



Maija Ruska, Juha Kiviluoma & Göran Koreneff

Sähköautojen laajan käyttöönoton skenaarioita ja vaikutuksia sähköjärjestelmään

ISBN 978-951-38-7499-5 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2010

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374



Julkaisun sarja, numero ja
raporttikoodi

VTT Working Papers 155
VTT-WORK-155

Tekijä(t) Maija Ruska, Juha Kiviluoma & Göran Koreneff		
Nimeke Sähköautojen laajan käyttöönoton skenaarioita ja vaikutuksia sähköjärjestelmään		
Tiivistelmä Verkosta ladattavien sähköautojen laaja käyttöönotto näyttää tällä hetkellä mahdolliselta. Polttoainekustannukset ovat pitkällä aikavälillä nousussa, ja vastaavasti akkuteknologia on kehittynyt voimakkaasti, mikä on alentanut akkujen hintoja. Julkaisussa esitellään jo tehtyjä skenaarioita sähköautojen käyttöönotosta sekä luodaan Suomelle kaksi uutta mahdollista skenaariota. Lisäksi tarkastellaan laajamittaisen sähköautojen käyttöönoton vaikutuksia sähköjärjestelmään erityisesti sähköntuotannon ja markkinoiden näkökulmasta. Tutkimuksessa vertailtiin älykkäästi lataavia ja välittömästi verkkoon liitettyään latauksen aloittavia sähköautoja. Älykkään latauksen järjestelmähyödyksi saatiin käytetyillä oletuksilla 227 €/auto/vuosi. Vaikka sähköautojen älykkään latauksen sähköjärjestelmälle tuomat hyödyt tulevaisuudessa ovat merkittävät, ei yksittäinen sähköauton käyttäjä koe vastaavan suuruisia säästöjä nykyjärjestelmässä. Mikäli käyttäjällä on sähkön tunneittaisen markkinahinnan mukainen sähköenergiatariffi ja aikapohjainen siirtotariffi, kertyy käyttäjällä säästöä vain noin 35 € vuodessa eli vain 10 senttiä päivässä. Tulevaisuuden kysymyksiä tulee olemaan, miten järjestelmähyödyt ulotetaan yhä enemmän myös yksittäiselle sähköauton käyttäjälle.		
ISBN 978-951-38-7499-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Projektinumero 34564; 41103 / 1.9
Julkaisuaika Joulukuu 2010	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 46 s.
Projektin nimi Hybridi- ja sähköautojen vaikutukset sähköjärjestelmään; SGEM, WP3.3 Plug-in hybrid and electric vehicles	Toimeksiantaja(t) VTT; Cleen Oy	
Avainsanat Electric vehicles, power system, power system impacts, smart charging	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374	



Series title, number and
report code of publication

VTT Working Papers 155
VTT-WORK-155

Author(s) Maija Ruska, Juha Kiviluoma & Göran Koreneff		
Title Scenarios of large-scale deployment of electric vehicles and their power system impacts		
Abstract Large scale deployment of electric vehicles seems possible at the moment. In the long run, fuel prices are increasing while the development of battery technology has been brisk. This work presents electric vehicle deployment scenarios from literature as well as two possible scenarios for Finland. In addition, the impacts of large scale use of electric vehicles on the power system are studied from the perspective of power generation and electricity markets. Smart charging and immediately charging electric vehicles are compared. Smart charging created a system benefit of 227 €/vehicle/year with the used assumptions. Even though the advantages of smart charging to the power system will be significant in the future, a single electric vehicle user doesn't experience similar benefits in the nowadays system. Assuming the user has an hourly spot-price dependent energy tariff and a time dependent distribution tariff, he saves approximately only 35 € per year, just 10 cents a day. One of the questions for the future will be how to extend the system benefits from smart charging to an increasing degree also to the single electric vehicle owner.		
ISBN 978-951-38-7499-5 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/publications/index.jsp)		Project number 34564; 41103 / 1.9
Date December 2010	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 46 p.
Name of project EV impacts on the power system SGEM, WP3.3 Plug-in hybrid and electric vehicles	Commissioned by VTT; Cleen Oy	
Keywords Electric vehicles, power system, power system impacts, smart charging	Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374	

Alkusanat

Julkaisu ”Sähköautojen laajan käyttöönoton skenaarioita ja vaikutuksia sähköjärjestelmään” on syntynyt kahden osittain rinnakkaisen projektin tuloksena. VTT:llä käynnistyi oma projekti sähköautojen sähköjärjestelmävaikutuksista vuoden 2009 alussa. Cleen SHOKin puitteissa käynnistyi Tekesin rahoittama *Smart Grids and Electricity Markets* (SGEM) -tutkimusohjelma syksyllä 2009, jossa yhtenä työpakettina on WP3.3 *Plug-in hybrid and electric vehicles* eli sähköautot. Tässä julkaisussa esitetään molempien projektien tuloksia.

Tekijät kiittävät VTT:tä ja SGEM-ohjelmaa saamastaan tuesta ja erityisesti WP3.3:n yritysedustajia Kari Koivurantaa ja Saara Peltosta (Fortum), Stefan Forsströmiä (Vantaan Energia) sekä Timo Knuutilaa ja T. Kabilania (Nokia Siemens Network).

17.12.2010

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	5
Lyhenteet ja sanasto.....	7
1. Johdanto	8
2. Kirjallisuuskatsaus.....	10
2.1 Yhteenveto.....	10
2.2 Yleiset skenaariot.....	11
2.3 Ruotsi.....	12
2.4 Suomi.....	13
2.5 Sveitsi	14
2.6 USA	14
2.7 Yhdistynyt kuningaskunta	16
3. Litiumvarat ja tuotanto.....	18
3.1 Litiumvarat	18
3.2 Litiumin tuotanto.....	20
3.3 Arvio litiumin saatavuudesta	21
4. Skenaariot sähköautojen yleistymiselle	23
4.1 Skenaarioiden lähtökohdat	24
4.1.1 Henkilöajoneuvokanta ja sen uudistuminen	24
4.1.2 Verkosta ladattavien sähköautojen osuus henkilöautojen myynnistä.....	25
4.1.3 Ajosuoritteet	26
4.2 Skenaariot.....	27
4.3 Muita näkökohtia.....	30
5. Sähköautojen toiminta energijärjestelmän kannalta.....	31
5.1 Autojen sähköenergian tarve	31
5.2 Sähköjärjestelmän toiminta	31
5.3 Sähköautojen vaikutus sähkön kulutukseen	32
5.4 Sähköautojen mallintaminen osana sähkömarkkinoita	34
5.5 Lähtötietoja laskelmille	34
5.6 Laskentamallin toiminta	36
5.7 Tuloksia malliajoista.....	37
5.7.1 Älykkäästä lataamisesta saatava hyöty	37
5.7.2 Sähköä akuista verkkoon?	38
5.8 Sähköautojen lataamisen kustannukset.....	38
6. Muuttuva liiketoimintaympäristö	40
7. Johtopäätökset.....	42
Lähdeluettelo	44

Lyhenteet ja sanasto

BEV	Battery electric vehicle – täyssähköauto
EV	Electric Vehicle – sähköauto
mpg	miles per gallon – mailia per gallona
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle – ladattava hybridisähköauto
V2G	Vehicle-to-Grid – autosta sähköverkkoon
E2G	Engine-to-Grid – auton moottorin tuottamaa sähköä syötetään sähköverkkoon
USGS	U.S. Geological Survey – Yhdysvaltojen geologinen tutkimuskeskus
Peak oil	öljytuotannon huippu, jonka jälkeen tuotantomäärät kääntyvät pysyvään laskuun

1. Johdanto

Liikenne kuuluu Euroopan Unionin päästökaupan ulkopuoliseen sektoriin, jolla päästöjen vähennystavoitteena on 10 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Kullekin jäsenmaalle on asetettu omat päästöjen vähennystavoitteet taakanjakopäätöksessä, jossa Suomen päästökauppasektorin ulkoisten päästöjen vähentämistavoitteena on 16 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä.

Päästökaupan ulkopuolisen sektorin päästöjen vähentäminen on erittäin haastava tehtävä. Jäsenvaltiot voivat pääosin itse päättää, miten ei-päästökauppasektorin päästöjä vähennetään. EU:n yhteisillä ohjaukeinoilla asetetaan rajoja autojen hiilidioksidipäästöille. EU:ssa tavoitteena on kaikkien uusien henkilöautojen päästöjen rajoittaminen alle 120 g:aan/km vuoteen 2015 mennessä. Vuonna 2012 65 %:n uutena rekisteröidyistä autoista tulee saavuttaa tämä tavoite. Vuodelle 2020 on asetettu vielä tiukempi tavoite, 95 g/km. Myös USA:ssa vaatimukset autojen polttoainetehokkuudelle tiukentuvat. NHTSA:n CAFE-standardin (Corporate Average Fuel Economy) mukaan myyntimäärillä painotetun uusien autojen polttoainetehokkuuden tulee parantua vuodesta 2010 vuoteen 2015 25 mpg:stä (9,4 l/km) 35 mpg:hen (6,7 l/km) 2020 mennessä.

Sekä USA:ssa että EU:ssa autojen hiilidioksidipäästöille asetetut rajat voidaan lyhyellä tähtämellä saavuttaa polttomoottoritekniikkaan kuuluvien autojen toiminnan tehostamisella. Pitkällä aikavälillä tarvitaan uusia teknologioita. Yhtenä merkittävimmistä keinoista autojen päästöjen vähentämiseksi nähdään verkosta ladattavien sähköautojen käyttö. Vaikka sähköntuotantokin aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä, on sähköntuotannon päästöjen voimakas vähentäminen kuitenkin helpompaa kuin moottoripolttoaineiden päästöjen vähentäminen. Sähköntuotannossa on useita lähes päästöttömiä vaihtoehtoja, kun taas polttoaineita saadaan lähinnä öljystä ja myös biomassasta, jota kuitenkin voidaan tuottaa vain rajallisesti suhteessa globaaliin polttoaineiden kulutukseen.

Toinen merkittävä verkosta ladattavien sähköautojen yleistymistä ajava tekijä on öljyriippuvuuden vähentäminen. Öljyn hinnan ennakoidaan helposti hyödynnettävien öljyvarojen ehtyessä nousevan, ja hintapiikit ovat todennäköisiä. IEA:n vuoden 2009 World Energy Outlookissa öljyn tuotannon ei ennusteta kääntyvän laskuun ennen vuotta 2030,

kun taas joiden arvioiden mukaan tuotantohuippu on jo saavutettu. Riippumatta ”peak oilin” ajankohdasta on selvää, että öljyriippuvuutta tulee pitkällä aikavälillä merkittävästi vähentää. OPECin ulkopuolinen konventionaalinen öljyntuotanto on jo saavuttanut huippunsa, joten USA:n ja EU:n riippuvuus OPEC-maista kasvaa tulevaisuudessa. Epäkonventionaalinen öljyntuotanto on jo viime vuosina kasvanut merkittävästi, mutta tällaisten varojen hyödyntäminen on kalliimpaa kuin konventionaalisten varojen. Epäkonventionaalinen öljyntuotanto vaatii usein myös merkittävästi enemmän energiaa, ja toisaalta tuotanto aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä (esimerkiksi Kanadan öljyhiekka-esiintymät).

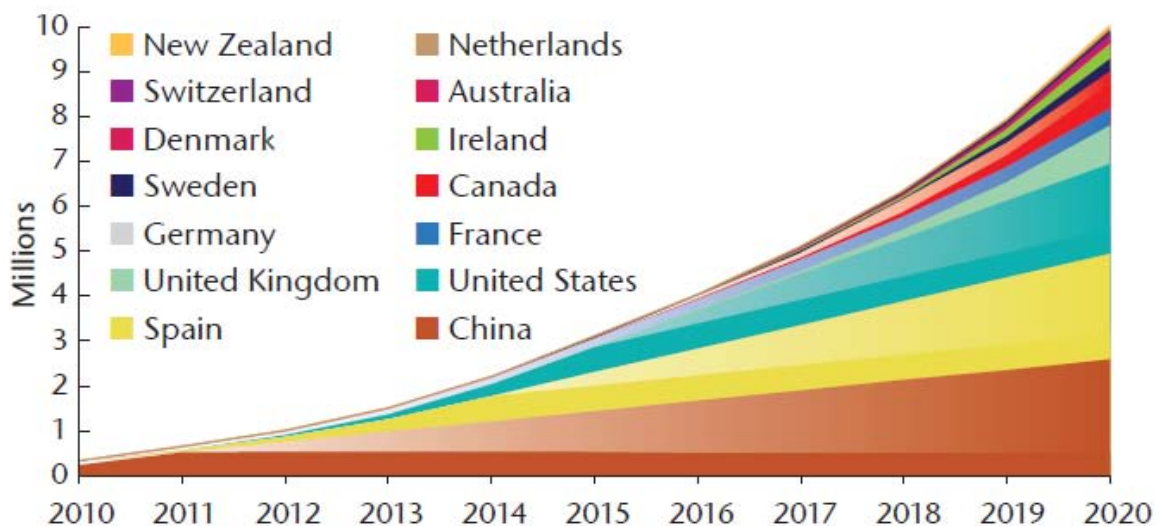
Vaihtuva tuotanto, kuten tuuli- tai aurinkovoima laajamittaisesti sovellettuna, edellyttää kuormituksilta uudenlaista joustoa. Sähköautot ovat täysin uusi kuormitustyyppi, joka tarjoaa mahdollisuuksia kysynnän joustoon. Sähköautojen akut mahdollistavat myös pitkällä aikavälillä sähkön varastoinnin. Uusiutuvan sähköntuotannon lisääntyessä voimajärjestelmä tarvitsee joustavuutta, jota voitaisiin lisätä lataamalla sähköautojen akkuja silloin, kun tuuli- tai aurinkovoiman tuotanto on suurta, ja syöttämällä akuista sähköä verkkoon aikoina, jolloin sähköntuotantoa on vähemmän. Tällaiset Vehicle to grid -teknologiat (V2G) ovat kuitenkin vasta kehittymässä.

2. Kirjallisuuskatsaus

Tässä luvussa esitetään yhteenveto keskeisistä sähköautojen yleistymisskenaarioista ja energiajärjestelmien infrastruktuurivaikutuksia käsittelevistä tutkimuksista. Katsaus sisältää julkaisuja vuodenvaihteeseen 2009–2010 saakka.

2.1 Yhteenveto

Euroopassa sähköautojen yleistymisen merkittävimpinä drivereina ovat päästöjen vähentäminen, öljyn korkea ja volatiili hinta, tuontiriippuvuus, akkujen nopea kehitys sekä uusiutuvan energiatuotannon lisäämisen mahdollistaminen.



