollessa 0,00001. Mallinnuksen edetessä tehdyt valinnat aktivoivat aina laskentajärjestyksessä seuraavan moduulin ne prosessit ja laskentafunktiot, jotka ovat tarpeen alavirranpuoleisen laskentamoduulin energialajien tuottamiseksi (Kuva 3.2).

Ajosuorite km	100
Mekaaninen energia	Sähköinen

»
»
»
»

Tuloksiin

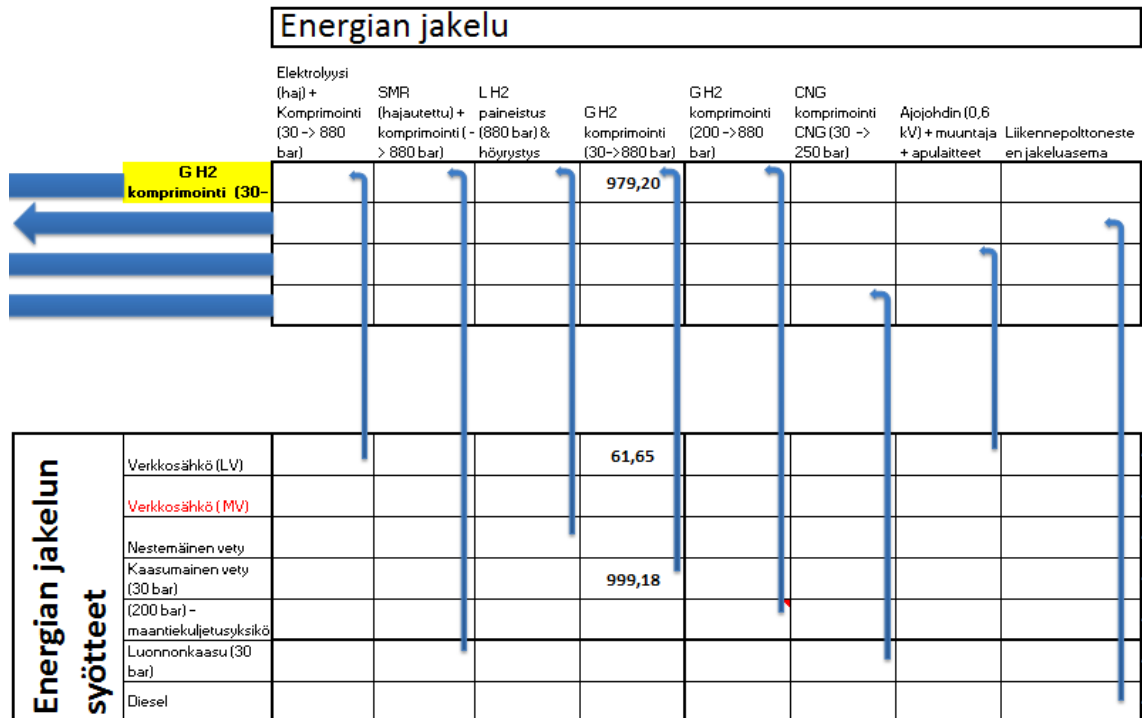
Voima- linjan energian- käyttö	Ajojohtimen sähkövirta			
	Vety			979,20
	Luonnonkaasu			
	Diesel			

Auton voimalinja			
Polttomoottori	Sähköinen	Hybridi	Polttokenno
	Vety		

Kuva 3.2 Ote kaupunkibussien energiaketjujen mallinnuksen ensimmäisestä laskentamoduulista. Ajosuoritteen pituudeksi on valittu 100 kilometriä ja ajoneuvon voimalinjaksi valittu Sähköinen - Vety.

Mallin kaupunkibussiosion *Auton voimalinja*-laskentamoduuliin (Kuva 3.2) on sisällytetty kuusi erilaista voimalinjaratkaisua. Nämä ovat luonnonkaasu- ja dieselkäyttöiset polttomoottorivoimalinjat, vetypolttokennoihin sekä ajojohtinvirroitukseseen perustuvat sähköiset voimalinjat sekä hybridiratkaisuista luonnonkaasu- ja diesel-voimalinjat.

Henkilöautojen mallinnuksessa mahdollisia voimalinjaratkaisuja on kaikkiaan kymmenen kappaletta. Polttomoottorivoimalinjoista mukana ovat vety-, luonnonkaasu-, diesel ja bensiinikäyttöiset voimalinjaratkaisut. Sähköisistä voimalinjaratkaisuista mukana ovat akkusähköön sekä vetypolttokennoihin perustuvat voimalinjaratkaisut. Hybridivoimalinjoista mukana ovat luonnonkaasu-, bensiini- ja dieselhybridit. Ladattavia hybrideitä on mukana vain yksi ja tämän energiasyötteinä ovat sähköenergia sekä bensiini.



Kuva 3.3 Ote kaupunkibussien energiaketjujen mallinnuksen Energian jakelulaskentamoduulista. Jakeluaseman tekniseksi toteutustavaksi on tässä valittu kaasumaisen vedyn komprimointi (30 bar → 880 bar) ja niin ollen vedyntoimitustavaksi on valittu putkisiirto.

Mallin *Energian jakelu*-laskentamoduuliin (Kuva 3.3) on sisällytetty viisi erilaista vedyn jakeluasemaratkaisua; hajautettuun elektrolyysiin, hajautettuun luonnonkaasun höyryreformointiin, nestemäisen vedyn maantiekuljetukseen ja kaasumaisen vedyn putkisiirtoon sekä kaasumaisen vedyn maantiekuljetukseen perustuvat ratkaisut. Muille energialajeille jakeluasemaratkaisuja on sisällytetty malliin yksi kullekin energialajille. Mallinnuksen *Energian jakelu*-laskentamoduuleihin on sisällytetty kaupunkibussien ketjumallinnuksessa ajohdinjärjestelmä ja henkilöautojen tapauksessa latauspiste.

Mallin muissakin moduuleissa on erilaisia variointimahdollisuuksia niin ajosuorituksen pituuden, syötteiden siirtoetäisyyksien, konversiomenetelmien sekä myös energiasyötteiden valinnan suhteen. Kaiken kaikkiaan malli mahdollistaa teoriassa äärettömän määrän erilaisia tarkasteluskenarioita, kun mukaan lasketaan vapaasti varioitavat syötteiden siirtoetäisyydet ja ajosuorituksen pituudet. Vetyyn sekä sähköön perustuvat (akku- ja johdinsähköiset) voimalinjat mahdollistavat eniten erilaisia ketjuvariaatioita primäärienergian valinnan suhteen. Konventionaalisiin polttoaineisiin pohjautuvia ketjuvariaatioita rajoittaa suppeampi primäärienergiavalikoima sekä suppeampi jakelujärjestelmävalikoima.

Malli vastaa myös tältä osin tosielämän tilannetta, esimerkiksi sähköenergiasta (ja vedestä) ei voi valmistaa bensiiniä saatikka dieseliä polttomoottoreille. Sähköiset sekä vetykäyttöiset voimalinjat voivat puolestaan toimia myös tällaisilla syötteillä joidenkin

konversioprosessien avulla. Mallin erilaisista variointimahdollisuuksista sekä logiikasta saa tarkemman käsityksen liitteenä olevasta mallin vuokaaviosta (Liite 3).

Mallinnuksessa on käytetty *Alavirrasta ylävirtaan* -menetelmää, koska myös tosielämässä vain käytettävä energia (häviöineen) täytyy tuottaa ja jalostaa (IEA, 2012, s. 43). Tämän menetelmävalinnan seurauksena mallin käyttäjää vaaditaan syöttämään vain sellaisia parametreja sekä valintoja jotka ovat tarpeen kulloinkin mallinnettavan energiaketjun arvioimiseksi.

Malliin on sisällytetty geneerinen dokumentointitoiminto, joka mahdollistaa mallilla saatujen tulosten jäljitettävyyden ja mallinnettujen energiaketjuvariaatioiden mallinnuksen toistamisen. Dokumentointi on toteutettu siten, että malli generoi sanallisen kuvauksen arvioitujen energiaketjuvariaatioiden keskeisimmistä syötearvoista ja valinnoista sekä ajosuoritteen pituudesta kuin myös primäärienergiasyötteiden lajeista ja näiden määristäkin.

3.3 Mallinnuksen matemaattiset perusteet

Mallin laskentavaiheiden etenemisjärjestyksestä johtuen laskentamoduuleiden laskentafunktiot on toteutettu siten, että ne operoivat kussakin prosessissa energiasyötteen ja energiantuoton *suhdeluvuilla* z . Mainittu suhdeluku on kerroin, joka ilmaisee, kuinka paljon prosessi vaatii kutakin energiasyötettä yhden tuottoyksikön tuottamiseen ja tämän dimensio on yleisesti muotoa MJ_{in}/MJ_{out} . (mukailien JEC, 2011a) Mallinnuksessa energian arvojen perusyksikkönä käytetään megajoulea (MJ).

Kunkin energiaketjun primäärienergiankäyttö lasketaan yhtälön 3.4 mukaisella menettelyllä

$$E_p = E_{TtW} z_n z_{n+1} \cdots z_{m-1} z_m, \quad (3.4)$$

jossa z :n arvot ovat edellä mainittuja konversioprosessien energiasyötön suhdelukuja ja E_{TtW} ajoneuvon energiankäyttö.

Ajoneuvojen energiankäyttö E_{TtW} on suoraan riippuvainen ajosuoritteen pituudesta ja määritetään yhtälön 3.5 avulla.

$$E_{TtW} = s e_{TtW}, \quad (3.5)$$

Tässä e_{TtW} on lähteestä saatu ajoneuvon energiankulutustieto kilometriä kohden ja s on malliin syötetty ajosuoritteen pituusparametri.

Ladattavan bensiinikäyttöisen hybridin laskentafunktiot on määritelty muista ajoneuvoista poiketen paloittain siten, että voimalinja voi tyydyttää osan energiantarpeestaan akkusähköllä vain niin pitkään kuin auton akkusähköavusteinen toimintasäde sen mahdollistaa. Tämän jälkeen kyseinen voimalinja siirtyy hybridimoodiin, jossa voimalinjan energiantarve tyydytetään ainoastaan bensiinillä. Myös akkusähköisen

voimalinjan laskentafunktioon on asetettu rajoite, joka estää akkukapasiteetin salliman toimintasäteen ylittämisen.

Energiansyötön suhdeluvut ovat konversioprosessien osalta yksinkertaistaen ilmaistuna hyötysuhdearvojen käänteislukuja ja ovat yhtälön (3.6) muotoa. Hyötysuhdevertaus pätee suoraan vain niissä tapauksissa, joissa energiasyötteitä ja -tuottoja on yksi kumpaakin.

$$z = \frac{E_{\text{in}}}{E_{\text{out}}} \quad (3.6)$$

Edellä z on jonkin prosessin energiasyötteen ja -tuoton välinen suhdeluku, E_{in} lähteessä käytetty energiasyötteen arvo ja E_{out} lähteessä käytetty energiantuoton arvo. Suhdeluvut on määritetty kunkin prosessin kullekin energiasyötteen lajille erikseen joko suoraan lähdetiedoista tai modifioimalla lähdetietojen arvoja laskentafunktioiden vaatimaan muotoon. Mallissa käytettävät suhdeluvut ovat energiansiirron laskentamoduulin suhdelukuja lukuun ottamatta vakioarvoisia. Energiansiirron laskentamoduulissa suhdeluvut ovat siirtoetäisyyden x funktioita.

Kunkin konversioprosessin energiasyötteiden arvojen laskenta etenee siten, että aiemmin laskettu vaadittava energiantuoton arvo E_{out} kerrotaan näillä suhdeluvuilla ja tulokseksi saadaan energiasyötteen arvo kullekin energialajille yhtälön (3.7) mukaisesti:

$$E_{\text{in}} = E_{\text{out}} * z \quad (3.7)$$

Edellä esitetyssä yhtälössä prosessin energiasyöte E_{in} on tuntematon muuttuja. Useissa mallin prosesseissa, kuten esimerkiksi vedyn jakeluaseman komprimoinnissa (Kuva 3.3), on useampia energiasyötteitä energiatuotetta kohden ja kunkin energiasyötteen arvon laskenta tapahtuu erillisillä laskentafunktioilla, jotka luonnollisesti vaativat lähtötiedoikseen omat suhdelukunsa. Niissä tapauksissa, jolloin konversioprosessissa ei tapahdu energiahäviöitä, suhdeluku z saa arvon 1, josta seuraa että prosessin energiasyötteen ja -tuoton arvot ovat samoja.

Energiantuotannon sekä konversioprosessien osalta suhdeluvut on poimittu pääasiassa JEC-raportin syötearvotaulukoista (JEC, 2011f). Tarkemmat viittaukset lähdetietoihin on löydettävissä omana liitteenään olevasta lähtöarvotaulukosta.

3.4 Ilmastovaikutusten laskennasta

Mallinnuksen energiaketjujen ilmastovaikutukset on laskettu tässä työssä soveltaen RES-direktiivin (2009/28/EY) mukaista ilmastovaikutusten ketjulaskentamenetelmää. RES-direktiivi on tarkoitettu kaasumaisten ja nestemäisten biopohjaisten polttoainesten ympäristövaikutusten arviointiin (EY, 2009b). Tämän vuoksi laskentamenetelmää ei voitu soveltaa kaikilta osin energiaketjuihin joissa primäärienergian lähteenä oli fossiilinen energialaji. Direktiivi määrittää, että sähkönkäytön ilmastovaikutukset olisi

arvioitava alueellisen keskimääräisen verkkosähkön tuotantotehon mukaisilla päästöker-toimilla. Tämän työn mallinnuksessa sähkön ilmastovaikutus määritettiin kullekin mal-linnuksen sähköntuotantotavalle erikseen ja sähköntuotannon ilmastovaikutukset mää-räytyvät valittavan sähköntuotantotavan mukaisiksi. Esimerkiksi kivihiilisähkölle saa-tiin erisuuruinen ilmastovaikutus kuin vaikkapa maakaasu-GTCC-lauhdesähkölle. Näin ollen saadut energiaketjujen ilmastovaikutusten arvot vastaavat mallinnuksessa tehtyjä valintoja myös sähkönkäytön osalta.

Tässä diplomityössä käytettiin mallinnusparametrien mukaisia konversio- ja siir-toprosessien ilmastovaikutuksen arvoja, jotka on johdettu pääasiassa JEC-raportin liit-teessä (2011d) annetuista lähtöarvoista. Henkilöautojen ilmastovaikutuksen laskennassa käytetyt lähtöarvot on johdettu JEC-raportin TtW-osaraportin (JEC, 2011b) arvoista. Kaupunkibussien vastaavat lähtöarvot on johdettu VTT:n ylläpitämän LIPASTO-tietokannan (VTT, 2012a) arvoista siten, että nämä vastaavat mallinnukseen mukaan otettujen kaupunkibussien energiankäytön arvoja.

3.5 Lähtöarvojen modifioinnista

Sähköverkon osalta lähtötiedot ovat peräisin kahdesta eri lähteestä, alue- ja paikallis-verkkojen osalta suomalaisten sähköverkkojen tunnusluvuista ja siirtoverkkojen osalta Siemens AG:n tasavirtasähkön siirtoteknologiaa esittelevästä statusraportista (Siemens, 2012). Mallissa käytettävät lähtötiedot on modifioitu sellaiseen muotoon, että näillä voidaan mallintaa sähköverkon etäisyydestä riippuvaa energiansyötön ja –tuoton välistä suhdetta.

Sähköverkon energiansyötön suhdeluku z on määritetty lähtötiedoista yhtälön (3.8) mukaisesti apumuuttujan i avulla, jota nimitetään tässä siirron energiaintensiteetik-si.

$$z = i_{\text{alue\&jakelu}} i_{\text{siirto}}^x, \quad (3.8)$$

jossa potenssiluku x on mallinnuksen parametrina oleva siirtoetäisyyden kilo-metrimäärä, $i_{\text{alue \& jakelu}}$ lähtötiedoista modifioitu alue- ja jakeluverkon energiaintensi-teettiluku ja i_{siirto} lähtötiedoista modifioitu siirtoyhteyden energiaintensiteettiluku.

Sähkönsiirtoyhteyden energiaintensiteetti on määritetty lähtötiedoista siirtoyhte-yksien (vaihto- ja tasavirta) siirtoetäisyyden funktiona yhtälön 3.9 mukaisesti

$$i_{\text{siirto}} = \frac{x_{\text{lähde}}}{\sqrt{(\eta_{\text{lähde}})}}, \quad (3.9)$$

jossa $x_{\text{lähde}}$ on lähdetietojen mukainen siirtoetäisyys, jolla häviö η tapahtuu. Energiain-tensiteetin määrittäminen on sähkönsiirron osalta tarpeen, koska tosielämässä siirron häviöt ja myös vaadittava energiansyötön suhdeluku riippuvat siirtoetäisyydestä. Myös

luonnonkaasun putkisiirron energiaintensiteetti on määritetty yhtälön 3.9 mukaisella menettelyllä.3.9

Todellisten alue- ja jakeluverkkojen siirron energiaintensiteettiä on hankala määrittää, koska todelliset sähköverkot ovat rakenteeltaan monimutkaisia. Tästä seuraa että yksittäisen sähkökäyttäjän käyttämän sähköenergian todellista alkuperää on hyvin hankala määrittää. Mallinnuksessa käytetään tästä syystä osalta suomalaisen alue- ja jakeluverkkojen keskimääräisen hyötysuhteen mukaan määritettyä energiansyötön suhdeluvun arvoa. Mainittu lukuarvo on määritetty yhtälön 3.10 mukaisesti

$$i_{\text{alue \& jakelu}} = \frac{E_{\text{in}}}{E_{\text{out}}}, \quad (3.10)$$

jossa E_{out} on alue- ja jakeluverkoista asiakkaille tai toisiin verkkoihin luovutettu sähköenergia, E_{in} verkkoihin syötetyn energian määrä ja $i_{\text{alue\&jakelu}}$ mainituista lähtötiedoista laskettu alue- ja jakeluverkkojen keskimääräinen energiaintensiivisyysluku.

Suomalaisten luonnonkaasuputkistojen siirron energiaintensiivisyyden arvo määritettiin samaan tapaan sähköverkon kanssa (yhtälö 3.9), koska siirron energiahäviö kasvaa molemmissa tapauksissa siirtoetäisyyden kasvaessa eksponentiaalisesti (*ketjuhyötysuhde*). Energiansyötön suhdeluku z lasketaan yhtälön 3.11 mukaisesti korottamalla putkisiirron energiaintensiteetin lukuarvo mallin siirtoetäisyyttä kuvaavalla parametrim x arvolla

$$z = i^x, \quad (3.11)$$

jossa i on mainittu siirron energiaintensiteetin lukuarvo. Venäjän puoleiselle maakaasun putkisiirrolle käytettiin Ruonakosken (2011) raportista johdettua keskimääräistä energiaintensiivisyyden lukuarvoa, joka on käytännössä hyötysuhteen käänteisluku.

3.5.1 Vedyn putkisiirron energiaintensiteetin määrittäminen

Malliin sisällytetty kaasumaisen vedyn putkisiirron energiansyötön suhdeluku on määritetty edellä esiteltyjen maakaasuputkiston modifioitujen lähtöarvojen pohjalta mutta putkisiirron energiantarve on modifioitu vastaamaan kaasumaisen vedyn putkisiirtoa. Perusajatuksena tässä modifioinnissa on se että vetykaasu siirretään identtisessä putkistossa maakaasuputkiston kanssa siten, että painetaso pidetään samassa tasossa, joka valitsee suomalaisessa luonnonkaasun siirtoputkistossa.

Siirron energiankäytön arvon skaalauksen perusajatuksena on siis, että putkisiirron virtausvastustyön määrään ja edelleen komprimoinnin energiantarpeeseen vaikuttaa ainoastaan siirrettävän aineen aineominaisuudet (Bossel, 2003) ja muut näihin vaikuttavat muuttujat on vakioitu vastaamaan luonnonkaasuputkiston arvoja. Näin ollen vedyn putkisiirron energiankäyttö on mahdollista määrittää varsin hyvin tunnettujen luonnonkaasun putkisiirron energiankäytön arvojen pohjalta.

Modifiointi tapahtui siten, että määritettiin putkisiirron virtausvastusteho (N_{H_2} & N_{CH_4}) ja kaasuturbiinikäyttöisen kompressorin polttokaasun ominaiskulutuslukemat (e_{H_2} & e_{CH_4}) molemmille virtausaineille. Määritetyt arvot toimivat niin sanottuina skaalausapumuuttujina (N_{H_2}/N_{CH_4}) ja (e_{H_2}/e_{CH_4}), joiden avulla vedyn putkisiirrolle saatiin määritettyä energiaintensiteetin lukuarvo maakaasun putkisiirron vastaavasta arvosta skaalaamalla.

Kaasumaisen virtausaineen putkisiirron teoreettinen virtausvastusteho N määritetään turbulentin virtauksen tapauksessa yhtälöllä (3.12). (Bossel et al., 2003, s. 25.)

$$N = \frac{\pi D}{8} L \rho v^3 \xi \quad (3.12)$$

jossa:

N on putkisiirron energiantarve

D putken halkaisija

L on putken pituus

ρ on aineen tiheys

v on virtausaineen virtausnopeus

ξ on putkiston kitkavastuskerroin (virtaustapauskohtainen)

Tehontarpeen yhtälössä esiintyvä putkiston kitkavastuskerroin ξ määritetään Moodyn diagrammina tunnetusta kuvaajasta. Kitkavastuskertoimen arvoon vaikuttaa putken seinämämateriaalin pinnankarkeuden ja putkenhalkaisijan suhteesta tuleva suhteellinen karkeus. Toisena muuttujana vastuskertoimen määrittämisessä on virtausaineelle ominainen Reynoldsin luku kyseisessä virtaustapauksessa. Suhteellisen karkeuden arvoksi määritettiin 0,005 (hyvin ruosteinen teräs, halkaisija 700 mm).

Bossel arvioi maakaasun putkisiirtovirtauksen tyypilliseksi Reynoldsin luvuksi $6,55 \times 10^6$. Jos taas virtausaine vaihdettaisiin vedyksi ja virtausnopeus pidettäisiin vakiona, Reynoldsin luku saisi arvon $3,16 \times 10^6$. (Bossel, 2003.) Näillä arvoilla määritettyä kitkavastuskertoimet ovat molemmille aineille samat, josta seuraa että ne supistuvat myöhemmin pois yhtälöistä. Virtausaineiden poikkeavat viskositeetin arvot eivät niin ollen vaikuta myöhemmin saatavaan skaalauslukuun.

Skaalaukseen vaadittu suhdeluku saadaan kaasumaisen vedyn ja maakaasun putkisiirron tehontarpeen yhtälöiden suhteesta yhtälön 3.13 mukaisesti

$$\frac{N_{H_2}}{N_{CH_4}} = \frac{\frac{\pi D}{8} L \rho_{H_2} v_{H_2}^3 \xi_{H_2}}{\frac{\pi D}{8} L \rho_{CH_4} v_{CH_4}^3 \xi_{CH_4}}, \quad (3.13)$$

joka sieventyy yhtälön 3.14 muotoon

$$\frac{N_{\text{H}_2}}{N_{\text{CH}_4}} = \frac{\rho_{\text{H}_2}}{\rho_{\text{CH}_4}} \frac{v_{\text{H}_2}^3}{v_{\text{CH}_4}^3} \quad (3.14)$$

Molempien virtausaineiden vaadittu virtausnopeus on määritettävissä energia-
vuon yhtälöstä (3.15) (Bossel et al., 2003)

$$Q'_f = A v \rho q, \quad (3.15)$$

jossa q on virtausaineen lämpöarvo (MJ /kg) ja Q'_f virtausaineen polttoaineteho. Tämä
yhtälö voidaan muokata yhtälön (3.16) muotoon

$$v = \frac{Q'_f}{A \rho q}. \quad (3.16)$$

Tällöin virtausnopeuksien suhde on määritettävissä yhtälön 3.17 mukaisella esi-
tyksellä.

$$\frac{v_{\text{H}_2}}{v_{\text{CH}_4}} = \frac{\rho_{\text{CH}_4}}{\rho_{\text{H}_2}} \frac{q_{\text{CH}_4}}{q_{\text{H}_2}} \quad (3.17)$$

Kun edellä saatu tulos sijoitetaan yhtälöön 3.14, on eri virtausaineiden siirtoon
vaadittavan teoreettisen virtausvastustehon vertailu mahdollista yhtälön 3.18 mukaisesti.

$$\frac{N_{\text{H}_2}}{N_{\text{CH}_4}} = \frac{\rho_{\text{CH}_4}^2}{\rho_{\text{H}_2}^2} \frac{q_{\text{CH}_4}^3}{q_{\text{H}_2}^3} \quad (3.18)$$

Teoreettisen tehon vertailu on mahdollista, vaikka tarkkaa tietoa putkistoissa vallitsevis-
ta virtausnopeuksista ei olisikaan saatavilla vaan tiedetään ainoastaan keskimääräinen
tehontarve koko putkistosta ja oletetaan, että virtausnopeus pysyy vertailtavissa osissa
molempien kaasujen tapauksessa turbulentilla alueella.

Yhtälössä 3.18 esiintyvät parametrit ovat riippuvaisia virtausaineen painetasosta
ja tässä modifikaatiossa arvoina käytettiin suomalaisen maakaasun siirtoputkiston ni-
mellispainetasoa 54 bar, jolloin lähtöarvot olivat alla olevan taulukon (Taulukko 3.1)
mukaisia.

	Tiheys ρ [kg/m ³] * (30 bar)	Alempi lämpöarvo q [MJ/kg]**
CH ₄	39,266	50,0
H ₂	4,326	120,1

Taulukko 3.1 Lähtöarvoja vedyn ja metaanin putkisiirron energiankäytön vertailuun, *
(NIST, 2012), ** JEC, 2011d)

Näillä arvoilla laskien, kaasumaisen vedyn putkisiirron virtausvastusteho on noin 5,94-kertainen metaanin siirtoon verrattaessa. Koska putkisiirron virtausvastusteho on virtausvastustyön (energia) ensimmäinen aikaderivaatta, sama suhdeluku toimii skaalausapumuuttujana myös energiankäyttöä määritettäessä.

Vedyn putkisiirron energiaintensiteetti i_{H_2} määritettiin yhtälön 3.19 mukaisella laskentatavalla

$$i_{H_2} = 1 + (i_{CH_4} - 1) \frac{e_{H_2}}{e_{CH_4}} \frac{N_{H_2}}{N_{CH_4}}, \quad (3.19)$$

jossa e_{H_2} ja e_{CH_4} ovat GREET-mallista johdettuja vedyn ja maakaasun kaasuturbiinikompressorien polttokaasun kulutuslukuja ($MJ_{H_2, \text{polttokaasu}} / MJ_{H_2, \text{out}}$). Tässä laskentatavassa oletetaan, että vedyn putkisiirron vuotohäviöt vastaavat maakaasuputkiston häviöitä ja putkiston painetaso sekä kaasun polttoainetehto vastaa maakaasuputkiston arvoja. Lisäksi oletetaan, että kompressorissa ei tapahdu ylimääräisiä sisäisiä häviöitä maakaasusta vetyyn vaihdettaessa. Luonnonkaasu- ja vetykäyttöisillä kaasuturbiineilla on lähes samansuuruiset termiset hyötysuhteet, 57,57 % luonnonkaasukäyttöiselle ja 56,25...58,35 % vetykäyttöiselle turbiinille (Chiesa et al, 2005). Näin ollen voidaan olettaa, että myöskään kompressorin kaasuturbiinin ominaisenergiankulutus ei muutu, kun polttokaasu vaihdetaan maakaasusta vetyyn.

Näin laskettuna vedyn putkisiirron vaatima polttokaasujen määrä on 6,51-kertainen maakaasun putkisiirtoon nähden. Näin saatu skaalausluku on herkkä laskennassa käytetyille putkiston painetason muutoksille, koska vedyn komprimointityö sekä virtausvastusteho kasvavat nopeammin kuin maakaasun vastaavat arvot ja niin ollen tämä suhdeluku (6,51) on voimassa vain tässä työssä käytetyillä arvoilla.

3.5.2 Ajoneuvojen lähtötietojen modifioinnista

Tässä työssä keskityttiin tutkimaan erityisesti vetyyn pohjautuvien voimalinjojen mahdollistamia energiaketjuja ja vertailemaan näitä muihin liikenteen energiaketjuihin. Täsmällinen energiaketjujen vertailu on mahdollista silloin kun energiankäyttöön ja energiatehokkuuteen vaikuttavat ”ylimääräiset” muuttujat vakioidaan ja ainoastaan polttoaine- sekä voimalinjalavalintaan liittyvät muuttujat jätetään ”vapaiksi”. Ajoneuvojen energiankäyttöön vaikuttavia ylimääräisiä muuttujia ovat käytännössä ajoneuvojen erityyppisten korien vaikutukset (otsapinta-ala sekä aerodynaaminen vastuskerroin). Kun eri voimalinjaratkaisuja edustavien ajoneuvojen koriparametrit vakioidaan ja energiankäytön arvot skaalataan vastaamaan referenssikorimallia, skaalatuista energiankäytön arvoista on mahdollista arvioida eri voimalinjaratkaisujen todellista energiatehokkuutta.

Eri voimalinjatyyypeillä on erilaiset ominaismassat, josta johtuen myös eri voimalinjatyyppiä edustavien ajoneuvojen massat vaihtelevat (JEC, 2011b). Tämä johtaa osaltaan eri voimalinjaketniiikkaa edustavien autojen erisuuruisiin ajovastuksiin. Ajo-

neuvojen massan arvoja ei ole mielekästä vakioida, koska eri tekniikkaa edustavien ajoneuvojen massat ovat oleellisesti kytköksissä voimalinjaratkaisujen massoihin. Tämä ilmenee erityisesti verrattaessa akkusähköisten ja tavallisten henkilöautojen ominaismassoja (JEC, 2011b).

Tässä mallissa henkilöautojen energiankulutuksen lähtötietoina käytettiin pääasiassa JEC-tutkimuskonsortion konsensusraportin TtW-osiossa (2011b) käytettyjä lähtötietoja, jotka on määritetty saman konsortion toimesta tietokoneavusteisella simuloinnilla (MatLab + ADVISOR). Lähteen kaikkien ajoneuvojen voimalinjat oli mitoitettu referenssiauton korimallille. Voimalinjamitoituksen kriteerinä oli että kullakin voimalinjaratkaisulla tuli saavuttaa ennalta asetetut suorituskyvyn vähimmäiskriteerit. Nämä vähimmäiskriteerit on luetteloitu alla (Taulukko 3.2).

Auton kokoluokka		VW Golf
Matkustajamäärä	hlöä	5
Kiihtyvyys 0-100 km/h	[s]	< 13
Huippunopeus	[km/h]	180
Toimintasäde	[km]	600

Taulukko 3.2 Keskeisimmät henkilöautojen energiankulutuksen simuloinnissa käytetyt kriteerit (JEC,2011b)

Pääasiallisessa lähteessä (JEC, 2011b) ilmoitetut henkilöautojen energiankäytön lähtötiedot olivat jo valmiiksi sellaisessa muodossa, että niitä ei tarvinnut modifioida. JEC-raportissa (JEC, 2011b) ei ollut kuitenkaan mukana ladattavaa hybridiä. Niin ollen ladattavan hybridin lähtöarvot modifioitiin ladattavan Toyota Priuksen energiankäytön arvoista. Akkusähköisen voimalinjan tiedot on otettu saman tutkimusraportin akkusähköiselle voimalinjaratkaisulle ja ladattavalle hybridille omistetusta liitteestä (JEC, 2011g). Tässä lähteessä oli annettu akkusähköisen auton tyypillinen energiankulutus sekä massanlisäys referenssiautoon nähden sekä tälle tyypillisiä toimintasäteen arvoja.

Ladattavan hybridin lähtötietojen modifioinnin perustana käytetyt Toyota Priuksen lähtötiedot saatiin Toyota Auto Finland Oy:n teknisestä palvelusta (Karvinen, 2013). Lähtötietojen mukainen ladattavan hybridin kiihtyvyys (0 – 100 km / h) on 11,4 sekuntia (Karvinen, 2013.), joka täyttää hyvin JEC-raportissa käytetyn vähimmäisvaatimuksen (Taulukko 3.2). Ladattava hybridin akkusähköön ja bensiininkulutuksen arvot skaalattiin vastaamaan referenssiauton korimallin mukaista NEDC-ajosyklin mukaista kulutusta. Skaalauksen taustalla oleva teoria on seuraavanlainen:

Tasaisella alustalla suoritettavan ajosyklin aikaisen mekaanisen pyörytön määrä voidaan määrittää yhtälön 3.20 mukaisella tavalla, kun ajosuorituksen nopeus-aikasarja tunnetaan (Koffler & Rohde-Brandenburger, 2010).

$$W_{m,tot} = W_R + W_L + W_a \quad (3.20)$$

Tässä W_R on ajoneuvon vierintävastusten voittamiseksi tehtävä työ (J), W_L aerodynaamisten virtausvastusten voittamiseksi tehtävä työ (J) ja W_a kiihdytysvastusten voit-

tamiseksi tehtävä positiivinen työ. Vierintävastusten voittamiseksi tehtävän työn määrä saadaan yhtälöstä (3.21)

$$W_R = \sum m g f_R \Delta s_i, \quad (3.21)$$

jossa m on ajosyklin suoritusmassa [kg],
 g putoamiskiihtyvyys [$\approx 9,81 \text{ m / s}^2$],
 f_R renkaan vierintävastusvakio [0,011, asfaltti] ja
 Δs_i on siirtymä tarkasteluvälillä [m].

Kukin tarkasteluväli on tässä laskennassa sekunnin mittainen ja numeerinen integrointi tehtiin testaussyklin aikasarjan hetkellisten tulosten arvoista koko syklin yli. Ajoneuvon aerodynaaminen virtausvastustyö saadaan puolestaan yhtälöstä yhtälön 3.22 mukaisesti:

$$W_L = \sum \rho \frac{v_i^2}{2} c_w A \Delta s_i, \quad (3.22)$$

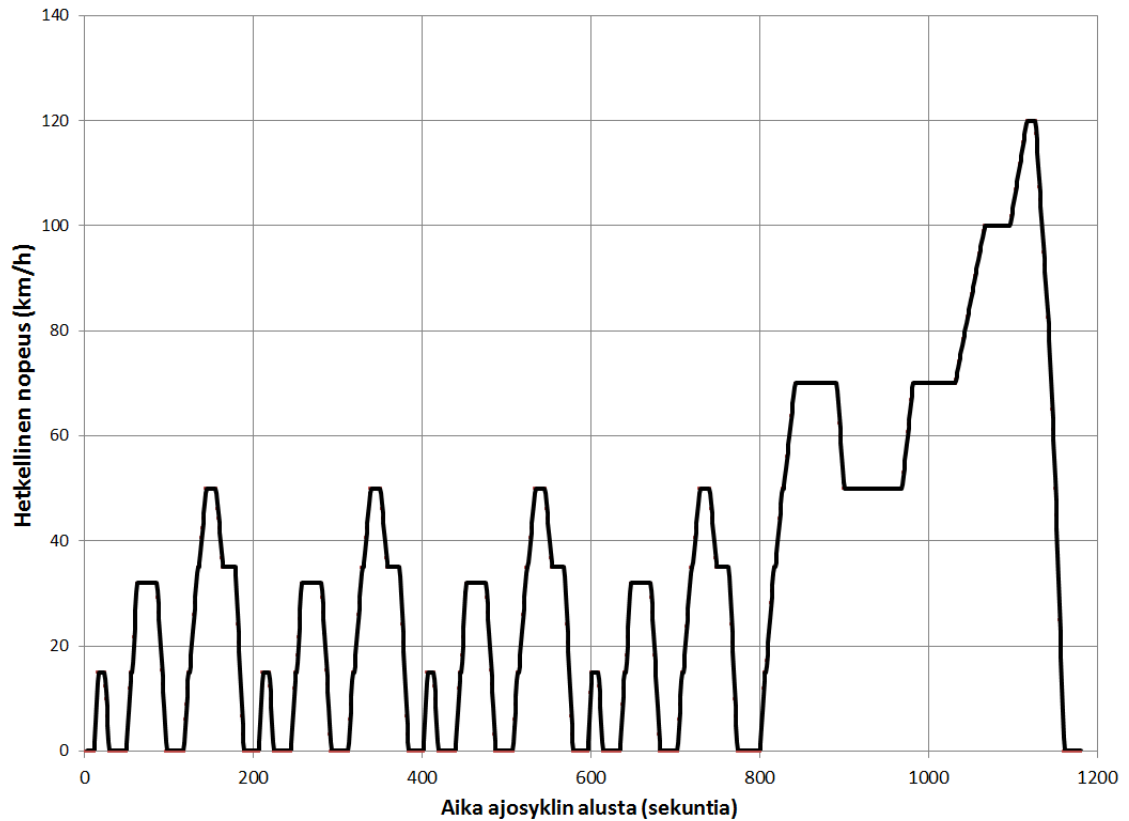
jossa
 ρ on ilmantiheys (@ 20 °C, 100 kPa),
 v_i ajoneuvon keskimääräinen nopeus tarkasteluvälillä,
 c_w ajoneuvon korinmuodoista määräytyvä virtausvastuskerroin ja
 A on ajoneuvon otsapinta-ala (m²).

Ajoneuvon kiihdytysvastusten voittamiseksi tehtävän työn määrä puolestaan on määritettävissä yhtälön (3.23) mukaisesti

$$W_a = \sum m a \Delta s_i, \quad (3.23)$$

jossa a on ajoneuvon syklinsuorituksen aikainen massa.

Kiihdytysvastusten laskennan osalta on syytä huomata, että summauslaskennassa lasketaan mukaan vain positiiviset tiehen tehtävät hetkelliset työt. Jarrutusten aikaisia negatiivisia pyörätyön arvoja ei siis lasketa mukaan, koska näiden mukaan ottaminen kuvaisi ideaalihybridin pyörätyön vähimmäismäärää. Laskennan käytetty NEDC-syklin nopeusprofiilin aikasarja kehitettiin ajoneuvojen tyyppihyväksyntää koskevan säädöksen (UN / ECE, No 83) mukaisten aikasarjatietojen pohjalta ja profiili on aika-nopeus-akseleilla kuvattuna kuvan (Kuva 3.4 NEDC-ajosyklin aika-nopeus-profiili) muotoinen.



Kuva 3.4 NEDC-ajosyklin aika-nopeus-profili

Ladattavan Prius-hybridin energiankäytön arvot skaalattiin vastaamaan JEC-raportin referenssiauton korimalli. Tämä tapahtui siten, että todellisen Priuksen energiankulutuksen arvot kerrottiin suhdeluvulla, joka indikoi, kuinka paljon ladattavan Priuksen energiankulutus muuttuisi jos autoon vaihdettaisiin referenssiauton kori. Priuksen bensiini- sekä sähköenergian kulutusten arvojen skaalaus tapahtui molemmille erikseen yhtälön 3.24 mukaisella laskentatavalla.

$$e_{\text{Prius,mod}} = e_{\text{Prius}} \frac{W_{\text{m,Prius,mod}}}{W_{\text{m,Prius}}} \quad (3.24)$$

Tässä $W_{\text{m,Prius,mod}}$ on referenssiauton koriparametreille modifioitu ladattavan Priuksen laskennallisen mekaanisen pyörätyön tarve NEDC-ajosyklillä. $W_{\text{m,Prius}}$ on puolestaan ladattavan Priuksen alkuperäisillä koriparametreilla laskettu mekaanisen pyörätyön tarve vastaavalla ajosyklillä. e_{Prius} indikoi ladattavan Priuksen bensiinin tai sähköenergian kulutusta. Modifioidut arvot laskettiin molemmille energialajeille erikseen. Tällä menetelmällä modifioituna ladattavan Priuksen lähtöarvot saatiin vertailukelpoisiksi mallin syötetiedoiksi. Näin menetellen mallin antamat tulokset ovat myös ladattavan hybridin osalta vertailukelpoisia muiden voimalinjaratkaisuiden kanssa.

Yhtälön 3.20 mukaista laskentatapaa on hyödynnetty mallinnuksen muiden henkilöautojen laskennassa siltä osin, kuin se oli primäärienergiahyötysuhteiden määrittä-

miseksi tarpeen. Kullekin henkilöautolle laskettiin mekaanisen pyörätyön määrä NEDC-ajosyklillä ja primäärienergiähyötysuhde on määritetty yhtälön (3.25) mukaisella tavalla ajoneuvon tekemän fyysisen pyörätyön ja primäärienergiankäytön arvon suhteena.

$$\eta_{prim} = \frac{W_m}{E_p} \quad (3.25)$$

Edellä W_m on mekaanisen pyörätyön määrä (MJ/km) ja E_p vastaavan ajosuorituksen vaatima primäärienergian määrä (MJ/km).

Kaupunkibussien energiakäytön arvot on otettu luonnonkaasuhybridin lukuun ottamatta suoraan FCH JU:n (2012) julkaisemasta tutkimusraportista ja edustavat tutkimuksessa esitettyä arvioita vuoden 2030 voimalinjatekniikasta. Mainitussa raportissa ei ollut mukana luonnonkaasuhybridivoimalinjaa. Tästä syystä malliin sisällytetyn luonnonkaasuhybridin energiankulutuksen arvot on skaalattu luonnonkaasukäyttöisen bussin lähtötiedoista yhtälön 3.26 mukaisella menettelyllä

$$e_{TtW,CNG-hybrid} = e_{TtW,CNG-ICE} \frac{e_{TtW,diesel-hybrid}}{e_{TtW,diesel-ICE}} \quad (3.26)$$

Yllä esitettyssä yhtälössä (3.26) $e_{TtW,CNG-hybrid}$ on laskennallinen luonnonkaasukäyttöisen hybridibussin energiankulutus (MJ/km). $e_{TtW,CNG-ICE}$ lähtötietojen mukainen tavallisen luonnonkaasubussin energiankulutus. $e_{TtW,diesel-hybrid}$ lähtötietojen mukainen diesel-sarjahybridibussin energiankulutus ja $e_{TtW,diesel-ICE}$ lähtötietojen mukainen tavallisen dieselbussin energiankulutus.

3.6 Mallinnuksen yksinkertaistuksista

Tämän työn energiaketjujen mallinnus on toteutettu siten, että valittavina sähköntuotannon tapoina on ainoastaan lauhdevoimaa edustavia voimalaitostyyppisiä ja CHP-laitoksia ei ole sisällytetty malliin. CHP:llä tuotetun sähkövoiman osuus oli Suomessa vuonna 2011 noin 37 % (Tilastokeskus, 2012), ja niin ollen CHP-laitokset edustavat varsin merkittävää osaa suomalaisesta sähköntuotantokapasiteetista. Sähköntuotannon hyötysuhteet ovat tyypillisesti erilaisia CHP- ja erillistuotantoa edustavissa voimalaitoksissa ja yksittäisenkin CHP-laitoksen sähköntuotannon hyötysuhde vaihtelee voimalaitoksen ajotavan sekä kaukolämpöverkon kuormituksen mukaan (Sohlman, 2013). Pelkkien lauhdelaitosten sisällyttäminen on perusteltavissa sillä, että mallin tulosten yleiskelpoisuus (skaalautuvuus) olisi kärsinyt CHP-laitosten sisällyttämisestä malliin.

Kaikki sähköntuotannon lähtöarvot ovat lähtöisin JEC-raportista (2011f) ja malliin on sisällytetty esimerkiksi lauhdekaasuturbiinikombivoimalaitos (lauhde-GTCC), jollaisia ei ole Suomessa. Lähteestä saatu GTCC-lauhdevoimalaitoksen lähtöarvo ($\eta_e = 55\%$) vastaa Vuosaaren GTCC-CHP-voimalaitoksen kesäajotilannetta, jolloin kaukolämpökuorma on alhainen ja voimalaitoksen höyrypiirin lauhdutus hoidetaan meri-

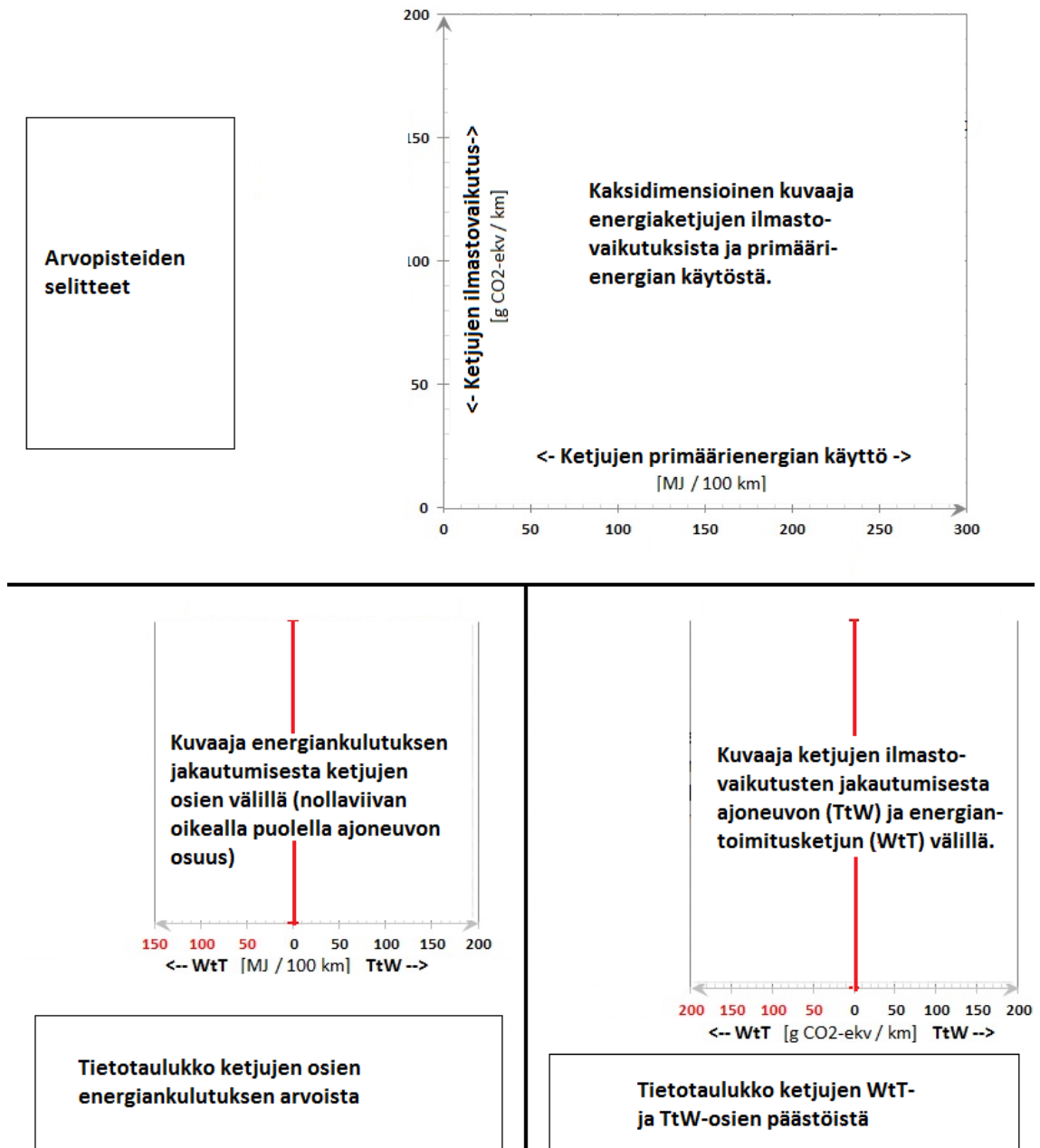
vesilauhduttimella. Kylmempinä vuodenaikoina, kun GTCC-CHP-laitosta käytetään ja laitoksella tuotetaan myös kaukolämpöä, sähköntuotannon hyötysuhde laskee noin 5 prosenttiyksiköllä arvoon $\eta_e \approx 50\%$. (Sohlman, 2013.) Näin ollen JEC-raportista saatu lauhde-GTCC-voimalaitoksen energian käytön arvo voisi toteutua myös Suomessa. Viime vuosina GTCC-CHP-laitoksia ei ole tietävästi ajettu lauhdeajolla (pelkkä sähköntuotanto) verrattain alhaisesta sähkön markkinahinnasta johtuen.

Mallinnuksessa tarkasteltujen henkilöautojen energiankulutuksen arvot ovat käyviä ainoastaan laboratorio-olosuhteita vastaavissa olosuhteissa. Tästä esimerkkinä mainittakoon, että kun henkilöautojen energiankulutus määritetään NEDC-ajosyklillä, ympäristön referenssilämpötilana pidetään 20 Celsius-astetta (UN/ECE NO 83, 2006), jollaisia lämpötiloja koetaan Suomessa joskus kesäaikaan. Todelliset ajo-olosuhteet poikkeavat laboratorio-olosuhteista erityisesti talviaikaan, josta seuraa että todelliset energiankulutuksen arvot voivat poiketa kylmempinä vuodenaikoina mallin antamista arvoista merkittävästi. Ajomukavuus saattaa vaatia energiatehokkaampien voimalinjojen tapauksissa auton sisätilojen lämmitystä lisälämmityslaitteistolla. Lisälämmityslaitteiston energiankulutus saattaa heikentää oleellisesti muuten energiatehokkaan ajoneuvon energiatehokkuutta.

3.7 Skenaariotarkasteluista

Tämän työn energiaketjujen primäärienergia- ja ilmastotarkastelut tehtiin henkilöautojen ja kaupunkibussien tapauksessa kolmella erilaisella skenaariotarkastelulla, joissa kussakin käytettävä primäärienergia valikoima vakioitiin vastaamaan jotakin tiettyä primäärienergiaryhmää tai lajia. Tällä menetelmällä oli tarkoituksena selvittää, millaisella energiaketjulla primäärienergia olisi mahdollista muuntaa mahdollisimman tehokkaasti ja pienin ilmastovaikutuksin liikennesuoritteiksi.

Kaikkien skenaariotarkasteluiden tulokset esitetään kolmiosaisella kuvaajaryhmällä, joista selviää eri ketjujen kokonaisenergiankäyttö (primäärienergiankäyttö) sekä kokonaisilmastovaikutukset ja lisäksi energiankäytön ja ilmastovaikutukset tarkemmin eri ketjun osille jaoteltuna. Tässä esitystavassa mukaillaan JEC-raportin tulosten esitystapaa, erityisesti kaksidimensioisen kuvaajan osalta.



Kuva 3.5 Energiaketjujen tulostulokkuvaajarakenteen esittely.

Tässä rakenteessa (Kuva 3.5) ylimmäisestä kuvaajasta selviää energiaketjujen kokonaisenergiankäytön arvot (primäärienergian käyttö) sekä kokonaisilmastovaikutukset. Alemmista kuvaajista puolestaan selviää eri ketjujen energiankäytön sekä ilmastovaikutusten jakauma ketjujen eri osissa. Ajoneuvon energiankäyttö ja ilmastovaikutukset esitetään näiden kuvaajien nollaviivan oikealla puolella. Energiaketjujen muiden osien arvot esitetään puolestaan kuvaajien nollaviivan vasemmalla puolella. Ilmastovaikutusten erittely on esitetty tarkkuudella WtT ja TtW. Energiankäytön arvot on jaoteltu yksityiskohtaisemmin ketjun eri osille.

Eri skenaarioiden eriävät primäärienergiatyypit ja -lajit mahdollistavat erityyppisiä energiaketjuja konversioprosesseineen. Tämän työn skenaariotarkasteluissa vakioitiin mahdollisimman paljon mallinnusparametreja, jotta tosielämää vastaavien mahdol-

listen valintojen vaikutus kokonaisenergiankulutukseen ja ilmastovaikutuksiin selviäisi. Tästä syystä seuraavissa alaluvuissa kuvataan lyhyesti kunkin skenaariotarkastelun keskeisimmät vakioinnit, kuten sähköntuotantotavan ja energiansiirtoprosesseja koskevat valinnat.

3.7.1 Hiilipitoiset fossiiliset primäärienergiat – skenaario

Tässä skenaariotarkastelussa primäärienergiavalikoima rajattiin siten, että käytettävissä oli ainoastaan konventionaalisia hiilipitoisia primäärienergianlähteitä kuten raakaöljy, kivihiili ja maakaasu. Sähköntuotantotavaksi vakioitiin konventionaalinen kivihiililauhdevoimalaitos. Vedyntuotantotavaksi vakioitiin keskitetty höyryreformointi (keskitetty *SMR*) ja vedynsiirtomenetelmäksi vakioitiin putkisiirto. Keskitetyn tuotannon prosesseina on ainoastaan konventionaalisia prosesseja eikä esimerkiksi hiilidioksidin talteenotolla varustettuja prosesseja. Keskitetyn tuotantolaitoksen ja jakeluaseman välinen siirtoetäisyys vakioitiin kaikkien energiaketjujen tapauksessa 300 kilometriin. Primäärienergianhankinnan arvot vastaavat JEC-raportin mukaisia eurooppalaisia keskimääräisiä arvoja (JEC, 2011a), mutta maakaasun osalta käytettiin Suomeen tuotavan maakaasun arvoja, jotka on johdettu Ruonakosken (2011) raportista. Tämän skenaarion primäärienergianhankintaprosessit vastaavat likimain suomalaista energianhankinnan nykytilaa.

3.7.2 Luonnonkaasuskenaario

Luonnonkaasuskenaariossa primäärienergianlähteeksi vakioitiin maakaasu ja sähköntuotantotavaksi maakaasukäyttöinen GTCC-lauhdevoimalaitos (*Gas-Turbine-Combined-Cycle*). Dieselin valmistusprosessiksi vakioitiin GTL-prosessi (*Gas-to-Liquid*) ilman CCS:ää. Vedyn tuotantoprosessiksi puolestaan vakioitiin keskitetty *SMR*, joka vastaa tilannetta jossa vetyä tuotetaan suuria määriä. Myös tässä skenaariotarkastelussa keskitetyn tuotantolaitoksen ja jakeluaseman välinen siirtoetäisyys vakioitiin 300 kilometriin.

Biokaasun muuntaminen vedyksi ei tuo suoraa päästövähennystä ajosuoritetta kohden RES-direktiivin laskentamenetelmällä esimerkiksi suoraan polttomoottorikäyttöön nähden, koska biokaasun ilmastovaikutukset ovat jo valmiiksi lähes nollassa. Tässä työssä ei mallinneta erikseen biokaasuun perustuvia energiaketjuja, mutta todetaan että eri maakaasuketjujen keskinäiset energiatehokkuusjärjestykset ovat voimassa myös siinä tapauksessa että luonnonkaasu tuotetaan biomassasta.

3.7.3 Uusiutuva sähkövoima - skenaario

Tässä skenaariotarkastelussa primäärienergiaksi valittiin tuulisähkö vielä siten, että tuulisähkö tuotettiin kaikissa energiaketjuissa 800 kilometrin päässä keskitetystä tuotantolaitoksesta tai siihen verrattavasta maantieteellisestä sijainnista. Tämän lisäksi keskitetyn tuotantolaitoksen ja jakeluaseman välinen siirtoetäisyys vakioitiin kaikkien energiaketjujen tapauksessa 300 kilometriin.

Tässä skenaariotarkastelussa mukana on kaksi erilaista sähköajoneuvon energia-ketjua sekä henkilöautotarkastelussa että kaupunkibussitarkastelussa. Ensiksi mainitussa sähköajoneuvon energiaketjuissa sähköenergia tuodaan latauspisteelle tai johdinsähköjärjestelmään tuulivoimapuistosta ilman energialajien välisiä konversioita. Energiansiirto tapahtuu tässä tapauksessa ensin 800 kilometriä pitkän korkeajännitteisen tasavirtasiirtoyhteyden (HVDC) yli ja sitten mantereella 300 kilometriä korkeajännitteisen vaihtovirtasiirtoyhteyden (HVAC) yli. Tämän jälkeen sähköenergia käy lävitse alue- ja jakeluverkon, ennen kuin se jaellaan latauspisteille tai ajojohdinjärjestelmään.

Toisessa sähköajoneuvoketjussa tuulisähkö muunnetaan vedyksi off-shore-elektrolyysillä ja vety siirretään mantereelle putkisiirrolla 800 kilometriä. Mantereella vety muunnetaan sähköenergiaksi vetykäyttöisellä GTCC-lauhdevoimalaitoksella. Tämän jälkeen sähköenergia siirretään 300 kilometriä latauspisteelle vaihtovirtasiirtoyhteydellä ja jaellaan alue- ja jakeluverkon kautta latauspisteelle tai ajojohdinjärjestelmään.

Polttokennoajoneuvojen ketjuissa elektrolyysilaitteistot on sijoitettu kolmella eri tavalla; jakeluasemalle, keskitettyyn tuotantolaitokseen ja kolmannessa ketjussa tuulivoimapuiston yhteyteen. Näistä ensiksi mainitussa ketjussa energiansiirto tapahtuu ensin 800 kilometriä HVDC-yhteydellä ja sitten mantereella 300 kilometriä HVAC-yhteydellä. Tämän jälkeen sähköenergia jaellaan alue- ja jakeluverkkojen kautta jakeluasemalle, jossa siitä tuotetaan vetyä hajautetulla elektrolyysituotannolla.

Toiseksi mainitussa vetyketjussa vedyntuotanto tapahtuu keskitetyssä tuotantolaitoksessa johon sähköenergia siirretään 800 kilometrin HVDC-yhteyden yli. Tämän jälkeen vety siirretään putkisiirrolla 300 kilometriä jakeluasemalle.

Viimeksi mainitussa vetyketjussa vedyntuotanto tapahtuu off-shore-elektrolyysillä tuulivoimapuiston yhteydessä. Näin tuotettu vety siirretään mantereelle 800 kilometrin putkisiirrolla ja mantereella vielä 300 kilometrin putkisiirrolla jakeluasemalle. Kaikkien tämän tarkastelun ketjujen energiansiirtoetäisyys on yhteensä 1100 kilometriä. Kaikkien ketjujen primäärienergianhankinta ja lopputuote pidetään vakioina ja vain energiantoimitusketjujen toteutustavoissa on eroja.

