

Sähköisten kulkuneuvojen integroituminen liikennejärjestelmään

Integration of electric vehicles and transport system

DI Antero Alku

Summary and conclusions

Electricity has been a mode of power for traffic from the end of 1800's, but in private traffic oil based fuels have been dominating. Electricity has become interesting alternative in the end of 1900's because of environmental reasons. Electricity is locally emission free and electricity can be produced using renewable technologies and carbon dioxide neutrally.

If the current fuel consumption of combustion engine cars in Finland is converted to equivalent electricity consumption as if the cars were chargeable electric vehicles, the equivalent electricity consumption of the current car fleet equals to 10 % increase to the current amount of electricity consumption in Finland. Using intelligent charging systems this amount of electric energy can be produced using current power plant capacity, but it will be produced using the adjusting production capacity, hydro and non-combined coal power. The required amount, 9,2 TWh, may also be produced using biomass that grows in Finland. It is also possible to use solar and wind power when using the car batteries capacity to balance the energy production and in long term to balance solar and wind power with combined electricity and heat production.

The pricing and taxing of the electricity is based on household and industry use. Energy used in traffic has a special tax. That is not possible to invoice without smart charging technology if cars are charged at home using the electricity measured with the kWh-meter of the household. To compare the taxing of the household electricity to the taxing of the fuel energy used in traffic the difference is app. 1100 € tax reduction for a consumer per year. The remarkable share of the electricity price in traffic is the cost of the battery. If the traffic energy tax for EVs equals the Euro value of the current fuel tax, electricity is more expensive alternative for the customer than fossil fuel when the battery cost is taken into account. The total economy of the electric energy is then dependent of the investment and service cost of an EV excluding battery.

The energy need for travelled passenger kilometer varies in different modes of transport in a ratio of 1 to 10. The most energy demanding mode of transport is a current car with 1450 kilograms tare mass. It requires 10 times as much energy as rail transport when measured both at a constant speed. In practical city transport the number of stops is dominant factor for the energy consumption. Electric vehicle technology has the benefit to make use of braking energy. This makes the EV slightly better compared to rail transport with equivalent stopping behavior, but a heavy 1450 kilograms EV still requires 6 times the energy per travelled passenger kilometer as used in rail transport. The key factor is the mass of the current car-like EV that for the majority of the EV travel purposes is not necessary. Therefore the key to reduce energy consumption is to switch from heavy cars to lighter vehicles that fit better to mobility needs and that benefit the electric propulsion technologies.

The actual potential of the EV technology for energy usage and requirement of the street and city space is in the new vehicle concepts. To only switch from fuel propulsion to electric propulsion keeping the vehicle equal does not have any impact to the traffic system. It does neither remove the congestion nor any other negative environmental impacts other than local exhaust emissions. Electric propulsion is remarkably more flexible than combustion engine propulsion and therefore it makes possible such vehicle and usage concepts that has not been possible with combustion engines.

The processes of electrifying car traffic and changes in mobility behavior and urban structure are very slow yet. That gives time to adapt to these changes but also slows down the results to be gained. Challenging is also to connect the old and new areas, their traffic solutions and urban structure. There are already remarkable problems in connecting the city and the sub-urban and urban sprawl areas. Public transport is practically not possible to organize in urban sprawl and only minority of the travelers can use car in the city because of the limited street space. So to travel between two different urban structures requires to switch from one mode of transport to another.

Electric vehicles like pedelecs or three wheelers, people movers without a driver or movers like Segway may extend the mobility of a human from what is the mobility of a pedestrian. But the vehicles like these do not fit into the same traffic space as ordinary heavy cars. To save street and traffic space with these solutions that require less space than a person with a car may require to share the traffic space for various purposes. This means that the current sharing to car space and pedestrian and cycling space is not enough.