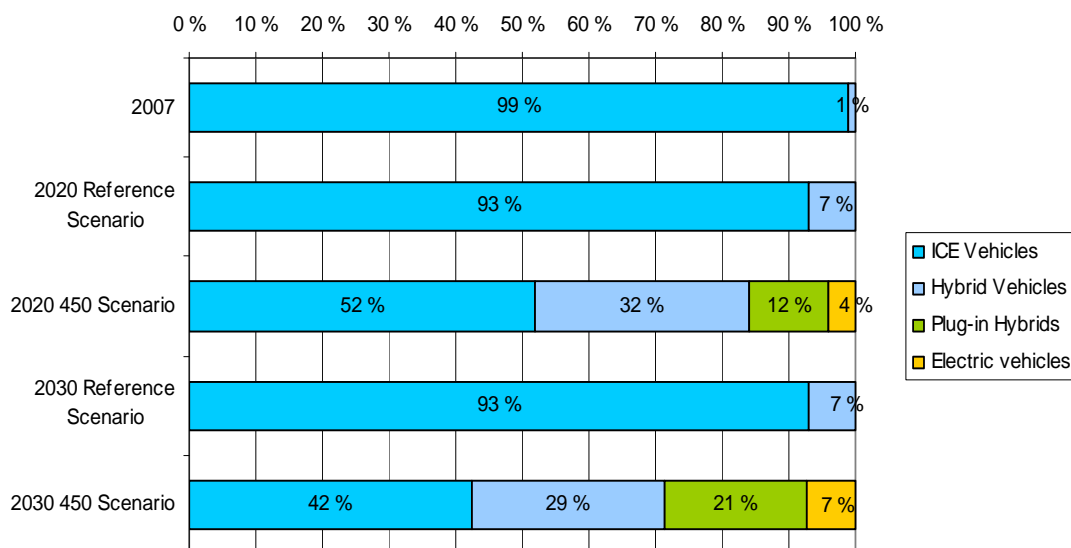
Kuva 1. Eri maiden tavoitteita sähköautojen vuosimyynnille (tavoitteita ei ole ilmoitettu kaikille vuosille, tehty arvio perustuu kasvua jatkavaan sovitukseen, IEA 2009a). Vuonna 2009 henkilöautoja tehtiin noin 50 miljoonaa kappaletta.

Monessa julkaisussa nähdään, että lyhyellä aikavälillä (noin vuoteen 2020) päästöjen vähentämistavoitteet voidaan täyttää polttomoottoritekniikan parantamisen (mukaan lukien ei-verkosta ladattavat hybridit) avulla. Pidemmällä aikavälillä, noin vuosiin 2020–2030, päästövähennystavoitteet todennäköisesti edellyttävät liikenteen osittaista siirtymistä sähkön tai mahdollisesti vedyn käyttöön.

Eri maiden tavoitteet vaihtelevat rajusti suhteessa toisiinsa (kuva 1) ja suhteessa arvioihin globaalin sähköautomarkkinan kasvusta. Tämä kertoo suuresta epävarmuudesta, joka liittyy sähköautojen lisääntymiseen. Sähköauton kustannukset ovat tällä hetkellä selvästi vastaavan bensiinikäyttöisen auton hintaa korkeammalla, minkä vuoksi sähköautojen voimakas lisääntyminen riippuu valtioiden tukipolitiikoista tai kustannustekijöiden suhteellisista muutoksista. Näihin tekijöihin liittyy merkittävää epävarmuutta, minkä vuoksi on vaikea arvioida, miten nopeasti sähköautot tulevat lisääntymään.

2.2 Yleiset skenaariot

Kuva 2 esittää IEA:n vuoden 2009 World Energy Outlookin referenssi- ja 450-skenaarioissa oletettua henkilöautojen myyntiä vuosina 2020 ja 2030. 450-skenaariossa ilmaston lämpeneminen saadaan 50 %:n todennäköisyydellä pysäytettyä kahteen asteeseen, eli tämä skenaario on yhtenevä EU:n ilmastotavoitteiden kanssa. Referenssiskenaariossa on otettu huomioon vuoteen 2009 mennessä tehdyt politiikkatoimet. IEA:n arvion mukaan globaalista henkilöautojen myynnistä olisi verkosta ladattavia sähköautoja 16 % vuonna 2020 ja 28 % vuonna 2030.



Kuva 2. IEA:n arviot eri autotyyppien osuuksista globaalista myynnistä vuosina 2020 ja 2030 eri skenaarioissa (alkuperäinen kuva IEA 2009b).

2. Kirjallisuuskatsaus

Shellin vuoden 2008 Blueprint-skenaarioissa sähköautojen käyttö kasvaa voimakkaasti vuosina 2025–2050. Vuonna 2050 sähköllä kuljetaan jo enemmän kuin kolmasosa globaalista henkilöautojen ajosuoritteesta (Shell 2008). Toisessa skenaariossa sähköautojen käyttö jää marginaaliseksi.

DB:n näkemyksen (Deutsche Bank 2008) mukaan hybridi- ja sähköautojen markkinaosuus uusien ajoneuvojen myynnistä vuonna 2015 on USA:ssa 20 % ja Länsi-Euroopassa 50 %. Vuonna 2020 nämä luvut nousevat 49 %:iin USA:ssa ja 65 %:iin Euroopassa. Suurin osa autoista tulisi olemaan ei-verkosta ladattavia hybridejä, sillä nämä tuovat eniten kustannushyötyjä autojen omistajille. DB pitää kaikkia lähivuosina tehtyjä ja tehtäviä ennusteita varsin epävarmoina ja odottaa taitekohdan litium-ion-akkujen kaupallistamisessa tapahtuvan noin vuonna 2012. DB:n asiantuntijat arvioivat myös, että litiumin saanti saattaa rajoittaa markkinoiden kasvua vuonna 2020.

Roland Bergerin julkaisussa ”Future drives electric” (Roland Berger 2009) esitetään kaksi skenaariota verkosta ladattavien sähköautojen yleistymiselle. Optimistisessa ”the future drives electric” -skenaariossa verkosta ladattavien sähköautojen myynti on globaalisti 8–10 miljoonaa vuonna 2020. Skenaarion taustaoletuksena on korkea öljyn hinta, akkujen hintojen voimakas alentuminen ja voimakas valtioiden tuki. Roland Bergerin raportissa esitellään myös sähköisen voimansiirron teknologiaa tavallista tarkemmalla tasolla.

2.3 Ruotsi

Energimyndighetenin vuonna 2008 tekemän pitkän aikavälin ennusteen (Energimyndigheten 2009a) mukaan Ruotsissa on vuonna 2020 85 000 sähköllä kulkevaa autoa, jos nykyiset vero- ja kannustinjärjestelmät säilyvät. Autojen sähkönkulutukseksi on arvioitu 0,17 kWh/km. Auton sähkötarpeeksi häviöineen on tässä arvioitu 0,24 kWh/km, mutta sähkönkulutus voi olla huomattavasti pienempikin. Energimyndighetenin toisessa raportissa (Energimyndigheten 2009b, taulukko 1) esitetään erilaisia skenaarioita sähköautojen yleistymiselle Ruotsissa. Nämä skenaariot on tehty Eklforskissa Englannin esimerkkiä (BERR 2008) noudattaen.

Ruotsissa energiatoimialan ja IVA:n (Kungliga Ingenjörsvetenskapsakademien) kunnianhimoisena visiona on 600 000 verkosta ladattavaa autoa vuoteen 2020 mennessä (Elforsk 2009). Näiden autojen sähkönkäyttö olisi vuositasolla yhteensä noin 1,5 TWh.

Taulukko 1. Ruotsin Energimyndighetenin (Energimyndigheten 2009b) esittämät markkina-skenaariot sähköautoista Ruotsissa.

Skenaario	Sähköautojen lkm Ruotsissa		
	2010	2020	2030
Nykyiset ohjaukeinit	600	42 000	480 000
Mid-range (ohjaukeinit kehittyvät normaalisti, sähköautojen elinikäkustannukset konv. ajoneuvojen tasolla 2015)	800	125 000	650 000
High-range (Latausinfrastrukturi kehittyä, sähköautojen elinikäkustannukset konv. ajoneuvojen tasolla 2015, akkujen vuokraus realistinen vaihtoehto)	800	240 000	1 780 000
Extreme-range (Sähköautojen kysyntä kasvaa erittäin suureksi, autojen saatavuus rajoitteena)	800	480 000	3 270 000

2.4 Suomi

Työ- ja elinkeinoministeriön asettaman sähköajoneuvotyöryhmän mietinnössä (TEM 2009a) on asetettu tavoitetilaksi, että Suomessa vuonna 2020 myytävistä uusista henkilöautoista 25 % olisi sähköverkosta ladattavia ja näistä 40 % (eli 10 % kaikista) täyssähköautoja. Mietinnössä ehdotetaan, että yhteiskunta kannustaisi voimakkaasti sähköajoneuvojen ja muiden energiatehokkaiden ajoneuvojen käyttöönottoon Suomessa. Kannustimiksi ehdotetaan autojen hankintaa ja käyttöä suosivia verohelpotuksia ja suoraa valtiontukea autojen hankintaan. Lisäksi esitetään, että kaupungit ja kunnat voisivat suosia sähköautoja tarjoamalla niille esimerkiksi pysäköintitietoja ja tavanomaisia ajoneuvoja sujuvampia liikennöintimahdollisuuksia.

Työryhmän tilaamassa taustaselvityksessä (TEM 2009b) on arvioitu sähköautojen käyttöönoton nopeutta. Sähköajoneuvotarjonnan oletettuun kansainväliseen kehitykseen ja Suomen nykyiseen ajoneuvoverotukseen pohjautuvan perusskenaarion mukaan ensimmäiset ladattavat hybridit tulevat markkinoille vuonna 2010, jonka jälkeen ne alkavat hitaasti yleistyä myös Suomessa niin, että vuonna 2020 maassamme myytävistä uusista henkilöautoista ladattavia hybridejä olisi 10 % ja varsinaisia täyssähköautoja 3 %. Tämä vastaa IEA:n WEO 2009:n 450-skenaariota, jossa vuonna 2020 myytävistä henkilöautoista 10 % olisi verkosta ladattavia hybridejä ja 4 % täyssähköautoja. Taustaselvityksessä on arvioitu myös nopeaa ja hidasta autojen käyttöönottoa, julkaistut skenaariot esitetään taulukossa 2.

Työ- ja elinkeinoministeriön marraskuussa 2009 (TEM 2009c) julkaisemassa sähkön kysyntäarviossa on käytetty sähköajoneuvotyöryhmän asettamaa tavoitetilaa sähköautojen sähkön käytön arvion taustalla. Kysyntäarviossa oletetaan, että sähköautojen sähkön-

2. Kirjallisuuskatsaus

käyttö Suomessa olisi vuonna 2020 0,5 TWh perustuen yllä esitettyyn tavoitetilään. Vuoden 2020 jälkeen sähköautojen myynti kasvaisi nopeasti, ja vuodelle 2030 on oletettu, että sähköautojen sähkönkäyttö olisi 3 TWh.

Taulukko 2. Sähköajoneuvotyöryhmän taustaselvityksessä käytetyt sähköajoneuvojen yleistymis-skenaariot Suomessa (TEM 2009b).

	Osuus uusista autoista, %				Kumulatiivinen myyntimäärä, kpl			
	2020		2030		2020		2030	
	EV	PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV
Perusskenaario	3	10	20	50	13 000	66 000	160 000	480 000
Nopea skenaario	6	40	40	60	26 000	190 000	450 000	960 000
Hidas skenaario	2	5	10	20	12 000	38 000	92 000	207 000

2.5 Sveitsi

Alpiq (2009) esittää vision, jossa Sveitsin autokannasta 15 % olisi sähköautoja vuoteen 2020 mennessä. Skenaariossa olisi vuoden 2020 automyynnistä 50 % sähköautoja. Vision lähtökohtana on, että sähköautot ovat paras ratkaisu liikenteen energiatehokkuuden lisäämiselle ja että muita toteuttamiskelpoisia vaihtoehtoja ei ole. Lähtökohdiltaan raportti on ristiriitainen. Toisaalta siinä kaihdetaan tukitoimia – sähköautojen kilpailukyvyyn lähtökohtana pitäisi olla markkinat ja ulkoisten kustannusten sisäistäminen hintoihin. Toisaalla raportissa pidetään tukitoimia kuitenkin välttämättöminä tavoitteeseen pääsemiseksi. Suunniteltuihin tukitoimiin sisältyisi informaatio-ohjausta, latausverkoston kehittämistä, sähköautoja suosivaa liikennepolitiikkaa ja liikennesuunnittelua, päästö- ja kulutusperustaisen verotusjärjestelmän perustamista, sähköauton ostamisen ja käyttämisen tukemista sekä julkisen hallinnon osto-ohjelmaa. Alpiq on Sveitsin suurin energiayhtiö.

2.6 USA

USA:ssa verkosta ladattavien hybridien ja sähköautojen nähdään auttavan kolmessa ongelmassa: autot vähentävät öljyn tuontiriippuvuutta ja päästöjä sekä auttavat hyödyntämään sähköntuotantokapasiteettia ei-huipputehoaikoina. Näkökulma liikenteen sähköistymiseen on siis hieman erilainen kuin Euroopassa. Yhdysvalloissa tavoitteena on ottaa käyttöön miljoona verkosta ladattavaa hybridiä vuoteen 2015 mennessä.

DoE:n (Department of Energy) rahoittama **Oak Ridge National Laboratoryssa** tehty tutkimus ”Potential Impacts of Plug-In Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation” (Hadley & Tsvetkova 2008) tarkastelee verkosta ladattavien sähköautojen

vaikutuksia sähköntuotantoon 13 eri alueella USA:ssa vuosina 2020 ja 2030. Raportissa on oletettu, että PHEVien markkinaosuus uusien ajoneuvojen myynnistä kasvaa 0 %:sta vuonna 2010 25 %:iin vuonna 2020 ja pysyy sen jälkeen samana. Kuormitusvaikutuksia on tutkittu lisäämällä autojen latauskäyrä toteutuneisiin kuormituksiin. Raportissa tarkastellaan useaa eri lataustapaa. Saadut kuormitusten pysyvyysskäyrät on annettu lähtötiedoiksi ORCED-ohjelmalle, jolla on laskettu muun muassa sähköautojen vaikutukset sähköntuotantoon, sähkön markkinahintaan, sähkön keskimääräiseen tuottajahintaan ja päästöihin.

Pacific Northwest National Laboratoryn kaksiosaisessa julkaisussa (PNNL 2007a ja PNNL 2007b) lähtökohtana on, että USA:n voimajärjestelmää ei hyödynnetä tarpeeksi huippukuormitusajan ulkopuolella. Julkaisussa selvitetään nykyisen verkon ja tuotantolaitosten mahdollisuudet tuottaa ja siirtää sähköä verkosta ladattaville hybrideille. Verkko on jaettu kahteentoista alueelliseen osaan. Julkaisun ensimmäisessä osassa tarkastellaan teknisiä mahdollisuuksia ja päästövaikutuksia, toisessa osassa taloudellisia Aspekteja.

Tuloksena on, että USA:n nykyisen voimajärjestelmän kapasiteetti olisi riittävä syöttämään sähköä 84 %:lle USA:n autoista tai 73 %:lle kevyistä ajoneuvoista (light duty fleet), mikäli näiden päivittäinen ajomatka olisi 33 mailia. Liikenteen sähköistäminen vähentäisi merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä, mutta toisaalta pienhiukkas- ja SO_x-päästöt kasvaisivat, kun tarvittavasta uudesta sähköntuotannosta suuri osa perustuisi hiilen käyttöön. Julkaisun toinen osa käsittelee liikenteen sähköistymisen taloudellisia vaikutuksia sähköyhtiöille ja ajoneuvojen omistajille. Tekijät päätyvät siihen, että jos sähköautojen lataaminen saadaan ajoitettua nykyisen matalan kuormituksen ajalle (valley filling), sähköntuottajien kapasiteetti olisi paremmin käytössä ja tuottajat saisivat pääomalleen paremman tuoton.

UC Berkeleyn julkaisussa (UC Berkeley 2009b) tarkastellaan sähköautojen laajamittaisen käyttöönoton vaikutuksia Kalifornian osavaltion sähkökuormaan ja kapasiteettiin. Kalifornian sähköjärjestelmä on kapasiteettirajoitettu, joten huipputehojen kasvu tulisi kalliiksi. Lisäksi uusille voimalaitoksille on erittäin vaikea saada rakennuslupia. Raportissa päädytään siihen, että jos latausta ohjataan yöaikaiseksi, ei sähköautojen käyttöönotolla ole merkittävää vaikutusta nykyiseen sähköjärjestelmään.