4 KATSAUS POLIITTISIIN OHJAUSTOIMIIN JA HANKKEISIIN

Niin kutsuttujen uusien puhtaan energian teknologioiden kehittämistoimet ovat IEA:n mukaan usein huomattavasti pääomaintensiivisempiä kuin muiden teknologioiden kehityshankkeet. Tällaiset kehityshankkeet vaativat usein panostusta pitkän aikavälin tutkimus- ja kehitystyöhön ja varmuutta investoinnin takaisinmaksukyvyistä tai tuottoasteesta on vaikeaa taata (IEA, 2012, s. 111). IEA arveleekin, että vedyn liikennekäyttöön liittyvän teknologian yleistyminen ei tapahdu nopeasti kaupallistumisen kautta ilman voimakkaita poliittisia ohjaustoimia, julkista rahoitusta ja niin sanottua yritysriskinjakoa (IEA, 2012, s. 129). Lisäksi, koska vetypolttoaineen kysyntää ei ole valmiiksi, vedyn valmistus- ja jakeluinfrastruktuuriin investoimista ei nähdä houkuttelevaksi vielä lähitulevaisuudessa pelkästään taloudellisin perustein. (IEA, 2009, s.29, s. 95–96, s. 151–152.)

Poliittisten ohjaustoimien mahdollinen vaikuttavuus on arvioitavissa esimerkiksi henkilö- ja pakettiautoille määrättyssä CO₂-päästöjen mukaan määräytyvässä hankintaverossa (autovero). Tämä vero ohjaa kuluttajia ostamaan vähäpäästöisempiä autoja (Finlex, 2012a). Tähän tähtää myös uudistunut henkilö-, paketti- ja matkailuajoneuvoja koskeva ajoneuvoveron päiväkohtainen perusosuus (perusvero). Perusvero määräytyy kullekin ajoneuvolle autonvalmistajan ilmoittaman CO₂-päästön mukaan. Perusvero ei vapauta päästöttömiä (sähkö- ja vetyautoja) kokonaan verotuksesta, mutta antaa näille huomattavan verotuksellisen edun konventionaalisiin ajoneuvoihin nähden. (Finlex, 2012b.)

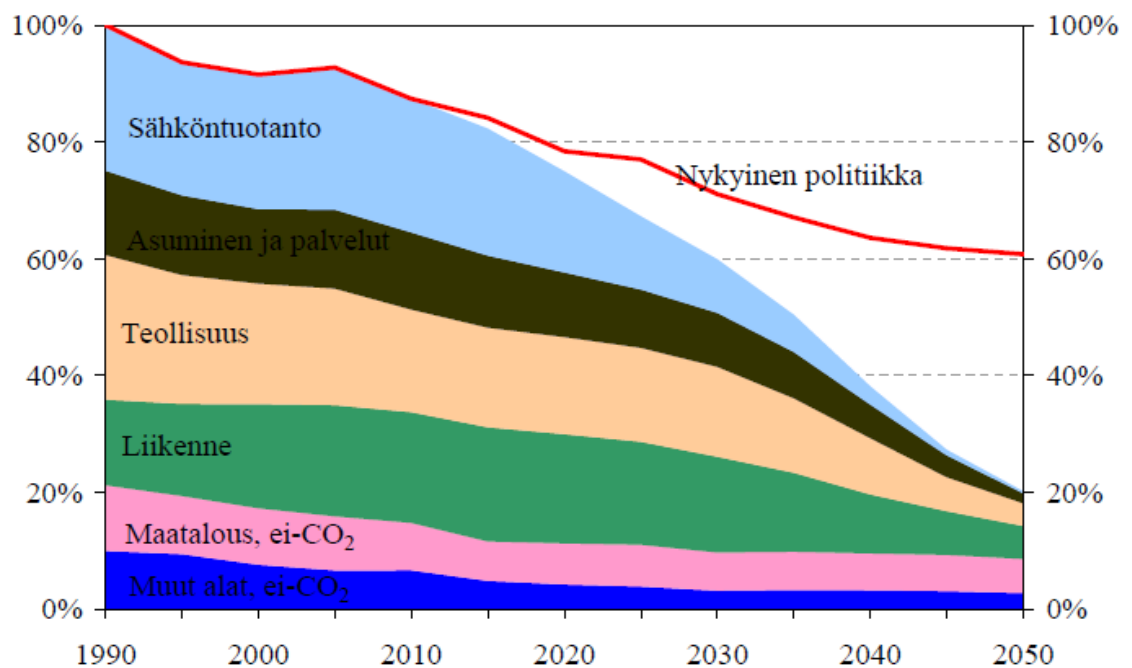
4.1 Poliittiset ohjaustoimet ja hankkeet Euroopan Unionissa

Eurooppalaisittain vedyn liikennekäyttöön voivat vaikuttaa esimerkiksi Euroopan unionin direktiivit ja asetukset, jotka saavat lainvoiman kansallisiin lainsäädäntöihin vietyinä. Esimerkiksi vuonna 2012 voimaan astunut direktiivi velvoittaa jäsenmaita vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä viidenneksellä vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020. Lisäksi sama direktiivi velvoittaa jäsenmaita täyttämään vähintään viidenneksen energianhankinnastaan uusiutuvilla energianlähteillä. (EC, 2010.) Euroopan unioni näkee energiatehokkuuden kehittämisen keinona vähentää riippuvuutta unionin ulkopuolelta tuotavasta energiasta ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY (RES-direktiivi) asettaa EU:n jäsenmaille veloitteen uusiutuvan energian käytöstä liikenteessä. Direktiivillä

asetettu velvoite vaatii kutakin jäsenmaata lisäämään uusiutuvien energianlähteiden osuuden liikennepolttoaineissa vähintään 10 prosenttiin vuoteen 2020 mennessä. (EY, 2009b.) Direktiivin velvoitteeseen vastatakseen, Suomen eduskunta on säätänyt lain (30.12.2010/1420), jonka mukaisella jakelovelvoitteella pyritään täyttämään ja ylittämään direktiivin asettama vaatimus uusiutuvan liikennepolttoaineen osuudesta. Tämä laki määrittää liikennepolttonesteiden jakelijoille velvoitteen, että vuonna 2020 jaeltavan liikennepolttonesteen vuotuisesta energiasisällöstä vähintään 20 % on oltava peräisin biomassasta. Laki velvoittaa jakelijoita lisäämään biokomponenttia jo mainittua aiemmin, mutta pienempinä määrinä. RES-direktiivi antaisi mahdollisuuden käsittää esimerkiksi tuulivoimalla tuotetun elektrolyysivedyn uusiutuvaksi liikennepolttoaineeksi, mutta suomalainen lainsäädäntö pyrkii edistämään nimenomaan biopohjaisten liikennepolttoaineiden käyttöä. Mainittu laki asettaa jakelovelvoitteen vain nestemäisten liikennepolttoaineiden jakelijoille, mutta ei kaasumaisten polttoaineiden jakelijoille kuten Gasumille. (Finlex, 2013)

Eurooppa-neuvosto (EN, 2011) ja Euroopan komissio (KOM, 2011a) ovat vahvistaneet, että Euroopan kasvihuonekaasupäästöjen kokonaisvähennystavoite on 80 – 95 % vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasoon nähden (Kuva 4.1).



Kuva 4.1 Euroopan komission asettama tavoite kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä vuodelle 2050. (KOM, 2011a)

Komission asettama päästövähennämätavoite on niin merkittävä, että sitä on käytännössä mahdotonta saavuttaa ilman suuria energiansäästöjä ja ilman uusiutuvien energianmuotojen laajaa käyttöönottoa. Näistä seuraten erilaisten energiankäytön ja -tuotannon teknologioiden on kehityttävä vastaamaan tulevaisuuden kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoitteisiin. Lisäksi Euroopan unioni ei halua rajoittaa liikennesuo-

ritteita ja vaan pikemminkin odottaa liikennesuoritteiden lisääntyvän. Tästä seuraa että myös liikenteen energiahuollon teknologioiden on kehityttävä nykyisestä.

Euroopan Unionin direktiivi 2009/33/EY puhtaiden ja energiatehokkaiden tieliikenteen moottoriajoneuvojen edistämisestä velvoittaa julkisia palvelunhankkijoita huomioimaan ostoliikennepalveluiden elinkaaren aikaiset energiankulutus- ja ympäristövaikutukset. Tämä on toteutettava direktiivin mukaan siten, että ajoneuvon laskennallisen elinkaaren aikaiselle energiankulutukselle ja päästövaikutuksille lasketaan rahallinen arvo ohjeen mukaan. Näin ollen energiatehokkaampi ja ympäristöystävällinen ajoneuvo saa kilpailuetua kilpailutusmenettelyssä. Mainittu direktiivi ohjaa kilpailutuslainsäädännön piirissä tapahtuvia hankintoja ja tämän tarkoituksena on edistävää energiatehokkaiden ja ympäristöystävällisempien tieliikenneajoneuvojen kysyntää. (EY, 2009a.)

Euroopan komission antaman puhtaiden ja energiatehokkaiden ajoneuvojen strategian [KOM(2010)186 lopullinen] ohjaa direktiivien valmistelua siten, että näillä edistettäisiin vähäpäästöistä ja energiatehokasta tieliikenteen teknologian kehittymistä. EU:n ”Eurooppalainen vihreiden ajoneuvojen hanke” (*European Green Cars Initiative*) rahoittaa strategian mukaisesti tieliikenteen sähköistämistä koskevaa tutkimus- ja demonstraatiohankkeita. Polttokenno- ja vetyteknologian yhteishanke (*Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking, FCH-JU*) puolestaan tukee vetypolttokennoajoneuvojen ja infrastruktuurin tutkimus- ja kehitystyötä. Strategian mukaan EU-komissio myös tarkkailee yllä mainitun direktiivin 2009/33/EY täytäntöönpanoa ja pyrkii muutenkin edistämään puhtaan ja energiatehokkaan tieliikennejärjestelmän luomista Euroopan Unionin alueella ja vähentämään tieliikenteen ympäristövaikutuksia erilaisin poliittisin ohjaus-toimin. Komissio edistää strategian toteuttamista aktiivisesti myös käynnistämänsä CARS 21-työryhmän avulla, joka analysoi puhtaan ajoneuvoteknologian yleistymisen esteitä. Työryhmä myös valmistelee toimenpide-ehdotuksia komissiolle, joilla komissio voi parantaa eurooppalaisen autoteollisuuden kilpailukykyä ja kestävän kasvun edellytyksiä (CARS 21, 2012). (KOM, 2010.)

Eurooppalainen vihreiden ajoneuvojen hanke (*European Green Cars Initiative*) on eräs Euroopan talouden elvyttämisohjelman julkisen ja yksityisten sektoreiden yhteishankkeista. Hankkeita julkistettiin useampia vuoden 2008 loppupuolella Euroopan komission puheenjohtajan toimesta. Mainitun hankkeen osatavoitteena on edistää olennaista infrastruktuuri- ja teknologiakehitystä, joka on välttämätöntä puhtaan ja energiatehokkaan tieliikenteen energiahuollon aikaansaamiseksi. Hanke rahoittaa tavoitteita edistäviä tutkimus- ja kehityshankkeita Euroopan komission, teollisuuden ja jäsenvaltioiden yhteisrahoitusohjelmien kautta. Tämän lisäksi hanke voi myöntää investointilainaa tavoitteita edistäville t&k-hankkeille myös Euroopan investointipankin kautta erilaisin rahoitusvälineillä. (European Green Cars Initiative, 2012.)

Polttokenno- ja vetyteknologian yhteisyritys (*Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking, FCH-JU, FCH-JU*) perustettiin Euroopan neuvoston päätöksellä (EY) N:o 521/2008 määräajaksi (vuoden 2017 loppuun saakka). Tämän tarkoituksena on edistää ja jouduttaa vety- ja polttokennoteknologioiden kehittymistä Euroopan Unionin alueella sekä elvyttää talouskehitystä. Yrityksessä on osallisina alan teollisuutta ja tutkimusor-

ganisaatioita sekä julkisia tahoja (EN, 2008.). Näistä kukin pyrkii toimimaan mainitun päämäärän edistämiseksi keskinäisellä kommunikoinnillaan sekä tutkimus- ja kehitystyön osittamisella siten. Näin menetellen on tarkoitus välttää päällekkäistä tutkimusta ja kohdistaa t&k-resursseja tehokkaammin. FCH-JU edistää vety- ja polttonnoalan tutkimus- ja kehitystyötä rahoittamalla lukuisia vedyn paikallis- ja liikennekäytön vaatimien teknologioiden kehittymistä edistäviä tutkimushankkeita. Tämän lisäksi FCH-JU myös tukee alaan liittyvän koulutusta. (FCH-JU, 2011; FCH-JU, 2012)

Perusajatuksena tällaisessa julkis-kaupallisessa tai julkis-yksityisessä yhteisyri-tyksessä (*PPP, Public-Private Partnership*) on, että julkinen rahoittaja osallistuu vain hankkeisiin joihin myös kaupalliset tahot ovat valmiita osallistumaan. Julkinen rahoittaja toimii riskin- ja vastuunjakajana ja näin ollen olettaa tukevansa aitoa liiketoimintapotentiaalin omaavien teknologioiden kehittämistä. Julkis-kaupalliset yhteisyrietykset ovat tyypillisesti pitkäkestoisia ja on yleistä että näiden tutkimus- ja kehittämis-, sekä demonstroitihankkeiden rahoitus- ja rahoitusjakopäätökset tehdään hankekohtaisesti. (Apak et al., 2012.)

Euroopan komission valkoinen kirja [*”Yhtenäistä Euroopan liikennealuetta koskeva etenemissuunnitelma – Kohti kilpailukykyistä ja resurssitehokasta liikennejärjestelmää”* KOM(2011) 144 lopullinen] koskee liikennesektorin energiatehokkuus- ja ilmastovaikutuksia. Tässä julkaisussa on mainittu useita konkreettisia lisätoimenpide-ehdotuksia liikennesektorin energiasäästö- ja ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi sekä muutoinkin tieliikennejärjestelmän kehittämiseksi. Eräänä toimenpide-ehdotuksena mainittakoon että *tavanomaisten polttomoottoriajoneuvojen (ei koske hybridejä) määrä puolitettaisiin kaupunkiliikenteessä vuoteen 2030 mennessä ja poistettaisiin kaupungeista kokonaan vuoteen 2050 mennessä ja korvattaisiin puhtaammilla ajoneuvoilla ja liikkumismuodoilla*. Lisäksi valkoisen kirjan aloitteessa 26 ehdotetaan kaikille liikenteen muodoille erityisiä hiilidioksidipäästönormeja ja mahdollisesti myös energiatehokkuusvaatimuksia sekä uutta tarkennettua ajosykliä todellisten päästöjen määrittämiseksi. (KOM, 2011b.)

Euroopan komissio aikoo suunnitella edellä esitettyjen tavoitteiden saavuttamiseksi liikennealalle erityisen innovaatio- ja käyttöönottostrategian. Tämän tarkoituksena olisi ohjata myöhemmin tehtäviä poliittisia ohjaustoimia siten, että näillä edistettäisiin puhtaampien ja turvallisempien liikennejärjestelmien tutkimus- ja kehitystyötä sekä käyttöönottoa. Tähän liittyen komissio aikoo myös valmistella lisää tarkoituksenmukaisia ja mainittuja tavoitteita edistäviä hallinto- ja rahoitusvälineitä. (KOM, 2011b.) Direktiiviksi hyväksyttynä mainitussa valkoisessa kirjassa esitetyt aloitteet tulisivat ohjaamaan myös liikennesektorin energiankäyttäjää tiukempaan päästö- ja energiankäytönvähennyskuuriin.

Euroopan komissio (KOM, 2012) on antanut autoteollisuuden tulevaisuutta käsittelevässä tiedonannossaan vahvan viestin, että aikoo edistää omilla toimillaan vaihtoehtoisten tieliikennepolttoaineiden käytön yleistymistä. Näin toimien komissio pyrkii osaltaan tukemaan Eurooppalaista autoteollisuutta. Komissio lupasi valmistella direktiiviehdotuksen vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden jakeluinfratruktuurin rakentamis-

velvoitteesta ja näitä koskevista standardeista. Komissio kehottaa myös muita Euroopan päätöksentekuelimiä edistämään vaihtoehtoisten liikenteenpolttoaineiden käyttöönottoa sekä yleistymistä ja toimimaan muutenkin autoteollisuuden toimintaedellytysten puolesta.

Direktiiviehdotus (COM(2013) 18 /2) ehdottaa hyväksyttäväksi, että kuhunkin jäsenmaahan olisi perustettava jakeluinfrastruktuuri vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden jakelemiseksi. Tämä direktiiviehdotus on seurausta edellä esitetystä poliittisen tahdon ilmauksesta. Direktiiviehdotuksessa mainitaan vedyn lisäksi myös useita muita vaihtoehtoisia liikenteen energiahuollon ratkaisuja. Direktiiviehdotus koskee esimerkiksi akkusähköautojen latauspisteverkoston rakentamista. Direktiiviehdotuksen tekstin mukaan vetytankkausasemaverkostoa olisi rakennettava kussakin jäsenmaassa vähintään 300 kilometrin välein vuoteen 2020 mennessä. Tällainen jakeluasemaverkosto mahdollistaisi vedyn liikennekäytön aloittamisen myös Suomessa. Direktiiviehdotus ottaa kantaa myös vedynjakeluasemien tekniseen spesifikaatioon. Direktiiviehdotuksessa mainitaan, että jakeluasemien toteutuksessa ja jaeltavan vedyn puhtausvaatimuksissa tulisi nojautua eurooppalaisiin standardeihin, jotka valmistellaan vuoden 2014 loppuun mennessä. Siihen asti tulisi toimia vastaavien ISO-standardien mukaisesti. (COM, 2013.)

Tässä luvussa esitetyt poliittiset ohjaustoimet jäävät vaikutuksiltaan jälkikäteen arvioitaviksi. On kuitenkin selvää, että ainoastaan energiatehokkuuden lisääminen ja uuden sukupolven teknologioiden yleistymisen voi mahdollistaa mainittujen päästövähennä- ja energiansäästötavoitteiden saavuttamisen. Jos edellä mainittu direktiiviehdotus (COM(2013) 18 /2) hyväksytään direktiiviksi, niin unionin jäsenmaiden on rakennettava huomattava määrä uutta teknologiaa edustavaa liikenteen energiahuollon infrastruktuuria vuoteen 2020 mennessä.

Eräänä tavoitteena oleva uusiutuvien energianmuotojen käytön lisääminen vaatii perinteisistä poikkeavia energianhankintatapoja ja mahdollisesti myös poikkeavia käytötapoja. Mikäli komission valkoinen kirja [(KOM(2011) 144 lopullinen] saatetaan direktiiviksi sellaisenaan, tavallisten polttomoottoriautojen määrä vähentyy näkyvissä määrin huomattavan nopeasti. Polttomoottoriajoneuvoja koskevat kannanvähennystavoitteet on saavutettavissa joko autokannan pienentämisellä tai huomattavan nopealla uuden sukupolven ajoneuvotekniikan yleistymisellä.

4.2 Valtioiden poliittiset ohjaustoimet ja hankkeet

Saksassa sikäläiset ministeriöt Talous- ja teknologiaministeriö (*BMWi*), Ympäristö ja ydinturvallisuusministeriö (*BMU*), koulutus- ja tutkimusministeriö (*BMBF*) ovat käynnistäneet kesällä 2012 yhdessä yli 60 eri tutkimushanketta energianvarastointiteknologioiden kehittämiseksi. Tutkimushankkeiden on määrä kehittää energiavarastoteknologioita teknisesti sekä teknis-taloudellisesti. Tätä päämäärää tavoitellaan yhdessä yritysten ja tutkimusyhteistyötahojen sekä korkeakoulujen kanssa. Lisätavoitteena on turvata osaamis pääoman riittävyys rahoittamalla nuorten energiavarastotutkijoiden

ryhmiä yliopistoissa. Tutkimuspaketin suurimmaksi tekniseksi haasteeksi mainitaan vedyn elektrolyysivalmistuksen konversiohyötysuhteen parantaminen. Eräänä suuntauksena tutkimuspaketissa on niin sähköverkon tasapainottaminen niin kutsutulla *tuulisähköstä kaasua*-menetelmällä, jossa sähköenergian ylituotantoa tasapainotetaan verkkoon kytketyllä vedyn valmistuskapasiteetilla. Tuotettu vety olisi mahdollista jatkojalostaa metaaniksi, mikäli tarpeelliseksi nähdään. Toisena tutkimuksen suuntauksena on mainittu paikallisverkkotason energianvarastointi akkutekniikalla. Näiden lisäksi ministeriöiden tutkimusrahoituspaketti sisältää myös muihin energiaratkaisuihin liittyvien tutkimushankkeiden rahoitusta. (BMU, 2012a; BMU, 2012b.)

Saksan liikenne, rakennus ja kaupunkikehityksen ministeriö (*BMVBS*) on perustanut, yhdessä muiden ministeriöiden kanssa määräaikaisen innovaatio-ohjelman (*the National Hydrogen and Fuel Cell Technology Innovation Programme, NIP*). Tämän innovaatio-ohjelman tehtävänä on edistää vety- ja polttokennoalan tutkimusta Saksassa. Ohjelmalla toteutetaan Saksan korkean teknologian strategiaa ja valtio rahoittaa NIP-ohjelman kautta tutkimus- ja kehitys- sekä demonstraatiohankkeita. NIP-ohjelman hallinnoinnista ja koordinoinnista vastaa vuonna 2008 perustettu Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie GmbH (NOW) (BMVBS, 2012a, Schindler, 2010.) NOW hallinnoi myös BMVBS:n sähköajoneuvoteknologian rahoitusohjelmaa (*Modellregionen Elektromobilität*).

NOW ohjaa NIP-ohjelman rahaa moniin eri tutkimus-, kehitys- ja demonstraatiohankkeisiin, joissa kussakin on mukana yksi tai useampi yritysosapuoli tai tutkimusorganisaatio. Näissä hankkeissa NOW:n myöntämä rahoituspanos vastaa korkeintaan toisen osapuolen rahapanostuksia. NOW-organisaation vuoden 2011 vuosikertomuksen mukaan NIP-ohjelman varoista tukea saaneet hankkeet liittyvät vetyinfrastruktuurin ja loppukäytön tutkimukseen, kehitykseen ja demonstrointiin. Tällaisista hankkeista esimerkkinä mainittakoon *Clean Energy Partnership*-yhteenliittymän (CEP) laaja, monivuotinen esikaupallisen teknologian demonstraatiohanke. Hankkeessa demonstroidaan polttoaineen valmistus- ja jakeluinfrastruktuurin ja polttokennoajoneuvojen toimintaa arkikäytössä Manner-Euroopassa, lähinnä Saksassa. Tällä luodaan samalla näkyvyyttä vetyteknologiapohjaiselle liikenteen energiahuollon järjestelmälle. Tämän lisäksi NOW on ohjannut NIP-rahoitusta lukuisiin muihin vetyteknologioiden kehitykseen liittyviin t&k- ja demonstraatiohankkeisiin. (NOW, 2011; Schindler, 2010.) Saksan BMVBS osallistuu NIP-hankkeen kautta Saksan vetytankkausasemaverkoston laajentamiseen yhdessä yrityskumppanien kanssa. Laajennushanke on varsin merkittävä. Hankkeen tavoitteena on, että vuoteen 2015 mennessä maassa olisi vähintään 50 vetytankkausasemaa, kun näiden lukumäärä on nykyään 15 kappaletta. (BMVBS, 2012b; FCB, 2012; FuelCellToday, 2012b.)

Vedylle on kaavailtu merkittävää roolia öljyriippuvuuden vähentämiseen tähtävässä kehityksessä. Esimerkiksi Islannin saarivaltiolla on huomattavat varannot geotermistä energiaa sekä vesivoimaa. Maa saa käytännöllisesti kaiken käytettävän lämpö- ja sähköenergiansa näistä lähteistä (Stacice, 2012). Maalla on lisäksi vielä hyödyntämättä valtaosa näiden energiavarantojen potentiaalista (Ragnarsson & Helgason, 2004). Run-

saista energiavarannoistaan huolimatta maan liikennesektorin energiahuolto on vahvasti riippuvainen maan rajojen ulkopuolelta tuotavista fossiilisista polttoaineista. Maan hallinto on osoittanut halukkuutensa siirtyä kohti energiaomavaraisuutta vetyteknologian avulla myös liikennesektorilla. Islannissa on tutkittu myös mahdollisuutta tuottaa ja myydä vetyä esimerkiksi Manner-Eurooppaan (INE, 2012).

Japani on erityisen riippuvainen maan rajojen ulkopuolelta tuotavasta energiasta ja hallinnolla on ollut tahtotilana vähentää riippuvuutta tuontienergiasta. Vetyteknologia nähdään eräänä mahdollisuutena parantaa energiaomavaraisuutta ja maan hallinto pyrkii edistämään aktiivisesti uusien energiateknologioiden, kuten vetyteknologian kehittämistä. (Schindler, 2010.)

4.3 Muita hankkeita

Maailmalla on ja on ollut menneillään runsaasti vetyteknologian kehittämiseen ja laajempaan kaupallistamiseen tähtääviä hankkeita. Hankkeet on tyypillisesti muodostettu joko liikeyritysten muodostamien strategisten yhteenliittymien toimesta tai julkisten tahojen toimesta siten. Viimeksi mainituissa hankkeissa toimintaan osallistuu myös kaupallisia toimijoita ja/tai tutkimusyhteisöjä (*PPP*). Arkikäytön demonstraatiot on nähty hyväksi keinoksi kartuttaa ymmärrystä vetyteknologiasta sekä todentaa vetyteknologian toimivuutta todellisia käyttöolosuhteita vastaavissa olosuhteissa.

Yhdysvalloissa on saatu päätökseen tähän mennessä suurin, seitsenvuotinen (2004-2011) vetyteknologiademonstraatio. Yhdysvaltain energiaviraston tutkimuslaitos (*National Renewable Energy Laboratory, NREL*) keräsi tässä demonstraatiossa dataa vetypolttokennoautojen ja muun muassa jakelu infrastruktuurin arkikäytöstä ja näiden teknologian kypsyydestä. Dataa on kerätty noin 5,8 miljoonan ajokilometrin ajosuorituksista ja ajosuoritteiden yhteenlaskettu lukumäärä oli yli 500 000 kappaletta. Demonstraation ajosuoritteet on suoritettu kaikkiaan 183 vetypolttokennokäyttöisellä henkilöautolla joiden polttoaineen jakelu suoritettiin 25 vetytankkausasemalla. Demonstraation aikana käytettiin kaikkiaan 152 tonnia vetypolttoainetta. (NREL, 2012.) Tämä datamäärä on sittemmin paketoitu ja julkaistu tutkimuslaitoksen toimesta graafisina esityksinä, jotka antavat hyvän käsityksen teknologian kypsyydestä ja toiminnasta arkikäytössä. Mainitussa demonstraatiossa kertyneen todennetun tiedon perusteella on helppo nähdä erilaisten teknologisten ratkaisuiden luotettavuus sekä tuotekehitystarpeet vedyn liikennekäytön mahdollistamiseksi.

Projektin pääasiallisena tavoitteena oli selvittää, vastaako vetyautojen ja infrastruktuurin tekniikan kypsyyksesi energiaviraston asettamia tavoitteita. Keskeisimmät asetetut tavoitteet ovat 400 kilometrin toimintasäde ja 2000 käyttötunnin elinikä polttokennostolle. Infrastruktuurille asetettu keskeisin tavoite on että vedyn valmistuskustannusten tulisi olla alle \$3/ekvivalentti gallona. Demonstraation tuottama data ja siitä paketoitu informaatio näyttäisi, että tekniikat eivät vielä saavuttaneet asetettuja tavoitteita vaan esimerkiksi tavoiteltu polttokennojen elinikä jäisi useissa tapauksissa saavuttamatta.

Japanissa oli vuosina 2002 - 2010 käynnissä vastaava laaja vetyteknologian demonstraatio jossa demonstroititiin vetykäyttöisiä ajoneuvoja ja näiden polttoainehuollon infrastruktuuria. Mukana demonstraatioissa oli seitsemän autonvalmistajan vetykäyttöisiä henkilöautoja sekä yhden valmistajan polttokennobussi. Demonstraatioissa oli mukana 15 vedyn tankkausasemaa. Demonstraatioon osallistuneet autonvalmistajat testasivat useita erilaisia teknisiä ratkaisuja omissa voimalinjakokoonpanoissaan. (JHFC, 2010.)

Euroopan unionin tukema HyFLEET:CUTE-hanke (2006–2009) selvitti vetykäyttöisten bussien tekniikan toimivuutta arkikäytössä kaupunkiliikenteessä. Lisäksi hankkeessa demonstroititiin myös polttoainejakeluinfranktuurin tekniikkaa. Demonstraatioissa oli mukana kaikkiaan 47 vetykäyttöistä bussia, joista 14 oli toteutettu polttomoottorivoimalinjalla ja 33 polttokennovoimalinjalla ja näiden yhteenlaskettu ajosuorite oli kaikkiaan yli 2,5 miljoonaa kilometriä. Bussit oli sijoitettuina kymmeneen eri kaupunkiin Euroopassa, Kiinassa ja Australiassa sekä Islannissa ja olivat päivittäisessä käytössä julkisen liikenteen osana. Demonstraation aikana kerättiin tietoa muun muassa ajoneuvo- ja infrastruktuuritekniikan luotettavuudesta sekä palveluiden käyttäjien mielipideilmastosta taholta. Bussitekniikassa on demonstraation tulosten mukaan vielä kehitettävää, polttokennokäyttöisten bussien ajallinen luotettavuus (*availability*) oli noin 92 prosenttia ja eräälle polttomoottoritekniikalle vastaava arvo 89 prosenttia. Myös jakeluasemien luotettavuudessa on vielä kehitettävää, näiden luotettavuus oli demonstraatioissa noin 90 prosenttia. Demonstraatioissa saatiin tietoa myös eri voimalinjaratkaisujen ominaisista polttoaineen kulutusluvuista ja esimerkiksi suoravetoisen polttokennovoimalinjan kulutus oli demonstraatioissa 20-24 kg / 100 km kun polttokennohybridin kulutus oli 10-14 kg / 100 km. Vetykäyttöisten polttomoottoribussien kulutusluvut olivat demonstraation aikana keskimäärin 21,6 kg sadalla kilometrillä. Tulosten perusteella polttokennovoimalinjan hybridisointi myös korottaa polttokennon elinikää noin 2 000 tunnista noin 12 000 tuntiin. Tämä voi olla vain osatekijä käyttöiän odotteen parantumiseen, koska tuloksista ei saa selvää käsitystä muista tehdyistä muutoksista. Mielipidemittausten tuloksista mainittakoon, että lähes 70 % demonstraatiobussien käyttäjistä tukee perinteisten bussien korvaamista vetykäyttöisillä busseilla. (HyFLEET:CUTE, 2009.)

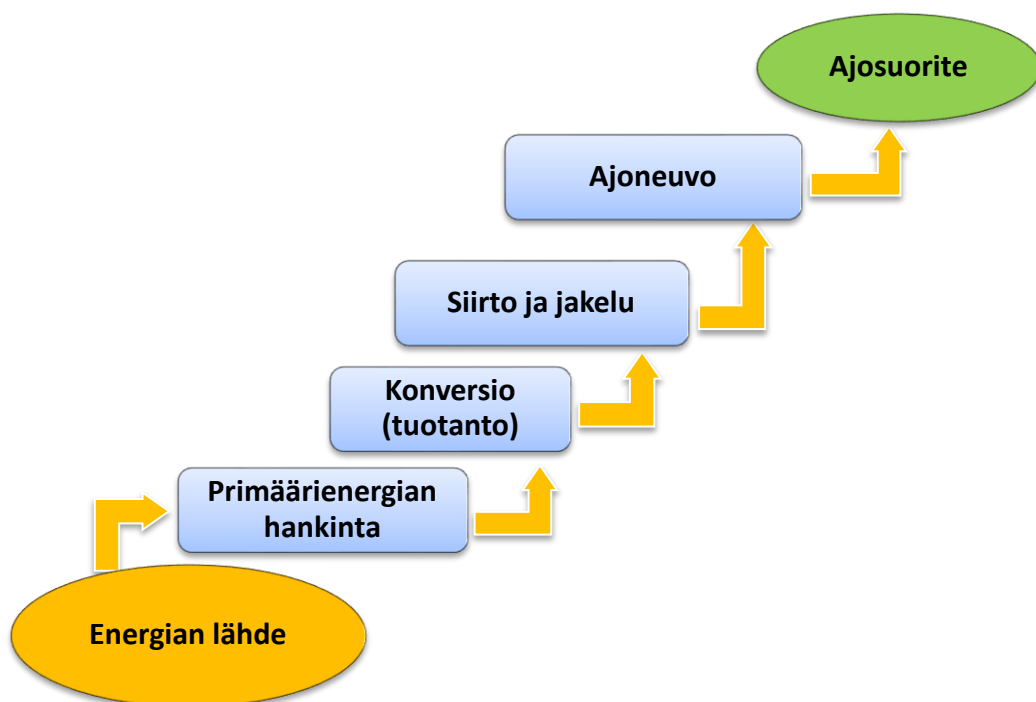
Vedyn liikennekäytön edistämiseen tähtäviä Pohjoismaisia hankkeita ovat norjalainen *HyNor*, tanskalainen *Hydrogen Link* ja ruotsalainen *Vätgas*. Nämä kansalliset kehittämishankkeet toimivat yhteistyössä toistensa ja muiden vastaavien kehityshankeorganisaatioiden kanssa. Näiden kolmen kansallisen hankeorganisaation yhteishanke tunnetaan nimellä *Scandinavian Hydrogen Highway Partnership* (SHHP) jossa on mainittujen toimijoiden lisäksi myös kaupallisia toimijoita sekä tutkimusyhteisöjä ja julkishallinnon elimiä. Viimeksi mainitun hankkeen päämääränä on myös edistää vedyn liikennekäyttöä ja vetykäyttöisten ajoneuvojen kaupallistumista. Hankkeen tavoitteena on edesauttaa vetytankkausasemaverkoston rakentamista Ruotsiin, Norjaan ja Tanskaan. Tämän ohessa tavoitteena on edesauttaa vetyautokannan kehittymistä poliittisin vaikutuskeinoin sekä jäsenorganisaatioidensa myöntämän rahoituksen turvin. Hankkeen tavoitteena on, että näihin maihin rakennettaisiin kaikkiaan 45 vetytankkausasemaa,

joista jo 13 tankkausasemaa oli perustettu vuoden 2012 loppuun mennessä. (SHHP, 2012.)

Ulkomaisten tutkimus- ja kehityshankkeiden lisäksi myös kotimaassa on vety- ja polttokennoalaan liittyvää tutkimusta. Tekes rahoittaa Polttokennot ohjelmansa (kesto 2007-2013) kautta useita alaan liittyviä tutkimushankkeita. Eräänä tutkimushankkeena mainittakoon Vuosaaren satamaan sijoittuvaa DEMO 2013-hanke, jossa tarkoituksena on selvittää erilaisten polttokennoteknologioiden kuin myös vetyteknologioiden teknis-taloudellisia edellytyksiä arkikäytön olosuhteissa. (Tekes, 2012)

5 ENERGIAKETJUN TEKINEN KUVAUS

Energian toimitus primäärienergian lähteiltä loppukäyttöön asti on mielletävissä toimitusketjuna, jossa energia hankitaan jostakin varannosta ja jalostetaan konversio- ja siirtoprosessien sekä loppukäyttösovellutusten avulla halutuksi lopputuotteeksi (Kuva 5.1). Lopputuote on tämän työn tapauksessa ilmeisesti ajosuorite, joka tuotetaan ajoneuvon voimalinjalla ja laajemmin katsoen ajoneuvolla.



Kuva 5.1 Havainnekuva energiaketjusta

Eri prosesseille voi olla eri omistajat, jotka asettavat näille tarkoituksenmukaisia laatuvaatimuksia. Esimerkiksi loppukäyttäjä usein omistaa loppukäyttösovellutuksena toimivan ajoneuvon. Käyttäjä asettaa tälle vaatimuksia tekniikan luotettavuudesta ja toimintasäteestä sekä tarkastelee, että voiko tuottaa tällä itselleen soveltuvan ajosuoritteen sopivilla kustannuksilla. Loppukäyttäjä voi arvioida esimerkiksi, että soveltuvan ajosuoritteen määritelmään kuuluu riittävä toimintasäde, kiihtyvyyys ja ajoneuvon kriteereihin paikallinen päästöttömyys. Tässä työssä tarkastellaan koko energiaketjua energiatehokkuuden sekä ilmastovaikutusten näkökulmasta siten, että loppukäyttösovellutuksina toimivat autot täyttävät tietyt suorituskykyyn liittyvät kriteerit.

Eri tavoin toteutetut energiaketjut voivat tuottaa samanlaisen ajosuoritteen, mutta asettavat tyypillisesti eriäviä vaatimuksia sitä edeltävälle energiatoimitusketjulle. Tässä työssä käsiteltävät vetykäyttöiset ajoneuvot edustavat sellaista tekniikkaa, joka asettaa erityisiä vaatimuksia toimitettavalle polttoaineelle. Toisaalta primäärienergian hankinnan suhteen vapausasteita on huomattavasti enemmän kuin tavanomaisissa energiaketjuissa. Tässä luvussa käsitellään vedyn valmistusmenetelmiä, siirto- ja jakelujärjestelmiä sekä vetykäyttöisten ajoneuvojen voimalinjaratkaisuja. Tässä syvennytään erityisesti siirto- ja jakeluinfrastruktureihin liittyviin seikkoihin.

Suurin osa nykyisistä ja suunnitteilla olevista vetykäyttöisistä henkilöautoista käyttää polttoaineenaan kaasumaista vetyä ja näiden polttoainesäiliöiden nimellispaine on joko 350 bar tai 700 bar (Ogden & Nicholas, 2011). Myös vetykäyttöisissä kaupunkibussisovelluksissa vety varastoidaan kaasumaisena ja polttoainesäiliöiden painetaso on joko 350 tai 700 bar (FCH-JU, 2012). Korkeammalla nimellispaineella on mahdollista saavuttaa parempia toimintasäteen arvoja. Tästä syystä tässä syvennytään käsittelemään 700 bar:n järjestelmiä. Myös jakeluasemaratkaisujen osalta syvennytään käsittelemään erityisesti sellaisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat kaasumaisen vedyn tankkaamisen 700 bar:n nimellispainetasoon.

5.1 Vedyn valmistus

Vedynvalmistustekniikat jaotellaan usein luokkiin keskitetty ja hajautettu tuotanto. Jaottelu tehdään sen mukaan, miten valmistuslaitokset on sijoitettavissa loppukäyttökohteisiin nähden. Keskitetyn tuotannon valmistuslaitoksissa tuotantomäärät ovat tyypillisesti suuria hajautetun tuotannon laitoksiin verrattuna. Keskitetyllä tuotantotavalla tuotettu vety kuljetetaan loppukäyttökohteisiin siirtoetäisyydelle ja volyymin soveltuvalla menetelmällä, soveltuvan menetelmän valinta on paitsi energiatekninen, myös taloudellinen optimointitehtävä.

Hajautetun tuotannon valmistuslaitoksissa vetyä tuotetaan tyypillisesti pienellä tuotantovolyymin ja vain paikalliseen tarpeeseen lähellä käyttöpaikkaa. Näin tuotetun vedyn siirtokuljetustarve ei tyypillisesti ole merkittävä. Useimmat vedynvalmistuksen tekniset ratkaisut käytettäväksi keskitetyssä että hajautetussa tuotannossa, mutta tyypillisesti suuren kokoluokan valmistuslaitoksen alkuinvestoinnit ovat tuotantokapasiteettiyksikköön nähden pienemmät. Pienemmän kokoluokan vedyntuotantolaitoksen perustaminen voi olla järkevää silloin, kun vedyn kysyntä ei anna syytä perustaa suuremman alkuinvestoinnin vaativaa keskitettyä valmistuslaitosta. Sopivan vedyntuotantotavan valintaan keskitetyn ja hajautetun väliltä vaikuttaa alkuinvestoinnin suuruuden lisäksi muun muassa tarvittavien energianlähteiden saatavuus ja sijainti sekä tuotevedyn kuljetusetäisyydet. (IEA, 2012, s. 238.)

Erikoistapauksena vedynvalmistusmenetelmien luokittelusta mainittakoon, että vetyä on mahdollista valmistaa soveltuvien menetelmien myötä ajoneuvoon asennettavalla (On-Board) laitteistolla. Tällä menetelmällä vety vapautetaan voimalaitteelle käytettäväksi vasta ajoneuvossa. Tähän tarvitaan jokin vedynkantajayhdiste, johon vety on si-

dottu tai sitoutunut. Tällaisina menetelminä on kehitetty esimerkiksi natriumboorihydraatin (NaBH_4) hydrolyysiin perustuvaa erottamista jossa kemiallinen yhdiste hajotetaan veden avulla lähtöaineikseen ja vety erotetaan voimalaitteen polttoaineeksi (Suda & Kelly, 2008). Tämän tyyppiset ratkaisut ovat nähtävästi olleet vain eräs vaihe vetyajoneuvojen kehityshistoriassa ja nykyisten vetykäyttöisten autojen kehitysversiot nojautuvat paineisena varastoitavaan vetyyn (FuelCellToday, 2012a).

Vedyn tuotanto- sekä siirto- ja jakelujärjestelmän on vastattava polttoaineen kysyntään. Suureen kysyntään vastaaminen pienen kokoluokan tuotantolaitoksia perustamalla voi tulla taloudellisesti kannattamattomaksi. Pienen tuotantoyksikön alkuinvestointi tuotantokapasiteetin yksikköä kohden on luonnollisesti suurempi kuin suuren yksikön tapauksessa. Suuren kokoluokan vedyntuotantolaitosten heikkoutena on, että tuotteen siirto ja jakelu käyttöpaikalle voi tulla suurilla siirtoetäisyyksillä verrattain kalliiksi tuotteen valmistuskustannuksiin nähden. Vetypolttoaineen kuljetus- ja jakelukustannukset voivat olla jopa niin suuria, että kaikkia tuotantomuotoja ei ole järkevää soveltaa suuren mittakaavan tuotantoon. (IEA, 2012, s. 240.) Song toteaa, että eri tuotantomuotojen keskinäinen paremmuus voidaan määrittää niiden taloudellisen kilpailukykyyn kautta (Song, 2009).

Maailman nykyisestä vedyntuotantokapasiteetista noin puolet pohjautuu maakaasun höyryreformointimenetelmään, hieman alle kolmannes vedystä tuotetaan öljyn ja jalostamokaasujen reformointiin soveltuviin reformointimenetelmiin. Noin viidennes kapasiteetista perustuu hiilen kaasutusmenetelmiin ja vain noin 4 % elektrolyysimenetelmiin. (IEA, 2009, s. 94 & 235; Saur 2008.) Nykyisistä vedynkäyttäjistä suurimmat ovat kemian ja petrokemian teollisuuden erilaiset jalostamot, joiden osuus maailmanlaajuisesta vedyn käytöstä on noin 90 % (Tomforde, 2008). Erilaisilla jalostamoilla sekä petrokemian teollisuudessa käytettävä vety on mukaan tyypillisesti laitosten omaa tuotantoa. Loput 10 % vuosittain tuotetusta vetymäärästä myydään asiakkaille joko bulkkikaasuna putkistojen kautta, nesteytettynä tai paineistettuna säiliökaasuna maantiekuljetuksin toimitettuna sekä hajautetusti käyttöpaikalla tuotettuna kaasuna. Pienemmän kuluksen asiakkaista Smolinka et al. mainitsevat korunvalmistajat, elektroniikkateollisuuden sekä erikoissovelluksena vedyn käytön rakettipolttoaineena. (2011.) Varsinaisen vedyn tuotannon lisäksi vetyä syntyy eräiden teollisuuden prosessien sivutuotteena. IEA näkeekin, että sivutuotevetynä saatava vety voisi toimia eräänä vedyn tuotantomenetelmänä myös liikennekäytön tarpeisiin, kun vedyn kysyntä on pientä ja ei vielä anna taloudellista syytä perustaa vedyntuotantoon keskittyntä laitosta. (IEA, 2012, s. 238.)

Ogden et al. (2011) ennustavat, että vedyn valmistaminen on edullisinta ja energiatehokkainta vielä hyvin pitkään fossiilisista primäärienergianlähteistä, ensisijaisesti maakaasusta mutta myös muista hiili- ja hiilivetyipitoisista raaka-aineista. Tällaisten tuotantolaitosten yhteyteen on mahdollista lisätä hiilidioksidin talteenottojärjestelmä (*Carbon Capture and Storage, CCS*). Vetyä on mahdollista valmistaa myös biomassasta, joka nähdään houkuttelevana menetelmä koska tämä mahdollistaisi erittäin alhaiset hiilidioksidin nettopäästöt. Pitkän aikavälin tuotantomenetelmää Ogden et al. eivät tästä kuitenkaan kaavaile, koska arvelevat että käytettävissä olevan biomassan määrä on ra-

jallinen tarpeeseen nähden. Ogden et al. pitävät pitkän aikavälin kestäväenä ratkaisuna hiilivapaita aurinko- ja tuulivoimaa yhdistettynä elektrolyyttiseen vedyn valmistukseen. Siihen tarvittava teknologia on tutkijoiden mukaan vielä tällä hetkellä niin kallista, ettei se kykene kilpailemaan fossiilisten menetelmien ja biomassan kaasutuksen kanssa pitkään aikaan. (Ogden et al. 2011, s. 69.)

Ajoneuvokäytössä yleistynyt vetypolttokennotyyppi (PEM) on herkkä vetyvirran mukana kulkeutuvalla hiilimonoksidille ja aivan erityisen herkkiä rikkikomponenteille, jotka molemmat aiheuttavat membraanielektrodikatalyytin myrkyttymistä. Vety saisi vallitsevan käsityksen mukaan sisältää rikkikomponenttia vain luokkaa 4 ppb (miljar-disosa) ja hiilimonoksidia vain joitain ppm:iä (miljoonasosia). Eri valmistustekniikoiden tuotevedyn puhtaus määräytyy osaltaan tuotannon raaka-aineesta ja käytettävistä puhdistusmenetelmistä. (Barbier, 2010.) Käytännössä vain joillain elektrolyysitekniikoilla päästään ajoneuvoissa käytettävien PEM-polttokennosovellutusten edellyttämään tuotepuhtauteen (Smolinka et al. 2012) ilman erillisiä puhdistusjärjestelyjä. Tuotevedyn puhdistaminen ei ole ainoa ongelmallinen teema polttokennosovellusten kannalta. Ratkaisemattomia ongelmia on myös tuotevedyn puhtauden mittaamisessa ja puhtauden todentamisessa. Nämä vaativat standardisoidun näytteenottomenettelyn käyttöönottoa ja näytteiden huolellista analysointia. (Barbier, 2010.) Polttoainevedyn laatuvaatimusstandardisointi on verrattain tuoretta, SAE on julkistanut viimeisimmän revisioitun PEM-polttokennojen vedynlaatua koskevan standardin vasta vuonna 2011 (SAE, 2011).

Seuraavissa alaluvuissa esitellään yleisellä tasolla niitä vedyntuotantotekniikoita, jotka ovat nykyisin laajassa käytössä tai jotka vallitsevan käsityksen mukaan tulevat yleistymään, mikäli vetypolttoaineen kysyntä lisääntyy.

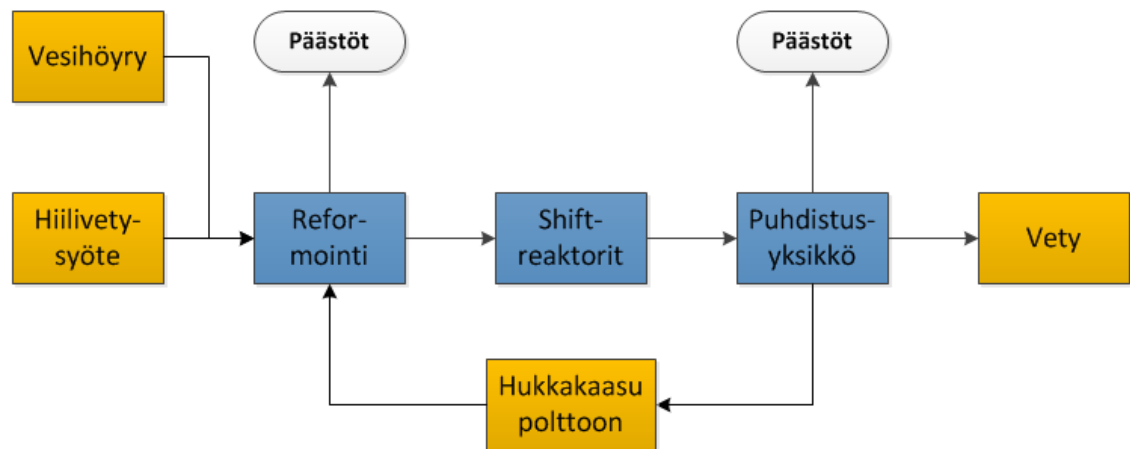
5.1.1 Luonnonkaasun höyryreformointi

Maakaasun höyryreformointi on paitsi yleisin ja myös edullisin vedyntuotantotekniikka. Vedyn valmistuksen maakaasun reformoinnilla arvellaan olevan mielekästä pitkään osaltaan myös siitä syystä, että maakaasua on laajalti saatavissa. Lisäksi maakaasun höyryreformointiprosessi on muihin tuotantoprosesseihin nähden suhteellisen yksinkertainen. Lisäksi myös tuotevedyn puhdistustarve on vähäisempi kuin muista hiilipitoisista syötteistä valmistetulla vedyllä. (Fuel Cell Handbook, 2004, s. 10-33.)

Maakaasun höyryreformointia (*Steam Methane Reforming, SMR*) on käytetty pitkään vedyn ja synteetikaasun valmistuksessa petrokemian ja kemian prosessiteollisuudessa (Elshout, 2010; IEA, 2012, s. 240). Subramani et al. toteavat, että hiilivetyjen ja erityisesti maakaasun sisältämän metaanin höyryreformointimenetelmä perustuu pitkälle kehittyneeseen ja käytännössä koeteltuun teknologiaan (Subramani et al. 2009).

Höyryreformointi tarjoaa vedynvalmistusta ajatellen suotuisamman synteetikaasun vety/hiilimonoksidisuhteen kuin muut tarkoitukseen soveltuvat muut reformointimenetelmät. Höyryreformointimenetelmän CO₂-ominaispäästöt tosin ovat tunnetuista reformointimenetelmistä suurimmat (Holladay et al, 2008, s. 246). Höyryreformointimenetelmällä on etunaan kuitenkin se, että osa tällä menetelmällä tuotetun synteetikaasun vedystä on peräisin prosessiin syötetystä vesihöyrystä, kun taas muilla menetelmillä

vety syntyy ainoastaan hiilivetyä syötteestä, kuten metaanista. (Subramani et al., 2009, s. 16) Edellä mainitusta seikasta johtuen juuri höyryreformointi on suosittu vedyn valmistusmenetelmä (Holladay, 2008, s. 246).



Kuva 5.2 Yksinkertaistettu havainnekuva höyryreformointiprosessista (mukailten: Elshout, 2010).

Höyryreformoinnissa (Kuva 5.2) hiilivetyä syötteen reformoituminen synteesikaasuksi ja edelleen vedyksi tapahtuu yhdistetyllä höyryreformointi- ja vesi-kaasu shift-reaktiolla useampien väli vaiheiden kautta. Näiden lisäksi prosessiin täytyy lisätä myös soveltuva vetyvirran puhdistusyksikkö. Välivaiheiden määrä riippuu voimakkaasti siitä, kuinka raskaita hiilivetyä syöte sisältää. Prosessin toteutus yksinkertaisimmillaan vaatisi, että syötevirrassa ei ole merkittäviä määriä metaania raskaampia hiilivetyjä, jotka aiheuttaisivat prosessilaitteistojen likaantumista. Raskaampien hiilivetyjen tapauksessa prosessiin on kytkettävä esireformointilaitteistoja, jotka muuntavat raskaat hiilivedyt metaaniksi ennen varsinaista reformointia. (Elshout, 2010.)

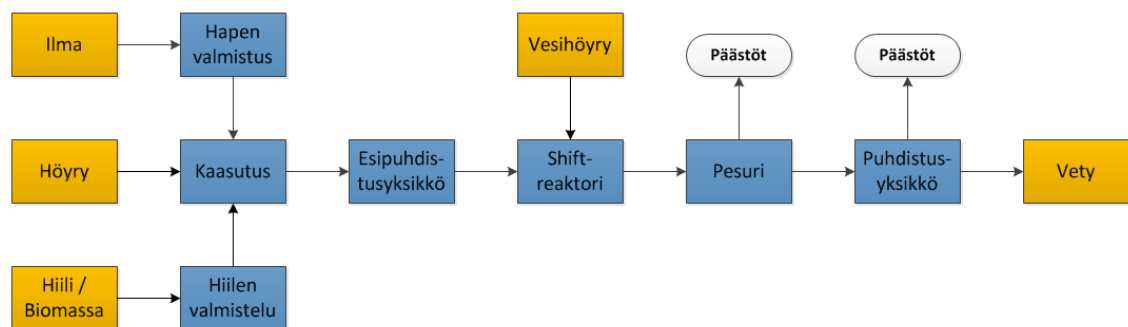
Ogden et al. odottavat, että tulevaisuuden vedynvalmistusteknologiat mahdollistavat kasvihuonekaasupäästöjen eliminoinnin laajemminkin. Ogden et al toteavat, että tämä on mahdollista jo nykyisillä CCS-menetelmillä suuren kokoluokan vedynvalmistuslaitoksissa. CCS-menetelmässä prosessista talteen otettu hiilidioksidi säilötään pysyvästi syviin geologisiin muodostelmiin. Ogden et al. ennustavat myös, että CCS-menetelmä ei tule yleistymään vedyn valmistuksen yhteydessä ennen vuotta 2020. (Ogden et al., 2011, s. 69.). Rostrup-Nielsen (2005) toteaa, että hiilidioksidin talteenotto olisi taloudellisesti järkevää ainoastaan keskitetyn tuotannon laitoksilla.

5.1.2 Kaasutusmenetelmä

IEA toteaa, että hiilen kaasutukseen perustuvilla menetelmillä voi tuottaa vetyä edullista vetyä erityisesti niillä alueilla, joissa on huomattavia hiiliesiintymiä. Koska kivihiltä esiintyy laajoina esiintyminä useilla alueilla, niin hiili voi olla tulevaisuudessa merkittävä primäärienergianlähde myös vedyn valmistuksessa (Lin, 2008).

Hiilen vetykonversioon käytettävä tekniikka soveltuu suurelta osin käytettäväksi myös biomassan kaasutukseen ja edelleen vetykonversioon. Eräänä biomassakaasutukseen liittyväksi ongelmaksi on tosin nähty mahdolliset biomassan saatavuusongelmat (IEA, 2006, s. 15; IEA, 2012, s. 241.) Suomalaisten metsäbiomassavarantojen näkökulmasta tämä on kuitenkin kiinnostava valmistustekniikka, mikäli vedyn kysyntä kasvaa nopeasti. Suomalaisiin metsäbiomassavarantoihin ja niiden riittävyyden arviointiin ei syvennyttä tässä työssä. Sen sijaan tässä kuvataan lyhyesti kaasutusmenetelmän ulkoisesti kiinnostavimmat seikat.

Hiilen kaasutukseen pohjautuva vedynvalmistusmenetelmä on teknisesti hyvin tunnettu ja sillä tuotettua vetyä käytetään raaka-aineena joissain kemianteollisuuden prosesseissa. Hiilen kaasutuksella tuotettua vetyä käytetään esimerkiksi ammoniakkin ja metanolintuotannossa sekä liikennepolttoaineiden Fischer-Tropsch-synteesissä (Lin, 2008). Kaasutusmenetelmä perustuu joiltain osin samaan tekniikkaan, kuin maakaasun reformointi, mutta on hiilen kaasutus- ja lisäpuhdistusyksiköineen reformointiprosessia monimutkaisempi (Kuva 5.3).



Kuva 5.3 Yksinkertaistettu havainnekuva hiilen tai biomassan kaasutusprosessista ilman CCS-prosessia (mukaillen: Rostrup-Nielsen, 2010; Schaadt et al, 2010).

Tässä menetelmässä hiili tai biomassassa kaasutetaan kaasutusreaktorissa ja muodostunut synteetikaasu etenee tarvittavien puhdistusyksiköiden kautta edelleen shift-reaktoriin, jollainen sisältyy myös maakaasun reformointiprosessiin. Shift-reaktorin jälkeen tuotevedyn sisältämät epäpuhtaudet (CO₂ ja H₂S) erotetaan tuotevedystä soveltuvin menetelmin, jollaisia käytetään myös maakaasun reformointiprosessin yhteydessä. (Rostrup-Nielsen, 2010; Schaadt et al, 2010.)

Jos kaasutusprosessin energiasyötteenä käytetään hiiltä ja halutaan saavuttaa ilmastopäästöjen vähenemä tavanomaisiin polttoaineisiin nähden, kaasutusprosessiin on lisättävä CCS-prosessi. CCS-tekniikalla toteutettuna tuotantolaitoksen investointi on IEA:n mukaan verrattuna kallis höyryreformointilaitokseen nähden ja sitoo investointipääomaa pitkäksi aikaa. Näin ollen tämä tekniikka soveltuisi vain suuren kokoluokan keskitettyyn vedyntuotantoon. Lisäksi hiilidioksidin talteenotto (CCS) vaatisi, että prosessin poistokaasun hiilidioksidipitoisuus olisi hyvin korkea. Tästä seuraa että laitos vaatisi yhteiteensä myös hapenvalmistusprosessin, joka on energiaintensiivinen ja verrattain kallis prosessi. (IEA, 2012, s. 241.)

5.1.3 Elektrolyysimenetelmä

Vesi voidaan hajottaa sähkökemiallisesti vedeksi ja hapeksi elektrolyysimenetelmällä. Elektrolyysimenetelmällä voidaan tuottaa vetyä erityissovelluksiin, joiden puhtausvaatimus on verrattain korkea. Esimerkiksi ajoneuvopolttokennojen katalyyttimateriaalit ovat erittäin herkkiä esimerkiksi rikkivety-yhdisteille sekä myös hiilimonoksidille. (Wittstadt, 2008.)

