
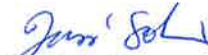





## Vetytiekartta – Vetyenergian mahdollisuudet Suomelle

Kirjoittajat: Pertti Kauranen, Jussi Solin, Kari Törrönen, Jouko Koivula, Juhani Laurikko

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi <b>Vetytiekartta – vetyenergian mahdollisuudet Suomessa</b>	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Tekes Heikki Kotila/Hannu Juuso	Asiakkaan viite Diario 248/31/2012 Päätös 40064/12
Projektin nimi Vetytiekartta	Projektin numero/lyhytnimi 78894 VTTK
Raportin laatija(t) Pertti Kauranen, Jussi Solin, Juhani Laurikko, Kari Törrönen, Jouko Koivula	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 88 s.
Avainsanat Vety, energia, polttoaine, energian kantaja, polttokenno, energia- ja ilmastopolitiikka, teknologiavienti	Raportin numero VTT-R-02257-13
<b>Tiivistelmä</b> <p>Vety on moneen sopiva energian kantaja, jonka avulla voidaan parantaa sähköä ja kemiallista energiaa hyödyntävien konversioketjujen hyötysuhdetta, varastoida energiaa ja pienentää päästöjä sekä paikallisesti energian käyttökohteessa että globaalisti. Vetyteknologian tutkimus ja demonstraatiot ovat maailmalla juuri nyt kiihkeässä vaiheessa. Liikennesovellukset ovat kaupallistumisen kynnyksellä. Vedyn keskeiset energiatekniset sovellukset ovat: liikennepolttoaine, uusiutuvan energian (aurinko, tuuli) varastointi ja siirto, hajautettu sähkön- ja lämmön tuotanto, älykkäät energiaverkot, varavoima sekä synteettisten (bio)polttoaineiden jalostus.</p> <p>Kansainvälinen autoteollisuus, joka on ilmoittanut tuovansa polttokennoautoja kuluttajamarkkinoille vuodesta 2015 lähtien, toimii kehityksen moottorina. Vedyn jakelu- ja varastointi-infrastruktuurin puute ja rakentamisen kalleus on merkittävin vetyteknologian käyttöönottoa hidastava tekijä, mutta useissa maissa on laadittu teollisia sopimuksia ja kansallisia strategioita jakeluinfrastruktuurin rakentamiseksi. On arvioitu, että Euroopan laajuisen infrastruktuurin rakentaminen tarjoaisi 100 Mrd€:n teknologiamarkkinat vuoteen 2050 mennessä.</p> <p>Suomessa on pitkäaikaista kokemusta vedyn käsittelystä öljynjalostuksessa ja muussa kemian teollisuudessa. Kemianteollisuuden sivutuotteena syntyy myös merkittäviä määriä vetyä, mikä tarjoaisi edullisen mahdollisuuden käynnistää vedyn energiakäyttöön liittyviä koe- ja demonstraatiohankkeita tavoitteena uusien teknologioiden kehittäminen vientimarkkinoille.</p> <p>Vetypolttokennoautot toimivat jopa 1.8 kertaa niin tehokkaasti kuin nestemäistä polttoainetta käyttävät autot ja niiden toimintasäde on yli kaksinkertainen sähköautoihin verrattuna. Jos merkittävä osa henkilöautoista siirtyisi polttokennokäyttöön ja polttoaine tuotettaisiin maakaasusta reformoimalla, tarjoaisi tämä miljardiluokan säästöpotentiaalin Suomen kauppataseeseen. Jos vety vielä tuotettaisiin hiilineutraalisti biomassaa kaasuttamalla, voitaisiin liikennepolttoaineissa päästä pitkällä aikavälillä lähes täydelliseen omavaraisuuteen.</p> <p>Raportissa esitetään katsaus vetyteknologioiden nykytilaan ja esitetään toimenpide-ehdotus kansalliseksi vetytiekartaksi.</p>	
Luottamuksellisuus	julkinen
Tampere/Espoo 3.4.2013 Laatija  Pertti Kauranen Johtava tutkija	Tarkastaja  Jussi Solin Johtava tutkija
	Hyväksyjä  Eila Lehmus Teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) Tilaaja VTT/Kirjaamo	
	1 alkuperäinen 1 alkuperäinen
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>	



## Alkusanat

Vety on moneen sopiva energian kantaja, jonka avulla voidaan parantaa energiakonversioketjujen hyötysuhdetta, varastoida energiaa ja pienentää päästöjä sekä paikallisesti että globaalisti. Vetyenergiatekniikan kehityksen moottorina toimii kansainvälinen autoteollisuus, joka on ilmoittanut tuovansa vetypolttonoautoja kuluttajamarkkinoille vuodesta 2015 lähtien. Vetypolttoaineinfrastruktuuria on alettu rakentaa maissa, joissa autoteollisuus on merkittävässä asemassa.

Tämän Vetytiekartta-hankkeen tarkoituksena on ollut arvioida, mitä kansainvälinen kehitys voisi tarkoittaa suomalaisten yritysten kannalta. Pyrimme myös visioimaan, millaisia energia-, ilmasto- ja teollisuuspoliittisia mahdollisuuksia vetyteknologian laajamittainen käyttöönotto voisi Suomelle tarjota. Tavoitteena oli realistisia mahdollisuuksia luotaava vetyenergiaan keskittyvä raportti. VTT:ssä on laadittu samaan aikaan energia- ja ilmastopolitiikan pohjaksi tarkoitettuja taustaselvityksiä, joissa tarkastellaan muitakin hiilivapaita energiatekniikoita.

Työ on tehty pääasiassa 1.6.–31.12.2012 välisenä aikana ja raporttiluonnosta on täydennetty asiantuntijapalautteen mukaan alkuvuodesta 2013. Vetytiekartta-työryhmään kuuluivat:

Jussi Solin, VTT  
Pertti Kauranen, VTT  
Juhani Laurikko, VTT  
Kari Törrönen, EnergyWave Oy  
Jouko Koivula, Belafennica Oy

Hankkeen ohjausryhmään osallistuivat:

Jermu Pulli, Cargotec Finland Oy, puheenjohtaja  
Kalevi Korjala, Oy Woikoski Ab  
Sari Siitonen, Gasum Oyj  
Osmo Kuusinen, Kemira Oyj  
Satu Jyrkönen, Outotec (Finland) Oy  
Erkko Fontell, Wärtsilä Oyj  
Jukka Kömi, Rautaruukki Oyj  
Juho Talonen, Outokumpu Oyj  
Matti Leivo, Teknologiateollisuus, polttokennotoimiala  
Hannu Hänninen, Aalto yliopisto  
Heikki Kotila & Hannu Juuso, Tekes  
Anneli Ojapalo, Spinverse Oy  
Eila Lehmus (vast. joht.) & Jari Ihonen, VTT

Raportin aineiston kokoamiseen ovat vaikuttaneet monet eri alojen asiantuntijat VTT:ssä. Kiitämme lämpimästi kaikkia työhön osallistuneita.

Tampere/Espoo 3.4.2013

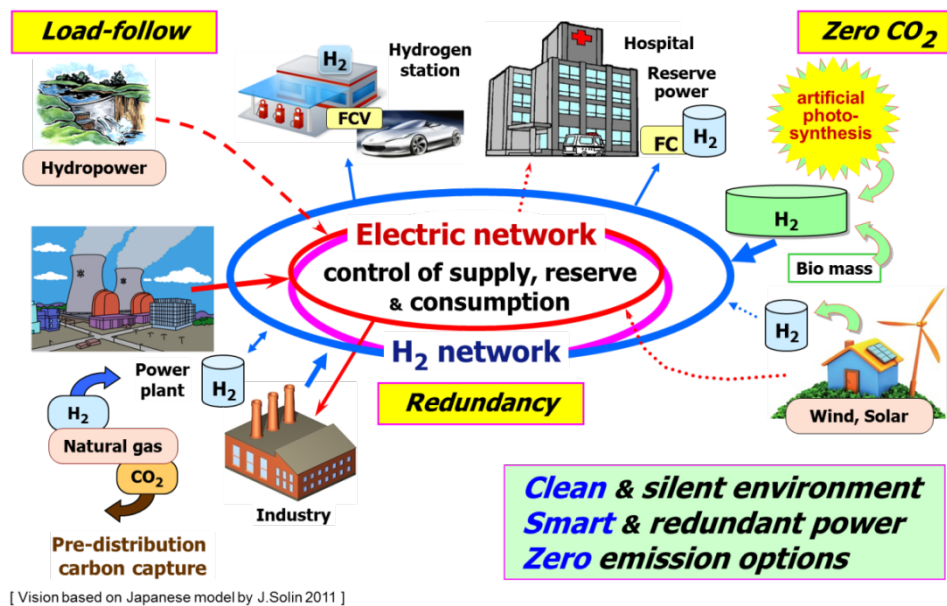
Tekijät

## Sisällysluettelo

Motto .....	2
Alkusanat.....	3
1 YHTEENVETO .....	6
2 JOHDANTO.....	11
2.1 Vety energian kantajana .....	11
2.1.1 Vety energian varastojana.....	11
2.2 Vetytalous ja vety-yhteiskunta.....	12
2.2.1 Vetytalous .....	12
2.2.2 Vety-yhteiskunta – Japanin malli.....	13
2.2.3 Hiilineutraali vety-yhteiskunta – hiilen talteenotto.....	14
3 KANSAINVÄLINEN KEHITYS JA KANSALLISET STRATEGIAT .....	14
3.1 Vedyn teollisuuskäyttö .....	14
3.1.1 Vedyn tuotanto.....	14
3.1.2 Vedyn jakelu .....	16
3.1.3 Vedyn varastointi .....	18
3.1.4 Vedyn käyttö teollisuudessa.....	20
3.1.5 Vety teollisuuden sivutuotteena .....	22
3.2 Vety liikennepolttoaineena .....	23
3.2.1 Polttokenno(henkilö)autojen kehitystilanne .....	23
3.2.2 Polttokennobussit.....	27
3.2.3 Vetytankkausasemien kehitystilanne .....	30
3.2.4 Liikennekäyttöön liittyviä käytännön kysymyksiä.....	33
3.3 Vedyn käyttö uusiutuvien energioiden varastona.....	36
3.3.1 Energiavarastojen tarve .....	36
3.3.2 Autonomiset järjestelmät.....	37
3.3.3 Älykkäät energiaverkot ja hybridivoimalaitokset.....	38
3.4 Vety synteettisten polttoaineiden tuotannossa .....	39
3.5 Polttokennot sähkön ja lämmön tuottajana, mikro-CHP .....	41
3.6 Vety varavoimana .....	43
3.7 Vety-yhteiskunnan rakentamiseen tarvittavat materiaalit .....	43
3.8 Kansallisia ja alueellisia strategioita.....	44
3.8.1 Saksa.....	46
3.8.2 Tanska .....	47
3.8.3 Norja .....	47
3.8.4 Korea .....	47
3.8.5 Japani .....	47
3.8.6 USA .....	47
3.9 Lainsäädäntö ja standardointi .....	48
4 Vety Suomessa 2012 .....	49
4.1 Vedyn tuotanto, jakelu ja sivutuotevety.....	49
4.2 Vetyteknologiaan liittyvä tutkimustoiminta.....	50
5 SKENAARIOITA VEDYN KÄYTÖSTÄ SUOMESSA .....	51
5.1 Tuulienergiaan perustuva vedyn tuotanto .....	51
5.2 Vedyn käyttöönotto liikennepolttoaineena.....	52
5.2.1 Potentiaali uusille polttoaineille julkisessa liikenteessä ja jakelussa ..	52

5.2.2	Asemien sijoittelu – esimerkkinä maakaasu.....	54
5.2.3	Laajentuminen ja ”runkoverkko” .....	54
5.2.4	Vedyn tarve 2020 ja 2050 .....	56
5.2.5	Ilmastovaikutukset .....	57
5.3	Biovetty ja vedyn käyttö synteettisten polttoaineiden tuotannossa.....	57
5.4	Vedyn käyttö kiinteistöissä ja teollisuudessa .....	59
5.5	Alueellinen vedyn tuotanto (HyWays) .....	60
6	VETYENERGIASTRATEGIA.....	61
6.1	Energia- ja ilmastopolitiikka .....	61
6.2	Liikenne .....	63
6.3	Teollisuuspolitiikka .....	63
6.4	Vaihtotase .....	64
6.5	Infrastruktuurivaihtoehdot .....	66
6.6	Varautuminen.....	68
6.6.1	Sosiaalinen hyväksyttävyys .....	68
6.6.2	Turvallisuuden varmistaminen .....	68
6.6.3	Koulutus- ja tutkimustarve.....	69
6.6.4	Demonstraatiot.....	70
6.6.5	Valtion ja kuntien rooli.....	70
6.7	Keskeisiä yhteistyöverkostoja .....	71
6.7.1	Suomessa ja EU:ssa.....	71
6.7.2	Kansainväliset toimijat .....	74
7	NÄKÖKULMIA.....	74
7.1	Haastattelujen toteutus .....	74
7.2	Yritysten näkemyksiä .....	74
7.3	Ministeriöiden näkemyksiä .....	75
7.4	Koulutus-, tutkimus- ja kehitysorganisaatioiden näkemyksiä .....	75
7.5	Muita keskeisiä toimijoita (Cleen Oy) .....	76
8	SUOSITUKSET/TOIMENPIDE-EHDOTUKSET .....	77
9	VIITTEET.....	81

# 1 YHTEENVETO



Kuva 1.1. Vety-yhteiskunta.

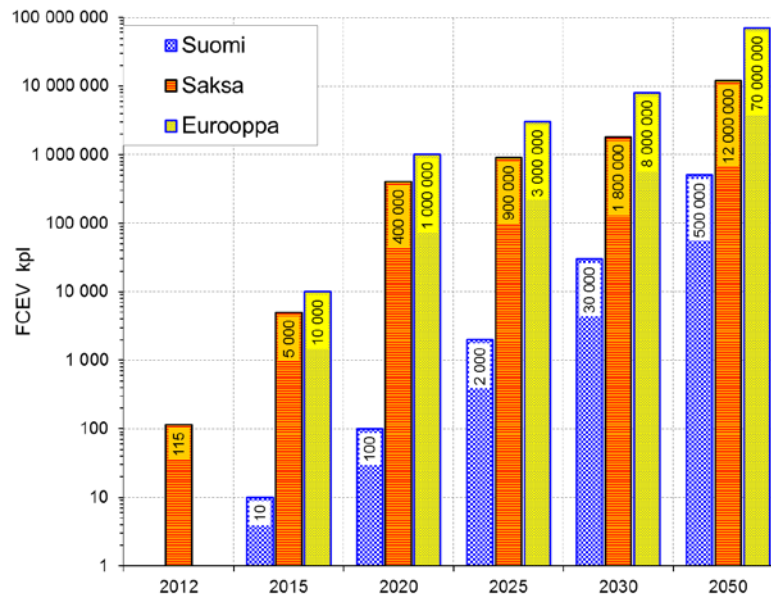
Vety on moneen sopiva energian kantaja, jonka avulla voidaan parantaa sähköä ja kemiallista energiaa hyödyntävien konversioketjujen hyötysuhdetta, varastoida energiaa ja pienentää päästöjä sekä paikallisesti energian käyttökohteessa että globaalisti, kuva 1.1. Vedyn keskeiset energiatekniset sovellukset ovat:

- liikennepolttoaine [Saksa, Englanti, Pohjoismaat, ... 2015; Suomessa ≈2020]
- öljynjalostus ja synteettisten biopolttoaineiden jalostus [Suomessa 2012]
- aurinko- ja tuulienergian edistäminen [S:ssa tuulivoiman varastointikokeilut 2015 lähtien]
- älykkäät energiaverkot ja varavoima eri mittakaavoissa [S:ssa pienjärjestelmiä 2012]
- hajautettu sähkön- ja lämmön tuotanto [S:ssa maatilat, liikekiinteistöt ja omakotitalot 2020]

Jakeluinfrastruktuurin rakentaminen, vetyteknologian tutkimus ja demonstraatiot ovat maailmalla juuri nyt kiihkeässä vaiheessa. Kehityksen moottorina toimii kansainvälisen autoteollisuuden vakaa aikomus tuoda vetypolttokennoautot (FCEV) kauppoihin keskeisillä kuluttajamarkkina-alueilla vuodesta 2015 lähtien. Niiden ja muidenkin vetyenergian sovellutusten yleistymistä hidastavat eniten vedyn jakelu- ja varastointi-infrastruktuurin puute. Jakeluverkostoon tehtävien ensimmäisten investointien lyhyen tähtäimen tuotto-odotukset ovat huonot ennen käyttöasteiden kasvua. Ensimmäisten FCEV valmistuslinjojen rakentaminen on kuitenkin aloitettu ja autonvalmistajat lähestyvät ”point of no return” tilannetta. Useissa maissa on laadittu teollisia sopimuksia ja kansallisia strategioita vetypolttoaineen jakeluverkoston rakentamiseksi. Euroopan komission direktiiviehdotus laajentaisi velvoitteet EU jäsenvaltioihin. Jo nykyiset demonstraatiohankkeet ja etenkin vetypolttoaineen jakeluinfrastruktuurin rakentaminen tarjoavat merkittävän vientimarkkinan ja potentiaalın uusille teknologisille ratkaisuille. McKinsey arvioi *markkinoiden arvoksi Euroopassa vuoteen 2050 mennessä 100 miljardia euroa*.

Polttokennoautoissa (FCEV) on sähköinen voimansiirto. Siksi sähkö- ja hybridi-autojen kehitys ja testaus tukee myös vetyautojen tuotekehitystä. Kuvassa 1.2 on

arvioitu Suomen autokannan uusiutumisenopeutta suhteutettuna kansainvälisten markkinakatsauksien nopeiden ja hitaiden skenaarioiden välimaastoon.



Kuva 1.2. Nopeiden ja hitaiden skenaarioiden välistä otettuja arvioita polttokennoautojen yleistymisestä Euroopassa.

Vety on herkästi syttyvä kaasu, joka avoimessa tilassa haihtuu kuitenkin nopeasti taivaalle. Vedyn turvallinen käsittely teollisuudessa on tunnettua, mutta nyt käytössä olevat ratkaisut ovat kalliita hinnaltaan kriittisiin energiasovelluksiin. Suomessa on käytettävissä merkittäviä määriä kemian teollisuuden sivutuotteena syntyvää vetyä, jonka hyötykäyttöä on selvitetty ja kokeiltu. **Sivutuotetvety tarjoaa edullisen mahdollisuuden käynnistää vetyteknologiaan liittyviä demonstraatiohankkeita.**

Suomessa on kansainvälisestäkin merkittävää biopolttoaineiden jalostukseen liittyvää osaamista ja alalla toimiva teollisuuskluusteri. **Metsäbiomassasta voitaisiin tuottaa vetyä hyvällä hyötysuhteella** leijupeti-kaasutukseen ja reformointiin perustuvilla prosesseilla. Vaikka näin tuotettu biovety olisi vielä arviolta kaksi kertaa kalliimpaa kuin maakaasusta reformoitu vety, tulisi tällainen lähes hiili-neutraali, kotimainen ja hajauttavissa oleva vedyn tuotantoprosessi demonstroida vetyä käyttävän teollisuuden yhteydessä.

Vetyä tarvitaan runsaasti öljyn jalostuksessa, etenkin nestemäisten biopolttoaineiden (BTL) valmistuksessa. Mahdollisuudet integroida BTL tuotanto valkaisu-kemikaalien tuotantoon, missä syntyy sivutuotetvetyä, tulisivat selvittää. BTL-tuotantoa voidaan tehostaa myös syöttämällä prosessiin elektrolyyttisesti tuotettua vetyä ja happea. Tällainen elektrolyyttinen kaasujen tuotanto voisi toimia uusiutuvan energian kasvun mahdollistajana ja **sähköverkkoa stabiloivana muuttavana kuormana.**

Henkilöauto- ja bussiliikenteen **siirtyminen vetypolttokennoautoihin tarjoaa merkittäviä hyötysuhde-etuja** fossiilisiin ja biopolttoaineisiin nähden. Toyotan testitulosten mukaan nykyisten polttokennoautojen energiahyötysuhde on noin 1,8 kertainen polttomoottoriautoihin verrattuna. Tämä selittää sen, miksi maakaasusta reformoidulla vedyllä ajaa pidemmälle, kuin suoraan maakaasulla. Jo siirtyminen raakaöljypohjaisista polttoaineista maakaasupohjaiseen vetyyn tarjoaisi miljardi-



luokan säästöpotentiaalin Suomen vaihtotaseeseen. Jos vety vielä tuotettaisiin kotimaisista uusiutuvista raaka-aineista (biomassa, tuuli), olisi **henkilöauto- ja bussiliikenteessä mahdollista päästä pitkällä tähtäyksellä lähes täydelliseen omavaraisuuteen ja hiilineutraaliuteen**. Muutoksen aikajänne on pitkä ja riippuu kansainvälisestä kehityksestä. Vetypolttokennoautojen kokeilut pitäisi käynnistää esim. jakeluliikenteessä, missä polttoainehuolto on helpoimmin organisoitavissa.

Vety ja polttokennot tarjoaisivat mahdollisuuden myös kiinteistöjen ja maatalojen energian käytön tehostamiseksi sekä hajautettuun sähkön tuotantoon. Pienimuotoiset putkijakelukokeilut voitaisiin käynnistää taajamissa, missä syntyy **teollisuuden sivutuotevetyä, esimerkiksi Äetsän vetykylässä**. Maatiloilla paikallisesti tuotetusta biokaasusta voidaan reformoida synteesikaasua keraamipolttokennolle (SOFC) tai vetyä polymeeripolttokennolle (PEMFC), joissa molemmissa voidaan tuottaa sekä sähköä että lämpöä. Järjestelmän kokonaistaloudellisuus ratkaisee teknologiavalinnan. Hajautettu polttokennoihin ja muuhun paikalliseen tuotantoon perustuva energiajärjestelmä parantaa myös huoltovarmuutta. Jos järjestelmään rakennetaan riittävästi varastoja, voidaan myrskyjen aiheuttamien sähkökatkosten vaikutuksia rajoittaa nykyisestä.

Kotimainen terästeollisuus toimittaa jo nyt raaka-aineita vetyaineastioiden ja putkien valmistukseen Euroopassa. Vaatimusten kasvaessa ja kilpailun kiristytessä korkeapaineisen ja nestemäisen vedyn vaikutukset, esim. vetyhaurastuminen, eri teräslaatuihin ja muihinkin materiaaleihin pitää tutkia entistä tarkemmin. On varmistettava, että **Suomalaisia teräksiä voidaan jatkossakin turvallisesti ja taloudellisesti soveltaa** vetyinfrastruktuurin vaatimissa putkistoissa ja paineestioissa. Teräksiä voisi jatkojalostaa Suomessa puolivalmisteiksi ja lopputuotteiksi kansainvälisille markkinoille. Painevedyn jakelu tarjoaa uusia liiketoimintamahdollisuuksia laitteiden ja palvelujen toimittajille kuten esimerkiksi **kompressorit, venttiilit, virtausmittarit ja vuodonilmaisujärjestelmät**. Woikosken kehittämät **kokonaiset vetyasemat** kilpailevat jo ensimmäisistä toimituksista EU:n 100 Mrd€ vetyinfran rakentamisen markkinoilla.

**Maakaasuverkko** tarjoaa mahdollisuuden suurten vetymäärien siirtoon ja varastointiin. Vedyn polttokennokäytössä saavutetut hyötysuhde-edut jäävät kuitenkin osin toteutumatta, kun vety sekoitetaan metaaniin, ja maakaasua käyttäviä polttimia ja moottoreita joudutaan säätämään, jos vetypitoisuus maakaasussa nousee yli 5 til-%:n.

Suomalainen teollisuus kehittää jo edullisia vetyliikennepolttoasemakonsepteja (Woikoski Oy) sekä edullista vedyn tuotantoa mm. rikkihapon tuotannon yhteyteen (Outotec Oy). **Vetyä tuottavan ja kuluttavan teollisuuden integrointi** keskenään luo vetyteknologialle liiketoimintamahdollisuuksia jo ennen kuin vedyn laajamittainen käyttö energiahuollossa ja liikenteessä yleistyy Suomessa. Liiketoiminta alkaa viennistä, mutta kotimaisilla yhteisprojekteilla voidaan testata ja demonstroida konsepteja.

Vedyn järkevä käyttöönotto energian kantajaksi sähkön, kaukolämmön sekä fossiilisten ja biopolttoaineiden rinnalle vaatii **laajamittaisia järjestelmätarkaste-luita**, jossa järjestelmän kokonaistaloudellisuus sekä ympäristövaikutukset voidaan realistisesti arvioida. Joustavana ja varastoitavana energian kantajana vety avaa uusia mahdollisuuksia innovatiivisiin yhdistelmiin esim. sähköverkon, liikenteen ja kotitalouskäytön kesken. Järjestelmä vaatii myös kehittyneitä säätö-

algoritmeja ja tehoelektroniikkaa.

Suomalaiset organisaatiot tekevät kansainvälistä vety- ja polttokennoyhteistyötä EU:ssa: *Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking* (FCH-JU) sekä IEA:n yhteistyösopimuksissa: Hydrogen Implementing Agreement (HIA) ja Advanced Fuel Cells (AFC) Implementing Agreement. Suomella on myös mahdollisuus osallistua USA:n ja Japanin aloitteesta käynnistettyyn kunnianhimoiseen WPI-hankkeeseen: *International Institute for Carbon-Neutral Energy Research* (I<sup>2</sup>CNER).

*Suosituks* (katso myös suosituks selityksineen luvussa 8)

Vetytiekarttatyöryhmä näkee vedyn energia- ja liikennekäytössä merkittäviä etuja hiilidioksidi- ja muiden ympäristöpäästöjen vähentämisessä, tuontipolttoaineiden korvaamisessa kotimaisella uusiutuvalla energialla, huoltovarmuudessa, alueiden työllisyydessä ja cleentech-kehityksessä.

Osa eduista on välillisiä, perustuen joustavasti transformoitavan ja varastoitavan energian kantajan tuomiin uusiin mahdollisuuksiin. Mutta suorat taloudelliset säästötkin ovat mahdollisia. Mikäli vetyenergian hinnankelitys jatkaa ennakoitua trendiä, vedystä on tulossa hintakilpailukyinen vaihtoehto erityisesti liikennepolttoaineena.

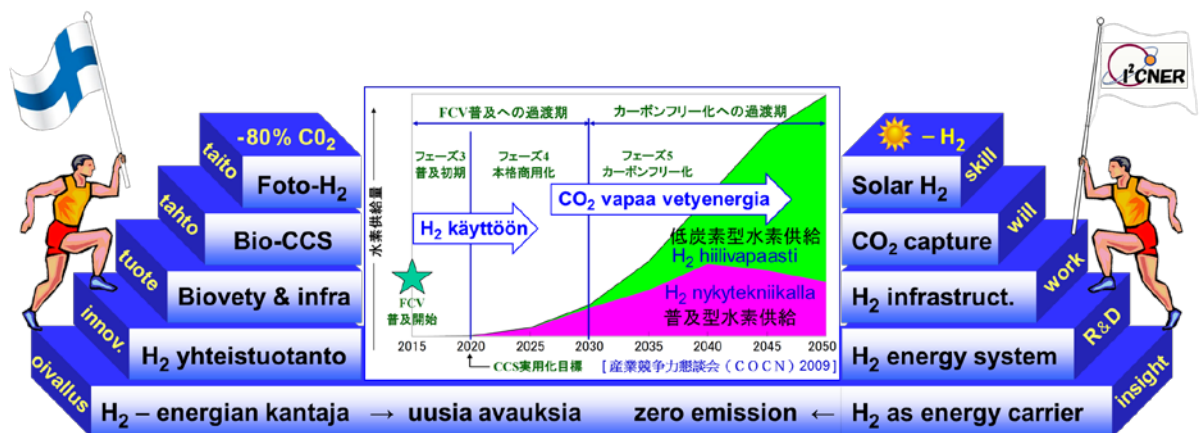
Suomen kannalta pidämme kuitenkin *tärkeimpänä vientimarkkinapotentiaalia* cleentech- ja muun teknologiateollisuuden aloilla. Realistisen arvion mukaan Suomi ei tule alkuvaiheessa olemaan vetyteknologian merkittävä ostaja, vaan myyjä. Aasiassa (Japani, Korea) ja Euroopassa (Saksa) markkinat ovat jo kasvussa ja ennusteiden mukaan kasvu jatkuu nopeasti kiihtyen.

Ehdotamme seuraavia toimenpiteitä:

1. Vetyenergia sisällytetään kansallisiin ja alueellisiin energia-, ilmasto- ja liikennepolitiikkoihin, myös teollisuus- ja ulkomaankauppapolitiikkaan kytkeytyen. Vety nähdään osana bioenergia-, biomass- ja bioekonomiatarkasteluita. Liikenne on vedyn tärkeä käyttökohde. Vetyenergian mahdollisuudet bionaloudessa, tuulivoiman hyödyntämisessä ja muissakin sovellutuksissa arvioitaneen 2013–2014 kuluessa laadittaessa Suomelle tietkartta hiilineutraaliin yhteiskuntaan vuoteen 2050 mennessä.
2. Kehitetään vetyinfrastruktuurin vaatimia prosesseja, järjestelmiä, materiaaleja, laitteita ja palveluja vientimarkkinoille, esim. teollisuuteen integroidut ja biomassapohjaiset prosessit, teräkset, paineastiat, kompressorit, venttiilit ja tehoelektroniikka.
3. Edistetään vetyteknologista huippuosaamista demonstroimalla metsäbiomassan kaasutukseen perustuva vedyn tuotanto vetyä käyttävän kemian teollisuuden yhteydessä ja selvittämällä mahdollisuudet integroida vetyä tuottavia ja vetyä kuluttavia teollisuuslaitoksia, esim. valkaisukemikaalien sivutuotevety ja biopolttoaineiden valmistus.
4. Varaudutaan polttokennoautojen markkinoille tuloon ja hankitaan polttokennoautoja ja -busseja koekäyttöön. Koekäyttö kytketään vetytankkausasemien, muiden vientituotteiden ja palvelujen kehitykseen, testaukseen ja markkinoin-

tiin. Direktiiviehdotuksen 2013/0012 (COD) käsittelyä Euroopan parlamentissa ja neuvostossa tulee seurata, koska se tekisi varautumisen pakolliseksi.

5. Käynnistetään hiilineutraaliin vetyenergiaan, vedyn tuotantoon, turvalliseen käsittelyyn ja hyödyntämiseen tarvittavaan teknologiaan erikoistuneita koulutusohjelmia yliopistoissa ja ammattikorkeakouluissa.
6. Osallistutaan Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU) toimintaan sopimuskaudella 2014–2020, USA:n ja Japanin aloitteesta käynnistettyyn I<sup>2</sup>CNER-hankkeeseen sekä muihin kotimaista tutkimusta tukeviin kansainvälisiin yhteisprojekteihin vety- ja polttonäyteteknologioiden alueella. IEA Hydrogen Implementing Agreement (HIA) osallistuminen tarjoaa myös erinomaisen verkoston ja seurantanavan.
7. Selvitetään tarve ja lainsäädännölliset keinot edistää vetyteknologioiden käyttöönottoa ja esikaupallisia investointeja esim. verohelpotusten, investointitukien tai syyttötariffien avulla.
8. Kansallisten energia-, ilmasto- ja liikennepolitiikkaa koskevien tarkastelujen perusteella päivitetään kuvassa 1.3 esitetty malli ja päätetään aloittaa sen toteuttaminen aikataululla, joka mahdollistaa päästövähennystavoitteiden toteuttamisen osin markkinaehtoisesti ja Suomen kansantaloutta mahdollisimman vähän kuormittaen.



Kuva 1.3. Portaat Suomen vety-yhteiskuntaan.

Vetyenergian käyttöönotto mahdollistaa jatkossa uusia hiilineutraaleja teknologisia avauksia, joiden avulla voidaan saavuttaa tai haluttaessa jopa ylittää asetetut tavoitteet hiilidioksidin ja muidenkin päästöjen vähentämiseksi. Vetyyhteiskunnassa -80 % CO<sub>2</sub> 2050 mennessä on realistinen tavoite. Portaille astumista edeltää kaukonäköinen suunnitelmallisuus. Perille kiipeäminen vaatii pitkäjänteistä tieteen, teollisuuden ja talouden sektorit ylittävää ja yhdistävää yhteistyötä – myös kansainvälisesti.

## 2 JOHDANTO

### 2.1 Vety energian kantajana

Vety on jaksollisen järjestelmän ensimmäinen alkuaine, kevyt, väritön ja hajuton kaasu, joka ei esiinny luonnossa vapaana. Vety on nykyään merkittävä teollisuuskemikaali. Sitä voidaan myös käyttää synteettisenä polttoaineena tai energian kantajana, jota voidaan tuottaa hiilivetyjä reformoimalla tai vettä termo- tai sähkökemiallisesti hajottamalla. Kiinnostus vedyn käyttöön on lisääntynyt voimakkaasti, koska vety on hiilivapaa polttoaine, jonka palamistuotteena syntyy vain vesihöyryä, eikä prosessissa vapaudu ilmastoa lämmittävää hiilidioksidia.

Vety toimii energian kantajana sähkön ja lämmön rinnalla [Winter 1988, Ball 2009, Winter 2009]. Vedyn suurimpana etuna sähköön verrattuna on sen varastoitavuus. Sähköä voidaan muuntaa vedyksi elektrolyysiprosessissa ja vetyä takaisin sähköksi polttokennoissa tai kaasuturbiineissa. Vedyn merkittävimmät energia-sovellukset ovat:

- liikennepolttoaine
- uusiutuvan energian (aurinko, tuuli) varastointi ja siirto
- hajautettu sähkön- ja lämmön tuotanto
- älykkäät energiaverkot ja varavoima (UPS)
- synteettisten (bio)polttoaineiden jalostus.

Vetyä voidaan tuottaa keskitetysti, esim. maakaasua reformoimalla, merituulivoimaloissa ja suurissa aurinkovoimaloissa, tai hajautetusti esim. liikennepolttoaineasemilla ja maatiloilla. Järjestelmän kokonaistaloudellisuuden ratkaisee vedyn tuotanto- ja jakelukustannusten summa verrattuna vaihtoehtoihin ratkaisuihin.

#### 2.1.1 Vety energian varastoinnina

Vedyn roolia sähkön varastoinnissa voidaan pelkistään kuvata protoneina, jotka varastoivat yhden elektronin per atomipainoyksikkö ja jotka voidaan sulkea pulloon. Polttokennossa vety voidaan konvertoida takaisin sähköksi (ja vedeksi) hyvällä hyötysuhteella. Vertailun vuoksi esimerkiksi litium-ioni varastoi elektronin per 7 nukleonia (3 protonia, 4 neutronia) ja akkuun tarvitaan muutakin, kuin litiumia.

Nykyinen taloutemme ja elämänmuotomme perustuu paljolti sähkön helppoon saatavuuteen. Metallijohtimissa tapahtuvaa elektronien liikettä, eli sähköä myydään kaupallisena tuotteena, mutta primäärienergian konvertointi sähköksi ja sen jakelu edellyttää vuosikymmenien kuluessa rakennettua infrastruktuuria ja vähän säätelyäkin. Sähköverkkoon kytketyn tuotannon ja kulutuksen tulee aina kohdata ”sähkön nopeudella”. Säättötarve syntyi kulutuksen vaihtelusta, mihin sähköjärjestelmämme onkin hyvin varautunut. Mutta tuuli-, aurinko- yms. ajallisesti vaihtelevan energian osuuden kasvu synnyttää aivan uuden haasteen. Saksassa ja Tanskassa ollaan jo riippuvaisia naapureilta saatavasta säätövoimasta ja tilannetta yritetään korjata energian varastointikapasiteettia kasvattamalla. Varsinkin Alppien alueella on pumppuvoimaloita, joissa vesi nostetaan ylijäämäsihtäällä takaisin ylämäkeen. Elektrolyysillä tai muuten sähköä hyödyntäen tuotetun vedyn varastointi on varteenotettava vaihtoehto, kun varastointitarve on suuri tehon ja/tai

ajan suhteen. Varsinaisina varastoina toimivien maanalaisten kallioluolien lisäksi kaasuputket, satamaterminaalit ja kaasulaivat toimivat kulutusta ja tuotantoa tasaavina energiavarastoina.

Sähkön varastointi vedyksi voi toimia myös palautumattomana sähkön ylitarjonnan nieluna, aivan kuten alumiinitehtaot toimivat Norjassa ja Islannissa. Vedyn yleistyminen liikenne-energian kantajana tarjoaa tähän oivan mahdollisuuden. Erittäin puhdasta ja edullista vetyä ja happea saadaan, kun ylijäämänsähkön hinta putoaa alas – tai noltaan, kuten Saksassa ja Tanskassa jo ajoittain käy. Tuotettu vety voidaan jatkossa myydä sellaisenaan liikenteessä käytettäväksi. Tarvittaessa osa vedystä voidaan hyödyntää myös kulutushuipun aikaiseen sähkön tuotantoon ja näin vahvistaa sähköverkon tasapainoa.

## 2.2 Vetytalous ja vety-yhteiskunta

### 2.2.1 Vetytalous

Varsinkin Yhdysvalloissa käytetään yleensä termiä ”vetytalous”. USA:n energiaministeriön (DOE) ohjelmissa on laskettu vedyn hinnalle, jakelun ja käytön (autot) kustannuksille tavoitteet, joilla saavutetaan hintakilpailuetu bensiiniin tai muihin perinteisiin energian kantajiin. Vedyn tuotannon ja autojen (polttokennojärjestelmän) hinnat ovat jo saavuttamassa markkinaehtoiselle kilpailulle asetetut tavoitteet. DOE:n ohjelmissa fokus onkin nyt asetettu vedyn jakeluverkkoon tarvittavaan teknologiaan ja sen hintakilpailukykyyn [DOE 2011].

Kalifornian energiakomission laskelmat osoittavat, että kannattavaan liiketoimintaan voidaan päästä investoimalla isolla kapasiteetilla varustettuihin vetytankkaus-asemiin. Mutta markkinoiden alkuvaiheessa asemien käyttöaste jää alhaiseksi ja julkisia tukimekanismeja tarvitaan [California 2012].

Euroopassa ja Aasiassa (Japani, Korea) lähtökohta on hyvin samanlainen. Esimerkiksi Japanissa talous on suunnilleen yhtä markkinaehtoista kuin USA:ssa. Toimintakulttuurissa on kuitenkin tarkastelumme kannalta merkittävä ero. Tämä näkyy kokonaisvaltaisena yritysten, poliittisten päättäjien ja virkakoneiston yhteistyönä, joka parhaimmillaan voi mahdollistaa radikaalinkin muutoksen silloin, kun se yhdistää valtion ja kotimaisen liike-elämän intressit. Energiaomavaraisuus ja öljyriippuvuuden katkaiseminen on tästä tyypillinen esimerkki.