Raportissa on tarkasteltu neljän erilaisen lataustavan vaikutuksia kesän 2008 huippukuormituspäivänä. Kaikille skenaarioille on laskettu kuormitusvaikutus neljällä eri penetraatiolla, 2 %, 5 %, 10 % ja 25 %. Eri skenaariot lataustavoista ovat:

1. Autot ladataan kotona työpäivän jälkeen, normaalijakauma, keskiarvo klo 18, hajonta 30 minuuttia.
2. Autoja ladataan sekä kotona että työpaikalla, latauksen on ajateltu jakautuvan kahteen osaan.

2. Kirjallisuuskatsaus

3. Autojen lataus ohjataan puolenyön jälkeen pakollisella time-of-use-tariffilla. Lataus on mallinnettu toispuoleisella normaalijakaumalla.
4. Yhdistelmä skenaarioista 1 ja 3.

Kaikkien sähköautojen oletetaan olevan plug-in-hybridejä, ja kuormitusvaikutus on otettu selvityksestä PNNL 2007a. Autoja ladataan 3,3 kW (220 V ja 15 A) teholla niin pitkään kuin akkujen täyttäminen vaatii päivittäisen ajomatkan ollessa 33 mailia.

Raportissa tarkastellaan myös sähköautojen käyttöönottojen tuomia mahdollisuuksia liiketoiminnalle. Näkökohtia ovat muun muassa:

- Sähköautot lisäävät sähkön kysyntää, jolloin sähköntuottajien ja verkkoyhtiöiden tuotteiden kysyntä kasvaa. Raportissa arvioidaan, että loppukäyttäjähinnalla 11,36 cent/kWh yhden auton käyttämä sähkö maksaisi vuodessa 480 \$ (oletuksena päivittäinen ajomatka 33 mailia ja sähkönkulutus 0,35 kWh/maili eli 0,22 kWh/km).
- Valley filling. Edellyttää automaattista mittarinluentaa ja kuormitusten ohjausta.
- Vehicle-to-Grid (V2G) antaa mahdollisuuden sähkön varastointiin. Raportin kirjoittajien näkemyksen mukaan tämä ei ainakaan lyhyellä aikavälillä tule toteutumaan, sillä akkujen kestävä lataus-purkaus-syklien määrä ei vielä ole riittävä, Smart Metering ja Smart Grid -teknologiat eivät ole vielä USA:ssa käytössä tarpeeksi laajasti, jakeluverkot eivät pysty ottamaan sähköä vastaan (kaksisuuntaiset invertterit puuttuvat) ja toistaiseksi V2G:n taloudellisuutta sähköyhtiöille tai sähkökäyttäjille ei ole vielä osoitettu.

UC Berkeleyyn toisessa julkaisussa (UC Berkeley 2009a) on skenaarioita sähköautojen käyttöönotolle vuoteen 2030 mennessä. Julkaisussa oletetaan, että sähköautojen akut olisivat vuokrattuja, jolloin autojen hankintahinta olisi edullinen. Skenaariot perustuvat arvioihin öljyn hinnan kehityksestä ja sähkö-polttomootoriautojen hintasuhteeseen. Baseline-skenaariossa 64 % USA:ssa myytävistä henkilö- ja pakettiautoista olisi sähköautoja, ja sähköautojen osuus koko autokannasta olisi 24 %. Raportissa on analysoitu autokannan sähköistymisen vaikutuksia USA:n öljyn tuontiin, kauppataaseeseen, investointeihin, päästöihin ja työllisyyteen. Lisäksi on arvioitu ilmanlaadun parantumisesta aiheutuvaa terveydenhoitokulujen alenemista.

2.7 Yhdistynyt kuningaskunta

Nicholas Sternin ilmastonmuutoksen taloudellisia vaikutuksia käsittelevän raportin (Stern 2006) jatkona Yhdistyneessä kuningaskunnassa aloitettiin selvitys liikenteen CO₂-päästöjen vähentämisestä. Julia Kingin johdolla tehty selvitys ”The King Review of low-carbon cars” julkaistiin kahdessa osassa (King 2007 ja 2008). Raportissa tarkas-

tellaan erilaisten ajoneuvo- ja polttoaineteknologioiden mahdollisuuksia vähentää tieliikenteen hiilidioksidipäästöjä. Raportin mukaan pitkällä aikavälillä (vuoteen 2050 mennessä) tieliikenteen hiilidioksidipäästöjä voidaan kehittyneissä valtioissa leikata noin 90 %:lla, jos liikenteen energiana aletaan käyttää päästöttömillä tavoilla tuotettua sähköä. Jos liikenteen kasvu jatkuu Isossa-Britanniassa nykyisellä noin prosentin vuosivauhdilla, voidaan päästöjä leikata noin 80 %:lla.

BERRin (Department of Business Enterprise & Regulatory Reform) ja DfT:n (Department for Transport) tilaama raportti ”Investigation into the Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Hybrid Electric Vehicles” (BERR 2008) esittää neljä skenaarioita sähköautojen yleistymiselle. Raportissa oletetaan, että sähköautojen saatavuus on huono ennen vuotta 2014, sillä autovalmistajat eivät pysty aloittamaan laajaa tuotantoa tätä ennen. Tehdyt skenaariot eivät ole ennusteita, vaan niiden avulla on haluttu selvittää sähköautojen yleistymisen vaikutuksia sähkön kysyntään, kasvihuonekaasupäästöihin, ilman laatuun ja mahdollisuuksiin sähkön varastoinnissa ja syöttämisessä takaisin verkkoon (V2G). Skenaariot esitetään taulukossa 3.

Raportti käsittelee myös sähköautojen yleistymisen vaikutuksia sähköntuotantoon ja sähköverkkoon. Mikäli sähköautojen lataus saadaan siirrettyä yöaikaiseksi, ei uutta sähkön tuotantokapasiteettia tarvitse juurikaan rakentaa. Sähköautojen yleistymisen ei nähdä aiheuttavan merkittäviä verkkovaikutuksia kantaverkkotasolla, mutta joissain tapauksissa jakeluverkkoja tulisi vahvistaa. Sähköntuotantokapasiteettikin riittää sähköautoille, mikäli autojen lataus voidaan tehdä off-peak-aikoina.

Taulukko 3. Sähköautojen yleistymisskenaarioita UK:ssa (BERR 2008).

	Sähköautojen lkm UK:ssa					
	2010		2020		2030	
	EV	PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV
Business as usual	3 000	1 000	70 000	200 000	500 000	2 500 000
Mid-range (ohjauskeinot kehittyvät normaalisti, sähköautojen elinikäkustannukset konv. ajoneuvojen tasolla 2015)	4 000	1 000	600 000	200 000	1 600 000	2 500 000
High-range (Merkittäviä kannustimia, sähköautojen elinikäkustannukset konv. ajoneuvojen tasolla 2015, akkujen vuokraus realistinen vaihtoehto)	4 000	1 000	1 200 000	350 000	3 300 000	7 900 000
Extreme-range (Sähköautojen kysyntä kasvaa erittäin suureksi, autojen saatavuus rajoitteena)	4 000	1 000	2 600 000	500 000	5 800 000	14 800 000

3. Litiumvarat ja tuotanto

Valtaosa sähköautoalan toimijoista olettaa, että lähes kaikki autovalmistajat alkavat käyttää litiumioniakkuja sähköautoissa (Deutsche Bank 2008). Pitkällä aikavälillä suuri osa globaalista autokannasta saattaa muuttua litiumioniakuilla toimiviksi sähköautoiksi, joten litiumin riittävyys ja tuotantoinfrastruktuurin kyky vastata nopeasti kasvavaan kysyntään saattavat rajoittaa sähköautojen yleistymistä.

Litiumioniakkuja pidetään yleisesti hyvänä teknologiana: litium on myrkytöntä, kevyttä ja sillä on korkea energiasisältö painoon nähden (*specific energy content*). Litium on suhteellisen edullista, ja sitä tuotetaan jo nykyisin merkittäviä määriä. Litiumia käytetään laajasti kuluttajaelektronikan akuissa, joten teknologia on jo käytössä pienissä sovelluskohteissa. Autokäyttöä varten suunniteltuja litiumakkuja kehittävät intensiivisesti useat akkuvalmistajat.

3.1 Litiumvarat

USGS (U.S. Geological Survey) esittää vuosittain arvioita maailman mineraalivaroista. Taulukossa 4 esitetään vuoden 2008 litiumin tuotanto- ja reservitiedot (USGS 2009). USGS ei ole esittänyt arviota Argentiinan reserveistä. Ne on arvioitu noin 2 miljoonan tonnin suuruisiksi (Tahil 2006). Myös Venäjän ja muutamien muiden maiden tiedot puuttuvat.

USGS:n mineraalivarojen jaottelu on seuraava:

- **Resursseilla** tarkoitetaan sitä maankuoressa olevaa mineraalin määrää, joka voidaan hyödyntää nykyisin tai potentiaalisin teknisin ja taloudellisin reunaehdoin.
- **Reservipohjalla** tarkoitetaan sitä osaa resursseista, joka täyttää tietyt nykyiseen louhintaan ja tuotantoon liittyvät fyysiset ja kemikaaliset minimikriteerit (muun muassa laatu, esiintymän paksuus ja syvyys). Reservipohja saattaa sisältää varoja, joiden oletetaan tulevan taloudellisesti hyödynnettäviksi tietyn aikavälin aikana.

- **Reserveillä** tarkoitetaan sitä osaa reservipohjasta, joka voidaan taloudellisesti tuottaa arvion tekoaikana. Tämä ei edellytä sitä, että esiintymä olisi arviointihetkellä tuotannossa.

Taulukko 4. USGS:n Mineral Commodity Summaries -julkaisun litiumia koskevat tuotanto- ja reservitiedot vuodelta 2008 (lähtötiedot USGS 2009).

	Mine production, t	Reserves , t	Reserve base, t
United States	W	38 000	410 000
Argentina	3 200	NA	NA
Australia	6 900	170 000	220 000
Bolivia	-	-	5 400 000
Brazil	180	190 000	910 000
Canada	710	180 000	360 000
Chile	12 000	3 000 000	3 000 000
China	3 500	540 000	1 100 000
Portugal	570	NA	NA
Zimbabwe	300	23 000	27 000
World total (rounded)	27400*	4 100 000	11 000 000

NA Not Available, W Withhold to avoid disclosing company proprietary data, - Zero

*excludes US production

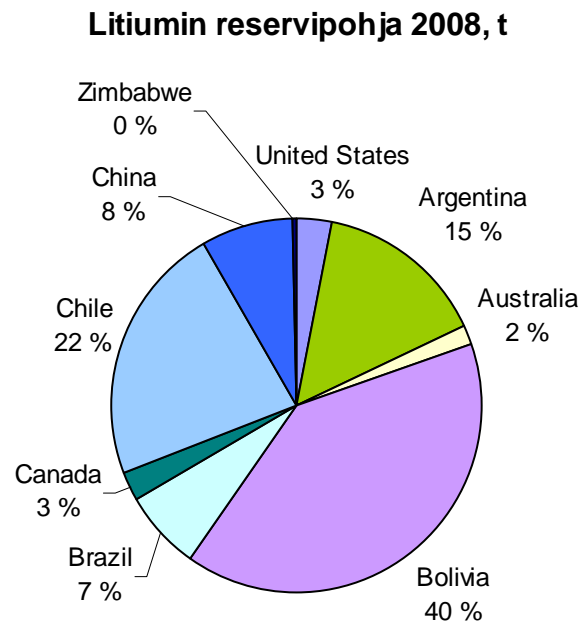
Resurssipohjan jakautuminen eri valtioille esitetään kuvassa 3. Suurin osa reservipohjan litiumista on suolajärviesiintymissä, joista edelleen valtaosa on Etelä-Amerikassa. Lisäksi suolajärviesiintymiä on USA:ssa Nevadassa ja Kiinassa. Yli 70 % litiumin reservipohjasta on Argentiinan, Chilen ja Bolivian valtioiden alueella olevassa kolmiossa. ”Litiumkolmion” sivujen pituudet ovat noin 360 km, 280 km ja 560 km. Tällä alueella on suolatasankoja, joilta saadaan litiumia sähköautojen akkuihin tarvittavassa litiumkarbonaattimuodossa (Li_2CO_3). Suolatasankojen litiumintuotanto on edullisempaa kuin kiviesiintymistä saatu litium. Tasangot ovat

- Chilen **Salar de Atacama**, jossa litiumia arvioidaan olevan noin 3 miljoonaa tonnia. Joidenkin arvioiden mukaan litiumia saattaisi olla Salarissa jopa 6,9 miljoonaa tonnia. Salar de Atacaman litium on laadultaan parasta maailmassa ja litiumsisältö on suurin.
- Argentiinan **Salar de Hombre Muerto** sijaitsee noin 220 km Salar de Atacama lounaaseen. Alueella litiumia tuottava yhtiö FMC käyttää menetelmää, jossa mineraalin puhdistuksessa käytetään runsaasti puhdasta vettä. Myös kaupallisessa tuotannossa oleva **Salar del Rincon** sijaitsee Argentiinassa.

3. Litiumvarat ja tuotanto

- Bolivian **Salar de Uyuni** on maailman suurin litiumesiintymä. USGS:n arvio reservipohjasta on 5,4 miljoonaa tonnia. Estimoidut Bolivian litiumvarat ovat noin 40 % koko maailman litiumin reservipohjasta.

Etelä-Amerikan suolajärvet ovat nähtävyyksiä, joita pidetään luonnonihmeinä. Tämä saattaa rajoittaa litiumin tuotantoa esiintymistä.

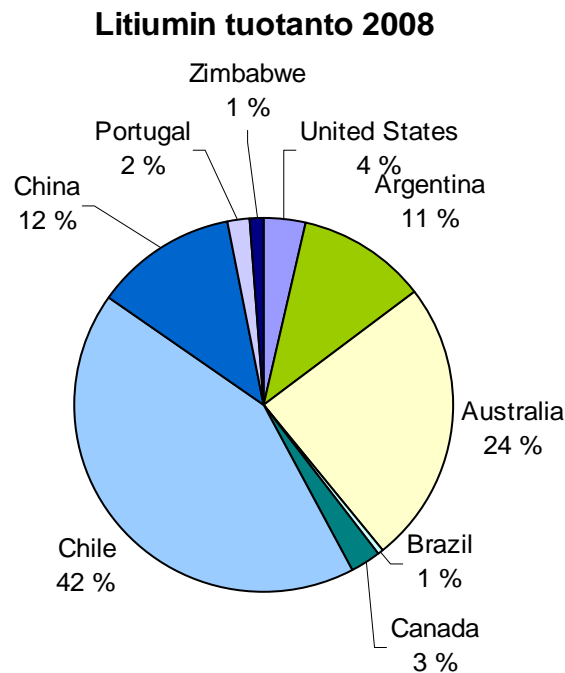


Kuva 3. Litiumin reservipohja vuonna 2008 (lähde pääosin USGS 2009, Argentiinan varat Tahil 2006).

Suolaesiintymien lisäksi litiumia on pegmatiittiesiintymissä esimerkiksi Australiassa, Suomessa ja Yhdysvalloissa (North Carolina). Näiden esiintymien litium on silikaattimuodossa, ja sen pääkäyttökohteena on keraaminen- ja lasiteollisuus. Litiumin tuotanto suolaesiintymistä on halvempaa kuin pegmatiitista, joten litiumkarbonaattia ei nykyisellä hintatasolla kannata tuottaa pegmatiittiesiintymistä.

3.2 Litiumin tuotanto

Vuonna 2008 globaalista litiumin tuotannosta yli 50 % tuli Etelä-Amerikasta (kuva 4). USGS:n vuoden 2009 arvion mukaan neljäsnes tuotetusta litiumista käytetään akkujen raaka-aineena. Litiumin käyttö akuissa on viime vuosina kasvanut nopeasti.