Vedyn elektrolyysituotanto on nähty erityisen kiinnostavaksi siitä syystä, että tällä tekniikalla vetyä on mahdollista tuottaa esimerkiksi tuulivoimalla tuotetulla sähköenergialla. Prosessisyötteeksi tarvitaan sähköenergian lisäksi ainoastaan vettä, ja näin ollen tuotetun vedyn ilmastovaikutus olisi parhaimmillaan hyvin pieni. Tämä tietysti edellyttäisi että sähköenergia olisi todella peräisin uusiutuvista lähteistä. Tämän tuotantotavan suurimpana heikkoutena lienee, että normaalisti sähköenergialla tuotettuna vedyn tuotantokustannus on taloudellisesti tarkasteluna kilpailukyvytön muihin vedyntuotantotapoihin nähden (Ogden et al, 2011).

Kuten jo mainittu, maailmanlaajuisesta vedyntuotantokapasiteetista vain murtoosa perustuu elektrolyyttiseen menetelmään. Suhteellisen pieneen osuuteen on useimmissa potentiaalisissa tuotantopaikoissa syynä korkea sähköenergian hankintahinta. Sähkönhinta tulee myös pysymään korkealla tasolla myös jatkossa useimmilla potentiaalisilla maantieteellisillä alueilla, kuten IEA (2009) toteaa. Wittstadt toteaa, että elektrolyysivedyn tuotantokustannuksista pääomakustannukset mukaan lukien, jopa 75 % voi olla sähköenergian hankintakustannuksia (Wittstadt, 2008). Elektrolyysivedyn, osaltaan korkeasta hinnasta johtuva verrattain alhainen kysyntä on johtanut siihen, että energiatehokkuuskehitys on ollut suuren kokoluokan elektrolyysereissä varsin vaatimattomaa viimeisen 40 vuoden aikana. Suuren kokoluokan elektrolyysilaitoksia onkin rakennettu sellaisiin paikkoihin, jossa on ”ylitarjontaa” sähköenergiasta, kuten vesivoimasta. (Smolinka et al., 2010.)

Kaupallisesti elektrolyysereitä on saatavissa kahta tyyppiä: alkaalielektrolyyseri (*Alkaline Electrolyser, AEL*) ja polymeerielektrolyyttimembraanielektrolyyseri (*Polymer Electrolyte Membrane Electrolyser, PEMEL*) (Saur, 2008) joista molemmilla on omat soveltuvat käyttökohteensa. Alkaalielektrolyysi on järkevä ratkaisu suuren kokoluokan keskitettyyn tuotantoon. PEM-elektrolyysi puolestaan on järkevä ratkaisu hajautettuun pientuotantoon yksinkertaisen rakenteensa ja hyvän tehotehityensä puolesta, kun laitteiston pieni koko voidaan nähdä etuna ja hankintahinta ei ole kriittinen tekijä. Alkalielektrolyysitekniikka on ollut käytössä yli 100 vuotta teollisuudessa ja suuren kokoluokan sovellutuksissa ja PEM-elektrolyysilaitteistot pienemmän kokoluokan tuotannossa vasta joitain vuosikymmeniä. (Smolinka et al., 2010.)

Eräs kiinnostava kehityksen haara on korotetussa painetasossa toimiva elektrolyyseri, jossa elektrolyysilaitteiston vedyntuottopaine on esimerkiksi luokkaa 400 bar, joka riittää varastointisovellutuksiin kuin myös joihinkin käyttösovellutuksiin (Saur, 2008) Erään tällaisen laitteen kehittäjän mukaan laitteiston vedyntuotannon painetaso olisi lähes 490 bar ilman mekaanista komprimointia (Avälence, 2012). Tämä painetaso

on merkittävästi suurempi, kuin markkinoilla olevien alkaali- tai PEM-elektrolyysereiden painetasot, jotka ovat tyypillisesti alle 30 bar (Smolinka et al., 2011).

Viime aikoina on herännyt laajaa kiinnostusta uusiutuvien energiamuotojen varastointiin elektrolyysillä tuotettavan vedyn muotoon (Smolinka et al., 2012). Muun muassa IEA (2012, s. 256) näkee vedyn elektrolyysivalmistuksen mahdollisena keinona muuntaa suuria määriä säätämättömällä sähköntuotantokapasiteetilla tuotettua uusiutuvaa sähköenergiaa varastoitavaan muotoon. Sähköenergian varastointi on suurissa määrissä haastavaa muilla tunnetuilla keinoilla. Sähköverkko ei voi itsessään varastoida energiaa hetkellisten kysynnän ja tuotannon erojen tasaamiseksi. Varastointi ja verkon säätö voivat olla kuitenkin tarpeen, mikäli säätämättömän sähköntuotantokapasiteetin osuus verkossa nousee merkittäväksi.

Mikäli verkossa ei ole nopeaa tehoreserviä riittävästi verkon tasapainottamiseksi, keinovalikoimaan jää käytännössä verkon kuormatehon säätö. Tällöin verkkoa kuormitettaisiin irtikytkettävällä kuormitusteholla (elektrolyysilaitteistoilla) silloin kun tuotantotehoa on liikaa. Kun taas verkon kuormateho ylittää tuotantotehon, kuormituksen vähentäminen (elektrolyysilaitteistojen sammuttaminen) tasapainottaisi verkkoa tähän suuntaan. Kuormitussäädössä tuotettu ja varastoitu vety olisi lisäksi mahdollista muuntaa sähköenergiaksi joko polttokennoin tai arkirealistisemmin visioituna vetykäyttöisillä kaasuturbiinilaitoksilla. Tällä tavoin tuotettu vety olisi mahdollista käyttää myös liikenteen polttoaineena, joka saattaisi olla vedylle jopa järkevämpi käyttötapa (Ulleberga et al., 2010).

Sähköenergian varastointi vedyn muotoon ja jälleen palauttaminen takaisin sähköenergian muotoon on toteutettavissa arviolta noin 36 prosentin hyötysuhteella. Tällöin vety tuotettaisiin elektrolyysillä, varastoitaisiin maanalaisiin geologisiin varastoihin ja palautettaisiin sähköksi polttokennoin. (Rasmussen et al., 2012) Tämä on tietysti kovin keho hyötysuhteen arvo verrattuna esimerkiksi pumppuvoimalaitoksiin (*Pumped Hydro Storage, PHS*), joissa sama hyötysuhteen arvo voi olla luokkaa 65-85 % (Beaudin et al., 2010).

Vedyn elektrolyysivalmistus voi olla mahdollisesti ainoa suuren kokoluokan vaihtoehto sähköenergian varastointiin. (IEA, 2012). Tällaisessa tilanteessa elektrolyysilaitteisto voisi tuottaa kokonaisuudelle sellaisen hyödyn, että vedyn valmistus kannattaa kokonaisuutta tarkasteltaessa jopa huonollakin hyötysuhteella. (Ulleberga et al., 2010). Lisäksi, jos elektrolyysilaitteistoja käytettäisiin verkon säätökuormakapasiteettina, niin sähköenergian hinta voisi olla hetkittäin jopa negatiivinen. Tästä seuraisi että elektrolyysivedyn hinta voisi olla kilpailukykyinen myös muihin tuotantotapoihin nähden.

5.2 Vedyn siirto- ja jakelujärjestelmä

Jotta keskitetysti tuotettu vetypolttaine olisi mahdollista hyödyntää eri sovellutuksissa, on se toimitettava tuotantolaitokselta käyttöpaikalle tai liikennepolttaineen tapauksessa tankkauspaikalle. Vedyn siirto- ja jakelujärjestelmän (Kuva 5.4) voi katsoa sisältävän

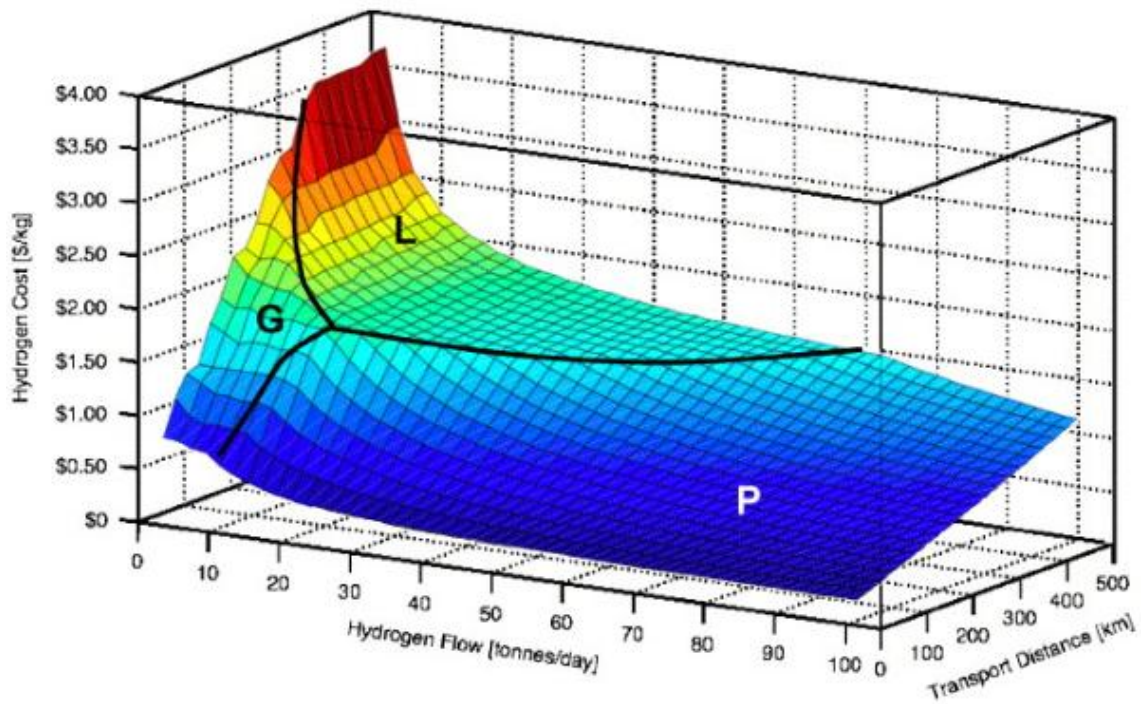
kaikki vaiheet tuotantolaitoksen vedyn siirtovalmisteluprosesseista aina polttoaineen jakeluasemaan. (Yang & Ogden, 2007.)



Kuva 5.4 Vedyn siirto- ja jakelujärjestelmän kaavioesitys. L H₂: nesteytetty vety, C H₂ komprimoitu vety. (mukaiillen Nexant, 2008b)

Vedyn jakelu voidaan toteuttaa useammalla erityyppisellä jakeluketjulla. Johtuen vedyn alhaisesta volumetrisestä lämpöarvosta (MJ / m³) vety on joko komprimoitava tai nesteytettävä kuljetusta ja varastointia varten (Yang & Ogden, 2007). Vedyn siirto on mahdollista toteuttaa kaasumaisen vedyn maantiekuljetuksin, kaasumaisen vedyn putkisiirrolla ja nesteytettynä maantiekuljetuksin. (IEA, 2012, s. 238 & 241.) Erilaisilla

siirtomenetelmillä on omat soveltuvat käyttökohteensa. Esimerkiksi kaasumaisen vedyn maantiekuljetus on järkevä menetelmä kun siirtoetäisyydet ja toimitusmäärät ovat pieniä tai satunnaisia. Tällöin ei ole välttämättä perustetta investoida nesteytyslaitokseen ja arvokkasiin kryogeenisiin kuljetusyksiköihin (Kuva 5.5). (Yang & Ogden, 2007.)



Kuva 5.5 Edullisin vedyn siirron kustannus (sisältää valmisteluprosessit investointeineen) toimitusmäärän ja etäisyyden funktiona, ei huomioi jakeluaseman kustannuksia. G = kaasumaisen vedyn maantiekuljetus, L = nestemäisen vedyn maantiekuljetus ja P = kaasumaisen vedyn putkisiirto (Yang & Ogden, 2007).

Nestemäisen vedyn maantiekuljetukseen perustuva siirtomenetelmä on järkevä menetelmä silloin kun toimitettavat määrät ja siirtoetäisyydet ovat suuria, mutta käyttökohteet maantieteellisesti erillään. Tällöin ei ole välttämättä mielekästä perustaa siirto-putkistoa. Kun vedyn kysyntä on suurta ja keskittynyt maantieteellisesti pienelle alueelle, vedyn siirto-putkisto on edullisin tapa toimittaa kaasua keskitetystä tuotannosta kulutuskohteisiin. (Yang & Ogden, 2007.) Tämän työn energiaketjujen tarkasteluissa vedyn siirtotavaksi on vakioitu putkisiirto, joka on edullisin siirtotapa täysin kehittyneessä vetytaloudessa kun siirtomäärät ovat suuria ja kysyntä keskittynyttä. Energiatarkasteluissa käytettävään malliin on kuitenkin perustettu myös muita siirto- ja jakelutapoja, jotka nyt jäävät rajaussyistä pois tämän työn energiaketjutarkasteluista.

5.2.1 Vedyn komprimointi

Vedyn paineistus on välttämätön toimenpide useammassa siirto- ja jakeluketjun vaiheessa, kun vety siirretään putkisiirtoon tai kaasumaisen vedyn maantiekuljetukseen perustuvalla menetelmällä. Esimerkiksi tuotantolaitoksen jälkeisessä siirron valmistuksessa kaasumainen vety on komprimoitava joko maantiekuljetusyksikön paineeseen tai siirtoputkiston paineeseen ja/tai bulkkivarastopaineen saavuttamiseksi. Siirtoputkisto voi tarvita pitkän siirtoputkiston tapauksessa useampia paineenkorotusasemia virtausvastusten voittamiseksi. Lisäksi jos siirtoputkiston yhteyteen on liitetty jokin varmuusvarasto, niin komprimointia voi tarvita myös varastopaineen saavuttamiseksi. Mikäli jakelujärjestelmään kuuluu väliterminaali, myös terminaalissa voidaan tarvita komprimointia varastopaineen saavuttamiseksi samoin kuin maantiekuljetusyksiköiden painetasen saavuttamiseksi. Jakeluasemalla komprimointia tarvitaan ajoneuvon polttoainesäiliöiden painetasen saavuttamiseksi ja/tai puskurisäiliöiden painetasen saavuttamiseksi. (FreedomCar, 2005; Yang & Ogden, 2007.)

Siirtoputkistojen paineenkorotuskompressorin kapasiteettivaatimus voi olla esimerkiksi luokkaa 500-2 000 tn/päivä ja painesuhdevaatimus on näillä tyypillisesti keskinkertainen; tyypillisesti luokkaa 5 bar:sta 70 bar:iin. Jakeluasemien kompressoreilla tuottovaatimus voi olla luokkaa 100 – 3000 kg/päivä, ja vaadittava paineenkorotus korkea, siirtopaineesta esim. 70 bar puskurisäiliöiden ylimpään paineeseen joka voi olla jopa noin 900 bar. (FreedomCar, 2005; Yang & Ogden, 2007; Klell, 2010.)

Kaasumaisen vedyn paineistus voidaan toteuttaa useammalla eri kompressoritekniikalla, kuten mäntä-, kalvomäntä-, ruuvi-, keskipako- ja aksiaalivirtauskompressoreilla. Näiden lisäksi tunnetaan myös muita kompressorityyppejä, kuten Linden kehittämä *Ionic Liquid Compressor*, ja sähkökemiallinen membraanikompressor. Kullakin yllämainitulla kompressoritekniikalla on omat erityispiirteensä ja soveltuvat käyttökohteensa. (Barbier, 2010, s. 136.)

Mäntäkompressoritekniikka soveltuu käytettäväksi hyvin laajalla toiminta-alueella niin paineenkorotuksen kuin tuottokapasiteettinsa puolesta FreedomCar, 2005, s. 16). Mäntäkompressorille on ominaista huono energiahyötysuhde ja suuri vikaantuvuus samoin kuin voiteluainekontaminaation tuotto vetyvirtaan (Barbier, 2008; Gao & Krishnamurthy, 2009). Kontaminaatioiden muodostuminen on lähes vältettävissä erityisillä teknisillä ratkaisuilla joihin ei syvennytä tässä sen tarkemmin (Klell, 2010). Vedyn paineistukseen tarkoitetut mäntäkompressorit on valmistettava erityisistä vetyä sietävisistä materiaaleista, josta seuraa että näiden hankintahinta on tyypillisesti suurempi kuin esimerkiksi luonnonkaasun komprimointiin tarkoitetuilla mäntäkompressoreilla. Mäntäkompressorien verrattain herkkä vikaantuvuus on seurausta runsaasta liikkuvien osien määrästä (Barbier, 2008; Gao & Krishnamurthy, 2009) mutta perustekniikka on hyvin tunnettua. Jakeluasemilla käytettävät mäntäkompressorit on tyypillisesti toteutettu monivaiheisella komprimoinnilla, jolloin kaasumaisen vety paineistetaan alkupaineesta loppupaineeseen esimerkiksi kolmessa eri paineportaassa. Vedyn paineistukseen tarkoitetut mäntäkompressorit on toteutettu tyypillisesti vähintään kolmivaiheisena ja komp-

rimoitava kaasu jäädytetään vaiheiden välissä lämmönvaihtimissa, joiden jäädytyskiertoaineena toimii joko vesi tai ilma. (Nexant, 2008a, 2-54; Klell, 2010.)

Myös kalvomäntäkompressoritekniikka on hyvin tunnettua tekniikkaa ja sopiva valinta sellaisin sovellutuksiin, joissa kompressorin tuottovaatimus on pieni ja paineenkorotustarve suuri. Lisäksi tämän tekniikan etuna on, että se ei aiheuta voiteluainekontaminaatiota vetyvirtaan. Syrjäytyskalvon voimansiirto tapahtuu vedyn komprimointiin tarkoitetuissa kalvokompressoreissa hydraulisesti, joka on etu turvallisuusnäkökulmasta tarkasteltuna. Näin toteutettuna kompressorin sisäisten vetyvuotojen todennäköisyys pienenee. (Barbier, 2008; Gao & Krishnamurthy, 2009; Klell, 2010; Nexant, 2008a.)

Keskipakokompressoritekniikalle on ominaista yksinkertainen rakenne ja siitä seuraava tekninen luotettavuus sekä pieni paineenkehityskyky. Tämän tyyppisiä kompressoreja käytetään sovellutuksissa, joissa suuri paineenkehityskyky ei ole erityisen tärkeää. Keskipakokompressoreja käytetään tyypillisesti vedyn nesteytysprosessissa (Barbier, 2008) ja on ajateltu käytettäväksi myös vedyn siirtoputkiston komprimointiasemilla (Nexant, 2008b).

Eräs lupaava kompressoritekniikka on sähkökemiallinen kompressor, jonka toiminta perustuu membraanielektrodiin jonka lävitse vetykaasu siirtyy sähkövirran ajamana membraanin ollessa virroitettuna. Sähkökemiallisessa kompressorissa ei ole liikkuvia osia, joten tässä kompressorityypissä ei ole merkittäviä kulumis- ja tiivistysongelmia. Etuna tällä tekniikalla on myös verrattain korkea energiatehokkuus sekä pienet ulkomitat ja äänenön käynti. Tutkimus- ja kehitystyö eivät ole vielä niin pitkällä, että tällä tekniikalla olisi mahdollista komprimoida siirtoputkistoissa esiintyviä virtausmääriä. Tekniikkaa on kuitenkin kokeiltu pienen kokoluokan sovellutuksissa (Gao & Krishnamurthy, 2009) kuten hidastankkauskompressoreissa.

Eräs kiinnostava uusi tekniikka on Linden kehittämä *Ionic Liquid Compressor*, joka vapaasti suomennettuna on *Ioninestekompressor*. Ioninestekompressorissa mäntä on korvattu ionikylläisellä nesteellä. Nestettä pumpataan paineistuskammioon ja pois siten, että nesteen pinta toimii tilavuudensyrjäytyspintana. Kaasumainen vety ei voi diffuutoitua ionikylläiseen nesteeseen, josta seuraa että vety paineistuu kun paineistuskammion tilavuus pienenee nesteenpinnan kulloinkin kohotessa. Herkkien loppukäyttösovellutusten, kuten polttokennojen näkökulmasta tällä komprimointimenetelmällä on etunaan se, että vetyvirtaan ei myöskään muodostu voiteluainekontaminaatioita. (Barbier, 2010, s. 138.) Lisäksi tällä tekniikalla on etunaan se, että se mahdollistaa lähes isotermisen komprimoinnin. Tämä puolestaan johtaa verrattain pieneen ominaisenergiankulutuksen. Lisäksi tällaisessa kompressorissa ei ole suurta määrää liukutiivistyspintoja pienellä välyksellä, josta seuraa parempi tekninen luotettavuus.

Kaasumaista vetyä on mahdollista tuottaa myös nestemäisestä vedystä. Tällöin vety paineistetaan nestemäisessä faasissa ja höyrytetään vasta halutussa painetasossa. Menetelmä tunnetaan nimellä *pumppaus-höyrytys*-menetelmä. Tällä menetelmällä on etunaan se, että vetyä ei tarvitse komprimoida kaasufaasissa vaan paineistus voidaan tehdä tämä pienemmällä energiamäärällä nestefaasissa. Lisäetuna on myös, että menetelmällä saatava kryogeeninen pumppu on mitoitettavissa tuotoltaan vastaamaan nope-

ankin tankkauksen tarpeisiin. Tällöin jakeluasemilla ei tarvita suuria korkeapaineisia varastosäiliöitä kaasumaiselle vedylle vaan pumpun tuotto riittää kaikkiin kuviteltavissa oleviin tankkaustarpeisiin jo pienelläkin puskurisäiliöllä. Tämä menetelmä on käytettävissä vain silloin kun vetyä on saatavilla nestemäisessä muodossa. (Nexant, 2008a, Nexant, 2008c).

Nestevedyn höyrystämiseen pohjautuvasta *pumppaus-höyrystys* menetelmästä ja kaasumaisen vedyn komprimointimenetelmästä tunnetaan myös variaatio, jota kutsutaan nimellä *höyrystys-komprimointi-menetelmä*. Tässä menetelmässä vety toimitetaan jakeluasemalle nestemäisenä ja höyrystetään varastosäiliön paineessa. Näin höyrystettävä vety komprimoidaan tankkauksen vaatimaan painetasoon perinteisin menetelmin mekaanisella kompressorilla. Tässä menetelmässä menetetään *pumppaus-höyrystys-menetelmän* energiataloudellinen ja taloudellinen etu, joka tulee halvemmasta komprimointimenetelmästä. Tällaisia jakeluasemia tiedetään kuitenkin toteutetun erittäin pienessä jakeluasemakokoluokassa, jossa halutaan välttää epäsäännöllisestä kulutuksesta johtuvaa nestevedyn kiehumishäviötä. (Nexant, 2008c, s. 66.) Tätä menetelmää voisi olla järkevä soveltaa niissä tapauksissa, joissa jakeluaseman nestevedyn kiehumisesta johtuvat häviöt nousevat merkittäviksi. Kryogeenisen varastosäiliön painetason noustessa (kiehumisen seurauksena) kaasumaista vetyä on päästettävä säiliöstä, jolloin se on tuuletettava (FreedomCar, 2005, s. 31) ja poltettava soihdussa (Nexant, 2008c, s. 60). Soihdutettaessa vedyn energiasisältö hukataan, jolloin komprimointi voi olla mielekäästä kiehumishäviöiden ollessa suhteellisesti tarkastellen suuria.

Vedyn paineistuksen aikainen suhteellinen häviö siirto- ja jakelujärjestelmään kuuluvissa kompressoreissa on tyypillisesti luokkaa 0,2 ... 0,5 % (JEC, 2011e; Nexant, 2008a). Tämän työn mallinnuksessa lähtötietona käytetään 0,2 prosentin häviöosuutta.

5.2.2 Vedyn nesteytys

Vedyn nesteytysprosessi on varsin tunnettua tekniikkaa ja on ollut käytössä jo vuosikymmeniä ympäri maailmaa. Vedyn volumetristä lämpöarvoa on mahdollista kasvattaa nesteytysprosessilla, jossa vety syväjäähdytetään monivaiheisessa prosessissa sen kiehumispisteen alapuolella oleviin lämpötilaan (noin -253 °C). Tällöin vedyn olomuoto muuttuu kaasumaisesta nestemäiseen faasiin. Vedyn nesteytyksen yhteydessä on suoritettava vedyn riittävän jäähdytyksen lisäksi myös *ortho-para*—konversiona tunnettu vaihe. Tässä vaiheessa vedystä vapautuu niin kutsuttua latenttilämpöä. Latenttilämpö on johdettava pois hyvin alhaisessa lämpötilassa ja tämä osaltaan vaikuttaa nesteytysprosessin suureen ominaisenergiankäyttöön.

Vedyn nesteyttäminen on energiatehokkuuden näkökulmasta mitattuna kallis prosessi, koska nesteytyksen *sähköenergian* kulutus on tyypillisesti noin 20...30 % vedyn alempaan lämpöarvoon suhteutettuna (Yang & Ogden, 2007; Klell, 2010). Lisäksi nesteytyslaitokset ovat tyypillisesti monimutkaisia ja kalliita laitoksia, joiden perustaminen ei ole kannattavaa vedyn kysynnän ollessa vähäistä tai satunnaista. Nesteytyslai-

toksen kokoluokan kasvaessa on kuitenkin saavutettavissa suhteellista kustannushöyryä kapasiteettiysikköä kohden. (Yang & Ogden, 2007.)

Mikäli mainittua konversiota ei tehdä hallitusti nesteytyksen yhteydessä, tapahtuu reaktio myöhemmin varastoinnin aikana aiheuttaen nestevedyn kaasuumista ja merkittävää häviötä. (Züttel, 2008, s. 75; Petschka, 1992; Nexant, 2008a). Vedyn volumetrinen lämpöarvo saadaan kasvatettua näin kaasumaisen vedyn alemmasta volumetrisestä lämpöarvosta 157 MJ/m^3 (NTP) arvoon 8500 MJ/m^3 (NTP), joka on noin 54-kertainen edelliseen arvoon nähden. (Klell, 2010.) Kun vety nesteytetään, maantiekuljetusyksiköiden hyötykuorma on mahdollista kasvattaa esimerkiksi puoliperävaunun tapauksessa noin 180 - 540 kilogrammasta (200 bar) noin 2000 - 4000 kilogrammaan (noin 1 atm) (Barbier, 2010). Näin kuljetusyksiköiden tehokkuus kasvaa ja kuljetus on järkevämpää erityisesti pitkillä siirtoetäisyyksillä (Yang & Ogden, 2007).

5.2.3 Vedyn varastointi

Vetyä on varastoitava tasaamaan kysynnän ja tuotannon välisiä ajallisia ja määrällisiä eroja sekä toimitusvarmuuden vuoksi. Varastointia voidaan tarvita jakelujärjestelmän useammassakin eri vaiheessa mutta ainakin tuotantolaitoksella ja jakeluasemalla. Tuotantolaitosten ja jakeluasemien on kyettävä toimittamaan polttoainetta hetkellisistä kysynnän vaihteluiden vuoksi *tuntitason varastoilla*. Tuotantolaitosten on puolestaan varmistettava toimituskyky pidemmällä aikavälillä esiintyvistä kysynnän vaihtelusta ja tuotantokatkoksista huolimatta suuremman kokoluokan *bulkkivarastoilla*. Esimerkiksi Yhdysvalloissa vedyn bulkkivarastoja on arveltu tarvittavan varmistamaan polttoaineen toimituskyky myös kesäisin, jolloin polttoaineen kysyntä voi olla merkittävästi suurempaa kuin talviaikaan. Näiden lisäksi bulkki- ja tuntivarastokapasiteettia saatetaan tarvita myös mahdollisesti siirto- ja jakelujärjestelmään kuuluvissa väliterminaaleissa, maantiekuljetusyksiköiden jouhevan täytön takaamiseksi ja/tai toimitusvarmuuden takaamiseksi. (Nexant, 2008a.)

Tämän työn mallinnusosiossa on tehty sellainen olettaus, että kaasumaisen vedyn varastopaineen saavuttamiseksi tehtävä komprimointityö ei mene hukkaan. Tämä komprimointityö vähentää vastaavalla määrällä myöhempää komprimoinnin tarvetta esimerkiksi jakeluasemalla. Tämä lähestymistapa on perusteltavissa sillä huomiolla, että kaasumaiselle vedylle ei tarvitse tehdä siirto- ja jakeluketjuissa paineenalennuksia, vaan vedyn painetta on joka tapauksessa korotettava siirron ja jakelun mahdollistamiseksi perättäisissä siirto- ja jakeluketjun osissa.

Bulkkivarastointitekniikat

Vedyn bulkkivarastointi hoidetaan tuotantolaitoksilla mahdollisuuksien mukaan siinä muodossa, jossa vety siirretään jakeluasemille (Yang & Ogden, 2007). Mikäli vety siirretään kaasumaisessa muodossa putkitse, edullisin bulkkivarastointitekniikka on vedyn varastointiin soveltuvat maanalaiset geologiset muodostelmat, mikäli sellaisia on käytettävissä. Mikäli soveltuvia geologisia esiintymiä ei ole käytettävissä, seuraavaksi edulli-

sin bulkkivarastointimenetelmä on vedyn nesteytys ja varastoiminen kryogeenisissä varastosäiliöissä. Mikäli vety siirretään jakeluasemille kaasumaisena maantiekuljetuksiin, edullisin bulkkivarastointimenetelmä on sama kuin putkisiirron tapauksessa Tapauksissa, joissa vety siirretään tuotantolaitokselta jakeluasemalle nesteytettynä maantiekuljetuksiin, edullisin bulkkivarastointitekniikka nesteytetyn vedyn varastointi kryogeenisiin varastosäiliöihin. (Nexant, 2008a.)

Kaasumaista vetyä on mahdollista varastoida paineistettuna maanalaisiin geologisiin esiintymiin, kuten suolaesiintymiin ja ehtyneisiin öljy- ja maakaasulähteisiin. Näistä vain suolaesiintymien käyttöä tiedetään sovelletun vedyn varastointiin. Suolaesiintymät ovat lähes kaasutiiviitä, joka onkin tärkeä piirre vetykaasun varastoinnissa, kun tiedetään vedyn taipumus diffundoitua jopa joidenkin kiinteiden materiaalien lävitse. Toteutuneita geologisia vetyvarastoja tiedetään olevan ainakin Saksassa, Britanniassa (1 000 000 Nm³) sekä Yhdysvaltojen Teksasissa. (Barbier, 2010, s. 134.) Tunnettujen geologisten varastojen painetaso on luokkaa 81 - 160 bar (FreedomCar, 2005).

Lisäksi kaasumaisen vedyn varastointiin käytetään myös suuria painesäiliöitä, jotka sijoitetaan useimmiten maanpinnan yläpuolelle huollettavuuden sekä tarkastusten mahdollistamiseksi. Tällä tekniikalla toteutettujen varastojen suurin varastopaine on luokkaa 12-16 bar ja suurimmat tällä tekniikalla toteutetut varastot ovat tilavuudeltaan noin 15 000 m³. Varastosäiliö on mahdollista suojata ylikuumenemiselta ja ulkoisilta vaurioilta sijoittamalla se nesteellä täytettyyn altaaseen, jolloin tarkastettavuus ja huollettavuus on mahdollista saavuttaa nestepinnantason laskulla. Suurten painesäiliöiden painetaso on, kuten yllä mainittu, varsin vaatimaton (Barbier, 2010, s. 135) ja investointikustannukset varastokapasiteettiin nähden korkeat (Yang & Ogden, 2007), joten varastointitekniikan tarkoituksenmukaisuus on harkittava tapauskohtaisesti.

Vedyn varastointi nesteytettynä on yleisin tapa varastoida suuria määriä vetyä. Nesteytetyn vedyn volumetrinen lämpöarvo on nestemäisessä faasissa merkittävästi parempi kuin nykytekniikalla saavutettavat paineistetun kaasumaisen vedyn energiatiheyden arvot. Tämä luonnollisesti edellyttää, että vety on nesteytettävä ennen varastointia prosessilla, joka on tunnettu energiatehottomuudestaan ja pääomaintensiivisyydestään. (FreedomCar, 2005.) Nestemäisen vedyn bulkkivarastointiin soveltuvan kryogeenisen varaston investointikustannus on kuitenkin verrattain edullinen vastaavan varastokapasiteetin kaasumaisen vedyn painesäiliövarastointimenetelmään nähden. Nesteytetyn vedyn varastoratkaisun kustannusetu voi kadota nesteytyslaitoksen vaatiman suuremman alkuinvestoinnin alle. Näin ollen järkevin varastointimenetelmä on harkittava tapauskohtaisesti. (Yang & Ogden, 2007.)

Kryogeeninen varastosäiliö voi olla joko sylinterin- tai pallonmuotoinen, suuret säiliöt rakennetaan yleensä pallonmuotoisiksi edullisen pinta-ala-tilavuussuhteen ja sitä kautta mahdollisimman alhaisen kiehumisnopeuden saavuttamiseksi. (FreedomCar, 2005.) Tunnetut kryogeeniset varastosäiliöt on eristetty tyhjiömonikerrosrakenteella ja säiliöitä tiedetään olevan yleisesti kokoluokissa 1,5-75 m³. (Barbier, 2010.) Nestemäisen vedyn höyrystymisnopeus on sidoksissa varastosäiliön kokoon ja täyttöasteeseen sekä muotoiluun. Pienemmän kapasiteetin säiliöissä höyrystymisnopeus on suurempi

johtuen suuremmasta lämmönsiirtopinta-alan ja nestevedyn tilavuuden suhteesta (FreedomCar, 2005; Züttel, 2008b.) Suurin tiedossa oleva kryogeeninen varastosäiliö on tilavuudeltaan noin 3800 m³ ja varastokapasiteetiltaan noin 270 tonnia. Mainittu säiliö sijaitsee Cape Carnivalin avaruustukikohdassa Kaliforniassa ja höyrystymisnopeus tässä säiliössä on noin 0,03%/vuorokausi, joka mahdollistaa nestemäisen vedyn varastoinnin huomattavan pitkäksi ajaksi. (Peschka, 1993; Barbier, 2010) Kryogeeninen säiliö on myös mahdollista sijoittaa maanpinnan alapuolelle, jolloin se on suojassa ulkopuolisilta mekaanisilta vaurionaiheuttajilta ja on usein maankäytön näkökulmasta pinta-asennusta parempi ratkaisu. Ainakin Britanniassa ja Saksassa tiedetään olevan jakeluasemia, joissa kryogeeninen varastosäiliöt on asennettu maanpinnan alapuolelle. (Barbier, 2010.)

Tuntitason varastotekniikat

Jakeluaseman edullisin tuntitason varastointitekniikka on vedyn putkisiirron tapauksessa varastointi painesäiliöistä koostetuissa pullopatteristossa, esimerkiksi noin 170 bar:in paineessa (Nexant, 2008a). Jakeluaseman tuntivaraston täyttö tapahtuu silloin kun vedyn kulutus on alhaista, tällöin kompressori pumppaa vetykaasua jakeluputkesta (~20 bar) paineesta välivaraston paineeseen (~170 bar). Suuren kulutuksen aikana kompressori pumppaa vetyä sekä jakeluputkesta että välivarastosta. Sopiva tuntivaraston kapasiteetti voi olla esimerkiksi luokkaa 0,3 päivän kulutusta vastaava määrä. (Nexant, 2008a, s. 2-10[30]).

Putkisiirron tapauksessa on mahdollista, että myös siirtoputki voi jo itsessään toimia tuntitason varastona, mikäli sen tilavuus ja sallittu painevaihtelun taso mahdollistavat riittävän varastointikapasiteetin tarpeeseen nähden. Tuntitason varastointi on mahdollista toteuttaa putkisiirron tapauksessa myös putkihalkaisijoiden ylimitoituksella, mikäli putkiston sallittu tilavuus ja painevaihtelutaso eivät muutoin mahdollista tyydyttävää varastointikapasiteettia. Tyypillistä on kuitenkin, että putkiston investointikustannukset nousevat putkihalkaisijaa kasvatettaessa. Tämä johtaa hyöty-kustannus-perustein tehtävään optimointitehtävään. (Nexant, 2008a.)

Kun vety kuljetetaan jakeluasemalle nestemäisessä muodossa maantiekuljetuksin, jakeluasema ei tarvitse erillistä tuntitason varastoa, vaan jakeluasemien kryogeeniset säiliöt palvelevat myös tätä tarkoitusta. Tuntivarastointi saattaa kuitenkin olla tarpeen vedyn maantiekuljetusyksiköiden lastaus/väliterminaalissa. Soveltuva koko varastolle voi olla tällaisessa tapauksessa luokkaa 0,25 vuorokautisesta virrasta. (Nexant, 2008a.) Jakeluaseman kryogeenisten varastosäiliöiden soveltuva kapasiteetti on luokkaa kaksi maantiekuljetusyksiköllistä.

Mikäli kaasu toimitetaan jakeluasemalle kaasumaisena maantiekuljetuksin, vaihdettava maantiekuljetusyksikkö palvelee samalla tuntitason varastona. Tällöin ei tarvita erillistä varastoa lyhytaikaisen kulutushuipun vuoksi. (Nexant, 2008a, s. 1-10.)

Kryogeenisessä varastoinnissa tapahtuvan suhteellisen päivähäviön osuus on sidoksissa varastoitavan aineen määrään sekä varaston lämpöä johtavaan pinta-alaan. Lisäksi myös säiliön eristeiden lämmönjohtavuus sekä säiliön muotoiluun vaikuttavat suh-

teellisen häviön suuruuteen. 100 m³ säiliöllä tyypillinen päivittäinen kiehumishäviö on luokkaa 0,2 % (Barbier, 2010) ja aiemmin mainitussa Cape Carnivalin 4000 m³ säiliössä noin 0,03 %. Kaasumaisen vedyn varastointi puolestaan voidaan olettaa häviöttömäksi.

Muut varastointitarpeet

Jakeluasemalla kaasumaiselle vedylle tarvitaan korkeapaineista varastokapasiteettia tasaamaan kompressorin kuormitusta ja jouduttamaan tankkaustapahtumaa. Näitä jakeluaseman korkeapaineisia säiliöitä kutsutaan puskurisäiliöiksi ja näiden suurin vaadittava painetaso riippuu ajoneuvon tankkausaineesta. Useimmat tunnetut kaasumaisen vedyn tankkausasemat on suunniteltu toimittamaan polttoaine ajoneuvoihin joko 350 tai 700 bar paineessa (Barbier, 2010). Tällöin puskurisäiliöiden suurin vaadittu painetaso on vastaavasti joko 400-500 bar tai 850-1000 bar. Jakeluaseman puskurisäiliöratkaisu toteutetaan yleensä kaskadikytkennällä (HyApproval, 2008), mutta säiliöt on mahdollista kytkeä myös samaan painetasoon (Farzaneh-Gord et al., 2012).

Tyypillisessä kaskadikytkennässä 3 painesäiliötä/painesäiliöryhmää kytketään rinnan siten, että ne eristetään toisistaan venttiilein. Säiliöiden pienimmät toiminnanaikeiset painetasot ovat erisuuruiset ja eri painetasoissa toimivia säiliöitä/säiliöryhmiä kutsutaan eri nimillä (*Low pressure*-, *Mid pressure*- ja *High pressure bank*). Nimitykset tulevat sen mukaan, missä painetasoissa ne alimmillaan toimivat. Ylin painetaso on kaikilla säiliöryhmillä yhteinen ja niin ollen Low-ryhmän säiliöissä tapahtuu suurin painevaihtelu ja High-ryhmässä pienin (Farzaneh-Gord et al., 2012.) Eri säiliöryhmien täyttymistä ja tyhjenemistä on mahdollista säädellä yksitellen, joka mahdollistaa tankkauksen aikaisen tyhjentyneiden säiliöiden täytön ja niin ollen valmistautumisen seuraavaan tankkaustapahtumaan.

Yksittäiset paineiset kaasumaisen vedyn paineiset varastosäiliöt on jaoteltu neljään eri luokkaan (tyypit I-IV) niiden rakenteellisen ratkaisun mukaan. (FreedomCar, 2005) Kaupallisesti saatavilla olevat kaasumaisen vedyn varastointiin soveltuvat pitkänomaiset lieriömäiset paineastiat on valmistettu yleensä austeniittisestä teräksestä ja luokitellaan tyypin I säiliöiksi. Myös muita vetyä sietäviä materiaaleja, kuten alumiinia ja kuparia tiedetään käytetyn (Züttel, 2008b). Tyypin I säiliöitä on kaupallisesti saatavilla 2,5-50 litran nettotilavuusluokissa ja painetasoon 300 bar saakka. Tällaiset kokometalliset säiliöt ovat painavia, mutta turvallisiksi ja lujiksi todettuja. Ongelmana tämän tyypin säiliöissä on pieni hyötykapasiteetti suhteutettuna säiliön omamassaan.

Paineastioita, joissa kuitukerros kattaa vain lieriön pitkänomaisen seinämän ja ei paineastian päätyjä, kutsutaan tyypin II painesäiliöiksi. (Klell, 2010,) Tällä tekniikalla toteutetun säiliön painetaso on sama kuin tyypin I säiliöissä, mutta omamassa pienempi johtuen pienemmästä metallivuorauksen paksuudesta lieriöosassa.

Säiliöitä jotka on vahvistettu kauttaaltaan kuitukerroksella ja joiden kaasutiivis sisäosa on metallia, luokitellaan III-tyypin painesäiliöiksi. Kaupallisesti saatavilla olevien III-tyypin säiliöiden nimellispainetaso voi olla joko 350 tai 700 bar, nimellistilavuus 100 litraa ja omamassa huomattavasti pienempi kuin I-tyypin säiliöllä (50 litran säiliöllä

jopa 54 kg vs. 94 kg). Kuituvahvistus vähentää metallivuorauksen vaadittua paksuutta ja niin ollen lisää hyötykapasiteetin ja omamassan suhdetta huomattavasti. Tämän tyyppin säiliöitä käytetään myös ajoneuvojen polttoainesäiliöinä.

Tyyppin IV-säiliön rakenteessa myös kaasutiivis sisäosa on toteutettu synteettisellä ei-metallisella vuorauksella (Klell, 2010, s. 12), kuten esimerkiksi polymeerillä (Barbier, 2010, s. 131). Kaupallisesti saatavien IV-tyypin nimellispaineet ovat 350 bar ja 700 bar, nimellistilavuus 120 litraan saakka ja lisäksi näiden omamassa on pienempi kuin samankokoisissa III-tyypin säiliöissä. Myös IV-tyypin painesäiliöt soveltuvat käytettäväksi ajoneuvojen polttoainesäiliöinä. (Klell, 2010, s. 13)

Kaikentyyppisille paineastioille yhteinen piirre on se, että nimellispainetasoa nostettaessa myös seinämälujutta on kasvatettava. Tämä johtaa siihen, että säiliöiden massa sekä myös hintataso kasvavat nimellispainetasoa nostettaessa. Kuituvahvisteiset (tyypit II ja III) ja kokonaan komposiitista valmistetut (tyyppi IV) säiliöt ovat tyypillisesti kalliimpia kuin tyyppin I kokometallisäiliöt, johtuen erityisesti kuitumateriaalin verrattain korkeasta hinnasta. (Klell, 2010.) Näistä johtuen soveltuva painetaso sekä säiliörakenne on ratkaistava tapauskohtaisesti hyöty-haitta-optimointimenetelmällä siten että painetason korotuksen tuoma hyöty on suhteutettava omamassan ja kustannusten nousuun (Züttel, 2008b). Korkeapaineista kaasumaisen vedyn säiliötekniikkaa koskeva säiliötekniikka ja sen vaatimuksia säädellään ISO-standardilla ISO/TS 15869:2009, jonka asettamat rajoitteet on huomioitava erilaisia varastointimenetelmiä suunniteltaessa.

Muut varastointitekniikat

Kryogeenisen ja kaasumaisen varastoinnin lisäksi kehitteillä on myös muita varastointitekniikoita, joiden kehittelyyn motivoi joko suurempi varastokapasiteetti tai edullisempi hintataso. Vetyä on mahdollista siirtää ja jaella esimerkiksi erilaisten kemiallisten *vedynkantaja*-yhdisteiden avulla, jotka ovat teknisesti helpommin käsiteltävissä kuin nestemäinen tai kaasumainen vety. Ongelmana näissä menetelmissä on energiaintensiiviset hydraus- ja dehydrausprosessit, jotka saattavat heikentävää jakelujärjestelmän energiahyötysuhdetta. (Barbier, 2010, s. 133.)

Eräänä kehityksen suuntana mainittakoon myös erilaiset adsorptiomenetelmät, joissa vety sidotaan adsorptiolla esimerkiksi aktiivihieleen tai metalleihin. Tällöin vedyn varastointi olisi mahdollista painesäiliövarastointia alhaisemmissa painetasoissa.

Eräs kehityksen suunta säiliötekniikoissa on paineiset kryogeeniset säiliöt. Lämpöeristetty säiliö pitää varastoitavan vedyn lämpötilan alle -193 °C ylläpitojäähdytyksen avulla ja säiliön nimellispainetaso mahdollistaa kaasunpaineen nousun luokkaa 200-400 bar oleviin paineisiin. Tällä menetelmällä olisi mahdollista parantaa nesteytyksen energiatehokkuutta, koska energiaintensiivinen ortho-para—konversio jäisi tarpeettomaksi. Lisäksi tällä tekniikalla toteutettuun varastosäiliöön on mahdollista varastoida myös kaasumaista vetyä sekä ympäristön lämpötiloissa että kryogeenisissä lämpötiloissa. Menetelmän heikkoutena kuitenkin tiedetään, että säiliöratkaisu tarvitsee erillisen järjes-

telmän ylläpitojäähdytykseen. Tämä puolestaan kuluttaa energiaa ja näin heikentää siirto- ja varastointimenetelmän energiatehokkuutta. (FreedomCar, 2005.)

5.2.4 Kuljetus

Kaasumaisen vedyn maantiekuljetus

Vetyä kuljetetaan yleisesti kaasumaisena maantiekuljetuksien tuotantolaitoksilta erilaisiin teollisuuden käyttökohteisiin erityisesti tapauksissa, joissa kulutus on luokkaa (1-50 Nm³/h). Kuljetusyksikkö toimii yleisesti toteutustavasta riippumatta loppukäyttökohteen vaihdettavana varastona, joka vaihdetaan aina tarpeen vaatiessa täytettyyn kuljetusyksikköön (Yang & Ogden, 2007). Kuljetusyksikkö voi koostua yhdestä tai useammasta I- tai II-tyypin kaasusäiliöstä jotka on kytketty kiinteästi kuljetusalustansa (perävaunu) tai vaihtolavaan. Lisäksi eräänä kuljetus- ja jakelutapana on käytetty myös sellaista ratkaisua, jossa pullot on kytketty sopivina määrinä helposti käsiteltäviin pullotelineisiin. (Barbier, 2010; Korjala, 2011) Kuljetusalustana voi toimia käyttötärpeestä ja alueesta riippuen mikä tahansa tavarankuljetusajoneuvo, joka on hyväksytty käytettäväksi tämän tyyppisten vaarallisten aineiden kuljetuksessa. Tyypillisessä kaasumaisen vedyn kuljetusyksikössä on 12–20 kokometallista kaasusäiliötä (tyyppi I) (Yang & Ogden, 2007) joiden painetaso on tyypillisesti luokkaa 200 - 300 bar (HyApproval, 2008, s. 39; Barbier, 2010, s. 129).

Kaasumaisen vedyn maantiekuljetusyksikön hyötykuormakapasiteetti on saatu nostettua viimeisimmillä teknisillä oivalluksilla jopa 600 kilogrammaan (250 bar, säiliötyyppi IV) (Barbier, 2010, s. 130). IEA:n mukaan tyypillisen kuljetusyksikön hyötykuorma on kuitenkin vain luokkaa 300 kg (200 bar). Tyypillinen 300 kg kuorma kaasumaista vetyä riittäisi jakeluasemalla noin 60 ajoneuvon tankkaukseen (5 kg/tankkaus). Maantiekuljetusten hyötykuormakapasiteettia olisi mahdollista lisätä kuljetussäiliöiden painetason nostolla nykyisin käytetystä 200 bar:sta esimerkiksi 520 bar:iin, jolloin hyötykuormakapasiteetti voisi nousta noin 900 kilogrammaan. Tällainen määrä riittäisi jo 180 henkilöauton tankkaamiseen. (IEA, 2012, s. 242.) Kaasumaisen vedyn maantiekuljetusyksiköiden hyötykuormakapasiteettia laskee osaltaan se, että kuljetusyksikön säiliöitä ei voida kokonaan tyhjentää. Varastosäiliöihin jää aina jonkin verran kaasumaista vetyä, jota ei voida hyödyntää käyttökohteessa alhaisessa painetasossa (Nexant, 2006).

Kaasumaisen vedyn maantiekuljetuksen etuna on kuljetusyksiköiden verrattain alhaiset alkuinvestoinnit muihin kuljetusmenetelmiin nähden, mutta menetelmän heikkoutena on alhainen hyötykuormakapasiteetti (IEA, 2012, s. 242). Tästä johtuen toimintustiheyden on oltava suurempi verrattuna nestemäisen vedyn maantiekuljetuksiin (Barbier, 2010).

Kaasumaisen vedyn putkisiirto

Kaasumaisen vedyn putkisiirtoa käytetään yleisesti kemian ja petrokemian teollisuudessa, jossa siirrettävät määrät voivat olla jopa kymmeniä tuhansia normikuutioita tunnissa. Tunnettujen vedynsiirto-putkien pituudet ovat sadoista metreistä muutamiin satoihin kilometreihin. Euroopassa vedynsiirto- ja jakeluputkistoa arvioidaan olevan noin 1600 km ja Pohjois-Amerikassa noin 1100 km. Lisäksi pienempiä putkisiirtojärjestelmiä tiedetään olevan muun muassa Thaimaassa, Indonesiassa, Brasiliassa ja Pohjois-Afrikassa. Vanhin yhä käytössä oleva siirto-putkisto on Air Liquide-yhtiön hallinnassa ja toimii Ruhrin alueella Saksassa, putkisto on otettu käyttöön vuonna 1938. (Barbier, 2010.)

Putkisto koostuu yleensä *siirto-* ja *jakeluputkistoista*, joista siirto-putkisto on halkaisijaltaan suurempi ja tarkoitettu suurten kaasumäärien siirtoon pidemmällä etäisyyksillä. Jakeluputkistoa puolestaan käytetään vedyn siirtoon matalammassa painetasossa jonkin rajatun alueen sisällä siirto-putkiston ääreltä käyttökohteisiin kuten jakeluasemille. Siirto-putkiston painetaso on tyypillisesti luokkaa 35-100 bar ja halkaisija tyypillisesti < 300 mm. Jakeluputkiston painetaso puolestaan on luokkaa 14-28 bar ja halkaisija tyypillisesti >10 mm. (FreedomCar, 2005; Barbier, 2010.)

Mikäli vedyn putkisiirto tehdään samassa painetasossa kuin jokin maakaasun putkisiirto, vedyn putkisiirron kapasiteetti on energiassa mitattuna 30 % vähemmän kuin vastaavan maakaasun siirto-putkiston tapauksessa. Tämä on seurausta vedyn alhaisemmasta volumetrisestä lämpöarvosta (MJ/m^3). Mikäli energiansiirtokapasiteettia halutaan korottaa, siirto-painetta korotettava tai putken halkaisijaa kasvatettava. Näistä voi seurata lisärajoituksia siirto-putkiston materiaalivalinnoille. (Barbier, 2010.)

Nykyään tunnetut vedyn siirto- ja jakeluputkistot palvelevat yksinomaan teollisuusprosessien syötevedyn siirtoa. Tästä seuraa että tunnettujen putkistojen virtausmäärät ja myös painetasot eivät juuri vaihtelee ennakoimattomasti. Mikäli siirto- ja jakeluputkisto rakennetaan energiansiirtotarkoitukseen, putkistoissa tulee esiintymään merkittävää painevaihtelua joka on seurausta käyttömäärien vaihtelusta (Barbier, 2010). Tästä seuraten on mahdollista että siirto-putkiston on suunniteltava ylemmän nimellispainetason osalta jopa 200 bariin, jotta siirto-putkisto kykenee toimittamaan kaasua luotettavasti myös äkillisten kulutushuippujen aikana (Gao & Krishnamurthy, 2009).

Vety altistaa siirto-putkiston hiiliteräsmateriaalit vetyhaurastumiselle, jonka vuoksi siirto-putkistoissa käytetään erityisiä matalalajuusteräksiä. Putkimateriaalien kehitys edelleen on tarpeen, ennen kuin putkisiirtoa voi ajatella sovellettavaksi suuren mittakaavan energiansiirtojärjestelmäksi. Eräänä mahdollisena putkistomateriaaliratkaisuna on nähty kuituvahvisteiset polymeerikomposiittimateriaalit, jotka eivät ole alttiita vetyhaurastumiselle tai korroosiolle. Tällä materiaalivalinnalla saattaisi olla tarjottavanaan etuja myös putkiasennusten aikaisessa käsiteltävyydessä ja kustannuksissa. Komposiittiputkien valmistustekniikat eivät vielä mahdollista suurten siirto-putkistojen edellyttämiä putkenhalkaisijoita, kuten teräspankputkien valmistustekniikat. (Barbier, 2010.)

Vetykaasua on mahdollista siirtää myös nykyisissä maakaasuun siirto- ja jakeluputkistoissa, mutta kaasuvirran vetypitoisuus rajoittuu alhaiseksi putkistomateriaalien ominaisuuksista johtuen. IEA:n (2012, s. 244) mukaan luonnonkaasuputkistoissa saat-taisi olla mahdollista siirtää jopa 20 % tilavuusosuuksia kaasumaista vetyä, mutta tällöin

putkiston teknisiin ratkaisuihin sekä loppukäyttösovellutuksiin olisi tehtävä muutoksia. Barbier:n mukaan tyypilliset luonnonkaasuputkiston teräkset (API X52 & X 60) saattavat kärsiä vetyhaurastumisesta, kun vetyä siirretään yli 25 % tilavuusvirtaosuuksina. Mikäli vetyä halutaan toimittaa käyttöpaikoille luonnonkaasuun seostettuna, vety olisi myös kyettävä erottamaan luonnonkaasusta jollakin luotettavalla tekniikalla. Membraanierotustekniikka soveltuu tällaiseen tarkoitukseen, mutta ei ole vielä yleisesti käytössä. (Barbier, 2010.)

Nesteytetyn vedyn maantiekuljetus

Nesteytetty vety siirretään tuotantolaitoksilta toimituskohteisiin maantiekuljetuksin kryogeensillä kuljetusyksiköillä, joista kuorma puretaan toimituskohteen kryogeenisiin varastosäiliöihin. Mainittua kuljetusmenetelmää on käytetty jo vuosikymmeniä esimerkiksi Pohjois-Amerikassa avaruusrakettien nestevetypropellantin toimituksiin (Peschka, 1993). Yhden maantiekuljetusyksikön nettotilavuus on tyypillisesti luokkaa 50 - 60 m³ hyötykuormakapasiteetin ollessa luokkaa 2000 – 4000 kg (FreedomCar, 2005; Barbier, 2010; Korjala, 2011). Tällä menetelmällä saavutettava hyötykuorma on merkittävästi suurempi kuin paineistetun vedyn maantiekuljetusyksiköiden vastaava arvo (~300 kg). Näin ollen tällä menetelmällä voidaan toimittaa jokin vetymäärä huomattavasti vähäisemmällä kalustomäärällä kuin vertailumenetelmällä. Näin ollen myös kuljetusyksiköiden investointi- ja operointikustannukset olisivat pienemmät kuin vertailumenetelmässä kuljetettua määrää kohden. (Yang & Ogden, 2007.)

5.2.5 Väliterminaalit

Tunnetut väliterminaalit toimivat tyypillisesti nesteestä-kaasuksi-periaatteella, jolloin vety toimitetaan terminaaliin nestemäisessä olomuodossa ja paineistetaan sekä höyrytetään kaasumaiseen muotoon edelleen toimitettavaksi. Vety toimitetaan terminaaleista edelleen käyttökohteisiin kaasumaiselle vedylle soveltuvin maantiekuljetusyksiköin. (FreedomCar, 2005, s. 25.) Väli- ja jakeluterminaleille ennustetaan merkittävää roolia jakelujärjestelmän kokoonpanossa, mikäli vedyn energiakäyttö laajenee merkittävään rooliin. Kaasu voitaisiin toimittaa tuotantolaitoksilta terminaaleihin esimerkiksi putkitse, joissa se nesteytettäisiin, varastoitaisiin ja joista se edelleen toimitettaisiin nesteytetynä tai kaasumaisena maantiekuljetuksin käyttökohteisiinsa. (Nexant, 2008b.)

5.2.6 Jakeluasemat

Jakeluaseman tehtävänä on jakaa tuotettu ja tuotantolaitokselta kuljetettu vetypolttoaine loppukäyttösovellutuksiin, jotka ovat liikennepolttoaineiden tapauksessa ajoneuvoja. Jakeluasema, tai tarkemmin ilmaistuna jakelumittari aputoiminnallisuuksineen, on asiakkaan käyttörajapinta valmistus-, kuljetus- ja jakeluinfrastruktuuriin (Barbier, 2010). Teknisessä mielessä jakeluaseman tehtävänä on siirtää vety toimitusketjusta ajoneuvon polttoainesäiliöön, vieläpä oikeassa muodossa.

Yleistä jakeluasematekniikkaa

Jakeluasemien tuntitason varastotekniikat samoin kuin kompressorit on kuvattu varastointitekniikoita ja kompressoreita käsittelevissä luvuissa. Myös jakeluasemien korkeapaineisten vetykaasun varastosäiliöiden kaskadikytkentämenetelmä on kuvattu varastointitekniikoita käsittelevässä luvussa. Tässä luvussa käsitellään jakeluasemien yleisimmät tekniset ratkaisut yleisellä tasolla.