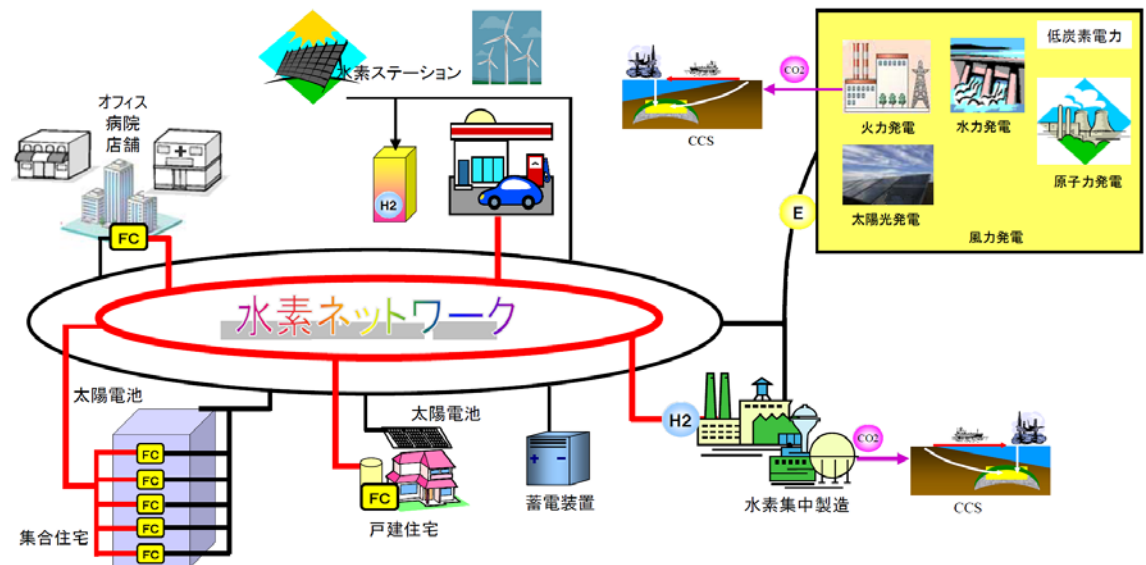
Japanissa ja Koreassa on nähty, että vety mahdollistaa uusien ratkaisujen kytke-  
misen osaksi jo toimivaa ja uudistuvaa energiajärjestelmää. Yksin vety ei itses-  
sään ratkaise perusongelmaa. Kantaja on vain kantaja, mutta sekin tarvitaan.  
Tekeillä on radikaali, mutta joustavasti markkinaehtoinen järjestelmämuutos  
haluttuun suuntaan – eräänlainen ”Energiewende”, mutta kilpailukykyisen talou-  
den kautta. Siihen tarvitaan joustavaa ja moneen tarkoitukseen sopivaa energian  
kantajaa, eli vetyä. Energiaomavaraisuuden ja ilmastonmuutoksen torjunnan ohel-  
la tärkeä ajava voima on edelleen teollisuuden kilpailukyky.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Erityisesti autoteollisuus pyrkii aktiivisesti kiihdyttämään Korean ja Japanin vety-yhteiskunta-ohjelmia, arvatenkin olettaen, että niillä on FCEV tuotekehityksessä vahva asema. Esimerkkinä Toyota, jonka kaikki Suomessakin myytävät mallit ovat jo nyt saatavissa myös hybrideinä, eli ainakin osittaisella sähköisellä

## 2.2.2 Vety-yhteiskunta – Japanin malli

Japanissa oli laadittu kokonaisvaltainen vety-yhteiskunta malli, jossa vedylle varataan sähkön rinnalla keskeinen rooli myös kansallisessa energiaverkossa. Malli laadittiin ennen 2011 ”311 tsunamin” aiheuttamaa energiajärjestelmän uudelleen arviointia, mutta tsunamin jälkeisellä viikolla ensimmäisten johtopäätösten joukossa oli vetyenergia-ohjelman edelleen priorisointi. Tarkoitus on varmistaa yhteiskunnan toimivuus valtakunnan sähköverkon lamaantuessakin. Tähän tarvitaan mm. paikallista energian varastointia ja hajautettua varavoimakapasiteettia. Osana Japanin katastrofivalmiutta toimiviin evakuoitikeskuksiin on asennettu vetysäiliöitä, joista paikalle (evakuoitavien kanssa) saapuva polttokennobussi tai yksittäinen henkilöautokin voi ottaa energian ja syöttää sähköä isonkin keskuksen tarpeeseen (>100kW/FCEV).

Edellä mainittu esimerkki kertoo suunnitelmallisuudesta, jota ei enää kutsuta vetytaloudeksi, vaikka priimus moottoreina toimiikin suurteollisuus. Nimi vaihtui ”vety-yhteiskunnaksi” (hydrogen society). Kuvan 2.1. mallissa sähkö ja vety toimivat toisiaan täydentävinä energian kantajina ja siinä yhdistyvät sekä keskitetty että hajautettu energian tuotanto ja jakelu. Liikenne-energia yhdistyy samaan järjestelmään, ja juuri sillä puolella saavutetaan nopeasti<sup>2</sup> merkittävä parannus öljyriippuvuuteen ja vaihtotaseeseen. Huomion arvoinen on myös tapa, jolla hiilen talteenotto (Carbon Capture and Storage, CCS) tuodaan malliin mukaan.



Kuva 2.1. ”Vety-yhteiskuntamalli” Competitive Council Nippon raportissa 6.3.2009. Musta rengas edustaa sähkön jakeluverkkoa, punainen vetyenergiajärjestelmää. [COCN 2009]

voimansiirrolla varustettuna. Ns. täyshybridien sähköisen voimansiirron kapasiteetti riittää ajamiseen sellaisenaankin (Esim. Lexus hybridit 150 kW sähkömoottoreilla). Sähkö- ja polttokennoautoon tarvittavasta teknologiasta suuri osa on siis jo nykytuotteissa ja todellisessa käytössä testattu. Enää sähkön lähde puuttuu.<sup>2</sup> Energia- ja liikennejärjestelmän ”nopeakin” muutos vaatii vuosikymmeniä. Esimerkiksi Kaliforniassa on päätetty ohjata autokanta uusiutumaan 2050 mennessä enemmistöltään sähköllä toimiviksi. Näistä suurimpaan osaan tulee vety energian kantajaksi ja polttokenno sähkön tuottajaksi. Tämä on jo suhteellisen nopea muutos.

### 2.2.3 Hiilineutraali vety-yhteiskunta – hiilen talteenotto

Alkuvaiheessa vedyn tarve voidaan varmimmin ja edullisimmin tyydyttää maakaasua reformoimalla. Jatkossa maakaasu voidaan korvata biokaasulla<sup>3</sup> ja tieteellis-teknisten tavoitteiden toteutuessa lopulta suoraan keinotekoisella fotosynteesillä tuotetulla vedyllä. Primäärienergiana toimivan maakaasun reformoinnissa syntyvä hiilidioksidi on kuitenkin helppo kerätä talteen. Kokeilumielessä näin jo tehdään eräiden vetytankkausasemien pienimuotoisen reformoinninkin yhteydessä (esimerkkinä Tokion Haneda lentokentän vetyasema).

Keskitetystä vetyreformoinnista vastaavilla kansallisen tai globaalien tason teollisilla toimijoilla on parhaat resurssit organisoida kerätyn hiilidioksidin loppusijoitus tai kierrätys kemian teollisuuden prosesseissa. Taloudellinenkin tehokkuus toteutuu, kun hiilidioksidi poistetaan energiaverkosta ennen käyttöä. Kuluttajakeluun päätyy hiilivapaata ja hyvällä hyötysuhteella sähköksi muunnettavaa vetyä. CCS jää pienen, mutta toimintakykyisen teollisuusryhmittymän – ja arvatenkin myös hallitusten – kesken toteutettavaksi.<sup>4</sup> Taajamissa pakokaasu-, hiukkas- ja melupäästöt pienenevät suorassa suhteessa vedyn käytön määrään.

Hiilidioksidin talteenotto maakaasusta voidaan toteuttaa maakaasukentällä, LNG terminaalissa tai putkiverkon keskeisessä solmukohdassa tai loppukulutuskohdeksessa. Taloudellisin vaihtoehto riippuu vedyn siirron (kaasu tai neste) sekä hiilidioksidin kuljetuksen ja varastoinnin kustannusrakenteista.

## 3 KANSAINVÄLINEN KEHITYS JA KANSALLISET STRATEGIAT

### 3.1 Vedyn teollisuuskäyttö

#### 3.1.1 Vedyn tuotanto

Maailmassa tuotettiin vuonna 2006 vetyä noin 50 miljoonaa tonnia ja sen arvo oli noin 280 miljardia USD [Winter 2009]. Vedyn tuotanto kasvaa noin 10 % vuosivauhdilla, johtuen etupäässä lisääntyneestä käytöstä öljynjalostuksessa. 85–90 % tuotetusta vedystä käytetään kemianteollisuuden (lannoitteet, öljynjalostus) omissa prosesseissa ja vain 10–15 % päätyy kaupallisille kaasumarkkinoille. 90 % vedystä tuotetaan fossiilisista polttoaineista pääasiallisesti maakaasua reformoimalla. Muita tuotantomenetelmiä ovat öljyn osittaishapetus ja hiilen kaasutus.

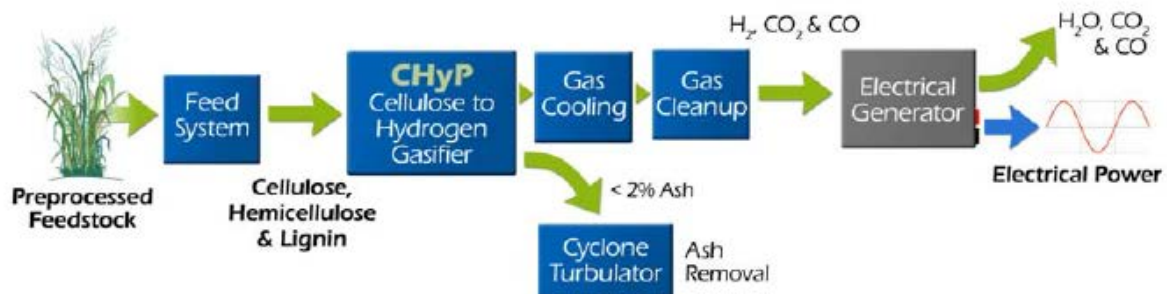
Vetyä voidaan tuottaa myös elektrolyytisesti vettä hajottamalla [Smolinka 2010]. Suuria elektrolyysilaitoksia on rakennettu lähinnä vesivoimaloiden yhteyteen. Alkalinen elektrolyysi (AEL) on perinteinen teknologia, joka on laajamittaisessa käytössä ja jota kehitetään edelleen. Polymeerielektrolyysi (PEMEL, PEMEC,

<sup>3</sup> Suomessa biokaasusta tuotettava vety olisi varteenotettava vaihtoehto jo heti alusta pitäen. Keinotekoisien fotosynteesiprosessien tehokkuus ei vielä läheskään täytä kaupallisen toiminnan odotuksia. Suomessa on kuitenkin tässäkin asiassa jo vahvaa osaamista (huippututkimusryhmä Turun yliopistossa).

<sup>4</sup> Japanissa öljy- ja kaasuteollisuus (Nippon Oil, Tokyo Gas, ...) kuuluu vety-yhteiskuntaa rakentavaan ydinjoukkoon. Suomessa keskeisiin H<sub>2</sub> + CCS toimijoihin voisivat kuulua esim. Neste Oil, Gasum, Fortum,...

SPEL) on uudempi teknologia, jonka katsotaan sopivan paremmin pieniin laitoksiin ja vaihtuvan kuorman sovelluksiin, esim. aurinko- ja tuulienergioiden yhteydessä. Polymeerielektrolyysissä virrantiheydet ovat suurempia, joten laitosten fyysinen koko on pienempi. Polymeerielektrolyysi voidaan paineistaa tuottamaan jopa 350 bar painetta. Korkean lämpötilan vesihöyryelektrolyysi (HTEL, SOEL, SOEC), joka on kiinteäoksidipolttokennon käänteisreaktio, on vielä tutkimusasteella.

Vetyä voidaan tuottaa biomassasta usealla eri menetelmällä. Pääasialliset menetelmät ovat biomassan kaasutus tai pyrolyysi ja käymisprosessit, joiden välituotteena syntyy synteetikaasua, biometaania, alkoholeja tai bioöljyjä, jotka jatkojalostetaan reformoimalla vedyksi. Prosessi voidaan suunnitella tuottamaan suoraan vetyä tai välituotteita voidaan varastoida ja kuljettaa kulutuskohteisiin, joissa vetyä tuotetaan hajautetusti [Milne 2001, Czernik 2007].

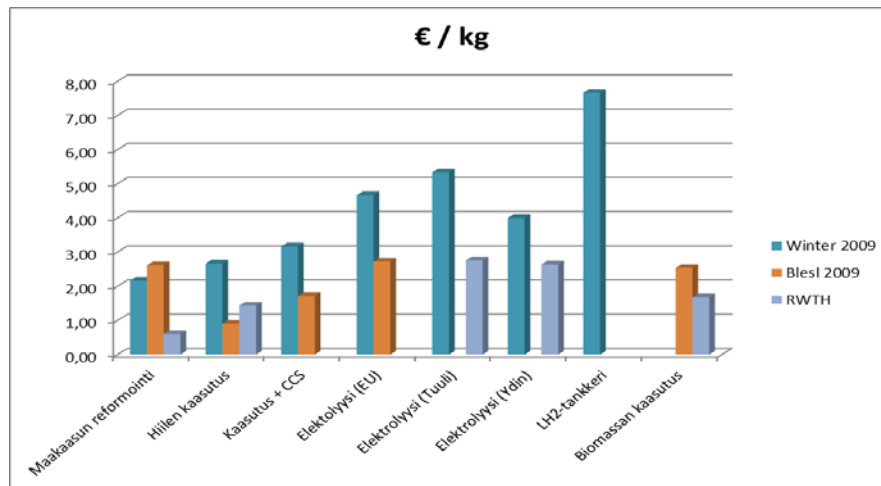


Kuva 3.1. Vedyn tuotanto biomassasta kaasutusprosessilla [ProtonPower 2010].

Vetyä voidaan tuottaa myös biologisin, fotosähkökemiallisin ja termokemiallisin menetelmin. Biologiset menetelmät perustuvat esim. leviin tai syanobakteereihin. Vetyä voidaan tuottaa biologisesti myös pimeä fermentaatiolla, missä bakteerit hajottavat hapettomissa olosuhteissa orgaanista ainetta vedyksi, hiilidioksidiksi, rasvahapoiksi sekä alkoholeiksi Termokemiallisissa menetelmissä vettä hajotetaan korkean lämpötilan ydin- tai aurinkovoimaloissa [Dincer 2010]. Nämä kaikki menetelmät ovat vielä tutkimus- ja pilot-asteella.

Vedyn tuotantokustannusarvioita on esitetty kuvassa 3.2. Fossiilisista polttoaineista tuotettuna hinta on 0,5–2,5 €/kg ja elektrolyysillä 2,5–5,0 €/kg. Aurinko-, tuuli- tai vesivoimalla tuotettu ja nesteytetty kaukokuljetettu vety on luonnollisesti kaikkein kalleinta.





Kuva 3.2. Vedyn tuotantokustannuksia [Winter 2009, Blesl 2009, RWTH 2012].

### 3.1.2 Vedyn jakelu

Samoin kuin vedyn käytöllä on sen jakelullakin pitkät ja laajat perinteet. Turvallisuuden kannalta jopa 150 vuoden takaiset tilastot ovat varsin lohdullista luettavaa. Vaarallisena pidetty, laajalla seossuhteella räjähtävän kaasuseoksen muodostava vety ei ole paljon mukana onnettomuustilastoissa [FuelCell Today, July 2012].

EU:n rahoittamassa hankkeessa [Road2HyCom 2007a] on kartoitettu olemassa olevaa ja potentiaalista vetyinfrastruktuuria. Se käsittää suurille kuluttajille vedetyn putkiston sekä maantiekuljetuksella ja jakeluasemilla hoidetun paikallisen jakelun. Keski-Euroopan alueella pääosassa ovat suuret kaasualan yritykset:

- Air Liquide (Sveitsissä Carbagas)
- Air Products (Italiassa Sapió Group)
- Linde (Skandinaviassa AGA ja Britanniassa BOC)
- Messer
- Praxair
- pienempiä toimijoita, kuten Sol, Westfalen AG, Intracerv, ym.

Euroopan vetyputkistoa on yhteensä lähes 1600 km. Maailman laajimman verkoston mittakaavaa kuvaa hyvin vertailu USA:han, jossa vastaava kaasuputkisto kattaa n. 800 km. Putkiston ovat rakentaneet, kukin omalle alueelleen, em. Keski-Euroopan suurimmat kaasunjakeluyritykset.

Laajinta verkostoa operoi Air Liquide Ranskan luoteisosassa, Belgiassa ja osissa Alankomaita. Kaikkien ilmakaasujen, happi, typpi, hiilimonoksidi ja vety putkiston yhteispituus tällä alueella on yli 2700 km. Pienemmät asiakkaat tai jakeluasemat, joiden käyttömäärät eivät riitä putken vetämiseen tai omaan vedyntuotantoon, ostavat vetynsa konteissa tai pullopattereissa. Kaupallinen vedyn myynti on laajuudeltaan n. 425 miljoonaa Nm<sup>3</sup> (38.000 Tn, 2006).

Maantiekuljetukseen on saatu lisää tehokkuutta nesteytetyn vedyn avulla. Näin kulkee suurempi määrä vetyä tilavuusyksikköä kohti. Toistaiseksi rajallista nestevedyn kuljetuskapasiteettia tullaankin lähiaikoina kasvattamaan [Linde 2012].

Useimmissa Keski-Euroopan maissa maakaasuverkosto ulottuu teollisuuslaitosten lisäksi lähes kaikkiin koteihin. Se muodostaa kokonaistilavuudeltaan merkittävän

kapasiteetin vedynkin siirtoon ja varastointiin. Tästä on suunnitelmia Saksassa, kts. kappale 3.3.1.

### *Maantiekuljetus*

Maantiekuljetukset tapahtuvat pääasiassa putkipaketteina tai kontteina 200 tai 300 bar:in paineessa. Kuljetuskapasiteetti on 2000–6200 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Se vastaa laskennallisesti 180–540 kg H<sub>2</sub>, kun tyhjä rekka painaa lähes 40 tonnia (Kuva 3.3). Optimitasolle päästään kevyillä komposiittipulloilla teräsastioiden sijaan. Tehokkuutta heikentää vielä paineiden tasaaminen asiakkaan säiliöpaineen kanssa. Kuljetuskalusto koostuu yhteensä n. 1000 säiliöautosta Euroopan alueella.

### *Kaasunjakeluasemat*

Kun suurimmat asiakkaat tuottavat itse tai ostavat paikallisesti tuotettua vetyä tai saavat sen putkella toimitettuna tai suoraan pullopatteritoimituksena, jää pienasiakkaille jakeluasemat, joihin vety toimitetaan myös maantiekuljetuksena. Lisäksi joillakin asemilla on oma paikallinen vedyn tuotantonsa tai niillekin toimitetaan vety läheisen teollisuuslaitoksen sivutuote- tai ylijäämävedystä.



*Kuva 3.3. Kaksi mallia paineistetun vedyn kuljetusjärjestelmästä [Air Liquide 2012].  
a. pullopatteri, lukumäärästä riippuen 2000–3000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>  
b. komposiittisäiliöt, kapasiteetiltaan 6200 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>.*

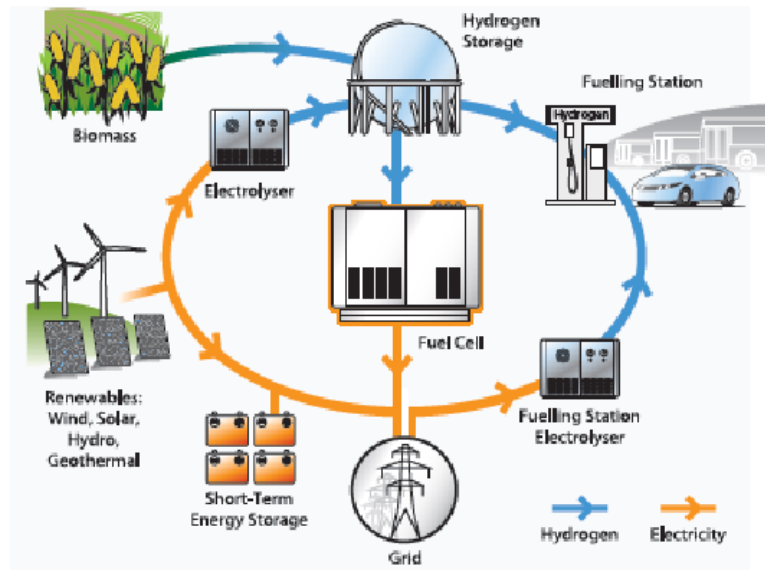
### *Nesteytysyksiköt*

Euroopassa on vain muutama nesteytetyn vedyn tuotantoyksikkö. Nestevedyn kuljetukseen on kehitetty kaasueristysjärjestelmä. Tällaisella rekalla kuljetuskapasiteetti on kuusinkertainen paineistetun kaasuedyn pullopakketikuljetukseen

verrattuna. Näillä päästään maksimissaan jo 3500 kg vetyäriin. Nesteytetyn vedyn osuus kokonaisjakelussa on toistaiseksi vain muutamia prosentteja.

Jo selvästi alkanut liikennekäytön vetyinfrastruktuurin rakentaminen tulee muokkaamaan perinteisiä vedyn jakelujärjestelmiä. Tehokkuutta on välttämättä lisättävä. Suoraviivaisin tie on kaasun paineen kohottaminen. Kulkuneuvokäytössä aloitettiin 350 bar:in paineesta, mikä on heti alkuvaiheessa yhteisellä sopimuksella nostettu 700 bar:iin. Valitulla tankkauspaineella joudutaan tosin jakelupaine nostamaan vähintään 750 bar:iin. Selvästi pienemmän pullopaineen voi toteuttaa imeyttämällä vety  $\text{MgCaCO}_3$  tai  $\text{NaBH}_4$  tapaisiin aineisiin. Imeytysaineen käytössä hukataan energiaa, samoin nesteytysvaihtoehdossa. Korkean paineen käyttökään ei ole aivan ongelmatonta, mm. venttiilien pitävyyden ja putkisto- ja varastohäviöiden osalta.

Polttokennoautojen markkinoille tulo tulee määräämään valittavat tekniset ratkaisut, sen osana myös vedyn jakeluun liittyvät valinnat. Vedystä piirretään jo verkostokuvia aivan sähköverkon tapaan, kuva 3.4. Kuvattu rakenne pitää sisällään vedyn kytkeytymisen hajautetun energian tuotannon voimakkaaseen kasvuun, uusiutuvan energian tuotannon hajautumiseen aina kiinteistötasolle ja biomassojen kaasutuksen lisääntymiseen. Vety nähdään jo nyt ratkaisuksi uusiutuvien energioiden (aurinko, tuuli, biokaasu) tuotannon tasaamisessa.



Kuva 3.4. Uuden vetytalouden vetyverkosto [FuelCellToday, May 2012].

### 3.1.3 Vedyn varastointi

Vetyä voidaan varastoida paineistettuna kaasuna, nesteytettynä, metalliin liuenneena hydridinä, vetyrikkaana kemikaalina tai pinnalle adsorptoituneena yhdisteenä [Züttel 2007, Winter 2009]. Vetyä voidaan tuottaa myös hapettamalla tietyt metalleja, esim. Na, Zn, vedellä, jolloin vapautuu vetyä.

Paineistetun kaasun varastona käytetään teräksisiä kaasupulloja (200, 300 bar) tai suurempia terässäiliöitä. Liikkuvissa sovelluksissa voidaan käyttää myös hiilikuitukomposiittisäiliöitä. Autoteollisuuden standardiksi on muodostunut 350 ja 700 bar komposiittisäiliöt, joissa vedyn massaosuus voi olla yli 10 p-%. Suuressa mittakaavassa vetyä voidaan varastoida suolakaivoksissa, vanhoissa kaasun-

tissä, pohjavesiesiintymissä tai kallioluolissa. Texasissa on öljyteollisuuden käytössä kaksi yli 550.000 m<sup>3</sup>/135 bar (7.000 Tn) maanalaista suolakerrostumiin rakennettua vetyvarastoa, joiden energiasisältö on yli 200 GWh/säiliö [Hebling 2012].

Vedyn kiehumispiste on -253 °C (= 20 K) ja nestemäisen vedyn tiheys 70.9 kg/m<sup>3</sup>. Nestevetyä voidaan varastoida tyhjöeristetyissä säiliöissä. Vedyn nesteytys kuluttaa n. 30 % kaasun energiasisällöstä ja hyvinkin eristetystä säiliöstä höyrystyy jatkuvasti vetyä joitakin prosentteja päivässä [Züttel 2007]. Pohjois-Amerikan nesteytyskapasiteetti (300 Tn/päivä) on yli 10-kertainen Eurooppaan (20 Tn/päivä) verrattuna. Maailman suurin nestevetysäiliö (2800 m<sup>3</sup>/270 Tn LH<sub>2</sub>) on Cape Canaveralin avaruuskeskuksessa [RWTH 2012]. Maanalaisia nestevety-säiliöitä on vetytankkausasemilla Lontoossa, Münchenissä ja Washingtonissa.

Vety liukenee atomaarisena tiettyjen metallien ja metalliyhdisteiden hilaan. Vedyn liukoisuus lämpötila ja -paine riippuvat yhdisteistä. Vedyn tiheys metallimatriisissa voi ylittää nestevedyn tiheyden, mutta vedyn massaosuus jää 1–5 p-%:iin. Huoneen lämpötilassa ja normaalipaineessa reagoivat perinteiset AB<sub>5</sub>- (LaNi<sub>5</sub>) ja AB- (TiFe) tyyppiset hydridit varastoivat 1–2 p-% vetyä, korkean lämpötilan Mg-pohjaiset hydridit noin 5 p-%.

Vetyä voidaan varastoida myös vetyrikkaana kemikaalina esim. synteettinen metaani, metanoli, ammoniakki, muurahaihappo tai dimetyylieetteri, katso kap-pale 3.4. Myös ns. kemiallisia hydrideitä, esim. NaBH<sub>4</sub>, on tutkittu paljon. Nestemäisten kemikaalien etuna on vedyn suuri massaosuus ja helppo käsiteltävyys, mutta haittana huono konversiohyötysuhde.

Vedyn varastointi pinnalle adsorpoituneena (fysisorptio) yhdisteenä on tutkittu suuren pinta-alan omaavien hiilinanoputkien ja metallo-orgaanisten yhdisteiden (MOF) pinnalla. Varastot toimivat nestetyypen lämpötilassa (-196 °C) ja saavutettu vedyn massaosuus on noin 2 p-%.

Taulukossa 3.1. on vertailtu vedyn varastointimenetelmien suorituskykyä.

Taulukko 3.1. Vedyn varastointimenetelmät [Züttel 2007].

Storage methode	$\rho_m$ (mass %)	$\rho_v$ (kg H <sub>2</sub> m <sup>-3</sup> )	$T$ (°C)	$p$ (bar)	Phenomena and remarks
High pressure gas cylinders	13	< 40	RT	800	Compressed gas (molecular H <sub>2</sub> ) in light weight composit cylinder (tensile strength of the material is 2,000 MPa).
Liquid hydrogen in cryogenic tanks	Size dep.	70.8	-252	1	Liquid hydrogen (molecular H <sub>2</sub> ), continuous loss of a few % per day of hydrogen at RT.
Adsorbed hydrogen	≈2	20	-80	100	Physisorption (molecular H <sub>2</sub> ) on materials e.g. carbon with a very large specific surface area, fully reversible.
Absorbed on interstitial sites in a host metal	≈2	150	RT	1	Hydrogen (atomic H) intercalation in host metals, metallic hydrides working at RT are fully reversible.
Complex compounds	<18	150	>100	1	Complex compounds ([AlH <sub>4</sub> ] <sup>-</sup> or [BH <sub>4</sub> ] <sup>-</sup> ), desorption at elevated temperature, adsorption at high pressures.
Metals and complexes together with water	<40	>150	RT	1	Chemical oxidation of metals with water and liberation of hydrogen, not directly reversible?

The gravimetric density  $\rho_m$ , the volumetric density  $\rho_v$ , the working temperature  $T$  and pressure  $p$  are listed. RT stands for room temperature (25°C)

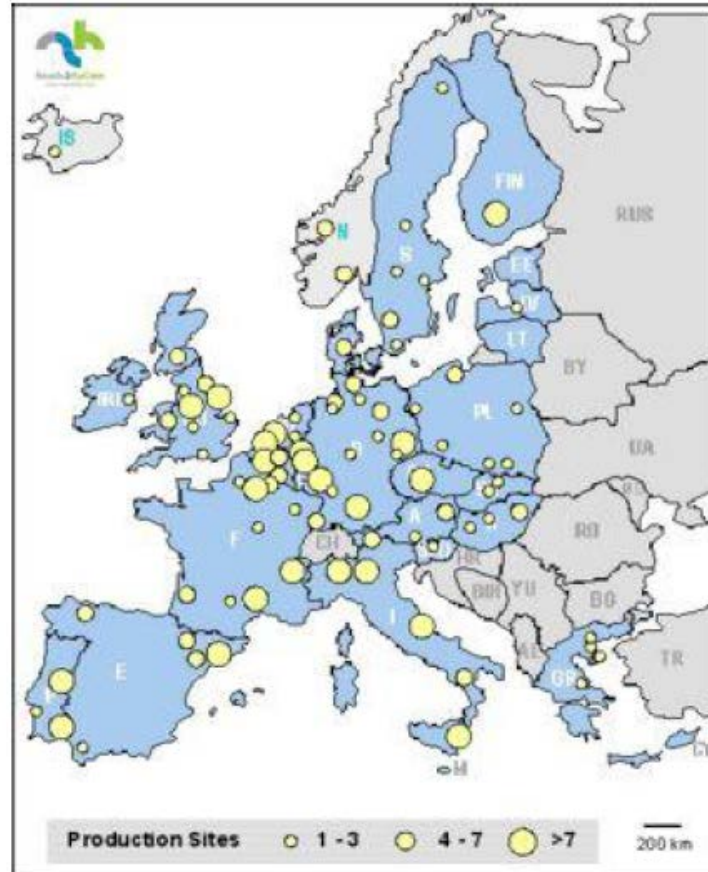
### 3.1.4 Vedyn käyttö teollisuudessa

Kevyimpänä alkuaineena vetyä tarvitaan hieman yli 11 Nm<sup>3</sup> ennen kuin päästään 1 kg:aan. Siitä huolimatta kokonaiskäyttö ylittää kunnioitettaviin lukuihin 50 miljoonaa Tn/a. Onhan se ratkaisevassa osassa kaikkien öljytuotteiden valmistuksessa, krakkauksessa ja rikinpoistossa ym. puhdistusprosesseissa. Se merkitsee, että potentiaalia ja valmista osaamista löytyy kaupallistumisen merkkejä osoittaviin uusiin vedyn energiavarasto-, energian kantaja- ja suoraan polttoainekäyttöön.

Fossiilisten öljyjen tapaan vetyä käytetään eläin- ja kasvirasvojen hydrauksessa, metanolin polymeerisessä liuottamisessa ja ammoniakkin valmistuksessa.

Voimakkaasti pelkistävänä kaasuna vetyä tarvitaan lukuisissa metallurgisissa prosesseissa, lasin valmistuksessa, metallien lämpökäsittelyissä ja hitsauksen suoja-kaasuna. Lääketeollisuus ja elintarviketeollisuus käyttävät vetyä lääkkeiden ja elintarvikkeiden valmistuksessa. Metall- ja konepajateknisten käyttäjien lisäksi vetyä tarvitaan elektroniikkateollisuudessaakin, siellä ainakin puolijohteiden valmistuksessa.

Vedyn kokonaiskulutukseksi Länsi-Euroopassa arvioidaan n. 61 Mrd Nm<sup>3</sup> (5.5 MTn, 2003), josta 80 % käyttää pääasiassa kaksi teollisuussektoria: öljyn jalostus 50 % ja ammoniakkiteollisuus 32 %. Kun mukaan luetaan vielä metanolin jatkojalostus ja metalliteollisuus, päästään jo selvästi yli 90 % kokonaiskäytöstä. Euroopassa tuotetaan yhteensä n. 90 Mrd Nm<sup>3</sup> (8.1 MTn) vetyä. Käyttäjäsektoreihin jaettuna, omaan tuotantoon vetyä valmistaa tästä n. 64 %, sivutuotevedyn osuus on 27 % ja loput 9 % tuottavat kaasuyhtiöt. Maantieteellisesti vedyn valmistus Euroopassa painottuu Saksan Rein- ja Main-jokien alueelle, Alankomaihin, Keski-Britannian teollisuusalueelle sekä Pohjois-Italiaan (kuva 3.5).



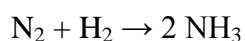
Kuva 3.5. Maantieteellinen jakautuma EU-alueen teollisista vedyn tuottajista [Road2HyCom 2007a].

Suuret vedyn käyttäjät valmistavat yleisesti itse tarvitsemansa vedyn. Näihin kuuluvat jalostamot, ammoniakkipohjaisten lannoitteiden valmistajat, metanoli-tehtaat ja vetyperoksidin tuotanto.

Vetyperoksidin  $\text{H}_2\text{O}_2$  valmistus kuluttaa  $735 \text{ Nm}^3$  vetyä tuotettua  $\text{H}_2\text{O}_2$  tonnia kohti.

Metanolin  $\text{CH}_3\text{OH}$  tuotanto syö  $1400 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$  metanolitonnia kohti.

Lannoitteiden valmistuksessa vaadittavan vedyn määrän voi laskea ammoniakin valmistusreaktiosta:



mikä kuluttaa n.  $1975 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2/\text{Tn}$  ammoniakkia.

Kuinka paljon näissä prosesseissa yli jäävää vetyä on mahdollisesti käytettävissä, on laskettavissa itse tuotetun vedyn ylijäämästä ja kemiallisen teollisuuden sivutuotteena syntyvän vedyn yhteismäärästä. Jalostamot tarvitsevat suuren määrän vetyä, josta ylijäämääkin voi potentiaalisesti syntyä. Sen sijaan muilta valmistajilta ei ole odotettavissa mitään suuria määriä ylijäämävetyä, mutta jo 10 %:n ylijäämällä päästäisiin noin 3 Mrd  $\text{Nm}^3$ :iin. Jos teollisuuden sivutuotevedystä on vain 10–20 % käytettävissä energiakäyttöön, muun osuuden mennessä muihin kemian prosesseihin, päästäisiin samansuuruiseen määrään eli noin 3 Mrd  $\text{Nm}^3$  vetyä [Road2HyCom 2007b].

### 3.1.5 Vety teollisuuden sivutuotteena

Monet teolliset prosessit vaativat vetyä tuotteensa ainesosana tai tuottavat sitä sivutuotteena. Näiden teollisten prosessien ylijäämävety voitaisiin käyttää sekä liikenteen että kiinteiden polttokennosovellusten polttoaineena välivaiheessa kohti vetytaloutta. Tärkeimmät toimijat vetymarkkinoilla ovat kaasujen myyntiyhtiöt, omaan tuotantonsa vetyä valmistavat ja sivutuotevedyn tuottajat [Road2HyCom 2007b].

Kemiallisten prosessien sivutuotteena vetyä arvioidaan syntyvän Euroopassa n. 23 Mrd Nm<sup>3</sup>/a. Saksan muodostaessa tästä 6,8 Mrd Nm<sup>3</sup> ja Britannian 3,6 MrdNm<sup>3</sup>. Suomen tuotannoksi arvioidaan samassa raportissa 1,8 Mrd Nm<sup>3</sup> (160.000 Tn) [Road2HyCom 2007b].

Vetytalouden kasvuvaiheeseen ajateltua sivutuotevedyn määrää on vaikea arvioida, kun suuri osa siitä on löytänyt tiensä konventionaalisten kattiloiden polttoaineeksi tai myyntiin muuhun teollisuuskäyttöön. Liikenteen tuleva tarve ja esimerkiksi mikro-CHP laitteiden yleistymisen saattavat tuoda lisää kysyntää olemassa olevalle sivutuotevetypotentialille.

Tuottajaosapuolten julkaisema 'vapaa' ylijäämä muodostaa yhteensä lähes 10 MrdNm<sup>3</sup>. Sillä kattaisi lähes 6 miljoonan auton polttoainetarpeen. Tämä on kuitenkin vasta pieni osa (3 %) Euroopan arvioidusta 190 miljoonan autokannasta. Se antaa kuitenkin usean vuoden sopeutumisajan vetytalouden kasvuvaiheen ja ensimmäisten käyttäjien luomille markkinoille.

Polttokennokäyttöä ajatellen tulee vielä vastaan kysymys ylijäämäviedyn laadusta ja autoihin valitun PEM polttokennon asettamista vaatimuksista ja sitä kautta kiinteidenkin polttokennojen markkinoille tuleville PEM polttokennoille. Vaarana on, että vedyn puhdistuskustannukset voivat nostaa sivutuotevedyn hintaa.

Yllä jo mainittiin kloorialkaliteollisuuden sivutuotevety yhtenä vedyn merkittävänä valmistusmenetelmänä. Yhteenlaskettu tuotanto ylittää 200 000 tonnia vuodessa. Sillä olisikin vaikutuksensa reservipotentialina uusien vetykäyttöjen alkutaipaleella. Suuria sähkötehoja syövät elektrolyysiprosessit ympäri maailman ovat jo ottaneet syntyvän sivutuotteen oman tuotantonsa tueksi. Sellaisiakin ratkaisuja on, että klooritehtaalta on vedetty putki paikallisten, metalli- tai lääketieteellisuuden tarpeisiin. Yhteensä kloorialkaliteollisuus hyödyntää sivutuotevetyä varsin pitkälle, noin 90 prosenttisesti, kun hyötykäyttö 10 vuotta sitten oli vielä 80 %.

Kloorialkaliteollisuuden primäärituotannon eli elektrolyysin tarvitsemää energiaa on pyritty tasaamaan omalla sähkön tuotannolla. Ajetaan syntyvä vety polttokennon polttoaineeksi ja korvataan näin saatavalla teholla ainakin osa sähköpoolin ajoittain kalliista sähköstä, kuva 3.6. Fuel Cell Todayn raportin mukaan ko. laitoksissa voitaisiin näin säästää yli 20 % sähkön hinnasta eli koko tuotannon määräävästä kustannuksesta [FuelCellToday, Oct 2011].



Kuva 3.6. PEM polttokenno Akzo Nobelin kloorialkalitehtaalla [Nedstack].

Teollisuus käyttää jonkin verran vetyä lämmityskattiloissaan sellaisissa tapauksissa kuin esim. terästeollisuuden hiiliuuneissa syntyvän sivutuotekaasun hyödyntäminen tai kemian teollisuuden jätekaasujen kierrätyslaitokset.

Joitakin teollisuudessa syntyviä vetyvirtoja on vielä lähes kokonaan hyödyntämättä, kuten esim. metallien elektrolyytisessä pinnoituksessa, kromauksessa, nikkeloinnissa ja/tai galvanoinnissa syntyvä puhdas vety.

Uutena mahdollisuutena pidetään rikkihapon valmistusprosessin muuntamista niin, että elektrolyysissä saataisiin huomattava määrä hyödynnettävää vetyä [Lokkiluoto 2012].