Kuva 4. Litiumin tuotanto vuonna 2008 (data USGS 2009, USA:n litiumin tuotannon arvioitu olevan 1 000 t (Tahil 2006)).

Myös Suomessa louhitaan litiumia. Keliber Resources Ltd Oy suunnittelee aloittavansa litiumkarbonaatin louhinnan Keski-Pohjanmaalla vuonna 2010. Esiintymä sisältää prosentin litiumia sisältävää mineraalia ainakin kolme miljoonaa tonnia, eli litium metallia on esiintymässä ainakin 3 000 tonnia (Tekniikka & Talous 3.4.2007). Lähteessä (Evans 2008) Keski-Pohjanmaan kaivosten sisältämän litiumin määräksi arvioidaan 14 000 tonnia.

3.3 Arvio litiumin saatavuudesta

Litiumvarojen ja tuotantokapasiteetin riittävyys laajamittaiseen sähköautojen käyttöön ottoon tarvittavien akkujen raaka-aineeksi on viime vuosina ollut debatin kohteena. William Tahilin julkaisussa ”The Trouble with Lithium: Implication of Future PHEV Production for Lithium Demand” vuodelta 2006 (Tahil 2006) kyseenalaistetaan teknisesti ja taloudellisesti hyödynnettävissä olevan litiumin riittävyys sähköautojen laajamittaisen käyttöönoton mahdollistajaksi. Tätä seurasi julkaisu ”The Trouble with Lithium 2: Under the Microscope” (Tahil 2008). Geologi Keith R. Evans esitti Tahilin arviosta poikkeavan näkemyksen litiumvaroista vuonna 2008 (The Abundance of Lithium, Evans 2008). Evansin mukaan litiumia on maankuoressa runsaasti eikä litiumvarojen määrä siten rajoittaisi liikenteen sähköistämistä. Erot litiumvarojen riittävyyttä koskevissa ar-

3. Litiumvarat ja tuotanto

vioissa johtuvat litiumesiintymien eroista. Tahil on julkaisuissaan arvioinut, että vain suolajärvistä saatavaa litiumia kannattaisi hyödyntää akkujen valmistuksessa. Litium-karbonaattia voidaan tuottaa myös pegmatiittiesiintymistä, mutta se on huomattavasti kalliimpi tuotantotapa.

Litiumin hinta on muiden raaka-aineiden hintojen tavoin noussut voimakkaasti 2000-luvulla. Vuonna 2007 litiumin hinta oli noin \$6,30 /kg. DB:n arvion mukaan akkujen litiumin tarve on 1,38 kg/kWh (Deutsche Bank 2008). Verkosta ladattava 12 kWh:n hybridi tarvitsisi litiumia noin 16,5 kg, jolloin akkujen litiumin arvo olisi \$100 nykyisellä hintatasolla. Samassa raportissa on arvioitu PHEV:in akkujen kokonaishinnaksi noin \$6000, joten litiumin osuus akun hinnasta on vain muutama prosentti. Akkuteollisuus voisi siis maksaa litiumista huomattavasti enemmänkin, jolloin myös muita kuin suolajärviesiintymiä voisi ottaa tuotantoon.

Muilla raaka-aineilla kysynnän ja hinnan kasvu on johtanut raaka-aineiden etsimisen kasvuun, uusien esiintymien löytämiseen ja tuotantotapojen kehittymiseen, jolloin teknisesti ja taloudellisesti hyödynnettävissä olevien reservien määrät ovat kasvaneet.

Pienimpienkin arvioiden mukaan nykyisin taloudellisin ja teknisin reunaehdoin louhitavissa oleva litium riittäisi vähintään seuraavan kymmenen vuoden aikana rakennettavien sähköautojen tarpeisiin. Todennäköisesti helposti hyödynnettävissä olevat litiumvarat riittävät paljon pidemmälle. Lisäksi litiumioniakut voidaan kierrättää, joten käytöstä poistuvien akkujen litium voidaan käyttää uudelleen.

4. Skenaariot sähköautojen yleistymiselle

Tässä luvussa esitetään kaksi skenaariota sähköautojen yleistymiselle Suomessa. Skenaarioiden tekemisessä on käytetty pääosin seuraavia lähteitä:

- Autokannan tulevaisuustutkimus (AKE 2006), jossa esitetään kuusi eri skenaariota autokannan uusiutumisella ja kasvulle Suomessa vuoteen 2030. Esitetyissä skenaarioissa ei ole huomioitu liikenteen sähköistymistä. Lähteestä on saatu arviot autokannan uusiutumismisnopeudelle.
- Sähköajoneuvot Suomessa -selvitys (TEM 2009b), jossa esitetään skenaarioita siitä, miten verkosta ladattavien sähköautojen osuus uusista henkilöautoista kehittyy. Tämän lähteen skenaariot perustuvat verkosta ladattavien sähköautojen ja polttomoottoriautojen kustannusten vertailuun.

Verkosta ladattavia sähköautoja on toistaiseksi liikennekäytössä hyvin vähän, Suomessa oli vuoden 2008 lopussa rekisteröitynä käyttöön 7 sähköhenkilöautoa ja 78 sähköpaketti-autoa (TEM 2009b). Lähtötilanne huomioiden esitetyt skenaariot sähköautojen yleistymiselle ovat hyvin epävarmoja. Keskeiset edellytykset sähköautojen laajamittaiselle yleistymiselle ovat akkujen teknologian kehittyminen ja valmistuskustannusten lasku sekä sähköautojen saatavuuden parantaminen. Sähköautojen yleistymisnopeus riippuu myös merkittävästi öljyn hintakehityksestä. Autovalmistajien tulisi pystyä tarjoamaan markkinoille jo lähivuosina merkittäviä määriä kohtuuhintaisia sähköautoja. Verkosta ladattavien sähköautojen yleistymisen tulee riippumaan myös valtioiden tukipolitiikasta, mikä hankaloittaa ennusteiden tekemistä.

Tässä luvussa esitettyjen skenaarioiden tarkoituksena ei ole ennustaa sähköautokannan kehittymistä vaan tarkastella mahdollisia tulevaisuuden kehityspolkuja ja niiden vaikutuksia energijärjestelmään.

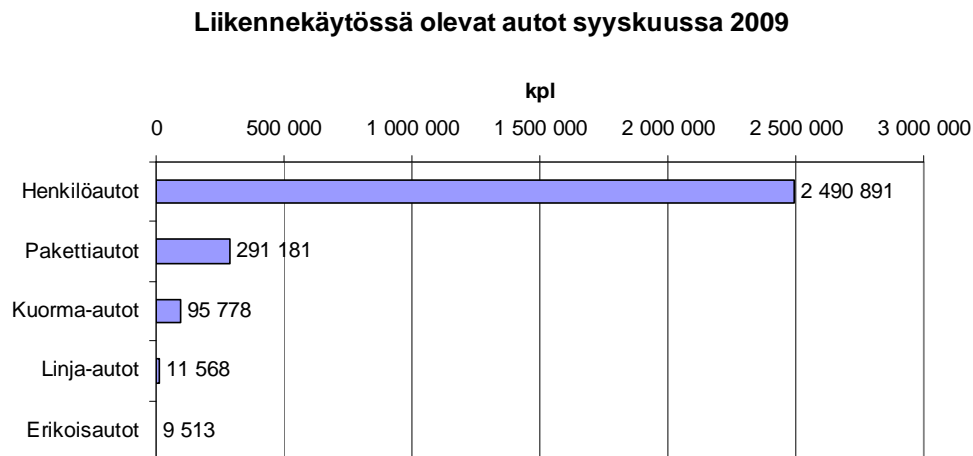
4.1 Skenaarioiden lähtökohdat

4.1.1 Henkilöajoneuvokanta ja sen uudistuminen

Ajoneuvohallintokeskus AKE ylläpitää yhdessä Tilastokeskuksen kanssa ajoneuvotilastoja. Ajoneuvokanta sisältää eri ajoneuvolajien määrät alueellisesti. Kantatilastoja päivitetään neljännesvuosittain. Lisäksi AKE julkaisee tilastoja ensirekisteröinneistä.

Suhteessa asukaslukuun Suomen autoistuminen on eurooppalaista keskitasoa. Vuoden 2008 lopussa autotiheys oli 591 autoa 1 000 asukasta kohden ja henkilöautotiheys 507 autoa (Tiehallinto 2009). Ajoneuvorekisterissä oli syyskuun lopussa 2009 5 969 436 ajoneuvoa, joista autoja oli 3 204 383. Näistä autoista oli liikennekäytössä 2 898 931 kappaletta. Kuvassa 5 esitetään liikennekäytössä olevien autojen määrä lajeittain.

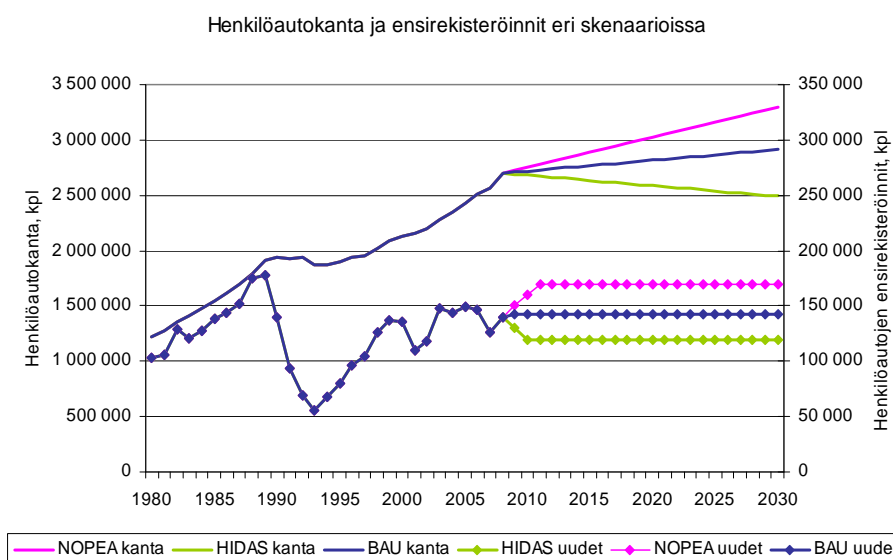
Vuonna 2007 Suomessa autojen keski-ikä oli 10,7 vuotta ja keskimääräinen romutusikä yli 18 vuotta. Näillä luvuilla Suomen autokanta on läntisten EU-maiden vanhin (<http://www.autoalantieto.fi/vanhauusi.asp>).



Kuva 5. Liikenteessä olevat autot Suomessa 30.9.2009 (lähtötiedot: AKE 2009).

Ajoneuvohallintokeskuksen julkaisussa ”Autokannan tulevaisuustutkimus – tulevaisuuden autokantaan vaikuttavat tekijät ja skenaarioita vuoteen 2030” esitetään kuusi skenaariota autokannan mahdollisista tulevaisuuden kehityspoluista (AKE 2006). Perusskenaario kuvaa nykytilanteen jatkumista (Business As Usual, BAU) ja toimii referenssiskenaariona muille. Viisi muuta skenaariota ovat kukoistava talous (NOPEA), taantuva talous (HIDAS), dieselöityminen (DIESEL), vaihtoehtopolttoaineskenaario (VEPA) sekä energian hinta-skenaario (HINTA). Skenaarioiden lähtökohtana on autokanta vuoden 2005 lopussa. Julkaisussa esitetään myös autokannan poistumien arvio. Erilaisista kehitysolehtuksista huolimatta autokantaan heijastuvat muutokset ovat melko vähäisiä, sillä autokanta on suuri ja tulevien ja poistuvien autojen määrät autokannan kokoon nähden pieniä.

AKEn skenaarioissa uusien henkilöautojen vuotuiset myyntimäärät vaihtelevat HIDAS-skenaarion 120 000 kappaleesta NOPEA-skenaarion 170 000 kappaleeseen. Skenaarioissa esitetyt arviot henkilöautokannan koosta vuonna 2030 vaihtelevat välillä 2,5 ja 3,3 miljoonaa. Skenaarioiden erot näkyvät kuvasta 6.



Kuva 6. Henkilöautokannan koon ja ensirekisteröintien määrän kehittyminen eri skenaarioissa (lähtötiedot: AKE 2006).

4.1.2 Verkosta ladattavien sähköautojen osuus henkilöautojen myynnistä

Työ- ja elinkeinoministeriön sähköajoneuvotyöryhmän taustaselvityksessä (TEM 2009b) on esitetty skenaarioita sähköajoneuvojen yleistymiselle. Skenaarioissa on lähtökohtana bensiini- ja dieselmotoristen polttomoottoriautojen ja verkosta ladattavan hybridin kustannusvertailu.

Laskelmissa on käytetty esimerkkinä vuonna 2010 markkinoille odotettavaa GM Volt -verkosta ladattavaa hybridiä (Euroopan markkinoilla Opel Ampera). Tämän auton lähtöhinnan arvioidaan olevan noin 31 000 € ja tavoitehinnaksi on ilmoitettu 23 000 €. Hintaero saman valmistajan vastaavaa polttomoottoriautoon on 6 000–13 000 €. Auton sähkönkulutukseksi on vertailussa arvioitu 20 kWh/100 km ja sähkön hinnaksi 0,1 €/kWh. Vertailukohtana on käytetty bensiini- ja dieselmotorisia polttomoottoriautoja. Bensiinin hinnaksi on oletettu raportin kirjoittamisen aikainen 1,3 €/l ja dieselin hinnaksi 1,0 €/l. Bensiiniauton keskikulutukseksi on oletettu 6,5 l/100 km ja dieselauton kulutukseksi 5,0 l/100 km.

Kustannusvertailut on esitetty sekä lähtöhintaisille että tavoitehintaisille verkosta ladattaville autoille. Bensiini- ja dieselautojen hinnat ja polttoaineiden hinnat on oletettu vakioiksi. Kustannusvertailun tuloksena on saatu seuraavaa:

4. Skenaariot sähköautojen yleistymiselle

- Lähtöhinnalla 31 000 € hybridauto on bensiiniautoa edullisempi yli 100 km päivittäisellä ajomatalla. Tällöinkin dieselauto on edullisempi kuin bensiini- tai hybridautot.
- Tavoitehinnalla 23 000 € hybridauto on kannattavin vaihtoehto, jos päivittäinen ajomatka on yli 45 km. Jos päivittäinen ajomatka ylittää 140 km, on dieselauto edullisempi.
- Päivittäisten ajomatkojen tarkastelussa saatiin selville, että ladattava hybridi olisi tavoitehinnalla edullisempi noin puolelle autoilijoista.

Raportissa esitetään kolme skenaariota sähköautojen yleistymiselle, perusskenaario sekä nopeutetun ja hitaan muutoksen skenaariot. Yhteenveto skenaarioista esitetään taulukossa 5. Kaikissa skenaarioissa oletetaan, että ensimmäiset ladattavat hybridit tulevat markkinoille vuonna 2010, minkä jälkeen ne alkavat yleistyä. Täyssähköautot tulevat markkinoille viiden vuoden viiveellä verrattuna ladattaviin hybrideihin. Myös luvun 2 kirjallisuuskatsauksessa esitetyissä skenaarioissa on oletettu, että lähivuosina suurin osa myytävistä sähköautoista on verkosta ladattavia hybridejä. Hybridillä voidaan siirtyä polttomoottorin käyttöön, kun akun kapasiteetti on käytetty loppuun. Akkuteknologioiden kehittyessä täyssähköautot yleistyvät, joten näiden osuus myydyistä verkosta ladattavista sähköautoista saattaa olla hybridejä suurempi vuonna 2030.

Taulukko 5. Sähköajoneuvotyöryhmän taustaselvityksessä käytettyjen skenaarioiden yhteenveto (TEM 2009b).