Vedyn vähittäisjakelu on toteutettavissa erilaisin jakeluasemaratkaisuin. Näiden tekniset toteutukset eroavat toisistaan sen mukaan, mitä vedyn kuljetusmuotoa käytetään (IEA, 2012, s. 242) sekä sen mukaan, missä muodossa vety tankataan ajoneuvoon. Tässä työssä käsitellään pelkästään kaasumaisen vedyn tankkaukseen soveltuvia jakeluasemaratkaisuja.

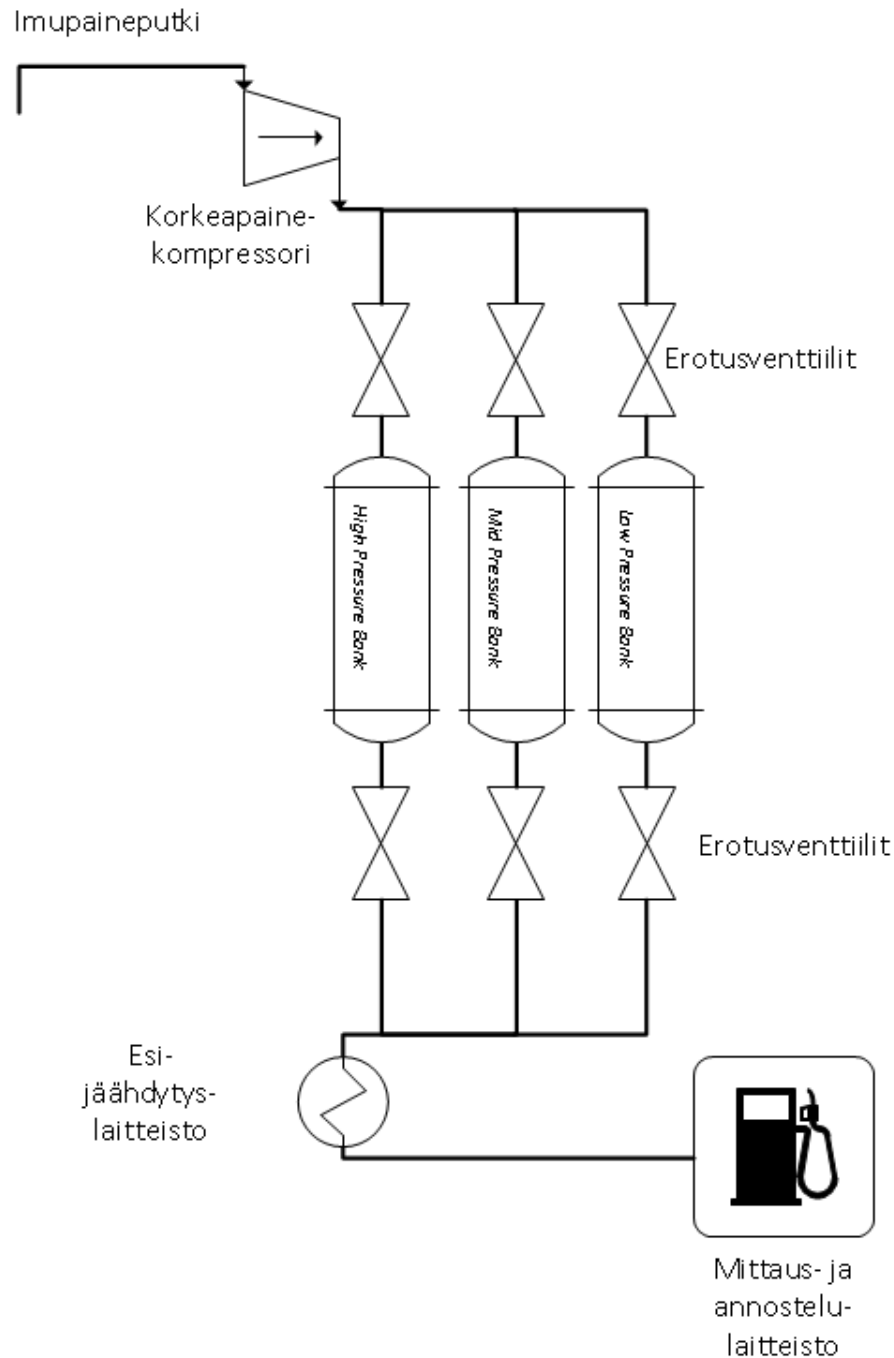
Jakeluasemat rakennetaan yleensä kiinteiksi, mutta myös liikuteltavia tankkausasemia tiedetään toteutetun pienempiin käyttötarpeisiin (Fuel Cell 2000, 2012). Maailmanlaajuisesti tieliikenteen käyttöön soveltuvia tankkausasemia on toiminnassa mukaan 226 kappaletta (h2stations, 2012). Toisen lähteen mukaan toiminnassa olevien asemien lukumäärä maailmanlaajuisesti olisi 140 kappaletta (Fuel Cells 2000, 2012). Osa jakeluasemista on julkisia, osa yksityisiä ja osa liikuteltavia, osa kiinteitä. *fuelcells*-sivuston mukaan ainakin 99 asemaa jakelee kaasumaista vetyä ja 10 jakelee hytaania joka on vedyn ja maakaasun seosta. Lisäksi ainakin 16 asemaa jakelee nestemäistä vetyä sekä osa asemista jakelee useampaa edellä mainittua polttoainelaatua. Jotkin näistä asemista saavat vetypolttoainetoimitukset kokonaan tai osittain keskitetyistä tuotantolaitoksista tai teollisuuden sivutuotevetyvirrasta. Vedyn siirto- ja jakelumenetelminä on mainittu näiden asemien tapauksissa putkikuljetus, kaasumaisen vedyn maantiekuljetus ja nesteytetyn vedyn maantiekuljetus. Lisäksi jotkin asemat tuottavat vetyä omilla tuotantoyksiköillään (elektrolyysi, erilaisten hiilivetyjen reformointi ja hiilen kaasutus) (Fuel Cells 2000, 2012). Tätä tuotantotapaa kutsutaan yleisnimikkeellä hajautettu tuotanto. Lähteenä käytetyssä taulukossa on vajavaisuuksia ja kaikkien asemien toteutustavoista ei saa selvää käsitystä lähteen tietojen perusteella. Näin ollen yllä mainitut kappalemäärät ovat vähimmäismääriä, jotka on koostettu lähteen tietojen pohjalta.

Kaasumaisen vedyn virtaus jakelumittarilta ajoneuvon polttoainesäiliöön vaatii tapahtuakseen painegradientin, jossa jakeluaseman painejärjestelmän nimellinen painetaso on ajoneuvon polttoainesäiliön nimellispainetta huomattavasti korkeampi (Klell, 2010). Jos vety tankataan nimellispaineeseen 350 bar, jakeluaseman järjestelmäpaineen on oltava luokkaa 400-500 bar ja 700 bar:n nimellispaineeseen tankattaessa, järjestelmäpaineen on oltava luokkaa 850-1000 bar (HyApproval, 2008). Tällaiset jakeluaseman järjestelmäpaineet on saavutettavissa monin eri tavoin, mutta yksinkertaisimmillaan jakeluaseman vedyntoimitus tapahtuu muualla paineistetuilla korkeapaineisilla säiliöillä, joiden painetaso riittää tankkaustapahtuman aikaansaamiseksi. Tällöin jakeluasemalla ei tarvita erillistä komprimointia ja aseman tekninen toteutus on verrattain yksinkertainen.

Paine-eron voi muodostaa myös kaasumaisen vedyn suoralla komprimoinnilla siirtoyksikön tai siirtoputken paineesta haluttuun painetasoon. Kolmantena toteutustapana on kaasumaisen vedyn komprimointi jakeluaseman korkeapaineisiin puskurisäiliöihin (esimerkiksi kaskadiin kytketyt säiliöt) ennen tankkaustapahtumaa. Tällöin yksittäisen tankkaustapahtuman kesto ei ole riippuvainen kompressorin tuotosta. Mainittu menetelmä tunnetaan englanninkielisellä termillä *Fast-Filling*, jolloin tankkaustapahtuman kesto on henkilöautoilla noin 2-3 minuuttia ja raskailla ajoneuvoilla luokkaa 12 minuuttia. (HyApproval, 2008, s. 39.) Nämä ovat erinomaisia arvoja esimerkiksi akkusähköisen auton latausaikoihin nähden, jotka mitataan tyypillisesti tunneissa minuuttien sijaan.

Kiinteät kaasunjakeluasemat

Tyypillinen kaasumaisen vedyn kiinteän jakeluaseman koostuu kompressorista, korkeapaineisesta puskurivarastosta, esijäähdyttimestä sekä mittaus- ja annostelulaitteistosta. Annostelulaitteistoon sisältyy mittaus- ja annostelulaitteet sekä ajoneuvoon sopiva tankkausyhde (Kuva 5.2). Jakeluaseman kokoonpanoon kuuluu myös turvallisuuden ja järjestelmän ohjaukseen sekä valvontaan liittyviä laitteita aputoiminnallisuuksineen. (Weinart & Lipman, 2006; HyApproval, 2008.)



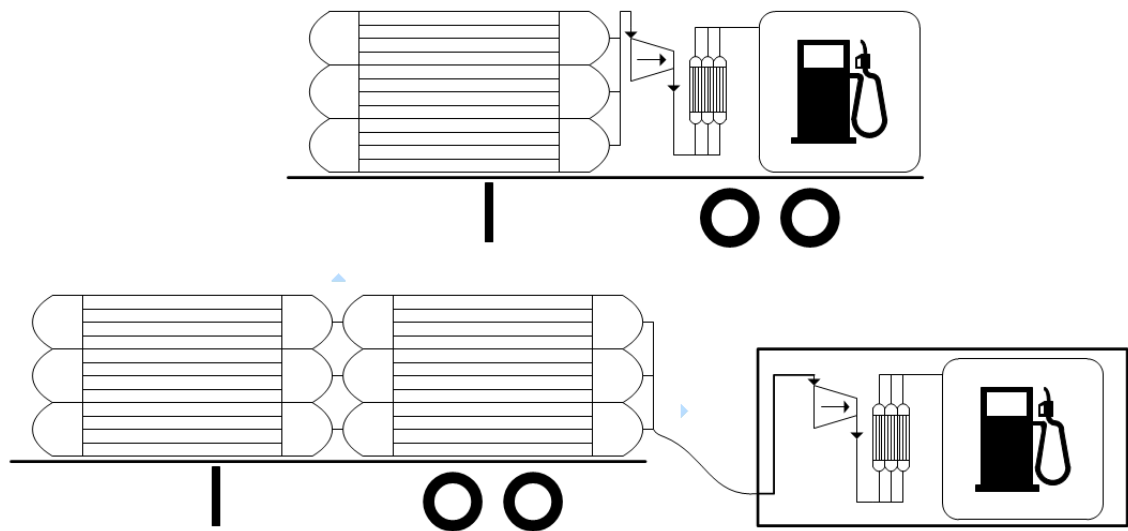
Kuva 5.6 Tyypillisen kaasumaisen vedyn jakeluaseman pääkomponentit (mukailten: HyApproval, 2008; Nexant, 2008b)

Jakeluaseman yhteyteen on mahdollista lisätä tarpeen vaatiessa matalapaineinen (esim. ~170 bar) tuntitason varasto tai esimerkiksi pienen kokoluokan vedyn tuotanto-yksikkö, jolla vety tuotetaan hajautetusti keskitetyn tuotannon sijaan. Mikäli vety toimittetaan jakeluasemalle kaasumaisena maantietoiimituksin, kuljetusyksikön varastosäiliöt toimivat tuntitason varastona. Lisäksi näiden painetasoa voidaan hyödyntää kytkemällä tämän säiliöt osaksi jakeluaseman kaskadijärjestelmää. Tällöin vain kuljetusyksiköiden painetasoa ylittävä osuus tarvitsee komprimointia (Yang & Ogden, 2007).

Kaasumaisen vedyn paineenkorotus siirtoyksikön/siirtoputken tai kuljetusyksikön paineesta tankkauspaineeseen vaatii asemalle kompressorin, joka on taloudellinen lisärasite muutenkin kalliin infrastruktuurin investointikuormassa (IEA, 2012, s. 242). Tämän ongelman kiertämiseksi on kehitetty erilaisia menetelmiä, jotka mahdollistaisivat jakeluaseman toiminnan ilman kaasumaisen vedyn komprimointia. Näitä sivutaan tulevaisuuden jakeluasematekniikan kehityksen suuntauksia käsittelevässä alaluvussa.

Mobiilit kaasunjakeluasemat

Huomattava osa nykyisistä tunnetuista vedyn jakeluasemista on liikuteltavia ratkaisuja (*Mobile Fuelers*) (Fuel Cells 2000). Liikuteltava jakeluasema on toteutettavissa erilaisin teknisin ratkaisuin, mutta yhteisenä piirteenä näillä on jakeluaseman helppo liikuteltavuus ja se, että nämä eivät tarvitse välttämättä kiinteitä asennuksia toimiakseen. Tämän tyyppisiä ratkaisuja on mahdollista käyttää esimerkiksi kiinteän jakeluasemaverkoston lisänä kattavuuden ja huoltovarmuuden lisäämiseksi. Täyskäytöllä olevan liikuteltavan jakeluaseman investointikustannukset jaeltavan vedyn määräyksikköä kohden ovat tyypillisesti suuremmat kuin kiinteän aseman tapauksessa. Näiden käyttö voi olla järkevästi perusteltavissa sellaisissa kohteissa, joissa kiinteän jakeluaseman käyttöaste tulisi olemaan alhainen. (Ogden & Nicholson, 2011; Wienert & Lipman, 2006.)



Kuva 5.7 Liikuteltavan jakeluaseman toteutustapoja, ylempänä yhden kuljetusyksikön ratkaisu (mukailtu: Wienert, 2005), alempana kahden kuljetusyksikön ratkaisu. (Ogden & Nicholas, 2011)

Kaasumaisen vedyn korkeapaineiset varastosäiliöt voidaan sijoittaa samaan kuljetusyksikköön paineenkorotuskompressorin ja jakelumittarin ynnä muiden laitteistojen kanssa (yhden kuljetusyksikön ratkaisu). Vaihtoehtoisesti jakeluasematekniikka on sijoitettavissa erilleen varastosäiliöistä, esimerkiksi vaihtolavakonttiin. Jälkimmäisessä tapauksessa jakeluaseman vedyntoimitus tapahtuisi tyypillisillä kaasumaisen vedyn

maantiekuljetuksiin soveltuvilla kuljetusyksiköillä (kahden kuljetusyksikön ratkaisu). (Ogden & Nicholson, 2011).

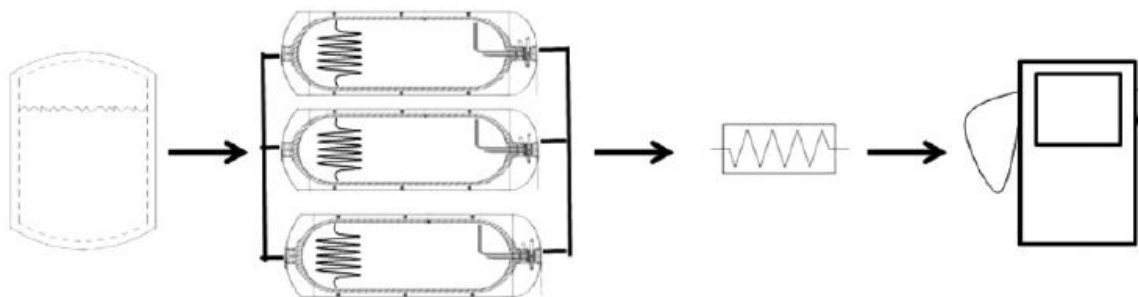
Yksinkertaisimmillaan mobiili tankkausasema ei tarvitse kompressoria ollenkaan, jos kuljetusyksikön varastosäiliöiden painetaso ja varastokapasiteetti riittää tankkausten suorittamiseksi (Wienert & Lipman, 2006). Mikäli jakeluaseman laitteisto ja varastosäiliöt sijoitetaan yhteen kuljetusyksikköön, niin varastokapasiteetti on tyypillisesti kahden kuljetusyksikön tapaukseen nähden pienempi. Tyypillinen varastokapasiteetti yhden kuljetusyksikön ratkaisulle on noin 110 kg (FreedomCar, 2005, s. 24.), kun erillisessä maantiekuljetusyksikössä se on tyypillisesti luokkaa 300 kg.

Kahden kuljetusyksikön ratkaisussa komprimointi- ja jakeluyksikkö ei tarvitse omaa alustaa jatkuvaan käyttöön vaan on siirreltävässä soveltuvalla kuljetuskalustolla. (FreedomCar, 2005, s. 24). Tässä ratkaisussa varastosäiliöiden sijaitessa erillisessä kuljetusyksikössä, jakeluaseman polttoainetäydennys on hoidettavissa ilman pitkäaikaista jakelukatkoa.

Jakeluasematekniikan kehityksen suuntauksia

Komprimointiratkaisuja käsittelevässä luvussa esitelty *pumppaus-höyrystys*-menetelmä on yleinen tapa paineistaa vety silloin kun vedyn toimitetaan jakeluasemille nestemäisenä. Etuina tässä menetelmässä on jakeluaseman suhteellisen alhaiset alkuinvestointi- ja käyttökustannukset. Tämä siitä syystä, että kryogeeniset säiliöt, pumput ja höyrystimet ovat investointikustannuksiltaan verrattain edullisia kompressorin ja vaadittavien kaskadisäiliöiden vastaaviin kustannuksiin nähden (IEA, 2012, s. 242).

Eräänä uutena jakeluasemakonseptina mainittakoon Petitpas et al:n (2012) kehittelemä termiseen komprimointiin perustuva ratkaisu (Kuva 5.8). Mainitussa konseptissa nestemäinen vety johdetaan kryogeenisestä varastosäiliöistä kryogeenisiin painesäiliöihin, jotka on liitetty kaskadikytkennällä toisiinsa. (Petitpas et al:n 2012.)



Kuva 5.8 Kaasumaisen vedyn jakeluasemakonsepti nestevedyn termisellä komprimoinnilla toteutettuna (Petitpas et al., 2012)

Nestemäisen vedyn höyrystäminen ja komprimointi tapahtuu tässä menetelmässä kryogeenisissä painesäiliöissä, kun säiliöön viedään lämpöenergiaa lämmönvaihtimilla määrää, joka riittää vedyn faasimuutoksen aikaansaamiseksi. Perinteisemmissä nestemäisen

vedyn paineistus- ja höyrystysratkaisuissa käytetty kryogeeninen pumppu on tässä konseptissa tarpeeton. Tässä menetelmässä nestemäisen vedyn virtaus varastosäiliöstä komprimointisäiliöihin aikaansaadaan paine-erolla, joka puolestaan kehitetään paineistamalla kryogeeninen varastosäiliö lepovuorossa olevan komprimointisäiliötä korkeampaan painetasoon. Tankkaustapahtuman aikana korkeapaineinen kaasuuntunut vety johdetaan painesäiliöistä esilämmittimen kautta soveltuvan tankkauslämpötilan saavuttamiseksi. Esilämmittimeltä kaasuvirta johdetaan edelleen mittaus- ja annostelulaitteiston lävitse ajoneuvon polttoainesäiliöön. Tutkijoiden mukaan tämä konsepti mahdollistaisi suhteellisen yksinkertaisen jakeluaseman toteutuksen koska tämän toiminta on mahdollista ilman mekaanista kompressoria tai kryogeenistä pumppua. Tämän menetelmän eräänä heikkoutena tiedetään, että kaasuuntunutta vetyä on tuuletettava komprimointisäiliöistä ympäristöön tietyissä vaiheissa, jotta komprimointisäiliön painetaso mahdollistaisi nestevedyn sisäänvirtauksen sen täyttövaiheen aikana. Kuvatun kaltaisia jakeluasemia ei ole vielä tietyvästi toteutettu, mutta tutkijoiden saamat suunnittelu- ja mallinnusvaiheen tulokset lupailevat merkittävää energiansäästöä komprimoinnissa mekaaniseen komprimointiin verrattuna. Tutkijat arvelevat myös, että tällä konseptilla toteutettu asema vaatisi vähemmän huoltoa ja kunnossapitoa kuin perinteisemmät jakeluasematratkaisut. (Petitpas et al.:n 2012.)

Tankkaustapahtuma

Kaasumaista vetyä käyttävien ajoneuvon polttoainesäiliöiden on havaittu lämpenevän tankkaustapahtuman aikana, erityisesti III ja IV-tyypin säiliöissä, joissa lämmönjohtuminen seinämien lävitse on verrattain hidasta täysmetallisiin säiliöihin nähden. Säiliömateriaalin lämpeneminen johtuu säiliöpaineen nopeasta noususta sekä kaasumaisen vedyn negatiivisesta Joule-Thompson-vakiosta normaalilämpötiloissa, jonka merkitys tosin on tässä tapauksessa vähäinen (Hobein & Krüger, 2010). Lämpötilan nousu on erityisen suurta tankkaustapahtuman alkuvaiheessa, jolloin tankkausjärjestelmän ja polttoainesäiliön paine-ero on suurimmillaan ja isentalpinen kuristusilmiö ja siitä seuraava entropian muodostus on suurimmillaan. Myös säiliön suhteellinen paineenousunopeus on tankkauksen alkuvaiheessa suurimmillaan. (Zheng et al. 2012.)

Säiliömateriaalin liiallinen lämpötilan nousu saattaa heikentää polttoainesäiliöiden materiaalilujuuksia erityisesti täyskomposiittisäiliöissä (tyyppi IV). Lisäksi tästä seuraa myös termisiä rasituksia vahvikekuitumateriaalin ja metallivuorauksen erisuuruisten lämpölaajenemiskertoimien vuoksi (tyypin III ajoneuvosäiliöissä). Tyypin IV-säiliöt ovat erityisen alttiita lämpövaurioille, koska niissä ei ole III-tyypin säiliöiden tapaan metallista sisävuorausta. Metallivuoraus jakaa III-tyypin säiliöissä pistemäisesti esiintyvät lämpökuormat laajemmalle alalle. (Zheng et al. 2012.)

Kaasun lämpötilan nousu aiheuttaa säiliömateriaalin lämpötilan nousun lisäksi myös säiliön alitankkautumista, koska korotetussa lämpötilassa olevalla kaasulla on suurempi ominaistilavuus kuin ympäristön lämpötilassa olevalla kaasulla. Polttoainesäi-

liön painetaso laskee kaasun ja säiliön lämpötilojen saavuttaessa ympäristön lämpötilan ja säiliön alitankkautuminen tulee ilmi. (Zheng et al. 2012.)

Liiallinen kaasun lämpeneminen ja sen aiheuttamat epätoivotut seuraukset on vältettävissä tankkausprotokollan suunnittelulla. Protokollan suunnittelussa määritellään tankkaustapahtuman eteneminen. Kaasun virtausta on mahdollista rajoittaa tankkaustapahtuman aluksi ja kiihdyttää tankkaustapahtuman loppua kohti tankkauksen kokonaisvirtausnopeuden siitä kärsimättä. Toisena menetelmänä käytetään jakeluasema vetykaasun esijäähdytystä. Esijäähdytys vaatii omat energiana kuluttavat laitteistonsa, mutta vaadittava esijäähdytys ja sen kuluttama energiamäärä ovat varsin maltillisia saatavaan hyötyyn nähden. (Barbier, 2010; Klell, 2010; Zheng et al. 2012.)

Vedyn jakeluasema tarvitsee oikein ja turvallisesti toimiakseen ohjauslogiikan, joka ohjaa laitteiston toimintaa tankkaustapahtuman aikana saamiensa anturitietojen ja esiohjelmoidun tankkausalgoritmin perusteella. Tankkausprotokolla määritellään kevyelle kalustolle esimerkiksi standardissa SAE TIR J2601 sekä ”mykälle tankkaukselle” että ”kommunikoivalle tankkaukselle”. Standardi määrittelee muun muassa suurimman sallitun kaasun lämpötilan tankkausyhteessä, suurimman sallitun virtausnopeuden ja suurimman sallitun paineen nousun nopeuden ajoneuvosäiliössä. (SAE TIR J2601; Hobein & Krüger, 2010, s. 384.)

Mainitun standardin määrittelemässä ”mykässä” tankkausprotokollassa ajoneuvo ei kommunikoi jakeluaseman ohjausjärjestelmän kanssa. ”Kommunikoivassa” tankkausprotokollassa puolestaan ajoneuvo kommunikoi jakeluaseman järjestelmän kanssa antaen tälle tankkaustapahtuman optimointiin tarvittavaa tietoa sekä reaaliaikaista tietoa polttoainesäiliön paineesta ja lämpötilasta. ”Kommunikoiva” tankkausprotokolla mahdollistaa suurimman mahdollisen säiliöntäyttöasteen ja tankkausnopeuden saavuttamisen siten, että polttoainesäiliön nimellispainetta tai sallittuja lämpötilarajoja ei ylitetä. ”Mykässä” tankkausprotokollassa tankkauksen yli- tai alitankkautumisen esto määritetään ympäristön lämpötilan perusteella. Tällöin jakeluaseman järjestelmä säättää tankkauksen loppupaineen alhaisemmaksi lämpötilan ollessa alhainen ja vastaavasti korkeammaksi suuremman ympäristön lämpötilan vallitessa. (Hobein & Krüger, 2010, s. 384.)

Kaasumaisen vedyn tankkausprotokolla etenee karkeasti ottaen seuraavasti. Käyttäjä kytkee jakeluaseman tankkausyhteen ajoneuvonsa tankkausliittimeen, jolloin jakeluaseman ohjauslogiikka määrittää säiliön alkupaineen protokollasta riippuen painepulssilla tai ajoneuvon kommunikointijärjestelmästä saamansa tiedon perusteella. Ohjauslogiikka virtauttaa kaasua kaskadisäiliön Low-säiliöryhmästä, kunnes säiliöryhmän painetaso tai virtaus laskee esiasetetulle tasolle. Seuraavaksi tankkauksenohjausjärjestelmä eristää Low-säiliöryhmän ajoneuvon järjestelmästä ja virtauttaa kaasua Mid-säiliöryhmästä, kunnes saavutetaan esiasetetut paine- tai virtausnopeuden arvot. Tämän jälkeen Mid-säiliöryhmä eristetään ja kaasua virtautetaan High-säiliöryhmästä, kunnes ajoneuvon polttoainesäiliön nimellispaine saavutetaan. (Farzaneh-Gord et al., 2012; Hobein & Krüger, 2010.)

5.3 Vedyn loppukäyttö

Aikaisimmat kokeelliset vetyautokokeilut on suoritettu 18. vuosisadan alkupuoliskolla (Eichlseder et al., 2010, s. 811-) joskaan näillä kokeilulla ei ollut paljon tekemistä nykyisen autotekniikan kanssa, saati sitten polttokennotekniikan kanssa. General Motors esitteli ensimmäisen polttokennoajoneuvonsa (Electrovan) suurelle yleisölle yli puoli vuosisataa sitten vuoden 1966 Detroitin autonäyttelyssä. Tällöin polttoainesäiliö ja polttokenno apulaitteineen oli sijoitettu konseptiautona toimivan pakettiauton tavaratilaan. (Froeschle & Wind, 2010, s. 801.) Polttokennotekniikassa samoin kuin vedyn varastointitekniikassa tapahtunut kehitys on sittemmin mahdollistanut voimalinjan sijoittamisen myös tavallisen kokosiin henkilöautoihin ja samalla varsin hyvän, jopa yli 600 kilometrin toimintasäteen, kuten esimerkiksi Hondan FCX Clarify osoittaa (JHFC, 2009).

Kaupunkibussit saattavat IEA:n (2012) mukaan hyvinkin olla ensimmäinen kaupallinen sovellutuskohde polttokennotekniikalle. Tässä ajoneuvoryhmässä tyypillinen toimintasädevaatimus on mahdollista täyttää vetypolttoaineen tunnetuilla varastotekniikoilla. IEA mainitsee, että kaupunkibussit tankataan tyypillisesti keskitetysti varikoilla, jolloin jo yksi perustettava jakeluasema voisi palvella huomattavaa ajoneuvokantaa. Samalla jakeluaseman mitoitus olisi mahdollista mitoittaa tunnetulle ajoneuvokannalle, joka vähentää liiketoimintariskiä. Lisäksi tämän ajoneuvoryhmän investointikustannukset ovat huomattavasti henkilöajoneuvokokoluokan vastaavia kustannuksia suurempia. Tästä seuraa että polttokennotekniikan aiheuttama suhteellinen kustannuksenousu ei olisi niin merkittävä kuin kevyemmässä kalustossa. (IEA, 2012; Wietschel & Ball, 2009.) Tässä työssä ei tarkastella kaupunkibussien voimalinjatekniikan erityispiirteitä, vaan polttokennovoimalinjatekniikka käydään lävitse yleisellä tasolla.

5.3.1 Vetyautotekniikan kehityksen suuntaukset

Vedyn liikennekäyttö on teknologisesti mahdollista useammalla erilaisella ajoneuvoteknisellä voimalinjaratkaisulla. Vetypolttoainetta käyttävän ajoneuvon voimalinjaratkaisuista tunnetaan polttomoottoriin sekä polttokennotekniikkaan perustuvat voimalinjaratkaisut. Näistä polttomoottoritekniikka on tunnettu kauemmin, mutta vetykäyttöisten ajoneuvojen valmistajat ovat päätyvässä voimalinjavalinnoissaan polttokennoratkaisuihin. Tämä on mainittujen tutkijoiden mukaan looginen jatkumo ajoneuvojen energiatehokkuus- ja sähköistyskehitykselle, jota on ilmennyt ajoneuvojen hybridi- ja sähköisten voimalinjaratkaisujen yleistytessä. (Ogden et al., 2011)

Tunnetuin polttomoottoriratkaisua edustava henkilöautokonsepti lienee BMW Groupin *Hydrogen 7*-malli, jonka polttomoottoritekniikkaa BMW kutsuu nimellä *Clean Energy*. BMW Group on perustellut voimalinjavalinnoistaan ajoneuvon kaksoispolttoaineoptiolla joka mahdollistaa perinteisten polttoaineiden käytön vedyn rinnalla ja siten suuremman riippumattomuuden vedynjakeluasemainfrastruktuurista. (BMW, 2010.) Kaupunkibusseissa ainakin MAN Nutzfahrzeuge AG:n tiedetään soveltaneen polttomoottoriin perustuvana ratkaisuna. MAN-kaupunkibussit ovat olleet mukana esimerkiksi HyFLEET:CUTE-demonstraatioissa peräti neljäntoista ajoneuvon laivueena. Myös

busseissa voimalinjatekniikan kehityksen kärki näyttäisi olevan polttokennoihin perustuvissa ratkaisuisa (HyFLEET:CUTE, 2012.), joten tässä työssä käsitellään vain polttokennoihin perustuvia voimalinjaratkaisuja.

Vetykäyttöisten ajoneuvojen polttoainesäiliöt on toteutettavissa useammalla eri tekniikalla, joista yleisesti tunnettuja ovat nestemäisen vedyn kryogeeniseen varastointiin perustuva menetelmä ja kaasumaisen vedyn paineenalainen varastointi. Näistä jälkimmäinen on paremmin tunnettu tekniikka (Ogden & Nicholas, 2011; Züttel, 2008). Koska kehitteillä olevien henkilöautojen polttoainesäiliötekniikaksi näyttäisi valikoituneen paineistettuun kaasumaiseen vetyyn perustuva tekniikka (FuelCellToday, 2012a; Ogden & Nicholas, 2011), tässä raportissa käsitellään vain tällä tekniikalla toteutettuja ajoneuvoja.

5.3.2 Polttokennovoimalinja

Vetykäyttöiset polttokennoajoneuvot eivät ole aivan uusi keksintö, ensimmäinen tunnettu polttokennoajoneuvo esiteltiin General Motors-yhtiön toimesta vuonna 1966 Detroitin autonäyttelyssä (Froeschle & Wind, 2010). Vetykäyttöisen ajoneuvon polttokennovoimalinjan pääkomponentit ovat polttoainesäiliö, polttokennosto ja sähkömoottori. Nykyisen vallitsevan suuntauksen mukaan voimalinjaan kuuluu myös akusto. Voimalinjaratkaisua jonka toimintaan kuuluu oleellisena osana myös akusto, nimitetään hybridi-voimalinjaksi. Kyseinen akusto mahdollistaa ajonaikaisten hidastusten kineettisen energian varastoinnin myöhemmin käytettäväksi ja mahdollistaa voimantuottolaitteiston tasaisemman kuormittamisen.

Polttokennohybridi-voimalinjan tapauksessa polttokennoa voidaan kuormittaa suuremman osan ajasta optimaalisella kuormitusalueella. Suoravetoisessa voimalinjaratkaisussa polttokennon täytyisi vastata kaikkiin ajosuoritteen aikana ilmeneviin voimantuottotarpeisiin mahdollisimman pienellä viiveellä. Hybridiratkaisu ei aseta niin suuria vaatimuksia polttokennoston kuormitusdynamiikalle, kuin ”suoravetoinen” polttokennovoimalinjaratkaisu (Froeschle & Wind, 2010; Friedrich & Büchi, 2008.) Tällöin polttokennoa ei siis tarvitse mitoittaa suurimman hetkellisen ajodynaamisen vastuksen mukaisesti, vaan pienempikin polttokenno riittää mahdollistaen säästön polttokennokustannuksissa (Weindorf & Bünger, 2009).

Varsinaisen polttokennon lisäksi voimalinjaan kuuluu myös aputoiminnallisuuksia, kuten kompressori, jäähdytyslaitteisto pumppuineen ja jäähdyttiminen sekä tarvittavat säätölaitteet. Edellä kuvattu konstruktio poikkeaa hyvin suuresti perinteisestä polttomoottorikäyttöisen ajoneuvon voimalinjasta, mutta on osin samankaltainen akkusähköajoneuvon voimalinjan kanssa sähköisten komponenttien osalta. (Bosch, 2003.)

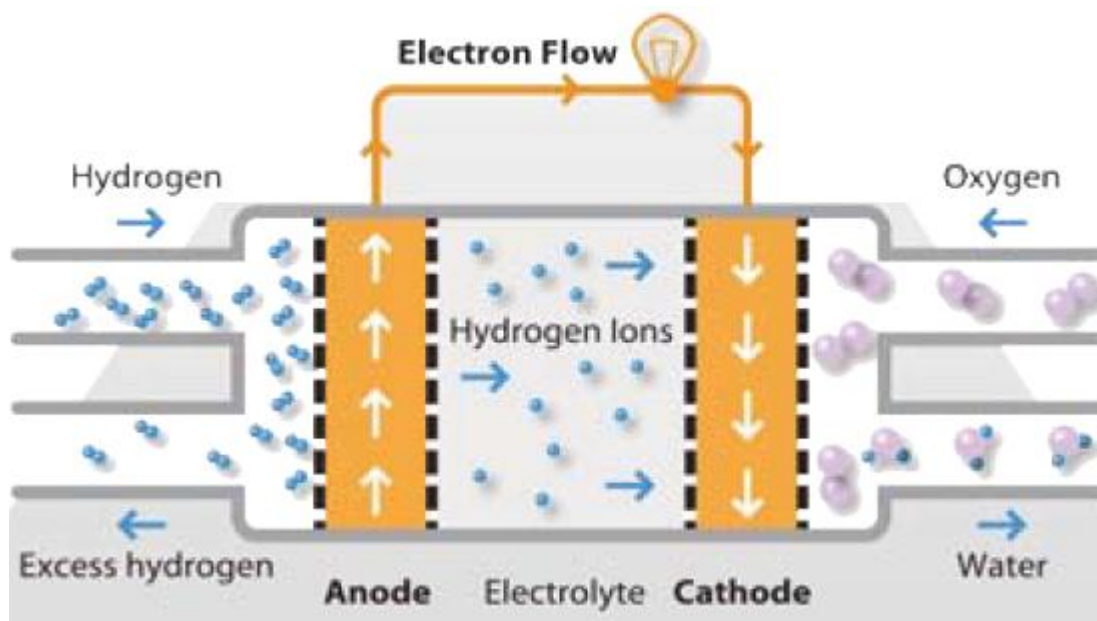
Polttokennovoimalinjan toimintaperiaate eroaa polttomoottorin tapauksesta siten, että tässä menetelmässä polttoaineen energian konversio ei perustu lämpövoimakoneen toimintaperiaatteeseen. Sen sijaan polttoaineen kemiallinen energia muutetaan tässä ensin sähköenergiaksi ja edelleen sähkömoottorilla mekaaniseksi energiaksi ja niin ollen mahdollisesti syntyvä lämpöenergia on voimalinjan tehokkuuden kannalta epäsuotuisaa. Polttomoottorin toiminnan kannalta taas on toivottavaa, että polttoaineen energia

saadaan muutettua palotilassa mahdollisimman hyvin lämpöenergiaksi, Tuotettu lämpöenergia on muunnettavissa paisuntatyöksi ja edelleen mekaaniseksi työksi männän ja vivuston välityksellä.

Yksittäinen polttokennopari muistuttaa toiminnaltaan joiltain osin galvaanista akkuparia. Yksittäisestä akkuparista saatavan sähköenergian määrä on sidoksissa aktiivisten elektrodien (anodi ja katodi) hapettumis- ja pelkistymisreaktiopotentiaaleihin. Näin ollen akusta saatava energia on riippuvainen elektrodien massasta ja sitä kautta koko akkuparin massasta. Yksittäisen polttokennoparin toiminta puolestaan perustuu reaktanttien (esimerkiksi vety ja happi) hapettumis- ja pelkistymisreaktioihin elektrodien pinnalla. Näin ollen polttokennosta saatava energia ei ole sidoksissa elektrodien massaan vaan käytettävissä olevien reaktanttien massaan. (Friedrich & Büchi., 2008.)

Koska vetypolttokennojen tapauksessa toisena reaktanttina on happi, tätä ei tarvitse erikseen varastoida ja kuljettaa mukana ajoneuvossa, vaan tämä on hankittavissa ympäröivästä ilmastasta. Tällöin vain toinen reaktantti eli vety on varastoitava ja kuljetettava ajoneuvon mukana ja päästään ajoneuvon massan osalta suhteellisen hyviin toimintasäteen arvoihin ja pieniin energiavaraston massoihin akkusähköisiin autoihin nähden.

Polttokennossa tapahtuva vedyn ja hapen hapetusreaktio on reaktioyhtälöltään sama kuin termisen hapettumisen vastaava yhtälö. Polttokennossa tapahtuva reaktio on mahdollista saada aikaiseksi sopivien katalyyttien avulla jo alhaisissa lämpötiloissa ja reaktion tuotteena saadaan lämpöenergian lisäksi myös sähköenergiaa. (Pant & Gupta, 2009) Varsinaisia polttokennon perusratkaisuja tunnetaan useampia ja nämä saavat nimensä yleensä käytetyn elektrolyytin mukaan. Polttokennoautojen tuotantoa suunnittelevat autonvalmistajat ovat päätyneet voimalinjaratkaisuihinsa polymeerielektrolyyttimembraanipolttokennoihin (PEM) (Pant & Gupta, 2009; Friedrich & Büchi, 2008; Ogden et al, 2011).

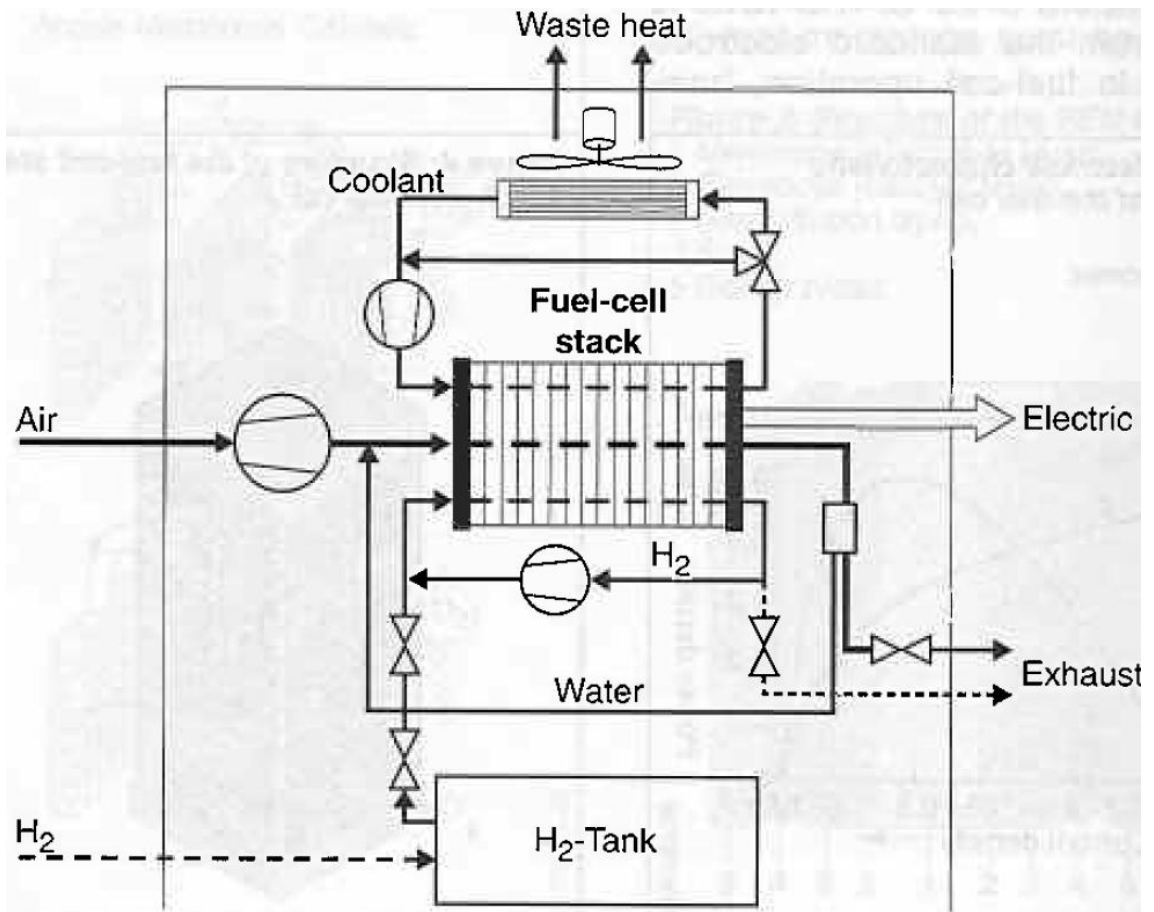


Kuva 5.9 PEM-polttokennoparin yksinkertaistettu toiminta- ja kokoonpanokaavio (FuelCell-Today, 2012b).

PEM-polttokennon (Kuva 5.9) sydän on membraanielektrolyyttikokoonpano (*Membrane Electrode Assembly, MEA*), joka koostuu kaasutiiviistä ja vetyioneja läpäisevästä polymeerimembraanista sekä tämän molemmiin puolin sijoitetuista elektrodeista. Elektrodit on ”pinnoitettu” huokoisen kantajamateriaalin pinnalle näiden tehollisen pinta-alan maksimoimiseksi. Elektrodeja kutsutaan anodiksi ja katodiksi näiden jännitepotentiaalien mukaan. Elektrodien katalyyttimateriaalina käytettävä platina on harvinainen ja kallis materiaali ja tämän tyyppisten polttokennojen tutkimus- ja kehitystyö tähtää osaltaan katalyytin määrän vähentämiseen valmistuskustannusten alentamiseksi. (Froeschle & Wind, 2010.)

Yksittäisen polttokennoparin jännitepotentiaali on vain luokkaa 0,6-0,8 V ja ulosottotehon ja käytännöllisen jännitetason saavuttamiseksi polttokennoja kytketään sähköisesti sarjaan useampia. Sarjakytkennässä voi olla jopa useita satoja polttokennopareja (Froeschle & Wind, 2010). Tällaista useamman polttokennoparin muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan *polttokennostoksi (fuel cell stack)*. (Friedrich & Büchi, 2008, s. 348.)

Polttokennoston lisäksi ajoneuvon voimantuottolaitteisto vaatii toimiakseen suuren määrän apulaitteita. Polttokennoston tuottama lämpö on poistettava kennostosta soveltuvalla jäähdytyslaitteistolla ja lisäksi polttokennoston kaasunvaihto on toteutettava pakotetusti komprimointijärjestelyin. Kaasunvaihto ei tapahdu polttokennoissa luonnostaan käytännöllisellä tehontuottoalueella. Voimantuottolaitteisto vaatii luonnollisesti myös kaasunlähteen, eli autoon sijoitetun polttoainesäiliön. Polttokennostoon johdettavat vety- ja ilmavirrat on kostutettava elektrolyytin protoninjohtavuuden ylläpitämiseksi erillisellä höyrymuodostuslaitteistolla. Jos vesi joutuisi polttokennoon nestefaasissa, vesi voisi vahingoittaa polttokennostoa ja alentaa tämän suorituskykyä. Kaikkia näitä apulaitteita venttiileineen on ohjattava erillisellä järjestelmällä joka sisältää tarvittavat toimilaitteet ja sensorit sekä ohjauslogiikan. Polttokennoston ja apulaitteiden muodostama kokonaisuutta kutsutaan *polttokennosysteemiksi (fuel cell system)* (Kuva 5.10). Käytännössä vasta tämä kokonaisuus voi muuntaa vedyn sisältämän kemiallisen energian sähköenergiaksi edelleen sähkömoottorille, akustoon ja muihin kulutuslaitteisiin käytettäväksi.



Kuva 5.10 Polttokennosysteemin periaatekaavio (Bosch, 2011, s. 660).

Polttokennosysteemin sisältämät apulaitteet voivat kuluttaa erittäin merkittävän osan polttokennoston tuottamasta sähköenergiasta. (Freialdenhoven & Wallentowitz, 2010; Friedrich & Büchi, 2008.) Freialdenhoven & Wallentowitz (2010, s. 865) esittävät esimerkkinä, että kun polttokennoston sähkökemiallinen konversiohyötysuhde on luokkaa 65,6 %, niin sähkömoottorille toimitettava sähköenergia on ainoastaan 33,7 % polttoaineen energiasisällöstä.

Juuri PEM-polttokennoratkaisun katsotaan soveltuvan parhaiten ajoneuvosovellutusten erityisvaatimuksiin (Pant & Gupta, 2009; Friedrich & Büchi, 2008; Ogden et al, 2011). Eräänä syynä tähän on tämän perusratkaisun verrattain alhainen toimintalämpötila, joka on luokkaa 80 - 100 °C. (Bosch, 2003, s. 649). Erotuksena korkeammassa lämpötiloissa (>200 °C) toimiviin perusratkaisuihin verrattuna näille on ominaista, että PEM-ratkaisut asettavat polttoaineen puhtaudelle aivan erityisiä vaatimuksia ja näiden kuormitusdynamiikka on verrattain hyvä (Friedrich & Büchi, 2008). PEM-polttokennot ovat suosittuja ajoneuvovalmistajien keskuudessa erityisesti verrattain suuren tehotiheydensä vuoksi. Hyvästä tehotiheydestä seuraa että polttokennosto on mitoitettavissa ulkomitoiltaan pieneksi joka mahdollistaa kennoston sijoittamisen myös pieniin ajoneuvoihin, joissa käytettävä tilavuus on usein rajallinen. Matalasta toimintalämpötilasta puolestaan seuraa, että PEM-polttokennoilla on verrattain nopea käynnistyvyys ja myös

verrattain hyvä kuormitusdynamiikka muihin ratkaisuihin nähden. (Pant & Gupta, 2009.)

PEM-tekniikan heikkona puolena on kennoston suhteellisen lyhyt elinikä joka on henkilöautosovellutuksissa nykyisellä kehityksellä tyypillisesti luokkaa 2000 käyttötuntia (Wipke et al., 2010) ja parhaimmillaan noin 2500 käyttötuntia (Wipke et al., 2012). Soveltuvana henkilöauton voimalinjan käyttöikä pidetään noin 5000 käyttötuntia. Lyhyt elinikä johtuu osaltaan ajoneuvosovellutuksissa esiintyvistä rajusti vaihtelevista toimintaolosuhteista. Ajoneuvokäytössä toiminnanaikaiset olosuhteet ovat erityyppisiä vaativia polttokennoille, koska käytön aikana esiintyy lämpötilavaihtelua aina veden jäätympisteen alapuolelta aina kiehumispisteen yläpuolelle. Lisäksi kennostossa vallitseva suhteellinen ilmankosteus vaihtelee ympäristön kosteudesta aina kylläiseen. Näiden lisäksi kennojen kuormitus voi vaihdella ajoneuvokäytössä, täystehosta ”joutokäyntiin” ja tietysti myös toisin päin, toisinaan hyvinkin nopeasti ajotilanteen ja varaustilan mukaan. Eräänä polttokennoille vahingollisena tekijänä tiedetään, että kennoparien anodipuolella saattaa esiintyä samanaikaisesti sekä vetyä että happea kennostoa käynnistettäessä ja sammutettaessa. Spontaanisti reagoidessaan nämä saattavat aiheuttaa vakaviakin vaurioita kennopareille. Erityisesti elektrodin tukimateriaalit ja membraanit ovat alttiita olosuhteiden muutoksista johtuville vaurioille. (U.S. Drive, 2010; Pant & Gupta, 2009.)

Tieliikenneajoneuvot ovat kaiken kaikkiaan hyvin vaativa polttokennojen sovel-luskohde. Ollakseen kilpailukykyinen muiden soveltuvien voimalinjaratkaisujen kanssa, polttokennovoimalinjalla olisi oltava suhteellisen korkea gravimetrinen ja volumetrinen teho- ja energiatiheys (Friedrich & Büchi, 2008). Näiden lisäksi myös ajoneuvokäyttöön sopiva voimalaitteen kustannustaso asettaa aivan erityisiä haasteita samoin kuin myös eliniän olisi vastattava totuttua voimalinjan elinikää (n. 5000 tuntia).

5.3.3 Vedyn varastointi ajoneuvoissa

Vetykäyttöisten ajoneuvojen eräänä teknisenä haasteena on pitkään ollut riittävän toimintasäteen mahdollistavien polttoainevarastointitekniikoiden kehittäminen. Melko yleisenä määritelmänä riittävälle toimintasäteelle pidetään noin 500 ajokilometriä (300 mailia). Tämä toimintasäde on samaa luokkaa kuin tavallisilla bensiinikäyttöisillä ajoneuvoilla. (Hirscher, 2010.) Riittävän toimintasäteen saavuttamisen lisäksi haasteena on ollut myös kaasumaiselle vedylle soveltuvien painesäiliöiden verrattain korkea hinta sekä näiden vaatima suuri tilavuus ja massa. Näiden lisäksi tutkimus- ja kehitystyötä on tehty muun muassa tankkauksen ajallisen keston pienentämiseksi sekä vedylle ominais-ten turvallisuusuhkien pienentämiseksi. (Satyapal & Thomas, 2009.)

500 kilometrin toimintasäteen mahdollistava diesel-polttoainesäiliön ulkotilavuus on tyypillisesti luokkaa 46 litraa, massa polttoaineen kanssa luokkaa 43 kg (Hirscher, 2010.) sekä tankkausaika tyypillisesti joitain minuutteja. Nykytekniikalla saman toimintasäteen mahdollistava kaasumaisen vedyn komposiittisäiliö (700 bar) on ulkotilavuudeltaan luokkaa 260 litraa, kun välttämättömät lisäkomponentit lasketaan mukaan. Tällaisen säiliön sekä lisälaitteiden on noin 125 kg ja tämän tankkausaika on samaa

luokkaa kuin perinteisillä polttoaineilla. (Hirscher, 2010.) Korkeapaineisten paineastioiden muotoilu ei ole yhtä vapaasti päätettävissä, kuin lähellä ympäristön painetasoa olevissa säiliöissä. Tämä aiheuttaa joitain haasteita ajoneuvojen rajallisten tilankäytön mahdollisuuksien näkökulmasta. Edellä on selvästi nähtävissä, että diesel on kaasumaiseen vetyyn nähden lyömätön liikennepolttoaine volumetriseen että gravimetrisen energiatihetyensä puolesta. Myöskään kaasumaisen vedyn korkeapaineisten varastosäiliöiden hintataso ei ymmärrettävästi voine milloinkaan kilpailla konventionaalisten polttoaineiden varastotekniikoiden kanssa. Nämä edellä luetellut tosiasiat voivat muuttua kovin epäoleellisiksi seikoiksi sellaisessa tapauksessa, jossa esimerkiksi dieseliä tai muita tavanomaisia polttoaineita ei ole käytettävissä.

Vedyn liikennekäyttöön soveltuvien varastointitekniikoiden luomiseksi on kehitelty huomattava määrä erilaisia varastointitekniikoita joilla on tähdätty varaston ja apulaitteiden osalta parempiin volumetriseen että gravimetrisen energiatihetyden arvoihin sekä laitteiston edullisempaan hintatasoon. (Satyapal & Thomas, 2009; Hirscher, 2010.) Ajoneuvovalmistajat eivät ole kuitenkaan jääneet odottamaan edistyneempien varastointitekniikoiden kehittymistä vaan varastointitekniikaksi on valikoitunut kaasumainen vety 700 bar paineessa ja täyskomposiittisäiliöt. Jo tällä menetelmällä saavutettava toimintasäde on verrattavissa bensiinikäyttöisten ajoneuvojen toimintasäteeseen. (Fuel-CellToday, 2012a.)

Vedyn varastointitekniikoita ei ole mielekästä vertailla konventionaalisten polttoaineiden varastointitekniikoiden kanssa. Tämä siitä syystä, että vaihtoehtoisista liikenteen energijärjestelmistä keskusteltaessa argumentit eivät liity oleellisesti teknologian tekniseen paremmuuteen. Tieteellisen keskustelun argumentit näyttäisivät liittyvän ennemminkin siihen, että millä tavoin liikenteen energiahuolto toteutetaan sitten, kun konventionaalisia polttoaineita ei jostakin syystä voida käyttää. Näin ollen mielekkäämpi vertailukohta vetyautojen tekniselle edistyneisyydelle voisikin olla esimerkiksi akkusähköautot. Tämä siitä syystä, että näiden kehittämisellä ja kaupallistamispyrkimyksillä tähdätään samaan tulokseen, kuin vetyteknologian kehityksellä. Tähtäimessä on molempien ratkaisujen osalta ympäristöystävällinen ja energiatehokas liikenteen energiahuoltojärjestelmä sekä öljyriippuvuuden vähentäminen (IEA, 2012).

Edellisestä argumentista seuraten mainittakoon esimerkiksi, että mainitun 500 kilometrin mahdollistava akkukäyttöisen ajoneuvon energiavarasto olisi ulkotilavuudeltaan luokkaa 670 litraa ja massaltaan noin 1000 kg ja tämän latausaika olisi useita tunteja ja minuuttien sijaan. Lisäksi tämän kokoluokan akuston hintataso olisi lähes 17-kertainen vastaavan energiasäiliön omaavaan kaasumaisen vedyn ajoneuvosäiliöön (Hirscher, 2010). Tässä on tosin syytä huomata, että akusto ei tarvitse lisäksensä polttokennostoa apulaitteineen (Bosch, 2003), joka on itsessään voi olla erittäin kallis osakokonaisuus.

Kaasumaisen vedyn varastotekniikka ja IV-tyypin säiliöt ovat muihin vedyn varastointimenetelmiin nähden suhteellisen edullista ja toimivaa tekniikkaa. Klell (2010) arvelee että korkeapaineisten säiliöiden teknologinen kehitys ei tuo enää lisäparannuksia gravimetrisen tai volumetriseen energiatihetyteen. Niin ollen muiden varastointitekniik-

koiden kehitys saattaa olla ainoa tapa kasvattaa vetyautojen toimintasäteitä, mikäli käyttäjämukavuus ja muut näkökulmat eivät anna mahdollisuutta kasvattaa säiliökokoja.

Vedyn varastointitekniikoiden kehittämiseksi on tehty laaja-alaista tutkimusta ja kehitteillä on ollut lukuisia erilaisia tekniikoita ja soveltuvia sidosmateriaaleja ja tässä tutkimuksessa käsitellyt tekniikat ovat kaikkein vanhimpia tutkimuksen suuntauksia. Uudemmissa tutkimuksen suuntauksista mainittakoon esimerkinomaisesti paineiset kryogeeniset säiliöt, joihin voi tankata nestemäistä vetyä samoin kuin konventionaaliseenkin kryogeeniseen säiliöön. Tällä uudella säiliötekniikalla toteutettuna kaasuntuuttua vetyä ei tarvitsisi tuulettaa pois säiliöstä vaan säiliö sietää paineenousua ainakin painetasoon 200 bar. Lisäksi mainitussa säiliötekniikassa on etuna se, että autoon voi tankata myös kaasumaista vetyä, mikäli nestemäistä vetyä ei ole saatavilla kaikkialla toiminta-alueella. (Gao & Krishnamurthy, 2009.)

5.4 Turvallisuus

Vedyn turvallisuus herättää ymmärrettävästi keskustelua, vaikka sitä on käytetty jo varsin pitkään erinäisissä teollisissa sovellutuksissa. Mikäli vety yleistyy tieliikenteen polttoaineena, johtaa se tilanteeseen jossa täysin aineen ominaisuuksia tuntemattomat henkilöt käsittelevät ainetta ilman minkäänlaista koulutusta. (Jordan & Breitung, 2010) Vety on ollut osallisena joissain onnettomuuksissa joissa vedyn palo- ja räjähdysominaisuudet ovat tulleet ilmeisiksi erittäin dramaattisen näköisellä tavalla. Näistä esimerkkinä ilmalaiiva Hindenburgin tuhoutuminen vuonna 1937 ja avaruussukkula Challengerin tuhoutuminen vuonna 1986 ja viimeksi Fukushima ydinvoimalan joidenkin reaktorirakennusten tuhon viimeinen vaihe vuonna 2011. (Züttel et al, 2008; Rigas & Sklavounos, 2009; IEA, 2011.)

Vetypolttoaine voi aiheuttaa monentyyppisiä vaaroja vapautuessaan hallitsemattomasti säiliöistä tai putkistoista. Henkeä uhkaavia vaaran tyyppejä ovat tukahtumisvaara kaasumaisen vedyn syrjäyttäessä hapetta, paineiskuvaara painesäiliön tai -putkiston vaurioituessa ja/tai suuremman seosmäärän palaessa räjähdysmäisesti sekä palovamma-vaara vedyn spontaanin hapettumisreaktion seurauksena. Lisäksi nestemäisen vedyn tapauksessa eräänä vaaratyyppinä tiedetään myös paleltumavammojen ja hypotermian vaarat. (Rigas & Sklavounos, 2009.)