## 3.2 Vety liikennepolttoaineena

### 3.2.1 Polttokenno(henkilö)autojen kehitystilanne

Periaatteessa vetyä voi käyttää kipinäsytytteen ottomoottorin polttoaineena, jopa suhteellisen pienin muutoksin. Vedyn syttymisrajojen ollessa hyvin laajat, sitä on mahdollista polttaa hyvin laihalla seossuhteella, mikä parantaa prosessin hyötysuhdetta. Laaja syttymisalue tekee palamisen hallinnasta kuitenkin haasteellista, ettei syttyminen tapahdu liian aikaisin. Vetyä käytettäessä pakokaasupäästöt ovat lähes pelkkää vettä, sillä suhteellisen matalan palamislämpötilan ja laiha seoksen ansiosta palamisilmasta syntyvät typen oksidien päästöt jäävät hyvin pieniksi. Pieniä määriä voiteluöljyä kuitenkin pääsee palotilaan, josta syntyy hiilivety-päästöjä. Vetypolttomoottorista kiinnostuneita autoyhtiötä ovat BMW, Mazda ja Ford. Ne ovat kaikki rakentaneet prototyyppisiä ja pieniä sarjoja, mutta varsinaisia tuotteeseen johtavia kehityshankkeita mikään niistä ei ole käynnistänyt.

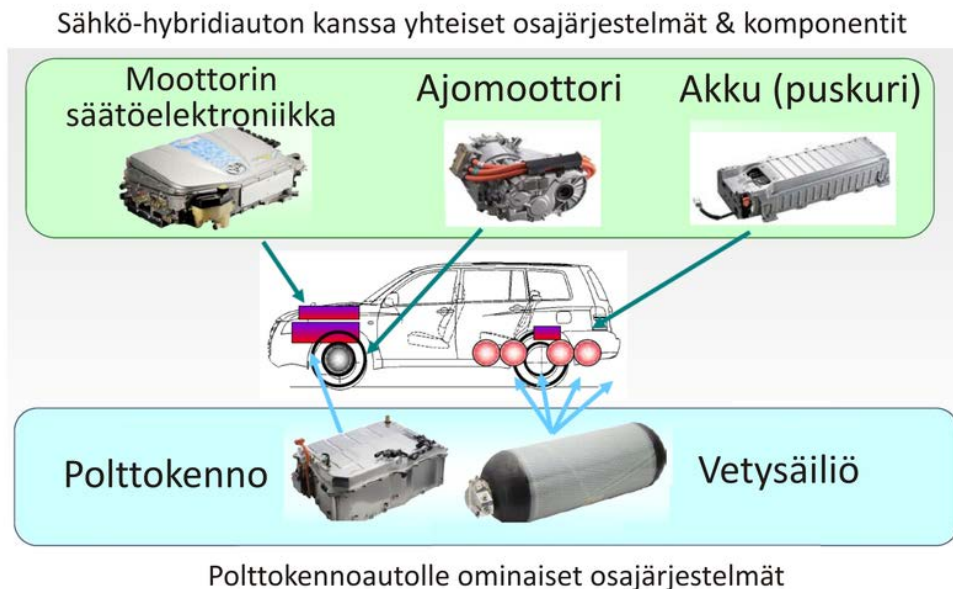
Vedyn käyttö polttokennon polttoaineena polttomoottorin sijaan on valittu etenkin sen tarjoaman paremman kokonaishyötysuhteen takia, ja isojen autoyhtiöiden (Toyota, Daimler, Honda, Nissan, Hyundai, GM) sitoutuminen polttokennoteknologiaan on vahva. Kehityshankkeita on useilla näistä ollut jo 1990-luvulta lähtien. Silloin autonvalmistajat alkoivat etsiä uutta voimalaiteratkaisua tulevaisuuden liikenteeseen, jolla saavutettaisiin päästöttömyys ajon aikana. Kasviuonekaa-



sujen kokonaispäästöt eivät kuitenkaan olleet silloin kovin korkealla kehitystyön tavoitelistassa, vaan lähinnä ihmisen terveydelle haitallisten ns. säänneltyjen päästöjen välttäminen. Hyvää hyötysuhdetta toki tavoiteltiin, koska vedyn varastoinen haasteellisuuden takia riittävän toimintamatkan saavuttamiseksi systeemin tuli olla energiatehokas. Myös vedyn hinnan arvioitiin olevan tulevaisuudessakin korkea.

Sähköllä toimivasta autosta ei tule lainkaan ajon aikaisia pakokaasupäästöjä, mutta akkuteknologian ollessa tuohon aikaan vielä varsin kehittymätöntä, ei sen varaan uskallettu alkaa panostaa. Kokemukset akkusähköautoista Kaliforniassa 1990-luvun lopulla vain vahvistivat tätä käsitystä. Siksi nähtiin lupaavampana vaihtoehtona käyttää polttoaineena (eli energian kantajana) vetykaasua, josta synnyttäisiin sähköä polttokennossa. Vaikka vetykaasun energiatiheys tunnetuissa varastointitavoissa jäi kauas jälkeen nykyisten nestemäisten polttoaineiden arvoista, näytti kuitenkin mahdolliselta rakentaa ajoneuvo, jonka toimintamatra olisi kohtuullinen (500 km) ja jonka polttoainetäydennys ei veisi juuri enempää aikaa kuin nykyinen 2–5 minuuttia.

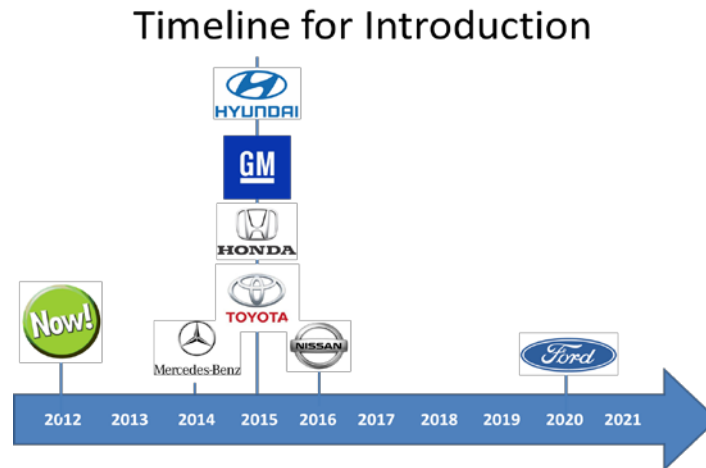
Keskeisin teknologiavaihtoehto on koko ajan ollut PEM-kenno, lähinnä riittävän tehosiheyden ja sopivan käyttölämpötila-alueen takia. Myös massavalmistettavuus on mahdollista. Kuvassa 3.7 on esitetty vetypolttokenno-sähköauton keskeiset osajärjestelmät ja eroteltu, mitkä niistä ovat pitkälti yhteisiä jo nyt markkinoilla olevien polttomoottori/sähkö-hybridiautojen kanssa, joista ensimmäinen ja tunnetuin on Toyota Prius. Tällä synergiällä on erittäin suuri merkitys tuotteistamisen ja valmistuskustannusten kannalta.



Kuva 3.7. Vetypolttokennokäyttöisen auton järjestelmät ja synergia nykyisiin polttomoottori/sähkö-hybridiautoihin (kuvalähde: Toyota, suom. Laurikko).

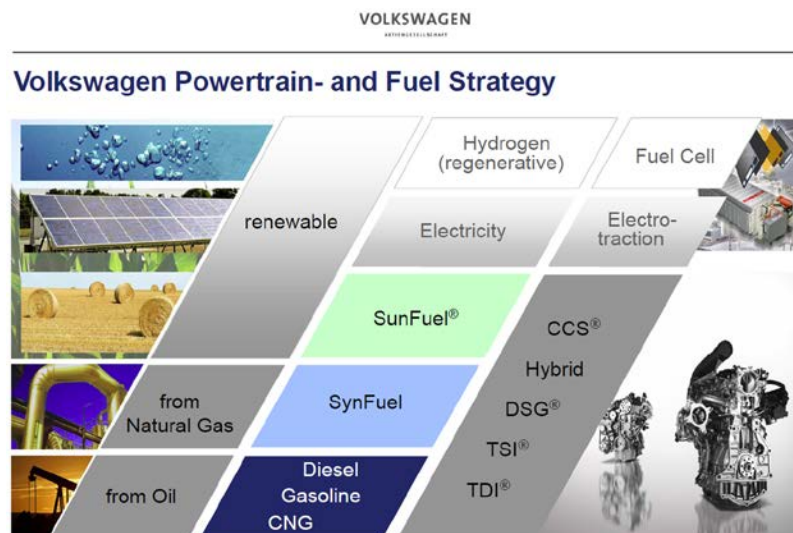
Käyttötesteissä polttokennolle on saavutettu 8000 h käyttöikä, joka vastaa noin 300 000 ajokilometriä, mikä riittää normaaliin henkilöautoon. Samoin käyttölämpötila-alue on saatu ulotettua jo alle -30 celsiusasteen, jolloin tekniikkaa voidaan pitää riittävän kypsänä markkinoille tuotavaksi. Seuraava merkittävä askel on tuotteistaminen, jossa järjestelmien rakenne suunnitellaan massavalmistukseen sopivaksi. Samalla myös komponenttien painoa ja tilan tarvetta vähennetään.

Tämäkin vaihe on jo edennyt varsin pitkälle, ja nykyisessä kehitysvaiheessa kokonaisjärjestelmän tilantarve ja osalukumäärä on saatu pienennettyä lähelle nykyisiä polttomoottorivaihtoehtoja, jolloin on teknisesti mahdollista alkaa koota polttokennoautoja samoilla tuotantolinjoilla normaaliautojen kanssa [Kizaki 2012], millä on huomattava vaikutus kustannuksiin. Siksi polttokennokäyttöisten autojen sarjavalmistus onkin jo alkamassa. Kuva 3.8 esittää eri valmistajien ilmoittamia vuosia valmistuksen aloittamiselle. Suunnitellut tuotantosarjat ovat aluksi noin 1000–50 000/vuosi.



Kuva 3.8. Esittelyajankohdat eri valmistajilla (Kuva: Laurikko, tietolähde: FuelCellToday 2012).

Vetypolttokennoa voimanlähteenä käyttävä sähköauto on paras tämän hetkinen haastaja tavanomaiselle polttomoottoriautoille. Toimintamatka on 400–500 km, tankkaus aika alle 5 min, suorituskyky (kiihtyvyys) ja hyötytilavuus normaalia vastaava. Suurin rajoitus on vedyn jakelun puuttuminen, kun sähköauto taas voi tukeutua olemassa olevaan sähköverkkoon ainakin hidaslatauksessa. Vetypolttokenno nähdään kuitenkin monien autonvalmistajien strategiassa kehityspolun päämääränä (esim. Volkswagen kuva 3.9), ja akkusähköauto vain välivaiheena tai täydentäjänä, etenkin lähi- ja kaupunkiliikenteessä. Kuten jo edellä todettiin, molemmissa autotyypeissä käytetään kuitenkin osin samoja komponentteja voimalinjan osalta, jolloin teknologioiden välille syntyy voimakasta synergiaa.



Kuva 3.9. VAG:n strateginen näkemys tulevaisuuden voimalaitteista [VAG2008].

Kuva 3.10 esittää Tokion autonäyttelyssä joulukuussa 2011 esiteltyä Toyota FCV-R konseptiautoa, joka Toyotan mukaan [Toyota 2012] on hyvin lähellä vuonna 2015 markkinoille tulevaa mallia. Kuvassa 3.11 taas nähdään Mercedes-Benzin F-Cell, joka perustuu merkin B-malliin. Näitä autoja on valmistettu kenttäkokeisiin 200 kpl esisarja.



*Kuva 3.10. Vetypolttokennokäyttöinen Toyota FCV-R -konseptiauto (lähde: Toyota).*



*Kuva 3.11. Halkileikkauskuva vetypolttokennokäyttöisestä F-Cell -autosta, joka perustuu B-malliin. Autoja on valmistettu 200 kpl esisarja (lähde: Mercedes-Benz).*

Tähän mennessä koesarjoina lähinnä tutkimuskäyttöön valmistetut polttokenno-autot on luovutettu käyttäjille pääasiassa leasing-sopimusten kautta, ja autot

palautuvat valmistajille projektien tai sopimuskauden päättyessä. Leasing-maksu on ollut useissa tapauksissa varsin nimellinen auton arvoon nähden, koska kyseessä on tutkimus, eikä tuotto-odotuksia vielä ole. Siten esim. Honda FCX Clarity'n on voinut saada Kaliforniassa käyttöönsä 600 USD kuukausimaksulla. Markkinoiden vähittäinen alkaminen on kuitenkin tuomassa polttokennoauton normaaliin tapaan ostettavaksi. Arviot hinnasta liikkuvat tasolla 50 000–125 000 USD, joten ihan jokamiehen perheautosta ei ole kyse. Useimmat autoyhtiöt positioivatkin uutta tuotetta aluksi ”upper premium” -segmenttiin, jossa myydään sellaisia autoja, jotka houkuttelevat asiakkaita, joille hinta ei ole ensisijainen huolenaihe, vaan tavoitteena on massasta erottuminen uuden tekniikan kautta.

### 3.2.2 Polttokennobussit

Polttokennobusseja on koekäytetty useissa demonstraatiohankkeissa vuodesta 2001 alkaen ja niille on kertynyt miljoonia ajokilometrejä. Merkittävimmät eurooppalaiset hankkeet ovat olleet:

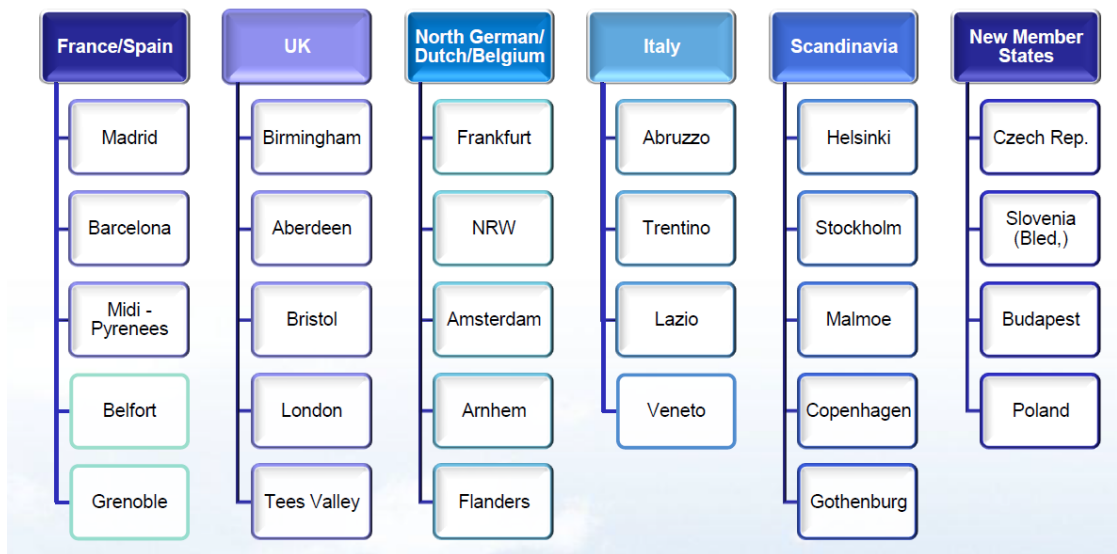
- CUTE&ECTOS; 2001–2005; 30 bussia
- HyFleet:CUTE; 2006–2009; 47 bussia, 2,6 milj.km matkustajaliikenteessä.

Eurooppalaiset bussidemonstraatiot jatkuvat CHIC-hankkeessa [CHIC 2012].

Key Technical Data of the Vehicle	Unit	Phase 0 regions		Phase 1 regions		
		APTS	New Flyer	Citaro	Wrightbus	Van Hool
Overall length	m	18,4	12,5	12	12	13,12
Net Weight	kg	16.650	13.000	13.400	11.707	16.900
Max. Passenger Number	No.	120	97	76	49	74
Number of Axles	No.	3	2	2	2	3
Drive Power	kW	200	2x 85 kW	2 x 80	2x 67	2x 85
Power Fuel Cell System	kW	140	Lithium Phosphate	140	75	150
Energy Storage Type (Type of Battery, Supercap)		Li-Ion battery+ Supercap		Li-Ion battery	Ultracaps	Li-Ion battery
Energy Storage Power	kW	approx 100		250	105	100
Energy Storage Capacity	kWh	Supercaps: 2 Battery: 25	47	26	0,748	17,5
Hydrogen Cylinders (@350 bar)	No.	8		7	6	7
Storage Capacity	kg	40		35	46.2	35

Kuva 3.12. Vetybussien teknisiä ominaisuuksia (CH<sub>2</sub>IC) [CHIC 2012].

Useissa Euroopan suurkaupungeissa on kehitysohjelmaa, joilla tähdätään bussi-liikenteen kehittämiseen vähäpäästöiseksi tai kokonaan päästöttömäksi, ja uusiutuvaa energiaa käyttäväksi. Näitä ovat mm. Köln, Lontoo, Amsterdam, Oslo, Brysseli, Hampuri ja Tukholma. Siten ne ovat todennäköisiä kohteita tuleville demonstraatioille ja ensi vaiheen käyttöönotolle. Lähes kaikissa niistä on jo ollut aiempaa vetybussitoimintaa EU-hankkeiden puitteissa. Kuvassa 3.13 ennakoitaan seuraavan vaiheen mahdollisia koalueita.



Kuva 3.13. Mahdollisia vetybussikoalueita (CH<sub>2</sub>IC) [CHIC 2012].

Tulevaa vetybussikehitystä ja teknologian kilpailukykyisyyttä on arvioitu tuoreessa, joulukuussa 2012 ilmestyneessä EU:n Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking:in (FCH JU) tuottamassa raportissa [New-IG 2012]. Siinä on tarkasteltu rinnan kaikkia relevantteja bussien käyttövoima- ja voimalaittevaihtoehtoja ja niiden kehityspolkuja vuoteen 2030 asti. Vertailtavia ominaisuuksia ovat kyky vähentää paikallisia ja kasvihuonekaasupäästöjä, ajoneuvon hinta, käyttökustannukset, toimintamatka, joustavuus, tarvittava tuki-infrastruktuuri jne. Vertailu on tehty erikseen sekä normaalille kaksiakseliselle 12 m bussille että suuremmalle 18 m mittaiselle nivelbussille. Nämä bussityypit kattavat analyysin mukaan n. 65 % Euroopan markkinoista. Hankkeen toteutti laaja konsortio, jossa oli edustettuna bussivalmistajia ja -operaattoreita, vetyinfrastruktuurin tuottajia, teknologia-yhtiöitä ja useita alan järjestöjä. Käytännön analyysistä ja raportin tuottamisesta vastasi konsulttiyhtiö McKinsey & Co.

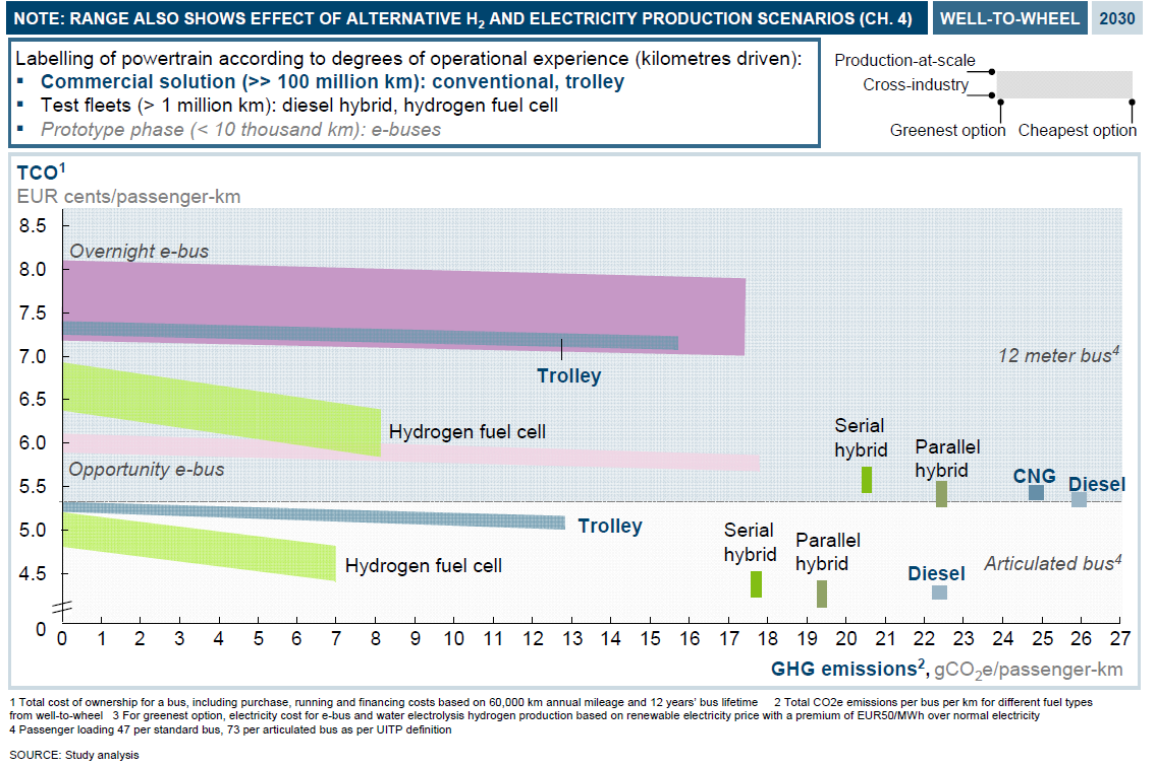
Nollapäästöisistä vaihtoehtoista vetykäyttöinen polttokenno-sähköbussi nähtiin monessa suhteessa hyvin kilpailukykyiseksi. Se tarjoaa pitemmän toimintamatkan kuin akkusähköbussit, ja enemmän liikkuvuutta ja joustavuutta kuin trolley-sähköbussi. Myös investoinnit tuki-infrastruktuuriin arvioitiin pienemmiksi kuin useissa kilpailevissa vaihtoehdossa. Tarkastelussa otettiin kuitenkin huomioon vain välittömät tankkaukseen ja ajoneuvojen huoltoon ja ylläpitoon liittyvät investoinnit, ei koko polttoaineen tuotanto- ja kuljetusketjua.

Eri vaihtoehtojen teknologinen kypsyyssaste myös vaihtelee, mikä heijastuu myös niitä koskevan faktatiedon varmuustasoon. Johdinauto (trolley) on jo kymmeniä vuosia markkinoilla ollut ratkaisu ja polttokennobussilla on takana menestyksellisiä käyttökokeita kymmenen vuoden ajalta, joista on saatavissa luotettavaa tietoa. Sitä vastoin useimmat akkuteknologiaan perustuvat bussitekniikat ovat vasta alkutaipaleella, ja kenttäkokeet vasta alkamassa. Niitä koskeva tieto nyt tehdyssä analyysissä perustuu siis suurimmaksi osaksi mallinnukseen, laskelmiin ja arviointeihin.

Arvioinnin päätulos redusoidtiin näkökulmaan, jossa yhdistyi saavutettavissa oleva kasvihuonekaasupäästöjen vähenemä ja kokonaiskustannukset (total cost of ownership, TCO). Sen tulosta esittää kuva 3.14, jonka mukaan polttokennobussi,

etenkin isokokoisempina nivelmallina on erittäin kilpailukykyinen tarjoten hyvän kustannus/hyötysuhteen päästöjen vähentämisessä.

#### GHG/TCO COMPARISON IN 2030 FOR STANDARD AND ARTICULATED BUSES



Kuva 3.14. Eri bussiteknologioiden vertailu kasvihuonekaasupäästöjen ja kokonaiskustannusten välillä [New-IG 2012].

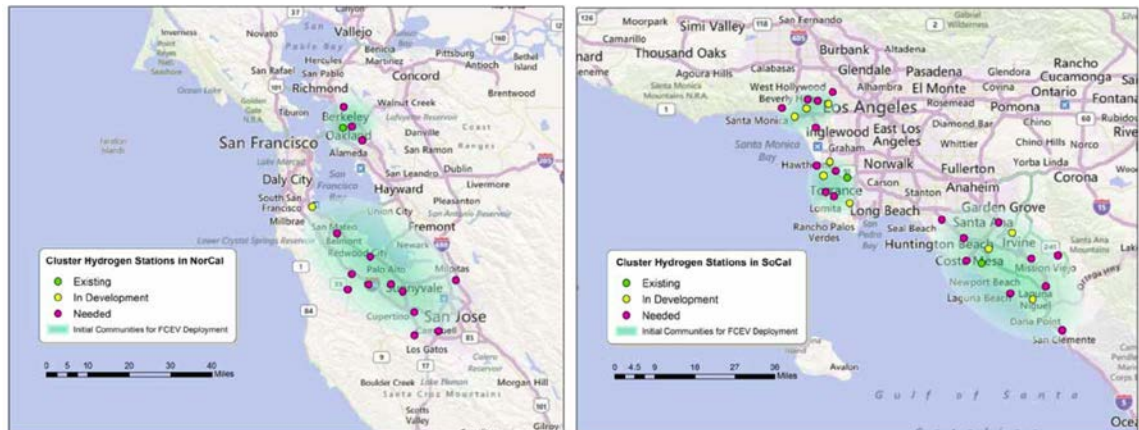
Analyyisin mukaan vaihtoehtoisten teknologioiden hintakilpailukyky paranee voimakkaasti vuoteen 2020 mennessä (12–13 %/a), mutta aikajaksolla 2020–2030 enää vähän hitaammin (2–4 %/a). Kokonaiskustannus kuitenkin lähestyy vähitellen perinteisten teknologioiden kustannuksia, koska niiden kustannusten ennakoitaan taas nousevan. Vaihtoehdosta riippuen vetybussin ”hintapremio” olisi vuonna 2030 noin 15–25 %, kun se nykytasolla on 125 %.

Erityisen tärkeänä polttokennobussin kustannuskehitykselle nähtiin yhteistyö henkilöautoja valmistavan teollisuuden kanssa, jolloin polttokennovoimalaittekehitys ja myöhemmin myös tuotanto saisi vetoapua. Tähän suuntaan vie jo nyt Mercedes-Benzin viimeisin konsepti, jossa voimalaitteessa on kaksi henkilöautossa käytettäväksi suunniteltua 75 kW nimellistehon polttokennoa, joita suunnitellaan suursarjavalmistukseen.

Raportissa nähtiin tarvetta laajalle yhteistyölle myös käyttöönoton nopeuttamiseksi. Suositusten mukaan julkisten tahojen, bussivalmistajien ja teknologia-tuottajien sekä bussioperaattorien kannattaisi pyrkiä yhteistyöhön ja riittävän suuriin yhteenliittymiin, joilla kehitystä ja markkinoille tuloa voitaisiin tukea ja vauhdittaa.

### 3.2.3 Vetytankkausasemien kehitystilanne

Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH ja TÜV SÜD ylläpitävät www-sivuja [H2stations 2012], joilla seurataan vetytankkausasemien kehitystilannetta. 23.11.2012 asemia tietokannassa oli 459. Vetypolttoaineinfrastruktuuria suunnitellaan ja rakentaminen on käynnistynyt ainakin Kaliforniassa, Japanissa, Koreassa, Saksassa ja Pohjoismaissa (Norja, Ruotsi, Tanska). Kaliforniaan on ehdotettu rakennettavaksi 68 asemaa vuoteen 2016 mennessä, kuvat 3.15 ja 3.16 [California 2012].



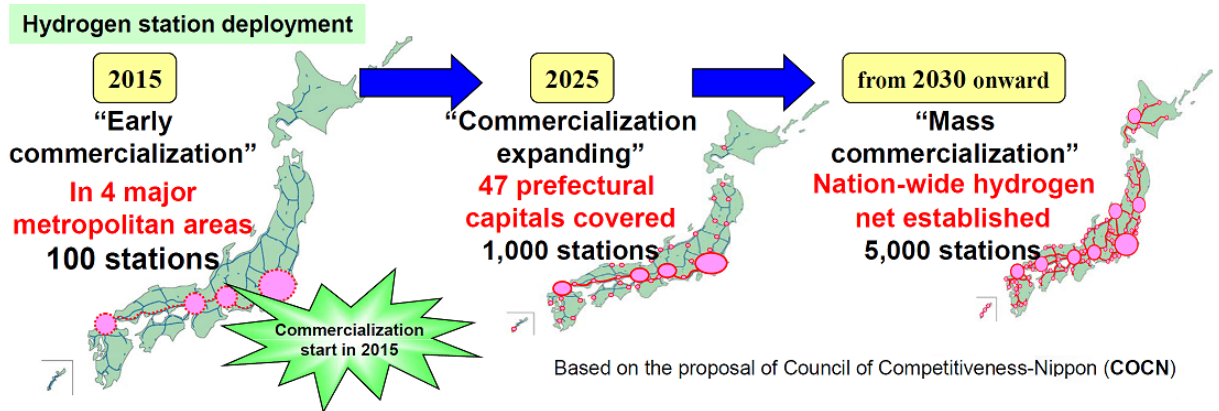
Kuva 3.15. Pohjois- ja Etelä-Kalifornian vetyasemia [California 2012].



Kuva 3.16. Julkinen vetyasema Etelä-Kaliforniassa (Santa Monica, CA) [kuva: Laurikko].

Vetytankkausasemien tekninen kypsyyden on niin hyvä, että ne voidaan sijoittaa normaalille jakeluasemalle, ainakin Kaliforniassa. Säädökset saattavat vaihdella maittain, ja Suomen tilanne on vielä selvityksen alla.

Japanin vetyasemia on esitetty kuvassa 3.17, Korean kuvassa 3.18, Saksan kuvassa 3.19 ja pohjoismaiden kuvassa 3.20.



Kuva 3.17. Japanin vetyasemia [Kawai, 2012].

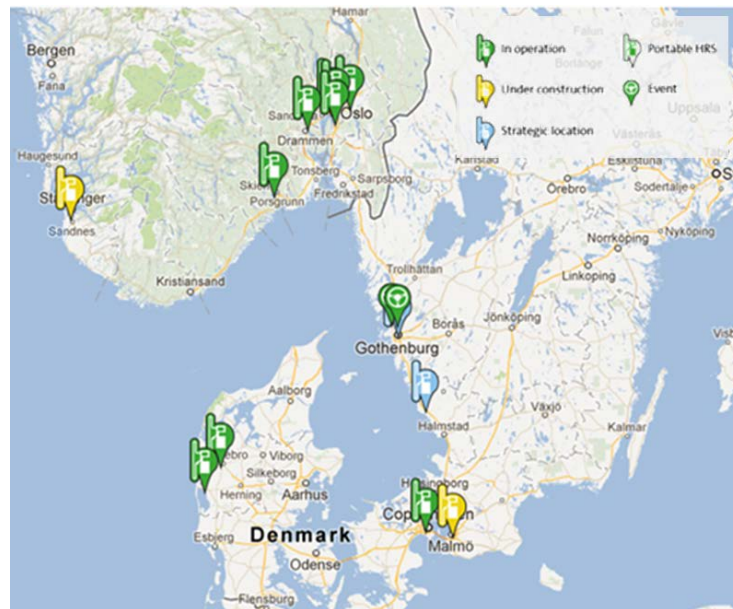


Kuva 3.18. Korean vetyasemia [Kim 2011].





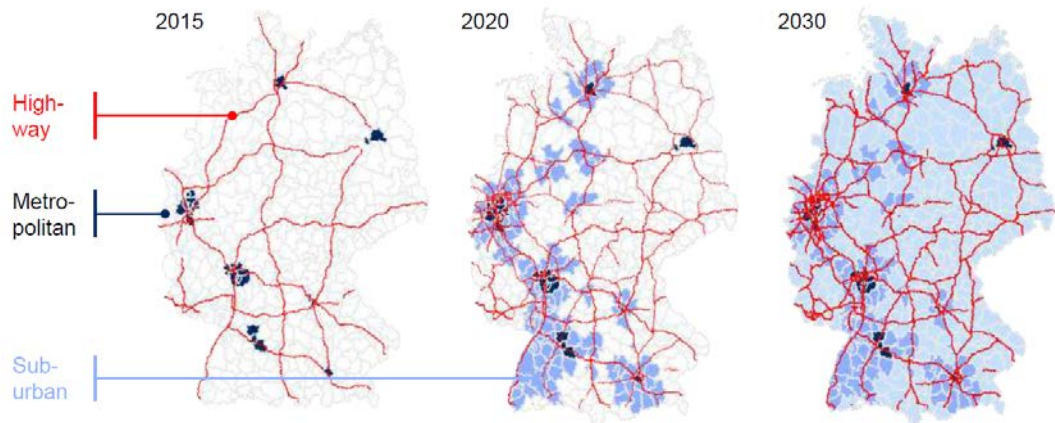
Kuva 3.19. Vetyasemia Saksassa [H2stations 2012].



Kuva 3.20. Pohjoismaisia vetyasemia. [H2stations 2012].

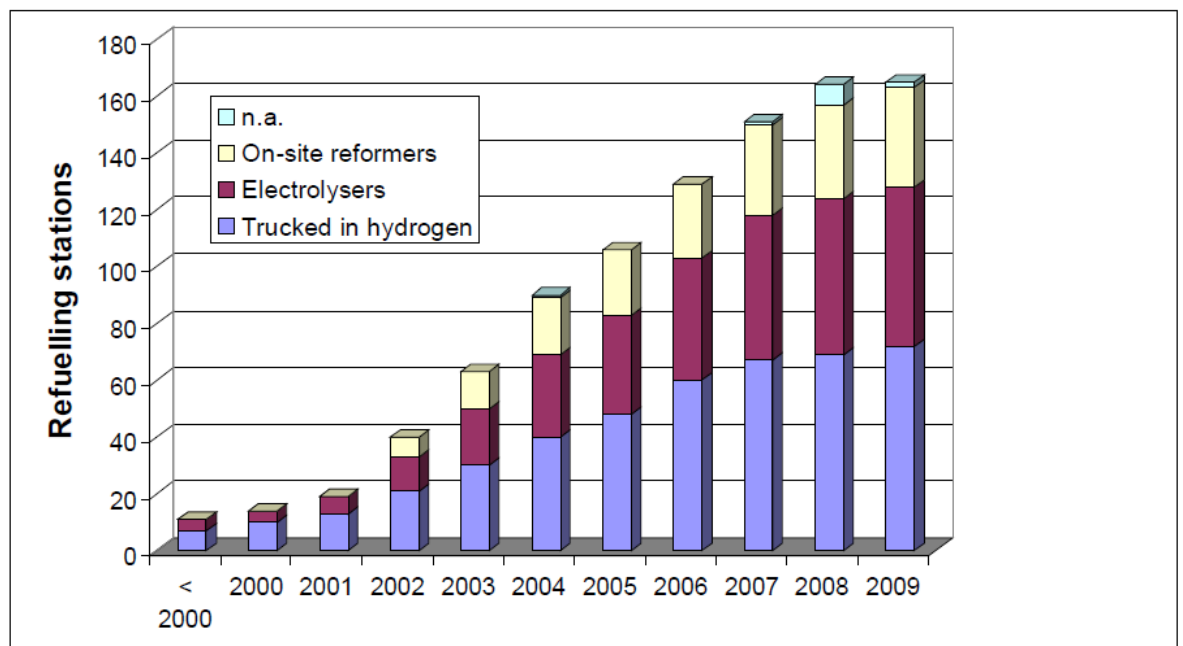
Pienen vetyaseman perustamiskustannus on kohtuullinen. Se on vapaasti sijoitavissa ja siirrettävissä ja korvattavissa isommalla, kun tarve lisääntyy. Vastaavasti sähköauton pikalatausaseman perustamiskustannus on suurehko, ja se tarvitsee tuekseen riittävän vahvan sähköverkon. Se ei ole vapaasti sijoitettavissa, eikä ole siirrettävissä.

Kun vetytankkausinfrastruktuuria aletaan rakentaa, voidaan aluksi tulla toimeen varikotankkauksilla, jos käyttökohteet ovat fleet-tyyppisiä, esim. jakeluoperaattorit tai taksit ja bussit. Myös teollisuusalueet ja satamat sopivat tähän hyvin. Tankkauspaikkojen tarjontaa on oltava monikertaisesti tarpeeseen nähden, kun lähdetään vapaaseen jakeluun. Käyttöaste kasvaa hitaasti, siksi investoinnille tulee pitkä takaisinmaksuaika. Tätä voidaan helpottaa skaalaamalla: aluksi pieni asema, korvataan myöhemmin suuremmalla, ja siirretään pieni asema laajenemisalueelle. Esimerkiksi Saksassa rakennetaan ensin asemia suurkaupunkeihin, joiden väliset yhdyskäytävät pyritään kattamaan seuraavassa vaiheessa, kuva 3.21.



Kuva 3.21. Vetyasemien laajentumisstrategia Saksassa [Herbert 2012].

Vetyasemia voidaan toteuttaa valmistamalla vety paikallisesti elektrolyysillä tai maakaasua reformoimalla tai tuomalla vety rekalla nesteenä tai kaasumaisena pullokonteissa (truck in). Myös kaasun putkikuljetus on mahdollista, mutta vielä harvoin käytössä. Kuvassa 3.22 on tilastotietoa toteutettujen vetyasemien teknologioista [IEA 2012].



Kuva 3.22. Vetyasemien teknologioita [IEA 2012].

### 3.2.4 Liikennekäyttöön liittyviä käytännön kysymyksiä

Vaikka vetykäyttöisille autoille on jo olemassa EU-tyyppihyväksymissäädökset, ja valmistajat tulevat hyväksyttämään markkinoille tulevat autot niiden mukaan, liittyy vedyn liikennekäyttöön vielä useita osin avoimia kysymyksiä, joihin tulee löytää vastaukset ennen kuin liikennöinti voi alkaa ongelmitta. Useimmat niistä liittyvät vedyn käyttöturvallisuuteen, ja voitaneen ratkaista kehittämällä ja yhdenmukaistamalla määräyksiä EU-tasolla. Nyt eri jäsenmaissa säädökset ja käytännöt ovat vaihtelevia.

Ainakin seuraavia tapauksia tulee tarkastella:

- suljetut pysäköintitilat, tunnelit, muut suljetut tilat, kuten esim. autolautat
- vetyjakelupisteen sijoittaminen yhteen muiden polttoaineiden (ja sähkön) kanssa
- korkeapaineisen vetysäiliön ”katsastus”
- Autojen merkitseminen; palo- ja pelastustoimen erityistoimet.

### **Suljetut pysäköintitilat, tunnelit, muut suljetut tilat, kuten esim. autolautat**

Merkittävin seikka, joka tulee ottaa huomioon, jos auto pysäköidään suljetussa tilassa, on vetykaasun korkea varastointipaine (70 MPa, 700 bar).