	Vuosi	Osuus uusista autoista, %		Kumulatiivinen myyntimäärä, kpl		Osuus henkilöautojen liikennesuoritteesta, %	
		PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV	EV
Perusskenaario	2020	10	3	66 000	13 000	3	0,6
	2030	50	20	480 000	160 000	19	7
Nopeutettu muutos	2020	40	6	190 000	26 000	8	1
	2030	60	40	960 000	450 000	38	19
Hidas muutos	2020	5	2	38 000	12 000	2	0,5
	2030	20	10	207 000	92 000	8	4

4.1.3 Ajosuoritteet

Henkilöautojen keskimääräinen ajosuorite on pysynyt Suomessa jo pitkään tasolla 18 000 km/a. Verkosta ladattavan sähköautojen hankinta on kuitenkin edullisinta niille käyttäjille, jotka ajavat päivässä noin 40–120 km (TEM 2009b). Tämä vastaisi 14 600–43 800 km:n vuotuista ajomatkaa. Voidaan olettaa, että sähköautoilla ajetaan keskimäärin

enemmän kuin 18 000 km/a, sillä sähköautot ovat kannattavimpia enemmän ajaville käyttäjille. Lisäksi uusilla autoilla ajetaan muutenkin vanhoja autoja enemmän.

Tiehallinnon tieliikenne-ennusteessa (Tiehallinto 2007) ennustetaan tieliikenteen kilometrimäärien kasvavan 2010–2020 noin 9 % ja lisäksi 2020–2030 noin 5 %. Kasvuennustetta ei ole eritelty ajosuoritteen ja autojen lukumäärän osalta.

4.2 Skenaariot

Tässä selvityksessä tehtiin kaksi uutta skenaariota liikenteen sähköistymiselle. Lähtökohtina käytettiin skenaarioita ajoneuvokannan uudistumisesta (AKE 2006) ja liikenteen sähköistymisestä (TEM 2009b). Esitetyt uudet skenaariot yhdistelevät näitä kahta.

Nopean sähköistymisen skenaariossa ajoneuvokannan uudistumista arvioidaan nopean muutoksen skenaariolla, jossa ensirekisteröityjen autojen määrä vuodessa nousee Suomessa nopeasti nykyisestä noin 140 000 kappaleesta 170 000 kappaleeseen. Ajoneuvokanta kasvaa myös nykyisestä 2,9 miljoonasta 3,3 miljoonaan vuoteen 2030 mennessä. Tämä vastaa lähteen AKE 2006 NOPEA-skenaariota. Nopean sähköistymisen skenaariossa verkosta ladattavien sähköautojen osuus myydyistä autoista kasvaa vuoteen 2030 mennessä noin 90 %:iin. Sähköautojen myyntiosuus on hieman pienempi kuin lähteen TEM 2009b nopeutetun muutoksen skenaariossa; vuonna 2030 myyntiosuus uusista autoista on yhteensä 90 %.

Nopean sähköistymisen skenaario

Taantuman jälkeen öljyn hinta lähtee voimakkaaseen nousuun. Tuotantohäiriöt merkittävässä tuottajamaissa hankaloittavat ajoittain öljyn saatavuutta, ja OPECin ulkopuoliset valtiot haluavat vähentää öljyriippuvuutta voimakkaasti. Valtioiden avustuksella sähköautojen ja erityisesti akkujen teknologian kehittämiseen panostetaan merkittävästi, ja samalla sähköautojen käyttöönottoa tuetaan erilaisilla verohelpotuksilla ja tuilla. Sähköautojen hankintakustannukset laskevat nopeasti, ja samanaikaisesti teknologian kehittyessä autojen suorituskyky paranee. Sähköautojen latausinfrastruktuuria kehitetään voimakkaasti jo 2010-luvun alkupuolella.

Hitaan talouskasvun skenaariossa oletetaan, että vuonna 2008 alkanut kansainvälinen taantuma vaikuttaa uusien henkilöautojen ostoa hidastavasti vastaavasti kuin 1990-luvun alkupuolen lama. Skenaariossa henkilöautojen ensirekisteröinnit vuosina 2009–2015 vastaavat vuosien 1991–1997 ensirekisteröintejä ja autokannan kasvua on hidastettu vastaavasti. Henkilöautokanta pienenee vuoden 2008 2,7 miljoonasta autosta yhteensä noin

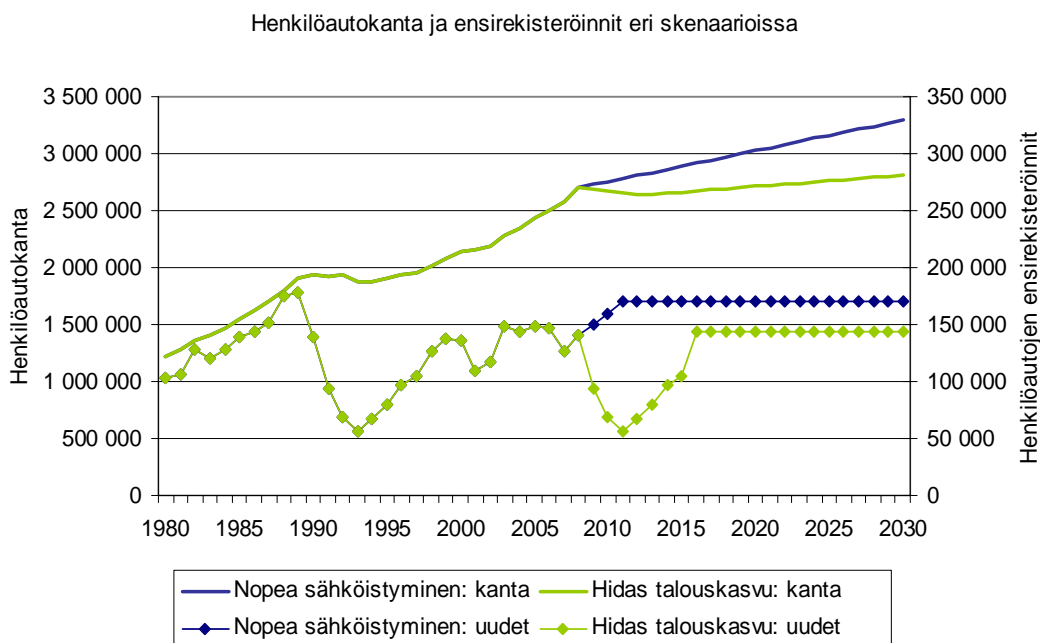
4. Skenaariot sähköautojen yleistymiselle

50 000 autoa vuoteen 2012 mennessä. Tämän jälkeen kanta kasvaa hitaasti ja on vuonna 2030 2,8 miljoonaa ajoneuvoa, lähes 500 000 vähemmän kuin nopean sähköistymisen skenaariossa. Sähköautot yleistyvät lähteessä TEM 2009b esitetyn perusskenaarion mukaisesti siten, että verkosta ladattavien autoja on vuonna 2030 noin 70 % myydyistä autoista.

Hitaan talouskasvun skenaario

Vuonna 2008 alkanut kansainvälinen taloudellinen taantuma vähentää merkittävästi kotitalouksien ostovoimaa, ja uusien henkilöautojen kauppa hidastuu merkittävästi.

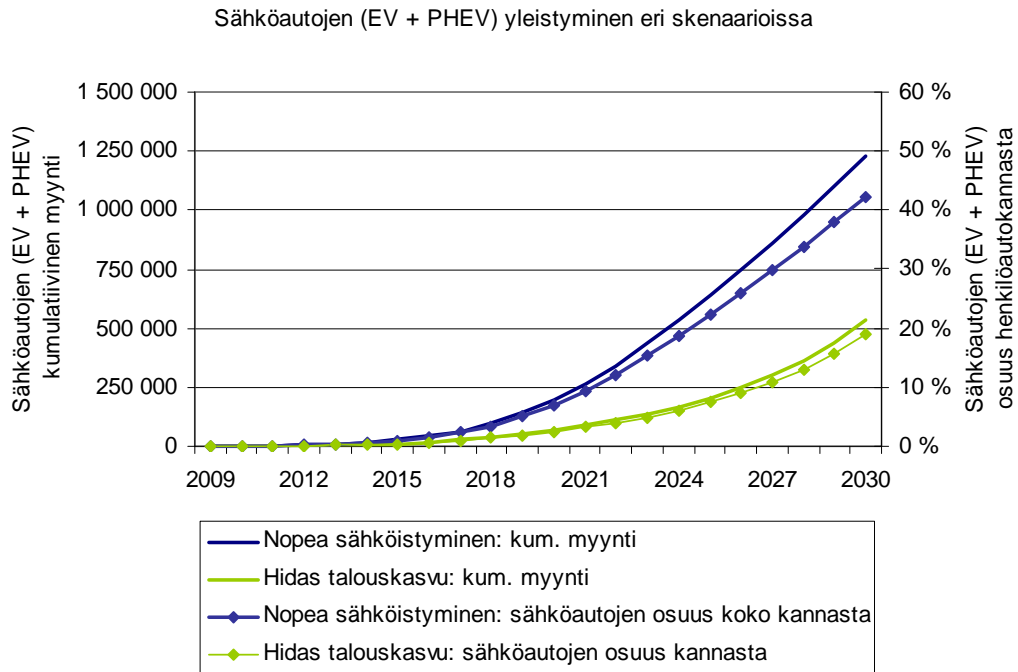
Öljyn hinta nousee vakaasti, ja verkosta ladattavat sähköautot kasvattavat markkinaosuuttaan. Akkuteknologian kehitys on hitaampaa kuin nopean sähköistymisen skenaariossa, ja sähköautojen markkinaosuus kasvaa verkkaisemmin. Taantumasta huolimatta halutaan vähentää öljyriippuvuutta ja pienentää CO₂-päästöjä, joten tukipolitiikalla pyritään vauhdittamaan sähköautojen yleistymistä myös tässä skenaariossa. Tiukka talustilanne kuitenkin rajoittaa tukien käyttöä, ja ne painottuvat liikenteessä biopolttoaineille. Latausinfrastruktuuri ei kehity yhtä nopeasti, koska yritykset kaihtavat ylimääräisiä riskejä.



Kuva 7. Henkilöautokanta ja ensirekisteröinnit eri skenaarioissa.

4. Skenaariot sähköautojen yleistymiselle

Kuvassa 7 esitetään henkilöautokannan kehittyminen ja ensirekisteröintien kehittyminen yllä esitetyissä skenaarioissa. Kuvassa 8 on vastaavat sähköautojen myynnin kehittymiset ja sähköautokannan kasvu.



Kuva 8. Täyssähköautojen ja verkkohybridien yhteenlasketut myyntimäärät ja osuus uusista henkilöautoista vuosina 2009–2030 eri skenaarioissa.

VTT:llä muodostettujen skenaarioiden yhteenveto esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6. VTT:llä muodostettujen skenaarioiden yhteenveto.

	Vuosi	Osuus uusista autoista, %		Kumulatiivinen myyntimäärä, kpl	
		PHEV	EV	PHEV	EV
Nopean sähköistymisen skenaario	2020	30	8	170 000	30 000
	2030	50	40	750 000	480 000
Hitaan talouskasvun skenaario	2020	10	3	55 000	14 000
	2030	50	20	400 000	150 000

4.3 Muita näkökohtia

Sähköautojen yleistyminen lisää luonnollisesti tarvetta latauspaikoille. Suurin osa latauksesta tulee todennäköisesti tapahtumaan kotona, koska tällöin ei tarvitse erikseen käydä latauspaikassa ja akuston saa täyteen joka yö. Tavallinen yksivaiheinen liityntä pystyy lataamaan lähes tyhjäksi ajetun sähköauton täyteen yön aikana, joten kolmivaiheinen lataus ei tule olemaan välttämätöntä kaikille käyttäjille. Lisäksi alhaisemmat lataustehot ovat parempia akkujen kestävyyskannalta. Luonnollisesti nopeampi lataus kotona lisää käyttömukavuutta, joten tätäkin tullaan varmasti näkemään. Joka tapauksessa kotilataus johtaa sähkönkäytön lisääntymiseen jakeluverkoissa, mikä voi jakeluverkosta riippuen johtaa investointitarpeisiin. Latauksen älykkäällä ajoituksella investointeja voi olla mahdollista lykätä tai välttää.

Myös työpaikkapaikoitus voi tarjota hyvän mahdollisuuden lataamiseen. Nykyisten lämmitystolppien käyttäminen on mahdollista, mutta kapasiteettirajoitukset ovat siinäkin mahdollisia. Kolmas latausmahdollisuus on pikalatauspisteet, joiden käyttö sopii osalle suunnitelluista akkuteknologioista. Tällöin akuston voi saada noin 80 % täyteen joissain minuuteissa. Pikalatauspisteet voisivat olla erityisen hyödyllisiä pidemmän matkan ajojen mahdollistamana ulosmenoteiden ja valtateiden varsilla. Myös kauppakeskusten parkkipaikat tai liityntäpysäköinti voisivat toimia latauspaikkoina. Joka tapauksessa olisi tarpeellista harkita eri latausmahdollisuuksien välistä suhdetta, jotta vältetään turhaa päällekkäisyyttä.

Täyssähköautojen haasteena on rajallinen toimintaetäisyys. Kuitenkin suurin osa tehdystä matkoista on lyhyitä, jolloin suurin osa ajosta voidaan tehdä täyssähköautolla. Perhekohtaisesti voi olla järkevää pitää sähköisen arkiauton rinnalla ”kakkosautona” tai ”pyhäautona” vanhaa polttomoottoriautoa pidempiä matkoja varten. Kaupungeissa lisääntyvä automäärä voi tuottaa esimerkiksi pysäköintiongelman.

5. Sähköautojen toiminta energiajärjestelmän kannalta

5.1 Autojen sähköenergian tarve

Sähköllä toimivat henkilöautot kuluttavat noin 0,15–0,3 kWh/km. Skaalan alapäässä ovat pääosin hiljaisilla nopeuksilla ajettavat, kevyet ja aerodynaamiset autot. Skaalan toisessa päässä ovat suuremmat henkilöautot, joita ajetaan paljon myös vaativissa olosuhteissa. Jos keskimääräiseksi kulutukseksi oletetaan 0,2 kWh/km, kuluttaisi nopean skenaarion mukainen autokanta vuonna 2020 yhteensä noin 0,6 TWh (0,20 milj. autoa) ja 2030 noin 3,9 TWh (1,23 milj. autoa). Laskua varten oletetaan lisäksi, että 80 % PHEV-auton ajokilometreistä katetaan sähköllä.

5.2 Sähköjärjestelmän toiminta

Sähköjärjestelmässä pitää joka hetki ylläpitää tasapainoa kulutuksen ja tuotannon välillä. Sähkönkulutus vaihtelee sähkönkäyttäjien tarpeiden mukaisesti. Tähän on vastattu lähinnä tuotannon muutoksilla, mutta joitain kulutustyyppisiä on myös mahdollista säätää. Lisäksi tuotantomuotoja, joista energia virtaa ohitse (tuulivoima, altaaton vesivoima ja aurinkokennot), ei yleensä kannata säätää, koska tällöin menetetään lähes ilmaista sähköä. Pohjoismaissa tuntitason kulutus ja tuotanto täsmätään sähkömarkkinoille tehtyjen tarjousten perusteella. Tuntitason sähkömarkkinat koostuvat Nord Pool ASAn ElSpot ja ElBas-sähköpörsseistä sekä kahdenkeskeisistä kaupoista (OTC Over The Counter).

Tunnin sisällä tapahtuvia kulutuksen ja tuotannon poikkeamia korjataan ensisijaisesti automaattisella taajuusohjatulla säädöllä, jota tehdään osassa voimalaitoksista. Ottamalla käyttöön säätösähkömarkkinoille (ENTSO-E Nordic Balancing Market) tehtyjä säätötarjouksia vapautetaan automaattista taajuusreserviä uudelleen käytettäväksi.