Vedyn aiheuttama syttymisvaara tulee ilmeiseksi esimerkiksi silloin, kun polttoaine pääsee spontaanisti kosketuksiin hapen kanssa ja esisekoittunut syttymiskelpoinen seos saa jostakin tarvittavan syttymisenergian. Ajoneuvoissa tällainen tilanne voi syntyä esimerkiksi silloin, kun ajoneuvo joutuu tieliikenneonnettomuuteen ja polttoainejärjestelmään syntyy vuoto (Klell, 2010). Pienen syttymisenergian vuoksi (~0,02 mJ) vety-ilmaseos syttyy jopa pienen staattisen sähkövarauksen purkautumisesta (Züttel, 2008). Tämän suuruinen varaus voi muodostua esimerkiksi kaasun virratessa putkistoissa (Rigas & Sklavounos, 2009).

Henkeä uhkaavien vaarojen lisäksi vety voi aiheuttaa myös erityisiä aineellisen menetyksen vaaroja. Näistä palo- ja räjähdysvaarat ovat ilmeisimpiä, mutta lisäksi vaa-

raa voi aiheutua myös, kun jotkin materiaalit ovat alttiita vedyn haurastuttavalle vaikutukselle. Vetyhaurastumisesta seuraa materiaaliominaisuuksien heikentymistä. Materiaaliominaisuuksien heikentymisen seurauksena voi aiheutua seurannaisvaurioita, kuten jännityksellisten teräsrakenteiden murtumista. (Rigas & Sklavounos, 2009.) Vetysäiliöt ja putkistot valmistetaan edellä mainitusta syystä sellaisista materiaaleista, jotka eivät ole alttiita vedyn haurastuttavalle vaikutukselle.

Vedyn pienin tunnettu molekyyli­massa sekä pienin molekyylin koko sekä alhainen viskositeetti aiheuttavat vedylle joitain erityisiä turvallisuuteen liittyviä ominaisuuksia. Vedyn vuotaessa ulkoilmaan se kohoaa ja laimenee muihin polttokaasuihin nähden hyvin nopeasti ja niin ollen onnettomuuspaikan lähistölle jäävä syttymiskelpoisen seoksen määrä jää vähäiseksi vähentäen siten vaaran ajallista kestoa. Toisaalta, nopeasta dispersoitumisesta sekä laajasta syttymisalueesta seuraa nopea syttymiskelpoisen seoksen muodostuminen muihin polttokaasuihin nähden. Näin ollen pelastautumisaika voi jäädä vuodon sattuessa vähäiseksi. (HyApproval, 2008; Rigas & Sklavounos, 2009; Züttel, 2008.)

Kaasumainen vety palaa päivänvalossa näkymättömällä liekillä ja jopa yli kymmenkertaisella palonopeudella hiilivety­polttoaineisiin nähden. Esisekoittuneen syttymiskelpoisen polttoaine-ilmaseoksen määrä pysyy normaalissa palotapahtumassa verrattain pienenä. Tämä on seurausta palorintaman nopeasta etenemisestä, joka kuluttaa seosta verrattain nopeasti muiden tunnettujen liikennepolttoaineiden tapauksiin nähden. (Rigas & Sklavounos, 2009; Züttel, 2008.) Tästä seuraa, että ulkoilmassa tapahtuvan räjähdysmäisen palotapahtuman riski on verrattain pieni muihin polttoaineisiin nähden.

Rigas & Sklavounos:n mukaan vety on vaarallisimmillaan silloin kun se pääsee vuotamaan säiliöistä tai putkistoista suljetussa tilassa kuten autotallissa ja ei niin ollen pääse tuulettamaan ulkoilmaan niin nopeasti kuin avomaastossa vuotaessaan. Tällaisessa tapauksessa onnettomuusriskiä voidaan vähentää tuulettamalla tilaa jollakin soveltuvalla menetelmällä. Lopuksi Rigas & Sklavounos mainitsevat, että vedyllä on turvallisuusnäkökohdista katsoen samankaltaisuuksia ja eroavaisuuksia muihin liikennepolttoaineisiin nähden. Osa eroavaisuuksista on sellaisia, että ne voivat aiheuttaa suurempia vaurioita perinteisiin polttoaineisiin nähden. Jotkin eroavaisuudet puolestaan on sellaisia, joista voi olla turvallisuushyötyä perinteisiin ratkaisuihin nähden. (Rigas & Sklavounos, 2009, s. 563.)

Kaasumaisen vedyn läsnäoloa on mahdotonta havaita ihmisaistein, jolloin sen havainnointi täytyy toteuttaa tarkoitusta varten suunnitelluilla kaasuntunnistimilla (HyApproval, 2008, s. 97). Kaasumaisen vedyn hajustaminen voisi helpottaa vuodon aistimista, mutta hajustaminen ei onnistu käytännön syistä. Pienestä molekyylin koosta johtuen vety vuotaa pienemmistä rei'istä sekä myös dispersoituu ympäröivään ilmaan nopeammin kuin tunnetut hajusteet (IEA, 2012, s. 243). Hajustuksessa oleellista on, että hajusteen molekyylien tulisi kyetä kulkeutumaan kantokaasun mukana, jotta vaaraa aiheuttava kantokaasu olisi havaittavissa jo pieninä pitoisuuksina. Hajustamiselle esteenä on myös, että autokäytössä yleistyvät PEM-polttokennot eivät siedä kaasujen hajustuksessa käytettyjä edes pieninä pitoisuuksina (Hennings & Reimert, 2007). Aistinvaraista

tunnistamista helpottavan kaasunhajustuksen sijaan vedyn tunnistamiseen on käytettävä soveltuvia kaasuntunnistimia, jotka tunnistavat vetykaasun jo pieninäkin pitoisuuksina (Kopasz, 2007).

Vedyn käyttöä liikennepolttoaineena säädellään ja ohjataan erinäisillä säädöksillä (esimerkiksi (EY) N:o 79/2009 vetykäyttöisten ajoneuvojen tyyppihyväksynnästä jne.), standardeilla ja ohjeilla, joita on lueteltu muun muassa EU-rahoitteen HyFacts-projektin sivustolla (hyfacts.eu). Vety on Rigas & Sklavounos:n mukaan jopa maakaasua ja bensiiniä turvallisempi liikennepolttoaine onnettomuuksissa, jotka tapahtuvat avomaastossa. Maantietunneleissa tapahtuvissa onnettomuuksissa vedyn vaarakomponentit eivät juuri poikkea luonnonkaasun ominaisuuksista. Maakaasun liikennekäyttö puolestaan on varsin yleistä ympäri maailman. (Rigas & Sklavounos, 2009.)

6 AUTONVALMISTAJIEN VETYSTRATEGIAT

Lähes kaikki tunnetuimmat henkilöautonvalmistajat ovat tehneet pitkäkestoista tutkimus ja kehitystyötä vetykäyttöisten ajoneuvojen tekniikan kehittämiseksi. Tämän lisäksi useimmat linja-autonvalmistajat ovat tehneet vastaavaa tutkimus- ja kehitystyötä vetyteknologioiden kanssa. Tässä luvussa käydään lyhyesti läpi joidenkin autonvalmistajien vetyteknologiaan liittyviä aikeita.

6.1 Henkilöautonvalmistajat

Useimmat autonvalmistajat (Honda, General Motors, Daimler) ovat tarjonneet vetykäyttöisiä jo autojaan kuluttajille leasing-sopimuksilla, Honda esimerkiksi jo vuodesta 2008 alkaen (JHFC, 2009) ja Daimler vuodesta 2010 (FuelCellToday, 2012b). Hyundai Motor aikoo saattaa markkinoille tuhannen vetypolttoautoa sarjan vuoteen 2015 mennessä ja tarjota näitä yksityisille ja julkisille leasing-asiakkaille. Mainittu autonvalmistaja on solminut leasing-sopimuksen Kööpenhaminan kaupungin kanssa 15 autosta, jotka toimitetaan asiakkaalle 2013 keväällä. (Hyundai, 2012.) Asiakas saa leasing-sopimuksissa ajoneuvon joko polttoaineinen tai polttoaineen erikseen ostaen etukäteen sovittavalla kuukausimaksulla. (FuelCellToday, 2012b.) Leasing-sopimuksessa ajoneuvon käyttäjä ei kannu riskiä teknologian luotettavuudesta vaan ostaa ikään kuin liikkuvuuspalvelua kiinteällä kuukausisummalla. Leasing-sopimuksen tarjoajan sopimusvoittoena on taata liikkuvuuspalvelu asiakkaalle sopimuksen mukaisesti vaikka ajoneuvo sattuisikin vikaantumaan.

Seitsemän autonvalmistajayhtiön edustajat (Taulukko 6.1) ovat kirjoittaneet vuonna 2009 energia- ja öljy-yhtiöille sekä poliittisille hallintoelimille suunnatun aiesopimuksen (*Letter of Understanding*). Tässä aiesopimuksessaan autonvalmistajat julkisivat aikeensa saattaa vetykäyttöiset henkilöautomallinsa sarjatuotantoon, aikaisimmillaan jo vuonna 2015. Autonvalmistajat halusivat viestittää tällä energia- ja öljy-yhtiöille sekä poliittisille hallintoelimille, että vetykäyttöisten autojen yleistyminen ei ole enää ensisijaisesti riippuvainen autotekniikan kypsyydestä. Tämä yleistyminen riippuu pikemminkin infrastruktuurin olemassaolosta tai sen puutteesta. (FCB, 2009.)

Autonvalmistaja *	Sarjatuotannon aloitus **
Toyota Motor Company	2015
Renault-Nissan Allianssi	2016
Daimler AG, (MB)	2014 (2017)***
Huyn dai Motor Company	2015

Honda	2015
Ford	2020
General Motors	2015

Taulukko 6.1 Autonvalmistajien polttokennoautojen , tiedot vuoden 2012 elokuulta (*FCB, 2009; **FuelCellToday, 2012b) ***Polttokennoauton sarjatuotanto siirtynee vuoteen 2017 (KL, 2013).

Autonvalmistajat pyrkivät tällä vahvalla viestillään rohkaisemaan energiayhtiöitä sekä poliittisia tahoja edistämään vetykäyttöisille autoille soveltuvan energiahuoltoinfrastruktuurin rakentamista Eurooppaan Saksasta aloittaen. Eurooppalaisen vetypolttoaineen jakeluinfrastruktuurin edistämisen lisäksi autonvalmistajat haluavat edistää samaa päämäärää myös Yhdysvalloissa, Japanissa ja Koreassa. (FuelCellToday, 2012b., FCB, 2009.) Fuel Cell Today on koonnut aiemmin mainittuun aiesopimukseen osallistuneiden autonvalmistajien valmistusaikataulusuunnitelmia julkaisuunsa (*Fuel Cell Electric Vehicles: The Road Ahead*) (Taulukko 6.1). Tämän mukaan joidenkin autonvalmistajien sarjatuotannon aloitus alkaa vuoden 2015 jälkeen kun taas Daimler oli aikeissa aloittaa sarjatuotannon jo vuonna 2014. (FuelCellToday, 2012b.)

Lisäksi myös Volkswagen-konserni on demonstroinut polttokennovoimalinjaratkaisuja useammallakin eri alustaratkaisulla jo vuodesta 1996 (Friedrich & Buchi, 2008; VW, 2012). Pitkäkestoisesta kehitystyöstä huolimatta VAG aikoo aloittaa polttokennokäyttöisten autojen sarjavalmistuksen aikaisintaan vuonna 2020 infrastruktuurin kehittymättömyyden ja kustannuskysymysten vuoksi (Volkmar, 2012).

BMW Group ja Toyota Motor Corporation ovat tehneet aiesopimuksen teknologioiden kehittämisestä jonka alaan kuuluu muun muassa aie yhteistyöstä sähköisten voimalinja- ja polttokennovoimalinjaketnologioiden kehittämisessä (BMW, 2012; Toyota, 2012a). Syntyneen yhteistyösopimuksen perusteella voisi arvella, että BMW haluaa tutkia polttokennoteknologiaa vetypolttomoottoriratkaisun lisäksi tai sijaan.

Autonvalmistajat pitävät vetypolttoaineen jakeluinfrastruktuurin puuttumista oleellisena esteenä vetykäyttöisten autojen yleistymiselle ja Honda onkin ryhtynyt toimiin ratkaistakseen polttoainehuollon ongelmat toimittamilleen autoille. Honda on kehittänyt vedyn kotitankkauslaitteen, joka mahdollistaa vetyauton toiminnan myös julkisen jakeluinfrastruktuurin ulkopuolella (Honda, 2012). Toisena esimerkkinä autonvalmistajien aktiivisuudesta infrastruktuuriongelman ratkaisussa mainittakoon Daimler AG:n ja Linde Groupin yhteishanke. Mainitut yhtiöt rahoittavat kustannuksellaan kahdenkymmenen vetytankkausaseman rakentamisen Saksan maanteiden varsille. Rakennettavien tankkausasemien vedyntuotannon energia on määrä tuottaa nimenomaan uusiutuvilla energianlähteillä. (Daimler, 2011.) Pitkäkestoiset ja oletettavasti myös kalliit tutkimus- ja kehityshankkeet sekä viimeksi esitellyt infrastruktuuriongelman ratkaisumallit on tulkittavissa varsin selviksi osoituksiksi vetyautoilun yleistymisen puolesta. Daimler AG:n ja Linden kaupallisvetoinen polttoaineen jakeluasemien rakennushanke on lisäksi varsin rohkea sijoitus, kun huomioidaan tämänhetkinen olematon vetyautokanta.

Autonvalmistajien ajattelemasta ansaintamallista ei ole tällä hetkellä kovin selvää käsitystä, mutta tähänastiset asiakkaiden autot on toimitettu nimenomaan leasing-sopimuksella, joka on asiakkaille varsin riskitön tapa testata uutta tekniikkaa edustavia ajoneuvoja. Ainakin Volkswagen on kaavaillut, että polttokennojen elinikä tulee kestämään auton eliniän ja VW ei odota leasing-omistusmuodon tulevan pysyväksi autonhankintatavaksi (Volkmar, 2012). Tämä tarkoittaa sitä, että polttokennon eliniän on kehityttävä parempaan suuntaan tai ajoneuvojen elinikä tulee olemaan alhaisempi kuin nykytekniikalla on totuttu.

6.2 Muut vetykäyttöiset ajoneuvot

Eurooppalaisista valmistajista ainakin Daimler, VanHool, Wrightbus ja MAN ja jotkin muut valmistajat sekä aasialaiset Toyota-Hino Allianssi sekä Hyundai ovat kehittäneet ja demonstroineet vetykäyttöisiä busseja jo useamman vuoden ajan (JHFC, 2010; HyFLEET:CUTE, 2009; FuelCellToday, 2012a). Eri polttokennobussien valmistajien sarjatuotannon aloitusajankohdista ei ole juurikaan vielä julkisesti saatavilla olevia tietoja, mutta esimerkiksi Toyota-Hino allianssi aikoo lanseerata polttokennokäyttöisen bussin vuonna 2016 (Toyota, 2012b). Fuel Cell Today-markkinatutkimustoimisto odottaa, että ensimmäiset kaupalliset asiakastoimitukset tullaan näkemään tässä ajoneuvosegmentissä lähivuosina. (FuelCellToday, 2012a.)

Henkilöautojen sekä kaupunkibussien lisäksi vetykäyttöisiä voimalinjaratkaisuja tiedetään tutkitun myös pakettiautokokoluokissa. Daimler on ollut aktiivisessa roolissa tässäkin segmentissä julkistettuaan ensimmäiset vetypolttokennokäyttöiset tavara-autot tutkimus ja demonstraatiokäyttöön jo vuosina 2001 ja 2004. Daimlerin toisen sukupolven vetypolttokennokäyttöistä MB Sprinter-pakettiautoa oli koeajettu arkipäivän jakeluajossa United Parcel Servicen toimesta noin kaksi vuotta vuoteen 2010 tullessa. (Froeschle & Wind, 2010.)

7 ENERGIAKETJUN VERTAILUA

Energiaketjujen tarkastelut ja vertailut on suoritettu tässä työssä skenaariotarkasteluiden avulla. Kussakin skenaariotarkastelussa primäärienergian lähteiksi vakioitiin samoja tai samantyyppisiä primäärienergian lajeja. Sekä henkilöautojen että kaupunkibussien ensimmäisessä skenaariossa primäärienergian lajeiksi vakioitiin hiilipitoiset fossiiliset primäärienergian lähteet kivihiihi, raakaöljy sekä maakaasu. Toisessa skenaariotarkastelussa primäärienergianlähteiksi valittiin pelkästään maakaasu ja kolmannessa primäärienergian lajiksi valittiin pelkästään tuulivoima. Kussakin keskitetyn tuotannon prosesseiksi valittiin kullekin primäärienergian lajille tyypillisiä tuotantomuotoja. Esimerkiksi ensimmäisessä skenaariossa sähköntuotantotavaksi valittiin konventionaalinen hiilivoimalaitos. Energiaketjuja on muodostettu eri skenaarioiden sisällä valittujen primäärienergiälajien mukaisesti.

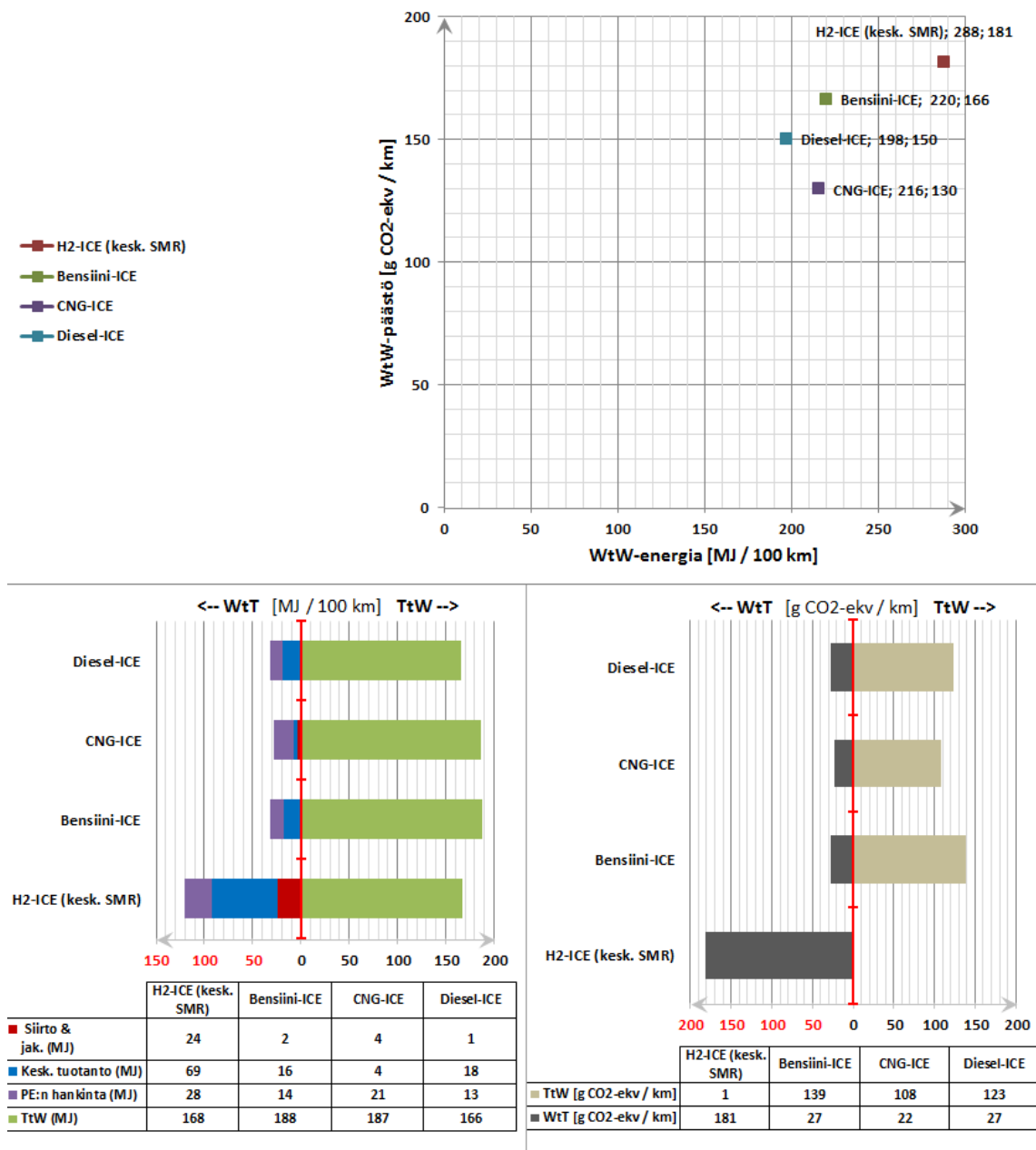
Tarkasteluissa on mukana vain sellaisia vetyenergiaketjuja, joissa vedyn jakelu tapahtuu kaasumaisena vetynä. Mukana ei ole sellaisia ketjuja, joissa siirto tapahtuisi maantiekuljetusyksiköillä kaasumaisessa tai nesteytetyssä muodossa. Siirto- ja jakelumenetelmiksi on niin ollen valittu kaasumaisen vedyn putkisiirto tai jakeluasemakohtainen tuotanto SMR:llä tai elektrolyysillä. Näin muodostetut energiatarkastelut kuvaavat vedyn osalta lähinnä sitä tilannetta jossa vedyn jakeluinfrastruktuuri olisi täysin kehittynyt ja optimoitu mahdollisimman energiatehokkaaksi. Näin saadut tarkasteluiden tulokset kuvaavat, kuinka tehokas jokin vetyyn perustuva energiaketju voisi olla tehokkaimmillaan muihin ketjuihin nähden.

7.1 Henkilöautojen energiaketjujen skenaariotarkastelua

Henkilöautojen skenaariotarkastelussa tarkasteluun muodostettiin sellaisia energiaketjuja, jotka ovat relevantteja kunkin skenaarion mukaisilla primäärienergian lajeilla ja tyypeillä. Skenaariotarkasteluissa käytetyt vakioinnit ja valinnat on kuvattu luvussa 3.7.

7.1.1 Hiilipitoiset fossiiliset primäärienergiat - skenaario

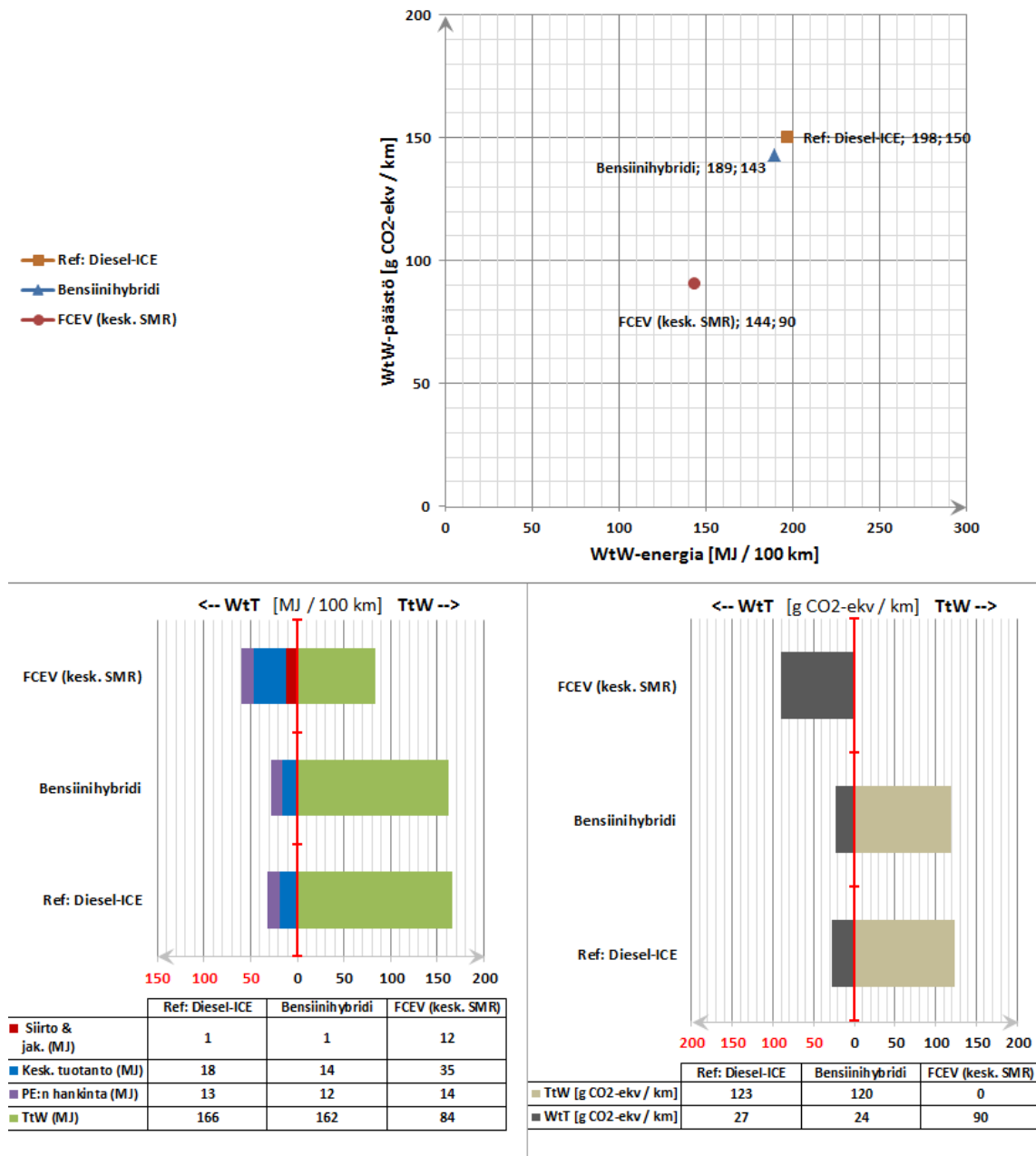
Hiilipitoiset fossiiliset-skenaariotarkastelun energiaketjuissa on mukana kaikki mallinnuksen mahdollistamat henkilöautojen voimalinjat ja nämä energiaketjut käydään tässä lävitse vaiheittain. Tarkastelu aloitettiin tarkastelemalla sellaisia energiaketjuja, joiden tapauksessa ajoneuvon voimalinja on toteutettu polttomoottorilla. Tämän tarkastelun energiatehokkain energiaketju on valittu referenssiksi seuraavaan tarkasteluun, jossa mukana on myös edistyneempää teknologiaa edustavia energiaketjuja.



Kuva 7.1 Polttomoottorivoimalinjojen energiaketjujen vertailua. Selitteet: **H2-ICE:** Vetypolttomoottori, **Bensiini-ICE:** bensiinipolttomoottori, **CNG-ICE:** luonnonkaasupolttomoottori, **Diesel-ICE:** dieselpolttomoottori, **WtT:** Well-to-Tank, **TtW:** Tank-to-Wheels, **WtW:** Well-to-Wheels, **kesk. SMR:** keskitetty höyryreformointi.

Tässä tarkastelussa (Kuva 7.1) energiatehokkain ketju on tavallisen dieselpolttomoottori-auton energiaketju, jonka primäärienergian käyttö on 198 MJ/100 km ja päästö 150 g_{CO₂-ekv}./km. Tarkastelun pienin ilmastovaikutus on puolestaan luonnonkaasuauton ketjulla joka saa arvot 216 MJ/100 km ja 130 g_{CO₂-ekv}./km. Vetypolttomoottori-auton energiaketjun KHK-päästöt sekä primäärienergian käyttö ovat odotetusti vertailun suurimmat ja saa arvot 288 MJ/100 km ja 181 g_{CO₂-ekv}./km.

Vetypolttomootoriketjun WtT-energiankäyttö sekä -kasvihuonekaasupäästöt ovat selkeästi muita ketjuja suuremmat, kun taas TtW-energiankäyttö sekä -päästöt ovat muita ketjuja pienemmät. Vertailun energiatehokkain vaihtoehto eli diesel-energiaketju toimii referenssinä seuraavassa vertailussa.

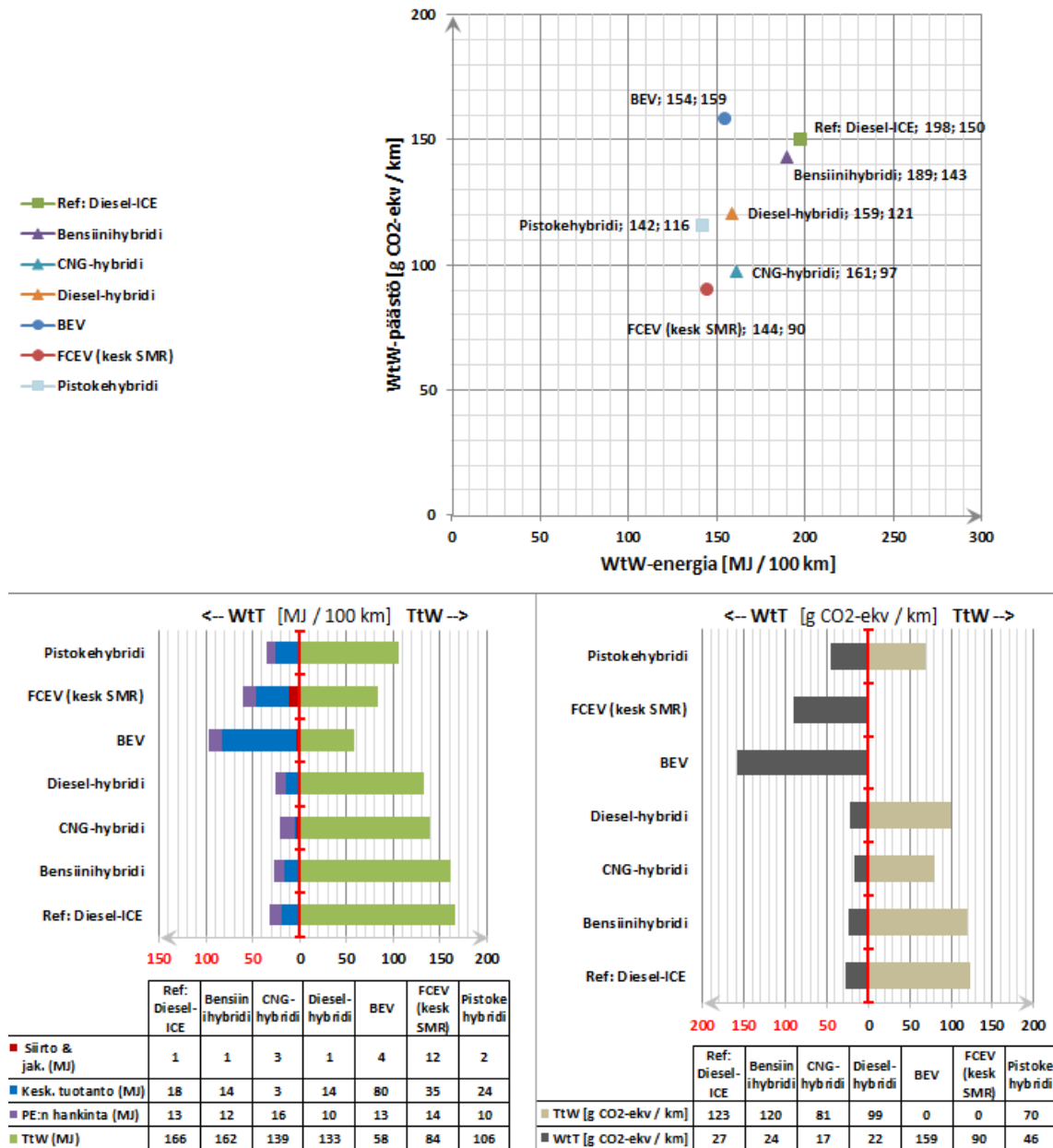


Kuva 7.2 Polttokennovoimalinjan, bensiinihybridin sekä diesel-polttomoottorin energiaketjujen vertailua. Lyhenteiden selitteet; FCEV: Polttokennoauto

Tässä tarkastelussa (Kuva 7.2) energiatehokkain sekä vähäpäästöisin energiaketju on polttokennoauton ketju, jonka primäärienergian käyttö on 144 MJ/100 km ja päästö on 90 g_{CO₂-ekv}/km. Referenssiksi valittu diesel-polttomoottoriauton energiaketju on vertailun tehottomin ja tämän primäärienergian käyttö on 198 MJ/100 km ja ilmastovaikutus

150 g_{CO2-ekv./km}. Bensiinihybridi-ketjun vastaavat arvot (189 MJ/100 km & 143 g_{CO2-ekv./km}) sijoittuvat lähelle diesel-polttomootoriauton vastaavia arvoja.

Uudempien voimalinjaratkaisujen avulla saavutettava primärenergiankäytön vähenemä näyttäisi olevan merkittävä diesel-ketjuun nähden. Tämän vuoksi seuraavassa tarkastelussa keskityttiin tarkastelemaan erityisesti uudempaa tekniikkaa edustavien autojen energiaketjuja.



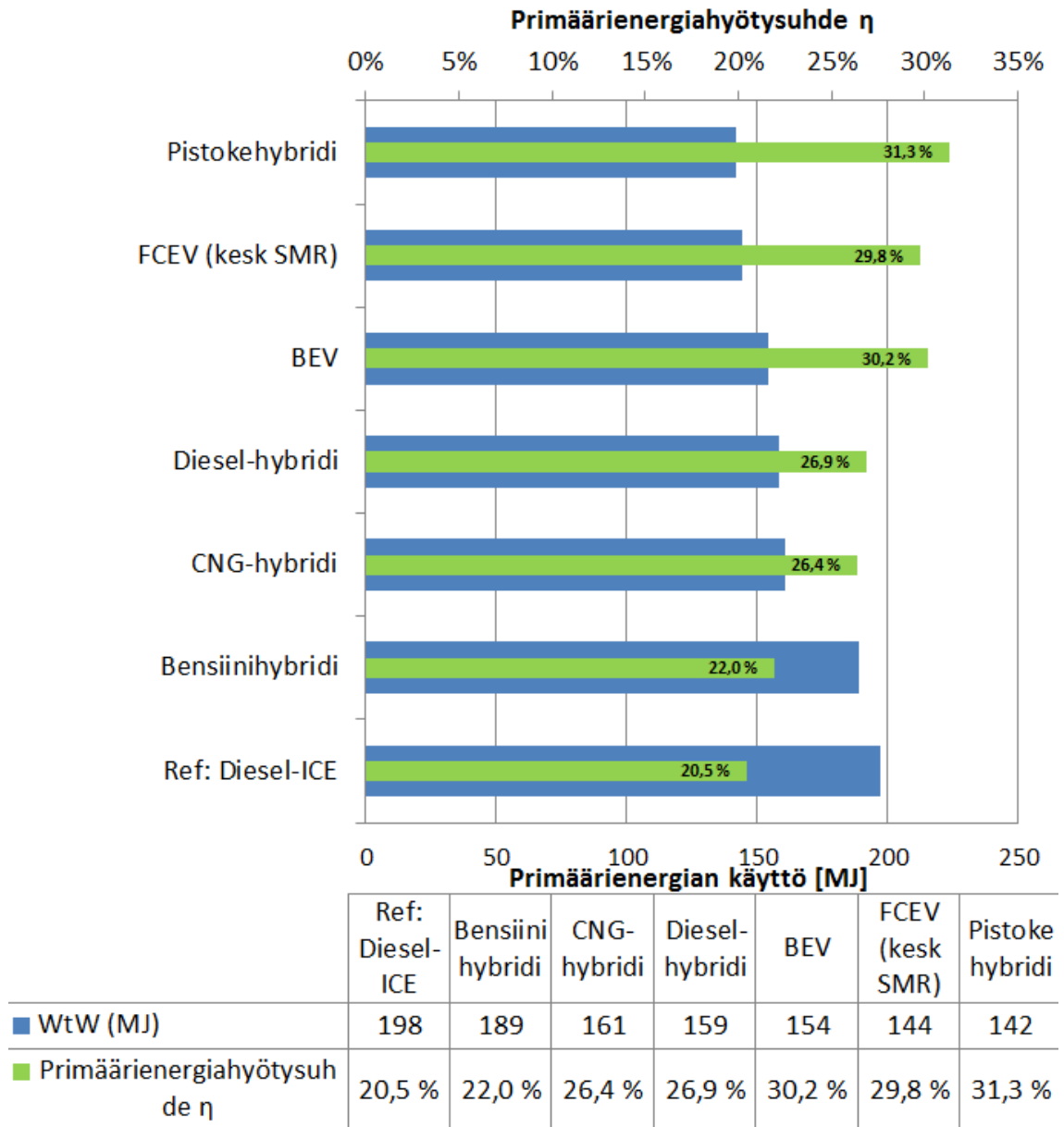
Kuva 7.3 Uudempaa voimalinjaratkaisua edustavien henkilöautojen energiaketjujen vertailua. Lyhenteiden selitteet: **BEV:** Akkusähköinen auto, **CNG-hybridi:** luonnonkaasuhybridi

Tässä tarkastelussa (Kuva 7.3) ladattavan hybridin energiaketju on energiatehokkain primärenergian käytön ollessa 142 MJ/100 km ja päästön ollessa 116 g_{CO2-ekv./km} ja. Polttokennoauton energiaketju saa vastaavat arvot 144 MJ/100 km ja 90 g_{CO2-ekv./km} ja

on näin ollen tämän ilmastovaikutus on edellistä pienempi. Luonnonkaasukäyttöisen hybridin ketjun arvot sijoittuvat hyvin lähelle polttokennokitjua saaden arvot 161 MJ/100 km ja 97 g_{CO₂-ekv}/km. Tarkastelun yllättävin tulos lienee akkusähköisen energiaketjun arvot (154 MJ/100 km ja 159 g_{CO₂-ekv}/km) erityisesti ilmastovaikutusten osalta. Akkusähköisen päästöt ovat lähes 1,8-kertaiset polttokennoauton energiaketjuun nähden.

Tulos skaalautuu ladattavan hybridin energiaketjua lukuun ottamatta kaikille ajosuoritteiden pituuksille, mutta akkusähköisen auton tapauksessa vain toimintasäteen mahdollistamissa rajoissa (tyypillisesti 160 km asti). Ladattavan hybridin energiaketju menettää energiatehokkuusetuaan muihin energiaketjuihin nähden ajosuoritteiden pituuden kasvaessa.

Joissain liikenteen energiankäyttöä koskevissa tutkimuksissa on käytetty absoluuttisen primäärienergian käytön arvon sijaan primäärienergiahyötysuhdetta. Näin ollen seuraavaksi esitetään edellä saadut WtW-energiankäytön tulokset myös primäärienergiahyötysuhteina.



Kuva 7.4 Uudempaa voimalinjatekniikkaa edustavien henkilöautojen energiaketjujen vertailua, primäärienergiähyötysuhteet sekä vastaavat primäärienergian kulutukset.

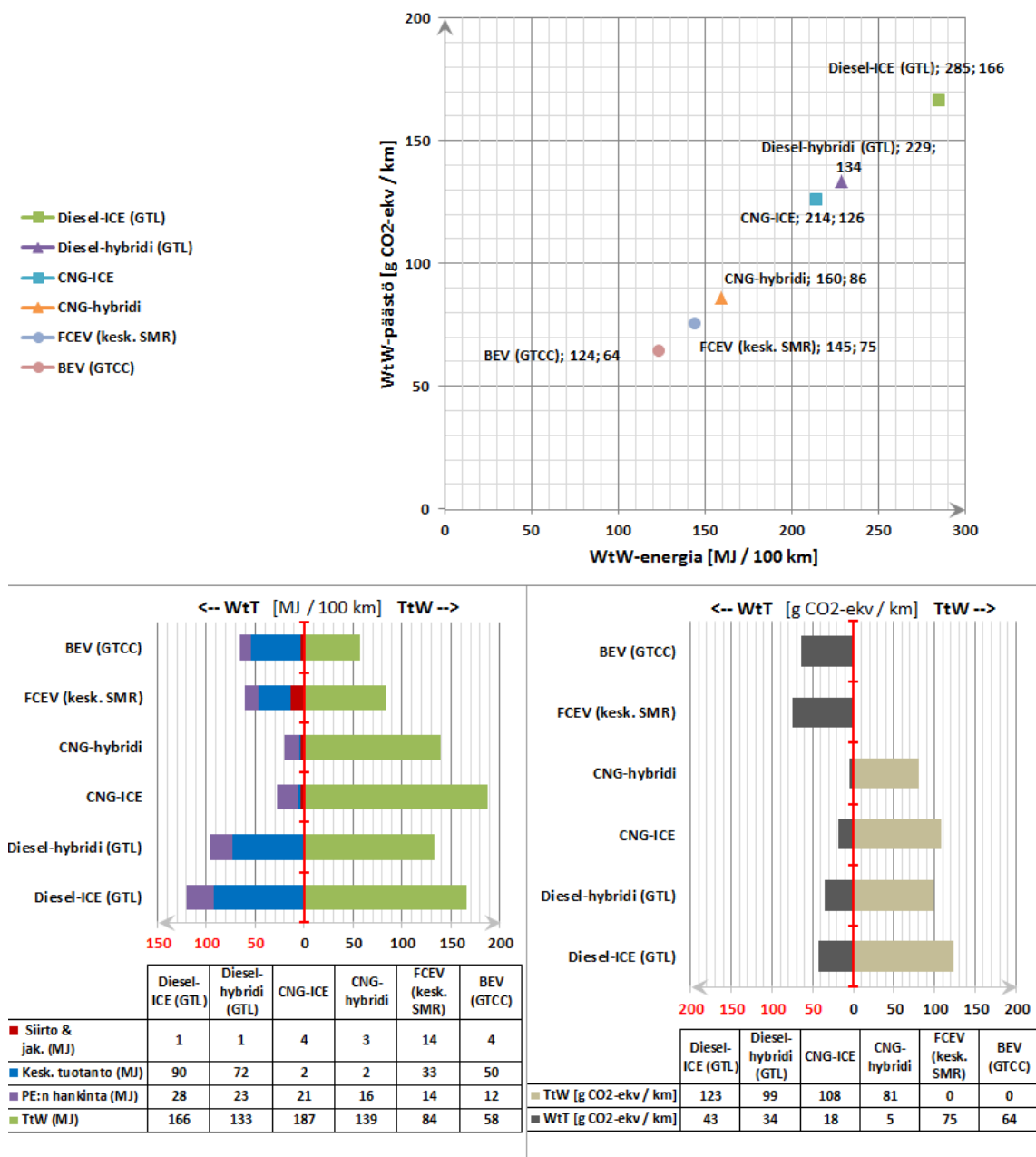
Tässä tarkastelussa (Kuva 7.4) on huomionarvoista, että akkusähköisen energiaketjun primäärienergiähyötysuhde on tässä tarkastelussa vertailun toiseksi paras (30,2 %), mutta absoluuttinen primäärienergiätehokkuus vasta tarkastelun kolmanneksi paras (154 MJ/100). Näiden tunnuslukujen välillä ei ole ristiriitaa koska primäärienergiähyötysuhde kertoo ainoastaan sen, kuinka hyvin energiaketju pystyy muuntamaan primäärienergian fyysiseksi työksi ajoneuvon pyörillä. Näin ollen hyötysuhteen arvo ei ota huomioon ajosuoritteen todellista fyysisen työn määrää.

Ladattavan hybridin TtW-energiäsyötteen kulutus ja keskinäinen suhde muuttuvat epäsuorasti ajettavan matkan funktiona ja niin ollen tämä tulos on ladattavan hybridin osalta voimassa vain ajosuoritteella 100 km. Pienillä ajosuoritteiden pituuksilla ak-

kusähkön suhteellinen osuus energiankäytöstä on suuri ja pienenee ajosuoritteen pituuden kasvaessa. Näin ollen ladattavan hybridin energiaketju menettää energiatehokkuusetuaan muihin energiaketjuihin nähden ajosuoritteen pituuden kasvaessa.

7.1.2 Luonnonkaasuskenaario

Luonnonkaasuskenaariossa tarkasteltiin sellaisia energiaketjuja, jotka voivat olla mielekkäitä sellaisessa tapauksessa jolloin käytettävissä on syystä tai toisesta maakaasua ja ei esimerkiksi raakaöljyä. Mukaan otettiin referenssiksi myös diesel-polttomoottori- ja diesel-hybridivoimalinjaan perustuvat energiaketjut, joiden diesel valmistetaan GTL-prosessilla (*Gas-to-Liquid*).



Kuva 7.5 Energiaketjujen vertailua: Primäärienergian lähteenä maakaasu. Lyhenteiden selitteet; *GTL*: Gas-to-Liquid, *GTCC*: kaasuturbiinikombivoimalaitos.

Tässä tarkastelussa (Kuva 7.5) akkusähköisen auton energiaketju on sekä energiatehokkain että pienipäästöisin ja tämän ketjun primäärienergian käyttö on 124 MJ/100 km ja KHK-päästöt 64 g_{CO₂-ekv./km}. Polttokennovoimalinjan ketju on tarkastelun toiseksi paras molemmilla mittareilla mitattuna ja saa arvot 145 MJ/100 km ja 75 g_{CO₂-ekv./km}. Luonnonkaasuhybridin energiaketju saa arvot 160 MJ/100 km ja 86 g_{CO₂-ekv./km} sijoittuu vertailussa kolmanneksi parhaiten molemmilla mittareilla tarkasteltuna.

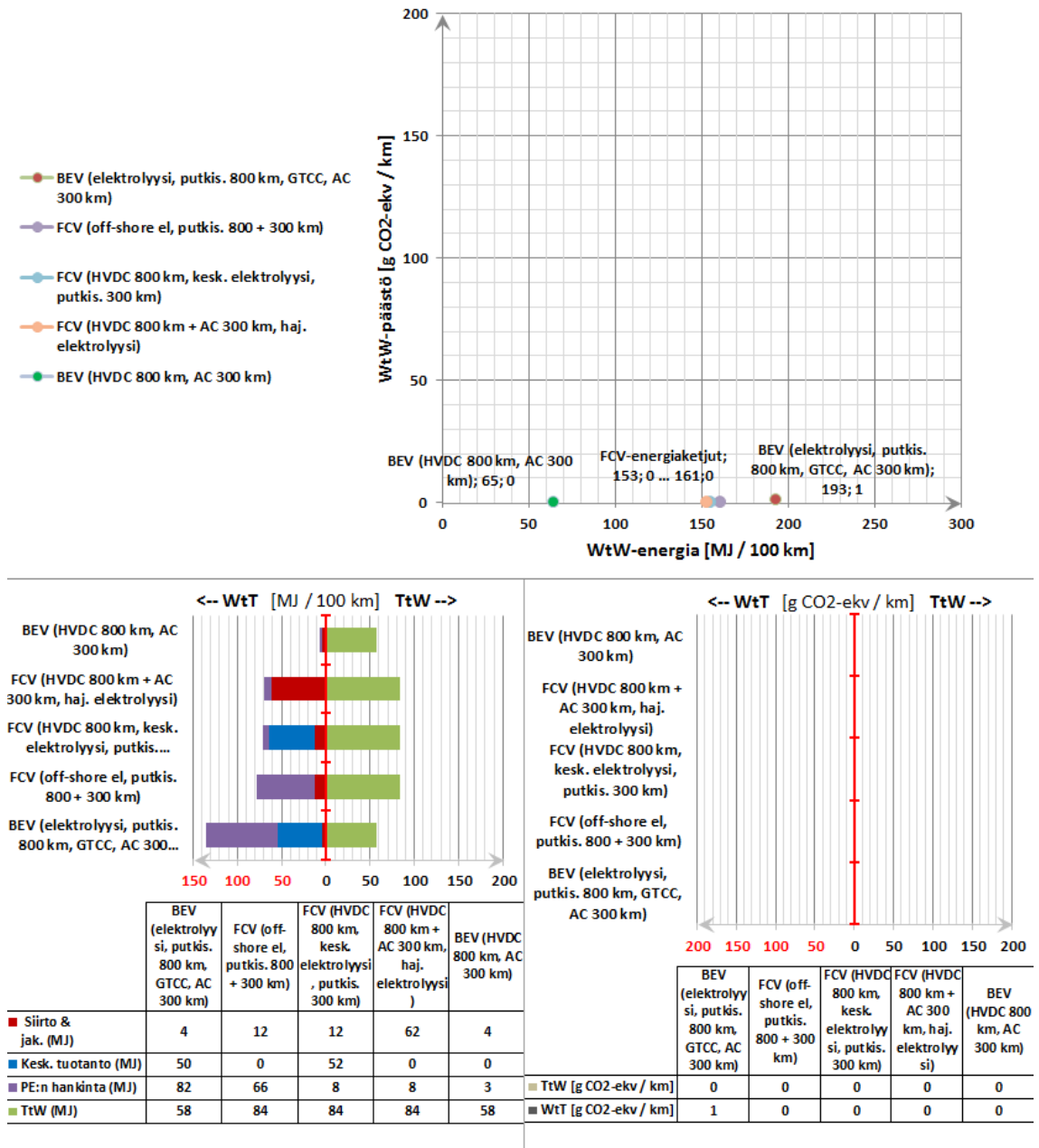
Tulos on tarkastelun energiatehokkaimman ketjun osalta varsin odotettu, sillä tässä ketjussa GTCC-voimalaitoksen sähköntuotannon hyvä hyötysuhde (≈55 %) yhdistetty akkusähköisen voimalinjan hyvän hyötysuhteen (≈ 80 %) kanssa. Nämä kompensoivat kirkkaasti akkusähköauton suuremman fyysisen pyörätyön tarpeen. Fyysinen pyörätyö on akkusähköauton tapauksessa (46,53 MJ/100 km) ja esimerkiksi polttokennovoimalinjan tapauksessa sama arvo on 42,92 MJ/100 km.

Kaikki tämän tarkastelun energiaketjujen energiatehokkuusjärjestys on luonnollisesti voimassa myös muilla luonnonkaasun hankintatavoilla. Nämä ketjut olisi mahdollista toteuttaa myös neitseellisellä tai jättepohjaisella biomassalla kaasutuksen ja mädätyksen avulla. Tällöin primäärienergian käyttö kasvaisi kaikissa ketjuissa, mutta KHK-päästöt lähestyisivät nollaa. Jos vastaava tarkastelu tehtäisiin neitseelliselle puu-biomassalle, niin vedyn tuotanto olisi mahdollisesti järkevintä toteuttaa suoralla puun kaasutuksella ilman metaanintuotannon prosessia.

Luonnonkaasuskenaarioiden tuloksia tarkasteltaessa on hyvä muistaa, että ainoat koeteltua autotekniikkaa sekä siirto- ja jakeluinfrastruktuuria edustavat energiaketjut ovat luonnonkaasu- sekä diesel-energiaketjut. Polttokennovoimalinjan energiaketju tarjoaa luonnonkaasuskenaariossa ainoastaan noin 10 % energiansäästön ja päästövähennemmän luonnonkaasuhybridin verrattuna, vaikka luonnonkaasuhybridin onkin hyvin ”miedosti” mitoitettu.

7.1.3 Uusiutuva sähkövoima – skenaario

Skenaariotarkastelun energiaketjuvalinnat on kuvattu menetelmäkuvausluvussa 3.7.3. Tarkastelussa on mukana kaksi akkusähköisen auton energiaketjua ja kolme erilaista vetypolttokennokenketjua.



Kuva 7.6 Akkusähköisten ja polttokennovoimalinjojen energiaketjujen vertailua, primäärienergiana tuulivoima. Selitteiden suluissa olevat osat viittaavat energiankonversio- ja siirtoprosesseihin. Lyhenteiden selitteet; BEV: Akkusähköauto, FCV: Polttokennoauto, AC: vaihtovirtasiirtoyhteys, off-shore el.: tuulivoimapuiston elektrolyysilaitteisto, kesk: keskitetty, haj: hajautettu, HVDC: korkeajännitteinen tasavirtasiirtoyhteys.

Tässä tarkastelussa (Kuva 7.6) energiatehokkuusjärjestys on varsin odotettu, sillä primäärienergiaksi laskettava tuulivoima on muunnettavissa 100 prosentin hyötysuhteella sähköksi. Tämä taas edustaa jo valmiiksi sitä energialajia joka kelpaa akkusähköisen voimalinjan syötteenä. Akkusähköisen auton se energiaketju, jossa tuulivoima toimitetaan sähköenergiana mantereelle, käyttää primäärienergiaa 65 MJ/100 km. Toinen vertailussa oleva akkusähköauton energiaketju sijoittuu tarkastelussa huonoiten ja saa primäärienergiankäytön arvon 193 MJ/100 km ja aiheuttaa myös nimellisen kasvihuone-

kaasupäästön ($1 \text{ g}_{\text{CO}_2\text{-ekv./km}}$). Tämä päästö on peräisin GTCC-voimalaitoksesta, jossa vety muunnetaan sähköksi. Jos tuulivoima on syystä tai toisesta muutettava vedyksi (off-shore -elektrolyysillä), sitä ei ole mielekäästä muuntaa takaisin sähköenergiaksi voimalaitoksissa. Energiatehokkaampaa on käyttää vety mieluummin polttokennoauton energiasyötteenä. Vertailussa mukana olleet polttokennovoimalinjaan perustuvat ketjut sijoittuivat hyvin lähelle toisiaan ja energiatehokkain ($153 \text{ MJ}/100 \text{ km}$) on se energia-ketju, jossa vety tuotetaan jakeluaseman yhteyteen sijoitetulla elektrolyysituotannolla. Tehottomimmassa polttokennoketjussa vety tuotetaan elektrolyysillä tuulivoimapuiston yhteydessä ja siirretään mantereelle 800 kilometrin pituisella siirtoputkella. Tämä tulos skaalautuu myös muille ajosuoritteiden pituuksille, mutta akkusähköisen voimalinjan tapauksessa vain toimintasäteen rajoissa.

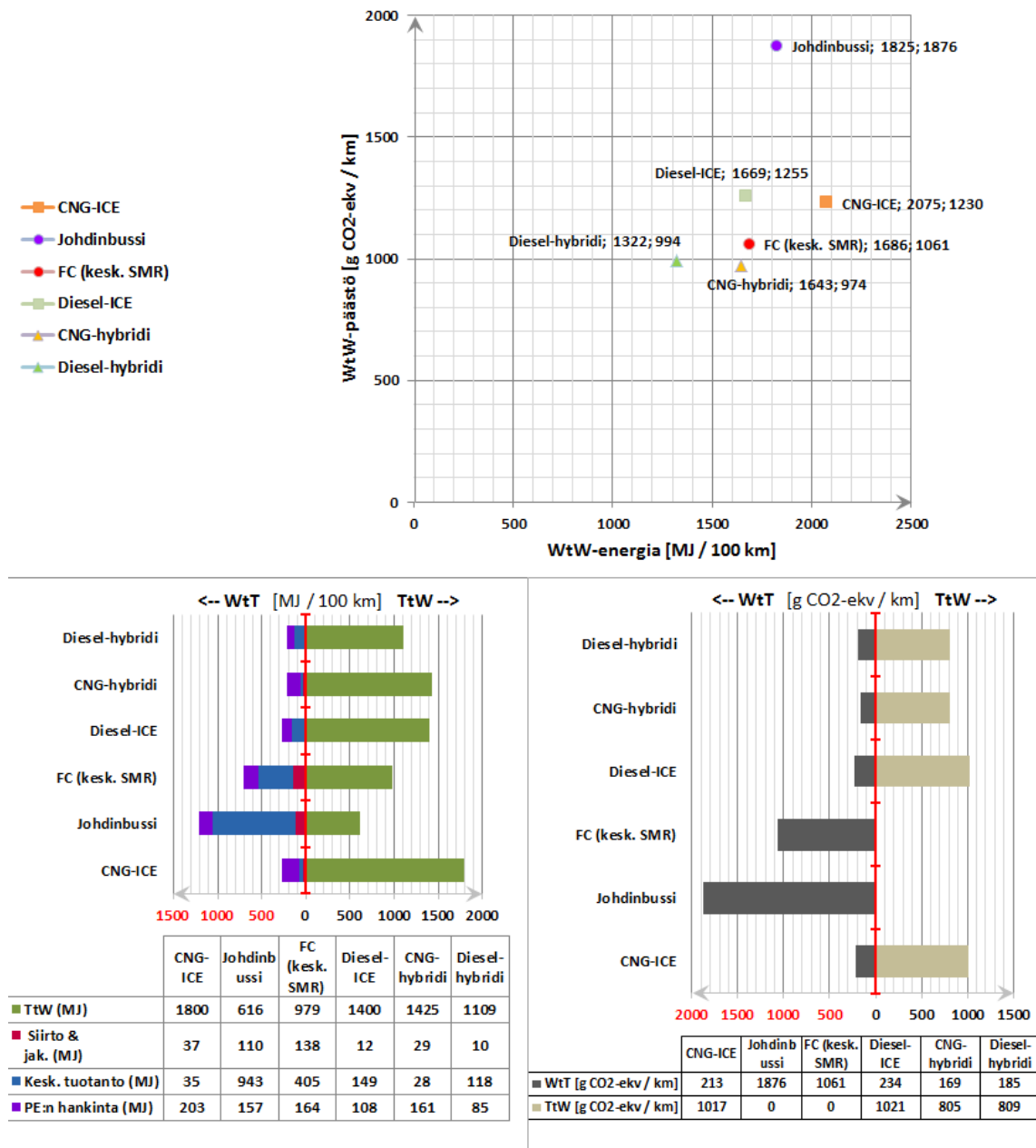
Eräänä huomionarvoisena seikkana on syytä todeta, että jopa tämän tarkastelun heikoiten menestyvän ketjun primäärienergiankäyttö saa pienemmän arvon kuin ensimmäisen tarkastelun diesel- ketju. Diesel-auton energiaketju primäärienergia on peräisin raakaöljystä ja tämä sijoittui energiatehokkuudessa parhaiten ensimmäisessä tarkastelussa.