Vaikka kotipysäköinnissä autotallien osuus on jo pitkään ollut laskusuunnassa, autoja pysäköidään nykyään hyvin yleisesti erilaisissa pysäköintihalleissa. Osa niistä on maan päällisiä, suhteellisen avoimia ja hyvin tuulettuvia rakenteita, osa taas suljettuja, joko rakennusten sisällä tai maan alla sijaitsevia tiloja, joissa tuuletus ja ilmanvaihto on koneellisesti hoidettu. Suljettujen hallien ilmanvaihtoa ohjataan yleisesti erilaisilla antureilla huolehtien siitä, että haitallisten yhdisteiden (häkä, hiilivedyt jne.) pitoisuudet eivät ylitä. Nykyisissä halleissa ei ole ilmaisimia vetykaasulle, joten mahdollisia vetykaasuvuotoja, joista voisi syntyä tulipalo- tai jopa räjähdysriski, ei voida havaita. Vetyilmaisimia on kuitenkin olemassa, samoin osa paloilmalaisimista tunnistaa vetypalon, vaikka siitä syntyvä säteilyemissio onkin ihmissilmälle näkyvän valon alueen ulkopuolella. Nämä tulisi ottaa mukaan vaatimuksiin, jotka koskevat tilojen rakentamista ja ylläpitoa.

Suuripaineisen kaasusäiliön mahdollinen vaurio, joka johtaa äkilliseen paineen vapautumiseen rakenteen rikkoutuessa, voi synnyttää suljetussa tilassa paljon suuremman vahingon kuin vapaassa ulkoilmassa. Vetysäiliöiden korkea paine kasvattaa vaurioriskiä huomattavasti suuremmaksi kuin nykyisten metaania polttoaineena käyttävien kaasuautojen, joiden pysäköintiä suljettuihin tiloihin ei ole rajoitettu, mutta niissä suurin säiliöpaine onkin vain 20 MPa.

Lisäksi metaani on vain vähän ilmaa kevyempi kaasu, joten vapautuessaan se ei pyri kovin voimakkaasti nousemaan ylöspäin, esim. ilmanvaihtokanaviin. Metaanin syttymisrajat ilmassa ovat myös huomattavan kapeat, joten syttymiskelpoisen seoksen syntyminen ei ole kovin todennäköistä. Vety taas on hyvin kevyttä ja nousee nopeasti ylöspäin täyttäen paineettomana tilaa ylhäältä alaspäin, päinvastoin kuin kaasuuntunut hiilivety, joka painuu alaspäin. Purkautuessaan vety siis päätyy ensimmäiseksi katossa oleviin poistoilmakanaviin ja ajotunneleihin, jotka nousevat maanalaisista tiloista ylöspäin vapaaseen ilmaan. Vedyn ja ilman seoksen laaja syttymisalue korostaa riskiä, ja jos alueella esiintyy kipinointia tai avotulta, voi aiheutua räjähdys.

Asetuksen 855/2012 mukaan autotallissa saa olla enintään 60 litraa polttoaineita ajoneuvosäiliössä olevan määrän lisäksi ilman pelastusviranomaisen hyväksyntää. Tilan sähkölaitteissa ja alkusammutuskalustossa tulisi myös huomioida vedyn varastointi. Jos vety on vain ajoneuvosäiliössä, ei määrästä ole mitään erityismääräyksiä. Tämä koskee myös pysäköintihalleja ja korjaamotiloja.

## **Vetyjakelupisteen sijoittaminen yhteen muiden polttoaineiden (ja sähkön) kanssa**

Liikenteen käyttövoimavaihtoehtojen lisääntyessä nousee tarve tuoda niitä nykyisten polttoaineiden rinnalle jakeluverkostossa. Liikennepolttoaineiden vähittäiskaupassa varsinainen polttoaineen myyntikate on nykyään puristettu niin pieneksi, että liikenneasemilla ravintolapalvelut ja muu myyntitoiminta muodostavat merkittävän osan tuloksesta. Jos uusia polttoaineita – kuten vety – ei voida tuoda samaan yhteyteen, on toiminnasta vaikeata saada kannattavaa. Itsenäinen asema, vaikka se olisi miehittämätön eli ns. ”kylmäasema” ilman oheispalveluja, ei tuota kovin hyvin, sillä ainakin aluksi tankkausmäärät ovat hyvin pieniä. Siksi on erittäin tärkeää selvittää, millä edellytyksillä tällaisia ”monipolttoaineasemia” voidaan rakentaa, ja selvittää, miten hyvin mm. säädökset sallivat rinnakaistuksen, ja mitä olisi kehitettävä.

Turvallisuus- ja kemikaalivirastosta (Tukes) saadun tiedon [Tukes 2013] mukaan asiaa ei ole vielä pohdittu. Pelastusviranomaisen on huoltoasemien päävastuuviranomainen ympäristöviranomaisten lisäksi. Asiantuntijan arvion mukaa estettä säännösmielessä tuskin löytyy, mutta ennakkokokemukset maakaasuasemien perustamisesta antavat aiheen olettaa, että ”alkukankeutta” tulee esiintymään. Siksi asiaa on syytä alkaa pohjustaa ajoissa ja kertoa asiat asioina etukäteen mahdollisimman monelle taholle pelastuslaitoksessa.

Voi perustellusti epäillä, että erityisesti korkeaa jännitettä hyödyntävän sähköautojen pikalatauksen järjestäminen rinnakkain vetytankkauksen kanssa voi nousta kynnyskysymykseksi. Tätä asiaa on kuitenkin jo pohdittu maakaasun osalta. Yhteinen näkemys on Tukesin mukaan<sup>5</sup>, että pikalatauspiste voi toimia asemalla kahdella ehdolla: 1) latauspiste ei saa olla EX-alueilla ja 2) liikenteellisesti latauspisteen tulee olla riittävällä etäisyydellä; suositeltava etäisyys 10 metriä.

## **Korkeapaineisen vetysäiliön ”katsastus”**

Vetyautojen korkeapaineiset kaasusäiliöt hyväksytään osana koko ajoneuvon tyyppihyväksymistä. Vaikka teknisesti kyseessä on korkeapaineinen kaasusäiliö, jolle löytyy lukuisia säädöksiä ja tarkastusmenettelyjä, se katsotaan Tukesin mukaan kuitenkin osaksi ajoneuvoa. Siten autojen normaali vuosikatsastus on riittävä myös korkeapainesäiliöiden osalta [Tukes 2013]. Voinee olla kuitenkin tarpeen pohtia, miten säiliö ja laitteet tulisi tarkastaa.

## **Autojen merkitseminen; palo- ja pelastustoimen erityistoimet**

Osin edellä mainitusta korkeapainesäiliöstä johtuen, osin vedyn lähes näkymätömään palamiseen liittyen vetykäyttöisten autojen merkitsemistä edellytetään eräissä maissa, vaikka auto olisikin normaalisti tieliikenteeseen hyväksytty. Esimerkiksi Yhdysvalloissa vaaditaan polttoaineen täyttöaukon kanteen tai muualle auton takaosaan sinipohjainen vinoneliötarra, jossa valkoisella tekstillä ”Compressed Hydrogen” (ks. kuva 3.23). Se toimii signaalina palo- ja pelastustoimien suorittajille, että nämä osaavat suhtautua autoon oikealla tavalla. Suomessa mitään merkintää ei ole säädöksillä määrätty.

Lopuksi pitää kuitenkin todeta, että vety ei ole sen vaarallisempi tai vaarattomampi kuin nykyiset polttoaineet, mutta monilta ominaisuuksiltaan se on erilainen,

mikä tulee ottaa huomioon turvallisuuskysymyksiä tarkasteltaessa.



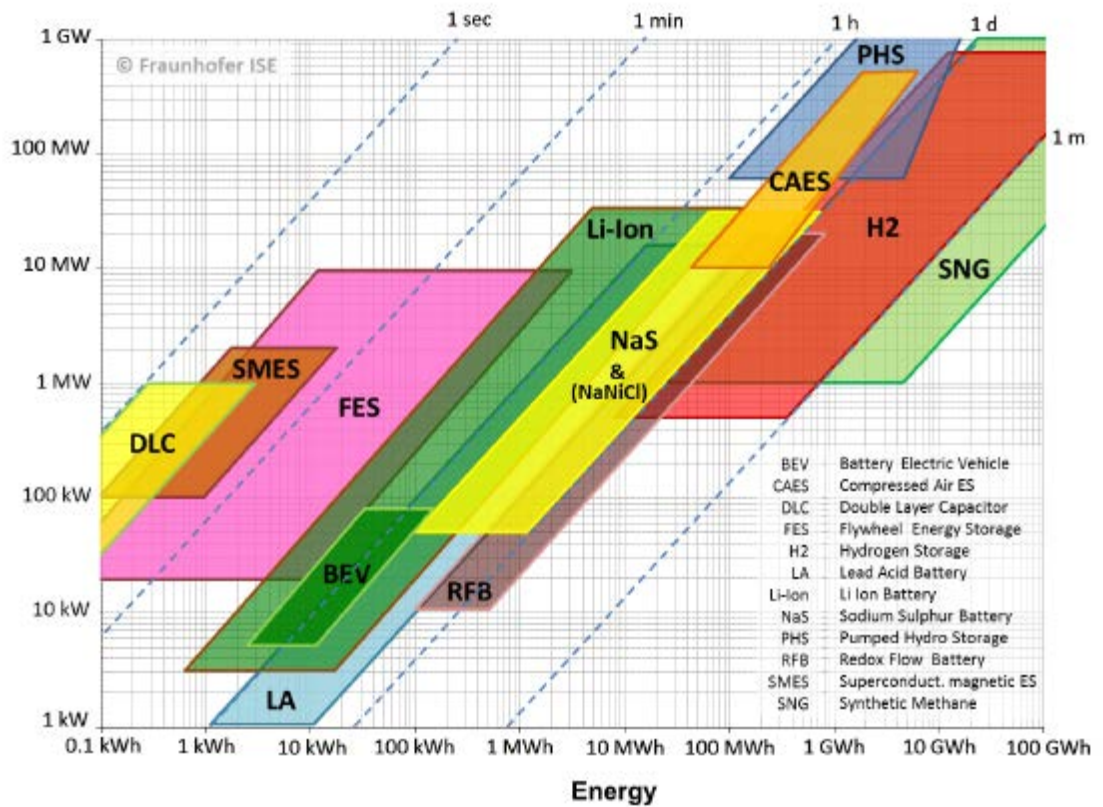
*Kuva 3.23. Yhdysvalloissa painevetykaasua käyttävän auton polttoaineen täyttöaukossa on oltava merkintä [Kuva: Laurikko].*

### 3.3 Vedyn käyttö uusiutuvien energioiden varastona

#### 3.3.1 Energiavarastojen tarve

Maailman fossiilisten polttoaineiden kulutus on  $1.2 \cdot 10^{14}$  kWh/v. Tämän korvaamiseksi kokonaan tarvittaisiin 5 miljardia tonnia vetyä, mikä on satakertainen määrä vedyn nykyiseen teollisuuskemikaalikäyttöön verrattuna [Züttel 2007].

Energiaa voidaan varastoida monissa muodoissa. Lämpövarastoiden lämmön arvo riippuu lämpötilasta, mitä voidaan kuvata exergialla. Exergia-analyysit ovat tehokas tapa analysoida energiakonversioprosessien hyötysuhteita [Winter 2009]. Kemiallisten polttoaineiden ja sähkön exergia-arvo on suuri, joten vetyä on ajateltu käytettävän lähinnä sähköenergian varastona. Sähköenergian varastointitekniikan soveltuvuus riippuu varastoitavan energian määrästä ja varastointiajasta, kuva 3.24. Yli vuorokauden varastointitarve MW-kokoluokassa voidaan kattaa vain pumppuvesivoimalla tai kemiallisilla energian kantajilla, joista paras konversiohyötysuhde on vedyllä.



Kuva 3.24. Energian varastointiteknikoiden soveltuvuusalue [Hebling 2012].

Tarkempia arvioita sähköenergian varastointitarpeesta on tehty Saksassa (ja Tanskassa), kun tuuli- ja aurinkoenergioiden osuus sähkön tuotannossa nousee merkittäväksi. Saksassa 5 % sähköstä tuotetaan aurinkosähköllä ja 9 % tuulivoimalla. (Tanskassa tuotetaan 20 % tuulivoimalla). Saksassa joudutaan jo nyt säättämään ruskohiili- ja ydinvoimaloita tuulisina viikonloppuina, jolloin sähkön kulutus on vähäistä. Vuonna 2020 tavoitteena on tuottaa 35 % ja vuonna 2050 80 % sähköstä uusiutuvilla [Hebling 2012]. Sähkön varastointitarpeeksi vuonna 2050 on arvioitu 40 TWh [Diwald 2012]. Maakaasuverkon varastokapasiteetiksi on arvioitu 110 TWh ja maanalaisten kaasuväylien yli 200 TWh, mikä olisi suuruusluokaltaan riittävä tulevaisuuden tarpeisiin.

### 3.3.2 Autonomiset järjestelmät

Vetyä autonomisten tuuli- ja aurinkoenergiajärjestelmien energiavarastona on tutkittu eri mittakaavoissa. Fraunhofer Institute for Solar Energy (ISE) rakensi 1990-luvun alussa Freiburgiin autonomisen aurinkoenergiatalon, jossa energian kausivarastointi oli toteutettu käyttäen polymeerielektrolyysiin ja -polttokennoon perustuvaa vetyvarastoa 1 kW kokoluokassa [Smolinka 2012]. Samaan aikaan Neste Oy/Naps kehitti Suomessa vastaavaa järjestelmää pieniin aurinkosähköjärjestelmiin. Areva on rakentanut Korsikan saarelle suuremman yli 100 kW kokoluokan järjestelmän, kuva 3.25.



Kuva 3.25. Arevan MYRTHE-projekti Korsikalla [Poggi 2012].

### 3.3.3 Älykkäät energiaverkot ja hybridivoimalaitokset

Älykkäissä energiaverkoissa ajatuksena on, että sähkö-, kaukolämpö- ja maakaasuverkkojen rinnalle rakennetaan vetyinfrastruktuuri ja että järjestelmää pyritään ohjaamaan mahdollisimman tehokkaasti. Sähköverkossa voi olla runsaasti uusiutuvaa tuotantoa (aurinko, tuuli, biokaasu), mutta myös heikosti säädettävää perusvoimaa (ydinvoima, ruskohiili). Alhaisen kulutuksen ja halvan sähkön aikaan tuotetaan elektrolyyttisesti vetyä, jota käytetään tarpeen mukaan liikennepolttoaineena, varastoidaan tai syötetään maakaasuverkkoon joko vetynä tai synteettisenä metaanina. Huippukuorman aikana vedystä ja/tai synteettisestä metaanista tehdään sähköä ja kaukolämpöä polttokenno- tai kaasuturbiinilaitoksessa. Esimerkki tällaisesta hybridivoimalaitoksesta on Berliinin uudelle lentokentälle suunniteltu järjestelmä, kuva 3.26. Enertrag AG:lla on vastaava laitos jo koekäytössä Prenzlaussa Saksassa.



11

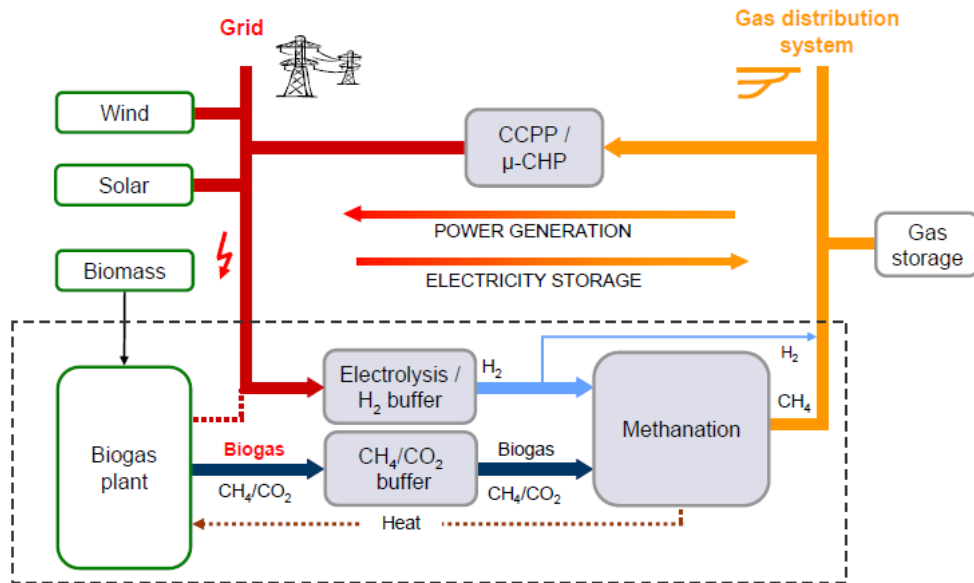
Kuva 3.26. Berliinin lentokentän hybridivoimalaitos [Diwald 2012].

### 3.4 Vety synteettisten polttoaineiden tuotannossa

Vedyn laajamittainen energiakäyttö vaatii mittavat investoinnit infrastruktuuriin. Investointikustannuksiltaan huomattavasti edullisempi tapa varastoida ja siirtää uusiutuvaa energiaa olisi käyttää olemassa olevaa maakaasuinfrastruktuuria tai käyttää vetyä nestemäisten polttoaineiden tuotannossa. Jokaisessa konversiovaiheessa tapahtuu kuitenkin häviöitä ja kaikkien hiilipitoisten polttoaineiden loppukäyttökohteissa syntyy paikallisia päästöjä ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , hiilivedyt, hiukkaset).

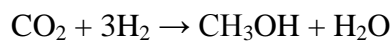
Synteettistä maakaasua voidaan tehdä metanointiprosessissa, jossa vety reagoi hiilimonoksidin tai -dioksidin kanssa. Hiilidioksidiin perustuvat prosessit ovat vielä kehitysasteella, mutta ensimmäisiä demonstraatioita on jo tehty. Esimerkiksi Stuttgartissa ollaan käyttöönottamassa tällaista 250 kW power-to-gas (P2G) koelaitosta. Vety tuotetaan elektrolyytisesti ja hiilidioksidi voidaan ottaa talteen esim. biokaasuprosessista tai myöhemmin fossiilisia polttoaineita käyttävistä voimalaitoksista, jotka on varustettu hiilidioksidin talteenotolla (CCS). Kuvassa 3.27 on esitetty periaate biokaasulaitoksen yhteyteen integroidusta P2G-konseptistä. Audi ja SolarFuels ovat skaalaamassa teknologiaa 1500 maakaasuauton tarpeisiin [Specht 2012].





Kuva 3.27. Synteettisen maakaasun tuotanto biokaasulaitoksen yhteydessä [Specht 2012].

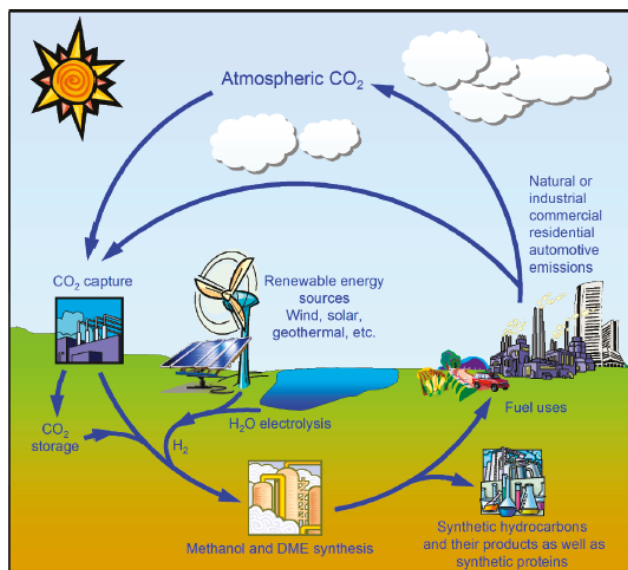
Nestemäisistä polttoaineista energian kantajana voisi toimia metanoli tai dimetyylieetteri (DME), joista jälkimmäistä mm. Volvo on käyttänyt raskaissa ajoneuvoissa dieselin korvaajana. Metanolisynteesi:



on hyvin tunnettu kemiallinen prosessi. Metanolista saadaan reformoitua uudelleen vetyä alhaisessa 300 asteen lämpötilassa. DME:tä valmistetaan metanolia kuivaamalla:

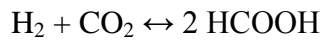


Metanoli/DME -talouden periaatekuva on esitetty kuvassa 3.28.



Kuva 3.28. Metanolitalouden periaate [Olah 2011].

Brookhavenin kansallislaboratoriossa (BNL) tutkitaan muurahaishapon käyttöä vedyn kantajana ja on kehitetty huoneen lämpötilassa toimiva katalyytti käänteisille reaktiolle [Hull 2012]:



Sekä muurahaishappoa että metanolia voidaan hapettaa suoraan sähkökemiallisesti polymeeripolttokennoissa.

(Bio)etanolin tuotannossa ei tarvita vetyä, mutta biodieselin tuotanto kuluttaa enemmän vetyä kuin dieselin tuotanto raakaöljystä. Mielenkiintoinen konsepti voisi olla prosessi, jossa tuotetaan elektrolyytisesti vetyä ja happea uusiutuvalla energialla tai ydinvoimalla. Happi käytettäisiin biomassan kaasutukseen ja vety rasvojen hydruukseen tai synteetikaasun muokkaukseen [Hawkes 2010, Graves 2011].

### 3.5 Polttokennot sähkön ja lämmön tuottajana, mikro-CHP

Kiinteistösektorin sähkö- ja lämmitysratkaisuilla vaikutetaan tehokkaimmin kokonaispäästöjen vähentämiseen. Toisaalta lähtökohtamme poikkeaa niistä yhteiskuntarakenteista, mistä malleja on saatavissa. Eli Suomessa tulee valittavaksi olosuhteisiin parhaiten istuvat ratkaisut. Suuntaa voi ottaa jo laajalla rintamalla muualla käynnistyneistä hankkeista.

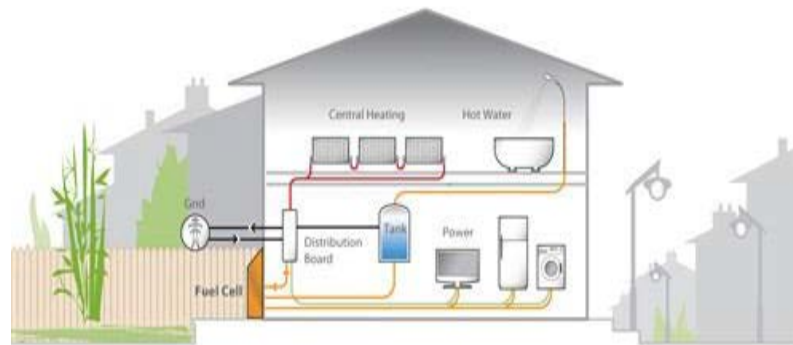
Omakotitalojen kohdalla puhutaan mikro-CHP (pieni yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto) laitteista. Tähän ryhmään kuuluvat kaasukäyttöiset yhdistetyt sähkön ja lämmöntuottajat, stirlingmoottoreilla toimivat vastaavat laitteet ja polttokennot, jotka tuottavat sekä sähköä että lämpöä omakotitalojen tarpeisiin. Mikro-CHP-polttokennomarkkinat ovat alkaneet maissa, joissa yksityisiin taloihin on kautta aikojen tullut maakaasu suoraan verkostosta. Siihen on helppo yhdistää kiinteäoksidi (SOFC) polttokenno. Toisena valintana on polymeeripolttokenno (PEMFC), mikä edellyttää kaasun muuntamisen vedyksi ennen kennostoon syöttöä.

Polttokennojen etuina perinteisiin boilereihin tai konventionaalisella tekniikalla toimiviin mikro-CHP-laitteisiin on niiden korkea sähköhyötysuhde. Verkosta tuleva maakaasu muunnetaan vedyksi. Siitä saadaan energiasisällöstä n. 30 % sähkötehoa ja 60 % lämpöä. Vain n. 10 % ostetusta energiasta hukataan häviöinä. Perinteiset kattilat ja muut järjestelmät jäävät hyötysuhteeltaan kauas jälkeen [Harrison 2010].

Vuosi 2012 on ollut läpimurtovuosi mikro-CHP-laitteille. Japanilaiset kodit ovat tässä uranuurtajia. Siellä ollaan jo kaupallisen markkinoinnin kynnyksellä, kuva 3.29. Nopean kehityksen on mahdollistanut vähäpäästöisten yksityisten investointien tukemiseksi luotu konsepti. Mikro-CHP-polttokennojärjestelmän hinta oli 2010 n. 32 000 € ja siihen sai n. 50 % valtion tukea. Nykyään tuki on 800.000 jeniä/laitos (8.000 €). Hinnan on arvioitu laskevan muutamassa vuodessa n. 8 000 euron tasolle, jolloin tukea ei enää tarvittaisi.

Tähän mennessä Japanissa on asennettu näitä n. 1 kW<sub>e</sub> polttokennojärjestelmiä yli 20 000 talouteen, kuva 3.30. Tästä eteenpäin on ennustettu uusia käyttäjiä tulevan vuosittain yli 20 000, kunnes määrän odotetaan nousevan 50 000 vuosittaiseen

asennukseen vuonna 2015 [Industry Review 2012].



*Kuva 3.29. Mikro-CHP-PEM-polttokenno asennettu jo 20 000 japanilaiseen talouteen [Fuelcelltoday 2012].*



*Kuva 3.30. Mikro-CHP-järjestelmä ei vie paljon tilaa [ENE Farm 2009].*

Muulla eturintamassa ollaan vielä kokeiluvaiheessa, mikä merkitsee yhteensä korkeintaan muutamaa tuhatta järjestelmää Koreassa, Saksassa, Hollannissa, Tanskassa, Britanniassa ja muutamissa USA:n osavaltioissa, kärkipäässä Kalifornia ja Havaijin saaret.

Britanniassa tuetaan mikro-CHP-laitteiden käyttöönottoa ainakin syöttötariffin kautta. Ensimmäisillä laitetoimittajilla on myös mahdollisuus alkavien markkinoiden tukeen. Energiapoliittisesti osittain suunnittelemattomassa tilassa pelätään, että vuoteen 2016 mennessä voi sähkön tuotantoon tulla jopa 45 %:n vajaus. Talokohtaiset mikro-CHP-laitteet voisivat ainakin osaksi kompensoida pelättyä vajetta. Merkittävään vaikutukseen valtakunnan tasolla päästään kuitenkin vasta useiden miljoonien järjestelmien käyttöönotolla. Houkutusena kotitalouksille on oma turvattu sähköntuotanto riippumattomana mahdollisista verkostohäiriöistä. CHP-järjestelmällä vältetään myös jakeluhäviöt sekä lämmön että sähkön osalta ja saavutetaan huomattavasti keskitettyä tuotantoa parempi hyötysuhde. Syntyvä taloudellinen etu tulee tässä tapauksessa suoraan käyttäjälle.

Saksan Callux [Callux 2012] projektissa on asennettu 200–300 mikro-CHP-laitosta. Paikalliset energiayhtiöt asentavat ja operoivat laitoksia ja kuluttaja maksaa vain sähköstä ja lämmöstä.

Mikro-CHP-laitokset ovat yleensä joko PEMFC- tai SOFC-pohjaisia ja käyttävät maakaasua, nestekaasua tai kerosiinia polttoaineena. Tanskan Lollandin saarelle on rakennettu koejärjestelmä, jossa tuulivoimalla tuotetaan vetyä paikalliseen vetyverkkoon, johon on kytketty vetykäyttöisiä mikro-CHP laitoksia [hydrogennet.dk 2012]. Vetykäyttöisissä CHP-laitoksissa päästään alhaisempaan kustannukseen, kun polttoaineprosessoria (reformointiyksikkö) ei tarvita.

Potentiaalisena vaihtoehtona mikro-CHP järjestelmien polttoaineeksi voi myös pitää biomassan kaasutusta. Valittavat menetelmät ovat ainakin vielä kalliita eikä niihin liity pienen mittakaavan laitteistojen massatuotantoa. Tämän hetken näkymät viittaavat lähinnä maatilakokoluokkaa olevalle yksikölle soveltuvaksi jäte-  
lietteen tai muun biomassan kaasutukseen. Siinä raaka-aineen eli polttoaineen tuotanto olisi ilmeisen tasaista ja soveltuisi hyvin mikro-CHP polttokennolle.

### 3.6 Vety varavoimana

Vetyä ja polttokennoja voidaan käyttää myös esim. telekommunikaatioasemien, datakeskusten, sairaaloiden ja maatilojen varavoimana ja siten parantaa yhteiskunnan huoltovarmuutta. Esim. Tanskan viranomaisverkon ja USA:ssa useiden datakeskuksen varavoimaratkaisut on toteutettu polttokennoilla [State of the States 2012]. Nokia Siemens Networks on juuri tehnyt yhteistyösopimuksen Ballard Power Systemsin kanssa [Tekniikka ja Talous 2012].

Vety-polttokennoautot tarjoaisivat huomattavan varavoimareservin, jos ne varustettaisiin sähkövirran ulosottomahdollisuudella [Winter 2009]. Lisäksi vaadittaisiin teknologiaa autojen kytkemiseksi talokohtaiseen tai paikalliseen sähköverkkoon. Esimerkiksi 100.000 polttokennoauton varavoimateho olisi 5–10 GW. Auton tyypillinen käyttöaika on noin tunti päivässä, jolloin tämä varavoimareservi voisi olla käytössä lähes koko ajan.

### 3.7 Vety-yhteiskunnan rakentamiseen tarvittavat materiaalit

Vetyenergian hyödyntäminen asettaa vaativia haasteita materiaalitekniikan ja -tieteen kehitykselle. Varsinkin vetyenergian käytännön sovellutuksiin tähtäävissä tutkimusyksiköissä materiaalitiede on keskeisessä asemassa. Polttokennoissa ja elektrolyysilaitteissa käytettävät katalyytit ja rakennemateriaalitkin ovat atomitasolle menevän materiaalitutkimuksen kohteena. Polttokennoissa tarvittavien harvinaisten maametallien määrä vaikuttaa voimakkaasti niiden hintaan. Esimerkkinä: autoteollisuus on platinapinnoitettujen nanoputkien avulla saavuttamassa vaiheen, jossa polttokennoon tarvittava määrä alittaa polttomoottorin pakoputkeen asennetussa katalysaattorissa olevan. Samaan aikaan laboratorioissa kehitetään katalyytteja, joissa ei ole lainkaan näitä strategisia metalleja.

Vety muodostaa erityisen haasteen myös sen käsittelyyn tarvittavan infrastruktuurin – painelaitteiden, putkistojen, venttiilien jne. – käytettävyydelle ja turvallisuudelle. Teräksen valmistuksessa ja hitsauksessa teräkseen jäävä vety on Suomessakin ollut pitkään haasteena ja tutkimuksen kohteena. Vedyn vaikutus tunnetaan hyvin myös offshore- rakenteiden katodisen suojauksen ”sivutuotteena”, kun katodisen suojauksen takia teräkseen tunkeutuva vety kiihdyttää väsymissärön kasvua ja lisää rakenteen murtumisriskiä. Metallien kanssa koske-

tuksessa oleva korkeapaineinen vety muodostaa samantapaisen, mutta kertaluokkaa vaikeamman haasteen.

Vetyenergian liikennesovellutuksissa kansainvälinen standardi on, että autojen polttoaineeksi tankataan kaasumaista vetyä 700 bar paineeseen. Vetytankkaus- aseman bufferiastioissa paine on sitäkin suurempi. Vedyn maantiekuljetukset tapahtuvat yleensä 200–300 bar paineistetuissa pulloissa ja kuljetusastioissa, joskus myös nesteytettynä. Kaikissa näissä sovellutuksissa uhkana on vetyhaurastuminen tai siihen rinnastettava materiaaliominaisuuksien muutos. Atomaarisiksi dissosioitunut vety kykenee tunkeutumaan metalleihin ja liikkumaan metallihilan välisijoissa matalassakin lämpötilassa. Tämän selittää vetyatomien pieni koko. Tarkkaan ottaen vetyatomiin kuuluva elektronikin liittyy osin metallissa olevien ”yhteisten elektronien” joukkoon ja jäljelle jää vain protoni, joka voi helposti siirtyä välisijasta toiseen. Tällöin vaarana on vedyn diffuusio ja kerääntyminen ylittäen vaaralliseksi katsottavan pitoisuuden paikallisesti. Tällaisia kohtia ovat materiaalin epäjatkuvuuskohdat, sulkeumat, huokokset ja erityisesti säröt. Lujassa teräksessä olevan särön kasvunopeus voi kasvaa vedyn johdosta jopa 3–4 dekadilla, eli esimerkiksi paineastian vaurioon johtavien painesykliä lukumäärä ja turvallinen käyttöikä voi supistua 1/1000 osaan. Tällaiselle ilmiölle altista materiaalia ei voida hyväksyä vetyastioihin.

Erityisesti USA:ssa ja Japanissa, jonkin verran myös Euroopassa on panostettu hyvin monimutkaisten vety-materiaali vuorovaikutusten ymmärtämiseen, mittaamiseen ja hallitsemiseen. Turvalliset, mutta laajamittaiseen infrarakentamiseen ajateltuna turhan kalliisiin materiaaleihin perustuvat ratkaisut ovat tiedossa. Vetyenergiajärjestelmän yleistyminen ja infrastruktuurin rakentaminen ovat sidoksissa materiaalien käytettävyyden saralla tapahtuvaan tekniseen kehitykseen ja kansainvälisesti harmonisoituun turvallisuusnormiston luomiseen.

Vientiin tähtäävän suomalaisen metalliteollisuuden kannalta tämä muodostaa haasteen. Sekä materiaaliratkaisut että niihin kohdistuvat vaatimukset ovat nopean muutoksen kohteena. Toisaalta, kansainvälisesti hyväksytyjen ja harmonisoitujen vaatimusten kehityksen ennakoiminen luo merkittäviä liiketoimintamahdollisuuksia sektorilla, joilla halvan massatuotannon tekijöillä ei ole mahdollisuuksia.

### 3.8 Kansallisia ja alueellisia strategioita

Vety- ja polttokennoteknologioissa kuten muissa puhtaan energiatekniikan kehityshankkeissa yhdistyvät energia-, ilmasto-, teollisuus- ja työllisyyspolitiikka. Eri maiden välillä on kuitenkin selkeästi nähtävissä painotuseroja.

#### *Energia-, ilmasto- ja teollisuuspolitiikka*

Työ- ja elinkeinoministeriö kuvaa verkkosivuillaan EU:n energiapolitiikkaa seuraavasti [TEM 2011]:

”EU:ssa kukin jäsenmaa huolehtii itse energiapolitiikastaan. EU:n sisäinen yhteistyö ja energiaa koskevien tavoitteiden asettaminen on kuitenkin tiivistynyt vuosien myötä ja Lissabonin sopimuksen voimaantulo loi yhteisön energiapolitiikalle selkeämmän oikeudellisen perustan.

EU:n energiapolitiikan peruseriaatteet ovat kestävyys, kilpailukyky ja toimitus-

varmuus. EU:n energiapolitiikan tavoitteet ovat yhteneväiset Suomen kansallisten tavoitteiden kanssa eli unionin yhteisellä energiapolitiikalla pyritään kilpailukyysiin energian hintoihin, energian riittävän ja häiriöttömän saatavuuden takaamiseen ja ympäristövaikutusten vähentämiseen.

EU:n **ilmasto- ja energiapolitiikasta** annettiin merkittävä lainsäädäntöpaketti huhtikuussa 2009. Tämä niin kutsuttu 20-20-20 tavoite tarkoittaa, että vuoteen 2020 mennessä tulisi EU:n energiankulutuksesta 20 % saada uusiutuvista lähteistä, EU:n kasvihuonekaasupäästöjä tulisi vähentää 20 % sekä energiatehokkuutta lisätä 20 %. Suomi sai uusiutuvan energian käytön tavoitteekseen 38 % vuoteen 2020 mennessä.

EU:ssa pyritään edistämään **tutkimusta ja kehitystä** energiasektorilla erityisesti puiteohjelmien kautta.”

Euroopan komission energiapolitiikka määritetään dokumentissa **Energia-politiikka Euroopalle** [KOM 2007] ja energiastrategia kuvataan dokumentissa **Energia 2020, Strategia kilpailukykyisen, kestävä ja varman energiansaannin turvaamiseksi** [KOM 2010]. Tärkeä osa komission energiapolitiikkaa on teknologiasiirtymän aikaansaaminen sähköntuotannon ja liikenteen hiili-intensivisyyden vähentämisessä. Tämä teknologiasiirtymä on kuvattu **Euroopan strategisessa energiateknologiasuunitelmassa** [SET-Plan 2007].

Energian varastoinnin kehittämisen yhteydessä mainitaan vetyteknologia yhtenä kehityskohteena.

**SET-Plan** identifioi kahdeksan kehitysaloitetta energiatekniikan kehittämiseksi; yksi näistä on Polttokenno- ja vetyteknologia (Fuel Cells and Hydrogen Joint Technology Initiative **FCH JU**). FCH JU toteutetaan vuosina 2008–2013 komission ja teollisuuden yhteishankkeena ja sen budjetti on noin 1 miljardi euroa. FCH JU:lla on **Multi-Annual Implementation Plan 2008–2013** [FCH JU 2011], missä kuvataan aloitteen strategiset tavoitteet ja tutkimusalueet budjetineen. Hankkeelle suunnitellaan jatkoa, mikä on kuvattu alan teollisuuden ryhmittymän (New Energy World Industry Grouping) julkaisemassa raportissa **Fuel Cell and Hydrogen technologies in Europe, Financial and technology outlook on the European sector ambition 2014–2020** [New Energy World 2011] sekä Euroopan komission julkaisemassa tiekartassa **Public-Private Partnership on Fuel Cell and Hydrogen in Horizon 2020** [European Commission Roadmap 2012]. Jatkohankkeen toteutuminen on kytköksissä komission budjetineuvotteluihin. Ratkaisuun vaikuttaa myös käynnissä oleva kahdeksan kehitysalueen evaluointi.

SET-Planilla on vuosittain päivitettävä laaja tausta-aineisto, jonka kokoaa komission yhteinen tutkimuskeskus (JRC). Viimeisin raportti on **2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan), Technology Descriptions** [EUR 2011]. Raportissa on laaja luku polttokenno- ja vetyteknologiasta. SET-Planiin liittyvää tausta-aineistoa julkaistaan komission yhteisen tutkimuskeskuksen ylläpitämällä nettisivuilla [SETIS 2013].

FCH JU on myös itse teettänyt useita selvityksiä alan kehitystrendeistä. Nämä selvitykset ovat tulossa julkisiksi tämän tiekartan valmistumisen jälkeen.

Komissio on myös julkaissut dokumentin **Energia-alan etenemissuunnitelma (Road Map) 2050** [KOM 2011], jossa kuvataan energiapolitiikan tavoitteet ja

suunnitelmat vuoden 2020 jälkeen vuoteen 2050 saakka. Dokumentissa painotetaan SET-Planin tärkeyttä. Tässä yhteydessä mainitaan erityisen tärkeinä asioina tieto- ja viestintäteknologian hyödyntämistä energia- ja liikennealalla ja älykäsissä kaupunkisovelluksissa sekä siirtyminen vaihtoehtoisiin polttoaineisiin. Jälkimmäisen tavoitteen saavuttamiseksi painotetaan uusia tutkimus- ja demonstraatiotoimia, jotka koskevat erityisesti akkuja, polttokennoja ja vetyä.