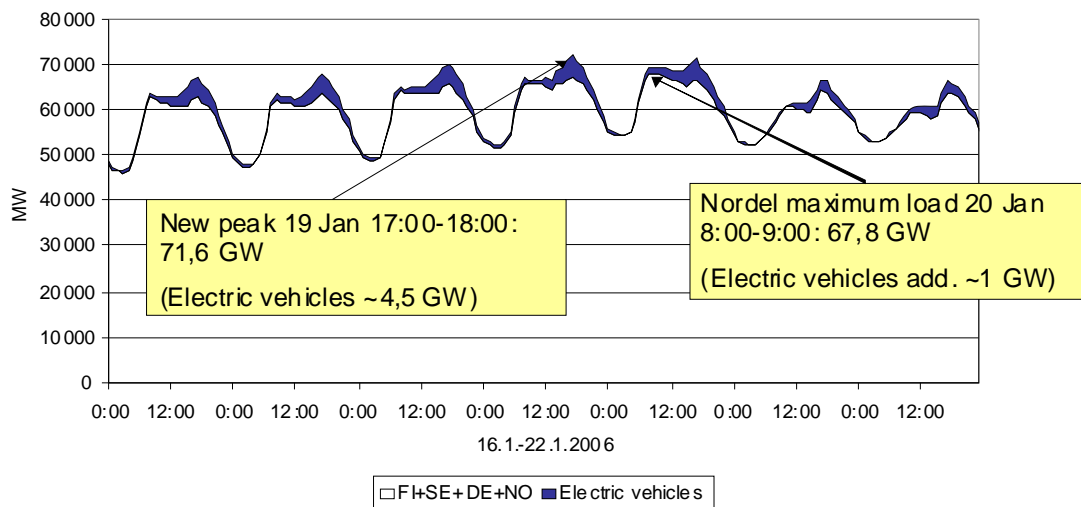
Häiriötilanteita varten on lisäksi erikseen nopeata häiriöreserviä, jota käytetään, mikäli säätösähkömarkkinoilta loppuvat tarjoukset tai niitä ei saada tarpeeksi nopeasti käyttöön.

5. Sähköautojen toiminta energiajärjestelmän kannalta

Sekä tasapainon ylläpidossa että reservien varaamisessa tulee huomioida sähkön siirtoverkon aiheuttamat rajoitukset. Mahdollisesti tarvittava tuotannon tai kulutuksen muutos ei saa ylikuormittaa mitään sähkönsiirtojärjestelmän osaa. Tämän tulee näkyä joko markkinoille asetettuina rajoitteina tai voimalaitosten ajojärjestykseen operatiivisessa vaiheessa tehtyinä muutoksina.

5.3 Sähköautojen vaikutus sähkön kulutukseen

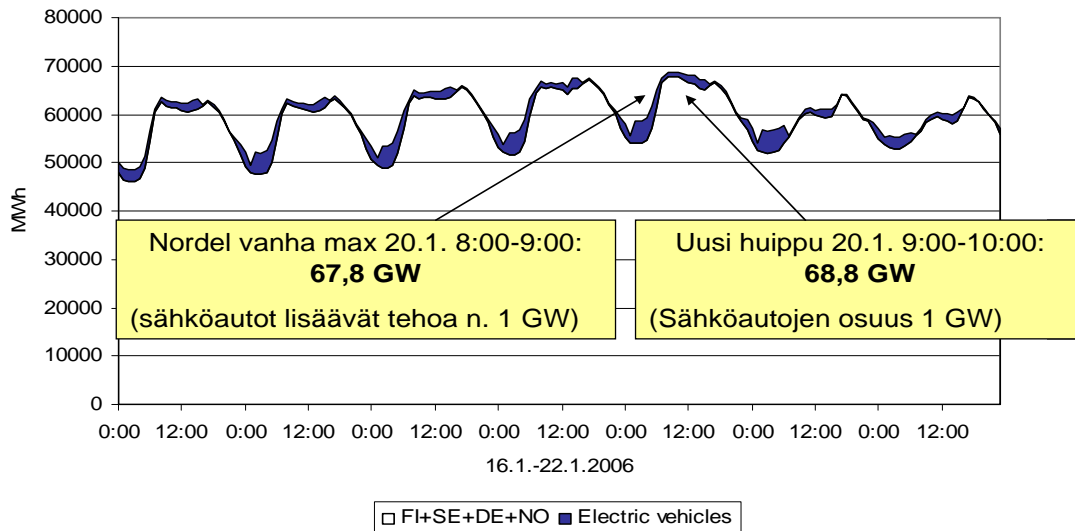
Jos sähköautojen mukanaan tuomaa uutta sähkönkulutusta ei pyritä millään tavalla ajallisesti optimoimaan, lisääntyvät sähköjärjestelmän haasteet. Sähköautojen lataaminen keskittyisi alkuiltaan (kuva 9). Sähköautojen kuormitus kasvattaisi koko järjestelmän huippukuormaa ja siirtäisi huipun ilta-aikaiseksi. Tämä kasvattaisi myös jakeluverkkojen huippukuormia, ja jakeluverkkoja pitäisi todennäköisesti vahvistaa. Uusi kulutuspiikki alkuillalla toisi mukanaan sähköjärjestelmätason tarpeita: tarvittaisiin lisää voimalaitoskapasiteettia ja mahdollisesti myös siirtoverkon vahvistuksia. Sähköautojen aiheuttama kulutus lienee kuitenkin kohtuullisen hyvin ennustettavissa, joten niiden vaikutus reservitarpeeseen jäisi todennäköisesti vähäiseksi.



Kuva 9. Välittömästi lataamisen aloittavien sähköautojen vaikutus huippusähkönkulutukseen Pohjoismaissa. Kuvassa vuoden 2006 huippukulutusviikkoon on lisätty viiden miljoonan sähköauton kuormitus (kuva: VTT).

Jos taas osa sähköautojen kulutusta olisi mahdollista ajoittaa sähköverkon kannalta suotuisampaan ajankohtaan, voisivat sähköautot tuoda kustannussäästöjä sähköverkon operatiiviseen toimintaan. Autojen kulutus voitaisiin ajoittaa vastaamaan tarjolla olevaa tuotantoa lähtötalannetta taloudellisemmalla tavalla. Merkittävin säästö syntyisi siirtä-

mällä lataamista illasta yöhön tai tarkemmin sanottuna niihin ajankohtiin, jolloin edullisempaa sähköä on tarjolla (kuva 10). Lataava sähköauto voisi osallistua myös reserveihin, jos lataus olisi mahdollista keskeyttää tarvittaessa. Lataavia sähköautoja voisi käyttää myös tunninsisäiseen säätöön.



Kuva 10. Älykkäästi (Smart charging) ladattavien sähköautojen vaikutus huippusähkönkulutukseen Pohjoismaissa. Kuvassa vuoden 2006 huippukulutusviikkoon on lisätty viiden miljoonan sähköauton kuormitus (kuva: VTT).

Autonkäyttäjä hyötyy itse älykkäästä latauksesta alhaisempien energia- ja siirtohintojen kautta, mikäli hänellä on käytössään aikapohjainen hinnoittelu.

- Edellä esitetyn älykkään latauksen yö- ja päivätuntien markkinahintaerosta saatava energiahintasäästö¹ on 12,66 €/sähköauto/vuosi.
- Lisäksi sähköstä maksettava arvonlisävero vähenee suhteessa menosäästöihin eli lähes 3 €/sähköauto/vuosi.
- Yleissiirtotariffia käyttävä sähköauton omistaja ei hyödy älykkäästä latauksesta. Jos siirtotariffi muuttuu ajan mukana, kertyy säästöä siirrostakin. Siirron kokonaissäästövaikutukseksi² saadaan keskimäärin 18,65 €/sähköauto/vuosi.

Älykäs lataus säästää siis kaiken kaikkiaan noin 35 euroa eli 10 senttiä päivässä nykyisillä hinnoilla ostettaessa sähkö spot-hintaan perustuvalla tuntitariffilla ja aikapohjaisella

¹ Pohjoismaiden spot-sähkemarkkinoiden vuosien 2006–2009 Suomen aluehinnoilla keskimäärin.

² Tarkasteltu esimerkinomaisesti Helsingin Energian Aika A -siirtotariffia, Savon voiman Yösähkön siirtotariffia ja Vattenfall Verkon Yösähkötariffia sähkö- ja arvonlisäveroineen vuodelle 2011.

5. Sähköautojen toiminta energiajärjestelmän kannalta

siirtotariffilla. Toki on muistettava, että sähköautojen yleistyessä järjestelmävaikutukset kasvavat ja sähköjärjestelmä itsessäänkin muuttuu. Järjestelmähyötyjä selvitetään tarkemmin kohdissa 5.4–5.8.

5.4 Sähköautojen mallintaminen osana sähkömarkkinoita

Sähköautojen aiheuttaman kulutuksen merkityksen arvioiminen edellyttää monta työvaihetta. Ensin tulee ymmärtää autojen ja niiden kuljettajien käyttäytymistä. Liikennetilastoista ja liikennetutkimuksista voidaan saada selville, milloin autot ovat liikkeessä, mistä ne lähtevät ja mihin ne päätyvät sekä miten pitkiä matkoja niillä on kuljettu ennen perille pääsemistä. Koska autoja on paljon, tasoittuvat yksittäisten autojen päivittäisten ajomatkojen vaihtelut, kun tarkastellaan suurta osaa koko autokannasta. Edellä mainittuja tietoja käyttämällä voidaan arvioida, miten paljon verkkoon saapuvat autot ovat kuluttaneet sähköä akuistaan. Näin saatua saapuvan lataustarpeen aikasarjaa voidaan käyttää sähkömarkkinamallin (Wilmar) lähtötietona. Lisäksi tarvitaan aikasarja verkkoon kytkettyjen sähköautojen sähkönkulutus- ja tuotantokapasiteeteista sekä verkkoon kytkettyjen akkujen kapasiteetista. Sähkömarkkinamalli pyrkii puolestaan huolehtimaan, että akut ladataan täysiksi ennen seuraavaa ajomatkaa. Yksittäisten autojen kuormitusten aggregointi aikasarjoiksi aiheuttaa tuloksiin epätarkkuutta, jota lisää historiallisen aineiston käyttäminen. Ajotottumukset ovat vuosien saatossa muuttuneet ja tulevat varmasti muuttumaan jatkossakin.

5.5 Lähtötietoja laskelmille

Olisi tärkeää tietää myös se, kuinka suuri osuus sähköauton käyttäjistä haluaa, että akkujen lataus alkaa aina välittömästi verkkoon liittymisen jälkeen ja kuinka suuri osuus voisi suostua lataamisen siirtämiseen ainakin osassa tilanteista. Tätä on kuitenkin erittäin haastavaa arvioida, ennen kuin sähköautoja on käytössä merkittäviä määriä ja ennen kuin pystytään paremmin arvioimaan, miten suuria säästöjä auton käyttäjälle voisi lataamisen lykkäämisestä syntyä. Tämän vuoksi arvioimme kaksi ääripäätä, joiden väliin todellinen tilanne tulee asettumaan:

- Kaikki autot aloittavat lataamisen heti, tai
- kaikki käyttäjät suostuvat lataamisen siirtämiseen sähköjärjestelmän tilanteen mukaisesti.

Jälkimmäisessäkin tapauksessa akkujen tulee olla täysiä tuntia ennen arvioitua liikkeellelähtöä.

Malliajoissa on käytetty miljoonaa sähköautoa (50 % täyssähköautoja ja 50 % verkohybridejä). Tämän kaltainen tilanne olisi edellä esitettyjen skenaarioiden valossa

mahdollista vuonna 2028 nopean sähköistymisen skenaariossa ja selvästi vuoden 2030 jälkeen hitaan talouskasvun skenaariossa.

Sähkömarkkinamalliin tarvitaan myös lähtötiedot käytettävissä olevista voimalaitoksista, muusta kulutuksesta ja tuotantoaikasarjat voimalaitoksista, joita ei säädetä. Näiden lisäksi voisi olla tarpeellista sisällyttää malliin sähköverkon rajoitteita, mikäli ne ovat merkityksellisiä tehtävän vertailun kannalta. Tässä tarkastelussa näin ei ole tehty. Jakeluverkkotason vahvistustarpeiden kustannukset kohdistuvat jakeluverkkoyhtiöille, ja jakeluverkkoyhtiö jakaa tarpeellisten verkkovahvistusten kustannukset koko asiakaskannalleen, kuten muunkin sähkönkulutuksen aiheuttamat vahvistus- ja rakennustarpeet. Siirtoverkon osalta latausälykkyyttä käyttävien sähköautojen vaikutus olisi todennäköisesti vähäinen, koska kulutushuiput eivät todennäköisesti kasvaisi. Sen sijaan välittömästi latauksen alkavat sähköautot voisivat aiheuttaa uuden kulutushuipun ja siten vaikuttaa myös siirtoverkon mitoitukseen. Tähän liittyvää analyysiä ei ole tässä yhteydessä tehty.

Kun arvioidaan tulevaisuuteen sijoittuvia vaikutuksia, perustuu sähkömarkkinamalliin laitettava voimalaitoskanta aina joihinkin oletuksiin. Nämä oletukset ovat välttämättä epävarmoja, koska tulevaisuuden tuotantokustannuksia tai edes niihin liittyvää epävarmuutta ei voida vielä tietää. Lisäksi varsinaiset voimalaitosten investointipäätökset riippuvat myös muusta toimintaympäristöstä, johon kuuluvat ainakin olemassa olevat voimalaitokset ja niiden omistuspohja, investoijien omat näkemykset, tarve eri tuotteille sähkömarkkinoilla tai reservimarkkinoilla, ympäristö- ja energiaveropolitiikka, energiatuet, mahdollisuus yhdistää lämmön ja sähkön tuotantoa tai muuta teollista tuotantoa sekä sähkönkuluttajien halukkuus maksaa eri sähkötuotteista. Investointipäätöksiin vaikuttaa myös sähkönkulutus, sekä kulutuksen profiili että sen arvioitu suuruus. Kulutusprofiiliin puolestaan vaikuttaa myös sähköautojen aiheuttama kulutus. Myös muut palvelut, joita älykkäät sähköautot tuottaisivat, voivat muuttaa investointipäätöksiä. Jos esimerkiksi nopean häiriöreservin tarve saadaan täytettyä sähköautoilla, laskee kiinnostus investoida kaasuturbiineihin, joille häiriöreservin tarjoaminen on usein yksi tulonlähde.

Näitä tekijöitä on pyritty ottamaan huomioon energiantuotannon suunnittelumallissa (Balmorel), jota käytettiin tuottamaan optimoitu voimalaitoskanta. Suunnittelumalli sisältää myös kaukolämpöverkkojen lämmöntarpeen ja yksinkertaistetun kuvauksen sähköautojen vaikutuksista kulutukseen ja tuotantoon. Malli tuottaa lähtötietojen asettamien reunaehtojen mukaisesti optimoidun järjestelmän, johon myös hyvin toimivien markkinoiden pitäisi periaatteessa johtaa. Vertailun vuoksi käytössä on kolmeen tilanteeseen perustuvat voimalaitoskannat: ei sähköautoja, välittömästi lataamisen aloittavat sähköautot sekä älykkäästi lataavat sähköautot. Suunnittelumalli sisältää tuntitason aikasarjat sekä yksinkertaisen reservivaruksen. Tuulivoiman investointikustannukset on asetettu lähtötiedoissa nykyistä huomattavasti alhaisemmiksi, koska tutkimuksessa on haluttu erityisesti saada esiin sähköautojen tuoman joustavuuden merkitys vaihtuva-

5. Sähköautojen toiminta energijärjestelmän kannalta

tuotantoisen tuulivoiman integroinnille järjestelmään. Lähtöoletukset esitellään tarkemmin artikkelissa Kiviluoma & Meibom (2011).