7.2 Bussien energiaketjujen tarkastelua

Kaupunkibussien skenaariotarkastelussa tarkasteluun muodostettiin sellaisia energiaketjuja, jotka ovat relevantteja skenaarion mukaisilla primäärienergian lajeilla. Skenaariotarkasteluissa käytetyt vakioinnit ja valinnat on kuvattu luvussa 3.7. Koska bussien mahdollisia voimalinjaratkaisuja on sisällytetty malliin vähemmän kuin henkilöautojen tapauksessa, skenaariotarkastelut ovat kaupunkibussien tapauksessa huomattavasti lyhyempiä henkilöautojen skenaariotarkasteluihin nähden.

7.2.1 Hiilipitoiset fossiiliset primäärienergiat - skenaario

Hiilipitoiset fossiiliset - tarkasteluskenaarioon valittiin mukaan kaikki kaupunkibussien voimalinjavaihtoehdot. Tämän skenaarion primäärienergianhankintaketjut vastaavat likimain suomalaista energianhankinnan nykytilaa.



Kuva 7.7 Kaupunkibussien energiaketjujen vertailua konventionaalisilla hiilipitoisilla primäärienergianlähteillä. Lyhenteiden selitteet; **Diesel-ICE:** diesel-polttomoottori, **CNG-ICE:** luonnonkaasupolttomoottori, **CNG-hybridi:** luonnonkaasuhybridi, **FC:** polttokennovoimalinja, **kesk. SMR:** keskitetty höyryreformointi.

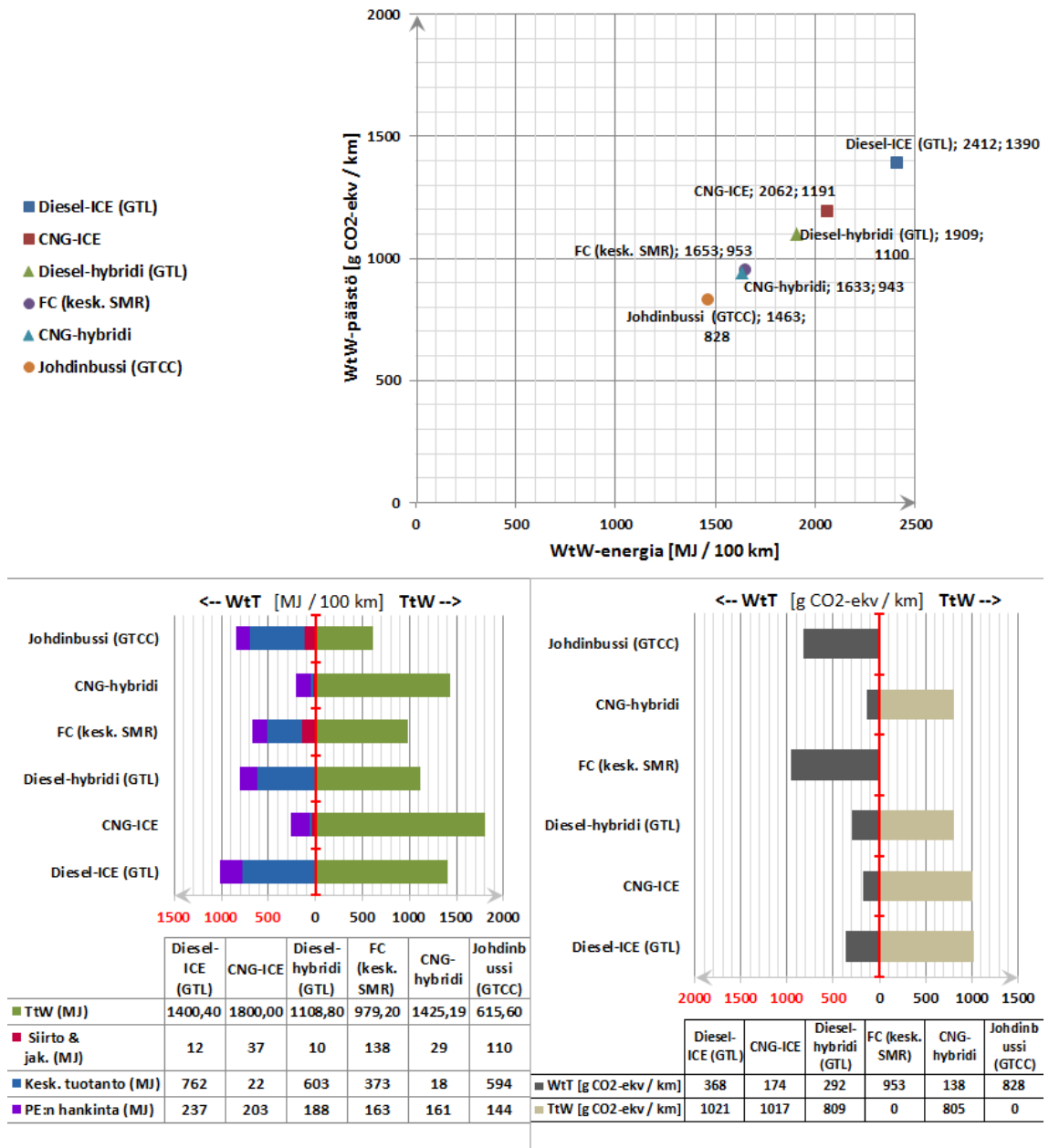
Tässä tarkastelussa (Kuva 7.8) diesel-hybridivoimalinjan energiaketju on vertailun energiatehokkain saaden arvot 1322 MJ/100 km ja 994 g_{CO₂-ekv}/km. Polttokennobussin ketju sijoittuu energiatehokkuusjärjestyksessä vertailun neljänneksi dieselpolttomoottoribussin sekä luonnonkaasuhybridin jälkeen, saaden vastaavat arvot 1686 MJ/100 km ja

1061 g_{CO₂-ekv.}/km. Polttokennobussin ketjun tapauksessa sekä päästöt että energiankäytön arvot ylittävät diesel- ja luonnonkaasuhybridin vastaavat arvot.

Tarkastelun yllätyksellisin tulos lienee, että ajojohdinbussin energiaketju on vertailun toiseksi tehottomin ja aiheuttaa eniten KHK-päästöjä. Johdinbussin energiaketju saa arvot 1825 MJ/100 km ja 1876 g_{CO₂-ekv.}/km. Tässä on kuitenkin syytä muistaa, että tässä skenaariossa sähköntuotantotavaksi on valittu konventionaalinen hiilivoimalaitos, jonka sähköntuotannon hyötysuhde on 43,5 %, ja polttoaine puhdasta hiiltä. Konventionaalisen hiililauhdevoimalaitoksen hyötysuhde on verrattain keho ja tämä vaikuttaa epäedullisesti tämän ketjun sijoitukseen.

7.2.2 Luonnonkaasuskenaario

Luonnonkaasuskenaariossa tarkastellaan sellaisia energiaketjuja jotka ovat relevantteja kun käytettävissä oleva primäärienergia on maakaasua. Tarkasteluun on otettu referenssiksi mukaan myös diesel-polttomoottoriin ja diesel-hybridiin perustuvat energiaketjut, joiden käyttämä diesel valmistetaan maakaasusta GTL-prosessilla.



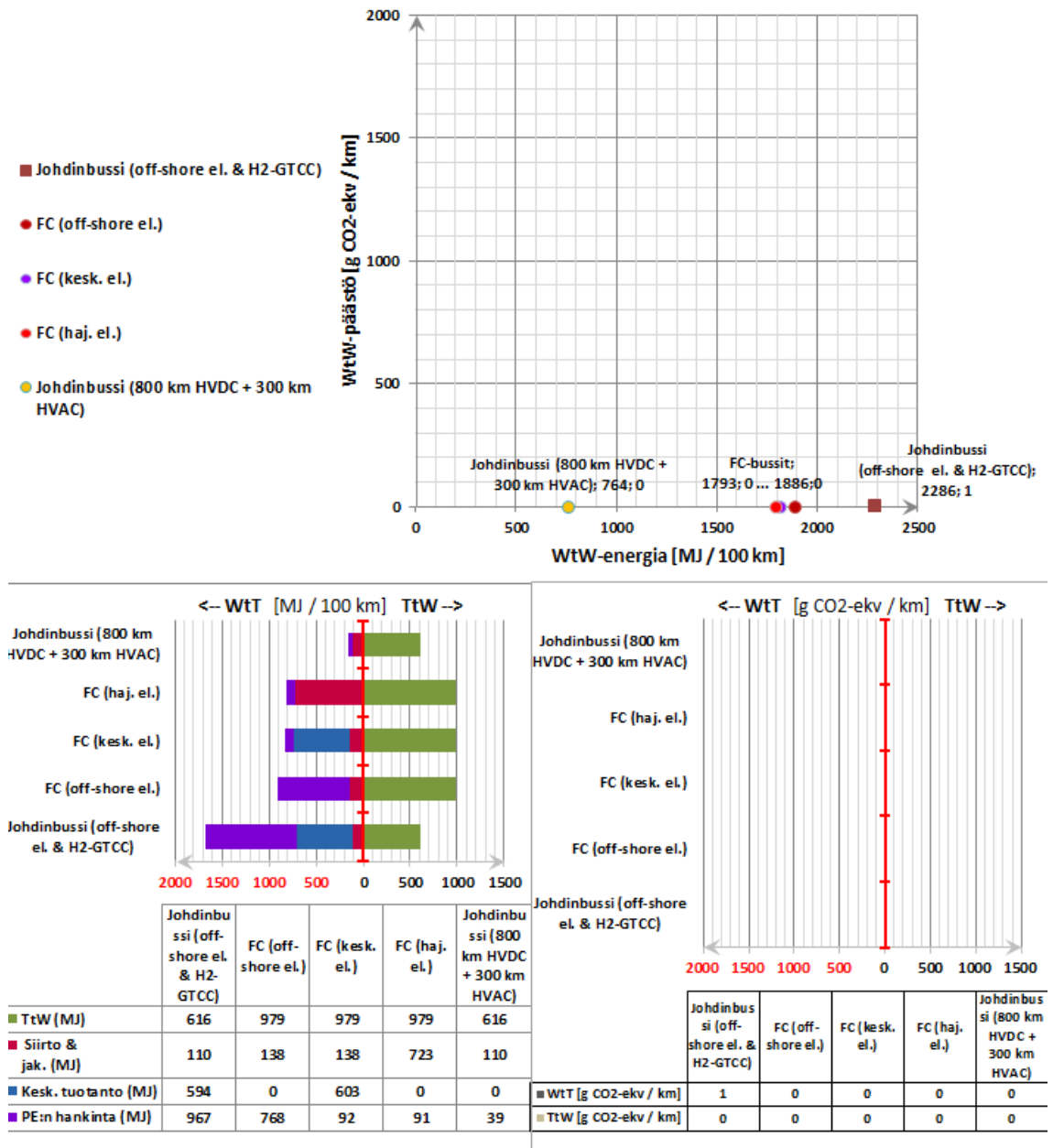
Kuva 7.8 Kaupunkibussien energiaketjujen vertailua, primäärienergianlähteenä maakaasu. Lyhenteiden selitteet: Kuten henkilöautojen vastaavassa tarkastelussa.

Tässä vertailussa (Kuva 7.8) energiategokkuusjärjestys on kutakuinkin odotettavissa. Johdinbussin energiaketjun primäärienergian käyttö saa arvon 1463 MJ/100 km ja KHK-päästö 828 g_{CO₂-ekv}/km. Polttokennobussin energiaketju saa tosin hieman yllättäen huomattavasti pienemmät arvot kuin luonnonkaasuhybridin energiaketju ja tämä on vasta vertailun kolmanneksi paras molemmilla mittareilla tarkasteltuna. Polttokennobussin energia ketju saa arvot 1653 MJ/100 km ja 953 g_{CO₂-ekv}/km kun luonnonkaasuhybridin ketjun vastaavat arvot ovat 1633 MJ/100 km ja 943 g_{CO₂-ekv}/km. Ero tuskin on huomattava, mutta tämän perusteella luonnonkaasukäyttöinen hybridi voisi olla järkevämpi ratkaisu niin päästöjen kuin energiategokkuuden kannalta suomalaisessa kaupunkiliikennöinnissä. Luonnonkaasuhybridin energiaketjun primäärienergian käyttö on

11,6 % suurempi kuin johdinbussin tapauksessa ja polttokennobussin ketjulla sama luku on 12,9 %.

7.2.3 Uusiutuva sähkövoima - skenaario

Uusiutuva sähkövoima-skenaariotarkasteluun on otettu mukaan kaksi johdinbussitekniikan mahdollistamaa ketjua ja lisäksi kolme polttokennovoimalinjan mahdollistamaa energiaketjua. Näiden ketjujen toteutukset on sähköisiä voimalinjoja lukuun ottamatta samanlainen vastaavan henkilöautoskenaariotarkastelun kanssa (Luku 7.1.3).



Kuva 7.9 Kaupunkibussien energiaketjujen vertailua, primäärienergianlähteenä tuulivoima. Selitteiden suluissa olevat lyhenteet viittaavat konversio- ja siirtoprosesseihin. Lyhenteiden selitteet; FC: polttokennovoimalinja, muut lyhenteet kuten henkilöautojen vastaavassa tarkastelussa.

Tämän vertailun (Kuva 7.9) ketjujen energiatehokkuusjärjestys on varsin hyvin arvattavissa. Johdinbussin verrattain pieni TtW-energiankulutus yhdistyy energiatehokkaimmassa ketjussa sähkönsiirron hyvään energiatehokkuuteen. Lisäksi primäärienergia muunnetaan 100 prosentin hyötysuhteella sähköksi, joka soveltuu käytettäväksi bussin voimalinjassa ilman energialajien välisiä konversiota. Koska tässä ketjussa ei tapahdu energialajien välisiä konversioita, tässä ketjussa ei tapahdu myöskään merkittäviä konversiohäviöitä. Ajojohdinbussin primäärienergiankäyttö on tässä tapauksessa 764 MJ / 100 km. Tarkastelun tehottomin energiaketju (2286 MJ/100 km) on johdinbussitekniikkaan pohjautuva ketju. Tässä tuulivoima muutetaan off-shore-elektrolyysillä vedyksi ja siirretään 800 km mantereelle ja edelleen muunnetaan sähköksi GTCC-lauhdelaitoksella. Tämän ketjun primäärienergian käyttö on noin 3-kertainen tehokkaimpaan ketjuun nähden. Kuten on jo tiedettyä, tuotettua vetyä ei ole mielekästä muuntaa voimalaitoksessa sähköenergiaksi vaan tämä kannattaa mieluummin käyttää polttokennovoimalinjan polttoaineena.

Polttokennokitjuista tehokkaimmat ovat jakeluasemaelektrolyysiin sekä keskitettyyn elektrolyysiin perustuvat energiaketjut, joiden primäärienergiankäyttö on molemmilla luokkaa 1800 MJ/100 km. Energiatehottomin polttokennotekniikkaan perustuva ketju on puolestaan off-shore-elektrolyysiin perustuva energiaketju, jossa vety tuotetaan elektrolyysillä tuulivoimapuiston läheisyydessä ja siirretään putkisiirrolla mantereelle. Tämän ketjun primäärienergian käyttö on 1886 MJ/100 km. Energiatehokkaimman polttokennokitjun primäärienergiankäyttö on hieman alle 2,4-kertainen johdinbussin energiaketjuun nähden. Tehottomimman polttokennokitjun primäärienergian käyttö on puolestaan yli 2,4-kertainen johdinbussin energiaketjuun nähden.

7.3 Tulosten yhteenveto

Työssä saatuja tuloksia analysoitaessa on nähtävissä, että ne energiaketjut ovat tyypillisesti energiatehokkaimpia, joissa eri energialajien välisiä konversioita on mahdollisimman vähän ja lisäksi ajoneuvon energiankäyttö on mahdollisimman pieni. Tuloksista voi ilmeisenä tosideikkana todeta myös, että jonkin energiaketjun energiatehokkuutta saattikka ilmastovaikutuksia ei voi ennakoita pelkästään TtW-energiankulutuksen arvon perusteella. Tämä on selkeästi nähtävissä päästöjen osalta esimerkiksi niissä tarkasteluissa, joissa on mukana akkusähköisen voimalinjan energiaketjuja (Kuva 7.3 ja Kuva 7.5). Ensimmäisen tarkastelun (Kuva 7.3) mukaisessa vertailussa akkusähköisen auton energiaketjun päästöt ovat vertailun suurimmat kun taas jälkimmäisessä vertailussa akkusähköauton energiaketju on samanaikaisesti vertailun energiatehokkain että pienipäästöisin.

Yleisesti voi todeta myös, että uudempaa tekniikkaa edustavat voimalinjatekniikat (ladattava hybridi, akkusähköauto ja polttokennoauto) mahdollistavat verrattain pienet primäärienergiankulutuksen ja ilmastovaikutuksen arvot. Näiden päästöt painottuvat

selkeästi energiantoimitusketjun puolelle (WtT), kun tavanomaisilla energiaratkaisuilla päästöistä valtaosa tulee pistepäästöinä auton pakoputkesta (TtW).

Uudempaa tekniikkaa edustavat ratkaisut eivät ole itseisarvoisesti energiatehokkaita tai ympäristöystävällisiä, mutta uudet teknologiat mahdollistavat näiden tavoitteiden saavuttamisen. Parhaimmillaan nämä tavoitteet on saavutettavissa samanaikaisesti uusien teknologioiden avulla. Myös tavanomaisempaan tekniikkaan perustuvilla hybridoimialinjaratkaisulla (Kuva 7.3 ja Kuva 7.5) on mahdollista päästä huomattaviin päästövähennyksiin ja energiansäästöihin, mutta nollapäästöjen saavuttaminen ei ole näillä mahdollista ilman biopolttoaineita (joita ei tarkastella tässä työssä).

Kun primäärienergianlähteenä on maakaasu, luonnonkaasuhybridin energiaketju mahdollistaa samaa suuruusluokkaa olevat energiankäytön ja päästövaikutusten arvot kuin polttokennovoimalinja. Henkilöautotarkasteluissa polttokennoauton energiaketju on luonnonkaasuhybridiä tehokkaampi ja vähäpäästöisempi, mutta kaupunkibussitarkastelussa luonnonkaasuhybridi vie voiton polttokennovoimalinjasta. Tämä eroavaisuus eri segmenteissä selittyy henkilöauto-luonnonkaasuhybridin voimalinjan verrattain laimealla mitoituksella, joka ei täysin valjasta hybridisoinnin energiansäästöpotentiaalia.

Vetyketjujen energiankäytön ja päästöjen arvot eivät sijoitu fossiilisilla primäärienergianlajeilla tehtävillä tarkasteluilla silminnähävästi muita ketjuja paremmin. Tämä siitäkkin huolimatta, että vetyenergiaketjujen siirtojärjestelmäksi valittiin optimistisesti kaikkein tehokkain siirtotapa eli vedyn putkisiirto. Lisäksi tarkasteluissa mukana olleen luonnonkaasuhybridin voimalinjamitointi ei vastaa esimerkiksi nykyisen Toyota Priuksen voimalinjamitointia, vaan on tätä laimeampi. Vedyn putkisiirto vastaa käytännössä tilannetta jossa yhteiskunnan energiahuolto tukeutuu vahvasti vetyyn ja vetyä tuotetaan suuria määriä keskitetysti. Tässä on tosin huomioitava, että näihin tarkasteluihin ei otettu mukaan CCS-järjestelmällä varustettua höyryreformointiprosessia joka mahdollistaisi vetyketjun päästöjen merkittävän alentamisen tavanomaiseen reformointiin nähden.

Polttokennoteknologia ei näyttäisi tuottavan energiansäästöjä ja yhtä suuria päästövähennyksiä fossiilisilla primäärienergianlähteillä kaupunkibussisegmentissä kuin henkilöautosegmentissä. Tavanomaisempaa tekniikkaa edustavat kaupunkibussien hybridoimialinjojen energiaketjut näyttävät pärjäävän ensimmäisessä skenaariotarkastelussa (7.2.1) jopa polttokennovoimalinjaa paremmin sekä päästöissä että energiatehokkuudessa. Tämä siitäkkin huolimatta, että käytetyt kaupunkibussien lähtöarvot perustuvat arvioon vuoden 2030 bussitekniikasta jolloin polttokennotekniikan kehityksen pitäisi olla jo pitkällä. Jos lähtöarvoina käytettäisiin vastaavia vuoden 2010 arvoja, niin polttokennobussien energiaketjut menestyisivät vieläkin kehnemmin.

Henkilöautojen akkusähköiset sekä kaupunkibussien johdinsähköiset voimalinjat mahdollistavat tyypillisesti energiatehokkaampia konversioketjuja kuin polttokennovoimalinjaketjuja. Jos akku- ja johdinsähköisten ketjujen sähköenergia tuotetaan kivihililauhdelaiteilla ja polttokennoketjujen vety tuotetaan puolestaan maakaasusta, polttokennoketjut ovat näitä energiatehokkaampia että ympäristöystävällisempiä.

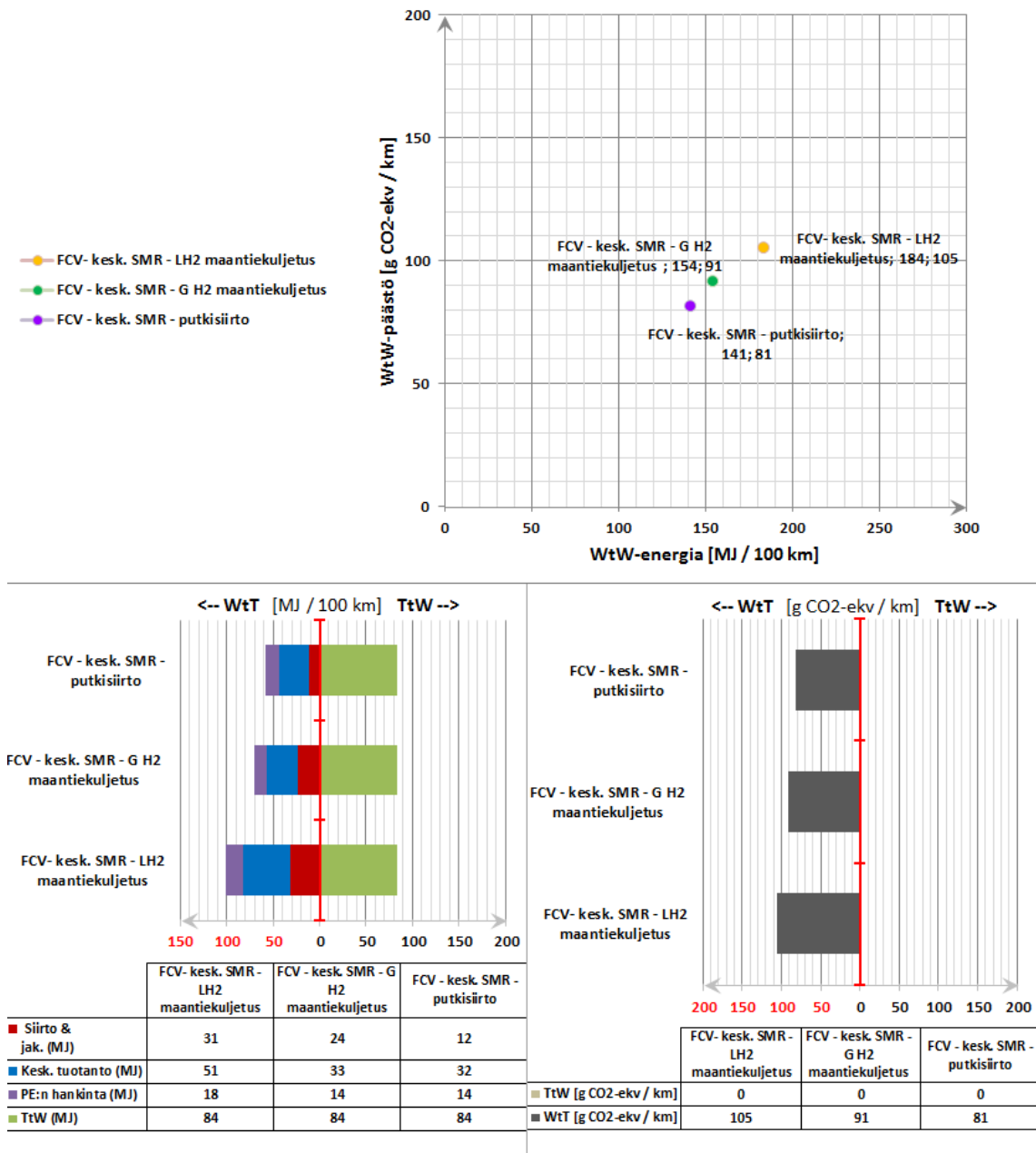
Jos primäärienergia on tuulivoimaa (Kuva 7.6), on odotettavissa oleva tulos että akkusähköisten ja johdinsähköisten ajoneuvojen energiaketjut päihittävät energiatehokkuudessa kirkkaasti vastaavien polttokennoajoneuvojen ketjut. Näiden käyttämä vety on tuotettava sähköstä melko tehottomalla elektrolyysillä. Jos taas tuulivoimaa ei syystä tai toisesta voida siirtää tuotannosta käyttöpaikalle sähköenergiana vaan se täytyy muuntaa ensin vedyksi, polttokennoauton energiaketjut ovat energiatehokkaampia kuin vastaavat sähköisten voimalinjojen ketjut. Tämä siitä syystä, että sähkö täytyisi tuottaa vedystä esimerkiksi GTCC-voimalaitoksella, joka heikentää ketjujen energiatehokkuutta vastaaviin polttokennokitjuihin nähden.

8 HERKKYYSTARKASTELU

Tässä työssä tarkasteltavien energiaketjujen energiatehokkuus ja ilmastovaikutukset riippuvat voimakkaasti valittavista mallinnuksen parametreista eli mallinnuksessa tehtävistä valinnoista. Esimerkiksi sähköntuotantotavan valinta vaikuttaa voimakkaasti akkusähköisen ajoneuvon primäärienergian käytön sekä ilmastovaikutuksen arvoihin. Myös vetykäyttöisten ajoneuvojen tapauksessa vedyn ja sähköntuotannon tuotantotavan valinta vaikuttaa suuresti primäärienergiankulutuksen ja ilmastovaikutuksen arvoihin, joka on odotettavissakin. Esimerkiksi bensiinikäyttöisen auton energiaketjun tapauksessa tuotantotapoja on vain yksi ja tämä energiaketju ei ole sähköenergiaintensiivinen. Tästä seuraa että sähköntuotantotavan valinta ei juuri vaikuta tämän ketjun arvoihin primäärienergiankäytön tai ilmastovaikutuksen arvoihin.

Tämän työn energiatehokkuus- ja päästötarkasteluissa tarkasteltiin vain sellaisia keskitettyyn vedyntuotantoon perustuvia vetyenergiaketjuja, joissa vedyn siirto tapahtuu keskitetyn tuotannon laitokselta putkisiirrolla. Näin saatiin käsitys, kuinka vetyenergiaketjut voisivat parhaimmillaan sijoittua muihin energiaketjuihin nähden. Tällainen optimistinen valinta indikoi sitä, kuinka tehokkaita vetyteknologiaan pohjautuvat energiaketjut voisivat olla täysin valmiissa vety-yhteiskunnassa.

Energiaketjujen herkkyystarkastelu tehdään ainoastaan vedyn siirtojärjestelmän valinnan osalta ja katsotaan kuinka siirtomenetelmän valinta vaikuttaa vetyenergiaketjun primäärienergian käyttöön ja ilmastovaikutuksiin. Tässä tapauksessa sähköntuotantotavaksi on vakioitu maakaasu GTCC-voimalaitos ja dieselin valmistus tapahtuu tavallisella öljynjalostamoprosessilla raakaöljystä. Syötteiden siirtoetäisyys on pidetty tässä herkkyystarkastelussa 300 kilometrissä.



Kuva 8.1 Polttokennoauton energiaketjun primäärienergiankäyttö sekä ilmastovaikutukset erilaisilla vedyn siirtomenetelmillä. Selitteiden lyhenteet: L H₂: Nesteytetty vety, C H₂: Kompressoitu vety, Muuten samoin kuin varsinaisissa tarkasteluissa.

Herkkyystarkastelun (Kuva 8.1) tulos on varsin odotettu ja vastaa hyvin yleistä erilaisien vedynsiirtomenetelmien energiätehokkuusjärjestyksestä keskipitkillä siirtoetäisyyksillä. Jos vety siirrettäisiin nestemäiseen vetyyn pohjautuvalla siirtojärjestelmällä, primäärienergian kulutus ja ilmastovaikutukset nousisivat noin 1,3-kertaisiksi putkisiirto- ketjuun nähden. Nestemäiseen vetyyn pohjautuvassa ketjussa kiehumishäviöt oletetaan olemattomiksi mutta tosielämässä häviöiden osuus tulee merkittäväksi jos kaasun kysyntä on pientä ja varastointiajat pitkiä. Kaasumaisen vedyn maantiekuljetukseen perustuvan ketjun energiankulutus on näiden tulosten mukaan alle 1,1-kertainen tehokkaimpaan nähden ja päästöt yli 1,1-kertaiset.

9 POHDINTAA JA LOPPUPÄÄTELMÄT

Tässä työssä saadut tulokset osoittavat, että vetypolttokennoautojen yleistyminen voisi tuottaa merkittäviä energiatehokkuushyötyjä konventionaalisiin voimalinjaratkaisuihin nähden henkilöautosegmentissä jo fossiililla hiilipitoisilla primäärienergianlähteillä. Kaupunkibussisegmentissä sen sijaan polttokennovoimalinjaratkaisun energiatehokkuusvaikutus on olematon tai jopa negatiivinen esimerkiksi tavalliseen dieselvoimalinjaan nähden. Näyttääkin siltä että vedyn liikennekäytön lisääminen ei palvelisi energiatehokkuuspyrkimyksiä kaupunkibussisegmentissä konventionaalisiin ratkaisuihin nähden. Sen sijaan polttokennovoimalinjat mahdollistavat huomattavan päästövähennyksen konventionaalisiin voimalinjaratkaisuihin nähden molemmissa ajoneuvosegmenteissä jo tavallisilla vedynvalmistusprosesseilla. Tämä siinäkin tapauksessa, että prosesseihin ei ole kytketty hiilidioksidin talteenottoa. Tosin, myös tavanomaisempaa tekniikkaa edustavilla hybridivoimalinjakoneilla on mahdollista päästä samaa suuruusluokkaa oleviin, ja jopa parempiin päästöarvoihin vetyenergiaketjun kanssa.

Mikäli vedyn liikennekäytöllä halutaan vähentää liikenteen ilmatorasitusta ja samanaikaisesti halutaan käyttää hiilipitoisia fossiilisia primäärienergianlähteitä, vedynvalmistuksen prosesseihin olisi kytkettävä hiilidioksidin talteenottoprosessit. Tämän lisäksi olisi keksittävä jokin kelvoinen loppusijoituspaikka näin tuotetulle hiilidioksidille. Jos taas vety tuotettaisiin jostakin uusiutuvasta primäärienergianlajista kuten metsäbiomassasta tai tuulivoimasta, niin laskennallinen päästövähennys olisi mahdollista saavuttaa ilman hiilidioksidin talteenottomenetelmiä.

Vedyn liikennekäytön tulevaisuus näyttää Euroopan unionin tekemien (ja valmistelemien) poliittisten linjausten perusteella valoisalta. Euroopan unionin asettamat suuntaviivat päästövähennyksistä ja energiansäästöstä vuodelle 2050 ovat niin tiukkoja, että niihin on erittäin vaikea päästä tavanomaisilla liikenteen energiahuollon järjestelmillä. Tämä on erityisen totta kun huomioidaan vielä, että liikennesuoritteiden odotetaan yhä lisääntyvän nykyisestä. Nämä tavoitteet edellyttävät osaltaan laajamittaista energiatehokkaan ja ympäristöä säästävän liikennejärjestelmän käyttöönottoa mahdollisimman nopeasti.

Koska nykyinen tieliikenteen energiahuolto perustuu lähes yksinomaan raakaöljyyn, liikennesektorille tarvitaan energiahuollon ratkaisu, joka antaa vapauksia primäärienergian hankinnassa kun raakaöljyä ei syystä tai toisesta ole käytettävissä. Vaikka vetyteknologiaan perustuvat energiaketjut eivät ole kaikissa skenaarioissa kaikkein energiatehokkaimpia tai ympäristöystävällisimpiä, niin vetyteknologia mahdollistaa monipuolisen primäärienergian hankinnan ja pienet ilmastovaikutukset. Tämän lisäksi vetyteknologiaa edustavien polttokennoautojen käytettävyys ja toimintasäde ovat omaa

luokkaansa esimerkiksi akkusähköisiin vastineisiinsa nähden. Vetyajoneuvojen tankkausajat ovat tyypillisesti muumia minuutteja, kun akkusähköisillä autoilla latausajat mitataan tunneissa.

Vedyn yleistyminen energiankantajana mahdollistaisi osaltaan laajamittaisen säätämättömän tuulisähkön ja aurinkovoiman lisärakentamisen sekä näihin tukeutumisen laajasti energiahuollossa. Vetyteknologian rooli olisi tässä nimenomaan sähköverkon kuormapuolen säätökapasiteettina ja huoltovarmuuden takaajana. Nykyään tunnettujen muiden samaan käyttötarkoitukseen soveltuvien energiavarastomenetelmien kapasiteetti on vetyyn nähden hyvin rajallinen. Näin ollen nämä eivät käytännössä mahdollistaisi samanlaista huoltovarmuutta, jonka vetyteknologia voisi mahdollistaa. Länsimainen elämäntapa ja yhteiskuntajärjestelmä tukeutuvat laajasti edulliseen ja huoltovarmaan energiaan ja onkin vaikea kuvitella tilannetta. Onkin vaikea edes kuvitella tilannetta jossa energiaa käytettäisiin vain silloin kun sitä sattuu olemaan saatavilla. Onkin mahdollista, että vedyn käyttö energiankantajana yleistyy osaltaan säätämättömän sähköntuotantokapasiteetin lisärakentamisen myötävaikutuksella. Tämä luonnollisesti edistäisi myös vedyn liikennekäyttöä, kun vetyä olisi saatavilla nykyistä paremmin. Lisäksi näin tuotettu vety olisi järkevämpää käyttää polttokennoautojen energiasyötteenä kuin esimerkiksi akkusähköautojen sähkön tuotantoon.

Näiden huomioiden perusteella voisikin sanoa, että vetyteknologia mahdollistaisi ”tasaisen vahvan” energiahuollon kokonaisratkaisun ilman fossiilisia hiilipitoisia primäärienergian lähteitä. Liikennesektorilla tämä pätee erityisesti henkilöautosegmentissä, jossa vetyteknologia mahdollistaa kattavan energiahuollon järjestelmän jo yhden liikennepolttoaineen infrastruktuurilla.

Euroopan parlamentin ja neuvoston valmisteleva direktiiviehdotus vaihtoehtoisten liikennepolttoaineiden jakeluinfrastruktuurin kehityksestä indikoi vahvasti sitä, että myös Suomeen tulee rakentaa vetytankkausasemaverkosto vuoteen 2020 mennessä. Tämä aiottu poliittinen ohjaustoimi ei juuri jätä varaa tulkinnoille, vaan näyttää todella siltä että unionin jäsenvaltiot velvoitetaan rakentamaan asemaverkosto, vaikkakin aluksi melko harvana.

Mikäli tässä työssä mainittujen henkilöautonvalmistajien aiheet ja suunnitelmat polttokennoautojen sarjatuotannon aloitusaikatauluista toteutuvat lähimainkaan, polttokennoautojen saatavuus ei muodostu esteeksi vedyn liikennekäytön yleistymiselle. Autonvalmistajien aikatauluissa saattaa tulla viivästyksiä, mutta näyttää siltä että nämä pyrkivät edistämään polttokennoautojen kaupallistumista voimakkaasti.

Polttokennoautojen voimalinja käyttöikä ei nykyisellään vastaa totuttua konventionaalisen voimalinjaratkaisun eliniän vähimmäisvaatimusta, vaan jää parhaimmillaan puoleen tästä eli noin 2500 käyttötuntiin henkilöautosegmentissä. Voi olla että tämä vähentää polttokennoautojen houkuttelevuutta potentiaalisessa asiakasryhmässä jos käypiä vaihtoehtoja on tarjolla. Voimalinja käyttöiänodotteen parantaminen edesauttaisi polttokennoautojen yleistymistä, joka puolestaan edesauttaisi vetypolttoaineen kysynnän lisääntymistä. Polttokennojen eliniän korottamiseksi tehdään jatkuvasti tutkimus- ja kehitystyötä ja onkin odotettavissa, että näiden eliniänodote paranee nykyisestä.

Edellä esitettyjen johtopäätösten perusteella voidaan todeta, että vedyn liikennekäyttö tulee yleistymään jollakin aikavälillä ja jossakin laajuudessa erityisesti henkilöautosegmentissä. Tämän aikavälin tarkka ennustaminen on tietysti mahdotonta, mutta esimerkiksi mainittu Euroopan unionin päästövähennämätavoitetta vuodelle 2050 voi olla vaikea saavuttaa liikennesektorin osalta ilman vedyn liikennekäytön yleistymistä. Tämän tavoitteen saavuttaminen voi olla vaikeaa myös vetyteknologian avulla, mutta sentään mahdollista, jos energiantuotantotavoiksi valikoituu vähäpäästöisiä prosesseja.

Vaikka polttokennoihin perustuvat energiaketjut eivät pärjänneetkään kaupunkibussien tarkasteluissa niin hyvin kuin henkilöjen vastaavissa tarkasteluissa, näyttää siltä että kaupallisia polttokennoratkaisuja tullaan näkemään myös kaupunkibusseissa. Poliittiset ohjaustoimet sekä fossiilisten primäärienergiälajien saatavuusongelmat saattavat edesauttaa vedyn yleistymistä tässäkin segmentissä.

Mallinnustyökalulla saadut energiankäytön ja ilmastovaikutusten tulokset ovat perusteltavissa ja linjassa aiemman tutkimuksen kanssa. Työssä osoitettiin selkeästi mallinnuksesta saaduilla tuloksilla, että primäärienergiahyötysuhde ei sovellu tarkkaan liikenteen energiaketjujen keskinäiseen vertailuun. Tämän sijaan on parempi käyttää absoluuttiseen primäärienergiankäyttöön perustuvia arvoja.

Tässä työssä kehitetyllä mallilla voi generoida pienellä vaivannäöllä ja nopeasti huomattavan määrän erilaisia skenaariotarkasteluja. Minkä tahansa tai mitkä tahansa energiaketjun parametrit voi vakioida tosielämän tilannetta kuvaavalla tavalla. Kun jotkin parametrit ja valinnat kiinnitetään ikään kuin reuna-arvoiksi, erilaisia energiaketjuja on mahdollista luoda niin monta kuin vapaiksi jätetyt parametrit mahdollistavat. Mallin avulla voisi esimerkiksi selvittää, millainen vedyn toimitustapa olisi energiatehokkain jonkin tunnetun kuljetusetäisyyden yli. Yhtä hyvin mallilla olisi mahdollista tutkia, mikä tuotantotapa olisi energiatehokkain, kun voimalinjatekniikaksi vakioitaisiin vaikkapa polttokennovoimalinja. Tässä työssä mallia käytettiin siten, että näkyvissä mallin vaihtomahdollisuuksista on näkyvissä vain erittäin suppea otos. Mallinnustyökalua on helppo muuntaa ja laajentaa tämän modulaarisen toteutustavan vuoksi.

Henkilöautojen energiaketjujen tarkasteluiden tuloksissa (Luku 7.1) on merkille pantavaa että lähtötiedoissa ilmoitetun luonnonkaasuhybridin voimalinja on mitoitettu erittäin laimeaksi esimerkiksi vuoden 2010 tavalliseen hybridi-Priukseen. Tavallisen hybridi-Priuksen voimalinjamitoitus on kokonaan eri luokkaa verrattuna tässä tutkimuksessa käytettyihin tavallisiin hybrideihin. Mikäli tämän työn mallinnuksessa käytetyt hybridoimalinjat vastaisivat Priuksen mitoituksia, odotettavissa olisi todella dramaattisia kulutuslukemien pudotuksia. Jos referenssijoneuvon voimalinja toteutettaisiin Priuksen voimalinjalla ja ajoneuvon massa muutettaisiin Priuksen massaa vastaavaksi, bensiinihybridin kulutuslukema noin 23,3 prosentilla. Mikäli myös luonnonkaasukäyttöisen hybridin voimalinjamitoitus modifioitaisiin vastaamaan Priuksen mitoitusta, odotettavissa olisi todella merkittävä kulutuslukeman pudotus. Tämä luonnollisesti heijastuisi myös tämän energiaketjujen primäärienergian käytön ja ilmastovaikutuksen arvoihin. Koska ladattava luonnonkaasu- tai diesel-hybridit saattaisivat pärjätä polttokennovoimalinjalle bensiiniversiota paremmin toisella voimalinjan mitoituksella, polttoken-

novoimalinjan ja sitä kautta myös vetypolttoaineen tarpeellisuutta olisi arvioitava uudestaan uusilla vertailuketjuilla.

Henkilöautotarkasteluissa esitetyssä tuulivoimaskenaariossa (Kuva 7.6) ollut tehottomin tuulivoimaskenaarion ketju oli tehokkaampi kuin yleisesti energiatehokkaana pidetty diesel-auton energiaketju (Kuva 7.1). Tästä voisi ymmärtää, että konventionaaliin tekniikoihin perustuvat energiaketjut eivät ole kovin tehokkaita ja tehostamisen varaa on vielä.

Kokonaan oma kysymyksensä on, soveltuuko nykyisin käytössä oleva primäärienergiatarkastelu tilanteeseen, jossa vertaillaan eri primäärienergiälajien mahdollistamia ketjuja keskenään muissa kuin lämmityskyvyn arvioinnissa. Voi olla että joskus kehitetään arviointimenetelmä, joka arvottaa primäärienergiälajit muutoin kuin lämmityskyvyn kautta. Nykyisin yleinen arvottamiskäytäntö on nimenomaan lämmityskykyyn perustuva määrittelytapa ja arvottaa eksergeettisemmätkin energialajit näiden arvottomimman käyttötavan mukaan.

Tässä työssä tehtyjen skenaariotarkastelujen lisäksi olisi mielekästä luoda skenaariotarkastelut myös neutseellisille biomassoille. Erityisesti puubiomassaan pohjautuva skenaariotarkastelu olisi suomalaisittain kiinnostava, koska Suomessa on huomattavat metsäbiomassavarannot.

Tässä tutkimuksessa käytettyjen arviointimenetelmien lisäksi vedyn liikennekäytön tulevaisuutta olisi arvioitava myös taloudellisten mittareiden kautta. Tämä olisi tarpeen, koska kustannustekijät voivat vaikuttavaa tosielämässä tehtäviin päätöksiin enemmän kuin marginaaliset hyödyt energiatehokkuudessa tai päästöissä.

LÄHTEET

- (AGA, 2012) Henkilökohtainen sähköpostikeskustelu koskien kaasumaisen vedyn maantiekuljetusyksiköiden tyhjä- ja täyskuormamassoja, 17.12.2012, Oy AGA Ab.
- (An & Santini, 2003) An, F., Santini, D. 2003. Assessing Tank-to-Wheel Efficiencies of Advanced Technology Vehicles, SAE Technical Paper 2003-01-0412, 2003, doi:10.4271/2003-01-0412.
- (Apak et al., 2012) Apaka, S., Atayb, E., Tuncerc, G., *Renewable hydrogen energy regulations, codes and standards: Challenges faced by an EU candidate country*, 2012, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, Issue 7, pp. 5481–5497
- (Aväence, 2012) Aväence LLC [WWW], Yrityksen verkkosivut ja tuote-esittely, Luotu 29.8.2012, Päivitetty 29.8.2012. [Viitattu 29.8.2012], Saatavissa osoitteesta [<http://avalance.com/technology/default.htm>]
- (Barbier, 2010) Barbier, F., *Hydrogen Distribution Infrastructure for an Energy System: Present Status and Perspectives of Technologies*. In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010, 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 121-148.
- (Beaudin et al, 2010) Beaudin, M., Zareipour H., Schellenberglabe, A., Rosehart, W., *Energy storage for mitigating the variability of renewable electricity sources: An updated review*, Energy for Sustainable Development, Vol 14 (2010), Issue 4, pp. 302-314.
- (BMU, 2012a) *BMW, BMU und BMBF geben Startschuss für Leuchtturmprojekte der Speicherinitiative*, 2012, [WWW], Lehdistöiedote 11.7.2012: Saksan ympäristö- ja ydinturvallisuusministeriö, BMU-Pressedienst Nr. 101/12, Viitattu [29.10.2012], Saatavilla [http://www.bmu.de/pressemitteilungen/aktuelle_pressemitteilungen/pm/pdf/48929.pdf]
- (BMU, 2012b) *Leuchtturmprojekte der Speicherinitiative von BMW, BMBF und BMU*, [WWW], Hankekuvauus: Saksan ympäristö- ja ydinturvallisuusministeriön verkkosivu, Viitattu [19.10.2012], Saatavilla [<http://www.bmu.de/energiewende/doc/48928.php>]
- (BMW, 2010) BMW CleanEnergy-moottorikonseptin esittely. 2010. [WWW], BMW AG, Viitattu [27.9.2012], Luotu [23.3.2010], [http://www.bmw.com/com/en/insights/technology/technology_guide/articles/bmw_cleanenergy.html]

(BMW, 2012) *BMW Group and Toyota Motor Corporation agree to further strengthen collaboration*, [WWW], lehdistötiedote 29.6.2012, BMW Group, Viitattu [18.10.2012], Saatavilla [http://www.bmwgroup.com/e/nav/index.html?http://www.bmwgroup.com/e/0_0_www_bmwgroup_com/investor_relations/corporate_news/news/2012/Ausbau_Zusammenarbeit_Toyota.html]

(BMVBS, 2012a) *National Hydrogen and Fuel Cell Technology Innovation Programme (NIP)*, [WWW], Hankekuvaus, Saksan liikenne, rakennus- ja kaupunkikehityksen ministeriön verkkosivu, Viitattu [29.10.2012], Saatavilla [<http://www.bmvbs.de/SharedDocs/EN/Artikel/UI/UI-MKS/national-hydrogen-and-fuel-cell-technology-innovation-programme-nip.html?nn=37150>]

(BMVBS, 2012b) *Bundesregierung und Industrie errichten Netz von 50 Wasserstoff-Tankstellen*, [WWW], Lehdistötiedote 20.6.2012: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, (BMVBS), Viitattu [29.10.2012], Saatavilla [<http://www.bmvbs.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2012/125-ramsauer-wasserstofftankstellen.html?linkToOverview=js>]

(Borgschulte & Züttel, 2008) Borgschulte, A. & Züttel, A., 2008. *Hydrogen Production from Coal and Hydrocarbons*. In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 149 - 155.

(Bosch, 2003) Boström, B., Haapaniemi, E., Isonokari, A., Korhonen, M., Laine, O., Lehtinen, A., Lehtomäki, J., Lehtonen, T., Louhos, P., Melin, M., Nieminen, K., Nuutio, E., Paananen, M., Saarialho, A., Ziessler, A., 2003, *Autoteknillinen käsikirja*, 6. suomennettu painos, Autoalan Koulutuskeskus Oy, Jyväskylä, alkukieliset teokset: Bauer, H., Dietsche, K-H., Crepin, J., Dinkler, F. (toim.), 2002, *Kraftfahrtechnische Taschenbuch*, 23. ja 24. uudistettu painos, Robert Bosch GmbH

(Bosch, 2011) *Automotive Handbook*, 2011, 8th eds. Reif, K., Dietsche, K-H., Germany, Robert Bosch GmbH, ISBN 978-0-7680-4851-3.

(Bossel et al, 2003) Bossel, U., Eliasson, B., Taylor, G., *The Future of the Hydrogen Economy: Bright or Bleak?* [WWW], Version of 15 April 2003 updated for distribution at the 2003 Fuel Cell Seminar 3 – 7 November 2003 Viitattu [16.11.2012], Saatavilla [<http://planetforlife.com/pdf/h2report.pdf>].

(CARS 21, 2012) *CARS 21 High Level Group, on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union - Final Report 2012*, [WWW], Euroopan komission työryhmän loppuraportti 6.6.2012, Viitattu [25.10.2012], Saatavilla

- [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/files/cars-21-final-report-2012_en.pdf]
(CARS 21, 2012) *CARS 21 High Level Group, on the Competitiveness and Sustainable Growth of the Automotive Industry in the European Union - Final Report 2012*, [WWW], Euroopan komission työryhmän loppuraportti 6.6.2012, Viitattu [25.10.2012], Saatavilla [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/automotive/files/cars-21-final-report-2012_en.pdf]
- (Chiesa et al, 2005)** Chiesa, P., Lozza, G., Mazzocchi, L., Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol 127, pp. 73- 80, Saatavilla myös [<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/turbines/refshelf/igcc-h2-sygas/Using%20H2%20as%20a%20GT%20Fuel.pdf>]
- (COM, 2013)** *Proposal for a directive of the European parliament and of the Council on the deployment of alternative fuels infrastructure* [WWW], Viitattu [15.3.2013], Saatavilla [[http://ec.europa.eu/danmark/documents/alle_emner/transport/130124_com\(2013\)18-2-directive_en.pdf](http://ec.europa.eu/danmark/documents/alle_emner/transport/130124_com(2013)18-2-directive_en.pdf)]
- (Daimler, 2011)** Linde and Daimler press ahead with development of infrastructure for fuel-cell vehicles, [WWW], Lehdistöiedote 1.7.2011: Daimler, Viitattu [6.11.2012], Saatavilla [<http://media.daimler.com/dcmedia/0-921-658901-1-1397124-1-0-0-0-0-1-12759-614216-0-0-0-0-0-0-0.html>]
- (EC, 2010)** Communication from the Commission – Europe 2020 - A strategy for smart, sustainable and inclusive growth [WWW], COM(2010) 2020 final, Viitattu [2.8.2012], Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:EN:PDF>]
- (Eichlseder et al., 2010)** Eichlseder, H., Grabner, P., Heindl, R., Hydrogen International Combustion Engines, In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010, 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. pp. 811–829.
- (Elshout, 2010)** Elshout, R., 2010. Hydrogen Production By Steam Reforming. *Chemical Engineering*, 117, 5, pp. 34-38.
- (EMV, 2011)** *Sähköverkon tt-luvut 2011 (Sähköverkon tt_luvut_2011.xlsx) - Sähköverkkotoiminnan tunnusluvut vuodelta 2011* [WWW], Energiamarkkinaviraston tilasto, Viitattu [11.12.2012], Saatavilla [<http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=3279&pgid=69&languageid=246>]
- (EN, 2008)** *Euroopan neuvoston asetukset (EY) N:o 521/2008, annettu 30 päivänä toukokuuta 2008, polttokenno- ja vetyteknologian*

alalla toimivan yhteisyrityksen perustamisesta, Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:153:0001:0020:FI:PDF>]

(EN, 2011) *Eurooppa-neuvoston kokous 4.2.2011 – päätelmät, EUCO 2/1/11 REV 1* [WWW], Viitattu [2.9.2012], Saatavilla [http://www.consilium.europa.eu/uedocs/cms_data/docs/pressdata/fin/ec/119177.pdf]

(European Green Cars Initiative, 2012) *About*, 2012, [WWW], verkkosivu, European Green Cars Initiative, Viitattu [25.10.2012], Saatavilla [<http://www.green-cars-initiative.eu/public>]

(EY, 2009a) *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/33/EY, annettu 23 päivänä huhtikuuta 2009, puhtaiden ja energiatehokkaiden tieliikenteen moottoriajoneuvojen edistämisestä* [WWW], Viitattu 24.10.2012], Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/Notice.do?mode=dbl&lang=en&ihmlang=en&lng1=en,fi&lng2=bg,cs,da,de,el,en,es,et,fi,fr,hu,it,lt,lv,mt,nl,pl,pt,ro,sk,sl,sv,&val=495132:cs>]

(EY, 2009b) *Direktiivi 2009/28/EY uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta*, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi. Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:FI:PDF>]

(Farzaneh-Gord et al., 2012) Farzaneh-Gord, M., Deymi-Dashtebayaza, M., Rahbaria, H. R., Niazmand, H., 2012, *Effects of storage types and conditions on compressed hydrogen fuelling stations performance*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, Issue 4.

(FCB, 2009) *Automakers commit to fuel cell vehicles from 2015*, Fuel Cells Bulletin, Vol. 2009, Issue 10, Elsevier Ltd

(FCB, 2012) *Germany for 50 public hydrogen stations by 2015*, Fuel Cells Bulletin, Vol. 2012, Issue 6, Elsevier Ltd

(FCH-JU, 2011) *FUEL CELLS AND HYDROGEN JOINT UNDERTAKING (FCH JU) - Multi - Annual Implementation Plan 2008 – 2013*, FCH-JU:n monivuotinen toimintasuunnitelma vuosille 2008-2013, Saatavilla [<http://www.fch-ju.eu/sites/default/files/MAIP%20FCH-JU%20revision%202011%20final.pdf>]

(FCH-JU, 2012) *Urban buses : alternative powertrains for Europe – A fact based analysis of the role of diesel hybrid, hydrogen fuel cell, trolley and battery electric powertrains* [WWW], Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, tutkimusraportti, Viitattu 14.1.2013], Saatavilla [<http://www.fch-ju.eu/news/fch-ju-launches-its-study-urban-buses-alternatives-power-trains-europe>]

- (Finlex, 2012a)** *Autoverolaki*
29.12.1994/1482, muutoksineen (8.11.2012 saakka), [WWW], verkkosivu: Finlex – ajantasainen lainsäädäntö, viitattu [13.11.2012], saatavilla [http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19941482]
- (Finlex, 2012b)** *Ajoneuvoverolaki*
30.12.2003/1281, muutoksineen (8.11.2012 saakka), [WWW], verkkosivu: Finlex – ajantasainen lainsäädäntö, viitattu [13.11.2012], saatavilla [http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2003/20031281]
- (Finlex, 2013)** Laki biopolttoaineiden käytön edistämistä liikenteessä 13.4.2007/446 [WWW], Viitattu [14.3.2013], Saatavilla [http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2007/20070446]
- (Freialdenhoven & Wallentowitz, 2010)** Freialdenhoven, A., Wallentowitz, H., Electrification in Transport Systems, In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. pp. 853-873.
- (Friedrich & Büchi, 2008)** Friedrich, K.A., Büchi, F.N., 2008. *Fuel Cells Using Hydrogen*. In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 335-364.
- (Froeschle & Wind, 2010)** Froeschle, P., Wind, J., *Fuel Cell Power Trains*, In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010, 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. pp. 793-809.
- (Fuel Cell Handbook, 2004)** *Fuel Cell Handbook* [WWW], 2004, Seventh Edition, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy National Energy Technology Laboratory. Viitattu [23.9.2012], Saatavilla [http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/834188/834188.pdf]
- (Fuel Cells 2000, 2012)** *Charts - Worldwide Hydrogen Fueling Stations* [WWW], Fuel Cells 2000, Viitattu [21.9.2012], Saatavilla [http://www.fuelcells.org/resources/charts/]
- (FuelCellToday, 2012a)** *The Fuel Cell Industry Review* [WWW], FuelCellToday, Viitattu 12.9.2012, Saatavilla [http://www.fuelcelltoday.com/media/1713685/fct_review_2012.pdf]
- (FuelCellToday, 2012b)** *Fuel Cell Electric Vehicles: The Road Ahead*, [WWW], Markkinakatsaus polttokennoautovalmistajien tulevaisuudensuunnitelmiin, Fuel Cell Today, Viitattu [5.11.2012], Saatavilla [http://www.fuelcelltoday.com/media/1711108/fuel_cell_electric_vehicles_-_the_road_ahead.pdf]

(Gao & Krishnamurthy, 2009) Gao, M., Krishnamurthy, R., *Hydrogen Transmission in Pipelines and Storage in Pressurized and Cryogenic Tanks.*, 2009, In: Gupta, R. (ed), *Hydrogen Fuel – Production, Transport and Storage*. CRC Press. ISBN: 978-1-4200-4575-8, pp. 341-379.

(GREET, 2012) *GREET (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation)- Fuel Cycle Model, Series 1 2012 rev1* [WWW], Excel-version, Argonne National Laboratory, Viitattu 4.10.2012, [<http://greet.es.anl.gov/files/greet1-2012-rev1-excel>], yleinen dokumentaatio [<http://greet.es.anl.gov/index.php?content=download1x>]

(Grube et al, 2010) Grube, T., Höhlein, B., Stiller, C., Weindorf, W., *System analysis and Well-to-Wheel Studies*, In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010, 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 831-852.

(Grünewald et al., 2011) Grünewald, P., Cockerilla, T., Contestabile, M., Pearson, P., *The role of large scale storage in a GB low carbon energy future: Issues and policy challenges*, Energy Policy, Vol. 39 (2011), Issue 9, pp. 4807-4815.

(h2stations, 2012) TÜV SÜD Industrie Service GmbH, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, *Hydrogen Filling Stations Worldwide*, Luotu [24.9.2012], Päivitetty [24.9.2012], Viitattu [24.9.2012], Saatavilla [<http://www.h2stations.org/>]

(Hennings & Reimert, 2007) Hennings, U., Reimert, R., *Behaviour of Sulfur-Free Odorants in Natural Gas Fed PEM Fuel Cell Systems*, (2007), Fuel Cells, 7, Issue 1, s. 63-69.

(Hirscher, 2010) Hirscher, M., Preface, 2010, In: Hirscher, M., Hirose, K., (ed)., *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Carrier*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Saksa, ISBN: 978-3-527-32273-2, pp. XV-XVII

(Holladay et al, 2008) Holladay, J.D., Hu, J., King, D.L., Wang, Y., 2008, *Review - An overview of hydrogen production technologies*, Catalysis Today, 139 (2009), p.244 – 260.