Kansainväliset organisaatiot, kuten **IEA**, ovat julkaisseet erilaisia tulevaisuuteen ulottuvia selvityksiä. Merkittävä uusi selvitys on esitetty IEA:n vuonna 2012 julkaisemassa **Energy Technology Perspectives 2012** kirjassa [IEA 2012a]. Vetyä käsittelevässä luvussa todetaan, että vedyllä voisi olla merkittävä rooli matalahiilissä energiasysteemissä, mutta tämä riippuu monista tekijöistä, kuten systeemitason integraatiosta. Vedyn kasvanut rooli voisi auttaa välttämään liiallista riippuvuutta muista vähähiilistä energialähteistä, erityisesti bioenergiasta.

Yhteenvedona IEA:n analyysistä esitetään seuraavaa:

- vety on monipuolinen energiankantaja, jolla voisi olla sovelluksia kaikilla loppukäyttösektoreilla
- vedyllä voisi olla merkittävä rooli matalahiilissä tieliikennesysteemissä
- vetyä voitaisiin käyttää rakennuksissa ja enenevässä määrin teollisuudessa
- vety saattaa tulla erityisen tärkeäksi hyvin pitkällä tähtäimellä
- laajamittainen vetyenergian varastointi voisi edesauttaa uusiutuvan energian käytön merkittävää lisäämistä tulevaisuudessa
- vedyn siirto- ja jakelusysteemin rakentaminen tulee vaatimaan merkittäviä investointeja
- vetyinfrastruktuurin pystyttäminen tulee vaatimaan kaikkien potentiaalisten osapuolten koordinoitua toimintaa.

Lopuksi esitetään merkittävää lisäystä tutkimus-, kehitys- ja demonstraatiotoimintaan, IEA:n piirissä on merkittävää koordinoitua ja maailmanlaajuista vetyyn liittyvää tutkimus-, kehitys- ja demonstraatiotoimintaan **Hydrogen Implementing Agreementin** puitteissa [IEA HIA], johon Suomikin osallistuu Tekesin kautta.

### 3.8.1 Saksa

Saksassa on päätetty luopua ydinvoimasta vuoteen 2022 mennessä ja satsata voimakkaasti uusiutuviin energioihin [BMU 2012]. Tämän ns. Energiewenden tavoitteena on tuottaa 18 % primäärienergiasta ja 35 % sähköstä vuonna 2020 uusiutuvilla. Vastaavat tavoitteet vuodelle 2050 ovat 60 ja 80 %. Vetyä tarvitaan tehostamaan liikenteen energiankäyttöä ja varastoimaan aurinko- ja tuulivoimaa. Etenkin polttokennoautoihin ja niiden polttoaineinfrastruktuuriin liittyvät teknologiat nähdään teollisuuspoliittisesti tärkeinä. Liittovaltion keskeinen rahoitusinstrumentti on National Innovation Programme (NIP) for Hydrogen and Fuel Cell Technologies, jota koordinoi NOW GmbH [NOW 2012]. Polttokennoautojen ja vetytankkausasemien edistämiseksi on perustettu Clean Energy Partnership (CEP) -teollisuuskonsortio [CEP 2012]. Liittovaltion vety- ja polttokennorahoitus 2006–2016 on 700 M€ ja teollisuus osallistuu kehitykseen vastaavalla summalla, jolloin kokonaisvolyyymi nousee 1.4 Mrd€oon.

### 3.8.2 Tanska

Tanskassa pyritään nostamaan tuulivoiman osuus nykyisestä 20 %:sta 50 %:iin vuoteen 2020. Tämä vaatii huomattavaa säätövoiman ja energiavarastojen tarvetta, missä vety- ja polttokennoteknologioilla nähdään keskeinen sija. Vetyä tuotettaisiin tuulivoimalla ja käytettäisiin hajautettuun sähkön tuotantoon kiinteistöissä, liikennepolttoaineena ja biopolttoaineiden tuotannossa. Tanska pyrkii rakentamaan vety- ja polttokennoteknologioista uuden vientiteollisuusklusterin tuulivoiman tapaan. Tanskassa, jossa on Euroopan kovin autoverotus, myönnetään vety- ja sähköautoille verovapaus. Tanskan yksityiskohtaiset energia- ja vetystrategiat ovat ladattavissa internetistä [ens.dk 2012, hydrogenet.dk 2012].

### 3.8.3 Norja

Norja pyrkii edistämään vähäpäästöisiä energiateknologioita ja on laatinut vetyteknologioille kansallisen strategian [Handlingsplan 2012; FuelCellToday 2013]. Strategian keskeisenä ajatuksena on säilyttää Norja energiatuotteiden merkittävänä nettoviejänä, vaikka hiilidioksidipäästöille asetettaisiin merkittäviä rajoituksia. Tuuli- ja vesivoimalla tuotettua tai maakaasusta reformoitua vetyä voitaisiin laivata nesteytettynä Keski-Euroopan markkinoille. Maakaasun prosessointi olisi varustettu hiilidioksidin talteenotolla.

Vetyenergiateknologiaa edistävät teollisuuden, tutkimuslaitosten ja kansalaisjärjestöjen yhteenliittymä Norsk Hydrogenforum [hydrogen.no 2012] ja Hynor-projekti [Hynor 2012], jonka tavoitteena on rakentaa vetytankkausasemia Oslosta Stavangeriin.

Norjalaiset ovat kansainvälisesti hyvin verkottuneita esim. Saksaan, Japaniin ja Kaliforniaan.

### 3.8.4 Korea

Korea joutuu tuomaan 97 % primäärienergiastaan, joten energiatehokkuus, uusiutuva energia ja vihreä kasvu ovat strategisesti tärkeitä. Vetyyn ja polttokennoihin investoidaan 100 M\$ vuodessa. Hyundai on valmistanut 200 polttokennoautoa ja bussia ja on ensimmäisenä autovalmistajana tuomassa polttokennoautot kuluttajamarkkinoille jo tänä vuonna. Koreassa on 13 vetytankkausasemaa. Tavoitteena on valmistaa 100.000 FCEV vuonna 2020 ja niille 168 tankkausasemaa. Korealaisella teollisuudella olisi 25 % osuus maailmanmarkkinoista. Koreassa on asennettu suuria 50 MW polttokennovoimalaitoksia, joista suurin osa on POSCO:n toimittamia sulakarbonaattikennoja [Hong 2012].

### 3.8.5 Japani

Japanin mallia on käsitelty luvussa 1.

### 3.8.6 USA

USA:n taloudellisen kasvun kivijalka on puhtaan, riittävän halvan (affordable), saatavissa olevan ja luotettavan energian saanti. Presidentti Obama on määritellyt



yleisiksi kansallisiksi energiatarvoiksi öljyriippuvuuden vähentämisen, saasteiden vähentämisen ja investoimisen puhtaan energian tutkimiseen ja kehittämiseen uusien työpaikkojen luomiseksi USA:ssa. Numeraaliset tavoitteet ovat [QTR 2011]:

- öljyntuonnin vähentäminen yhteen kolmasosaan vuoteen 2025 mennessä
- miljoonan sähköauton käyttöönotto vuoteen 2015 mennessä
- ei-asumiskäytössä olevien talojen energiatehokkuuden lisääminen 20 %:lla vuoteen 2020 mennessä
- puhtaista lähteistä saatavan energian osuuden nostaminen 80 %:iin kokonaistuotannosta vuoteen 2035 mennessä
- kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 17 %:lla vuoteen 2020 ja 83 %:lla vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoteen 2005.

USA:n energiapolitiikasta vastaa Department of Energy (DOE). DOE:n teknologiapolitiikka ja päästrategiat on kuvattu dokumentissa ”Report on the First Quadrennial Technology Review” [QTR 2011], joka on julkaistu syyskuussa 2011. DOE:lla on kuusi päästrategiaa energiateknologiaan liittyen, joista yksi on ”Vehicle Electrification” Tähän strategiaan sisältyvät erityyppisten sähköautoteknologioiden kehittäminen, mukaan lukien polttokennosähköautoteknologiat. Tämä ei kuitenkaan ole lyhyellä tähtämellä pääkohde, koska polttokennoautojen lisäksi pitäisi kehittää puuttuva infrastruktuuri.

Edellä mainitusta rajoituksesta huolimatta DOE rahoittaa monivuotista tutkimus-, kehitys- ja demonstraatio-ohjelmaa ”Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program (2005–2015 [DOE 2011]), jonka suunnitelmaa päivitetään jatkuvasti; viimeisin versio on vuodelta 2011. Tämä ohjelma on hyvin samantapainen kuin EU:n Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking. Ohjelmaan liittyen on muodostettu mm. ”FreedomCAR & Fuel Partnership”, jossa on mukana DOE, viisi suurinta energiatuottajaa, USCAR ja kaksi voimayhtiötä. Tämän konsortion tuloksista ja hahmottelemasta tiekartasta eteenpäin on julkaistu yhteenveto ”Hydrogen Production – Overview of Technology Options” [FreedomCAR 2009] vuonna 2009. Kokonaisuohjelmaan kuuluu osaohjelma ”Fuel Cell Technologies (FCT) Program, jonka tuloksista on julkaistu 2012 raportti ”Pathways to Commercial Success: Technologies and products Supported by the Fuel Cell Technologies program” [DOE 2012]. Riippumaton Fuel Cells 2000 –organisaatio on julkaissut 2012 yhteenvetoraportin ”State of the States – Fuel Cells in America 2012” [State of the States 2012], jossa puolestaan kuvataan polttokennojen kehitystä ja määrää osavaltioittain. Kehitys on erityisen pitkällä Kaliforniassa. Kehitystä ohjaamaan ja toteuttamaan on perustettu ”California Fuel Cell Partnership”, jonka toimesta on 2012 julkaistu tiekartta ”A California Road Map: The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles” [California 2012].

Hyvä yhteenveto USA:n tilanteesta on Tekesin rahoittamassa raportissa ”Overview of Status of Hydrogen and Fuel Cells in the USA and Summary of Topics of Interest at the February 2011 Fuel Cell & Hydrogen Energy Conference in Washington, D.C.” [mrs enterprises 2011].

### 3.9 Lainsäädäntö ja standardointi

Erlaisia vetysovelluksia koskevat sekä tiettyyn tekniseen sovelluskohteeseen että

vedyn käyttöön liittyvät säädökset. Polttokennoja ja niihin liittyvää vetyinfrastruktuuria koskevien kansainvälisten säädösten ja standardoinnin tilannetta on selvitetty useissa EU:n tutkimusprojekteissa (esim. HyFacts, HYPER, Roads2HyCom ja HyApproval) sekä myös tuoreessa Fuel Cell Today:n raportissa [RCS Review 2012]. Suomen osalta sovellettavia säädöksiä ja jossakin määrin myös standardeja tarkastellaan käynnissä olevassa ja vuoden 2013 aikana päättyvässä Tekesin rahoittamassa DemoTurvallisuus-hankkeessa (Polttokennosovellusten ja polttoaineinfrastruktuurin turvallinen käyttöönotto) [Demo 2013].

## 4 Vety Suomessa 2012

### 4.1 Vedyn tuotanto, jakelu ja sivutuotevety

Vetyä tuotetaan Suomessa n. 140.000 tonnia vuodessa. Suurin tuottaja on Neste Oil, joka tuottaa n. 110.000 Tn/v Kilpilahden jalostamolla. Vety tuotetaan maakaasusta reformoimalla ja koko tuotanto kuuluu jalostamon omissa prosesseissa esim. hiilivetyjen krakkaukseen ja rikinpoistoon. Muita vedyn tuottajia ovat AGA Oy Hämeenlinnassa ja Solvay Chemicals Kouvossa. Woikoski Oy tuottaa elektrolyyttistä vetyä Espoossa.

EU:n Road2HyCom projektin raporttiin [Road2HyCom 2007b] on kerätty tiedot kaikista vedyntuottajista Euroopassa. Suomesta löytyy tämän mukaisesti taulukon 4.1 mukainen kapasiteetti. Muutaman tiedon puuttuessa yhteenlaskun tulokseksi saadaan 4,2 milj.m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/päivä (140.000 Tn/a).

*Taulukko 4.1. Vedyn tuottajia Suomessa.*

Yritys	Sijainti	Kapasiteetti 1000 m <sup>3</sup> /päivä	Tuote	Tuotantotapa
Eka Chemicals	Oulu	30	Lipeä	
Eka Chemicals	Oulu	90	Lipeä	
AGA (Linde)	Helsinki	12		
AGA (Linde)	Raisio	17		
Borealis Polymers	Porvoo	161	Etyleeni	sivutuote
Neste Oil	Porvoo	3300	Öljytuotteet	reformointi
Finnish Peroxides	Voikkaa		Vetyperoksidi	
Kemira Chemicals	Joutseno	55	Lipeä	sivutuote
Kemira Chemicals	Kuusankoski	115	Kloori	sivutuote
Kemira Chemicals	Kuusankoski	63	Lipeä	sivutuote
Kemira Chemicals	Äetsä	240	Kloraatti	sivutuote
Norilsk Nikkel	Harjavalta	60	Elektrolyysi	sivutuote
Woikoski Oy			Vety	elektrolyysi

Suuri osa Suomessa teollisuuskaasuna käytettävästä vedystä syntyy kemian teollisuuden sivutuotteena. Kemira Chemicals on yksi maailman suurimmista valkaisuaineiden, natriumkloraatti (NaClO<sub>3</sub>) ja klooridioksidi (ClO<sub>2</sub>) valmistajista. Sillä on

oma patentoitu kloraatin valmistusteknologia. Tuotantokapasiteetti on 480.000 tonnia vuodessa. (Äetsä, Joutseno, Kuusankoski, yhteensä n. 270 kTn/a). Kemiralla on myös lipeätehdas, tuotantokapasiteetti n. 110 kTn/a tonnia vuodessa. Kaikilla tuotantolinjoilla syntyy sivutuotteena puhdasta vetyä. Sivutuotevetyä käytetään omien kattiloiden polttoaineena, sekä esim.  $\text{NaBH}_4$  valmistuksessa. Osan myy Woikoski vedyn teollisille käyttäjille.

Äetsän laitoksen mitoitettu sähköteho on 100 MW (käytännössä 70 MW), jolloin 1 MW suuruisella polttokennolla tuotetun sähkön merkitys on melko vähäinen. Ylijäämävetyä, raaka-aine käyttöjen ja vedyn myynnin lisäksi, voisi laskelmien mukaan riittää n. 10 MW polttokennopohjaiseen sähkön tuotantoon (Kemira Chemicals Oy).

Kemira Chemicals jatkaa tuotannossaan syntyvän vedyn tehokkaan käytön edistämistä. Sitä varten Äetsässä on tehty aluevaraus vedyn nesteytyslaitosta varten. Lisäksi heillä on rakenteilla vetyä käyttävä höyryturbiini ja generaattori, jonka sähkön tuotantoteho on 5 MW. Joutsenossa tällainen on jo tuotannossa.

Woikoski Oy:llä on kapasiteettia jaella 1.500 Tonnia vetyä vuodessa. Jakelu tapahtuu 200 bar teräspulloissa (1 kg  $\text{H}_2$ ), pullopattereissa (12 kg  $\text{H}_2$ ) ja konteissa (247 kg  $\text{H}_2$ ). Woikoski on siirtymässä 300 bar pulloihin, jolloin kuljetuskapasiteetti kasvaa 50 % [Korjala 2012]. Vetyä tuottaa ja myy myös AGA, joka on osa Linde-konsernia ja joka tuottaa sitä maakaasua reformoimalla.

Sivutuotevetyä voitaisiin jaella paikallisesti myös putkikuljetuksena, mutta putkijakelun kannattavuusrajaksi on arvioitu vain 10 km. Nestevedyn jakelu on suunnitteluasteella.

## 4.2 Vetyteknologiaan liittyvä tutkimustoiminta

VTT:n metallilaboratoriossa tutkittiin 1980-luvulla vedyn vaikutusta teräksiin. Laajempi vetyteknologian tutkimustoiminta käynnistyi 1988 kauppa- ja teollisuusministeriön ja Tekesin rahoittamissa uusiutuvan energian NEMO- (1988–1992) ja NEMO2- (1993–1998) tutkimusohjelmissa. Merkittävimmät kehityshankkeet olivat:

- vedyn varastointi metallihydrideihin ja metallihydridien energiasovellukset (VTT/Tähtinen, TKK/Prof. Gasik (IEA-HIA Task 17))
- vedyn käyttö kausivarastona autonomisessa aurinkoenergiajärjestelmässä (Neste Oy ja TKK/Prof. Lund)
- alkaalisen polttokennon ja metallihydridiakun kehitystyö (TKK/Prof. Lampinen ja Hydrocell Oy).

Ohjelmien jälkeen tutkimustoiminta jatkui pienimuotoisena yliopistoissa sekä Neste NAPS:issa ja Hydrocell Oy:ssä, joista kummatkin ovat sittemmin luopuneet vetyyn ja polttokennoihin liittyvistä kehityshankkeistaan. Vetyteknologian tutkimustoiminta on uudelleen aktivoitunut Tekesin ja EU:n (FCH-JU) polttokenno-ohjelmien (2007–2013) aikana. Vaikka ohjelmien pääpaino on ollut polttokennoteknologiassa, ovat suomalaiset tutkimuslaitokset ja yritykset osallistuneet myös vedyn tuotantoon ja vetyinfrastruktuuriin liittyviin hankkeisiin, joista merkittävimmät ovat:

- Demo 2013 Vuosaaren satamassa (Teknologiateollisuus, VTT)
- vetytankkausasema (Woikoski Oy, Arctic Driving Centre)
- vedyn ja rikkihapon yhdistetty tuotanto (Outotec Oyj, Aalto (IEA-HIA Task 25))
- vetyinfrastruktuurin materiaalit (VTT, Aalto)
- vedyn tuotanto metanolista, etanolista ja biomassasta (Aalto, Åbo Akademi, Oulun yliopisto, VTT)
- biologinen vedyn tuotanto (Jyväskylän yliopisto, Tampereen teknillinen yliopisto)
- polymeerielektrolyysi (VTT, Åbo Akademi).

Vedyn tuotantoa on arvioitu myös osana metsäbiomassan kaasutukseen ja reformointiin perustuvaa tuotantoketjua biojalostamohankkeissa [McKeough 2007].

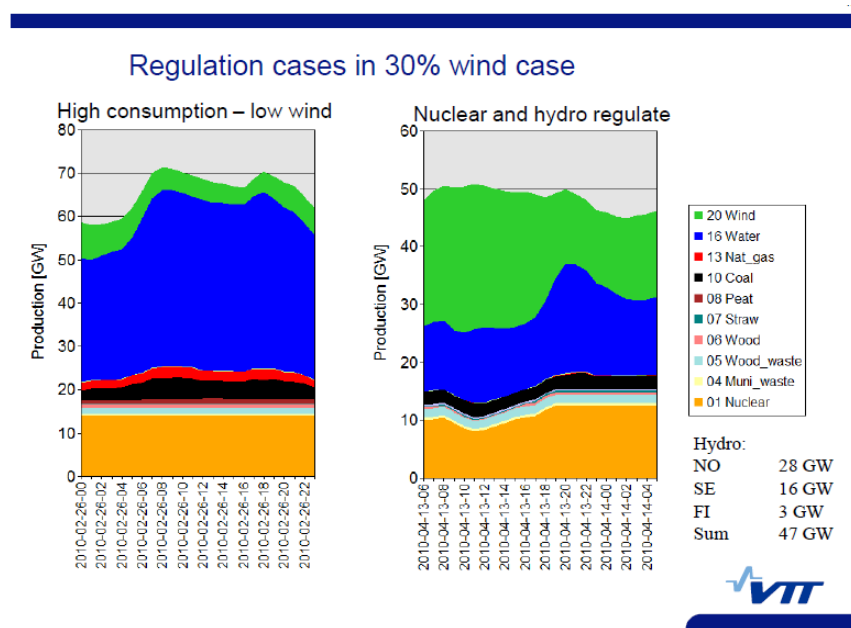
## 5 SKENAARIOITA VEDYN KÄYTÖSTÄ SUOMESSA

### 5.1 Tuulienergian perustuva vedyn tuotanto

Tuulivoiman (ja aurinkovoiman) laajamittainen rakentaminen (>> 10 % sähkön kulutuksesta) lisää muun sähköntuotannon säätöä ja voi aiheuttaa tilanteita, joissa on joko säädettävä ydinvoimaa alaspäin tai vähennettävä tuulivoimatuotantoa. Lisäksi joidenkin lauhde- ja vastapainevoimaloiden ylläpito voi tulla kannattamattomaksi, koska näiden voimaloiden käyttöajat lyhenevät uusiutuvien tuotannon kasvaessa. Säädettävät kuormat esim. elektrolyysiin perustuva vedyn tuotanto nostaisivat ainakin joidenkin voimaloiden käyttöaikoja.

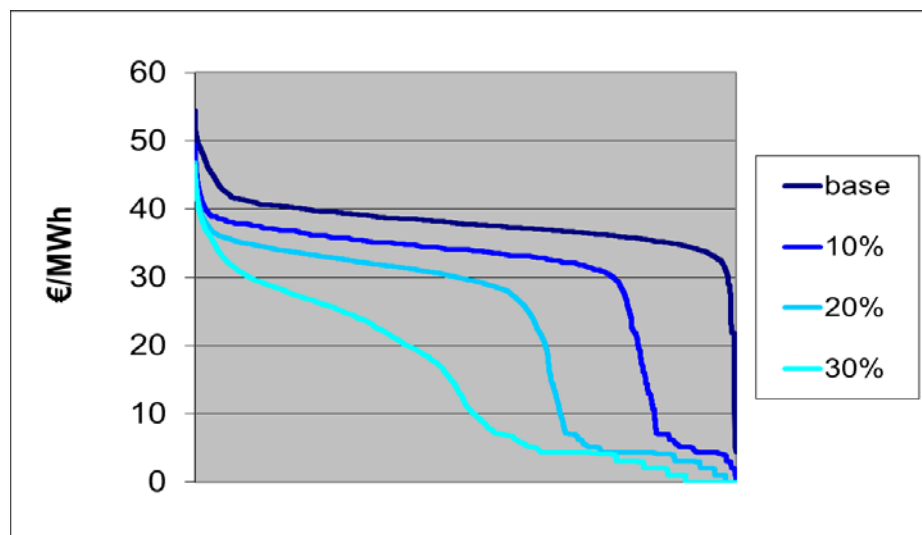
Tuulivoimakapasiteetin vaikutusta sähköverkon säätötarpeeseen ja hintaan Pohjoismaissa on arvioitu 10 %, 20 % ja 30 % tuuliosuuksilla [Kiviluoma 2006]. Analyysissä on otettu huomioon vesivoiman käyttö säätövoimana ja sähkön siirto maiden välillä sekä Pohjoismaista Saksaan. Tuntitasolla tehdyn mallinnuksen mukaan Norjan ja Ruotsin runsas vesivoimakapasiteetti pystyy säätämään järjestelmää vaikka tuulivoiman osuus nousisi 30 %:iin. Suomen kannalta tilanne muuttuu oleellisesti huonommaksi, mikäli naapurimaiden vesivoima ei olisi käytössä säätövoimana, mitä tosin ei oltu analysoitu.

Kuvassa 5.1. on esitetty tilanteita, jossa vesivoimaa tarvitaan runsaasti säätövoimaksi ja jossa myös ydinvoimaa käytetään säätövoimana.



Kuva 5.1. Sähkön simuloitu tuotantorakenne pohjoismaissa helmi- ja huhtikuuisina päivinä, kun tuulivoiman osuus on 30 % sähkön tuotannosta.

Kuvassa 5.2. on esitetty sähkön hinnan pysyvyyskäyrän riippuvuus tuulivoiman osuudesta Suomessa ja Ruotsissa. Sähkön hinta on merkittäviä aikoja alle CHP-laitosten muuttuvien kustannusten. Olisikin analysoitava, miten järjestelmän kokonaistaloudellisuutta voitaisiin parantaa elektrolyysi- ja polttokennolaitosten avulla ja millaisia käyntiaikoja eri vaihtoehdoissa näillä laitoksille sekä vanhoille lauhde- ja vastapainelaitoksille olisi saavutettavissa.



Kuva 5.2. Sähkön hinnan pysyvyyskäyrä vuositasolla Suomessa ja Ruotsissa, kun tuulivoiman osuus sähkön tuotantokapasiteetista on merkittävä.

## 5.2 Vedyn käyttöönotto liikennepolttoaineena

### 5.2.1 Potentiaali uusille polttoaineille julkisessa liikenteessä ja jakelussa

Uusilla polttoaineilla tai energiantantajilla toimivat ajoneuvot on yleensä helpoin-

ta ja kustannustehokkainta ottaa käyttöön sellaisissa käyttökohteissa tai -soveluksissa, joissa polttoaineen jakelu on järjestetty keskitetysti. Tällaisia ovat tyypillisesti kaupunkibussit, jätehuollon ajoneuvot sekä usein myös kaupunkien ja kuntien huoltoautot ja työkoneet. Rajatapauksena voidaan ottaa mukaan myös taajama-alueella toimivat jakeluliikenteen autot ja taksit, vaikka ne yleensä tankkaavatkin normaaleilla asemilla.

Näille yhteisenä nimittäjänä on keskitetyn polttoainehuollon lisäksi tyypillisesti toimiminen varsin rajatulla alueella sekä myös kohtuullisen suuri vuorokautinen ajosuorite ja isohko energian ominaiskulutus ajokilometriä kohden. Siten näissä kohteissa kulutetun energian määrä on verrattain suuri jo aivan polttoaineen jakelupisteen lähialueella, ja polttoaineen jakeluinfrastruktuurin tuoma kustannus mahdollisimman pieni. Lisäksi päästöttömästä ajoneuvosta saatava hyöty on periaatteessa maksimaalinen juuri keskustoissa ja muutoinkin taajamissa, joissa liikennepäästöille altistuminen on voimakkainta.

Pääkaupunkiseudulla (HSL-alue) toimii nyt noin 1 200 kaupunkilinja-autoa, ja niitä operoi viisi suurehkoa operaattoriyritystä. Koko liikenteen kuitenkin tilaa Helsingin Seudun Liikenne (HSL), ja toiminta perustuu linjakohtaiseen kilpailutukseen, jossa sopimusajat ovat noin 5–7 vuotta. Tällaisessa toimintaympäristössä ei ole kovin helppoa saada aikaan investointeja uusiin polttoaineisiin. Tällä hetkellä esimerkiksi vain osa operaattoreista käyttää maakaasua, koska tankkauspaikkoja ei ole ollut mahdollista järjestää kaikille varikoille niiden sijainnin takia. Sopimuspohjaisessa liikenteessä on myös vaikeata sitoutua poikkeavaan tekniikkaan, koska uutta sopimusta ei samalle kalustolle välttämättä aina saada, jolloin kalustoa pitäisi voida siirtää joustavasti muualle. Mikäli autot kuitenkin toimivat polttoaineella, jota ei ole yleisesti saatavilla, tämä voi olla vaikeaa.

Kaupunkien (Helsinki, Espoo, Vantaa) omassa käytössä on noin 300–400 henkilöautoa, noin 500 pakettiautoa ja runsaat 200 kuorma-autoa. Lisäksi Suur-Helsingin alueella toimii noin 150–200 jäteautoa. Jätehuollon kuljetuksia hoitaa Suomessa usea yritys, mutta suuria ja koko maassa toimivia ovat mm. Lassila & Tikanoja Oyj ja Sita Oy. Kumpikin yritys suhtautuu periaatteessa positiivisesti uusiin polttoainevaihtoehtoihin, ja ovat olleet mukana useissa kehityshankkeissa, joissa uusia vaihtoehtoja kokeillaan käytännön toiminnassa.

Jakeluliikenteen pakettiautoja Suur-Helsingin alueella toimii arviolta 15 000–20 000 ja kuorma-autoja noin 3 000–5 000. Jakeluliikennettä harjoittavien yritysten joukossa Itella Oy on jo pitkään kokeillut ja suosinut uusia ja puhtaita ajoneuvoteknologioita. Nykykäytössä on muutamia maakaasukäyttöisiä autoja, ja aikoinaan myös sähköautoja (Elcat). Sähköautojen uusi tuleminen on juuri alkanut, kaksi Mercedes-Benz e-Vito akkusähköautoa otettiin käyttöön lokakuun lopussa. Koko autoerästä (12 kpl) muut autot menivät lähinnä energiayhtiöille.

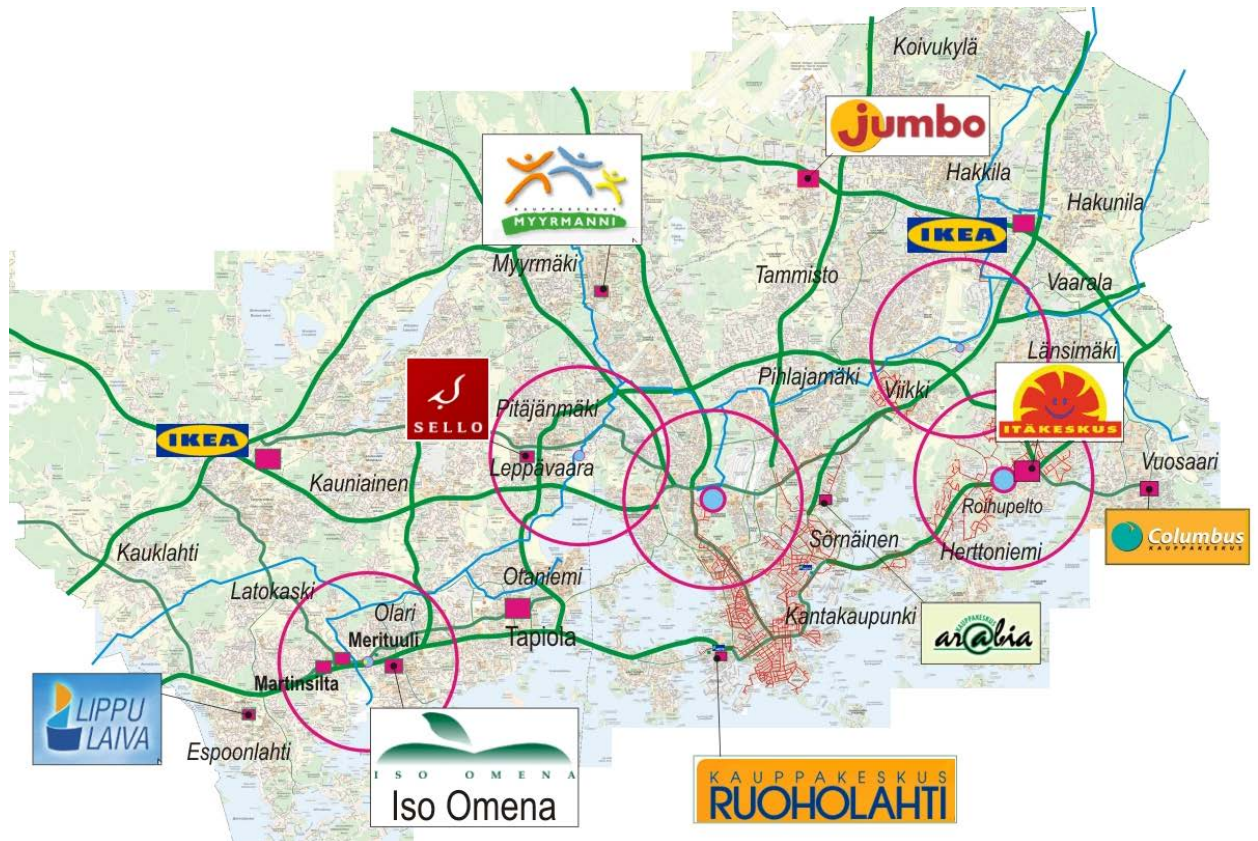
Konsernitason päätös viime syksyltä on, että Itellan jakeluautoista 40 prosenttia on vaihtoehtojoneuvoja vuoteen 2020 mennessä [Posti 2012].

Takseja on koko maassa noin 10 000, joista Uudellamaalla noin 3 000, ja niistä Helsinki-Espoo-Vantaa -kolmiossa noin 2 200 autoa. Toiminta on luvanvaraista, ja vahvasti organisoitunut alueellisten yrittäjäjärjestöjen kautta, joten tähänkin toimintoon voisi olla mahdollista luoda kohdennettu polttoainejakelu.

## 5.2.2 Asemien sijoittelu – esimerkkinä maakaasu

Vaihtoehtoisten polttoaineiden jakelun aloittaminen on aina haasteellista, sillä kysyntä herää asteittain, mutta tarjontaa pitää rakentaa vahvasti etupainotteisesti. Muuten kuluttajat eivät uskalla sitoutua. Valitsemalla asemien sijoituskohteiksi esimerkiksi suurten kauppakeskusten lähimaastot, tankkauskäynti hoituisi osana muuta asiointiliikennettä. Tätä taustaa vasten esimerkiksi maakaasun tankkausasemat pääkaupunkialueella on sijoitettu varsin lähelle kaupallisia keskittymiä. Maa- ja biokaasuasemat on edullisinta sijoittaa putkiverkon varteen, vaikka teoriassa kaasua voidaan jaella myös paineastioissa tai nesteytettynä. Vedyn jakelu tapahtuisi kuitenkin ensi vaiheessa joko paineastiakonteissa tai nesteytettynä, jolloin sijoittelu voi toimia vapaammin.

Kuvassa 5.3 on esitetty nykyiset maakaasuasemat pääkaupunkiseudulla sekä tärkeimmät kauppakeskukset. Vastaavaan tapaan voitaisiin ajatella asemien sijoittelua muissakin suuremmissa kaupungeissa kuten Tampereella, Jyväskylässä, Oulussa jne.



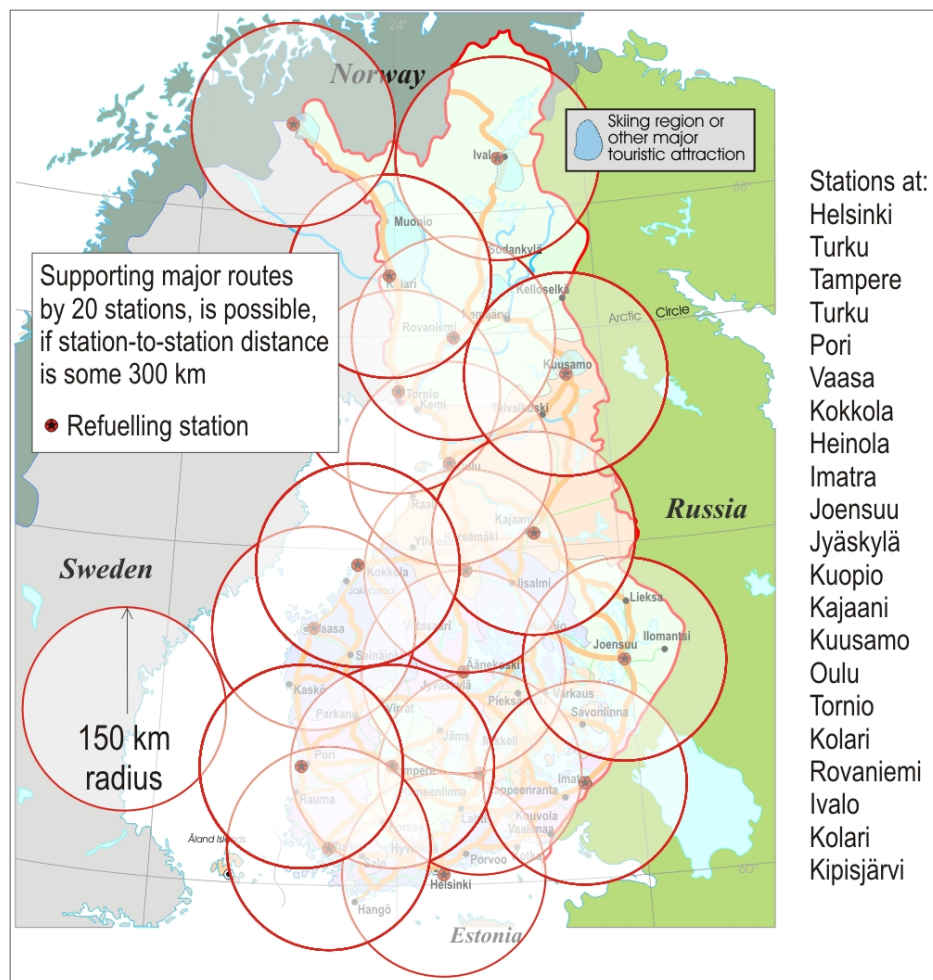
Kuva 5.3. Nykyiset maakaasuasemat pääkaupunkiseudulla sekä tärkeimmät kauppakeskukset.

## 5.2.3 Laajentuminen ja ”runkoverkko”

Ainakin teoreettisesti ajateltuna vetyjakelu voisi toisessa vaiheessa laajentua samaan tapaan kuin matkapuhelinverkot, jolloin ensin rakennetaan tankkausasemia pääkaupunkiseudulle ja muihin suuriin kaupunkeihin, joissa autotiheyttä eli potentiaalista kysyntäpohjaa on mahdollista luoda riittävästi. Kaupunkiseutujen välille voitaisiin sitten luoda ”käytävät”, joissa asemia olisi 150–200 km välein,

mitä voi pitää realistisena, jos vetyauton toimintamatka on yli 500 km yhdellä tankkauksella. Kun tankkausaikakin on vain minuutteja, ei pitkämatkainen liikenne olisi mikään ongelma. Alueellisiin asemiin voitaisiin myös integroida paikallista vedyn tuotantoa, jolloin osa polttoaineesta syntyisi uusiutuvista raaka-aineista.

EU:ssa on myös valmisteilla direktiivi vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta. Sitä koskeva Komission ehdotus [European Commission 2013] valmistui 24.1.2013, ja se on toimitettu Parlamenttiin helmikuun 2013 alussa. Ehdotuksen mukaan vetyasemaverkostoa tulisi laajentaa alueellisesti kattavaksi jäsenvaltioiden ja jatkossa koko EU alueella. Verkoston tulisi olla sellainen, että liikennöinti olisi mahdollista viimeistään vuoden 2020 loppuun mennessä niissä maissa, joissa vetyä on saatavilla direktiivin voimaan tullessa. Suositeltava asematiheys vedylle on enintään 300 km. Kuvassa 5.4. on esimerkin omaisesti esitetty, miten noin 20 asemaa riittäisi toteuttamaan tavoitteena olevan 300 km asemavälin. Nämä mahdollistaisivat liikenteen esimerkiksi pääkaupunki-seudulta Lapin hiihtokeskuksiin, mikä on hyvin tyypillinen pitkä automatka ainakin nykyään.



Kuva 5.4. Noin 20 asemaa riittää kattamaan tärkeimmät Etelä-Suomen kaupungit ja mahdollistamaan matkat myös Lapin hiihtokeskuksiin.



## 5.2.4 Vedyn tarve 2020 ja 2050

Taulukossa 5.1 on esitetty arvio vedyn liikennekäytön määrästä henkilöautoissa ja busseissa. Rajaus näihin ajoneuvoluokkiin perustuu nähtävissä olevien teknologia-vaihtoehtojen kohdentumisen mukaan, eli toistaiseksi teollisuus kehittää vetypolttokennokäyttöä vain henkilöautoihin ja kaupunkibusseihin. Pitkämatkaiseen rahtiliikenteeseen ei teknologiaa ainakaan vielä ole kehitteillä.