The technology of fully chargeable EV's is currently in a development phase. The products are expensive and availability is very limited. The car industry of the western countries seem not to be interested in giving up from oil based technology and a remarkable after sales markets bound to it. In some countries state has supported strongly the penetration of EV's. The high prices and thoughts of rapidly ageing products reduce the consumers interest to by EVs and their batteries. Various leasing and renting based solutions may help.

There exist already the technologies to move to EVs but political decisions are required to choose to which direction the traffic system is to be developed and which goals are to be achieved. The climate emission goals in EU for 2050 cannot be fulfilled with just switching from combustion engine to electric motor and keeping the car and it's use as it is today. EVs may be CO₂ neutral only if the electricity production is totally CO₂ neutral. Electrifying the cars as they are today does not reduce the need to reduce the need to travel and to reduce traffic to make the living and housing environment better. To reduce the energy consumption requires light vehicles, replace the use of a car with logistics and high quality public transport in dense urban structure like in cities.

Alkusanat

Ilmastonmuutos on johtanut teollisuusmaissa kuten EU:ssa ja Suomessa tavoitteeseen vähentää liikenteen CO₂-päästöjä. Liikenteen CO₂-päästöt perustuvat fossiilisten polttonesteiden hallitsevaan asemaan liikenteen energialähteenä. Liikenteen sisällä merkittävin päästömäärä syntyy henkilöautojen päästöistä, mikä on johtanut ajatukseen kehittää sähkökäyttöisiä autoja.

Nykyisen henkilöauton muuttaminen sähkökäyttöiseksi ei ole tämän hetken teknisen tietämyksen tasolla mahdollista niin, että auton käyttö olisi täysin yhtenevää polttonestekäyttöisen henkilöauton kanssa. Olennainen ero on sähköauton toimitusväline, joka jää noin 1/3 tai 1/4-osaan polttonestekäyttöisestä autosta. Osin tämä johtuu akkujen hinnasta, osin akkujen teknisistä ominaisuuksista. Yksi merkittävä tekijä on akuston pitkä latausaika verrattuna polttonestetankin täyttämiseen. Erot vaikuttavat auton käytettävyyteen siten, että ne muuttavat auton käyttötottumuksia. Lisäksi sähköautolle on luotava polttonesteiden jakelujärjestelmän tapainen energian täydennyksen standardijärjestelmä, jotta sähköautot ovat käytettävissä toimintasäteensä puitteissa kaikkialla.

Sähköauton kehittämisessä on yleisesti pidetty tavoitteena ratkaista teknisin keinoin erot nykyisen auton käytettävyyteen. Tämä tavoite on ymmärrettävä sen kannalta, että liikkumistottumukset ja yhdyskuntarakenne perustuvat teollisuusmaissa suuresti henkilöauton käyttöön. Nykyisellä teknologialla sähkökäyttöisen auton ominaisuudet vastaavatkin polttomoottorikäyttöistä autoa kaupunkiolosuhteissa. Autolla kerralla tai vuorokaudessa ajettava suorite on huomattavasti pienempi kuin sähköauton toimitusväline, ja auto seisoo käyttämättömänä niin pitkiä aikoja, että akkujen lataaminen alhaisella virralla on mahdollista, jos sähköä on saatavilla.

Kaupunkiolosuhteissa autojen muuttuminen sähkökäyttöisiksi ei siten välttämättä vaikuta liikenteeseen ja liikkumistottumuksiin, jos on mahdollista järjestää autojen lataus. Mutta autojen sähköistäminen nykyisen kaltaisina ei välttämättä riitä autoilun päästötavoitteiden täyttymiseen. On lukuisia muitakin syitä, joiden vuoksi sähkökäyttöistä kulkuneuvoteknologiaa kannattaa tarkastella laajemmin kuin nykyisenkaltaisen auton konseptina, jossa ajoneuvoon ladattava energia on sähköä. Eriytyisenä ongelmana on nykyisenkaltaisten autojen tilantarve niin pysäköinnille kuin katuverkon kapasiteetille.