(Honda, 2012) Honda Introduces Solar Hydrogen Station on Saitama Prefectural Office Grounds, [WWW], Lehdistöiedote 27.3.2012: Honda Motor Co., Viitattu [8.11.2012], Saatavilla [<http://world.honda.com/news/2012/4120327Solar-Hydrogen-Station/index.html>]

(HSL, 2011) Anttila, T., Eklund, P., Airaksinen, S., Mättö, R., Lähdetie, A., *Johdinautoliikenteen hankeselvitys* [WWW], HSL Helsingin seudun liikenne, Viitattu [17.12.2012], Saatavilla [http://www.hsl.fi/FI/mikaonhsl/julkaisut/Documents/2011/13_2011_Johdinautoliikenteen%20hankeselvitys.pdf]

(HyApproval, 2008) *Handbook of Hydrogen Refuelling Station Approval*, 2008, Final Version, Deliverable 2.2, Version 2.1, [WWW], EU-komission rahoittaman tutkimushankkeen loppuraportti, Viitattu [17.9.2012], Saatavissa [http://www.hyapproval.org/Publications/The_Handbook/HyApproval_Final_Handbook.pdf].

(HyFLEET:CUTE, 2009) *Future. HYDROGEN TRANSPORTS -- Bus Technology & Fuel for TODAY and for a Sustainable Future, A Report on the Achievements and Learnings from The HyFLEET:CUTE Project 2006 – 2009*, [WWW], Hankkeen loppuraportti: HyFLEET:CUTE, Viitattu [6.11.2012], Saatavilla [http://hyfleetcute.com/data/HyFLEETCUTE_Brochure_Web.pdf]

(Hyundai, 2012) *Hyundai Provides Zero-Emissions Hydrogen Fuel Cell ix35 to Municipality of Copenhagen*, [WWW], Lehdistöiedote 24.9.2012: Hyundai Motor Company, Viitattu [6.11.2012], Saatavilla [http://worldwide.hyundai.com/WW/Corporate/News/News/DF_WW_GLOBALNEWSVIEW_120924_01.html?testValue=DF_WW_RD_GLOBALNEWS&title=DF_WW_GLOBALNEWSVIEW_120924_01&Row=1&totalRow=&selx2=Copenhagen]

(IEA, 2006) *Hydrogen Production and Storage R&D Priorities and Gaps*. IEA [WWW], Paris, France. Viitattu [13.9.2012], Saatavissa osoitteesta [<http://iea.org/publications/freepublications/publication/hydrogen.pdf>]

(IEA, 2009) *Transport, energy and CO₂ - Moving toward sustainability* [WWW]. IEA. Pariisi. OECD/IEA. painos 2009. ISBN: 978-92-64-07316-6. [Viitattu 21.6.2012]. Saatavilla osoitteesta [<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,3838,en.html>].

(IEA, 2010a) *Energy technology perspectives 2010 - Scenarios & Strategies to 2050*. 2010. Pariisi, OECD/IEA. ISBN: 978-92-64-08597-8. 706 s.

(IEA, 2010b) *World Energy Outlook 2010* [WWW]. IEA. Pariisi. OECD/IEA. painos 2010. ISBN: 978-92-64-08624-1. Viitattu [18.7.2012]. Saatavilla osoitteesta [<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/name,27324,en.html>].

(IEA, 2011) *World Energy Outlook 2011*, IEA, Pariisi, Ranska, ISBN: 978 92 64 12413 4

(IEA, 2012) *Energy Technology Perspectives 2012*, IEA, Pariisi, Ranska, ISBN: 978-92-64-17488-7, 686 s.

(INE, 2012) *EURO-HYPORT 2002 - 04*, [WWW] Projektikuvaus: Icelandic New Energy Ltd, Viitattu [13.11.2012], Saatavilla

[http://www.newenergy.is/en/projects/research_and_demonstration_projects/euro_hypor t/]

(JEC, 2011a) Edwards, R., Larivé, J-F, *Well-to-Tank Report - Version 3c, July 2011*, [WWW], In: Edwards, R., Larivé, J-F, Beziat, J-C, *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context - Report Version 3c, July 2011*, JEC: European Commission Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE, Viitattu 16.11.2012, [<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>]

(JEC, 2011b) Beziat, J-Z, *TANK-to-WHEELS Report - Version 3c, July 2011*, [WWW], In: Edwards, R., Larivé, J-F, Beziat, J-C, *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context - Report Version 3c, July 2011*, JEC: European Commission Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE, Viitattu 16.11.2012, [<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>]

(JEC, 2011c) Larivé, J-F, *Well-to-Wheels Report Version 3c, July 2011*, [WWW], In: Edwards, R., Larivé, J-F, Beziat, J-C, *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context - Report Version 3c, July 2011*, JEC: European Commission Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE, Viitattu 16.11.2012, [<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>]

(JEC, 2011d) *WTT APPENDIX 1 - Description of individual processes and detailed input data*, [WWW], In: Edwards, R., Larivé, J-F, Beziat, J-C, *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context - Report Version 3c, July 2011*, JEC: European Commission Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE, Viitattu 16.11.2012, [<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>]

(JEC, 2011e) *WTT APPENDIX 4 - Step-by-step input data for individual pathways* [WWW], In: Edwards, R., Larivé, J-F, Beziat, J-C, *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context - Report Version 3c, July 2011*, JEC: European Commission Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE, Viitattu 16.11.2012, [http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/files/documents/wtw3_wtt_appendix4_eurformat.pdf]

(JEC, 2011f) *WTW APPENDIX 1 - Summary of WTW Energy and GHG balances* [WWW], In: Edwards, R., Larivé, J-F, Beziat, J-C, *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context - Report Version 3c, July 2011*, JEC: European Commission Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE, Viitattu 16.11.2012, [<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>]

(JEC, 2011g) Appendix 2 - WTW GHG-Emissions of Externally Chargeable Electric Vehicles [WWW], In: Edwards, R., Larivé, J-F, Beziat, J-C, *Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Power trains in the European Context - Report Version 3c, July 2011*, JEC: European Commission

Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE, Viitattu 16.11.2012,
[<http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>]

(JHFC, 2009) FCVs, [WWW], Hankkeen esittelymateriaali: Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project, Viitattu [5.11.2012], Saatavilla [<http://www.jari.or.jp/jhfc/data/pdf/fcv.pdf>]

(JHFC, 2010) Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project, 2010, Hankkeen esittelymateriaali, Saatavilla [<http://www.jari.or.jp/jhfc/data/pdf/jhfc.pdf>]

(Jordan & Breitung, 2010) Jordan, T., Breitung, W., *Safety Analysis of Hydrogen Vehicles and Infrastructure*, In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010, 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. pp. 853-873.

(Karvinen, 2013) Karvinen, P., Henkilökohtainen sähköposti 15.1.2013, Toyota Auto Finland Oy, tekninen tuki

(KL, 2013) *Polttokenno-*
Mersu siirtyy vuosilla [WWW], Turtiainen, J., Artikkelin Kauppalehden verkkolehdestä 21.1.2013, viitattu [29.1.2013], saatavilla [<http://www.kauppalehti.fi/auto/uutiset/polttokenno-mersu+siirtyy+vuosilla/201301343267>]

(Klell, 2010) Klell, M., 2010, *Storage of Hydrogen in Pure Form*, In: Hirscher, M., Hirose, K., (ed.), *Handbook of Hydrogen Storage: New Materials for Future Energy Carrier*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Saksa, ISBN: 978-3-527-32273-2, pp. 1-37

(Koffler & Rohde-Brandenburger, 2010) *On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments*, The International Journal of Life Cycle Assessment, vol. 15 (2010), pp. 128-135.

(Kolari, 2012) Henkilökohtainen puhelu koskien dieselin ja bensiinin kuljetusyksikön tyhjä- ja täyskuormamassoja, 4.12.2012, Kuljetusliike Kolarin Oy.

(KOM, 2010) *Eurooppalainen puhtaiden ja energiatehokkaiden ajoneuvojen strategia*, [WWW], Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle ja Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle. SKOM(2010)186 lopullinen, Viitattu [24.10.2012], Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/Notice.do?mode=dbl&lang=en&ihmlang=en&lng1=en,fi&lng2=bg,cs,da,de,el,en,es,et,fi,fr,hu,it,lt,lv,mt,nl,pl,pt,ro,sk,sl,sv,&val=512714:cs>]

(KOM, 2011a) *Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle: Etenemissuunnitelma – siirtyminen kilpailukykyiseen vähähiiliseen talouteen vuonna 2050* [WWW], Viitattu [2.9.2012], Saatavilla: [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0112:FIN:FI:PDF>]

- (KOM, 2011b)** Valkoinen kirja, *Yhtenäistä Euroopan liikennealuetta koskeva etenemissuunnitelma – Kohti kilpailukykyistä ja resurssitehokasta liikennejärjestelmää*, KOM(2011) 144 lopullinen, Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:FI:PDF>]
- (KOM, 2012)** *Komission tiedonanto Euroopan parlamentille, neuvostolle, Euroopan talous- ja sosiaalikomitealle ja alueiden komitealle: CARS 2020: Kilpailukykyistä ja kestävä eurooppalaista autoteollisuutta koskeva toimintasuunnitelma*, [WWW], COM(2012) 636 final, Viitattu 19.11.2012], Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2012:0636:FIN:FI:PDF>]
- (Kopasz, 2007)** Kopasz, J.P., *Fuel cells and odorants for hydrogen*, 2007, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, 13, s. 2527-2531.
- (Korjala, 2011)** Korjala, K., 2011. *Towards Hydrogen Society in Finland*. In: *Towards a Hydrogen Society*, Solin, J., Korjala, K., Esitys: Green Tech Conference and exhibition, Tokio, Japani. 7 - 8.11.2011
- (Laurikko & Ikonen, 2007)** Laurikko, J., Ikonen, E., *Transport*, In: *Energy use – Visions and Technology Opportunities in Finland*, VTT. Edita Prima, Helsinki, ISBN: 978-951-37-4742-8, s. 179-206.
- (McKinsey, 2010)** McKinsey & Company, *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis: The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles*, 2010 [WWW], Konsulttiselvitys, Viitattu [16.10.2012], Saatavissa [http://ec.europa.eu/research/fch/pdf/a_portfolio_of_power_trains_for_europe_a_fact_based_analysis.pdf]
- (Nexant, 2006)** Hydrogen Delivery Infrastructure Options Analysis, DE-FG36-05GO15032, Task Report Task 1: Data and Knowledge Base, 2006, In: Chen, T-P, 2008, Final Report ---Hydrogen Delivery Infrastructure Options Analysis, DOE Award Number: DE-FG36-05GO15032, [WWW], Viitattu [14.9.2012], [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/delivery_infrastructure_analysis.pdf] pp. 42-144.
- (Nexant, 2008a)** *H2A Hydrogen Delivery Infrastructure Analysis Models and Conventional Pathway Options Analysis Results*, DE-FG36-05GO15032 *Interim Report* [WWW], Viitattu [14.9.2012], [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/nexant_h2a.pdf]

- (Nexant, 2008b)** Hydrogen Delivery Infrastructure Options Analysis. [WWW] Viitattu [13.9.2012], Saatavissa [http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/nexant_h2a.pdf]
- (NIST, 2012)** *Thermophysical Properties of Fluid Systems* [WWW], National Institute of Standards and Technology, Viitattu [6.12.2012], Saatavilla [<http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>]
- (NOW, 2011)** *Annual Report 2011*, Vuosikertomus 2011 NOW GmbH, Saatavilla [http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/RE-Mediathek/RE_Publikationen_NOW/NOW_Jahresbericht_2011_EN.pdf]
- (NREL, 2012)** Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicle Learning Demonstration [WWW], demonstraatiohankkeen verkkosivu, Viitattu [5.10.2012], Saatavilla [http://www.nrel.gov/hydrogen/proj_learning_demo.html].
- (Nylund & Koponen, 2012)** Nylund, N-O., Koponen, K., *Fuel and technology alternatives for buses – Overall energy efficiency and emission performance*, VTT Technology, ISBN:978-951-38-7868-9
- (Odgen, 2004)** Odgen, J., 2004. *Where Will the Hydrogen Come From? System Considerations and Hydrogen Supply*. In: Sperling, D., Cannon, J. S.(ed.). *The hydrogen energy transition: Moving toward the post petroleum age in transportation*. USA. Elsevier Academic Press. pp. 73-92.
- (Ogden & Nicholas, 2011)** Ogden, J., Nicolas, M., 2011, *Analysis of a ‘cluster’ strategy for introducing hydrogen vehicles in Southern California*. Energy Policy, Vol. 39, Issue 4, pp. 1923-1938.
- (Ogden et al., 2011)** Ogden, J., Yang, C., Cunningham, J., Johnson, N., Li, X., Nicholas, M., Parker, N., Sun, Y., 2011. *Chapter 3: The Hydrogen Pathway*. In: Ogden, J., Anderson L. (ed.). *Sustainable Transportation Energy Pathways – A Research Summary for Decision Makers*. [WWW-versio] Institute of Transportation Studies, University of California. [Viitattu 23.8.2012]. Saatavilla osoitteesta [<http://steps.ucdavis.edu/steps-book/STEPS%20Book%20web%20version%29%20Sept2011.pdf>]. 333 s.
- (Page & Krumdieck, 2009)** Page, S., Krumdieck, S., *System-level energy efficiency is the greatest barrier to development of the hydrogen economy*, Energy Policy, vol. 37, pp. 3325-3335.
- (Pant & Gupta, 2009)** Pant, K.K., Gupta, R.B., *Fundamentals and Use of Hydrogen as a Fuel*, 2009, In: Gupta, R. (ed), *Hydrogen Fuel – Production, Transport and Storage*. CRC Press. ISBN: 978-1-4200-4575-8, pp. 4-32.

- (Patterson, 1996)** Patterson, M. G., What is Energy Efficiency – Concepts, indicators and methodological issues, *Energy Policy*, vol. 24, no. 5, pp. 337-390.
- (Peschka, 1993)** Peschka, W., 1992, *Liquid Hydrogen-Fuel of the Future*, Springer-Verlag, Itävalta, englanninkielinen käännetty painos, alkukielinen teos saksan kielellä, kääntäjät Mr & Mrs Wilhelm, E., ISBN: 3-211-82250-X.
- (Petitpas et al., 2012)** Petitpas, G., Salvador, M. A., Gupta, N., 2012, *Vehicle refueling with liquid hydrogen thermal compression*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, Issue 15, Pp 11448–11457
- (Ragnarsson & Helgason, 2004)** Ragnarsson, A., Helgason, P., *Energy in Iceland - Historical Perspective, Present Status, Future Outlook*, 2004, National Energy Authority and Ministries of Industry and Commerce, Saatavilla [http://www.os.is/media/eldri-utgafa/EnergyinIceland_2003.pdf]
- (Rasmussen et al., 2012)** Rasmussen, M.G., Andresen, G.B., Greinerb, M., *Storage and balancing synergies in a fully or highly renewable pan-European power system*, *Energy Policy*, Vol. 51 (2012), pp. 642-651.
- (Rigas & Sklavounos, 2009)** Rigas, F., Sklavounos, S., *Hydrogen Safety*, 2009, In: Gupta, R. (ed), *Hydrogen Fuel – Production, Transport and Storage*. CRC Press. ISBN: 978-1-4200-4575-8, pp. 535-568.
- (Rostrup-Nielsen, 2010)** Rostrup-Nielsen, J., *Reforming and Gasification – Fossil Energy Carriers*, In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010, 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. pp. 291-305.
- (Ruonakoski, 2011)** Ruonakoski, T., *Suomeen tuotavan maakaasun polttoaineketjun kasvihuonepäästöt*, [WWW], Aalto-yliopisto, Insinööri-tieteiden korkeakoulu, Energiatekniikan laitos – Sovellettu termodynamiikka, ISBN 978-952-60-4128-5, Viitattu [11.12.2012], Saatavilla [<https://aalto.doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/5128/isbn9789526041285.pdf?sequence=1>]
- (SAE, 2011)** *J2719-201109-Revised, Hydrogen Fuel Quality for Fuel Cell Vehicles*, SAE International.
- (Satyapal & Thomas, 2009)** Satyapal, S., Thomas, G.J., *Targets for Onboard Hydrogen Storage Systems: An Aid for the Development of Viable Onboard Hydrogen Storage Technologies*, 2009, In: Gupta, R. (ed), *Hydrogen Fuel – Production, Transport and Storage*. CRC Press. ISBN: 978-1-4200-4575-8, pp. 327-340.
- (Saur, 2008)** Saur, G., 2008, Wind-To-Hydrogen Project: Electrolyzer Capital Cost Study, [Viitattu 28.8.2012], Saatavissa: [<http://www.osti.gov/bridge/>], Technical Report NREL/TP-550-44103, National Renewable Energy Laboratory, Colorado USA

- (SHHP, 2012)** *About SHHP*, [WWW], Verkkosivu: Scandinavian Hydrogen Highway Partnership, Viitattu [6.11.2012], Saatavilla [<http://www.scandinavianhydrogen.org/about-shhp>]
- (Siemens, 2012)** *Fact Sheet -High-voltage direct current transmission (HVDC) - Status July 2012* [WWW], Tasavirtasähkön siirtoyhteysteknologian kuvaus, Siemens, Viitattu [21.12.2012], Saatavilla [<http://www.siemens.com/press/pool/de/events/2012/energy/2012-07-wismar/factsheet-hvdc-e.pdf>]
- (Simonsen & Walnum, 2011)** Simonsen, M., Walnum, H. J., *Energy Chain Analysis of Passenger Car Transport*, Energies, 2011, 4, pp. 324-351, doi: 10.3390/en4020324, ISSN 1996-1073.
- (Smolinka et al., 2010)** Smolinka, T., Rau, S., Hebling, C., *Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Water Electrolysis*, In: Stolten, D. (ed.), *Hydrogen and Fuel Cells*, 2010, 1. uusintapainos, Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. pp. 271-289.
- (Smolinka et al., 2012)** Smolinka, T., Garche, J., Hebling, C., Ehret, O., 2012, *Overview on Water Electrolysis for Hydrogen Production and Storage, Results of the NOW study » Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von H₂ aus regenerativen Energien“*, SYMPOSIUM - Water electrolysis and hydrogen as part of the future Renewable Energy System, 10. – 11.5.2012, Kööpenhamina [Viitattu 28.8.2012]. Saatavilla osoitteessa [http://www.hydrogennet.dk/fileadmin/user_upload/PDF-filer/Aktiviteteter/Kommende_aktiviteteter/Elektrolysesymposium/Tom_Smolinka.pdf]
- (Sohlman, 2013)** Sohlman, I., Helsingin Energia, Puhelinkeskustelu 25.2.2013 koskien GTCC-kombivoimalaitoksen sähköntuotannon hyötysuhdetta.
- (Soimakallio & Manninen, 2007)** Soimakallio, S., Manninen, J., *Energy Efficiency and the Finnish energy system*, In: *Energy use – Visions and Technology Opportunities in Finland*, VTT. Edita Prima, Helsinki, ISBN: 978-951-37-4742-8, s. 13-54.
- (Song, 2009)** Song, C., 2009. *Introduction to Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*. In: Liu, K., Song, C., Subramani, V. (ed), 2009. *Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*. Publisher: Wiley. ISBN: 978-0-471-71975-5. USA. [<http://bib.fi/dYF69A>]
- (Speight, 2008)** Speight, D.S. 2008. *The Hydrogen Cycle*. In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 43-67.
- (Stattice, 2012)** *Installed capacity and generation in public power plants 1976-2011 (Total – Hydro – Geothermal) - Annual generation of*

energy, GWh, Islannin tilastokeskuksen verkkosivu, Viitattu [13.11.2012], Päivitetty [8.11.2012], Saatavilla

[[http://www.statice.is/?PageID=1230&src=/temp_en/Dialog/varval.asp?ma=IDN02101%26ti=Installed+capacity+and+generation+in+public+power+plants+1976%2D2011+%26path=../Database/idnadur/orkumal/%26lang=1%26units=Megawatt/Gigawatt hour/percent](http://www.statice.is/?PageID=1230&src=/temp_en/Dialog/varval.asp?ma=IDN02101%26ti=Installed+capacity+and+generation+in+public+power+plants+1976%2D2011+%26path=../Database/idnadur/orkumal/%26lang=1%26units=Megawatt/Gigawatt+hour/percent)]

(Subramani et al., 2009) Subramani, V., Sharma, P., Zhang, L., Liu, K., 2009. *Catalytic Steam Reforming Technology for the Production of Hydrogen and Syngas*. In: Liu, K., Song, C., Subramani, V. (ed), 2009. *Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*. Publisher: Wiley. ISBN: 978-0-471-71975-5. USA. [<http://bib.fi/dYF69A>]

(Suda & Kelly, 2008) Suda, S., Kelly, M.T., 2008, *Indirect Hydrogen Storage via Metals and Complexes Using Exhaust Water*, In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 335-364.

(Tekes, 2012) Projektit, [WWW], Poltto-
kennot-ohjelman verkkosivut: Tekes, Viitattu [6.11.2012], saatavilla
[<http://www.tekes.fi/ohjelmat/Polttokennot/Projektit>]

(Tilastokeskus, 2012) Tilastokeskus, Energiatilas-
to 2011, Suomen virallinen tilasto, ISBN: 978-952-244-335-9.

(Tomforde, 2008) Tomforde, H. (2008) *Hydrogen Infrastructure* – Linde. Präsentation 7. Brennstoffzellenforum, Hanau, 30. Oktober 2008.

(Toyota, 2012) BMW Group and TMC
Agree to Further Strengthen Collaboration, [WWW], lehdistötiedote 29.6.2012, Toyota
Motor Corporation, Viitattu [18.10.2012], Saatavilla
[<http://toyota.eu/about/pages/newsdetails.aspx?prid=747&prs=Corporate&prrm=pressre+lease>]

(Toyota, 2012b) TMC Announces Status of
Its Environmental Technology Development, Future Plans, [WWW], Lehdistötiedote
24.9.2012, Toyota Motor Company, Viitattu 23.10.2012], Saatavilla
[<http://www2.toyota.co.jp/en/news/12/09/0924.html>]

(U.S. Drive, 2010) Fuel Cell Technical Team, 2010,
[WWW], *Cell Component Accelerated Stress Test and Polarization Curve Protocols for
Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells*, U.S. DRIVE Partnership, Viitattu
[3.10.2012], Saatavissa
[http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fc_publications.html]

(Ulleberga et al., 2010) Ulleberga, Ø., Nakkenb, T., Etéc,
A. 2010, *The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of*

system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 35, 5, pp. 1841-1852.

(UN/ECE No 83, 2006) *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements*, Regulation No 83 (2006) of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE), Economic Commission for Europe of the United Nations, Saatavilla [<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:375:0223:0495:EN:PDF>]

(Volkmar, 2012) Henkilökohtainen sähköposti 7.11.2012: Dr. Volkmar, H., Volkswagen AG

(VTT, 2012a) *LIPASTO-yksikköpäästöt* [WWW], VTT, Viitattu [6.12.2012], Saatavilla [<http://lipasto.vtt.fi/>]

(VTT, 2012b) Erkkilä, K., Laine, P., Ny-
lund N-O., Silvonen, P., Murtonen, T., Lappi, M.,
Juhala, M., Laamanen, M., Kankare, J., Naskali, T., Noponen, K., Liimatainen, H.,
Wahlsten, R., Energiatehokas ja älykäs raskas ajoneuvo, – HDENIQ – Loppuraportti,
VTT-R-08344-12.

(VW, 2012) *HyMotion-Touran/Tiguan -
Schritt für Schritt in eine CO2-freie Autozukunft*, [WWW], Verkkosivu: Volkswagen,
Viitattu [8.11.2012], Saatavilla
[http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/innovation/research_vehicles/HyMotion.bin.html/pdfFile/hymotion-touran_tiguan.pdf
][http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/de/innovation/research_vehicles/HyMotion.html]

(Weindorf & Bünger, 2009) Weindorf, W., Bünger, U.,
Energy-chain analysis of hydrogen and its competing alternative fuels for transport,
2009, In: Ball, M., Wietschel, M., The Hydrogen Economy: Opportunities and Chal-
lenges, 2009, Cambridge University Press, UK, s.199-253

(Weiss et al., 2000) Malcolm A. Weiss, M.A.,
Heywood, J. B., Drake, E. M., Schafer, A., AuYeung, F. F., *ON THE ROAD IN 2020, A
life-cycle analysis of new automobile technologies - A life-cycle analysis of new auto-
mobile technologies* - Energy Laboratory Report # MIT EL 00-003 [WWW], Massachu-
setts Institute of Technology, Viitattu 17.12.2012], Saatavilla
[<http://web.mit.edu/energylab/www/pubs/el00-003.pdf>].

(Wienert & Lipman, 2006) Weinert, J. X., Lipman, T. E., 2006,
*An Assessment of the Near-Term Costs of Hydrogen Refueling Stations and Station
Components*, University of California – Davis, Institute of Transportation Studies,
raportti: UCD-ITS-RR-06-03. Viitattu [25.9.2012], Saatavissa osoitteesta
[http://pubs.its.ucdavis.edu/publication_detail.php?id=138]

- (Wienert, 2005)** Wienert, J., 2005, *A Near-Term Economic Analysis of Hydrogen Fueling Stations*, Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, UCD—ITS—RR—05—04, Thesis Work, Viitattu [25.9.2012], Saatavilla [http://pubs.its.ucdavis.edu/publication_detail.php?id=46]
- (Wietschel & Ball, 2009)** Wietschel, M., Ball, M., *The Future of Hydrogen*, 2009, In: Ball, M., Wietschel, M., *The Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges*, 2009, Cambridge University Press, UK, s. 613-639.
- (Wipke et al., 2010)** Wipke, K., Sprik, S., Kurtz, J., Ramsden, T., National Renewable Energy Laboratory, [WWW], Controlled Hydrogen Fleet and Infrastructure Analysis, 2010 DOE Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, 10.6.2010, Washington, Viitattu [3.10.2012], Saatavilla [http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/tv001_wipke_2010_o_an8.pdf]
- (Wipke et al., 2012)** Wipke, K., Sprik, S., Kurtz, J., Ramsden, T., Ainscough, C., Saur, G., *National Fuel Cell Electric Vehicle Learning Demonstration Final Report*, 2012, Technical Report, NREL/TP-5600-54860, Viitattu [1.11.2012], Saatavilla [<http://www.nrel.gov/hydrogen/pdfs/54860.pdf>]
- (Wittstadt, 2008)** Wittstadt, U. 2008. Electrolysis: Hydrogen Production Using Electricity. In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp.155-163
- (Yang & Ogden, 2007)** Yang, C., Ogden, J., 2007, *Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode*. *International Journal of Hydrogen Energy*. 32, 2, pp. 268-286
- (Zheng et al., 2012)** Zheng, J., Liu, X., Xu, P., Liu, P., Zhao, Y., Yang, J., 2012, *Development of high pressure gaseous hydrogen technologies*. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol 37, Issue 1. pp. 1048-1057.
- (Züttel & Borgschulte, 2008)** Züttel, A., Borgschulte, A. 2008. *Hydrogen Production from Coal and Hydrocarbons*. In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp.149-155
- (Züttel et al, 2008)** Züttel, A., Schlapbach, L., Borgschulte, A., *History of Hydrogen*, 2008, In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 7-21.
- (Züttel, 2008a)** Züttel, A., 2008, *Hydrogen Gas*, In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 71-94.

(Züttel, 2008b)

Züttel, A., 2008, *Hydrogen Storage in Molecular Form*, In: Züttel, A., Borgschulte, A., Schlapbach, L. (ed.). *Hydrogen as a Future Energy Carrier*. Saksa. WILEY-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA. pp. 165-172.

(Åhman, 2001)

Åhman, M., *Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles*, Energy, vol 26 (2001), pp. 973-989.

LIITE 1: TARKASTELUIDEN DOKUMENTAATIO

Taulukkuuettelo

- **Liitetaulukko 1:** Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.1) liittyvä dokumentaatio
- **Liitetaulukko 2:** Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.2) liittyvä dokumentaatio
- **Liitetaulukko 3:** Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.3 ja Kuva 7.4) liittyvä dokumentaatio
- **Liitetaulukko 4:** Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.5) liittyvä dokumentaatio.
- **Liitetaulukko 5:** Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.6) liittyvä dokumentaatio
- **Liitetaulukko 6:** Kaupunkibussien energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.7) liittyvä dokumentaatio
- **Liitetaulukko 7:** Kaupunkibussien energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.7) liittyvä dokumentaatio
- **Liitetaulukko 8:** Kaupunkibussien energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.9) liittyvä dokumentaatio
- **Liitetaulukko 9:** Herkkyystarkasteluun (Kuva 8.1) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	PE-hyötysuhde	WtW [g CO2-ekv / km]	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
H ₂ -ICE (kesk. SMR)	288	28	69	24	168	14,2 %	181	181	1	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (260,19 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: Raakaöljy (1,06 MJ); Maakaasu (0,26 MJ); Jätteet yht. (0,05 MJ); Kivihiili (26,46 MJ); Ruskohiili (0,05 MJ); Luonnonuraani (0,28 MJ); Vesivoima (0,08 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Hiili (25,81 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos: Maakaasu (54 bar) (234,59 MJ); --> SMR-prosessi]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar):]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar): Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30 -> 880 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (167,5 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttomoottori --> Ajosuorit: 100 km]
Bensiini-ICE	220	14	16	2	188	19,1 %	166	27	139	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (218,25 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus: Raakaöljy (0,06 MJ); Maakaasu (0,02 MJ); Jätteet yht. (0 MJ); Kivihiili (1,61 MJ); Ruskohiili (0 MJ); Luonnonuraani (0,02 MJ); Vesivoima (0 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (3,35 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae: Raakaöljy (202,93 MJ); --> Öljynjalostamo -> Bensiinijae: Hiili (1,57 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Bensiini; Diesel; --> Ei konversiota:]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Bensiini; Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syötteet: [Bensiini (187,9 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Bensiini; --> Polttomoottori --> Ajosuorit: 100 km]
CNG-ICE	216	21	4	4	187	19,2 %	130	22	108	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (208,77 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: Raakaöljy (0,27 MJ); Maakaasu (0,06 MJ); Jätteet yht. (0,01 MJ); Kivihiili (6,63 MJ); Ruskohiili (0,01 MJ); Luonnonuraani (0,07 MJ); Vesivoima (0,02 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (188,23 MJ); --> CNG - ei konversiota: Hiili (6,47 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Luonnonkaasu (54 bar); --> Ei konversiota:]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Luonnonkaasu (54 bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar): 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (187,2 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu (dedikoitu); --> Polttomoottori --> Ajosuorit: 100 km]
Diesel-ICE	198	13	18	1	166	20,5 %	150	27	123	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (196,01 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus: Raakaöljy (0,06 MJ); Maakaasu (0,01 MJ); Jätteet yht. (0 MJ); Kivihiili (1,42 MJ); Ruskohiili (0 MJ); Luonnonuraani (0,02 MJ); Vesivoima (0 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (185,26 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae: Hiili (1,39 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota:]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (165,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Polttomoottori --> Ajosuorit: 100 km]

Liitetaulukko 1 Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.1) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	PE-hyötysuhde	WtW [g CO2-ekv / km]	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
Ref: Diesel ICE	198	13	18	1	166	20,5 %	150	27	123	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (196,01 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus::: Raakaöljy (0,06 MJ); Maakaasu (0,01 MJ); Jätteet yht. (0 MJ); Kivihiili (1,42 MJ); Ruskohiili (0 MJ); Luonnonuraani (0,02 MJ); Vesivoima (0 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (185,26 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae::: Hiili (1,39 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota:::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko::: Diesel; --> Liikenneolttonesteen maantiekuljetus::: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneolttonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (165,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Polttomoottori --> Ajosuorite: 100 km]
Bensiinihybridi	189	12	14	1	162	22,0 %	143	24	120	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (187,82 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus::: Raakaöljy (0,06 MJ); Maakaasu (0,01 MJ); Jätteet yht. (0 MJ); Kivihiili (1,39 MJ); Ruskohiili (0 MJ); Luonnonuraani (0,01 MJ); Vesivoima (0 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (2,88 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae::: Raakaöljy (174,64 MJ); --> Öljynjalostamo -> Bensiinijae::: Hiili (1,35 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Bensiini; Diesel; --> Ei konversiota:::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko::: Bensiini; Diesel; --> Liikenneolttonesteen maantiekuljetus::: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneolttonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syötteet: [Bensiini (161,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Bensiini; --> Hybridi --> Ajosuorite: 100 km]
FCEV (kesk. SMR)	144	14	35	12	84	29,8 %	90	90		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (130,02 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus::: Raakaöljy (0,53 MJ); Maakaasu (0,13 MJ); Jätteet yht. (0,03 MJ); Kivihiili (13,22 MJ); Ruskohiili (0,03 MJ); Luonnonuraani (0,14 MJ); Vesivoima (0,04 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Hiili (12,9 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos::: Maakaasu (54 bar) (117,23 MJ); --> SMR-prosessi -> vety 30 bar):::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota::: Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar):::]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar)::: Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko::: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30 ->880 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno --> Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 2 Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.2) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	PE-hyötysuhde η	WtW [g CO ₂ -ekv / km]	WtT [g CO ₂ -ekv / km]	TtW [g CO ₂ -ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
Ref: Diesel ICE	198	13	18	1	166	20,5 %	150	27	123	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (196,01 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus: Raakaöljy (0,06 MJ); Maakaasu (0,01 MJ); Jätteet yht. (0 MJ); Kivihiili (1,42 MJ); Ruskohiili (0 MJ); Luonnonuraani (0,02 MJ); Vesivoima (0 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (185,26 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae: Hiili (1,39 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syytteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota:]>>> Syytteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syytteet: [Diesel (165,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Polttomoottori --> Ajosuorite: 100 km]
Bensiinihybridi	189	12	14	1	162	22,0 %	143	24	120	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (187,82 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus: Raakaöljy (0,06 MJ); Maakaasu (0,01 MJ); Jätteet yht. (0 MJ); Kivihiili (1,39 MJ); Ruskohiili (0 MJ); Luonnonuraani (0,01 MJ); Vesivoima (0 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (2,88 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae: Raakaöljy (174,64 MJ); --> Öljynjalostamo -> Bensiinijae: Hiili (1,35 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syytteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Bensiini; Diesel; --> Ei konversiota:]>>> Syytteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Bensiini; Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syytteet: [Bensiini (161,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Bensiini; --> Hybridi --> Ajosuorite: 100 km]
CNG-hybridi	161	16	3	3	139	26,4 %	97	17	81	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (155,46 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: Raakaöljy (0,2 MJ); Maakaasu (0,05 MJ); Jätteet yht. (0,01 MJ); Kivihiili (4,94 MJ); Ruskohiili (0,01 MJ); Luonnonuraani (0,05 MJ); Vesivoima (0,01 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (140,17 MJ); --> CNG- ei konversiota: Hiili (4,82 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syytteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Luonnonkaasu (54 bar); --> Ei konversiota:]>>> Syytteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Luonnonkaasu (54 bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar): 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar)]>>> Ajoneuvon syytteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (139,4 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu (dedikoitu); --> Hybridi --> Ajosuorite: 100 km]
Diesel-hybridi	159	10	14	1	133	26,9 %	121	22	99	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (157,33 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus: Raakaöljy (0,05 MJ); Maakaasu (0,01 MJ); Jätteet yht. (0 MJ); Kivihiili (1,14 MJ); Ruskohiili (0 MJ); Luonnonuraani (0,01 MJ); Vesivoima (0 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (148,7 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae: Hiili (1,11 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syytteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota:]>>> Syytteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syytteet: [Diesel (133 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Hybridi --> Ajosuorite: 100 km]
BEV	154	13	80	4	58	30,2 %	159	159		Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (5,78 MJ); Maakaasu (1,41 MJ); Jätteet yht. (0,28 MJ); Kivihiili (144,51 MJ); Ruskohiili (0,28 MJ); Luonnonuraani (1,55 MJ); Vesivoima (0,42 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Hiili (140,99 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syytteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota:]>>> Syytteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: 300 km]>>> Energian jakelu: [Latauspiste]>>> Ajoneuvon syytteet: [Tasavirta (57,6 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Akkusähkö; --> Sähköinen --> Ajosuorite: 100 km]
FCEV (kesk SMR)	144	14	35	12	84	29,8 %	90	90		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (130,02 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: Raakaöljy (0,53 MJ); Maakaasu (0,13 MJ); Jätteet yht. (0,03 MJ); Kivihiili (13,22 MJ); Ruskohiili (0,03 MJ); Luonnonuraani (0,14 MJ); Vesivoima (0,04 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Hiili (12,9 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos: Maakaasu (54 bar) (117,23 MJ); --> SMR-prosessi -> vety 30 bar:]>>> Syytteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedin komprimointi (30 -> 54 bar):]>>> Syytteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H ₂ (54 bar) - putkisiirto - G H ₂ (54 -> 30 bar): Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H ₂ komprimointi (30 -> 880 bar)]>>> Ajoneuvon syytteet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno --> Ajosuorite: 100 km]
Pistokehybridi	142	10	24	2	106	31,3 %	116	46	70	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (110,18 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus: Raakaöljy (1,2 MJ); Maakaasu (0,29 MJ); Jätteet yht. (0,06 MJ); Kivihiili (29,89 MJ); Ruskohiili (0,06 MJ); Luonnonuraani (0,32 MJ); Vesivoima (0,09 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus (EU-mix):]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (1,69 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae: Raakaöljy (102,45 MJ); --> Öljynjalostamo -> Bensiinijae: Hiili (29,16 MJ); --> Konv.lauhdevoimalaitos:]>>> Syytteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Bensiini; Diesel; --> Ei konversiota:]>>> Syytteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: Bensiini; Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syytteet: [Bensiini (94,86 MJ) Tasavirta (11,59 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Akkusähkö; Bensiini; --> Pistokehybridi --> Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 3 Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.3 ja Kuva 7.4) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	PE-hyötysuhde η	WtW [g CO2-ekv / km]	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
Diesel-ICE (GTL)	285	28	90	1	166	14,2 %	166	43	123	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (285,35 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: : :]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (256,18 MJ); --> GTL-prosessi : : : Maakaasu (54 bar) (1,1 MJ); --> GTCC-voimala: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota: : :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: : : 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (165,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Polttomoottori --> Ajosuorite: 100 km]
Diesel-hybridi (GTL)	229	23	72	1	133	18,6 %	134	34	99	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (229,04 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: : :]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (205,63 MJ); --> GTL-prosessi : : : Maakaasu (54 bar) (0,88 MJ); --> GTCC-voimala: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota: : :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : Diesel; --> Liikenneoltonesteen maantiekuljetus: : : 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikenneoltonesteen jakeluasema]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (133 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Hybridi --> Ajosuorite: 100 km]
CNG-ICE	214	21	2	4	187	19,3 %	126	18	108	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (214,44 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: : :]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (188,23 MJ); --> CNG - ei konversiota: : : Maakaasu (54 bar) (5,11 MJ); --> GTCC-voimala: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Luonnonkaasu (54 bar); --> Ei konversiota: : :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : Luonnonkaasu (54 bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar): : : 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (187,2 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu (dedikoitu); --> Polttomoottori --> Ajosuorite: 100 km]
CNG-hybridi	160	16	2	3	139	26,6 %	86	5	81	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (159,68 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: : :]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (140,17 MJ); --> CNG - ei konversiota: : : Maakaasu (54 bar) (3,81 MJ); --> GTCC-voimala: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Luonnonkaasu (54 bar); --> Ei konversiota: : :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : Luonnonkaasu (54 bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar): : : 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (139,4 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu (dedikoitu); --> Hybridi --> Ajosuorite: 100 km]
FCEV (kesk. SMR)	145	14	33	14	84	29,7 %	75	75		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (144,67 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: : :]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (10,2 MJ); --> GTCC-voimala: : : Maakaasu (54 bar) (120,24 MJ); --> SMR-prosessi --> vety 30 bar): : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: : : Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar): : :]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar): : : Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30 -> 880 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno --> Ajosuorite: 100 km]
BEV (GTCC)	124	12	50	4	58	37,6 %	64	64		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (123,66 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus: : :]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (111,5 MJ); --> GTCC-voimala: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: : :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : 300 km]>>> Energian jakelu: [Latauspiste]>>> Ajoneuvon syötteet: [Tasavirta (57,6 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Akkusähkö; --> Sähköinen --> Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 4 Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.5) liittyvä dokumentaatio.

Tekstikuvau s	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	PE- hyötysuhd e η	WtW [g CO2-ekv / km]	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
BEV (elektrolyysi, putkis. 800 km, GTCC, AC 300 km)	193	82	50	4	58	24,1 %	1	1		Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (193,2 MJ); --> Uusiutuvan vedyn elektrolyysi tuotanto ja putkisiirto 800 km)::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva vety (54 bar) (111,5 MJ); --> GTCC-voimala::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: 300 km]>>> Energian jakelu: [Latauspiste]>>> Ajoneuvon syötet: [Tasavirta (57,6 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Akkusähkö; --> Sähköinen --> Ajosuorite: 100 km]
FCV (off-shore el, putkis. 800 + 300 km)	161	66		12	84	26,6 %				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (6,73 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km)::]>>> Tuulivoima (154,46 MJ); --> Uusiutuvan vedyn elektrolyysi tuotanto ja putkisiirto 800 km)::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (6,39 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö - ei konversiota:: Uusiutuva vety (54 bar) (89,14 MJ); --> Uusiutuva vety - ei konversiota::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota:: Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar)::]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar):: Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30 -> 880 bar)]>>> Ajoneuvon syötet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno --> Ajosuorite: 100 km]
FCV (HVDC 800 km, kesk. elektrolyysi, putkis. 300 km)	155	8	52	12	84	27,7 %				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (154,93 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km)::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (147,06 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö - ei konversiota::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota:: Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar)::]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar):: Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30 -> 880 bar)]>>> Ajoneuvon syötet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno --> Ajosuorite: 100 km]
FCV (HVDC 800 km + AC 300 km, haj. elektrolyysi)	153	8		62	84	28,0 %				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (153,25 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km)::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (145,48 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö - ei konversiota::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: 300 km]>>> Energian jakelu: [Elektrolyysi (haj) + Komprimointi (30 -> 880 bar)]>>> Ajoneuvon syötet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno --> Ajosuorite: 100 km]
BEV (HVDC 800 km, AC 300 km)	65	3	0	4	58	72,0 %				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (64,61 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km)::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (61,33 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö - ei konversiota::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: 300 km]>>> Energian jakelu: [Latauspiste]>>> Ajoneuvon syötet: [Tasavirta (57,6 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Akkusähkö; --> Sähköinen --> Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 5 Henkilöautojen energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.6) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	WtW CO2-ekv / km	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
CNG-ICE	2075	203	35	37	1800	1230	213	1017	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (2007,38 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):: Raakaöljy (2,55 MJ); Maakaasu (0,62 MJ); Kierrätyspolttoaineet yht. (0,12 MJ); Kivihiili (63,73 MJ); Ruskohiili (0,12 MJ); Luonnonuraani (0,68 MJ); Vesivoima (0,19 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (1809,89 MJ); --> CNG - ei konversiota:: Hiili (62,17 MJ); --> Konventionaalinen lauhdevoimalaitos::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Maakaasu (54 bar); --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: Luonnonkaasu (54bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar):: 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar)::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (1800 MJ) ::]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu; --> Polttomoottori:: Ajosuorite: 100 km]
Johdinbus si	1825	157	943	110	616	1876	1876		Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (68,4 MJ); Maakaasu (16,68 MJ); Kierrätyspolttoaineet yht. (3,34 MJ); Kivihiili (1709,9 MJ); Ruskohiili (3,34 MJ); Luonnonuraani (18,35 MJ); Vesivoima (5 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Hiili (1668,19 MJ); --> Konventionaalinen lauhdevoimalaitos::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: 300 km]>>> Energian jakelu: [Ajojohtin (0,6 kW) + muuntaja + apulaitteet::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Johdinsähkö (600 V DC) (615,6 MJ) ::]>>> Auton voimalinja: [Ajojohtimen sähkövirta; --> Sähköinen:: Ajosuorite: 100 km]
FC (kesk. SMR)	1686	164	405	138	979	1061	1061		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (1521,06 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):: Raakaöljy (6,19 MJ); Maakaasu (1,51 MJ); Kierrätyspolttoaineet yht. (0,3 MJ); Kivihiili (154,67 MJ); Ruskohiili (0,3 MJ); Luonnonuraani (1,66 MJ); Vesivoima (0,45 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Hiili (150,9 MJ); --> Konventionaalinen lauhdevoimalaitos:: Maakaasu (54 bar) (1371,41 MJ); --> SMR-prosessi -> vety 30 bar)::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota:: Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar)::]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar):: Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30->880 bar)::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (979,2 MJ) ::]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno:: Ajosuorite: 100 km]
Diesel-ICE	1669	108	149	12	1400	1255	234	1021	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (1656,56 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus:: Raakaöljy (0,48 MJ); Maakaasu (0,12 MJ); Kierrätyspolttoaineet yht. (0,02 MJ); Kivihiili (12,01 MJ); Ruskohiili (0,02 MJ); Luonnonuraani (0,13 MJ); Vesivoima (0,04 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (1565,75 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae:: Hiili (11,72 MJ); --> Konventionaalinen lauhdevoimalaitos::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: Diesel; --> Liikennepolttonesteen maantiekuljetus:: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikennepolttonesteen jakeluasema::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (1400,4 MJ) ::]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Polttomoottori:: Ajosuorite: 100 km]
CNG-hybridi	1643	161	28	29	1425	974	169	805	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (1589,39 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):: Raakaöljy (2,02 MJ); Maakaasu (0,49 MJ); Kierrätyspolttoaineet yht. (0,1 MJ); Kivihiili (50,46 MJ); Ruskohiili (0,1 MJ); Luonnonuraani (0,54 MJ); Vesivoima (0,15 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (1433,02 MJ); --> CNG - ei konversiota:: Hiili (49,23 MJ); --> Konventionaalinen lauhdevoimalaitos::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Maakaasu (54 bar); --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: Luonnonkaasu (54bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar):: 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar)::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (1425,19280205656 MJ) ::]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu; --> Hybridi:: Ajosuorite: 100 km]
Diesel-hybridi	1322	85	118	10	1109	994	185	809	Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (1311,62 MJ); --> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus:: Raakaöljy (0,38 MJ); Maakaasu (0,09 MJ); Kierrätyspolttoaineet yht. (0,02 MJ); Kivihiili (9,51 MJ); Ruskohiili (0,02 MJ); Luonnonuraani (0,1 MJ); Vesivoima (0,03 MJ); --> Hiilen tuotanto ja kuljetus::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (1239,72 MJ); --> Öljynjalostamo -> Diesel-jae:: Hiili (9,28 MJ); --> Konventionaalinen lauhdevoimalaitos::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel (ja raskas pö); --> Ei konversiota::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:: Diesel; --> Liikennepolttonesteen maantiekuljetus:: 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikennepolttonesteen jakeluasema::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (1108,8 MJ) ::]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Hybridi:: Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 6 Kaupunkibussien energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.7) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	WtW [g CO2-ekv / km]	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
Diesel-ICE (GTL)	2412	237	762	12	1400	1390	368	1021	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (2411,65 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (2165,12 MJ); --> GTL-prosessi:::]>>> Maakaasu (54 bar) (9,27 MJ); --> GTCC-voimala:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota:::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:::]>>> Diesel; --> Liikennepolttonesteen maantiekuljetus:::]>>> 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikennepolttonesteen jakeluasema:::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (1400,4 MJ):::]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Polttomoottori:::]>>> Ajosuorite: 100 km]
CNG-ICE	2062	203	22	37	1800	1191	174	1017	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (2061,92 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (1809,89 MJ); --> CNG - ei konversiota:::]>>> Maakaasu (54 bar) (49,17 MJ); --> GTCC-voimala:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Maakaasu (54 bar); --> Ei konversiota:::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:::]>>> Luonnonkaasu (54 bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar):::]>>> 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar):::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (1800 MJ):::]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu; --> Polttomoottori:::]>>> Ajosuorite: 100 km]
Diesel-hybridi (GTL)	1909	188	603	10	1109	1100	292	809	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (1909,48 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (1714,28 MJ); --> GTL-prosessi:::]>>> Maakaasu (54 bar) (7,34 MJ); --> GTCC-voimala:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; --> Ei konversiota:::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:::]>>> Diesel; --> Liikennepolttonesteen maantiekuljetus:::]>>> 300 km]>>> Energian jakelu: [Liikennepolttonesteen jakeluasema:::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Diesel (1108,8 MJ):::]>>> Auton voimalinja: [Diesel; --> Hybridi:::]>>> Ajosuorite: 100 km]
FC (kesk. SMR)	1653	163	373	138	979	953	953		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (1653,42 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (119,34 MJ); --> GTCC-voimala:::]>>> Maakaasu (54 bar) (1371,41 MJ); --> SMR-prosessi --> vety 30 bar):::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota:::]>>> Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar):::]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar):::]>>> Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:::]>>> 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30->880 bar):::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (979,2 MJ):::]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno:::]>>> Ajosuorite: 100 km]
CNG-hybridi	1633	161	18	29	1425	943	138	805	Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (1632,57 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (1433,02 MJ); --> CNG - ei konversiota:::]>>> Maakaasu (54 bar) (38,93 MJ); --> GTCC-voimala:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Maakaasu (54 bar); --> Ei konversiota:::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:::]>>> Luonnonkaasu (54 bar); --> Luonnonkaasun putkisiirto (54 -> 30 bar):::]>>> 300 km]>>> Energian jakelu: [CNG komprimointi (30 -> 250 bar):::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Luonnonkaasu (250 bar) (1425,19280205656 MJ):::]>>> Auton voimalinja: [Luonnonkaasu; --> Hybridi:::]>>> Ajosuorite: 100 km]
Johdinbus si (GTCC)	1463	144	594	110	616	828	828		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (1463,21 MJ); --> Maakaasun tuotanto ja kuljetus (4000 km):::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (1319,26 MJ); --> GTCC-voimala:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota:::]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko:::]>>> 300 km]>>> Energian jakelu: [Ajojohdin (0,6 kV) + muuntaja + apulaitteet:::]>>> Ajoneuvon syötteet: [Johdinsähkö (600 V DC) (615,6 MJ):::]>>> Auton voimalinja: [Ajojohtimen sähkövirta; --> Sähköinen:::]>>> Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 7 Kaupunkibussien energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.8) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	WtW [g CO2-ekv / km]	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
Johdinbus si (off-shore el. & H2-GTCC)	2286	967	594	110	616	1	1		Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (2285,91 MJ); --> Uusiutuvan vedyn elektrolyyysi tuotanto ja putkisiirto 800 km]: :]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva vety (54 bar) (1319,26 MJ); --> GTCC-voimala: :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : 300 km]>>> > Energian jakelu: [Ajojohtin (0,6 kV) + muuntaja + apulaitteet: : :]>>> Ajoneuvon syötet: [Johdinsähkö (600 V DC) (615,6 MJ) : :]>>> Auton voimalinja: [Ajojohtimen sähkövirta; --> Sähköinen: : : Ajosuorite: 100 km]
FC (off-shore el.)	1886	768		138	979				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (78,7 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km): :]>>> Uusiutuvan vedyn elektrolyyysi tuotanto ja putkisiirto 800 km]: :]>>> > Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (74,71 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö: : : Uusiutuva vety (54 bar) (1042,9 MJ); --> Uusiutuva vety - ei konversiota: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: : : Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar): :]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar): :]>>> Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30->880 bar): :]>>> > Ajoneuvon syötet: [Vety (880 bar) (979,2 MJ) : :]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno: : : Ajosuorite: 100 km]
FC (kesk. el.)	1812	92	603	138	979				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (1812,46 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km): :]>>> > Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (1720,49 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: : : Vety (54 bar); Verkkosähkö; --> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar): :]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); --> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar): :]>>> Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : 300 km]>>> > Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30->880 bar): :]>>> Ajoneuvon syötet: [Vety (880 bar) (979,2 MJ) : :]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno: : : Ajosuorite: 100 km]
FC (haj. el.)	1793	91		723	979				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (1792,88 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km): :]>>> > Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (1701,91 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö - ei konversiota: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: : :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : 300 km]>>> > Energian jakelu: [Elektrolyyysi (haj) + Komprimointi (30 -> 880 bar)]>>> Ajoneuvon syötet: [Vety (880 bar) (979,2 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; --> Polttokenno -> Ajosuorite: 100 km]
Johdinbus si (800 km HVDC + 300 km HVAC)	764	39	0	110	616				Primäärienergian hankinta: [Tuulivoima (764,46 MJ); --> Uusiutuvan sähkövoiman tuotanto ja siirto HVDC 800 kV (800 km): :]>>> > Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Uusiutuva sähkövoima (725,66 MJ); --> Uusiutuva verkkosähkö: : :]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; --> Ei konversiota: : :]>>> Syötteiden siirto: [Siirtosähkö (HV); --> Siirto- ja jakeluverkko: : : 300 km]>>> > Energian jakelu: [Ajojohtin (0,6 kV) + muuntaja + apulaitteet: : :]>>> Ajoneuvon syötet: [Johdinsähkö (600 V DC) (615,6 MJ) : :]>>> Auton voimalinja: [Ajojohtimen sähkövirta; --> Sähköinen: : : Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 8 Kaupunkibussien energiaketjutarkasteluun (Kuva 7.9) liittyvä dokumentaatio

Tekstikuvaus	WtW (MJ)	PE:n hankinta (MJ)	Kesk. tuotanto (MJ)	Siirto & jak. (MJ)	TtW (MJ)	PE-hyötysuhde η	WtW [g CO2-ekv / km]	WtT [g CO2-ekv / km]	TtW [g CO2-ekv / km]	Koko ketjun kuvaus
FCV - kesk. SMR - LH2 maantiekuljetus	184	18	51	31	84	23,3 %	105	105		Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (2,08 MJ); ---> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus::: Maakaasu (181,94 MJ); ---> Maakaasun tuotanto ja kuljetus:::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (1,97 MJ); ---> Öljynjalostamo -> Diesel-jae::: Maakaasu (54 bar) (53,97 MJ); ---> GTCC-voimala::: Maakaasu (54 bar) (110,07 MJ); ---> SMR-prosessi -> vety 30 bar:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; ---> Ei konversiota::: Vety (54 bar); Verkkosähkö; ---> Vedyn nesteytysprosessi:::]>>> Syötteiden siirto: [Nestemäinen vety; ---> Nestevedyn maantie-kuljetus::: Siirtosähkö (HV); ---> Siirto- ja jakeluverkko::: Diesel; ---> Liikenneolettonesteen maantiekuljetus::: 300 km]>>> Energian jakelu: [L H2 paineistus (880 bar) & höyrystys]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; ---> Polttokenno ---> Ajosuorite: 100 km]
FCV - kesk. SMR - G H2 maantiekuljetus	154	14	33	24	84	27,8 %	91	91		Primäärienergian hankinta: [Raakaöljy (20,15 MJ); ---> Raakaöljyn tuotanto + kuljetus::: Maakaasu (134,2 MJ); ---> Maakaasun tuotanto ja kuljetus:::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Raakaöljy (19,05 MJ); ---> Öljynjalostamo -> Diesel-jae::: Maakaasu (54 bar) (8,69 MJ); ---> GTCC-voimala::: Maakaasu (54 bar) (112,31 MJ); ---> SMR-prosessi -> vety 30 bar:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; Diesel; ---> Ei konversiota::: Vety (54 bar); Verkkosähkö; ---> Vedyn komprimointi (30 -> 200 bar):::]>>> Syötteiden siirto: [Vety (200 bar); ---> Kaasumaisen vedyn maantiekuljetus (200 bar)::: Siirtosähkö (HV); ---> Siirto- ja jakeluverkko::: Diesel; ---> Liikenneolettonesteen maantiekuljetus::: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (200 ->880 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; ---> Polttokenno ---> Ajosuorite: 100 km]
FCV - kesk. SMR - putkisiirto	141	14	32	12	84	30,4 %	81	81		Primäärienergian hankinta: [Maakaasu (141,33 MJ); ---> Maakaasun tuotanto ja kuljetus:::]>>> Energiankäyttö tuotantolaitoksilla: [Maakaasu (54 bar) (10,2 MJ); ---> GTCC-voimala::: Maakaasu (54 bar) (117,23 MJ); ---> SMR-prosessi -> vety 30 bar:::]>>> Syötteiden valmistelu: [Verkkosähkö; ---> Ei konversiota::: Vety (54 bar); Verkkosähkö; ---> Vedyn komprimointi (30 -> 54 bar):::]>>> Syötteiden siirto: [Vety (54 bar); ---> G H2 (54 bar) - putkisiirto - G H2 (54 -> 30 bar)::: Siirtosähkö (HV); ---> Siirto- ja jakeluverkko::: 300 km]>>> Energian jakelu: [G H2 komprimointi (30 ->880 bar)]>>> Ajoneuvon syötteet: [Vety (880 bar) (83,7 MJ)]>>> Auton voimalinja: [Vety; ---> Polttokenno ---> Ajosuorite: 100 km]

Liitetaulukko 9 Herkkyystarkasteluun (Kuva 8.1) liittyvä dokumentaatio

LIITE 2: KÄYTETYT LÄHTÖARVOT

Taulukkuuettelo

- Liitetaulukko 10: *Henkilöautovoimalinjojen lähtöarvot ja modifioinnit*
- Liitetaulukko 11: *Kaupunkibussien voimalinjojen lähtötiedot ja modifioinnit*
- Liitetaulukko 12: *Energianjakeluprosessien laskennassa käytetyt lähtöarvot*
- Liitetaulukko 13: *Energiasyötteiden siirron laskennassa käytetyt lähtöarvot ja modifikaatiot*
- Liitetaulukko 14: *Energiasyötteiden valmistelu-moduulin laskennan lähtöarvot*
- Liitetaulukko 15: *Keskitetyn tuotannon prosessien laskennan lähtöarvot*
- Liitetaulukko 16: *Primäärienergian hankinnan laskennassa käytetyt lähtöarvot*

	Modifioinnin lähtöarvot	Mallinnuksen lähtöarvo	Lähde:	kgCO ₂ CO ₂ -ekv. / yksikkö	kgCH ₄ CO ₂ -ekv. / yksikkö	kgN ₂ O CO ₂ -ekv. / yksikkö	Lisähuomautus
Lähdetieto: H2 ICE (PISI, 1,3 l), polttoaineen kulutus [MJve-tyä / km]		1,675	(JEC, 2011b)				
Lähdetieto: ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1406		(JEC, 2011b)				
Laskenta: H2 ICE, ajosyklin aikainen mekaanisen energian tarve, bruttoenergiavirta [MJ / km]		0,408		0,0	0,0	0,3	[gCO ₂ -ekv./ MJf]
Lähdetieto: CNG ICE (PISI 1,9 l, dedicated), CNG:n kulutus [MJcng / km]		1,872	(JEC, 2011b)				
Lähdetieto: CNG ICE, ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1438		(JEC, 2011b)				
Laskenta: CNG ICE, ajosyklin mekaaninen energia, bruttoenergiavirta [MJ / km]		0,415		56,3	0,9	0,3	[gCO ₂ -ekv./ MJf]
Lähdetieto: Diesel (DICI 1,9 l +Diesel Particulate Filter), dieselin kulutus		1,657	(JEC, 2011b)	73,3	0,1	0,9	[gCO ₂ -ekv./ MJf]