Laskelma perustuu liikenteen vuotuisten kilometrisuoritteiden määrään ja oletettuun energian tarpeeseen (MJ/km), josta on voitu laskea ko. ajoneuvoluokan energian vuotuinen käyttömäärä (PJ/a). Vetykäyttöisten autojen yleistymisen mukaan on arvioitu niiden osuus ko. ajoneuvoluokan automäärästä ja ajokilometreistä (%), jonka perusteella on laskettu se bruttoenergia ("gross"), jonka nuo autot käyttäisivät. Koska vetypolttokennoauto on kuitenkin energiatehokkaampi, on arvioitu, että nettoenergia ("net") olisi vain 60 % edellisestä. Tämä energiamäärä on sitten muunnettu vetykiloksi ja edelleen normi-kuutiometreiksi. Laskelman mukaan vuonna 2020 vetyä voisi liikennekäytössä kulua vajaat 17 miljoonaa m<sup>3</sup>, ja vuonna 2050 lähes 700 miljoonaa m<sup>3</sup>. Tämä arvio vastaa vuoden 2050 osalta suuruusluokaltaan tuoreen Low Carbon Finland 2050 visiopaperin vedyn liikennekäyttöä "Onni- ja Inno"-skenaarioissa (10–15 PJ/a) [Low Carbon Finland 2050]. Raportissa oli pyritty ottamaan myös vaihtoehtoisten polttoaineitten kustannusvaikutuksia huomioon.

*Taulukko 5.1. Arvio vedyn liikennekäytöstä Suomessa; konservatiivinen skenaario.*

	autot		H2 henkilöautot			
	PJ/a	%	PJ/a "gross"	PJ/a "net"	Tn/a	1000 Nm <sup>3</sup> /a
2010	102.0	0 %	0.0	0.0	0	0
2020	99.4	0 %	0.3	0.2	1 400	15 600
2030	93.2	3 %	2.5	1.5	12 500	138 900
2040	90.2	6 %	5.8	3.5	29 100	323 300
2050	87.2	13 %	11.7	7.0	58 400	648 900

	bussit		H2 bussit			
	PJ/a	%	PJ/a "gross"	PJ/a "net"	Tn/a	1000 Nm <sup>3</sup> /a
2010	6.9	0 %	0.0	0.0	0	0
2020	6.2	0.5 %	0.0	0.0	100	1 100
2030	5.3	3 %	0.2	0.1	800	8 900
2040	4.8	7 %	0.3	0.2	1 700	18 900
2050	4.3	10 %	0.4	0.3	2 200	24 400

Taulukossa 5.2 on esitetty vastaavan laskelman tulokset olettaen, että vetykäyttöisten autojen myyntiosuudet 2020–2050 ovat kaksinkertaiset edellä esitettyyn, konservatiiviseen arvioon nähden. Silloin kokonaismäärät kasvavat tasolle yli 1.3 miljardia m<sup>3</sup>/a (= 117 000 Tonnia/a), mikä vastaa suuruusluokaltaan Kilpilahden jalostamon nykyistä vedyn tuotantoa ja kulutusta.

Taulukko 5.2. Arvio vedyn liikennekäytöstä Suomessa; optimistinen skenaario.

	autot PJ/a	%	H2 henkilöautot			
			PJ/a "gross"	PJ/a "net"	Tn/a	1000 Nm <sup>3</sup> /a
2010	102.0	0 %	0.0	0.0	0	0
2020	99.4	0 %	0.3	0.2	1 400	15 600
2030	93.2	5 %	4.8	2.9	23 900	265 600
2040	90.2	13 %	11.7	7.0	58 300	647 800
2050	87.2	27 %	23.4	14.0	116 800	1 297 800

	bussit PJ/a	%	H2 bussit			
			PJ/a "gross"	PJ/a "net"	Tn/a	1000 Nm <sup>3</sup> /a
2010	6.9	0 %	0.0	0.0	0	0
2020	6.2	0.9 %	0.1	0.0	300	3 300
2030	5.3	6 %	0.3	0.2	1 600	17 800
2040	4.8	14 %	0.7	0.4	3 400	37 800
2050	4.3	20 %	0.9	0.5	4 300	47 800

### 5.2.5 Ilmastovaikutukset

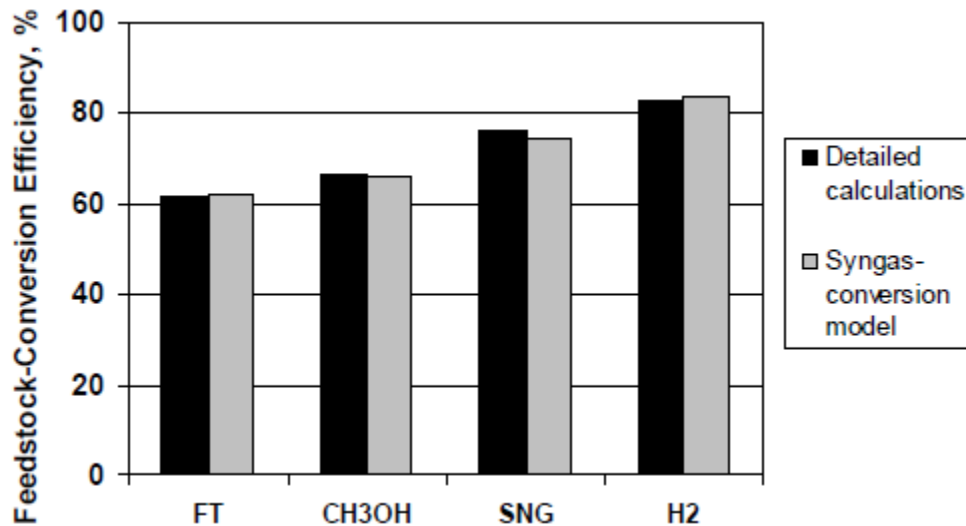
Korvattaessa vedyllä perinteisiä fossiilisia polttoaineita voidaan saavuttaa vähemmän hiilidioksidin ja muidenkin kasvihuonekaasujen päästöissä. Arvio päästövähennyksestä voidaan tehdä yksinkertaisesti laskemalla vetykäyttöisille autoille arvioitu bruttoenergiamäärä kertoimella, joka kuvaa hiilidioksidin päästön ja energian käytön suhdetta. Silloin taulukon 5.1 esittämät energiamäärät vastaisivat vuonna 2020 noin 21 000 tonnin vähennyksiä ja vuonna 2050 runsaan 800 000 tonnin vähennyksiä olettaen, että käytetty vety on tuotettu täysin hiilineutraalisti. Vastaavasti optimistisemmän skenaarion (taulukko 5.2) mukaan vähennykset voisivat olla runsaat 1,6 milj. tonnia CO<sub>2</sub> vuonna 2050. Tämä olisi noin 18 % Suomen liikenteen kokonaishiilidioksidipäästöistä, jotka ns. perusennusteen mukaan on arvioitu olevan n. 9 milj. tonnia vuonna 2050 [Tuominen 2012].

## 5.3 Biovety ja vedyn käyttö synteettisten polttoaineiden tuotannossa

Suomessa on laajamittaista nestemäisten biopolttoaineiden, esim. biodiesel, mäntyöljy, tutkimus- ja kehitystoimintaa. Strategiana on käyttää metsäbiomassaa raaka-aineena, ettei biopolttainetuotanto kilpailisi ruoan tuotannon kanssa. Prosessit perustuvat biomassan (leijupeti)kaasutukseen, reformointiin synteetikaasuksi, kaasun puhdistukseen ja konversioon lopputuotteiksi. Alan ympärille on syntynyt vahva teollisuusklusteri ja suunnitteilla on useita suuria demonstraatiohankkeita.

Em. nestemäisten biopolttoaineiden rinnalla on tarkasteltu metanolin ja DME:n tuotantoa ja tutkitaan synteettisen maakaasun (SNG) ja vedyn tuotantoa [McKeough 2007, Vetaani 2012]. On arvioitu, että biomassan konversio vetykaa-

suksi olisi hyötysuhteeltaan edullisin prosessi ja voisi saavuttaa yli 80 % hyötysuhteen, kuva 5.5. Kun tämä yhdistetään erinomaiseen loppukäyttöhyötysuhteen polttokennoautoissa ja mikro-CHP-laitoksissa, saadaan erittäin tehokkaita energian konversioprosesseja. Rajoittavina tekijöinä ovat vedyn varastointi- ja jakeluinfrastruktuurin puute sekä polttokennojen korkeat kustannukset.



Kuva 5.5. Biomassan konversiohyötysuhde synteettiseksi polttoaineeksi kaasutusreformointiprosessissa (FT: biodiesel, CH<sub>3</sub>OH: metanoli) [McKeogh 2007].

Yhdellä 300 MW:n kaasutusvetylaitoksella voitaisiin tuottaa 60 000 Tn (2 TWh) vetyä vuodessa, mikä vastaa puolta vedyn nykyisestä kulutuksesta Suomessa. Tällä voitaisiin sähköistää ja lämmittää 500 000 passiivitaloa (á 4 MWh/a) polttokennomikro-CHP-teknologiaa käyttäen tai käyttää 450 000 polttokennoautoa (á 20.000 km/a = 133 kg H<sub>2</sub>/a). Laitoskoko olisi noin kaksinkertainen Gasumin, Helsinki Energian ja Metsä Fibre:n Joutsenoon suunnittelemaan metaania tuottavaan kaasutuskoelaitokseen verrattuna. Hajautettuun vetyenergian tuotantoon tarvittaisiin kertaluokkaa pienempiä 10–30 MW:n laitoksia.

Toisaalta vedyn avulla voidaan tehostaa biomassan konversiota nestemäisiksi polttoaineiksi. Esim. BTL biodieselin tuotanto kuluttaa enemmän vetyä kuin raakaöljyn jalostus. Metsäbiomassaa jalostavan laitoksen vedyn lähteenä voisi olla ensi vaiheessa teollisuuden sivutuotevety, jolloin biojalostamo rakennettaisiin vetyä tuottavan valkaisu-kemikaalituotannon yhteyteen. On myös ajateltavissa, että jos ydin- tai tuulivoiman tuotannon kasvaessa syntyy hetkellistä tai pysyvää ylituotantoa, edullisella sähköllä voitaisiin tuottaa elektrolyytisesti vetyä ja happea biojalostamon tarpeisiin.

Suomessa tuotetaan biokaasua mädätys/käymisprosesseilla kaatopaikoilla, maataloilla ja veden puhdistuslaitoksilla 139 miljoonaa m<sup>3</sup>, mikä vastaa 630 GWh lämpöarvoa [Pakarinen 2012]. Jos tämä kaikki reformoitaisiin vedyksi 80 % hyötysuhteella, syntyisi 15.000 tonnia vetyä. Vetyä voidaan tuottaa biokaasuprosessissa myös suoraan, mutta tuotto jää metaania alhaisemmaksi. Edullisin vaihtoehto voisi olla kaksivaiheinen prosessi, jossa tuotetaan sekä vetyä että metaania [Pakarinen 2012]. Mädättämällä tuotetuksi biokaasupotentiaaliksi on arvioitu 7–18 TWh, josta peltobiomassan osuus olisi 6 TWh ruuan tuotannon vaarantumatta ja 10 TWh kaasutettavaa metsäbiomassaa tai turvetta.

## 5.4 Vedyn käyttö kiinteistöissä ja teollisuudessa

Passiivitaloksi rakennetun 150 m<sup>2</sup>:n omakotitalon ostoenergian kulutus (lämpö+sähkö) on noin 4 MWh vuodessa. Tämän tuottamiseksi polttokennolla (50 % sähkö/50 % lämpö) tarvittaisiin noin 120 kpl 50 L/200 bar vetypulloa vuodessa eli 12 pullon pullopatteri pitäisi vaihtaa keskimäärin 5 viikon välein, mikä ei taajama-alueella vaikuta järkevältä. Olisikin tutkittava vedyn putkijakeluun perustuvia taajamia.

Biomassan kaasutukseen, vedyn putkijakeluun sekä kiinteistökohtaisiin polttokennomikro-CHP-laitoksiin perustuva järjestelmä voisi tarjota energiatehokkaan vaihtoehdon kaukolämpölaitoksille ja -putkille uusilla alueilla, jotka eivät vielä ole kaukolämmön piirissä. Saman vetyputkiverkoston yhteyteen voitaisiin rakentaa myös polttokennoautojen tankkausasemat sekä vetyä tarvitsevaa teollisuutta. Tämä edellyttäisi kaasutusreformointiteknologian skaalaamista 10–30 MW kokoluokkaan, vedyn puhdistusteknologian kehitystä ja edullisen putkijakelu-järjestelmän kehittämistä. Vety pohjaiset mikro-CHP laitokset olisivat huomattavasti nykyisiä järjestelmiä edullisempia, koska erilliset reformointiyksiköt jäisivät pois. Kokonaistaloudellisuus riippuu vety- ja kaukolämpöputkiston investointi- ja käyttökustannusten eroista. Mikäli autoteollisuuden polttokennoille asettamat hintatavoitteet saavutetaan, ei kiinteistökohtaisten polttokennojenkaan kustannusten pitäisi muodostua pullonkaulaksi.

Alueilla, joissa jo on kaukolämpöverkosto, edullisemman tavan tuottaa lämpöä ja sähköä voisi muodostaa keskitetty kaasutukseen ja kiinteäoksidipolttokennoihin perustuva kaukolämmön tuotanto.

Mikro-CHP-teknologiaan perustuvan hajautetun energiatuotannon kokeilu voitaisiin aloittaa pienimuotoisesti taajamissa, joissa on teollisuuden sivutuotetvetyä käytettävissä. Tämänhetkisessä tuotantotilanteessa Kemira Chemicals:in Suomen tehtaiden tuottama vety, yhteensä n. 18 000 tonnia/v, riittäisi esim. n 90 000 polttokennohenkilöauton tankkaukseen. Omakotikäytössä pienikiinteistön sähköt ja lämmöt tuotettaisiin samaisella vedyllä n. 33 000 taloudessa. Vastaavaa mikro-CHP-teknologiaa voitaisiin soveltaa myös saaristossa käyttäen tuulivoimaa ja elektrolyysiä vedyn tuotantoon.

Kaikissa tapauksissa vedyn kustannustehokkaiden varastointikonseptien kehitys parantaisi järjestelmän käytettävyyttä.

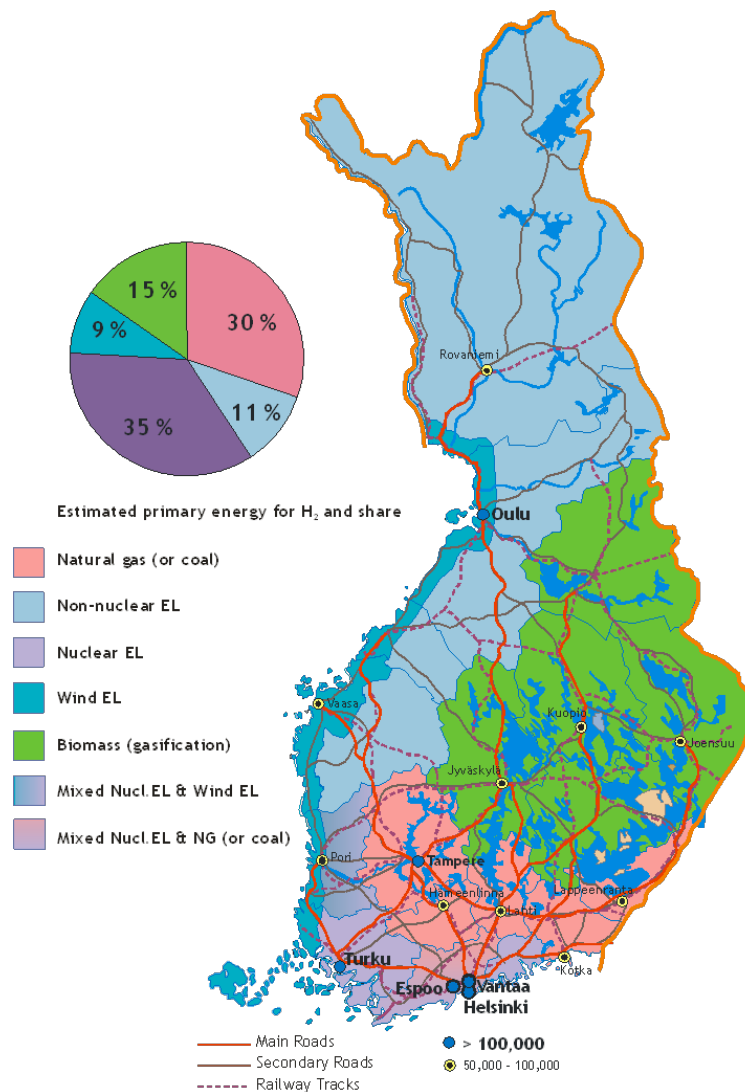
Jatkossa, jos aurinkokennojen kustannukset laskevat merkittävästi, nollaenergia- ja passiivitalojen energiantuotanto voisi perustua aurinkoenergiaan ja kiinteistökohtaisiin energiavarastoihin, jotka olisivat yhdistelmä akku- ja vetyteknologioita. Tällaista äärimmäisen hajautettua energiajärjestelmää on kutsuttu seuraavaksi teknillistaloudelliseksi vallankumoukseksi ja energihuollon internetiksi, jossa energiayhtiöt toimisivat tuottajien sijaan operaattoreina [Rifkin 2002].

Rifkin toteaa, että EU maissa yksin on jo 191 miljoonaa rakennusta. Uusiutuvien energioiden talteenotto tekisi niistä nollapäästöisiä tai jopa energiapositiivisia. Massatuotannon laajeneminen halventaa jatkuvasti hyödynnettäviä teknologioita ja tuottaa miljoonia työpaikkoja. Voidaan hyvinkin olettaa kehityksen seuraavan tietokoneteollisuuden jo viitoittamaa tietä: 25 vuodessa muutamasta omaisuuksien arvoisesta keskustietokoneesta on tultu tilanteeseen, missä tietojenkäsittelyyn

tarvittava laitteisto on lähes kaikkien ulottuvilla.

## 5.5 Alueellinen vedyn tuotanto (HyWays)

EU-hankkeessa (HyWays 2006–2007) tehtiin Suomea koskeva tarkastelu vedyn tuotannosta ja jakelusta. Sen johtavana ajatuksena oli hajautettu tuotanto ja alueellisesti erilaiset tuotantotavat, joissa hyödynnettiin paikallisesti saatavissa olevaa energiaa, vaikka energiataloudellisesti keskitetty tuotanto voisi olla tehokkaampi vaihtoehto. Kuvassa 5.6 on esitetty tämän hankkeen tuloksena syntynyt kuva eri tuotantotapojen osuuksista ja jakautumasta, jossa alueellinen tuotanto ja kulutus ovat likimain tasapainossa.



Kuva 5.6. Vedyn eri tuotantotapojen alueellinen jakautuma [HyWays 2006].

## 6 VETYENERGIASTRATEGIA

### 6.1 Energia- ja ilmastopoliitiikka

Työ- ja elinkeinoministeriö määrittelee Suomen energiapolitiikan seuraavasti [TEM 2012]:

”Suomen energiapolitiikalla on kolme peruslähtökohtaa: energia, talous ja ympäristö. Keskeisellä sijalla ovat energian saatavuuden turvaaminen, energian kilpailukykyinen hinta ja EU:ssa yhteisesti asetettujen Energia- ja ilmastotavoitteiden toteuttaminen. Myös muiden kestävä kehityksen ja ympäristötavoitteiden integrointi energiatalouteen on keskeinen toimintaperiaate. Lisäksi tuontienergian hinta- ja saatavuusnäkymät sekä lisääntynyt kansainvälinen päätöksenteko vaikuttavat suunnittelukauden energiapolitiikkaan.

Noudatettava energiapolitiikka perustuu hallitusneuvotteluissa sovittuihin tavoitteisiin ja erikseen laadittuihin energiapoliittisiin asiakirjoihin, joita ovat esimerkiksi valtioneuvoston hyväksymät energia- ja ilmastostrategiat, sekä kansainvälisiin sitoumuksiin (kts. kappale 3.8).

Vuonna 2008 hyväksytty kansallinen ilmasto- ja energiastrategia [TEM 2008] ja sitä täydentävät ohjelmat määrittävät noudatettavan energiapolitiikan linjat. Toisaalta ilmastostrategian valmistelussa on otettu huomioon myös energiapolitiikan lähtökohdat. Strategisen suunnittelun ja skenaarioiden laatimisessa hyödynnetään tutkimustulosten työtä sekä kansainvälisiä ja kansallisia tilastolähteitä.

Edelleen vuoden 2013 strategiasta todetaan [TEM 2013]:

”Vuoden 2008 strategian päivitystyö on aloitettu hallituksen energia- ja ilmastopoliittikan ministerityöryhmässä. Päivityksen tavoitteena on ensisijaisesti varmistaa, että Suomi saavuttaa sille asetetut vuotta 2020 koskevat energia- ja ilmastopoliittiset tavoitteensa. Hallitusohjelman mukaisesti uuteen strategiaan yhdistetään ohjelma öljyriippuvuuden vähentämiseksi.

Strategian päivitystyö on tarkoitus saada valmiiksi helmikuun 2013 loppuun mennessä.

Päivityksen valmistuttua aletaan laatia **Suomen tiekarttaa** kohti vuotta **2050**. Tiekartan laadintaan yhdistetään myös laaja sidosryhmien ja kansalaisten kuuleminen.”

Valtioneuvoston **ilmasto- ja energiastrategiassa** esitetään edelleen sivulla 41:

Vuoteen 2050 mennessä Suomella on periaatteessa mahdollista siirtyä lähes päästöttömään energiatalouteen. Tämä edellyttää kuitenkin mm., että tulevana vuosikymmeninä ei enää rakenneta yhtään uutta fossiilisia polttoaineita pääpolttoaineena käyttävää voimalaitosta tai lämpökeskusta ilman hiilidioksidin talteenottoa ja että liikenteessä päästöttömät energiaratkaisut ovat laajasti käytössä. Päästöjä syntyy kuitenkin edelleen muualla kuin energiantuotannossa. Pitkän aikavälin päästötavoitteiden perusteita ja edellytyksiä tarkastellaan valtioneuvoston kansliassa valmisteltavassa **tulevaisuusselonteossa**.”

Edelleen **ilmasto- ja energiastrategiassa** sivulla 53 esitetään:

”Suomessa on ollut jo pitkään järjestelmällinen ja vahva panostus energia-alan tutkimukseen ja tuotekehitykseen. Valmisteluvaiheessa oleva Energia- ja ympäristöalan strategisen huippuosaamisen keskittymä (SHOK) on uusi toimintatapa, jota hyödynnetään myös kansallisten ilmasto- ja energiavoitteiden saavuttamisessa. Julkisen sektorin ja yksityisen sektorin tiivis yhteistyö tutkimus-, teknologia- ja innovaatiotyössä on välttämätöntä. Vastaavanlaista vahvaa julkisen ja yksityisen sektorin teknologiayhteistyötä kehitetään myös EU:n uudessa **Strategisessa energiateknologiasuunnitelmassa** [SET-suunnitelma 2007], joka samalla korostaa energiateknologian tärkeyttä EU:n yhteisessä tutkimus-, tuotekehitys- ja demonstraatiotoiminnassa (kts. kappale 3.8).

Kansainvälinen teknologiayhteistyö on tiivistynyt ja teknologiapanostukset ovat kasvamassa merkittävästi. Energia- ja ilmastoteknologian kehitys tulee olemaan lähivuosina ripeää. Suomen tulee olla sekä teknologian kehittäjänä että soveltajana ja käyttäjänä eturintamassa. Tämä edellyttää nykyisten toimien olennaista tehostamista ja uusien ohjauskeinojen käyttöönottoa. Suomalaisen painokas osallistuminen EU:n tutkimus-, teknologia- ja energiaohjelmiin ja hankkeisiin meillä tärkeillä aloilla varmistetaan yhteistyössä yritysten, tutkimuslaitosten ja yliopistojen kanssa mm. edistämällä energiatehokkuuden asiantuntemuksen ja osaamisen lisäämistä. Myös EU:n ulkopuolelle ulottuva kansainvälinen tutkimus- ja teknologiayhteistyö pyritään hyödyntämään tehokkaasti Suomen kannalta keskeisillä energiantuotantoon ja energiankäyttöön liittyvillä aloilla. Kansainvälistä yhteistyötä hyödynnetään myös tarvittavan osaamisen käyttöön saamiseksi niillä energia- ja ilmastotavoitteiden kannalta merkittävillä osa-alueilla, joita ei priorisoida kotimaisessa kehitystyössä.

Ilmasto- ja energiateknologia on jatkossakin yksi keskeinen T&K-ala. Valtion rahoitusta suunnataan entistä enemmän uuden teknologian demonstrointiin ja kaupallistamisen tukemiseen sekä päästökaupan piirissä että sen ulkopuolella olevilla aloilla, jotta panostukset tutkimukseen ja kehittämiseen saadaan hyödynnettyä täysimääräisesti. Rahoitusta tulee suunnata myös yrityskehittämisen ja tutkimushankkeisiin. Näin varmistetaan osaamisen siirtyminen elinkeinoelämän käyttöön ja syntyneen osaamisen ja teknologian hyödyntäminen myös viennissä.

Kehittämisessä painotetaan myös toimintatapoja ja liiketoimintamalleja sekä palveluja.”

Vetyteknologia mainitaan **ilmasto- ja energiastrategiassa** kohdassa *Teknologian ja innovaatioiden kehittäminen* sähköautojen rinnalla (sivu 67):

### ”Teknologian ja innovaatioiden kehittäminen

*Uusia, päästöjä vähentäviä ajoneuvoteknologioita ovat mm. sähkö- ja hybridi-autot.* Hybridiautoissa polttomoottorin rinnalla on yksi tai useampi sähkömoottori ja sähköenergian varastointiin soveltuva järjestelmä. Lähes kaikki suuret autonvalmistajat ovat kehittämässä sähköautoja. Tähän saakka sähkökäyttöisten autojen yleistymisen esteenä ovat olleet sähköenergian varastointiin liittyvät ongelmat. Uusin autoteknologia pyrkii yhdistämään akkusähköauton ja polttomoottori-hybridiauton parhaita puolia ns. lataushybridiautossa (”plugin” hybrid), jossa tavanomaisesta hybridiautosta poiketen on mahdollisuus ladata akkuja sähköverkosta.

Sähkö- ja **vetyauto** ovat meluttomia eikä niiden käytöstä aiheudu paikallisia, terveydelle haitallisia päästöjä. Kokonaisuutena sähkö- tai vetyautojen haitallisten päästöjen ja hiilidioksidipäästöjen määrä riippuu sähkön tuotantotavasta.

*Ajoneuvoteknologian tuomat hyödyt otetaan mahdollisimman laajasti käyttöön vaikuttamalla henkilöautovalintaan ja henkilöauton käyttötapaan auto- ja ajoneuvoverotuksella sekä voimakkaalla panostuksella informaatioon.”*

Yhteenvedona voi todeta, että vety energian kantajana ja vedyn todennäköisesti merkittävä rooli tulevaisuuden Suomen ilmasto- ja energiastrategiassa on lähes analysoimatta. Nähtäväksi jää, tuleeko vedyn todennäköinen rooli esitettyä strategian päivityksessä, vai siirtyykö tämä tapahtuvaksi em. Suomen energiatiekartan valmistelun yhteydessä.

## 6.2 Liikenne

Tämän hetken virallisissa liikenneskenaarioissa ja arvioissa ajoneuvojen käyttövoimavaihtoehtojen kehittymisestä vetyyn suhtaudutaan hyvin varovasti, eikä sen arvioida saavuttavan kovin merkittävää osuutta edes 2050 mennessä. LVM:n asettaman asiantuntijatyöryhmän käsityksen mukaan [Jääskeläinen 2012] henkilöautoissa osuus voisi olla 5 % vuonna 2050, raskaassa liikenteessä vastaavasti n. 8 %.

## 6.3 Teollisuuspolitiikka

Vedyn käyttö energian kantajana avaa uusia, joustavasti muunneltavia ja toisiaan täydentäviä mahdollisuuksia energiajärjestelmään. Sähkön (tuuli, aurinko ja muut uusiutuvat) tai kemiallisen (fotosynteesi) energian varastointi vetynä mahdollistaa myös ”väärässä paikassa ja väärään aikaan” sijaitsevien energialähteiden hyödyntämisen. Paikallisesti/hajautetusti tuotetun vedyn kerääminen ja uudelleen jakelu liikennepolttoaineeksi, säätö- ja varavoimaksi tai mikro-CHP avaa liiketoimintamahdollisuuksia cleantech-yrittäjille. Mittakaava voi vaihdella maatilain sivutoimesta tai mikroyrityksestä kansainvälisesti toimivaan suurteollisuuteen, esimerkiksi kotimaisen metsäteollisuuden toimijoihin.

Hajautetun biokaasutuotannon kasvun avulla on mahdollista vaikuttaa alueellisen talouden ja työllisyyden ohella myös Suomen vaihtotaseeseen. Vety toimii tässä ”voiteluaineena”, eli kehitystä helpottavana energian kantajana. Tavoite ei voi olla vedyn tuotannon tai kulutuksen kasvu, vaan vedyn erinomaisten ”energian kantominaisuuksien” älykäs hyödyntäminen mahdollistamaan uutta ja hyödyllistä liiketoimintaa.

Energiateollisuuden ohella vety luo uusia mahdollisuuksia valmistavalle teollisuudelle sekä ICT- ja palvelusektorille. Suomen terästeollisuudella (Rautaruukki, Outokumpu) on erinomainen valmius ja hyvät lähtökohdat vety-infrastruktuurin materiaalintoimittajana:

- Ruostumattomat austeniittiset teräkset ovat yleisesti käytettyjä materiaali-vaihtoehtoja moniin painelaitteisiin, putkiin ja vetyä käsitteleviin laitteisiin, joissa vaarana on vetyhaurauden aiheuttama riski.

Karrikoiden: 316NG  $\approx$  316HG, eli nuclear grade on hydrogen grade.



- Pienempään painoon tai hintaan pyrittäessä, esimerkiksi putkistoissa ja kaasunkuljetusrekoissa päädytään kuitenkin austeniittisia teräksiä lujempiin ferriittisiin teräksiin, joista arktiset rakenne- ja paineastiateräket soveltuvat tarkoitukseen parhaiten. Rautaruukilla on jo tuotannossaan valikoima teräksiä, joilla on kysyntää vetyinfraa rakennettaessa.

Vedyn markkinoiden kasvaessa voidaan olettaa, että siitä tulee LNG tapainen maailmankaupan tuote, jota kuljetetaan meritse. Osa H<sub>2</sub>-tankkereista tulee varmasti liikennöimään Koillisväylällä ja muilla arktisilla merillä. Tämä tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia Suomalaisille telakoille.<sup>5</sup>

FCEV autojen tuotekehitykseen tarvittavat teknologiapanostukset ovat osoittautuneet isoiksi haasteiksi eräille kansainvälisesti toimiville autonvalmistajillekin. Suomessa ei ole varteenotettavaa itsenäistä alan toimijaa, mutta Valmet Automotiven yhteistyö Daimlerin kanssa saattaisi otollisessa tilanteessa johtaa aluksi pienemmässä sarjoissa valmistettavien FCEV mallien kokoonpanoon Uudessakaupungissa.

Autoteollisuuden käyttämien polttokennojen sarjavalmistuksen käynnistyminen tarjoaa tilaisuuden soveltaa hinnaltaan kohtuullisia polttokennoja työkoneiden ja erikoisajoneuvojen voimanlähteenä. Satamalaitteiden alueella Suomessa on T&K projekteja jo käynnissä. Rovaniemellä kehitetty konsepti savuttoman ja hiljaisen moottorikelkkasafarin kulkuvälineestä on palvelu- ja matkailusektorillekin ulottuvana loistava ”monikärkiohjus”, joita kaivattaisiin lisää – ja vakavan panostuksen kohteeksi.

EU:n alueelle 2050 mennessä rakennettavaksi suunnitellun vetyasemaverkoston ja muun jakeluinfratuurin rakentamisessa avautuu mittava markkinapotentiaali vientiteollisuudellemme. Erään arvion mukaan vetyautojen laajamittainen markkinoille tulo edellyttää EU:ssa 20–30 miljardin investoinnit 2020 mennessä ja 100 miljardia 2050 mennessä [McKinsey 2011]. Woikoski Oy:n kehittämällä vetytankkausasemalla on siis parhaimmassa tapauksessa huomattava vientimahdollisuus. Vastaavia avauksia kaivataan lisää.

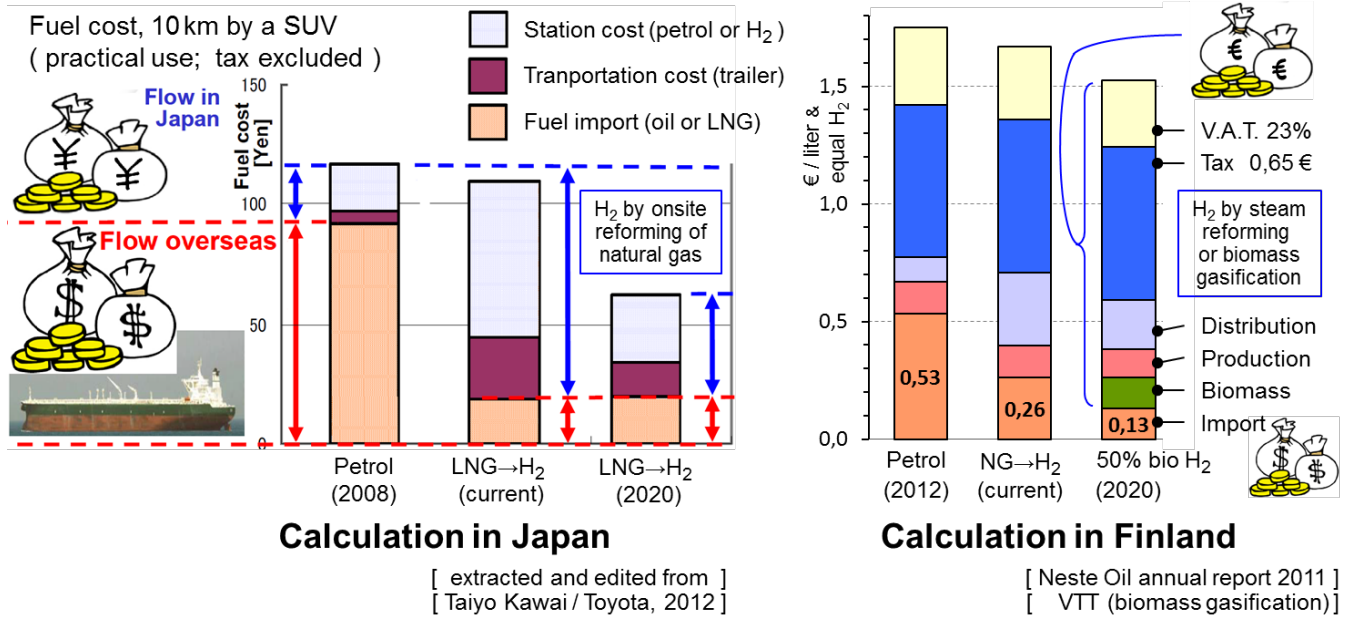
Mikäli 2015 autokauppaan tulevat polttokennoautot saavat vähänkään samanlaisen vastaanoton kuin hybridit ovat saaneet, vetyinfran rakentamisessa on edessä pitkäaikainen korkeasuhdanne. Nyt on syytä tutkia markkinapotentiaalit ja kammata liiketoimintamahdollisuudet, sillä eturivin paikat siihen markkinaan jaetaan nyt.

## 6.4 Vaihtotase

Liikenne-energian osalta on helppo tehdä vertailulaskelmia vedyn käytön vaikutuksesta vaihtotaseeseen. Kuvassa 6.1 a esitetty Japanilainen laskelma osoittaa, että raakaöljyn tuontiin perustuvien liikennepolttoaineiden korvaaminen vedyllä vaikuttaa merkittävästi vaihtotaseeseen. Tuonnin arvon vähentyessä ja lopullisen kuluttajahinnan säilyessä ennallaan, kansantaloudelle syntyy merkittävää etua

<sup>5</sup> Norjassa on laadittu öljyn jälkeisen energiaviennin strategia, jossa pohjoisen valtaviin offshore tuulipuistojen tuottama 50 GW sähköteho muutetaan vedyksi. Skenaariossa vetyä viedään 150 vetytankkerilla Saksaan, mikä on laskettu sähkökaapelia edullisemmaksi siirtotavaksi. Osa noista 150 vetytankkereista voitaisiin suunnitella ja rakentaa Suomessa.

sekä vaihtotaseen että työllisyyden paranemisen ansiosta. Vetyjakelujärjestelmän kilpailukyvyyn paraneminen luo myöhemmin potentiaalia kuluttajahinnan laskulle.



a)

b)

Kuva 6.1. Laskelma liikennepolttoaineena käytettävän vedyn suhteellisesta vaikutuksesta vaihtotaseeseen a) Japanin tapauksessa [Kawai 2012 (edited J.S.)] ja b) alustava laskelma Suomen osalta.

Yksinkertainen laskelma vahvistaa, että raakaöljypohjaisten ja tuontiraaka-aineeseen perustuvien biodieselin käyttöä korvaavan vedyn yleistyminen vaikuttaa samansuuntaisesti vaihtotaseeseen myös Suomessa, kuva 6.1 b. Näkyvä vaikutus saadaan, kun polttokennoautojen määrä kasvaa riittävästi. Mikäli bensiini- ja diesel-käyttöisen liikennekaluston ja infran vaihtaminen vetyyn olisi kokonaisuudessaan mahdollista, vaikutus Suomen vaihtotaseeseen olisi vuositasolla miljardin euron luokkaa. Merkittävä muutos vaatii pitkän aikajakson. Säästöpotentiaali on kuitenkin sitä luokkaa, että suosittelemme tilaisuuteen tarttumista. Varsinkin, kun samalla saavutetaan merkittäviä muita etuja ainakin huoltovarmuuden ja ilmastopoliittikan saralla.

Nestemäisistä liikennepolttoaineista merkittävä osa jalostetaan raakaöljystä, jonka tuontiarvo on noin 6 G€a [Neste Oil 2011]. Neste Oy öljynjalostamot ovat samalla Suomen suurimmat vedyn tuottajat (90 %) ja käyttäjät (90 %). Vedyllä on keskeinen rooli raakaöljyn – ja erityisesti biodieselin – jalostuksessa liikennepolttoaineeksi. Porvoon jalostamolla toimii maailman suurimpiin ja tehokkaimpiin lukeutuva vetytehdas, joka tuottaa vetyä maakaasun höyryreformoinnilla. Mikäli vedylle olisi kysyntää ja jakeluverkko, Neste Oil pystyisi toimittamaan tiettyyn ajosuoritteeseen tarvittavan polttoaineen vetynä selkeästi nykyistä edullisempaan ja paremmalla katteella. Tämä perustuu sekä polttokennoautojen hyvään energiahyötysuhteeseen että maakaasun edulliseen hintaan (öljyyn suhteutettuna).