Tässä työssä on tutkittu niitä mahdollisuuksia, joita sähkö ajoneuvon energiamuotona tarjoaa ajoneuvotekniikan ja liikennejärjestelmän sekä yhdyskuntarakenteen kehittämiseksi. Sitä, minkälaiset kehitysskenaariot ja minkälaisin aikatauluin ovat mahdollisia, selvitetään tämän työn seuraavissa vaiheissa.

Työ on osa TEKESin rahoittamaa sähköisen liikkumisen SIMBe-tutkimusohjelmaa, joka käynnistyi Aalto-yliopiston Teknillisellä korkeakoululla vuoden 2010 alussa. Ohjelmassa on mukana sekä viranomaisia että yrityksiä, joiden toiminta liittyy tai perustuu sähköiseen ajoneuvoteknologiaan. SIMBe-ohjelma on osa TEKESin Kestävä yhdyskunta -ohjelmaa, jonka tavoitteena on synnyttää uutta liiketoimintaa kestävien ja energiatehokkaiden alueiden ja rakennusten suunnittelussa, rakentamisessa, ylläpidossa ja korjauksessa.

Sisältö

1	Johdanto	7
2	Liikenne ja yhdyskuntarakenne	9
2.1	Liikenteen tilantarve	9
2.2	Erilaiset kaupunkirakenteet	13
2.3	Seuturakenne	15
3	Sähkökäyttöiset kulkuneuvot	18
3.1	Raideliikenne	18
3.1.1	Moottorivaunu ja -juna	19
3.1.2	Raitiovaunu	19
3.1.3	Metrojuna	20
3.1.4	Duoraitiovaunu	21
3.1.5	Hybridiraitiovaunu	22
3.1.6	Akkuvaunu	22
3.1.7	Raidetaksi	22
3.2	Bussit	23
3.2.1	Johdinauto	23
3.2.2	Akkubussi	25
3.2.3	Gyrobussi	25
3.2.4	Polttomoottorihybridibussi	25
3.2.5	Polttokennobussi	26
3.3	Henkilöautot	26
3.3.1	Ladattava sähköauto	26
3.3.2	Polttomoottoriauton muunnos	27
3.3.3	Polttomoottorihybridi	27
3.3.4	Sähkökäyttöinen mopoauto	27
3.4	Henkilökohtaiset sähköajoneuvot	28
3.4.1	Sähköpolkupyörä	28
3.4.2	Sähköskootteri	29
3.4.3	Invalidikuljettimet	29
3.4.4	Segway	30
3.5	Tavaraliikenteen sähköajoneuvot	31
4	Sähköisen liikenteen energialähteet	32
4.1	Sähkön tuotannon nykytila	33
4.2	Liikenteen sähköntarve ja tuotantomahdollisuudet	35
4.2.1	Kulkuneuvojen liikkumisen sähköntarve	35

4.2.2	Sähkökulkuneuvojen lämmitys ja ilmastointi	36
4.2.3	Liikenteen sähkön tuotanto	38
4.2.4	Tuulivoima liikenteen energiatuotannossa	42
4.2.5	Aurinkovoima autojen energiatuotannossa	43
4.2.6	Ladattavien kulkuneuvojen akkukannan käyttö aurinko- ja tuulisähkön varastona ...	44
4.3	Liikenteen sähköenergian kustannus	49
4.4	Liikenteen sähkön hinnoittelu	55
5	Sähköinen liikkuminen ja liikenteen tulevaisuudenkuva	60
5.1	Kulkuneuvotekniikan kehitysmahdollisuuksia	60
5.2	Liikkumisen energiantarve	61
5.3	Liikkumisen energian käytön hyötysuhteen parantaminen	66
5.4	Energialoudelliset kulkuvälineet	67
5.5	Tavaran kuljetuksen tarve	73
5.6	Ajoneuvokannan uusiutuminen	74
5.7	Kulkuvälineiden tekniset mahdollisuudet	75
5.8	Uudet kulkuvälineet ja kulkutottumukset	78
5.9	Yhdyskuntarakenteen ja kulkutottumusten kehitys	80
5.10	Liikenteen päästöjen vähentämisen potentiaali	84
5.11	Liikennevälineiden omistus ja hallinta	86
6	Yhteenveto ja johtopäätökset	89
	Yhteenveto työssä käytetyistä tilastoarvoista	91
	Lähdeluettelo	92