[MJdieselä / km]							
Lähdetieto: Diesel (DICI), ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1388		(JEC, 2011b)				
Laskenta: Diesel (DICI), ajosyklin mekaaninen energia, bruttoenergiavirta [MJ / km]		0,405					
Lähdetieto: Bensiini (DISI, 1,6 l) bensiinin kulutus [MJbensiiniä / km]		1,879	(JEC, 2011b)				
Lähdetieto: Bensiini (DISI), ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1461		(JEC, 2011b)				
Laskenta: Bensiini (PISI), ajosyklin mekaaninen energia, bruttoenergiavirta [MJ / km]		0,419		73,4	0,2	0,3	[gCO ₂ -ekv./ MJf]
Lähdetieto: BEV Toimintasäde [km]		160	(JEC, 2011g)				
Lähdetieto: BEV, sähköenergian käyttö (16 kWh / 100 km) [MJ / km]		0,58	(JEC, 2011g)				
Lähdetieto: BEV (Range: 160 km, ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1690		(JEC, 2011g), (JEC, 2011b)				
Laskenta: BEV (Range: 160 km, ajosyklin aikainen energian kulutus, bruttoenergiavirta [MJ / km]		0,465		0,0	0,0	0,0	massa 1250 + 300 kg + 140 kg
Lähdetieto: FCV Hybrid, polttoaineen kulutus [MJvetyä / km]		0,837	(JEC, 2011b)				
Lähdetieto: FCV Hybrid, ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1510		(JEC, 2011b)				
Laskenta: FCV Hybrid, ajosyklin mekaaninen energia, brut-		0,429		0,0	0,0	0,0	[gCO ₂ -ekv./ MJf]

toenergiavirta [MJ / km]							
Lähdetieto: CNG hybridi (sähkö- moottori 14 kW, polttomoottori 1,6 l PISI), CNG:n kulutus [MJeng / km]		1,394	(JEC, 2011b)				
Lähdetieto: CNG hybridin ajosyk- lin suoritusmassa [kg]	1441		(JEC, 2011b)				
Laskenta: CNG Hybrid, ajosyk- lin mekaaninen energia, brut- toenergiavirta [MJ / km]		0,424		56,2	1,2	0,4	[gCO2-ekv./ MJf]
Lähdetieto: Diesel hybridi (sähkömoottori 14 kW, poltto- moottori 1,6 l DICI + DPF), dieselin kulutus [MJdieseliä / km]		1,330	(JEC, 2011b)				
Lähdetieto: Diesel hybridi, ajosyklin suori- tusmassassa [kg]	1453		(JEC, 2011b)				
Laskenta: Diesel Hybrid, ajosyk- lin mekaaninen energia, brut- toenergiavirta [MJ / km]		0,427		73,2	0,1	1,1	[gCO2-ekv./ MJf]
Lähdetieto: Bensiini hybridi (polttomoottori 1,6 l PISI + 14 kW sähkömoot- tori), bensiinin kulutus [MJben- siiniä / km]		1,617					
Lähdetieto: Bensiini hybridi, ajosyklin suori- tusmassassa [kg]	1401						
Laskenta: Ben- siini Hybrid, ajosyklin me- kaaninen ener- gia, bruttoener- giavirta [MJ / km]		0,416		73,3	0,3	0,3	

Lähdetieto: Prius hybrid, ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1565		(Karvinen, 2013), (JEC, 2011b)				
Lähdetieto: Prius Hybrid, aerodynaaminen vastuskerroin	0,25						
Lähdetieto: Prius Hybrid, otsapinta-ala [m2]	2,17						
Laskenta: Prius Hybrid, omilla A:n ja Cw: arvoilla laskettu ajosyklin mekaaninen energia, bruttoenergiavirta [MJ / km]	0,416						
Laskenta: Prius Hybrid, referenssiauton A:n ja Cw: arvoilla laskettu ajosyklin mekaaninen energia, bruttoenergiavirta [MJ / km]			0,4402				
Laskenta: Energiankulutuksen suhdeluku (referenssin mek. en / Alkuperäisen mek. en)			1,059				
Lähdetieto: Prius, hybridi (sähkömoottori 60 kW + PISI) (3,9 l/100 km) [MJbensiniä / km]	1,255		(Karvinen, 2013)				
Laskenta: Skaalattu bensinin kulutus [MJbensiniä / km]			1,329			<i>Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.</i>	<i>omamassa 1425 kg + 140 kg</i>
Lähdetieto: Plug-In Prius (sähkömoottori 60 kW + PISI), toimintasäde ennen akuston tyhjenemistä [km]			32,7	(Karvinen, 2013)			
Lähdetieto: Prius Plug-in ajosyklin suoritusmassassa [kg]	1590		(Karvinen, 2013), (JEC, b)	73,3	0,3	0,3	Ajosyklin massa: omamassa 1450 kg + 140 kg. Käytetään tavallisen bensiinihybridin päästöarvoja. [gCO ₂ -ekv./MJf]

Lähdetieto: Prius Hybrid, aerodynaaminen vastuskerroin	0,25						
Lähdetieto: Prius Hybrid, otsapinta-ala [m2]	2,17						
Laskenta: Prius Plug-in Hybrid, omilla A:n ja Cw: arvoilla laskettu ajosyklin mekaaninen energia, bruttoenergiavirta [MJ / km]	0,421						
Laskenta: Prius Plug-in Hybrid, referenssiauton A:n ja Cw: arvoilla laskettu ajosyklin mekaaninen energia, bruttoenergiavirta [MJ / km]			0,4452				
Laskenta: Energiankulutuksen suhdeluku (referenssin mek. en / Alkuperäisen mek. en)			1,059				
Lähdetieto: Plug-In Prius, bensiinin kulutus (0... 32,7 km) = 0,9 l / 100 km [MJbensiiniä / km]	0,290					(Karvinen, 2013)	
Lähdetieto: Plug-In Prius, sähköenergian kulutus (0... 32,7 km) = 93 Wh / km [MJsähköenergiaa / km]	0,335					(Karvinen, 2013)	
Lähdetieto: Plug-In Prius (sähkömoottori 60 kW + PISI) bensiinin kulutus (32,8 km...->) = 3,7 l / 100 km [MJbensiiniä / km]	1,191					(Karvinen, 2013)	
Laskenta: Skaalattu bensiinin kulutus (0... 32,7 km)			0,307				

[MJbensiniä / km]							
Laskenta: Skaalattu sähköenergian kulutus (0... 32,7 km) [MJsähköenergia / km]		0,354					
Laskenta: Skaalattu bensinin kulutus (32,8 km...->) [MJbensiniä / km]		1,260					

Liitetaulukko 10 Henkilöautovoimalinjojen lähtöarvot ja modifioinnit

	Modifi- oinnin lähtöarvot	Mallinnuk- sen lähtö- arvo	Läh- de:	kgCO 2 CO2- ekv. / yk- sikkö	kgCH 4 CO2- ekv. / yk- sikkö	kgN ₂ O CO2- ekv. / yk- sikkö	Lisä- huomautus
Lähdetieto: Diesel- bussin polttoaineen kulutus [MJdieselä / km]		14,004	(FCH JU, 2012)	72,4	0,0	0,5	CO ₂ -päästö lähteestä (VTT, 2012b), muut päästöt lähteestä (VTT, 2012a, (ajoneuvojen päästöluokka EEV) [g CO ₂ -ekv / MJf]
Lähdetieto: Sarja- hybridi Diesel-bussin polttoaineen kulutu- tus [MJdieselä / km]		11,088	(FCH JU, 2012)	72,4	0,0	0,5	CO ₂ -päästö lähteestä (VTT, 2012b), muut päästöt lähteestä (VTT, 2012a, (ajoneuvojen päästöluokka EEV) [g CO ₂ -ekv / MJf]
Lähdetieto: CNG- bussin polttoaineen kulutus [MJcng / km]		18,000	(FCH JU, 2012)	54,9	1,1	0,4	CO ₂ -päästö lähteestä (VTT, 2012b), muut päästöt lähteestä (VTT, 2012a, (ajoneuvojen päästöluokka EEV) [g CO ₂ -ekv / MJf]
Laskenta: CNG- hybridibussin poltto- aineen kulutus die- sel- ja dieselhybridin arvojen pohjalta [MJcng / km]		14,252		54,9	1,1	0,4	CO ₂ -päästö lähteestä (VTT, 2012b), muut päästöt lähteestä (VTT, 2012a, (ajoneuvojen päästöluokka EEV) [g CO ₂ -ekv / MJf]

Lähdetieto: Vety- polttokennohybridi- bussin polttoaineen kulutus [MJvetyä / km]		9,792	(FCH JU, 2012)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Ajojoh- dinbussin energian- kulutus [MJsähkö- energiaa / km]		6,156	(FCH JU, 2012)	0,0	0,0	0,0	

Lähtötiedot ja modifioinnit

	Modifi- oinnin lähtöarvot	Mallin- nuksen lähtöarvo	Lähde:	kgCO₂ 2 CO ₂ - ekv. / yk- sikkö	kgCH₄ 4 CO ₂ - ekv. / yk- sikkö	kgN₂ O CO ₂ - ekv. / yk- sikkö	Lisä- huomautus
Lähdetieto: Akkula- turin energiasyöte (latauksen hyötysuh- de 85 %)		1,176	(JEC, 2011g)	0,0	0,0	0,0	
Laskenta: Koko joh- dinvirroitinjärjestel- män keskimääräinen energiansyötön suh- deluku (lähdetietojen pohjalta) [MJel / MJel]		1,107	(HSL, 2011)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Jak. As: kompr. (H2: 15 - 880 bar) [MJvetyä / MJ]		1,020	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Jak. As: kompr. (H2: 15 - 880 bar) [MJsähköenergi- aa / MJ]		0,077	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Jak. as: kompr. (H2: 20 - 880 bar) [MJvetyä / MJ]		1,020	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Jak. as: kompr. (H2: 20 - 880 bar) [MJsähköenergi- aa / MJ]		0,077	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Jak. As: kompr. (H2: 30 - 880 bar) [MJvetyä / MJ]		1,020	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Jak. As: kompr. (H2: 30 - 880 bar) [MJsähköenergi- aa / MJ]		0,062	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Jak. As: kompr. (H2: 200 - 880 bar) [MJvetyä / MJ]		1,020	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Jak. As: kompr. (H2: 200 - 880 bar) [MJsähkö- energiaa / MJ]		0,035	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Jak. As: kompr. (CNG: 30 - 250 bar) [MJsähkö- energiaa / MJ]		0,014	(GREE T, 2012)	0,0	0,0	0,0	

Lähdetieto: Hajautettu el. (el MV - H2 30 bar) [MJsähköenergiaa / MJ]		1,538	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Diesel- ja bensiini-jakeluaseman sähköenergian käyttö [MJsähköenergiaa / MJ]		0,003	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: SMR_hajautettu (CNG: -> H2: 15 bar) [MJcng / MJ]		1,441	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: SMR_hajautettu (CNG: -> H2: 15 bar) [MJsähköenergiaa / MJ]		0,016	(JEC, 2011e)	79,3	0,0	0,0	(JEC, 2011d) [g CO2-ekv / MJ _{H2,out}]
Lähdetieto: Nestevedyn höyrystys (sähkövastus) [MJsähköenergiaa / MJ]		0,051	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	

Litetaulukko 12 Energianjakeluprosessien laskennassa käytetyt lähtöarvot

	Modifi- oinnin lähtöar- vot	Mallin- nuksen lähtöarvo	Lähde:	kgC O₂ CO₂- ekv. / yk- sikkö	kgC H₄ CO₂- ekv. / yk- sikkö	kgN₂ O CO₂- ekv. / yk- sikkö	Lisähuomautus
Maantiekulje- tussyksiköiden energiankäytön lähtötiedot							
Lähdetieto: Maan- tiekuljetussyksikön massa tyhjänä (omamassa, vars. pv-yhdistelmä) [kg]	20000		(LIPAS PAS- TO, 2012)				täysperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo
Lähdetieto: Maan- tiekuljetussyksikön massa täyskuormal- la (kok. massa, vars. pv-yhdistelmä) [kg]	60000		(LIPAS PAS- TO, 2012)				täysperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo
Lähdetieto: Maan- tiekuljetussyksikön energiankulutus tyhjänä (omamassa, vars. pv-yhdistelmä) [MJdieselä / km]	12		(LIPAS PAS- TO, 2012)				täysperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo
Lähdetieto: Maan- tiekuljetussyksikön energiankulutus täyskuormalla (ko- konaismassa, vars. pv-yhdistelmä) [MJdieselä / km]	18		(LIPAS PAS- TO, 2012)				täysperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo
Lähdetieto: Maan- tiekuljetussyksikön massa tyhjänä (omamassa, puo- lipv-yhdistelmä) [kg]	15000		(LIPAS PAS- TO, 2012)				puoliperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo
Lähdetieto: Maan- tiekuljetussyksikön massa täyskuormal- la (kok. massa, puolipv-yhdistelmä) [kg]	40000		(LIPAS PAS- TO, 2012)				puoliperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo
Lähdetieto: Maan- tiekuljetussyksikön energiankulutus tyhjänä (omamassa, puolipv-yhdistelmä)	11		(LIPAS PAS- TO, 2012)				puoliperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo

[MJdieselä / km]							
Lähdetieto: Maantiekuljetusyksikön energiankulutus täyskuormalla (kokonaismassa, puolipv-yhdistelmä) [MJdieselä / km]	15		(LIPAS PAS-TO, 2012)				puoliperävaunuyhdistelmä, EURO 5-päästöluokka, maantieajo
Nestemäisen vedyn maantiekuljetuksen energiankäytön laskenta							
Lähdetieto: Yhdistelmän max.hyötyk (lähde) [kg]	3500		(JEC, 2011e)				
Laskenta: Yhdistelmän massa tyhjänä (omamassa) [kg]	36500						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, täyskuormalla [MJdieselä / km]	15						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, tyhjänä [MJdieselä / km]	14,44						
Lähdetieto: Vedyn energiasisältö [MJ / kg]	120,1		(JEC, 2011d)				
Laskenta: Kuljetuksen energiasisältö [MJ]	420350						
Laskenta: Siirron energiaintensiivisyys [MJdieselä / MJ km]		<u>7,00E-05</u>		73,3	0,0	0,0	JEC, 2011d skaalattu: [g / MJ _{diesel}]
Kaasumaisen vedyn maantiekuljetuksen energiankäytön laskenta							
Lähdetieto: Yhdistelmän max.hyötyk (lähde) [kg]	450		(AGA, 2012)				
Lähdetieto: Yhdistelmän massa täyskuormalla (kok.massa) [kg]	60000		(AGA, 2012)	73,3	0,0	0,0	JEC, 2011d skaalattu: [g / MJ _{diesel}]

Laskenta: Yhdistelmän massa tyhjänä (omamassa) [kg]	59550						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, täyskuormalla [MJdieselä / km]	18						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, tyhjänä [MJdieselä / km]	17,9325						
Lähdetieto: Vedyn energiasisältö [MJ / kg]	120,1			(JEC, 2011d)			
Laskenta: Kuljetuksen energiasisältö [MJ]	54045						
Laskenta: Siirron energiaintensiivisyys [MJdieselä / MJ km]			6,65E-04				
Dieselin maantiekuljetuksen energiankäytön laskenta							
Lähdetieto: Yhdistelmän max.hyötyk (lähde) [kg]	40000			(Kolari, 2012) puhelu 4.12.2012			
Lähdetieto: Yhdistelmän massa täyskuormalla (kok.massa) [kg]	60000			(Kolari, 2012) puhelu 4.12.2012			
Laskenta: Yhdistelmän massa tyhjänä (omamassa) [kg]	20000						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, täyskuormalla [MJdieselä / km]	18						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, tyhjänä [MJdieselä / km]	12						
Lähdetieto: Dieselin energiasisältö [MJ / kg]	43,1			(JEC, 2011d)			
Laskenta: Kuljetuksen energiasisältö [MJ]	1724000				73,3	0,0	0,0
							JEC, 2011d skaalattu: [g / MJ _{diesel}]

Laskenta: Siirron energiintensivisyys [MJdieselä / MJ km]		<u>1,74E-05</u>					
Bensiinin maantiekuljetuksen energiankäytön laskenta							
Lähdetieto: Yhdistelmän max.hyötyk (lähde) [kg]	40000		(Kolari, 2012) puhelu 4.12.2012				
Lähdetieto: Yhdistelmän massa täyskuormalla (kok.massa) [kg]	60000		(Kolari, 2012) puhelu 4.12.2012				
Laskenta: Yhdistelmän massa tyhjänä (omamassa) [kg]	20000						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, täyskuormalla [MJdieselä / km]	18						
Laskenta: Polttoaineen kulutus, tyhjänä [MJdieselä / km]	12						
Lähdetieto: Bensiinin energiasisältö [MJ / kg]	43,2		(JEC, 2011d)				
Laskenta: Kuljetuksen energiasisältö [MJ]	1728000						
Laskenta: Siirron energiintensivisyys [MJdieselä / MJ km]		<u>1,74E-05</u>		73,3	0,0	0,0	JEC, 2011d skaalattu: [g CO2-ekv/MJ _{diesel}]
Luonnonkaasun putkisiirron energiankäytön laskenta							
Lähdetieto: CNG:n putkisiirron syötösuhde (häviöistä johtuva, 4000 km siirto, [MJ _{cng,in} / MJ _{cng,out}])	1,0052		(JEC, 2011e)	51,9	1,0	0,2	(JEC, 2011d) skaalattu: [g CO2-ekv/MJhäviö]

Lähdetieto: CNG:n putkisiirron komprimoinnin tarve (4000 km siirto, [MJmekaanista / MJcng,out]	0,024		(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Kaasurubiinikompressorin energiankäyttö [MJcng / MJmekaanista]	3,6		(JEC, 2011e)				
Laskenta: Siirron energiaintensiivisyys [(MJCNG / MJ) ^ (1 / km)]		<u>1,000021</u> <u>9</u>					
Vedyn putkisiirron energiankäytön laskenta							
Oletus: Vedyn putkisiirron syöttösuhde (häviöistä johtuva osa mukana (= 0), 4000 km siirto, [MJH2,in / MJH2,out]	1						
Lähdetieto: CNG:n putkisiirron komprimoinnin tarve (4000 km siirto, [MJmekaanista / MJcng,out]	0,024		(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Metaanin tiheys (54 bar, 20 °C) [kg / m3]	39,266						
Lähdetieto: Kaasumaisen vedyn tiheys (54 bar, 20 °C) [kg / m3]	4,326						
Lähdetieto: Metaanin alempi lämpöarvo (54 bar) [MJ/kg]	50						
Lähdetieto: Vedyn alempi lämpöarvo [MJ/kg]	120,1						
Laskenta: Vedyn putkisiirron virtaus-työn skaalausluku vrt. CNG:n putkisiirron tapaukseen	5,94			0,0	0,0	0,2	Oletus, vuotohäviöitä ei tapahdu. Oletus: typpioksiduulipäästö sama kuin CNG:n putkisiirrossa [g CO2-ekv/ MJhäviö]

Lähtötieto: CNG:n putkisiirron komprimoinnin poltto kaasun käyttö (30 bar - > 54 bar) [MJpoltto kaasua / MJcng,out]	0,019						
Lähtötieto: Vedyn putkisiirron komprimoinnin poltto kaasun käyttö (30 bar - > 54 bar) [MJpoltto kaasua / MJcng,out]	0,021						
Laskenta: Siirron energiaintensiivisyys [(MJvetyä / MJ) ^ (1 / km)]		<u>1,000142</u> <u>74</u>					
Sähköverkon energiankäytön laskenta							
Lähdetieto: Siirtoyhteyden häviö 800 km (Yhteys: 400 kV AC, 2,5 GW)	9,40 %			(Siemens, 2012)			
Laskenta: Siirtoyhteyden syötön suhdeluku, 800 km (400kV, 2,5 GW) [MJin / MJout]	1,10						
Lähdetieto: Alue- ja jakeluverkkoihin syötetty energiamäärä (Suomessa 2011) [GWh]	81455,99 9			(EMV, 2011)			
Lähdetieto: Alue- ja jakeluverkoista luovutettu sähköenergia [GWh]	79386,73 5			(EMV, 2011)			
Laskenta: Alue- ja jakeluverkon keskimääräinen energiointensiteetti [MJel,in/ MJel,out]		<u>1,026</u>					
Laskenta: Siirron energiaintensiivisyys [(MJ / MJ) ^ (1 / km)]		<u>1,000123</u> <u>40</u>			0,0	0,0	0,0

Energiaintensiivisyyden likiarvo, mallinnuksessa käytetään tarkempaa arvoa

Litetaulukko 13 Energiasyötteiden siirron laskennassa käytetyt lähtöarvot ja modifikaatiot

	Modifioin- nin lähtö- arvot	Mallinnuk- sen lähtö- arvo	Lähde:	kgCO₂ CO ₂ -ekv. / yk- sikkö	kgCH₄ CO ₂ -ekv. / yk- sikkö	kgN₂O CO ₂ -ekv. / yk- sikkö	Lisähuomau- tus
Lähdetieto: Kaasumaisen vedyn nesteytys [MJel / MJve- tyä]		0,30	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Vedyn kom- rimointi (30 -> 200 bar) [MJsähköener- giaa / kg]	2,11238532		(GREE T, 2012)				Sheet: Comp- ression: Pipe- line compres- sor
Lähdetieto: Vedyn energia- sisältö [MJ / kg]	120,1		(JEC, 2011d)				
Laskenta: Ve- dyn kompri- mointi (30 -> 200 bar) [MJel / MJvetyä]		<u>0,018</u>		0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Vedyn kom- rimointi (30 -> 54 bar) [MJsähköener- giaa / kgH ₂]	1,044		(GREE T, 2012)				Sheet: Comp- ression: Pipe- line compres- sor
Laskenta: Ve- dyn kompri- mointi (30 -> 54 bar) [MJsähköener- giaa / MJ]		<u>0,009</u>		0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Biokaasun komprimointi (9 ... 54 bar) [MJsähköener- giaa / kg]	0,43760894		(GREE T, 2012)				Sheet: Comp- ression: Pipe- line compres- sor
Lähdetieto: Metaanin ener- giasisältö [MJ / kg]	50		(JEC, 2011d)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			

Laskenta: Bio- kaasun kom- rimoinnin ener- giankäyttö (9 ... 54 bar) [MJsähköener- giaa / MJ]		<u>0,009</u>			Tämä on liikiarvo, mal- linuksessa käytetään tarkempaa arvoa
---	--	--------------	--	--	---

Liitetaulukko 14 Energiasyötteiden valmistelu-moduulin laskennan lähtöarvot

	Modifi- oinnin lähtöarvot	Mallinnuk- sen lähtö- arvo	Läh- de:	kgCO₂ 2 CO ₂ - ekv. / yk- sikkö	kgCH₄ 4 CO ₂ - ekv. / yk- sikkö	kgN₂ O CO ₂ - ekv. / yk- sikkö	Lisähuomau- tus
Lähdetieto: Öljynja- lostamo (raakaöljy - > bensiini) [MJraa- kaöljyä / MJ]		1,080	(JEC, 2011e)	7,0	0,0	0,0	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ - ekv./MJout]
Lähdetieto: Öljynja- lostamo (raakaöljy - > Diesel) [MJraaka- öljyä / MJ]		1,100	(JEC, 2011e)	8,6	0,0	0,0	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ - ekv./MJout]
Lähdetieto: GTL diesel-laitos [MJcng / MJdiesel]		1,538	(JEC, 2011e)	13,8	0,0	0,0	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ - ekv./MJout]
Lähdetieto: GTL- laitos + CCS [MJCNG / MJ]		1,667	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Konv. hiililauhdevoimalai- tos [MJhiiltä / MJ]		2,299	(JEC, 2011e)	221,5	0,0	0,0	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ - ekv./MJout]
Lähdetieto: IGCC (hiili) + CCS [MJhiiltä / MJ]		2,439	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Ydin- voimala (Ydinpolto- aine) [MJydin- poltoaine / MJ]		3,030	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Ydin- voimalan dieselin käyttö [MJdieselä / MJ]		0,003	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Kon- ventionaalinen puu- biomassavoimalai- tos (11,5 MWe) [MJpuuhake / MJ]		2,075	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Raaka- puun haketus [MJpuubiomassa / MJ]		1,025	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Raaka- puun haketus [MJdieselä / MJ]		0,004	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: GTCC- voimalaitos (CNG) [MJcng / MJel]		1,818	(JEC, 2011e)	100,1	0,2	1,4	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ -

							ekv./MJout]
Oletus: GTCC-voimalaitos (vety) [MJ _{H2} / MJel]		1,818	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	1,4	
Lähdetieto: GTCC-voimalaitos + CCS (CNG) [MJcng / MJ]		2,123	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Haketus + Puubiomassan kaasutus + WGS + PSA (200 MWth input) [[MJpuuhaketta / MJ]		1,499	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Haketus + Puubiomassan kaasutus + WGS + PSA (200 MWth input) [MJdieseliä / MJ]		0,040	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Haketus + Puubiomassan kaasutus + WGS + PSA (200 MWth input) [MJsähkö / MJ]		0,082	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Hiilen kaasutus -> vety (200 MW) [MJhiiltä / MJ]		1,967	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: CNG -> SMR kesk. -> vety (30 bar)		1,315	(JEC, 2011e)	72,4	0,4	0,0	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ -ekv./MJout]
Lähdetieto: Mädätys + upgreidaus [MJbiojätettä / MJ]		1,443	(JEC, 2011e)	Ei mukana diplomityön tarkasteluissa.			
Lähdetieto: Mädätys + Upgreidaus [MJsähköenergiaa / MJ]		0,087	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Yhdyskuntajäte (biojäte) -> biokaasu -> vesipesu -> Biokaasu [MJlämpöenergiaa / MJ]		0,062	(JEC, 2011e)				

Lähdetieto: Biokaasukäyttöinen kondenssikattila [MJbiokaasua / MJ]		1,000	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Biokaasukäyttöinen kondenssikattila MJsähköenergiaa / MJ]		0,016	(JEC, 2011e)				
Lähdetieto: Keskitetty elektrolyysi (vety -> 30 bar) [MJsähköenergiaa / MJ]		1,538	(JEC, 2011e)	0,0	0,0	0,0	
Lähdetieto: Raskaan polttoöljyn tuotanto (käytetään dieselin tuotannon arvoa) [MJraakaöljyä / MJ]		1,100	(JEC, 2011e)	7,0	0,0	0,0	Dieselin jalostuksen raakaöljyn syötösuhde 1,1 ja HFO:n 1.088 (JEC, 2011d), käytetään dieselinjalostuksen arvoa yksinkertaisuuden vuoksi, koska volyymit ovat mallissa pieniä.

Litetaulukko 15 Keskitetyn tuotannon prosessien laskennan lähtöarvot

	<i>Modifi- oinnin lähtöar- vot</i>	<i>Mallin- nuksen lähtöarvo</i>	<i>Lähde:</i>	<i>kgC O₂ CO₂- ekv. / yk- sikkö</i>	<i>kgC H₄ CO₂- ekv. / yk- sikkö</i>	<i>kgN₂ O CO₂- ekv. / yk- sikkö</i>	<i>Lisähuomautus</i>
<i>Raakaöljyn han- kinnan energian- käyttö</i>							
<i>Lähdetieto: Raa- kaöljyn tuotanto [MJraakaöljyä / MJ]</i>	1,058	1,058	(JEC, 2011e)	4,4	0,0	0,0	
<i>Lähdetieto: Raa- kaöljyn merikulje- tuksen energiain- tensiteetti [MJraskasta polt- toöljyä / MJtn km]</i>		0,010	(JEC, 2011a, s. 24)	0,8	0,0	0,0	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ - ekv./MJout]
<i>Maakaasun han- kinnan energian- käyttö</i>							
<i>Lähdetie- to:Maakaasun tuotanto [MJcng / MJcng]</i>		1,002	(Ruona- koski, 2011)	1,7	0,1	0,0	
<i>Laskenta: Venä- jänpuoleisen maa- kaasun putkisiir- ron keskim. ener- giaintensiteetti [MJcng,in / MJcng,out]</i>		<u>1,107</u>	(pohjau- tuen Ruona- koski, 2011)	51,9	1,0	0,2	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ - ekv./MJout]
<i>Puubiomassan hankinta</i>							
<i>Lähdetieto: Maan- tiekuljetusyksikön massa tyhjänä (omamassa, vars. pv-yhdistelmä) [kg]</i>	20000		(LIPAS- TO, 2012)				
<i>Lähdetieto: Maan- tiekuljetusyksikön massa täyskuor- malla (kok. massa, vars. pv- yhdistelmä) [kg]</i>	60000		(LIPAS- TO, 2012)				
<i>Laskenta: Yhdis- telmän max.hyötyk</i>	40000			<i>Ei mukana diplomi- työn tarkasteluissa.</i>			<i>täysperävaunuyh- distelmä, EURO 5- päästöluokka, maantieajo</i>

<i>Laskenta: Yhdistelmän massa tyhjänä (omamassassa)</i>	20000						
<i>Laskenta: Polttoaineen kulutus, täyskuormalla [MJdieselä / km]</i>	18						
<i>Laskenta: Polttoaineen kulutus, tyhjänä [MJ / km]</i>	12						
<i>Lähdetieto: Puubiomassan energiasältö (kuiva) [MJ / kg]</i>	18,5						(JEC, 2011e)
<i>Laskenta: Puubiomassan energiasältö (abs. kost. 30%) [MJ / kg]</i>	12,95						
<i>Laskenta: Kuljetuksen energiasältö [MJ]</i>	518000						
<i>Laskenta: Energiaintensiivisyys [MJdieselä / MJ km]</i>							$\frac{0,000057}{92}$
<i>Lähdetieto: Puubiomassan korjuu [MJdieselä / MJ]</i>							0,01
<i>Kivihiihlen hankinta</i>							
<i>Lähdetieto: Kivihiihiltä [MJkivihiihiltä / MJ]</i>							1,025 (JEC, 2011e)
<i>Lähdetieto: Vesivoimaa [MJvesivoimaa / MJ]</i>							0,003 (JEC, 2011e)
<i>Lähdetieto: Ruskohiiltä [MJruskohiiltä / MJ]</i>							0,002 (JEC, 2011e)
<i>Lähdetieto: Raakaöljyä [MJraakaöljyä / MJ]</i>							0,041 (JEC, 2011e)
<i>Lähdetieto: Maa-kaasua [MJmaa-</i>							0,010 (JEC, 2011e)
				6,5	8,8	0,1	(JEC, 2011d) skaalattu: [gCO ₂ -ekv./MJout]

<i>kaasua / MJ</i>							
<i>Lähdetieto: Luonnonuraania [MJluonnonuraania / MJ]</i>		0,011	(JEC, 2011e)				
<i>Lähdetieto: Kierätyspolttoainetta [MJjättepolttoainetta / MJ]</i>		0,002	(JEC, 2011e)				
<i>Uusiutuvan sähköenergian hankinta</i>							
<i>Lähdetieto:HVDC siirtohäviö (800 kV, 2,5 GW) häviöt/ 800 km</i>	2,60 %		(Siemens, 2012)				<i>Huom, kertahäviöt jätetty pois. Energiaintensiivisyyden arvon on likiarvo, laskennassa käytetään tarkempaa arvoa</i>
<i>Laskenta: Siirron energiaintensiteetti [(MJ / MJ)^(1/km)]</i>		$\frac{1,000032}{2}$		0,0	0,0	0,0	
<i>Ydinpolttoaineen hankinta</i>							
<i>Lähdetieto: Uraanimin louhinta (pinta-kaivostoiminta Afrikassa) [MJprimääriuraania / MJ]</i>		1,000	(JEC, 2011e)				
<i>Lähdetieto: Uraanimin louhinta (pinta-kaivostoiminta Afrikassa) [MJdietseliä / MJ]</i>		0,000	(JEC, 2011e)				
<i>Lähdetieto: Uraanimin laivaus Afrikasta rikastukseen 6000 km, kantavuus 79 000 tonnia (tn km / MJ)</i>	0,003617 1		(JEC, 2011e)				
<i>Lähdetieto: Laivauksen energiankäyttö [MJrask.pö / tn km]</i>	0,081		(JEC, 2011e)				<i>Energiaintensiivisyyden arvon on likiarvo, laskennassa käytetään tarkempaa arvoa</i>
<i>Laskenta: Laivauksen energiaintensiivisyys (6000</i>		$\frac{0,000293}{2}$		<i>Ei mukana diplomi-työn tarkasteluissa.</i>			

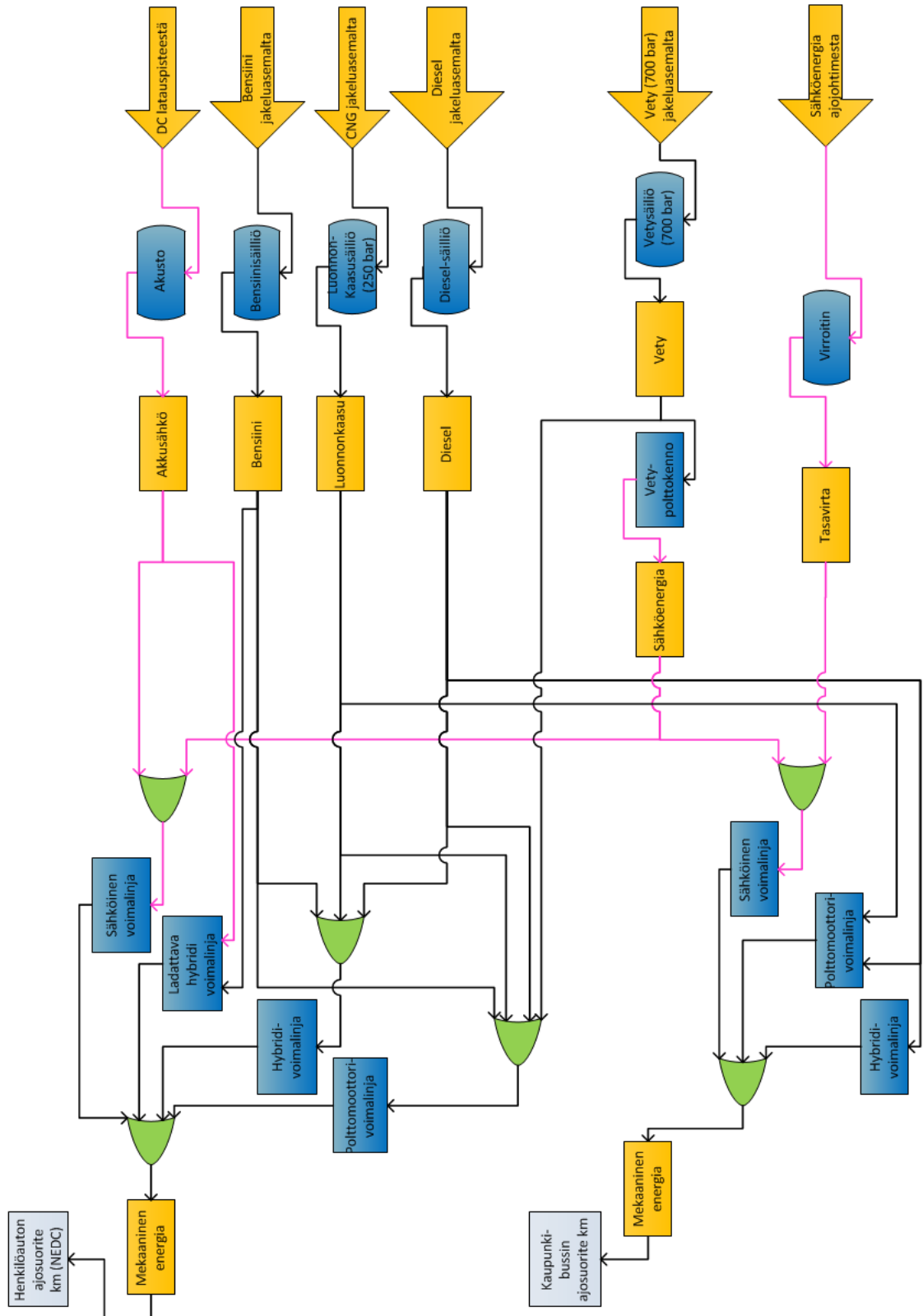
<i>km, kantavuus 79 000 tn, sis. paluu- matkan tyhjänä) [MJrask.pö / MJ]</i>					
<i>Lähdetieto: UF6:n tuotanto (uraanimalmi -> UF6) [MJu- raanimalmia / MJ]</i>		<i>1,111</i>	<i>(JEC, 2011e)</i>		
<i>Lähdetieto: UF6:n tuotanto (uraanimalmi -> UF6) [MJsähkö- energiaa / MJ]</i>		<i>0,000</i>	<i>(JEC, 2011e)</i>		
<i>Lähdetieto: Uraa- nin rikastus (UF6i -> uraanirikaste) [[MJUF6 / MJ]</i>		<i>1,000</i>	<i>(JEC, 2011e)</i>		
<i>Lähdetieto: Uraa- nin rikastus (UF6i -> uraanirikaste) [[MJsähköä) / MJ]</i>		<i>0,008</i>	<i>(JEC, 2011e)</i>		
<i>Lähdetieto: Ydin- polttoainesauvojen valmistus [MJUF6 / MJ]</i>		<i>1,053</i>	<i>(JEC, 2011e)</i>		
<i>Lähdetieto: Ydin- polttoainesauvojen valmistus [MJsäh- köenergiaa / MJ]</i>		<i>0,002</i>	<i>(JEC, 2011e)</i>		

Liitetaulukko 16 Primäärienergian hankinnan laskennassa käytetyt lähtöarvot

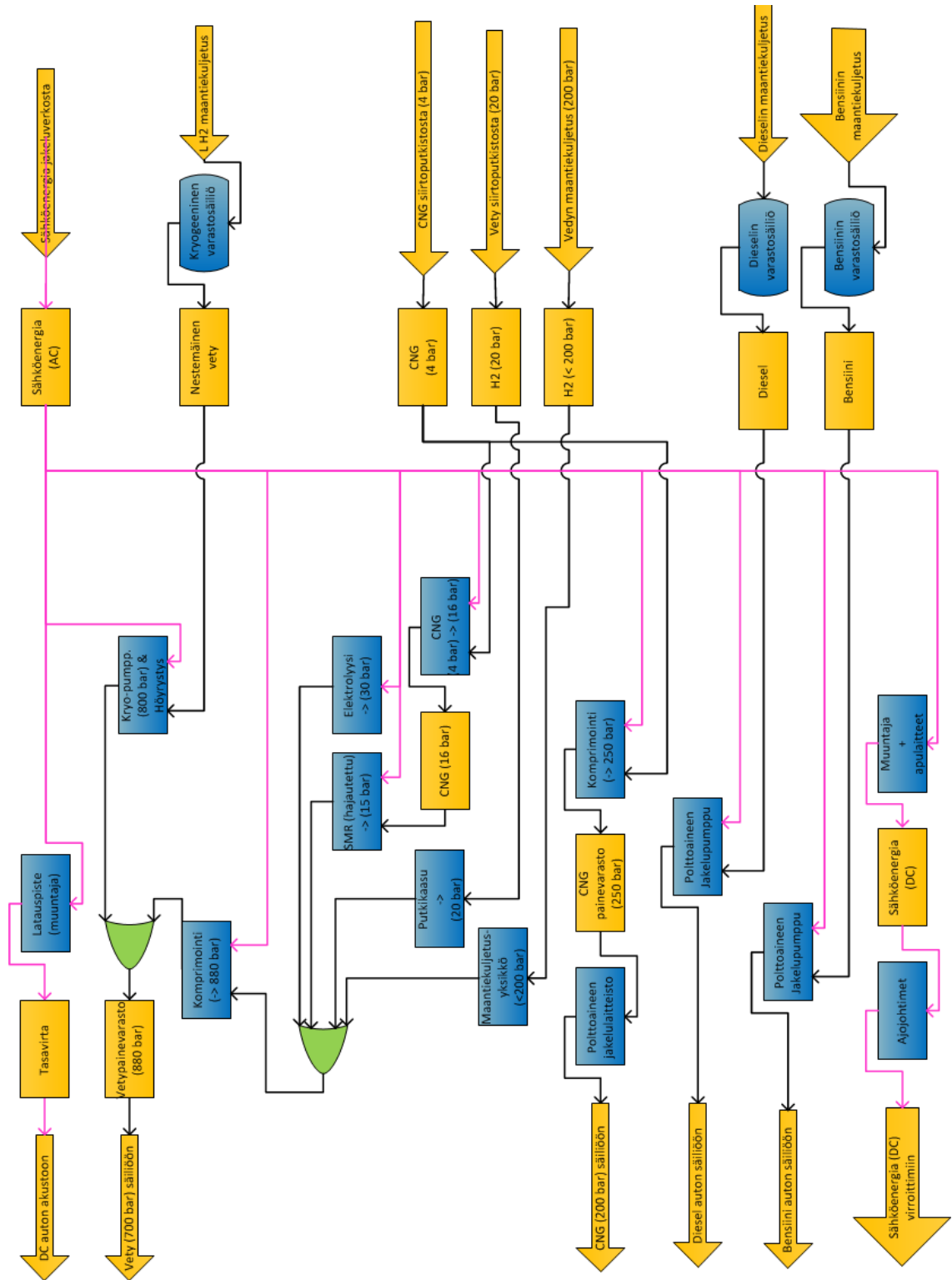
LIITE 3: MALLINNUKSEN VUOKAAVIOT

Liitekuvaluettelo

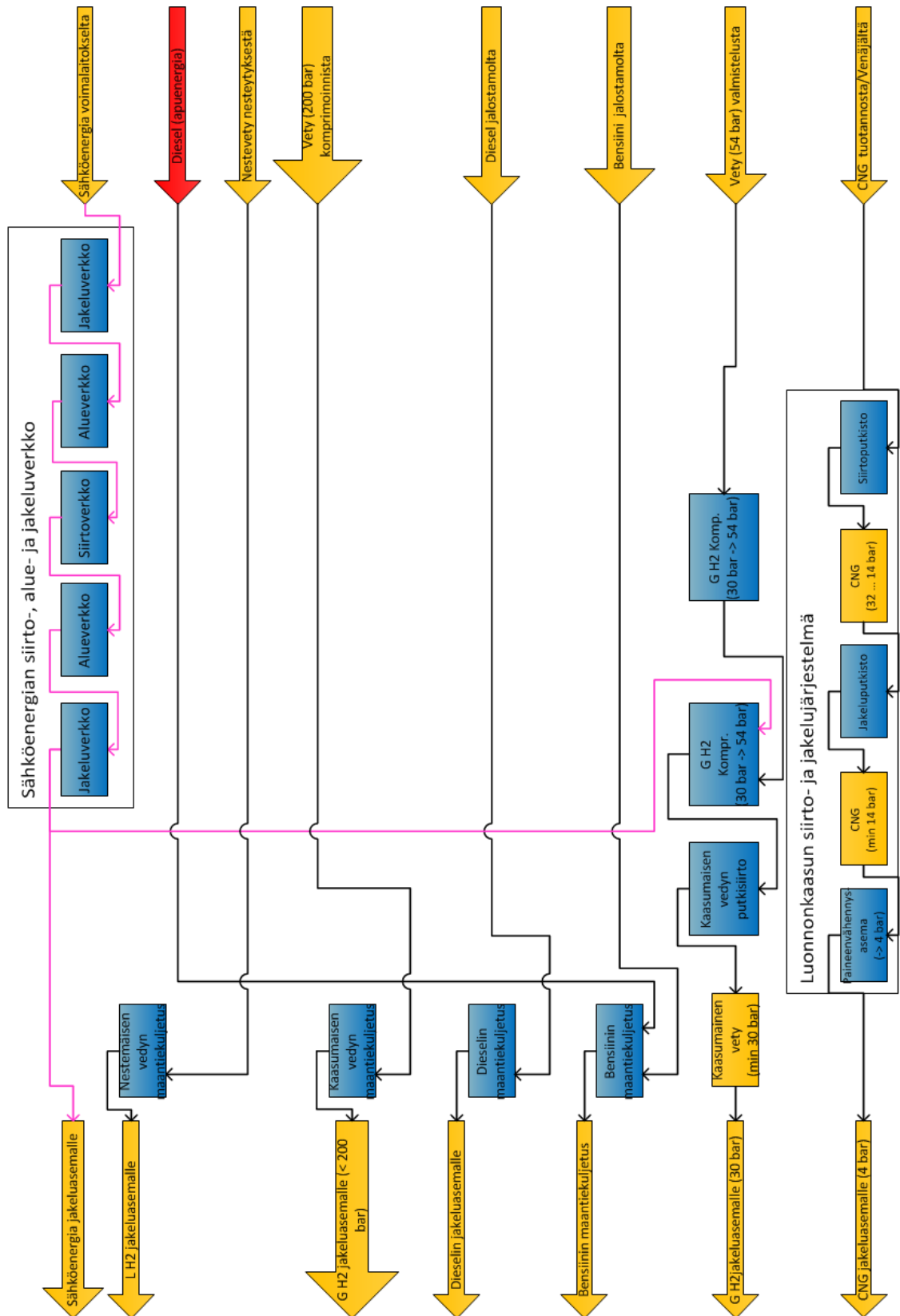
- Liitekuva 1: *Mallinnuksen "Ajoneuvo"-laskentamoduulin vuokaavio*
- Liitekuva 2: *Mallinnuksen "Jakeluasema"-moduulin vuokaavio*
- Liitekuva 3: *Mallinnuksen "Syötteiden siirto" moduulin vuokaavio*
- Liitekuva 4: *Mallinnuksen "Syötteiden valmistelu"-moduulin vuokaavio*
- Liitekuva 5: *Mallinnuksen "Syötteiden valmistus"-moduulin vuokaavio*
- Liitekuva 6: *Mallinnuksen "Primäärienergian hankinta"-moduulin vuokaavio*



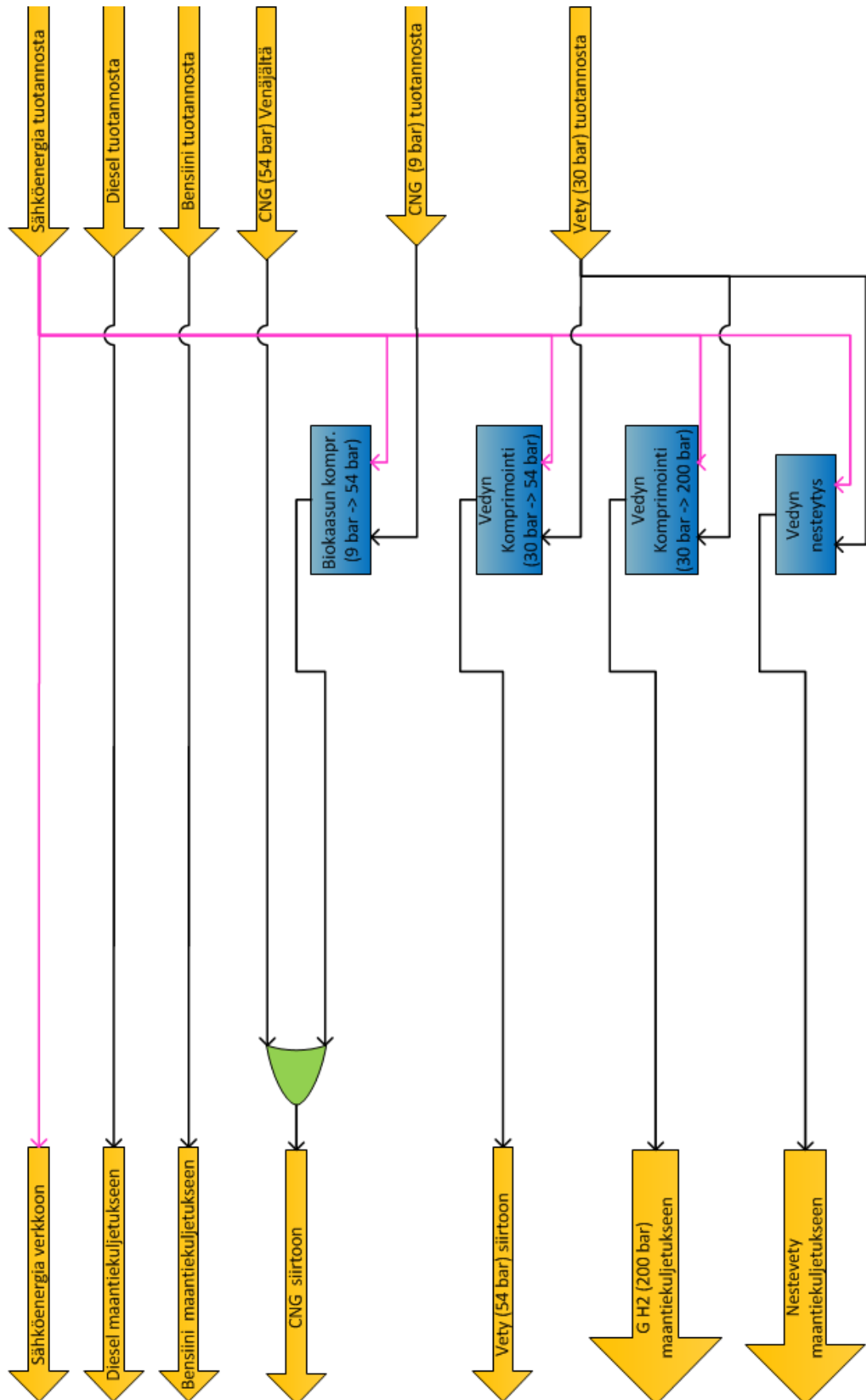
Liitekuva 1 Mallinnuksen "Ajoneuvo"-laskentamoduulin vuokaavio



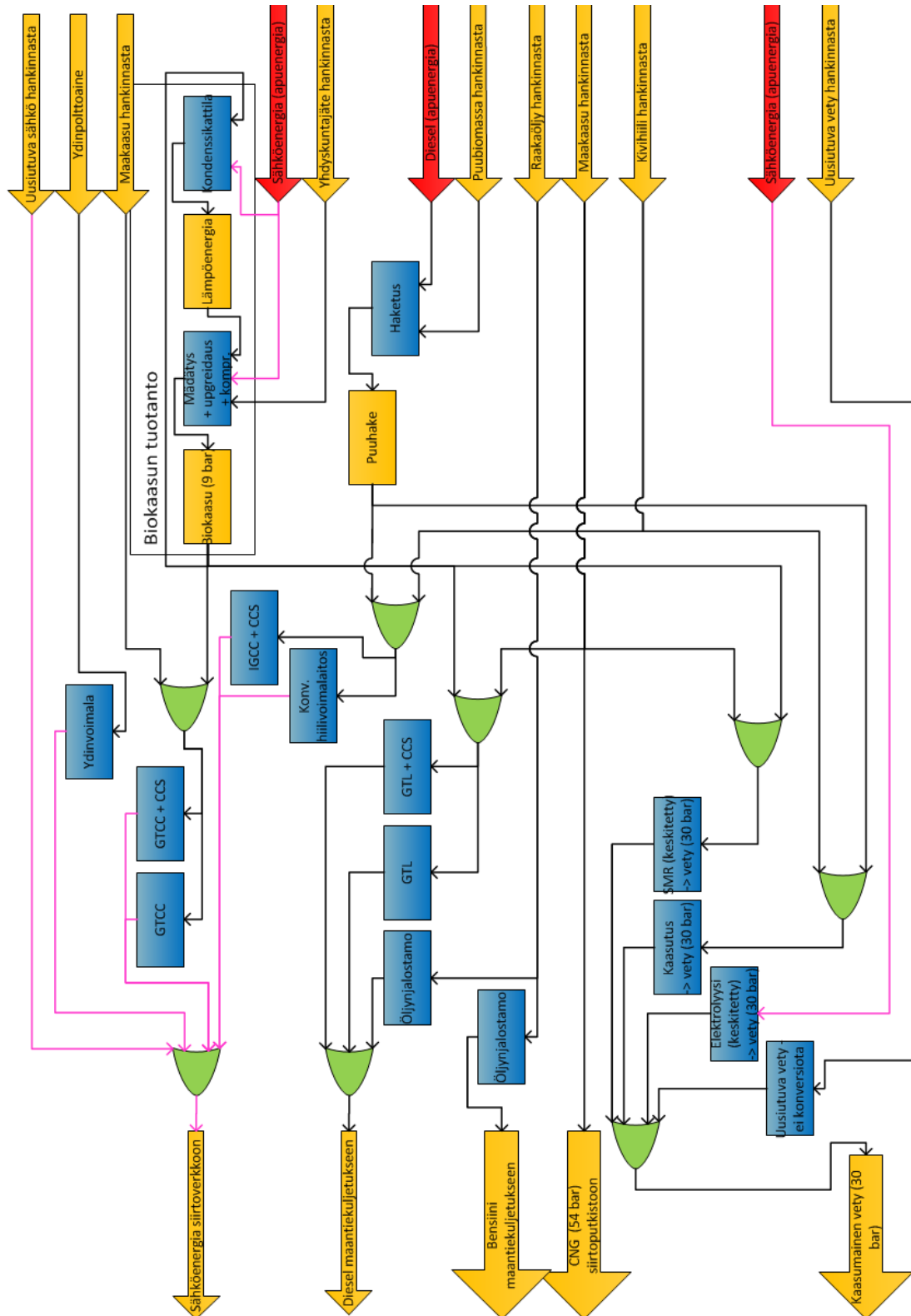
Liitekuva 2 Mallinnuksen "Jakeluasema"-moduulin vuokaavio



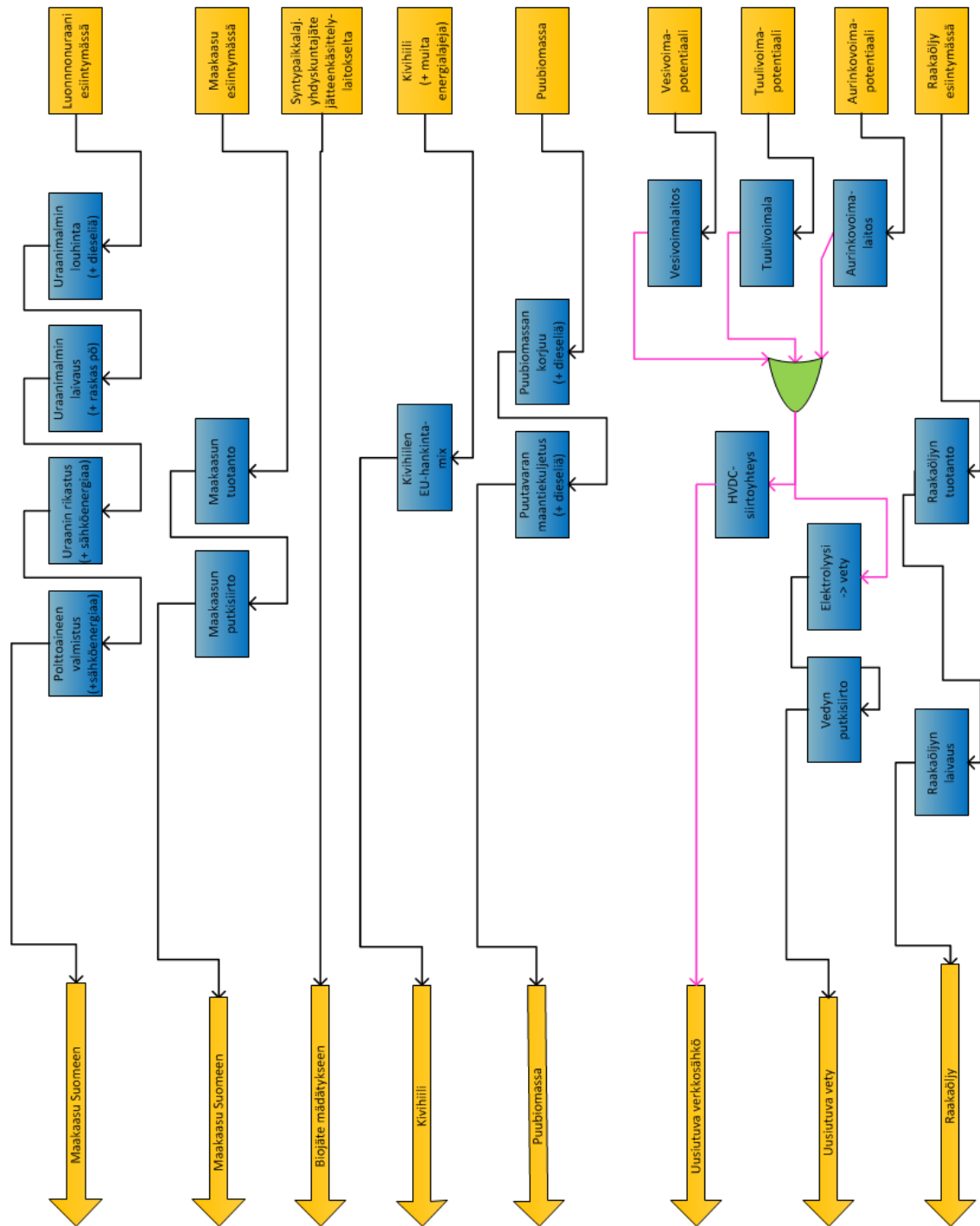
Liitekuva 3 Mallinnuksen "Syötteen siirto" moduulin vuokaavio



Liitekuva 4 Mallinnuksen "Syötteiden valmistelu"-moduulin vuokaavio.



Liitekuva 5 Mallinnuksen "Syötteiden valmistus"-moduulin vuokaavio



Liitekuva 6 Mallinnuksen "Primäärienergian hankinta"-moduulin vuokaavio