Edellä mainittujen vientituotteiden (teräs, laivat, kulku- ja työvälineet, vetyjakeluasemat, biojalostamot ja muut laitteet) markkinoille saattaminen vaikuttaa luonnollisesti vaihtotaseeseen. T&K panostuksilla voidaan vaikuttaa lopputulokseen.

## 6.5 Infrastruktuurivaihtoehdot

Vetyinfrastruktuurin loppukäyttäjiä ovat:

- vetyautot
- vetybussit
- muut kulkuneuvot, esim. veneet ja moottorikelkat
- trukit ja muut työkoneet
- laivojen ja rekkojen APU-laitteet
- kaukolämpölaitokset tai kiinteistökohtaiset mikro-CHP-laitokset
- varavoimalaitokset
- vetyä käyttävä teollisuus.

Jos liikennepolttoaineena vedyn verolliseksi tavoitehinnaksi asetetaan 10 €/kg H<sub>2</sub> tulee polttokennoauton kilometrikustannukseksi 6–10 €/100 km kulutuksesta 100–150 km/kg H<sub>2</sub> riippuen, mikä vastaa taloudellisen diesel-auton nykykustannusta ja on alle keskimääräisen bensiiniauton kilometrikustannuksen.

Mikro-CHP-laitoksen polttoainekustannusta voidaan verrata sähkön kuluttajahintaan. 8 €/kg H<sub>2</sub> verollinen kuluttajahinta vastaa 0.24 €/kWh hintaa, joka on 60 % suurempi kuin sähkön keskimääräinen kuluttajahinta Suomessa, mutta vastaa Saksan ja Tanskan nykyisiä sähkönhintoja. Vedystä tosin saadaan vain puolet sähköksi.

Vedyn jakelua voidaan lähteä kehittämään seuraavasti:

- kaasumaisen vedyn putkijakelu puhtaana vetynä
- kaasumaisen vedyn jakelu pullokonteissa ym. paineastioissa rekoilla, junilla ja laivoilla
- kaasumaisen vedyn jakelu maakaasuun sekoitettuna
- nestemäisen vedyn jakelu rekoilla, junilla ja laivoilla
- vedyn jalostaminen synteettisiksi hiilivedyiksi esim. SNG, metanoli
- paikallinen, hajautettu vedyn tuotanto kulutuskohteessa
- yhdistelmä edellisistä.

Seuraavassa arvioidaan eri vaihtoehtojen hyviä ja huonoja puolia.

### *Kaasumaisen vedyn putkijakelu*

Ainoastaan kaasumaisen vedyn putkijakelussa saavutetaan täysi hyöty vedyn hyvästä konversiohyötysuhteesta sähkökemiallisissa reaktoreissa (elektrolyysi- ja polttokennot) ja biomassan jalostuksessa. Putkijakelu on tunnettua tekniikkaa teollisuusvedyn siirrossa, mutta vaatii kuitenkin kalliin uuden infrastruktuurin, mitä on lähdetty pienimuotoisesti kokeilemaan vain Japanissa ja Tanskassa. Vedyn siirtolinjojen (30 bar, Ø 250 mm) kustannusarviot vaihtelevat välillä 500.000–1.000.000 €/km maastosta riippuen, mikä vastaa suuruusluokaltaan nykyisten maakaasuputkistojen kustannuksia [Ball 2009].

Kaasumaisen vedyn putkijakelu voisi tarjota suuren innovaatiopotentiaalin ja markkinoita etenkin terästeollisuudelle. Lisäksi vaadittaisiin uutta teknologiaa vedyn paineistukseen, venttiileihin, vuodonpaikannukseen ja uusia varastokonsepteja kaasumaiselle vedylle. Kaasumaisen vedyn putkijakelua voitaisiin kokeilla pienimuotoisesti paikkakunnilla, joissa sivutuotevetyä on saatavilla. Käyttökohteenä olisi esim. kiinteistökohtaiset mikro-CHP laitokset.

Paikallinen kaasun jakelu olisi monopolitoimintaa kuten sähkön jakeluin, joten sille olisi luotava kuluttajan edut turvaavat säädökset.

#### *Kaasumaisen vedyn jakelu pullokonteissa*

Tämä on nykyisin vallitseva jakeluteknologia teollisuusvedylle ja ensi vaiheessa käytössä myös pienillä vetypolttoainemasemilla. Konttien kapasiteettia voidaan nostaa siirtymällä teräspulloista komposiittipulloihin ja nostamalla pullojen painetta, mutta teknologialla on vain rajoitettu kehityspotentiaali. Pullokonttien jakelu kauas tuotantopisteestä ei ole energiataloudellisesti järkevää.

Pullokontit ja -patterit ovat ensisijainen jakelujärjestelmä pienissä varavoimajärjestelmissä. Pullojakelua voitaisiin laajentaa esim. maatilakohtaisiin CHP-laitoksiin, jos polttoaine- ja jakelukustannukset saadaan riittävän alas.

#### *Kaasumaisen vedyn jakelu maakaasuun sekoitettuna*

Kaasumaisen vedyn jakelu ja käyttö maakaasuun sekoitettuna on tutkimuskohteena esim. Saksassa. Teknologiaan liittyy mm. mittaus- ja materiaalitekniisiä haasteita ja juridisia kysymyksiä. Suomen maakaasuverkko on yhden operaattorin käytössä eikä Suomesta toistaiseksi viedä maakaasua ulos, joten juridiset kysymykset olisivat helpommin ratkaistavissa. Puhtaan vedyn hyödyt osin menetetään, kun sitä sekoitetaan hiilivetyihin, ja loppukäyttölaitteita joudutaan säätämään uudelleen, jos vedyn pitoisuus nousee merkittäväksi.

Vedyn uudelleenerotus maakaasusta loppukäyttökohteessa voisi edistää maakaasuverkoston käyttöä vedyn siirrossa. Tällöin siirron pitäisi kuitenkin tapahtua yhtä putkea pitkin rajatulla alueella, ja kaasujen erotukseen pitäisi kehittää entistä edullisempia esim. membraani-teknologioita.

#### *Nestevedyn jakelu*

Nestevedyn kuljetus on edullisin tapa siirtää suuria vetymääriä maanteitse. Nestevelyä voidaan varastoida huomattavasti kompaktimmin kuin kaasumaista vetyä. Vedyn nesteytys kuluttaa kolmanneksen kaasun energiasisällöstä, mutta nestevedyn paineistus on edullisempaa kuin kaasun ja nestevely on valmiiksi jäädytetty, mikä mahdollistaa nopean tankkauksen vetyjakeluasemilla. Nesteveysliöiden höyrystyshäviöt olisi aina otettava talteen ja saatava energian tuotantoon. Nesteveytinfrastruktuuria voitaisiin pitkällä tähtäyksellä käyttää myös laivoilla tuodun vetypolttoaineen jakeluun. Nestevedyn kustannukset, hyödyt ja haitat verrattuna muihin synteettisiin polttoaineisiin tulisikin tarkemmin selvittää.

#### *Vedyn jalostus synteettiseksi maakaasuksi*

Tässä vaihtoehdossa edullisesta sähköstä tuotetusta vedystä tai teollisuuden sivutuotevedystä tehtäisiin synteettistä maakaasua metanoimalla se hiilidioksidin avulla. Jakelu ja käyttö tapahtuisivat nykyisen kaasuverkon kautta. Tämä olisi kustannuksiltaan edullinen ratkaisu, mutta vedyn hyötysuhde-edut maakaasuun nähden jäisivät hyödyntämättä.

#### *Paikallinen hajautettu vedyn tuotanto*

Tässä vaihtoehdossa vetyä tuotettaisiin paikallisesti maakaasusta, biokaasusta tai

sähköstä tarpeen mukaan esim. kaukolämpö- ja kiinteistökohtaisissa mikro-CHP-laitoksissa ja vetypolttoaineasemilla. Tämä ratkaisu on käytössä mikro-CHP-kokeiluissa maissa, jossa maakaasupolttimia käytetään yleisesti kiinteistöjen lämmityksessä (Saksa, Englanti) ja yleistyy vetypolttoaineasemilla niiden koon kasvaessa.

Hajautettuun vedyn tuotantoon on jo pienimuotoista maakaasun reformointi- ja elektrolyysiteknologiaa olemassa, mutta kustannukset ovat vielä korkeat. Kiinteän biopolttoaineen kaasutusta ja reformointia ei ole vielä toteutettu pienessä mittakaavassa.

Hajautetut ratkaisut soveltuvat huonosti hiilidioksidin talteenottoon.

## 6.6 Varautuminen

### 6.6.1 Sosiaalinen hyväksyttävyyys

Uusien teknologioiden hyväksyttävyyys voidaan jakaa yleiseen (globaaliin) ja paikalliseen hyväksyttävyyteen [VanBree 2010]. Yleinen hyväksyttävyyys tarkoittaa sitä, että asiaan suhtaudutaan periaatteessa myönteisesti, ja paikallinen hyväksyttävyyys sitä, että suhtaudutaan myönteisesti lähiympäristössä toteutettavaan konkreettiseen hankkeeseen.

Suuren yleisön tietoisuus vetyteknologioista on vielä heikkoa. Vety puhtaana polttoaineena herättää positiivisia mielikuvia mutta palavana kaasuna myös huolta turvallisuudesta. Sosiaalista hyväksyttävyyttä voidaan tutkia kyselytutkimuksilla ja edistää asiapitoisella mutta kansantajuisella tiedotustoiminnalla sekä hyvin toteutetuilla demonstraatiohankkeilla. Vetybussi- ja taksidemonstraatiot Vancouverin, Pekingin ja Lontoon olympialaisissa saivat paljon myönteistä julkisuutta. Toisaalta asiantuntijoiden ristiriitaiset lausunnot esim. turvallisuuskysymyksistä voivat herättää sosiaalista vastustusta. Suomessa vetyteknologioiden hyväksyttävyyttä ei ole tutkittu.

Koehankkeiden paikallisen hyväksyttävyyden saavuttamiseksi avoin hankevalmistelu ja eri osapuolten sekä paikallisen väestön varhainen mukaanotto ja eri näkökantojen yhteensovittaminen ovat avainasemassa. Myös hankkeen toteuttaja-organisaatio voi vaikuttaa paikalliseen hyväksyttävyyteen teknologiasta riippumatta.

### 6.6.2 Turvallisuuden varmistaminen

Vedyn käytön laajeneminen uusille sovellusalueille (esimerkiksi polttokennoajoneuvot, uusiutuvien energialähteiden energiavarastot jne.) ja siirtyminen kohti vetytaloutta edellyttävät, että nämä muutokset voidaan tehdä turvallisesti ja hallitusti. Alalla toimivien yritysten, viranomaisten ja muiden toimijatahojen on osaltaan varmistettava turvallisuus vetyteknologian kehityksen ja käyttöönoton kaikissa vaiheissa. Mahdollisilla vedyn käyttöön ja vetysovelluksiin liittyvillä onnettomuuksilla voi olla hyvin suuri negatiivinen vaikutus vedyn käytön lisäämistä koskevaan yleiseen mielipiteeseen.

Suuri osa vetyteknologian turvallisuuden varmistamista koskevista säädöksistä tulee EU-tasolta mm. erilaisina direktiiveinä, joiden vaatimukset siirretään Suomen kansalliseen lainsäädäntöön. Esimerkkejä ovat mm. painelaitedirektiivi, konedirektiivi, ATEX-direktiivit, EMC-direktiivi ja pienjännitedirektiivi. Suomalaisen toimijoiden on tunnettava turvallisuuteen liittyvien säädösten asettamat vaatimukset ja niiden soveltaminen vetyteknologiaan. Samoin on tärkeää, että Suomessa ollaan tietoisia suunnitteilla olevista säädösmuutoksista ja mahdollisista kokonaan uusista vetyteknologiaan vaikuttavista säädöksistä. Tieto uusista vaatimuksista on saatava hyvissä ajoin suomalaisten yritysten ja muiden toimijoiden käyttöön. Joissain tapauksissa voidaan myös pyrkiä vaikuttamaan säädösten sisältöön.

Vetyteknologian käyttöönoton alkuvaiheessa turvallisuusviranomaisten, esimerkiksi Tukes, Työsuojeluhallinto, Sisäasiainministeriö/Pelastustoimi, Trafi jne., yhteistyö vetysovelluksiin liittyen helpottaisi alan toimijoita säädösten ja niiden soveltamisen mahdollisten pulmakohtien kanssa. Myös viranomaisten laatimat käytännönläheiset ohjeet erilaisten vetysovellusten turvallisuuden varmistamiseksi olisivat tarpeen heti sovellusten yleistymisen alkuvaiheessa (vrt. esim. Suunniteluohje maa- ja biokaasun tankkausasemille [Maakaasuohje 2012]).

Myös tiedon jakamisen ja kokemusten keräämisen kannalta tulisi vetysovellusten yleistymisen alkuvaiheesta lähtien olla kansalliset menettelyt vedyn käyttöön liittyvien onnettomuus-, vaaratilanne- ja häiriötietojen keräämiseksi (vrt. esim. Tukesin ylläpitämä Vaurio- ja onnettomuusrekisteri [VARO 2012] tai DOE:n ylläpitämä H2Incidents-tietokanta [H2incidents 2012]). Tällaiseen tietokantaan kerätyt tapahtumat ja tilanteet palvelisivat esimerkiksi vetysovellusten parissa toimivia suunnittelijoita ja asiantuntijoita turvallisuusnäkökohtien huomioon ottamisessa. Vetyteknologian yleistyessä tulisi myös olla vedyn käytön ja sovellusten turvallisuutta koskevaa koulutusta niin suunnittelijoille kuin muille sovellusten kanssa toimiville.

Vetysovelluksia koskevan standardoinnin suhteen suomalaisten yritysten ja muiden toimijoiden olisi hyödyllistä tunnistaa tärkeimmät standardointiryhmät ja osallistua ryhmien työskentelyyn. Näin voitaisiin saada uusinta standardointitietoa Suomeen ja myös vaikuttaa alan standardointiin.

### 6.6.3 Koulutus- ja tutkimustarve

Vetyteknologian käyttöönotto edellyttää laajaa koulutus- ja tutkimustoimintaa. Koulutus voi lähteä jo peruskoulusta, jossa vedyn käyttöä energian kantajana voidaan havainnollistaa monin tavoin. Esimerkiksi opetuskäyttöön suunniteltuja aurinko-, elektrolyysi- ja polttokennon pienimuotoisia yhdistelmiä on yleisesti saatavilla. Vedyn eri tuotanto- ja käyttötapoja voidaan sitten syventää ylemmillä luokilla ja lukioissa.

Vetyteknologiaan liittyvien laitteistojen suunnitteluun, valmistukseen ja huoltoon liittyvää opetusta ammattikorkeakouluissa pitää lisätä sitä mukaa, kun laitteistot yleistyvät. Sähkö- ja hybridautojen huoltoon ja katsastukseen liittyvä koulutus palvelee myös tulevaa polttokennoautojen tarvetta.

Vetyturvallisuuteen liittyvää materiaalia on runsaasti saatavilla julkisistakin lähteistä [Molkov 2012]. Vetyyn liittyviä erityisvaatimuksia tulee käsitellä

turvallisuus- ja kaupunkisuunnitteluviranomaisten kanssa ja alan standardit viedä kansalliseen lainsäädäntöön. Näitä kysymyksiä tarkastellaan tarkemmin Vuosaaren satamassa toteutettavassa vetytiekartalle rinnakkaisessa Demo-turvallisuus-hankkeessa [Demo 2013].

Suositteluvia tutkimusaiheita ovat:

- biovety: kaasutus-, pyrolyysi- ja reformointiprosessit, käymisreaktiot/bio-kaasu/etanoli, nestemäiset vedyn kantajat, levät
- polttoaineinfrastruktuurin materiaalit ja komponentit
- vedyn paineistus ja paineastiat
- mikro-CHP-teknologia
- vedyn käyttö biopolttoaineiden jalostuksessa
- elektrolyysiprosessit
- vedyn nesteytys ja nestevedyn varastointi, komprimointi ja muu käsittely
- vedyn laajamittainen varastointi esim. kallioluolissa
- energian konversioketjujen hyötysuhde ja taloudellisuustarkastelut
- vetyturvallisuus
- älykkäät energiaverkot.

#### 6.6.4 Demonstraatiot

Tekesin Polttokennot-ohjelma ja Teknologiateollisuuden polttokennotoimialaryhmä ovat käynnistäneet Vuosaaren satamassa DEMO2013-hankkeen [Demo 2013], jonka tavoitteena on esitellä polttokenno- ja vetyteknologioita laajalajaisesti satamaympäristössä. Tämän lisäksi tulisi demonstroida metsäbiomassan kaasutukseen perustuva vedyn tuotanto vetyä käyttävän kemian teollisuuden yhteydessä. Mielenkiintoinen kokoluokka olisi 10–30 MW.

Paikkakunnilla, joissa on sivutuotevetyä käytössä (Oulu, Joutseno, Äetsä), voidaan käynnistää mikro-CHP kokeiluita ja selvittää mahdollisuus hyödyntää sivutuotevetyä biopolttoaineiden jalostuksessa. Ouluun suunniteltu Hiukkavaaran kaupunginosa olisi mahdollinen koekohde mikro-CHP-laitoksille.

Polttokennoautoja ja -busseja olisi saatava koekäyttöön kuten muissakin Pohjoismaissa, jotta niistä saadaan ensikäden käyttökokemuksia. Rovaniemi olisi sopiva demonstraatiokohde polttokennoautoille, koska siellä on Arctic Driving Centerin vetyasema ja joulupukin avulla kokeiluille voitaisiin saada kansainvälistä huomiota. Bussien koekäyttö voitaisiin tehdä suurimmissa kaupungeissa. Helsingin Vuosaaren tulee DEMO2013-yhteydessä vetytankkausasema. Tampereella ja Turussa voitaisiin hankkia kokemuksia polttokennobusseista ennen kuin tehdään päätöksiä raitioliikenneinvestoinneista.

#### 6.6.5 Valtion ja kuntien rooli

Valtio voi edistää uuden teknologian käyttöönottoa tukemalla tutkimus-, kehitys- ja demonstraatiotoimintaa. Tuen muotona voi olla T&K rahoitus, investointituet koelaitoksille, verohelpotukset tai syöttötariffi. Puhdasta energiateknologiaa pyritään edistämään myös päästökaupan avulla, mikä on kuitenkin toistaiseksi osoittautunut varsin tehottomaksi. Tukipolitiikan pitäisi aina olla pitkäjänteistä ja ennustettavaa ja se pitäisi räätälöidä kunkin maan erityisolosuhteet huomioon

ottaen parhaan kustannustehokkuuden saavuttamiseksi.

Teknologiaa voidaan edistää myös lainsäädännöllä ja asetuksilla. Vety- ja polttokennoteknologioita koskevien hallinnollisten määräysten kansainvälinen harmonisointi ja kansallinen implementointi tavoitteena mahdollisimman joustavat käytännöt – turvallisuudesta luonnollisesti tinkimättä – ovat tässä avainasemassa.

Tanska ja Norja ovat päätyneet tukemaan sähkö- ja polttokennoautojen käyttöönottoa myöntämällä vapautuksen muutoin korkeasta autoverosta. Vetytankkausinfrastruktuurin rakentaminen sitoo pääomia, joitten tuotto-odotus on ensi vaiheessa alhainen ja vaativat siten esim. investointitukia. Mikro-CHP-laitokset voivat olla joko paikallisen energiayhtiön omistuksessa kuten Saksassa tai yksityisomistuksessa, jolloin niiden käyttöönottoa voidaan edistää joko investointiavustuksin kuten Japanissa tai syöttötariffein.

Kunnat voivat vaikuttaa uusien tekniikoiden käyttöönottoon kaavoituksessa ja teknologiavalinnoilla julkisissa hankinnoissa. Vetytankkausasemat ja mahdolliset putkilinjat vaikuttavat yhdyskuntarakenteeseen. Kuntien ja kunnallisten liikennelaitosten rooli on keskeinen etenkin polttokennobussikoikeiluissa.

## 6.7 Keskeisiä yhteistyöverkostoja

### 6.7.1 Suomessa ja EU:ssa

Suomessa on Tekesin Polttokennot-ohjelman ympärille rakentunut asiantunteva tutkimusyhteisö, jonka työn jatkuvuus olisi turvattava ja aihepiiriä laajennettava vety-yhteiskuntaan laajemmin. Teollisuuspuolella luonnollinen toimija on teknologiateollisuuden polttokennoryhmä. Yksi mahdollinen viitekehys vetytalouden ja -yhteiskunnan kehitykseen olisi Energia- ja ympäristöalan strategisen huippuosaamisen keskittymä Cleen Oy [Cleen 2012].

Pohjoismaista polttokennoyhteistyötä on toteutettu Nordic Energy Researchin [NER 2012] kautta. 1990-luvun alussa toteutettu pohjoismaainen polttokennoteknologioiden tohtorikoulutusohjelma oli erittäin hedelmällinen tapa toimia. Ohjelmassa koulutetut henkilöt ovat alan keskeisiä toimijoita kaikissa pohjoismaissa.

EU-tasolla keskeinen yhteistyöfoorumi on Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU) ja sen teollisuus- ja tutkimuslaitoskonsortiot. FCH-JU:n tavoitteita on esitelty kappaleessa 6.1.

Vastaavasti kuin yritykset ovat perustaneet yhteistyöelimen EU:n FCH-JU-ohjelman piiriin, ovat EU:n alueelliset merkittävät kaupungit ja maakunnat perustaneet oman yhteistyöelimen, HyRaMP (Regional and Municipal Partnership for Hydrogen and Fuel Cells). Se perustettiin v. 2008 EU:n komission tuella polttokennojen ja vetyteknologian käyttöönoton edistämiseksi. Alueelliset toimijat nähtiin tehokkaiksi toteuttamaan EU:n 20-20-20-ilmastotavoitteita liikenteen ja energiantuotannon päästöjen vähentämiseksi.

Heti ensimmäisten toimintavuosien aikana yhteisöön liittyi 35 aluetta tai kaupun-



kia (kuva 6.3), niiden joukossa Suomessa vuosia toiminut Äetsän vetykylähanke oli mukana liittämässä Pirkanmaan maakuntaa HyRaMP:in jäseneksi. Suomen osallistuminen on toistaiseksi jäänyt kovin vaisuksi, vaikka alueellisen yhteistyöelimen nimi vastikään muutettiin HyER:iksi (Hydrogen and Electric Mobility in European Regions), kun mukaan otettiin myös sähköiset kulkuneuvot, missä Tampereen alueen toimijoilla on vankka asema sähköistä liikkuvuutta edistävissä kansallisissa kehityshankkeissa.



Kuva 6.3. HyER (ent. HyRaMP) jäsenistöä [HyER 2012].

HyRaMP/HyER on ollut kokoamassa yhteisiä EU-hankkeita polttokennobussien, vetyinfrastruktuurin rakentamiseksi polttokennokulkuneuvoille ja mikro-chp järjestelmien käyttööntömiseksi erityisesti syrjäseuduilla. Bussihanke, nimeltään CHIC, on sitoutunut viemään puhtaan, vetyyn perustuvan julkisen liikenteen kaupalliselle asteelle Euroopassa. Jo kolmessa vaiheessa toteutetut paikallisen julkisen liikenteen polttokennoistamisprojektit ovat tuoneet polttokennobussit yleisön koettaviksi pariin kymmeneen kaupunkiin lähinnä HyRaMP:in yhteisten hankkeiden mahdollistaman Euroopan Keskuspankin investointituen avulla. Sillä on saatu hankinta kunnille vastaamaan perinteisten bussien hintatasoa.

H2MovesScandinavia ja HyTEC ja FR EVUE yhteishankkeet rakentavat vedyn jakeluinfrastruktuuria tuleville polttokennoautoille. Ene.field yhteistyön kautta haetaan esimarkkinointitukea polttokennomikro-chp laitteille osana syrjäseutujen hajautettua energiantuotantoa tavoitteena uusiutuviin energioihin ja biomassan kaasutukseen perustuva puhdas omavarainen ja halpa sähkön ja lämmön tuotanto. Käyttäjän avuksi tässä tulee useissa Euroopan maissa antelias syöttötariffi. Suomessa ei ole käyttäjiin kohdistuvaa tukimuotoa vielä esikaupallisten järjestelmien hankintaa edistämään.

Meneillään olevat projektit toteuttavat hyvin HyER (HyRaMP) toimintalinjauksia:

- jäsentenvälinen tiedonvaihto vety- ja polttokennoteknologian oppimisen, kehittämisen ja käyttöönoton edistämiseksi EU:ssa
- olla mukana JCH-JU tavoitteiden toteuttamisessa ja vaikuttamassa yhteisiin rahoitusmekanismeihin, yhteishankintoihin, standardien ja määräysten ajanmukaistamiseen ja alan yleisen tietouden kohentamiseen
- alueellisten toimien ja rahastojen harmonisointi tavoitteena laajat yhteishankkeet.

Suuri osa HyER Brysselin toimiston kuluista katetaan EU:n t&k-määrärahoilla. Sen avulla aikomuksena on aikaistaa nollapäästöisten kulkuneuvojen käyttöönotto 35 jäsenalueella, vakuuttaa päättäjät vety- ja polttokennoteknologioiden käytettävyydestä, toimittaa paikallisille päättäjille pitkän tähtäimen sitoumukset vetyinfrastruktuurin rakentamiseen ja valmistautua vakaiden markkinoiden luomiseen alueellisin käyttöönottoesimerkein.

The European Hydrogen Association (EHA) on samalla asialla, edistämässä vetyteknologian uusia markkinoita ja tukemassa uuden liiketoimintasektorin rakentamista. Järjestöllä on jo yli 20 kansallista vety-yhdistystä jäsenenään sekä toistakymmentä vetyalan suurimpia yrityksiä tukemassa toimintaa. Suomea EHA:ssa edustaa Teknoliateollisuuden Polttokennotoimialaryhmä.

Jäsenrakenne on antanut EHA:lle suorat yhteydet paikallisiin kehityshankkeisiin ja valtuudet edustaa EU:n päätöksentekotasolla alan teollisuuskysymyksissä ja tärkeissä määräysten uudistamiseen liittyvissä aiheissa. Itse asiassa vuodesta 2008 lähtien EHA on isännöinyt yllä kuvattua HyER-, aiemmin HyRaMP-yhteistyöelintä.

EHA:n missiona on:

- edistää ja kannustaa osallistumista EU:n vetyalan kehitysohjelmiin
- edustaa jäsenmaitaan kansallisissa ja kansainvälisissä organisaatioissa vetyalan lakien ja määräysten kehittämiseksi
- toimia tiedonjakajana tai koota asiantuntemusta yhteisten t&k hankkeiden ja standardien luomiseen
- tukea vetyalan koulutuksen kehittämistä.

EHA on koordinoanut ja julkaissut jo ainakin kolme vetyteknologian tulevaisuudenkatsausta, viimeisin nimeltään: Energy Infrastructure 21 – Role of Hydrogen in Addressing the Challenges in the new Global Energy System (Energiantuotannon infrastruktuuri – Vedyn rooli uuden globaalin energiajärjestelmän haasteiden julistuksessa) [EHA 2010]. Raportti on strategiaesitys vedyn roolista energiankantajana muuttuvassa energia- ja ilmastokentässä. Kun vähittäin joudutaan korvaamaan fossiilisten polttoaineiden käyttöä uusiutuvilla lähteillä, tulee vedyllä olemaan keskeinen asema sähköisten kulkuneuvojen ja älykkään energiaverkoston kehittämisessä.

Aineisto nojaa aiempiin katsauksiin primäärienegialähteistä vedyn tuottamiseksi, selvästi ilmaisten, että uusiutuvat energiat tulevat muodostamaan turvallisimman ja kestävimmän lähteen vedyn tuotannolle. Toinen raportti kuvasi kuinka vety ja polttokennot helpottavat uusiutuvien energioiden käyttöönottoa.

## 6.7.2 Kansainväliset toimijat

Kansainvälisessä yhteistyössä Suomi on osallistunut kansainvälisen energiajärjestön IEA:n vety- ja polttokennosopimukseen [IEA HIA, IEA AFC]. Aalto yliopisto ja Tampereen teknillinen yliopisto ovat osallistuneet vety- ja VTT polttokennoyhteistyöhön. Bilateraaliyhteistyö alan keskeisten toimijoiden (Japani, Korea, USA, Saksa) on arvioitava tapauskohtaisesti.

IEA:n rinnalla kansainvälisesti toimii myös International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in Economy (IPHE) [IPHE 2013], jonka jäsen Suomi ei ole.

# 7 NÄKÖKULMIA

## 7.1 Haastattelujen toteutus

Yrityshaastattelut toteutettiin yritysvierailuina heinä–lokakuussa 2012. Tutkimusorganisaatioiden haastattelut tehtiin puhelinhaastatteluina ja taustaraportti kierrätettiin lausuntokierroksella helmikuussa 2013.

## 7.2 Yritysten näkemyksiä

Haastateltujen yritysten keskeisiä kytkentöjä vety-yhteiskuntaan on lueteltu seuraavassa.

Woikoski Oy on kaasuyhtiö, jolla on 13 toimipistettä ja 170 jälleenmyyjää Suomessa ja joka toimittaa vetyä teollisuuskäyttöön. Woikoski uskoo vedyn energiakäyttöön ja kehittää omaa jakeluasemakonseptia liikennekäyttöön.

Kemira Oyj:lla syntyy valkaisu- ja kemikaalien tuotannossa merkittäviä määriä sivutuotevetyä. Kemira haluaa edistää vedyn energiakäyttöä alkuvaiheessa, muttei näe itselleen merkittävää liiketoimintapotentiaalia alueella.

Neste Oil Oyj on Suomen suurin vedyn tuottaja ja käyttäjä. Tuotettu vety kuluu öljyn jalostuksessa. Biopolttoaineiden tuotanto lisää vedyn kulutusta.

Gasum Oyj toimittaa maakaasua vedyn tuottajille. Gasum seuraa vetyteknologian kehitystä. Kiinnostuksen kohteena ovat vedyn käyttö liikennepolttoaineena, biovedyn tuotanto ja maakaasuverkon käyttö vedyn varastoinnissa ja siirrossa.

Neste Jacobs Oy suunnittelee kaasuverkkoja ja -varastoja sekä vedyn tuotantoyksiköiden integrointeja öljyn jalostusprosesseihin.

Cargotec Oyj tutkii polttokennoja satamatyökoneiden voimanlähteenä ja on kiinnostunut vedyn jakeluinfrastruktuurista etenkin satamaympäristöissä.

Outotec Oyj kehittää vedyn ja rikkihapon yhdistettyä tuotantoprosessia ja on kiinnostunut vedyn teollisuuskäytöstä etenkin metallurgisten prosessien yhteydessä.

Fortum Oyj on kiinnostunut sähköverkon stabilointiin liittyvistä asioista ja vetyteknologioiden kustannuksista.

STX Europe seuraa nestevetytankkereiden kehitystä osana kaasutankkereiden yleistä kehitystä, muttei näe niille tarvetta lyhyellä tai keskipitkällä aikavälillä.

### 7.3 Ministeriöiden näkemyksiä

**Työ- ja elinkeinoministeriössä (TEM)** arvioidaan että liikenne ei tule sähköistymään Suomessa niin nopeasti kuin on ennustettu, perusteena ovat pitkät kuljetusmatkat ja raskaat kuljetukset, joihin nykyinen akkuteknologia ei ole riittävää. Tähän liittyen tarvitaan lisää tietoa polttokennosähköautoista. Vetytiekarttaraportissa tulisi tehdä vertailuja akku- ja polttokennokäyttöisten sähköautojen välillä.

TEM arvioi että tulevaisuudessa säätövoima tulee yhä tärkeämmäksi. Tällä hetkellä Suomi saa tarvittavan säätövoiman Norjan ja Ruotsin vesivoimasta, mutta Saksan lisääntyvä tarve voi rajoittaa Suomelle tarjolla olevaa säätövoimaa. Tämän takia vedyllä voi olla merkittävä rooli tulevaisuudessa sen varastoitavuuden kannalta.

Tuulivoiman tavoitteeksi on nostettu tuottaa 8–9 TWh, mikä alkaa olla sähköverkon stabiiliuden kannalta varsin suuri osuus koko tuotannosta. Tällöin vedyn tuotannolla ja varastoinnilla voi olla tärkeä rooli verkon stabiloimisessa.

Innovaatio-osasto katsoi tärkeäksi, että eri energiantuotanto-, varastointi- ja siirtomuodot kilpailevat keskenään ja valikoituminen tapahtuu tätä tietä. Ajanjaksoa 2015–25 pidetään ratkaisevana sähkön ja vedyn keskinäisen suhteen kehittymisen kannalta. Innovaatio-osasto haluaisi laajentaa vetytiekarttaprojektia koskemaan myös liiketoiminnan luomisen mahdollisuudet vetytaloudessa ja siihen liittyvät työllistämismahdollisuudet, mutta tätä ei voitu resurssien rajallisuuden takia ottaa projektiin mukaan.

TEM:in edustajat halusivat selkeän analyysin siitä, mihin vetyteknologia nyt ylittää, missä ovat pullonkaulat ja milloin ne ratkaistaan. Kansainväliset kehitystrendit tulee ottaa huomioon tiekarttaa laadittaessa. TEM:in edustajat arvioivat, että toimiva vetytalous tulee edellyttämään toimivaa hiilidioksidin talteenottoa ja varastointia (CCS).

Yhteenvedossa TEM:in edustajat totesivat vetytiekarttaraportin hyvin tarpeelliseksi TEM:in ohjelmatyön kannalta.

### 7.4 Koulutus-, tutkimus- ja kehitysorganisaatioiden näkemyksiä

Aalto-yliopistossa kehitetään yhdistettyä vedyn ja rikkihapon tuotantoa sekä tutkitaan vedyn ja metallien vuorovaikutuksia. Yliopisto on aktiivinen IEA:n (HIA) ja EU:n (FCH-JU) vety-yhteistyössä. IEA:n www-sivuilla [IEA-HIA] on saatavilla runsaasti tausta-aineistoa eri vetyteknologioista.

Tampereen teknillisessä yliopistossa (TTY) Kemian ja biotekniikan laitoksella on tutkittu ja kehitetty pimeä fermentaatioon perustuvaa biologista vedyntuotantoa 10

vuoden ajan. Professori Jaakko Puhakan johtama projekti on osa IEA-HIA yhteistyötä.

TTY:llä tutkitaan myös metaanin hajottamista kiinteäksi hiileksi ja vedyksi katalyyttien avulla (thermo-catalytic decomposition of methane). Prosessin taloudellisuutta on vielä parannettava, mutta prosessina metaanin hajotus haastaa höyryreformoinnin, sillä itse reaktio ei tuota CO<sub>2</sub>-päästöjä. Hanke on osa Cleen Oy:n Carbon Capture and Storage -ohjelmaa (CCSP). Maakaasusta erotettua vetyä voitaisiin käyttää polttoaineena jo olemassa olevissa laitoksissa ja alentaa niiden vuotuisia päästöjä. Maailmalla maakaasun hinta on romahtanut erityisesti USA:n liuskekaasun ansiosta, jolloin sen käyttö todennäköisesti lisääntyy. Ennen polttoa tapahtuva hiilen talteenotto näyttää muodostuvan tulevaisuudessa houkuttelevaksi, sillä polton jälkeen talteen otetun hiilidioksidin varastointiin liittyvät kysymykset näyttävät muodostavan ongelman vielä vuosiksi, pahimmillaan vuosikymmeniksi eteenpäin.

Jyväskylä Innovation Oy:n mukaan mädättämällä tuotetun vedyn ja/tai biokaasun ja siitä reformoidun vedyn potentiaali on merkittävä. Konseptia kannattaa kehittää edelleen ja se mahdollistaa hajautetun biomassapohjaisen vedyn tuotannon demonstroinnin laajassakin mittakaavassa. Vientiteknologioiden kehittäminen edellyttää myös toimivia kotimarkkinoita.

Åbo Akademin arvion mukaan vetyinfrastruktuurin rakentaminen on taloudellisesti erityisen haasteellista Suomessa, jossa etäisyydet ovat pitkiä ja asukastiheys alhainen. Osittain esim. maakunta- tai kaupunkitasolle hajautetun tuotannon ja eri kuljetusmuotojen yhdistelmien taloudellisuustarkasteluja olisi tehtävä tarkemmin. Myös infrastruktuuriin tarvittavien materiaalien sitoutunut energia ja materiaalien kierrätettävyys olisi otettava huomioon eri vaihtoehtoja ja niiden hyötysuhteita tarkasteltaessa.

## 7.5 Muita keskeisiä toimijoita (Cleen Oy)

Vetyteknologia sivuaa kaikkia **Energia- ja ympäristöalan strategisen huippuosaamisen keskittymän Cleen Oy:n** ohjelmia [Cleen 2012]:

- Hiilidioksidin talteenotto ja varastointi, Carbon Capture and Storage Program (CCSP)
- Hajautetut energiajärjestelmät, Distributed Energy Systems (DESY)
- Energian käytön tehokkuus, Efficient Energy Use (EFEU)
- Tulevaisuuden polttomoottorivoimalaitokset, Future Combustion Engine Power Plants (FCEP)
- Ympäristön mittaus ja monitorointi, Measurement, Monitoring and Environmental Efficiency Assessment (MMEA)
- Älykkäät sähköverkot ja energiamarkkinat, Smart Grids and Energy Markets (SGEM).

Kaikissa vuoden 2010 alussa käynnistyneissä ja 2014 päättyvissä ohjelmissa SGEM, MMEA ja FCEP on tarkasteltu älykästä sähköverkkoa, jossa on hajautettua ja ajallisesti vaihtelevaa tuotantoa. Ohjelmien jatkoksi on alustavasti kaavailtu energiajärjestelmätarkasteluita, joissa sähköverkon lisäksi on merkittäviä varastokomponentteja. Vedyn käyttö sähkövarastona tai elektrolyysiproses-

sien käyttö muuttuvana kuormana ja tuotetun vedyn käyttö liikennepolttoaineena tai biopolttoaineiden jalostuksessa sopisi hyvin tähän viitekehukseen muiden varastokonseptien rinnalla. Liikennesektoria ei toistaiseksi ole tarkasteltu osana energiajärjestelmää, mutta se on asettanut reunaehdot tarkasteluille.

## 8 SUOSITUKSET/TOIMENPIDE-EHDOTUKSET

Vetytiekarttatyöryhmä näkee vedyn energia- ja liikennekäytössä merkittäviä etuja hiilidioksidi- ja muiden ympäristöpäästöjen vähentämisessä, tuontipolttoaineiden korvaamisessa kotimaisella uusiutuvalla energialla, huoltovarmuudessa, alueiden työllisyydessä ja cleentech-kehityksessä.

Osa eduista on välillisiä, perustuen joustavasti transformoitavan ja varastoitavan energian kantajan tuomiin uusiin mahdollisuuksiin. Mutta suorat taloudelliset säästötkin ovat mahdollisia. Mikäli vetyenergian hinnankelitys jatkaa ennakoitua trendiä, vedystä on tulossa hintakilpailukyinen vaihtoehto erityisesti liikennepolttoaineena.