1 Johdanto

Sähkökäyttöisten kulkuneuvojen historia alkaa 1800-luvun loppupuolelta sähkömoottorin kehittämisestä. Merkittävässä mitassa sähkökäyttöinen liikkuminen yleistyi, kun keksittiin raiteen yläpuolelle sijoitettu ajojohto. Ajojohto oli turvallisella etäisyydellä ihmisistä niin, että voitiin siirtyä korkeisiin jännitteisiin ja siten liikennevälineille riittävään tehonsiirtoon. Kaupunkijoukkoliikenteessä sähkö on ollut merkittävä energiamuoto 1800-luvun lopulta alkaen.

Sähkökäyttöisiä akuilla varustettuja autoja valmistettiin 1900-luvun alussa. Niiden etu oli helppokäyttöisyys, koska polttomoottorin käynnistäminen kammella oli raskas ja jossain määrin vaarallinenkin tehtävä. Sähkötoimisen käynnistysmoottorin keksiminen lopetti kuitenkin sähköautojen kehittämisen. Sähkökäyttöisiä ajoneuvoja käytettiin ainoastaan erikoistilanteissa, kuten varastoissa, rautatieasemien matkatavarakuljetuksessa tai varhaisaamun maitopullojen jakelussa. Eli kohteissa, joissa pakokaasu tai polttomoottorin melu ei voinut tulla kysymykseen.

Polttomoottorikäyttöisen auton perusrakenne ei ole muuttunut henkilöautojen sarjatuotannon alkamisesta 1900-luvun alussa. Olennainen muutos on ollut poikittain sijoitetun moottorin ja etuväntöruudun yleistymisen 1960-luvun jälkeen, muuten auton peruskonsepti on pysynyt ennallaan. Suurempi on ollut muutos, jonka auto on aiheuttanut ihmisten elintapoihin ja yhdyskuntarakenteeseen.

Auton ja auton käytön reaaliarvon laskun seurauksena auton omistaminen ja käyttö on tullut mahdolliseksi kaikille ruokakunnille. Tämän seurauksena työpaikat ja palvelut ovat voineet hakeutua itselleen edulliseen sijaintiin ilman, että niiden olisi tarvinnut ottaa huomioon julkisia liikennepalveluita. Samalla tavoin perheet ovat voineet valita asuinpaikkansa pääasiassa muilla perusteilla kuin liikenneyhteyksien vuoksi. Tuloksena on ollut kaupunki- ja seuturakenteiden hajautuminen ja henkilöä kohden lasketun liikennesuorituksen kasvu.

Öljypohjaisiin polttoaineisiin perustuvan autoilun reaalikustannus on niin alhainen, ettei autoilun hinnalla ole liikkumistottumuksia merkittävästi ohjaavaa vaikutusta. Alhaisen hinnan vuoksi ei ole ollut myöskään markkinavetoista syytä kehittää vaihtoehtoisia liikkumismuotoja. Sähköllä tankattava auto kuluttaa paremman hyötysuhteen vuoksi vähemmän energiaa kuin polttonesteellä tankattava auto, mutta akkuteknologian kustannusten vuoksi sähkökäyttöinen autoilu on selvästi kalliimpaa kuin polttomoottoriautoilu. Sähköisen autoilun ympäristöystävällisyys ei ole ollut kuluttajien vetoava myyntiargumentti, joka olisi edistänyt sähköauton yleistymistä.