5.6 Laskentamallin toiminta

Suunnittelumallin tuottama voimalaitoskanta on istutettu tarkempaan sähkömarkkinamalliin (Wilmar), joka sisältää myös kaukolämpöverkkojen lämmön tarpeen sekä tarkemman sähköautomoduulin. Suunnittelumallista poiketen sähkömarkkinamalli ottaa huomioon tuulivoiman ja kulutuksen ennusvirheet ja ennusteiden tarkentumisen, kun lähestytään varsinaista tuotantotuntia. Malli simuloi epävarmuuden alaisuudessa tehtäviä voimalaitosten käynnistämispäätöksiä ja voimalaitosten käyttöä. Tunnin sisäisiä ennusvirheitä malli ei kuitenkaan tarkastele, joten niistä saatavat hyötyjä ei ole analysoitu. Mallin simulointien aikajäniteitä verrataan reaali maailman aikajäniteisiin taulukossa 7.

Reservien osalta malli varaa riittävästi kapasiteettia selvittääkseen n-1-vikatilanteesta. Lisäksi nopeaa taajuusohjattua reserviä varataan 484 MW. Kapasiteettia käytetään vain toteutuvan kulutuksen ja vaihtuvan tuotannon erotuksen mukaisesti, eli häiriötilanteita ei ole simuloitu mukaan. Nopeaa reserviä voivat tuottaa vain käynnissä olevat voimalaitokset sekä älykkäät sähköautot. Sekundäärireservejä saa myös voimalaitoksista, jotka eivät ole käynnissä mutta ovat riittävän nopeita käynnistymään tarvittaessa. Mallissa nopea reservi aiheuttaa lisäkustannuksia, joita voidaan pienentää sähköautoilla. Sen sijaan sekundäärireservejä varten mallilla on koko ajan käytettävissään riittävästi kapasiteettia ilman kustannusvaikutusta, joten siihen sähköautot eivät tuo lisähyötyjä. Varsinaisten reservien lisäksi malli varautuu selviytymään korkeimman kulutuksen ja alhaisimman tuulivoimatuotannon yhdistelmästä, joka voi toteutua 99,9 % todennäköisyydellä. Tähän varattu kapasiteetti pienenee, kun käyttötunti lähenee, koska ennuste paranee. Käyttötunnin kohdalla näin varattua kapasiteettia käytetään korjaamaan toteutuva ennusvirhe.

Taulukko 7. Mallin tekemän simuloinnin ja todellisen sähkömarkkinajärjestelmän vertailu.

Aikajänne	Todellisuus	Wilmar malli
Yli vuorokausi	Futuurit ja termiinit	-
12-36 tuntia ennen	Elspot	Day ahead
Yli tuntia aiemmin	Elbas	Intraday korjaa ennusvirheitä aina käyttötuntiin saakka, tunnin sisäiset ei mukana
Tunnin sisällä	Säätösähkö ja automaattinen taajuussäätö	

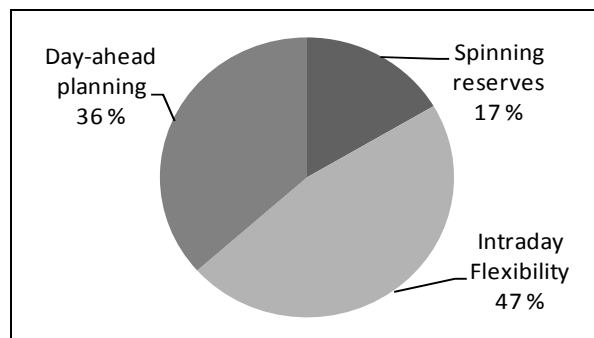
5.7 Tuloksia malliajoista

Älykästä latausta käyttävät sähköautot voivat auttaa järjestelmää ajoittamalla lataamisen paremmin ja osallistumalla sekä edellä mainittuihin sähköjärjestelmän oheispalveluihin että spottikaupan jälkeisten ennusvirheiden korjaamiseen. Mikäli älykkäitä latausalgoritmeja ei käytetä, jäävät hyödyt saavuttamatta ja järjestelmän operointi tulee kalliimmaksi. Vertaamme kahta skenaariota: toisessa on älykästä latausta käyttäviä sähköautoja ('Älykäs') ja toisessa sähköautot alkavat välittömästi ladata eivätkä osallistu oheispalveluiden tuottamiseen ('Tyhmä'). Molemmissa skenaariotyypeissä käytetään suunnittelumallin tuottamaa voimalaitoskantaa, jotka siis eroavat toisistaan. Skenaarioiden välinen kustannusero investoinneille ja kiinteille käyttökustannuksille oli 102 M€/vuosi. 'Älykäs' oli halvempi. Koska sähköautoja on tarkastelussa miljoona, on tämä ero 102 €/sähköauto/vuosi. Tämän päälle arvioimme operatiiviset kustannukset aiemmin esitellyn Wilmar-mallin avulla.

Tuloksista jäävät arvioimatta ainakin verkon vahvistamiseen liittyvät kustannukset ja tunnin sisäisten virheiden korjaamisesta mahdollisesta saatavat hyödyt.

5.7.1 Älykkästä lataamisesta saatava hyöty

Laskettu kokonaiskustannusero 'Älykäs'- ja 'Tyhmä'-skenaarioiden välillä oli 227 €/sähköauto/a. Kokonaishyöty jakautui eri komponentteihin (kuva 11), joita arvioitiin ajamalla mallia myös siten, että sähköautojen osallistuminen näiden palvelujen tarjontaan oli estetty. Kokonaishyöty koostuu osallistumisesta häiriöreserviin, joustavuudesta muuttaa EISpotissa sovittuja lataus- ja purkuaikoja sekä latauksen optimoinnista EISpotmarkkinahintoihin nähden. Nopean reservin suhteen malli arvioi ainoastaan kapasiteetin varaamisen kustannusvaikutuksen, sen käyttöä malli ei sisällä. Optimointi EISpotmarkkinahintoihin nähden tarkoittaa erotusta 'Tyhmä'-skenaariion tilanteelle, jossa latausaikoja ei optimoida ollenkaan.



Kuva 11. Älykkästä lataamisesta saatavien hyötyjen muodostuminen eri lähteistä. Kokonaishyöty oli 227 €/sähköauto/vuosi.

5.7.2 Sähköä akuista verkkoon?

Sähköautojen akkuja on mahdollista myös purkaa sähköverkkoon (Vehicle-to-Grid eli V2G). Tämä voisi olla kannattavaa, kun sähkö on erityisen kallista, tai ominaisuutta voisi käyttää reservitarpeen tyydyttämiseen. Kun esimerkiksi häiriöreserviä halutaan voimalaitoksista, pitää näiden voimalaitosten olla käynnissä mutta ne eivät saa tuottaa täydellä kapasiteetilla. Tämä aiheuttaa kustannuksia. Sähköautoille puolestaan riittää, että ne on kytketty verkkoon ja että ne pystyvät myös purkamaan akkuja tarvittaessa. Häiriöreserviä tai kalliimpia nopean reservin lähteitä tarvitaan verrattain harvoin, joten sähköautojen käyttö kapasiteetin turvaamiseksi voisi olla järkevää. Perusskenaariossa kaikilla sähköautoilla oli purkumahdollisuus. Tätä oletusta muutettiin muutamassa skenaariossa, jotta nähtiin, kuinka suuria hyötyjä tästä V2G-ominaisuudesta voisi olla. Purkuominaisuuden asentaminen sähköautoihin maksaa, joten ei ole itsestään selvää, että se on kannattavaa – ainakaan koko autokannassa. Tulokset tukevat tätä oletusta, sillä suurin osa hyödyistä saavutettiin, kun vain puolet sähköautoista oli varustettu V2G:llä. Kun V2G kiellettiin kaikilta sähköautoilta, 'Älykäs'-skenaariossa tuottama kokonaishyöty laski 227 eurosta 174 euroon eli 53 €/sähköauto/vuosi. Jos V2G kiellettiin puolelta sähköautoista, oli pudotus 6,7 €/sähköauto/vuosi.

Perusskenaariossa V2G:n lisäksi osa (20 %) PHEV-autoista pystyi myös käyttämään moottoria tuottamaan sähköä verkkoon (Engine-to-Grid eli E2G). Kaikilta PHEV-autoilta tämä ei voisi onnistua, koska moottoria ei ole voida käynnistää omia aikojaan esimerkiksi autotallissa. Tosin, jos polttomoottorin sijaan autossa on vedyllä käyvä polttokenno, niin ongelmat pienentyisivät huomattavasti. Kun E2G-ominaisuus estettiin kaikilta autoilta, putosi kokonaishyöty edellisestä vielä 1,2 €/sähköauto/vuosi. E2G ei siis vaikuta kovin hyödylliseltä ominaisuudelta, mutta täytyy kuitenkin huomioida, että voimalaitosinvestointien suunnittelumalli ei nähnyt tämän ominaisuuden mahdollista hyödyllisyyttä. Jos olisi, niin voimalaitoskapasiteetin tarve olisi voinut pienentyä ja E2G:n tuottama hyöty olisi voinut olla selvästi suurempi.

5.8 Sähköautojen lataamisen kustannukset

Skenaariossa, jossa sähköautoja ei tullut vuoteen 2035 mennessä, sähkön tuottamisen keskimääräiset kustannukset olivat 41,8 €/MWh. Arvio sisältää uusien voimalaitosten investointikustannukset (Balmorel), kaikkien voimalaitosten kiinteät käyttökustannukset (Balmorel) ja muuttuvat käyttökustannukset (Wilmar). Siinä on mukana hinta CO₂-päästöille (32,4 €/tCO₂), mutta kustannusarvion suuruus heijastaa ennen kaikkea tehtyjä lähtöoletuksia sekä voimalaitosten että polttoaineiden hinnoista.

Kun 'Tyhmä'-skenaariossa sähköautot otetaan mukaan, sähkön tuottamisen keskimääräiset kustannukset nousevat ja ovat 42,7 €/MWh. Sähkön kulutus lisääntyi samalla

5. Sähköautojen toiminta energiajärjestelmän kannalta

4 TWh ja oli 117 TWh/a. Jos kustannuksen nousu jyvitetäisiin pelkästään sähköautojen käyttämälle sähkölle, tarkoittaisi se 67,1 €/MWh kustannuksia sähköautojen sähkölle.

Sen sijaan 'Älykäs'-skenaariossa keskimääräiset sähkön tuotantokustannukset laskevat ja ovat 40,7 €/MWh. Jyvitys tuottaisi sähköautojen sähkön hinnaksi 9,3 €/MWh.

Todellisuudessa kustannustenjakoperusteena ei ole eri kulutusmuotojen vaikutus keskimääräiseen tuotantokustannukseen vaan sähkön markkinahinta. Operatiivinen malli tuottaa sähkölle myös markkinahinnan, ja sen avulla voidaan arvioida, mitä sähköautojen lataaminen maksaisi sähkön tukkuhintojen perusteella. Mallin tuottama markkinahinta olettaa, että tuottajat tekevät tuotantotarjouksensa voimalaitosten marginaalikustannusten mukaisesti ja että markkinavoimaa ei käytetä.

Älykkäästi lataavien sähköautojen sähkön tukkuhinta olisi ollut 157 €/sähköauto/vuosi, kun taas tyhmästi lataavien autojen sähkön tukkuhinta olisi ollut 217 €/sähköauto/vuosi. Ero markkinahinnoissa on siis huomattavasti pienempi kuin järjestelmäkustannuksissa.

6. Muuttuva liiketoimintaympäristö

Sähköautojen yleistyminen tulee muuttamaan sähköyhtiöiden liiketoimintaa. Sähköautot tuovat mukaan uusia toimijoita ja markkinarakenteita sekä aivan uudenlaisia liiketoimintamahdollisuuksia. Sähköntuottajien ja verkkoyhtiöiden olisi hyvä ennakoita näitä muutoksia ja täsmentää oma asemansa uudessa liiketoimintaympäristössä. Tämän tutkimuksen tulokset osoittavat, että sähköjärjestelmä voi merkittävästi hyötyä sähköautoista, jos näitä käytetään säädettävänä kuormana tai V2G-’tuotantona’. Sähköjärjestelmän hyödyistä esille nousee järjestelmän toimivuuden kannalta merkittävänä tekijänä sähköautokuormituksen säädettävyys. Tulevaisuuden suurten tuulivoimainvestointien myötä tuotannon lisääntyvä stokastisuus ja heikentyvä ennustettavuus vaativat entistä enemmän säätövoiman käyttöä, jonka tarpeeseen voidaan osittain vastata sähköautoilla. Operatiivisten säästöjen lisäksi sähköautoilla voidaan korvata voimalaitoskapasiteettia. Koska kaikki sähköjärjestelmäosapuolet osallistuvat järjestelmän ylläpitokustannuksiin kantaverkkomaksujen kautta, hyötyvät kaikki sähköautojen älykkästä latauksesta.

Paikallinen hajautettu sähkön tuotanto yleistyy tulevina vuosikymmeninä, ja monessa jakeluverkossa jouduttaneen siirtymään passiivisesta aktiiviseen verkon hallintaan. Paikallisella verkkoyhtiöllä voi siten olla omat kuormituksen säätötarpeensa, varsinkin jos lähestytään paikoin jakeluverkkojen kuormitettavuuden maksimia. Jakeluverkon komponenttien vaihtaminen nimellisteholtaan suuremmiksi pelkäästään muutamien tuntien suuria tehoiikkejä varten on turha ja erittäin kallis investointi.

Sähköenergiamarkkinoilla kysynnän jousto alentaa markkinahintaa ja tehostaa ole-massa olevien voimalaitosten käyttöä, kuten mallituloksista ilmenee.

Tavoitteena tulisi olla, että sähköautot saadaan liiketaloudellisin perustein osallistu-maan sähköjärjestelmän hienosäätöihin sen eri portailla. Tämä lisäisi tarvetta erilaisille aggregaattoreille, jotka toimivat loppukäyttäjien ja pienien sähköntuottajien edustajana sähköjärjestelmään nähden ja ohjaavat kuormitusta loppukuluttajan edun mukaisesti. Ohjattavuutta voi tarpeen mukaan myydä verkkoyhtiöille tai sähköenergiamarkkinoille. Tietojärjestelmien ja tiedonvaihdon kehittymisen ja automatisoinnin myötä aggregaatto-rien merkitys voi vähentyä jollain aikavälillä, mutta tämä edellyttää automatiikka- ja

kaupankäyntijärjestelmien kehitystä, mikä puolestaan loisi uusia liiketoimintamahdollisuuksia.

Auton lataukseen liittyy vielä paljon avoimia kysymyksiä, vaikka fyysisen liittymän standardisointityö onkin meneillään. Jo se, käytetäänkö autoissa vuokra-akkuja vai ostettuja, vaikuttaa sekä latausmenetelmiin (esim. akun pikavaihto) että sähköjärjestelmän kannalta tarjolla olevaan säätelyvoimaan. Auton latauksen ohjelmistot (mm. tunnistus, ohjaus, kaupankäyntijärjestelmät, tiedonsiirrot) ja niihin tehtävät ratkaisut vaikuttavat myös pitkälle tulevaisuuteen, joten siltä puolelta on odotettavissa sekä tärkeitä tulevaisuuden muutostekijöitä että myös merkittävää liiketoimintaa. Autovalmistajien ja sähköntuottajien välille on jo nyt muodostunut yhteistyöklikkejä. Näitä ovat muun muassa Toyota–EdF, Better Place – Renault, Fortum–Mitsubishi, Vattenfall–Volvo ja BMW. Sähköautojen yleistyminen tulee muuttamaan sähköyhtiöiden liiketoimintaa. Sähköautot tuovat mukaan uusia toimijoita ja markkinarakenteita sekä aivan uudenlaisia liiketoimintamahdollisuuksia.