Suomen kannalta pidämme kuitenkin *tärkeimpänä vientimarkkinapotentiaalia* cleentech- ja muun teknologiateollisuuden aloilla. Realistisen arvion mukaan Suomi ei tule alkuvaiheessa olemaan vetyteknologian merkittävä ostaja, vaan myyjä. Aasiassa (Japani, Korea) ja Euroopassa (Saksa) markkinat ovat jo kasvussa ja ennusteiden mukaan kasvu jatkuu nopeasti kiihtyen.

Ehdotamme seuraavia toimenpiteitä:

1. Vetyenergia sisällytetään kansallisiin ja alueellisiin energia-, ilmasto- ja liikennepolitiikkoihin, myös teollisuus- ja ulkomaankauppapolitiikkaan kytkeytyen. Vety nähdään osana bioenergia-, biomassa- ja bioekonomia-tarkasteluita. Liikenne on tärkeä vedyn käyttökohde. Vetyenergian mahdollisuudet biotaloudessa, tuulivoiman hyödyntämisessä ja muissakin sovelutuksissa arvioidaan 2013–2014 kuluessa laadittaessa Suomelle tiekartta hiilineutraaliin yhteiskuntaan vuoteen 2050 mennessä.
  - a. Kansallisella tasolla tärkeitä tavoitteita ovat mm. vaihtotase, kotimaisuusaste, öljyriippuvuuden rajoittaminen ja huoltovarmuus. Näihin vety tarjoaa suoraan osaratkaisuja, kuten myös hiilidioksidi- ja muiden ympäristöpäästöjen vähentämiseen. Vedyn avulla voidaan tarvittaessa rajoittaa päästöjä radikaalistikin.
  - b. Aluepoliittisesti (ja huoltovarmuuden kannalta) merkittävä mahdollisuus on polttoaineiden hajautettu tuotanto. Vedyn taloudelliset tuotanto- ja jakelumenetelmät ovat erilaiset eri puolilla Suomea. Suosittelemme paikallisten edellytysten ja vahvuuksien tarkempaa analysointia ja alueellisten vetytiekarttojen laatimista.
  - c. Sähköverkon stabilointijärjestelmien tarvetta voidaan ennakoida kehittämällä elektrolyysiprosesseja vedyn tuottamiseksi sähköenergialla. Tuulienergian ”smart grid” kytkentä energiaverkkoon voitaisiin demonstroida esimerkiksi Vuosaaren satamassa.
2. Kehitetään vetyinfrastruktuurin vaatimia prosesseja, järjestelmiä, materiaaleja, laitteita ja palveluja vientimarkkinoille, esim. teollisuuteen integroidut ja biomassapohjaiset prosessit, teräkset, paineastiat, kompressorit, venttiilit ja

tehoelektroniikka.

- a. Suomessa on merkittävää osaamista biomassan kaasutuksessa. Arvioimme prosessin täydentämiselle metsähakkeesta vedyn tuotantoon saakka löytyvän kansainvälistä kysyntää. Tekesin ja Cleen Oy edustajat ovat jo kertoneet suorista tiedusteluistakin.
  - b. Materiaalien ja laitteiden kysynnän arvioimme kasvavan erityisesti Saksassa, missä vety-infrastruktuurin rakentaminen saavuttanee laajan mittakaavan nopeimmin Euroopassa.
  - c. Pitkällä aikavälillä Suomessakin tarvitaan edullisia vedyn varastointi- ja jakelukonsepteja. Kyseeseen tulisivat esimerkiksi maanalaiset varastot, putkijakelu ja vedyn nesteytysteknologia.
  - d. Ensimmäiset nestemäisen vedyn merikuljetukset on suunniteltu aloitettavaksi 2017 (Australiasta Japaniin). Suosittelemme harkittavaksi varautumista myös mahdolliseen vetyoptioon LNG terminaaleja suunniteltaessa. Mikäli arktiset LH<sub>2</sub> kuljetukset yleistyvät, Turun telakka saattaisi soveltua tankkereiden rakentamiseen.
  - e. Ehdottamiemme kehityskohteiden haasteena on tuotekehityspanosten laajuus, aikajänne ja rahoitus. Uudella alueella sekä tuotekehitykseen että investoinnin takaisinmaksuun tarvittava aika on pitkä. Yritysten tulisi kyetä ennakoimaan markkinakysynnän kasvu jo tuotekehitysvaiheen aikana.
3. Edistetään vetyteknologista huippuosaamista demonstroimalla metsäbiomassan kaasutukseen perustuva vedyn tuotanto vetyä käyttävän kemian teollisuuden yhteydessä ja selvittämällä mahdollisuudet integroida vetyä tuottavia ja vetyä kuluttavia teollisuuslaitoksia, esim. valkaisu-kemikaalien sivutuotevety ja biopoltoaineiden valmistus.
- a. Kemian ja metsäteollisuuden prosessien yhdistäminen palvelee sekä kotimaisen teollisuuden kilpailukykyä että prosessitoimitusten vientikauppaa.
  - b. Suomessa on merkittävää osaamista, mutta kysyntä puuttuu. Demonstraatioiden ja esikaupallisten investointien tehtävänä on mahdollistaa teknologian valmiiksi kehittäminen ensin vientiä ja myöhemmin kotimaista kysyntää varten.
  - c. Kiinteistökohtaisten mikro-CHP-laitosten kokeiluja suosittelemme tehtäväksi paikkakunnilla, joissa on sivutuotevetyä saatavilla. Erityisen hyvin soveltuvia ovat taajamat, joissa ei ole kaukolämpöä.
4. Varaudutaan polttokennoautojen markkinoille tuloon. Hankitaan polttokennoautoja ja -busseja koekäyttöön. Kytetään koekäyttö vetytankkausasemien, muiden vientituotteiden ja palvelujen kehitykseen, testaukseen ja markkinointiin. Direktiiviehdotuksen 2013/0012 (COD) käsittelyä Euroopan parlamentissa ja neuvostossa tulee seurata, koska se tekisi varautumisen pakolliseksi.
- a. Autoteollisuudessa tehtiin selvityksemme aikana päätöksiä FCEV tuotantolinjojen rakentamisesta. Lisäksi julkistettiin useita strategisia yhteenliittymiä. Kehitys on linjassa 2009 tehtyjen ”FCEV’t kaupossa 2015” H<sub>2</sub> mobility sopimusten kanssa.
  - b. Infrastruktuurin rakentamisessa on lipsuttu sovitusta aikatauluista, mutta tärkeimmät autonvalmistajat ovat sitoutuneet kaupallisten mallien julkistuksiin 2014 ja 2015.
  - c. FCEV myynti alkaa valituilla markkinoilla, joihin luetaan myös

”Pohjoismaat”, eli naapurimme, joissa on nyt 28 FCEV demoautoa kokeilussa, Suomessa ei yhtään (tähän emme laske ”kotitekoisia” virituksia). Minimiehdotuksemme on: takseja Rovaniemelle (arktinen testaus ja joulupukki) sekä busseja pääkaupunkiseudulle Vuosaaren satamassa tankattavaksi.

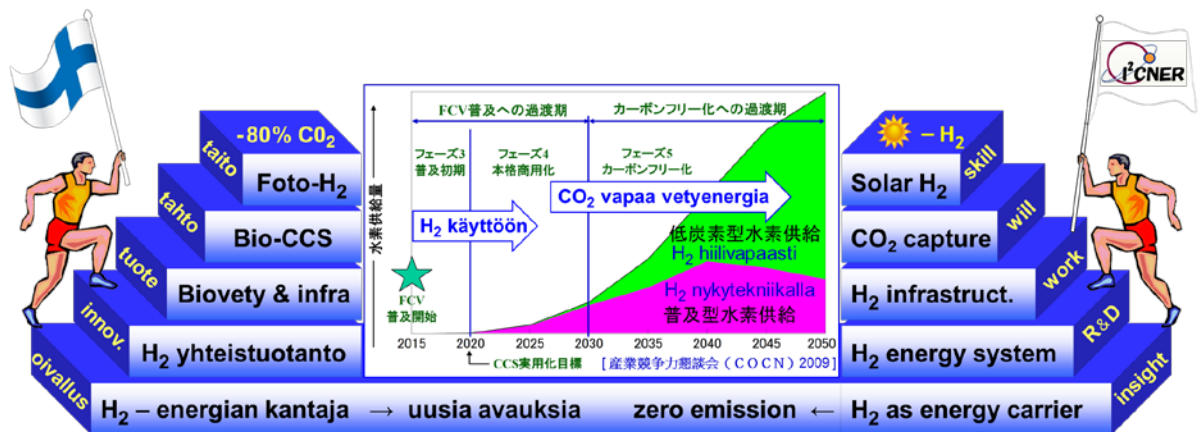
- d. Woikoski on investoinut omaan vetytankkausasemakonseptiin, jonka julkistusta odotetaan lähiaikoina. Menestyksellinen kilpailu Saksan markkinoilla kansainvälisten jättiyritysten kanssa edellyttäne kotimaista ”testialustaa”. Vedyn jakelun ja hyödyntämisen alalle voisi kasvaa erilaisia komponentteja ja palveluita kehittävien teknologiayritysten klusteri.
  - e. Euroopan komission ehdotuksen Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta [European Commission 2013] hyväksymisestä seuraisi velvoite Euroopan laajuisen FCEV -liikenteen mahdollistavan vetyjakeluverkon rakentamisesta. Ehdotuksen käsittelyä on syytä seurata ja varautua ehdotuksen läpimenoon nyt tai myöhemmin, jotta Suomessa olisi tarvittaessa valmius vastata jakeluinfran suunnittelusta ja rakentamisesta omin voimin.
5. Käynnistetään hiilineutraaliin vetyenergiaan, vedyn tuotantoon, turvalliseen käsittelyyn ja hyödyntämiseen tarvittavaan teknologiaan erikoistuneita koulutusohjelmia yliopistoissa ja ammattikorkeakouluissa.
- a. Vetyenergiaan liittyvästä tutkimuksesta merkittävä osa on vuorovaikutuksessa tieteen eri sektorien kanssa: fysiikkaa, kemiaa, biologiaa, materiaaleja jne. Tutkimus soveltuu poikkitieteellisen tiede- ja teknologiakoulutuksen yleiseenkin edistämiseen.
  - b. Vetyteknologiaan liittyvää perustutkimusta voitaisiin vahvistaa kohdistuen esim. fotosähkökemiallisiin ja biologisiin vedyn tuotantoprosesseihin, uusiin varastointimateriaaleihin ja -konsepteihin sekä neljännen sukupolven ydinreaktoreiden käyttöön vedyn tuotannossa.
  - c. Erityinen koulutustarve syntyy myös painevedyn turvallisesta ja taloudellisesta käsittelystä. Aivan kuten aikanaan ydintekniikassa, turvallisuuden tasoa ei voida jättää pelkästään ulkomaisten toimittajien varmistettavaksi. Taloudellisestikaan ei ole mielekäästä jättää vety-infrastruktuurin rakentamista ulkomaisten toimittajien päätettäväksi ja tehtäväksi.
  - d. Koulutuksen ja tutkimuksen tarve sekä kehittämisen aikajänne ovat sitä luokkaa, että maltillisiinkin skenaarioihin varautumisella on jo kiire.
6. Osallistutaan Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH-JU) toimintaan sopimuskaudella 2014–2020, USA:n ja Japanin aloitteesta käynnistettyyn I<sup>2</sup>CNER-hankkeeseen sekä muihin kotimaista tutkimusta tukeviin kansainvälisiin yhteisprojekteihin vety- ja polttokennoteknologioiden alueella. IEA Hydrogen Implementing Agreement (HIA) osallistuminen tarjoaa myös erinomaisen verkoston ja seurantakanavan.
- a. Suomalaiset tutkijat ovat varsin hyvin verkottuneet, erityisesti EU:n (FCH-JU) ohjelmassa ja muuallakin. Tämä on kustannustehokas tapa varmistaa tutkimuksen vaikuttavuus ja pääsy megaresursseja edellyttävän tiedon lähelle, muttei poista oman tutkimuksen tarvetta, vaan päinvastoin, teknologian siirtokin edellyttää sitä.
  - b. International Institute for Carbon-Neutral Energy Research (I<sup>2</sup>CNER) on USA:n ja Japanin aloitteesta (ja rahoituksella) käynnistynyt hiilineutraalia energiateknologiaa poikkitieteellisen ja sovellutuslähtöisen perustutkimuk-



sen pohjalta kehittävä huippututkimusyksikkö, jossa on annettu vedylle keskeinen rooli energian kantajana. Suomalaiset ovat toistaiseksi yhteistyössä I2CNER yhdeksästä divisioonasta vain yhden (Hydrogen Structural Materials Division) kanssa. Ehdotamme yhteistyön laajentamista kohdistumaan ainakin seuraaviin divisiooniin: Hydrogen Production, Fuel Cells, CO<sub>2</sub> Separation and Concentration, Carbon Capture and Storage sekä Energy Analysis.

- c. Kotimainen vetyyn liittyvä tutkimus on paikoin erittäin korkeatasoista. Tekesin polttokenno-ohjelmassa on käynnistynyt sellaisiakin vetyyn kohdistuvia hankkeita, jotka eivät suoranaisesti kohdistu polttokennoihin. Raportissamme on mainittu joitakin tutkimuskohteita, mutta jätämme tutkimushankkeiden tarvehankinnan ja suositukset muiden tehtäväksi.
7. Selvitetään tarve ja lainsäädännölliset keinot edistää vetyteknologioiden käyttöönottoa ja esikaupallisia investointeja esim. verohelpotusten, investointitukien tai syöttötariffien avulla.
- a. Ainakin Japanissa ja USA:ssa lähtökohtana on, että lyhytaikaisten insenttiivien jälkeen vetyenergian käyttö laajenee markkinaehtoisesti ja päästövähennysten aiheuttamaa kokonaiskustannusta supistaen. Ensimmäisten vetyjakeluasemien koko ja käyttöaste tulee kuitenkin olemaan niin pieni, että etäisyys kannattavaan toimintaan ja investoinnin kuolelutukseen kasvaa suureksi ja vaatii hyvin pitkäjänteistä strategiaa tai ”laiskaa rahaa”.
  - b. Vetyteknologioiden markkinavetoista käyttöönottoa nopeutetaan insenttiiveillä, joilla ylitetään aloituskynnys: ”ei kannata investoida jakeluun, koska käyttäjät puuttuvat, eikä voi käyttää, koska jakelua ei ole”.
  - c. Vetytankkausasemia rakennetaan toistaiseksi esikaupallisina investointeina. Pohjoismaissa päästöttömien autojen käyttäjillekin on annettu verohelpotuksia ja etuoikeuksia mm. bussikaistan käyttöön ja ilmaiseen parkkeeraukseen. Suosituksemme mukaan mahdolliset päästövähennyksiin kannustavat tuet kohtelevat eri teknologioita tasaveroisesti kilpailua vääristämättä.
  - d. Laskelmiemme mukaan liikennepolttoaineena käytettävään vetyyn voidaan kaupallisessa vaiheessa kohdistaa polttoainevero, kuten nestemäisiin polttoaineisiin. Korkea vero ei kuitenkaan sovellu kaikkiin vedyn käyttökohteisiin.
8. Kansallisten energia-, ilmasto- ja liikennepolitiikkaa koskevien tarkastelujen perusteella päivitetään kuvassa 8.1 esitetty malli ja päätetään aloittaa sen toteuttaminen aikataululla, joka mahdollistaa päästövähennystavoitteiden toteuttamisen osin markkinaehtoisesti ja Suomen kansantaloutta mahdollisimman vähän kuormittaen.
- a. Ensimmäiselle portaalle astuminen perustuu oivallukseen joustavan ja hiilivapaan – sähköön verrattavan mutta edullisesti varastoitavan – energian kantajan tarjoamista uusista mahdollisuuksista. Vetyenergian käyttöönotto mahdollistaa jatkossa uusia hiilineutraaleja teknologisia avauksia, joiden avulla voidaan saavuttaa tai haluttaessa jopa ylittää asetetut tavoitteet hiilidioksidin ja muidenkin päästöjen vähentämiseksi. Vety-yhteiskunnassa hiilidioksidipäästöjen 80 % supistus 2050 mennessä on realistinen tavoite.
  - b. Tutkimusta ja tuotekehitystä ohjaa kaukonäköinen suunnitelmallisuus, jolla avataan mahdollisuudet myöhemmin tehtäville päätöksille siirtyä hiilineut-

- raaliin energiaan, tarvittaessa nopeutetussakin aikataulussa.
- c. Teknologian implementointi ja infrastruktuurin rakentaminen vaativat mittavia investointeja. Tuotekehityksessä menestyneille avautuu uusi globaali markkinasegmentti.
  - d. Nykyisten ennusteiden mukaan ilmastonmuutoksen globaali hallinta tulee vaatimaan seuraavilta sukupolvilta vahvoja päätöksiä. Hiilidioksidin talteenottoon, varastointiin tai kierrätykseen tarvittavat teknologiat tulee kehittää siihen mennessä päätöksenteon mahdollistavalle tasolle.
  - e. ”Aurinkovety” ja muut suoraan hiilivapaat vedyn tuotantomuodot ovat tänään perustutkimuksen kohteena. On kehitetty toimivia, mutta kaupallisesti kannattamattomia prosesseja. On mahdollista, että I2CNER saa Nobel-palkintonsa maissin hyötysuhteesta voittamisesta vuonna 2020 ja 2050 mennessä keinotekoisella fotosynteesillä tuotetaan hintakilpailukykyistä vetyä teollisessa mittakaavassa.
  - f. Perille kiipeäminen ja hiilineutraalin energijärjestelmän kehittäminen vaatii pitkäjänteistä tieteen, teollisuuden ja talouden sektorit ylittävää ja yhdistävää yhteistyötä – myös kansainvälisesti.



Kuva 8.1. Portaat vety-yhteiskuntaan.

## 9

## VIITTEET

**Air Liquide 2012:** [www.airliquide.com/air-liquide-and-hydrogen-3/](http://www.airliquide.com/air-liquide-and-hydrogen-3/).

**Ball 2009:** Michael Ball and Martin Wietschel; Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges; Cambridge University Press 2009.

**Blesl 2009:** M. Blesl, D. Bruchof, N. Hartmann, D. Özdemir, U. Fahl, L. Eltrop, A. Voß; Entwicklungsstand und Perspektiven der Elektro-mobilität; Universität Stuttgart Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung 2009; [http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/Elektromobilit%C3%A4t\\_Endbericht\\_IER.pdf](http://www.zfes.uni-stuttgart.de/deutsch/downloads/Elektromobilit%C3%A4t_Endbericht_IER.pdf).

**BMU 2012:** Transforming our energy system – The foundations of a new energy age, Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) 2012; [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere\\_energiewende\\_en\\_bf.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_energiewende_en_bf.pdf).

**California 2012:** A California Road Map Bringing Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles to the Golden State; California Fuel Cell Partnership 2012; <http://cafcp.org/roadmap>

**Callux 2012:** callux, Field Test of Residential Fuel Cells, Background & Activities 10 May 2012, [www.callux.net](http://www.callux.net).

**CEP 2012:** Hydrogen – Join the Movement ! CEP Phase III, April 2012, km 1.385.000; <http://www.cleanenergypartnership.de>.

**CHIC 2012:** [www.chic-project.eu](http://www.chic-project.eu); viitattu joulukuussa 2012.

**Cleen 2012:** <http://www.cleen.fi/fi/>; viitattu joulukuussa 2012.

**COCN 2009:** Infrastructure and supply of hydrogen for fuel cell vehicles, Development project dissemination: Towards a low-carbon society – Start of spreading fuel cell vehicles by 2015 and Hydrogen Highway construction by 2020. Competitive Council Nippon report in theme of industrial competitiveness promotion, 6.3.2009. 56 p. (Japanin kielen)

**Czernik 2007:** Stefan Czernik, Robert Evans, Richard French; Hydrogen from biomass-production by steam reforming of biomass pyrolysis oil; Catalysis Today 129 (2007) 265–268.

**DEMO 2013:** Teknologiateollisuus ry – Polttokennokokeilualusta Demo2013; Teknologian tutkimuskeskus VTT – DemoTurvallisuus – polttokennosovellusten ja polttoaine-infrastruktuurin turvallinen käyttöönotto; <http://www.tekes.fi/ohjelmat/Polttokennot/Projektit>; Anneli Ojapalo; Demo2013 kokeilualustahanke esittely; [http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS\\_0\\_201\\_403\\_994\\_2095\\_43/http%3B/tekes-ali1%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/polttokennot/documents/demo2013/demo2013\\_tietoisku\\_lyhyt\\_tammikuu2013.pdf](http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS_0_201_403_994_2095_43/http%3B/tekes-ali1%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/polttokennot/documents/demo2013/demo2013_tietoisku_lyhyt_tammikuu2013.pdf).

**Dincer 2010:** Ibrahim Dincer and M. Tolga Balta; Potential thermochemical and hybrid cycles for nuclear-based hydrogen production; Int. J. Energy Res. 35 (2011) 123–137.

**Diwald 2012:** Werner Diwald; Highlight projects for the energy transition; F-Cell, Stuttgart, 8–9 Oct. 2012.

**DOE 2011:** Hydrogen, Fuel Cells & Infrastructure Technologies Program – Multi-Year Research, Development and Demonstration Plan, Planned program activities 2005 – 2015, U.S.Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy.

**DOE 2012:** Pathways to Commercial Success: Technologies and Products Supported by the Fuel Cell Technologies Program, U.S.Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy.

**ENE Farm 2009:** ENE FARM Residential Fuel Cells Launched, Tokyo Gas 2009.

**Ens.dk 2012:** Energy Policy Report 2012; Report from the Ministry of Climate, Energy and Building to the Danish Parliament; 9 May 2012; <http://www.ens.dk>.

**EUR 2011:** 2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan), Technology Descriptions, JRC Scientific and Technical Reports, EUR 24979 EN - 2011.

**European Commission Roadmap 2012:** Public-Private Partnership on Fuel Cell and Hydrogen in Horizon 2020, DG RTD – K2, 11/2012.

**European Commission 2013:** Kommission esitys 2013/0012 (COD), 23.1.2013. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/docs\\_autres\\_institutions/commission\\_euroenne/com/2013/0018/COM\\_COM\(2013\)0018\\_FL.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/docs_autres_institutions/commission_euroenne/com/2013/0018/COM_COM(2013)0018_FL.pdf).

**FCH JU 2011:** Multi-Annual Implementation Plan 2008–2013, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) Document FCH JU 2011 D708.

**FreedomCAR 2009:** Hydrogen production – Overview of Technology Options, FreedomCAR & Fuel Partnership, January 2009.

**Fuelcelltoday:** Fuelcelltoday uutispalsta; <http://www.fuelcelltoday.com>.

**Fuelcelltoday 2012:** Fuel Cell Electric Vehicles: The Road Ahead, August 2012.

**Fuelcelltoday 2013:** Fuel Cells and Hydrogen in Norway; <http://www.fuelcelltoday.com/analysis/surveys/2013/fuel-cells-and-hydrogen-in-norway>.

**Graves 2011:** Christopher Graves, Sune D. Ebbesen, Mogens Mogensen and Klaus S. Lackner; Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O with renewable or nuclear energy; Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 1–23.

**H2insidents 2012:** <http://www.h2incidents.org>; viitattu joulukuussa 2012.

**H2stations 2012:** [www.h2stations.org](http://www.h2stations.org); viitattu joulukuussa 2012.

**Handlingsplan 2012:** Handlingsplan 2012–2015, Anbefalinger utarbeidet av Hydrogenrådet i henhold til mandat gitt av Olje- og energidepartementet og Samferdselsdepartementet, 2012. <http://www.hydrogen.no/assets/files/Hydrogenradet/Handlingsplan/Handlingsplan%20for%20perioden%202012%20-%202015.PDF>.

**Harrison 2012:** Jeremy Harrison, Micro CHP – The big picture, Big Picture Publishing/Blurb 2010.

**Hawkes 2010:** G. L. Hawkes, M. G. McKellar, R. Wood, M. M. Plum; Process Modeling Results of Bio-Syntrolysis: Converting Biomass to Liquid Fuel with High Temperature Steam Electrolysis; Clean Technology Conference & Expo 2010; Idaho National Laboratory 2010; <http://www.inl.gov/technicalpublications/documents/4536694.pdf>.

**Hebling 2012:** Cristopher Hebling; Renewable Hydrogen for Energy Storage and Mobile Applications; F-Cell, Stuttgart, 8-9 Oct. 2012.

**Herbert 2012:** Herbert, Thorsten; Status on the expansion of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Supply Infrastructure in Germany. International Hydrogen Energy Development Forum 2012, Fukuoka|Feb. 1st, 2012.

**Hong 2012:** Seong-Ahn Hong; Hydrogen and fuel cell development: status of the art and its long term strategy in Korea; F-Cell, Stuttgart, 8–9 Oct. 2012.

**Hull 2012:** Jonathan F. Hull, Yuichiro Himeda, Wan-Hui Wang, Brian Hashiguchi, Roy Periana, David J. Szalda, James T. Muckerman and Etsuko Fujita; Reversible hydrogen storage using CO<sub>2</sub> and a proton-switchable iridium catalyst in aqueous media under mild temperatures and pressures; Nature Chemistry 4 (2012) 383–388.

**Hydrogennet.dk 2012:** <http://www.hydrogennet.dk>; viitattu joulukuussa 2012.

**Hydrogen.no 2012:** <http://www.hydrogen.no>; viitattu joulukuussa 2012.

**Hyer 2012:** <http://www.hyer.eu/>; viitattu joulukuussa 2012.

**Hynor 2012:** <http://www.hynor.no>; viitattu joulukuussa 2012.

**Hyways 2006:** <http://www.hyways.de/>.

**IEA 2012a:** Energy Technology Perspectives 2012 – Pathways to a Clean Energy System, International Energy Agency, OECD/IEA, Paris, 2012.

**IEA 2012b:** Ingrid Schjøberg, Eugino Calo, Eric van Dijk, Atilla Ersöz, Esther Ochoa Fernandez, Christian Hulteberg, Dick Lieftink, Corfitz Nelsson, Jacques Saint-Just, Frederik Silversand, Ralph Stauss, Isamu Yasuda; IEA-HIA Task 23 Small-scale Reformers for On-site Hydrogen Supply 2006-2011, IEA Hydrogen Implementing Agreement 2012.

**IEA AFC:** International Energy Agency; Advanced Fuel Cells Implementing Agreement; <http://www.ieafuelcell.com/>.

**IEA HIA:** International Energy Agency; Hydrogen Implementing Agreement; <http://ieahia.org/>.

**IPHE 2013:** <http://www.iphe.net/>; viitattu maaliskuussa 2013.

**Jääskeläinen 2012:** Saara Jääskeläinen; Suomen visiot vaihtoehtoisten käyttövoimien edistämisestä liikenteessä. Alustus TransEco -tutkimusohjelman seminaarissa 4.12.2012.

**Kawai 2012:** Kawai, Taiyo; FCV Development and Initial Market Creation, H2 Energy Development Forum, February 1, 2012.

**Kim 2011:** Eunjung Kim, Kwangwon Lee, Jongsoo Kim, Younghee Lee, Jaedeuk Park, Il Moon. Development of Korean hydrogen fueling station codes through risk analysis 2011.

**Kizaki 2012:** Kizaki, Mikio; Development of New Fuel Cell System for Mass Production. Paper 102056, EVS26, Los Angeles, CA, USA, May 2012.

**KOM 2007:** Energiapolitiikka Euroopalle, KOM(2007)1 lopullinen [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/european\\_energy\\_policy/index\\_fi.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/index_fi.htm).

**KOM 2010:** Energia 2020, Strategia kilpailukykyisen, kestävä ja varman energiansaannin turvaamiseksi, KOM(2010)639 lopullinen.

**KOM 2011:** Energia-alan etenemissuunnitelma (Road Map) 2050, KOM(2011)0885 lopullinen [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/european\\_energy\\_policy/index\\_fi.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/index_fi.htm).

**Korjala 2012:** Kalevi Korjala; Hydrogen refuelling; Tekes Fuel Cell Annual Seminar 2012; [https://tapahtumat.tekes.fi/uploads/f717744/Kalevi\\_Korjala\\_Hydrogen\\_Woikoski-7611.pdf](https://tapahtumat.tekes.fi/uploads/f717744/Kalevi_Korjala_Hydrogen_Woikoski-7611.pdf).

**Linde 2012:** Hydrogen, <http://www.linde-engineering.com>.

**Lokkiluoto 2012:** Anu Lokkiluoto, Pekka A. Taskinen, Michael Gasik, Ilkka V. Kojo, Heljä Peltola, Michael H. Barker, Karl-Heinz Kleifges; Novel process concept for the production of H<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> by SO<sub>2</sub>-depolarized electrolysis; Environ. Dev. Sustain. 14 (2012) 529–540.

**Low Carbon Finland 2050:** Low Carbon Finland 2050; VTT Vision 2; VTT 2012; <http://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2012/V2.pdf>

**Maakaasuohje 2012:** [http://www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/oppaat/Maakaasu\\_tankkausasemao\\_hje.pdf](http://www.maakaasu.fi/sites/default/files/pdf/oppaat/Maakaasu_tankkausasemao_hje.pdf); viitattu joulukuussa 2012.

**McKeough 2007:** Paterson McKeough and Esa Kurkela; DETAILED COMPARISON OF EFFICIENCIES AND COSTS OF PRODUCING FT LIQUIDS, METHANOL, SNG AND HYDROGEN FROM BIOMASS; 15th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, 7–11.5.2007.

**McKinsey 2011:** 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; McKinsey 2011.

**Milne 2001:** Thomas A. Milne, Carolyn C. Elam and Robert J. Evans; Hydrogen from Biomass, State of the Art and Research Challenges; A Report for the International Energy Agency Agreement on the Production and Utilization of Hydrogen, Task 16, Hydrogen from Carbon-Containing Materials, IEA/H2/TR-02/001; [http://ieahia.org/pdfs/hydrogen\\_biomass.pdf](http://ieahia.org/pdfs/hydrogen_biomass.pdf).

**Molkov 2012:** Vladimir Molkov; Fundamentals of Hydrogen Safety Engineering I & II, Vladimir Molkon & bookboon.com (Ventus Publishing ApS) 2012; <http://bookboon.com/en/textbooks/mechanics/fundamentals-of-hydrogen-safety-engineering-i> <http://bookboon.com/en/textbooks/mechanics/fundamentals-of-hydrogen-safety-engineering-ii>.

**mrs enterprises 2011:** Overview of Status of Hydrogen and Fuel Cells in the

USA and Summary of Topics of Interest at the February 2011 Fuel Cell & Hydrogen Energy Conference in Washington, D.C., M.R.S. Enterprises, Mary Rose de Valladares, April 29, 2011.

**Nedstack 2012:** Nedstack in news; <http://www.nedstack.com>.

**Nemo2 1998:** Lund, P. & Konttinen, P. (ed.); Advanced energy systems and technologies. NEMO 2, Final report 1993-1998. NEMO-report Tekes, TKK.

**Neste Oil 2011:** Neste Oil Annual Report 2011; [http://www.2011.nesteoil.com/files/neste\\_ar2011/PDF/Neste\\_Oil\\_Oyj\\_Annual\\_Report\\_2011.pdf](http://www.2011.nesteoil.com/files/neste_ar2011/PDF/Neste_Oil_Oyj_Annual_Report_2011.pdf).

**New Energy World 2011:** Fuel Cell and Hydrogen Technologies in Europe, Financial and Technology Outlook on the European Sector Ambition 2014–2020 NEW-IG.

**NEW-IG 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. <http://www.new-ig.eu/uploads/Modules/Publications/20121029-urban-buses-alternative-powertrains-for-europe---final-report.pdf>.

**NOW 2012:** <http://www.now-gmbh.de/en/home.html>; viitattu joulukuussa 2012.

**Olah 2011:** George A. Olah, G. K. Surya Prakash, and Alain Goeppert; Anthropogenic Chemical Carbon Cycle for a Sustainable Future; J. Am. Chem. Soc. 133 (2011) 12881–12898.

**Pakarinen 2012:** Outi Pakarinen; Biokaasun mahdollisuudet vedyn tuotannossa Suomessa; Tekes – Vetyseminaari 28.5.2012; [http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS\\_0\\_201\\_403\\_994\\_2095\\_43/http%3B/tekes-ali1%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/polttokennot/documents/seminaariaineistot/vetyseminaari\\_28\\_5\\_2012/pakarinen\\_280512\\_korjattu.pdf](http://www.tekes.fi/fi/gateway/PTARGS_0_201_403_994_2095_43/http%3B/tekes-ali1%3B7087/publishedcontent/publish/programmes/polttokennot/documents/seminaariaineistot/vetyseminaari_28_5_2012/pakarinen_280512_korjattu.pdf).

**Poggi 2012:** Philippe Poggi; Presentation of the MYRTE Platform coupling a 560 kWp PV plant and hydrogen chains (electrolyser – H<sub>2</sub> storage and fuel cells) – first results; F-Cell, Stuttgart, 8–9 Oct. 2012.

**Posti 2012:** [https://www.posti.fi/tiedotteet/2012/20120926\\_ilmastokumppanit.html](https://www.posti.fi/tiedotteet/2012/20120926_ilmastokumppanit.html).

**Proton Power 2010:** Biomass to Hydrogen PowerClean Energy Systems & Green Hydrogen; [http://www.usbiomassboard.gov/pdfs/ppi\\_presentation\\_copy\\_12.pdf](http://www.usbiomassboard.gov/pdfs/ppi_presentation_copy_12.pdf); <http://www.protonpowerinc.com/index.html>.

**RCS Review 2012:** 2012 Fuel Cell RCS Review; <http://www.fuelcelltoday.com>.

**Rifkin 2002:** Jeremy Rifkin; The hydrogen economy: the creation of the worldwide energy web and the redistribution of power on earth; Tarcher/Penguin 2002.

**Road2HyCom 2007a:** Jerome Perrin, Robert Steinberger-Wilckens and Sören

Christian Trümper; EU Roads2HyCom, PART III: Industrial distribution infrastructure 2007; <http://www.roads2hy.com>.

**Road2HyCom 2007b:** Guy Maisonnier, Jérôme Perrin, Robert Steinberger-Wilckens and Sören Christian Trümper; EU Roads2HyCom, PART II: Industrial surplus hydrogen and markets and production 2007; <http://www.roads2hy.com>.

**RWTH 2012:** [http://www.ika.rwth-achen.de/r2h/index.php/Hydrogen\\_and\\_Fuel\\_Cell\\_Technology](http://www.ika.rwth-achen.de/r2h/index.php/Hydrogen_and_Fuel_Cell_Technology); viitattu joulukuussa 2012.

**SETIS 2013:** Strategic Energy Technologies Information System, <http://setis.ec.europa.eu>.

**SET-Plan/SET-suunnitelma 2007: Euroopan** strateginen energiateknologia-suunnitelma (SET-suunnitelma) – ”Kohti vähähiilistä tulevaisuutta” KOM(2007)723 lopullinen [http://europa.eu/legislation\\_summaries/energy/european\\_energy\\_policy/index\\_fi.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/european_energy_policy/index_fi.htm).

**Smolinka 2010:** Tom Smolinka, Martin Günther and Jürgen Garcke; Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus Regenerativen Energien; NOW Studie 22.12.2010; [http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user\\_upload/REMediathek/RE\\_Publikationen\\_NOW/NOW-Studie-Wasserelektrolyse-2011.pdf](http://www.now-gmbh.de/fileadmin/user_upload/REMediathek/RE_Publikationen_NOW/NOW-Studie-Wasserelektrolyse-2011.pdf).

**Smolinka 2012:** Tom Smolinka; Renewable hydrogen for energy storage and mobile applications; F-Cell, Stuttgart, 8–9 Oct. 2012.

**Specht 2012:** Michael Specht; Power-to-Gas (P2G®): Layout, operation and results of the 25 and 250 kWel research plants; F-Cell, Stuttgart, 8–9 Oct. 2012.

**State of the States 2012:** State of the States. Fuel Cells in America 2012; [www.fuelcells.org](http://www.fuelcells.org) 2012.

**Tekniikka ja talous 2012:** <http://www.tekniikkatalous.fi/innovaatiot/polttokennot+tukiasemiin++nokia+siemensin+verkot+kestavat+luonnonmullistukset/a857318>.

**TEM 2008:** [www.tem.fi](http://www.tem.fi): Etusivu>Energia>Pitkä aikavälin ilmasto- ja energiastrategia>vuoden 2008 strategia>selonteko 6.11.2008: Valtioneuvoston selonteko eduskunnalle 6. päivänä marraskuuta 2008.

**TEM 2011:** [www.tem.fi](http://www.tem.fi): Etusivu>Energia>EU:n energiayhteistyö (viimeinen päivitys 15.3.2011).

**TEM 2012:** [www.tem.fi](http://www.tem.fi): Etusivu>Energia (viimeinen päivitys 21.12.2012).

**TEM 2013:** [www.tem.fi](http://www.tem.fi): Etusivu>Energia>Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia>vuoden 2013 strategia (viimeinen päivitys 8.1.2013).

**Toyota 2012:** [http://www.toyota.fi/innovaatiot/design/concept\\_cars/fcvt/index.tmex](http://www.toyota.fi/innovaatiot/design/concept_cars/fcvt/index.tmex).



**Tukes 2013:** Sähköpostiviesti Ylitarkastaja Urho Säkkinen ja ryhmäpäällikkö Anne-Mari Lähde, prosessiturvallisuus, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto (Tukes) 6.2.2013.

**Tuominen 2012:** Anu Tuominen, Tuuli Järvi, Irmeli Wahlgren, Kari Mäkelä, Petri Tapio, Vilja Varho; Ilmastonmuutoksen hillinnän toimenpidekokonaisuudet liikenne- ja energiateollisuuden sektorilla vuoteen 2050. LVM 15/2012, 18.9.2012.

**VAG 2008:** Oliver Berger, Sven Schmitz, Klaus Görner: Optimization of a fuel-cell-cooling-system for automotive transportation at Volkswagen. Presentation DEM33-4 at 2008 Fuel Cell Seminar & Energy Exposition – Fuel Cells for a Greener World, October 2008. <http://www.fuelcellseminar.com/past-conferences/2008/presentations.aspx>.

**VanBree 2010:** Bas van Bree, Ingo Bunzeck; Social acceptance of hydrogen demonstration projects; NextHyLights WP6.1 FinalReport; ECN 2010; [http://www.nexthylights.eu/Publications/WP6-1\\_social%20impacts%20report\\_final\\_clean.pdf](http://www.nexthylights.eu/Publications/WP6-1_social%20impacts%20report_final_clean.pdf).

**VARO 2012:** <http://varo.tukes.fi/>; viitattu joulukuussa 2012.

**Vetaani 2012:** <http://www.vtt.fi/sites/vetaani/index.jsp?lang=en>.

**Winter 1988:** Carl-Jochen Winter and Joachim Nitsch: Hydrogen as an Energy Carrier, Technologies – Systems – Economy, Springer-Verlag 1988.

**Winter 2009:** Carl-Jochen Winter; Hydrogen energy Abundant, efficient, clean: A debate over the energy-system-of-change; Int. J. Hydrogen Energy 34 (2009) S1 – S52.

**Züttel 2007:** Andreas Züttel; Hydrogen storage and distribution systems; Mitig Adapt Strat Glob Change 12 (2007) 343–365.

**QTR 2011:** Report on the first Quadrennial Technology Review, U.S.Department of Energy, September 2011.