7. Johtopäätökset

EU on asettanut tavoitteekseen vähentää liikenteen päästöjä 10 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2020 mennessä. Vuoden 2020 jälkeen päästövähennystavoitteet tulevat kiristymään entisestään, sillä EU tavoittelee 80–95 % päästövähennyksiä vuoteen 2050 mennessä. Päästöjen vähentäminen liikennesektorilla on haastavaa.

Lyhyellä aikavälillä, noin vuoteen 2020 asti, polttomoottoritekniikan parantaminen ja ei-verkosta ladattavien hybridien käyttö riittävät liikenteen päästövähennystavoitteiden saavuttamiseen. Päästövähennystavoitteiden kiristyessä tarvitaan uusia teknologioita. Yhtenä merkittävimmistä keinoista vähentää liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä nähdään verkosta ladattavien sähköautojen käyttö. Tässä selvityksessä on tarkasteltu erilaisia skenaarioita sähköautojen yleistymiselle sekä selvitetty laajamittaisen sähköautojen käyttöönoton vaikutuksia sähköjärjestelmään.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella eri maiden tavoitteet liikenteen sähköistymiselle vaihtelevat rajusti. Useimmissa skenaarioissa oletetaan, että verkosta ladattavat sähköautot tulevat markkinoille 2010-luvun alussa ja yleistyvät jokseenkin hitaasti vuoteen 2020 asti. Yleensä oletetaan, että vuoden 2020 tienoilla verkosta ladattavat sähköautot ovat kustannustehokkaita polttomoottoriautoihin nähden, ja sähköautojen osuus uusista autoista on varsin suuri vuosina 2020–2030. Sähköautojen yleistyminen edellyttää kuitenkin akkujen teknologista kehitymistä ja autojen hintojen alenemista.

Sähköautojen yleistymisen nopeus tulee riippumaan voimakkaasti politiikkatoimista. Useat valtiot tukevat jo nyt liikenteen sähköistymistä verohelpotuksilla tai muilla tavoilla.

Sähköautojen yleistyminen tulee muuttamaan sähköyhtiöiden liiketoimintaa. Sähköautot tuovat mukaan uusia toimijoita ja markkinarakenteita sekä aivan uudenlaisia liiketoimintamahdollisuuksia. Sähköntuottajien ja verkkoyhtiöiden tulisi ennakoida näitä muutoksia ja täsmentää oma asemansa uudessa liiketoimintaympäristössä. Sähköautojen yleistymisen nopeudella, erilaisten lataustapojen käyttöönotolla jne. voi olla erittäin suuria vaikutuksia sähköyhtiöiden nykyiseen liiketoimintaan. Sähköautojen käyttöönoton edistäminen tulisi tehdä teknisesti, taloudellisesti ja ympäristön kannalta järkevästi.

Sähköautojen lataukseen liittyvä standardisointityö on kesken, joten suurten investointien tekeminen tässä vaiheessa on sähköyhtiöille riskipitoista. On kuitenkin tärkeää, että tarvittava infrastruktuuri rakennetaan riittävän ajoissa. Haasteena on suuri epävarmuus sähköautojen lisääntymisen aikataulusta.

Yksittäinen sähköauton käyttäjä ei koe merkittäviä säästöjä älykkästä latauksesta nykyjärjestelmässä ja nykyhinnoin. Mikäli sähköauton sähkö ostetaan spot-hintaan ja siirto maksetaan aikatariffilla, kertyy älykkästä latauksesta omistajalle vuodessa noin 35 €/sähköauto/vuosi verrattuna tyhään lataukseen. Energiahinnoissa saavutettu säästö on hieman yli 10 €/sähköauto/vuosi. Sähköautojen älykkään latauksen sähköjärjestelmälle tuomat hyödyt tulevaisuudessa ovat kuitenkin paljon merkittävämmät.

Sähköautojen käyttämän sähkön markkinahinnassa ei tehdyssä mallinnusesimerkissä syntynyt kovin suurta eroa (60 €/sähköauto/vuosi) älykkään ja tyhmän latauksen välillä toisin kuin järjestelmäkustannuksissa saavutettavassa hyödyssä (227 €/sähköauto/vuosi). Tämä voi olla merkityksellinen asia, jos älykkästä latauksesta saatavia hyötyjä ei saada vietyä eteenpäin myös autonkäyttäjille. Tällöin kannuste käyttää älykästä latausta voi jäädä suhteellisen vähäiseksi.

Jos latausta ei toteuteta älykkästi ja sähköautoja tulee paljon, on seurauksena sähköjärjestelmän huippukuormituksen kasvaminen ja siirtyminen alkuiltaan. Tämä johtaisi tarpeeseen investoida voimalaituskapasiteettiin ja siirtolinjoihin. Sähköautojen laajamittaisen käyttöönoton suurimmat vaikutukset todennäköisesti tulisivat kuitenkin paikallisverkkotasolle, joita ei tässä raportissa ole käsitelty. Tulevaisuuden kysymyksiä tuleekin olemaan, miten sähköautojen sähköjärjestelmähyödyt eri tasoilla ulotetaan yhä enemmän myös yksittäiselle sähköauton käyttäjälle.

Lähdeluettelo

- AKE 2006. Autokannan tulevaisuustutkimus. Tulevaisuuden autokantaan vaikuttavat tekijät ja skenaarioita vuoteen 2030. Pöllänen, M., Kallberg, H., Kalenoja, H. & Mäntynen, J. Ajoneuvohallintokeskus. Tutkimuksia ja selvityksiä. Nro 4/2006.
- AKE 2009. Ajoneuvokanta. Saatavilla: <http://www.ake.fi/AKE/Tilastot/Ajoneuvokanta/>.
- Alpiq 2009. Electrical vehicle market penetration in Switzerland by 2020: We cannot forecast the future but we can prepare for it. Saatavilla: http://www.ecs-five.ch/parkcharge/documents/EV_swissvision_2020.pdf.
- BERR 2008. Investigation into the Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Plug-in Hybrid Vehicles. Department for Business Enterprise & Regulatory Reform and Department for Transport. October 2008. Saatavilla: <http://www.berr.gov.uk/files/file48653.pdf>.
- Deutsche Bank 2008. Electric cars: Plugged in. 9 June 2008. Saatavilla: http://www.inrets.fr/fileadmin/recherche/transversal/pfi/PFI_VE/pdf/deutch_bank_electr ic_cars.pdf.
- Elforsk 2009. Plug in road 2020. Rapport baserad på konsumentundersökning, intervjuer och seminarium. Elforsk rapport 09:40. Saatavilla: <http://www.elforsk.se>.
- Energimyndigheten 2009a. Långsiktsprogno s 2008. ER 2009:14. Saatavilla: <http://www.energimyndigheten.se>.
- Energimyndigheten 2009b. Kunskapsunderlag angående marknaden för elfordon och laddhybrider KAMEL. ER 2009:20. Statens Energimyndighet. Saatavilla: <http://www.energimyndigheten.se/Global/Press/Kamel%20slutlig%20090529.pdf>.
- Evans, R. K. 2008. An Abundance of Lithium. Saatavilla: http://www.che.ncsu.edu/LEET/phevs/lithium-availability/An_Abundance_of_Lithium.pdf.
- Hadley, S. W. & Tsvetkova, A. 2008. Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation. Oak Ridge National Laboratory. January 2008. Saatavilla: http://www.ornl.gov/info/ornlreview/v41_1_08/regional_phev_analysis.pdf.
- IEA 2009a. Technology Roadmap Electric and plug-in hybrid electric vehicles. OECD/IEA, Paris.
- IEA 2009b. World Energy Outlook 2009. International Energy Agency. OECD/IEA 2009.
- King 2007. The King Review of low-carbon cars Part I: the potential for CO₂ reduction. October 2007. HM Treasury. Saatavilla: http://www.hm-treasury.gov.uk/d/pbr_csr07_king840.pdf.
- King 2008. The King Review of low-carbon cars Part II: recommendations for action. March 2008. HM Treasury. Saatavilla: http://www.hm-treasury.gov.uk/d/bud08_king_1080.pdf.

- Kiviluoma, J. & Meibom, P. 2011. Methodology for Modelling Plug-in Electric Vehicles in the Power System and Cost Estimates for a System with either Smart or Dumb Electric Vehicles. Elsevier. Energy. In press. Doi: 10.1016/j.energy.2010.12.053.
- PNNL 2007a. Impact Assessment of Plug-in Hybrid Vehicles on Electric utilities and Regional U.S. Power Grids. Part I: Technical Analysis. Michael Kintner-Meyer, Kevin Schneider, Robert Pratt. Pacific Northwest National Laboratory. Saatavilla: <http://www.ferc.gov/about/com-mem/wellinghoff/5-24-07-technical-analy-wellinghoff.pdf>.
- PNNL 2007b. Impact Assessment of Plug-in Hybrid Vehicles on Electric utilities and Regional U.S. Power Grids. Part II: Economic Assessment. Scott, M. J., Kintner-Meyer, M., Elliot, D. B. & Warwick, W. W. Pacific Northwest National Laboratory. Saatavilla: <http://www.ferc.gov/about/com-mem/wellinghoff/5-24-07-technical-analy-wellinghoff.pdf>.
- Roland Berger 2009. Powertrain 2020 – The Future Drives Electric. Study. Valentine-Urbschat, M. & Bernhart, W. Roland Berger Strategy Consultants 09/2009. Saatavilla: <http://www.rolandberger.com>.
- Shell 2008. Shell Energy Scenarios to 2050. Shell International BV 2008. Saatavilla: http://www-static.shell.com/static/public/downloads/brochures/corporate_pkg/scenarios/shell_energy_scenarios_2050.pdf.
- Stern 2006. Stern Review on the Economics of Climate Change. HM Treasury 2006. Saatavilla: http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm.
- Tahil 2006. The Trouble with Lithium. Implications of Future PHEV Production for Lithium Demand. Meridian International Research. Saatavilla: http://www.meridian-int-res.com/Projects/Lithium_Problem_2.pdf.
- Tahil 2008. The Trouble with Lithium 2. Under the Microscope. Meridian International Research. Saatavilla: http://www.meridian-int-res.com/Projects/Lithium_Microscope.pdf.
- TEM 2009a. Sähköajoneuvot Suomessa. Työryhmämietintö. 6.8.2009. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavilla: http://www.tem.fi/index.phtml?C=91964&product_id=222&s=2826.
- TEM 2009b. Sähköajoneuvot Suomessa – tustaselvitys. Biomeri Oy. 6.8.2009. Työ- ja elinkeinoministeriö. Saatavilla: http://www.tem.fi/files/24099/Sahkoajoneuvot_Suomessa-selvitys.pdf.
- TEM 2009c. Energian kysyntä vuoteen 2030. Arvioita sähkön ja energian kulutuksesta. Työ- ja elinkeinoministeriö, energiaosasto. 10.11.2009. Saatavilla: <http://www.tem.fi/index.phtml?s=3596>.
- Tiehallinto 2007. Liikenne-ennuste 2007–2040. Ilmestynyt lehdessä Tulevaisuuden näkymiä 3/2007. Tietohallinto. ISSN 0789-8886. Saatavilla: http://alk.tiehallinto.fi/tn/tnpdf/tn_307i.pdf.
- Tiehallinto 2009. Tietilasto 2 008. Tilastoja – Statistiska rapporter – Statistics 1/2009. Saatavilla: http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf2/3300022-v-tietilasto_2008.pdf.

- UC Berkeley 2009 a. Electric Vehicles in the United States. A New Model with Forecasts to 2030. Center for Entrepreneurship & Technology. University of California, Berkeley. 24.8.2009. Saatavilla: http://cet.berkeley.edu/dl/CET_Technical%20Brief_EconomicModel2030_f.pdf.
- UC Berkeley 2009 b. Impact of Widespread Electric Vehicle Adoption on the Electrical Utility Business – Threats and Opportunities. Center for Entrepreneurship & Technology. University of California, Berkeley. 31.8.2009. Saatavilla: http://cet.berkeley.edu/dl/Utilities_Final_8-31-09.pdf.
- USGS 2009. Lithium. U.S. Geological Survey, mineral Commodity Summaries, January 2009. Saatavilla: <http://www.usgs.gov/>.

VTT Working Papers

- 141 Juha Forström, Esa Pursiheimo, Veikko Kekkonen & Juha Honkatukia. Ydinvoimahankkeiden periaatepäätökseen liittyvät energia- ja kansantaloudelliset selvitykset. 2010. 82 s. + liitt. 29 s.
- 142 Ulf Lindqvist, Maiju Aikala, Maija Federley, Liisa Hakola, Aino Mensonen, Pertti Moilanen, Anna Viljakainen & Mikko Laukkanen. Hybrid Media in Packaging. Printelligence. 2010. 52 p. + app. 7 p.
- 143 Olavi Lehtoranta. Knowledge flows from incumbent firms to newcomers. The growth performance of innovative SMEs and services start-ups. 2010. 36 p. + app. 2 p.
- 144 Katri Grenman. The future of printed school books. 2010. 42 p.
- 145 Anders Stenberg & Hannele Holttinen. Tuulivoiman tuotantotilastot. Vuosiraportti 2009. 2010. 47 s. + liitt. 5 s.
- 146 Antti Nurmi, Tuula Hakkarainen & Ari Kevarinmäki. Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus. 2010. 39 s. + liitt. 6 s.
- 147 Juhan Viitaniemi, Susanna Aromaa, Simo-Pekka Leino, Sauli Kiviranta & Kaj Helin. Integration of User-Centred Design and Product Development Process within a Virtual Environment. Practical case KVALIVE. 2010. 39 p.
- 148 Matti Pajari. Prestressed hollow core slabs supported on beams. Finnish shear tests on floors in 1990–2006. 2010. 674 p.
- 149 Tommi Ekholm. Achieving cost efficiency with the 30% greenhouse gas emission reduction target of the EU. 2010. 21 p.
- 150 Sampo Soimakallio, Mikko Hongisto, Kati Koponen, Laura Sokka, Kaisa Manninen, Riina Antikainen, Karri Pasanen, Taija Sinkko & Rabbe Thun. EU:n uusiutuvien energialähteiden edistämisdirektiivin kestävyyskriteeristö. Näkemyksiä määrittämisestä ja kestävyuden todentamisesta. 130 s. + liitt. 7 s.
- 151 Ian Baring-Gould, Lars Tallhaug, Göran Ronsten, Robert Horbaty, René Cattin, Timo Laakso, Michael Durstewitz, Antoine Lacroix, Esa Peltola & Tomas Wallenius. Wind energy projects in cold climates. 2010. 62 p.
- 152 Timo Laakso, Ian Baring-Gould, Michael Durstewitz, Robert Horbaty, Antoine Lacroix, Esa Peltola, Göran Ronsten, Lars Tallhaug & Tomas Wallenius. State-of-the-art of wind energy in cold climates. 2010. 69 p.
- 153 Teemu Tommila, Juhani Hirvonen & Antti Pakonen. 2010. Fuzzy ontologies for retrieval of industrial knowledge – a case study. 54 p. + app. 2 p.
- 154 Raili Alanen. Veneiden uudet energijärjestelmät. 2010. 86 s.
- 155 Maija Ruska, Juha Kiviluoma & Göran Koreneff. Sähköautojen laajan käyttöönoton skenaarioita ja vaikutuksia sähköjärjestelmään. 2010. 46 s.
- 157 Tero Sundström, Ari Kevarinmäki, Stefania Fortino & Tomi Toratti. Shear resistance of glulam beams under varying humidity conditions. 2011. 125 p. + app. 12 p.