Sähköautoa pidetään yhtenä keinona vähentää liikenteen CO₂-päästöjä. Sähkökäyttöisen auton hyötysuhde suhteessa tankattuun energiaan on polttomoottoriautoa parempi, mutta sähkö on valmistettava jollain primäärienergialla. Autoilun sähköistymisen oleelliseksi kysymykseksi on nousut, miten autojen sähkö tuotetaan. Suomen nykyisellä sähköntuotannon profiililla sähköinen autoilu ei ole CO₂-neutraalia ja on ilmeistä, että tankattavan energian muodon lisäksi on puututtava myös auton energian määrälliseen kulutukseen ympäristötavoitteiden saavuttamiseksi.

Sähköautojen kehittäminen ja yleistyminen edellyttävät julkista panostusta ja ohjausta, koska markkinavoimat eivät johda siirtymään polttomoottorista sähkökäyttöön. Nykyisenkaltaisen henkilöauton energian muuttuminen sähköksi ei todennäköisesti vaikuta liikennejärjestelmään ja yhdyskuntarakenteeseen juuri mitenkään. Sen sijaan sähkökäytön myötä mahdolliset uudenlaiset ajoneuvokonseptit voivat muuttaa liikkumistottumuksia ja yhdyskuntarakennetta.

Tässä työssä selvitetään niitä mahdollisuuksia, joita sähkö ajoneuvon energiamuotona tarjoaa ajoneuvotekniikan ja liikennejärjestelmän sekä yhdyskuntarakenteen kehittämiseksi. Sitä, minkälaiset kehitysskenaariot ja minkälaisin aikatauluin ovat mahdollisia selvitetään tämän työn seuraavissa vaiheissa.

2 Liikenne ja yhdyskuntarakenne

Yhdyskuntarakenne on yleisesti esiintyvä käsite, jonka määritelmä on väljä. Laajasti yhdyskuntarakenteella tarkoitetaan kaikenlaista ihmisen toimintaa varten rakennettua ympäristöä. Tällöin ei rajoiteta alueen laajuuteen tai rakenteen tiheyteen. Esimerkiksi maaseudulla yksittäin sijaitsevat rakennukset ovat yhdyskuntarakennetta yhtä lailla kuin kaupunkikeskuksen korttelit.

Yhdyskuntarakenteesta puhuttaessa käytetään myös termejä kaupunkirakenne ja aluerakenne. Kaupunkirakenteella tarkoitetaan tiheästi rakennettujen alueiden sisäistä yhdyskuntarakennetta. Aluerakenteella tarkoitetaan yhdyskuntarakennetta tarkasteltuna karkealla tasolla, alueina ja alueiden suhteena toisiinsa. Yhdyskuntarakenne-nimitystä saatetaan käyttää tarkoittamaan ainoastaan kaupunkirakennetta.

Maankäyttö- ja rakennuslaki määrittelee Suomessa yhdyskuntarakenteen suunnittelun neljä tasoa: valtakunnalliset alueiden käytön tavoitteet, maakuntakaavat, yleiskaavat ja asemakaavat. Kaikilla tasoilla yhdyskuntarakenne sisältää Anderssonin (1993) määritelmän mukaisesti asutusta, työpaikkoja, palveluita sekä näitä yhdistäviä yhteyksiä. Konkreettiset yhteydet ovat jalankulun ja kulkuneuvojen liikenneyhteyksiä, mutta myös tietoliikenneyhteydet kuuluvat yhdyskuntarakenteeseen.

Liikenteen ja yhdyskuntarakenteen välillä vallitseva vuorovaikutus, jonka Andersson (1993) väitöskirjassaan esitti, on nykyisin yleisesti myönnetty ilmiö. Eräs konkreettisimmista viimeaikaisista tämän vuorovaikutuksen tuloksista on kaupunkien yhdyskuntarakenteen hajautuminen, jonka henkilöautoilu on tehnyt mahdolliseksi.

Liikenteen ja yhdyskuntarakenteen välisen vuorovaikutuksen merkityksen voi havaita historiasta monella tavalla. Antiikista lähtien kaupungit sijaitsivat rannikoilla tai jokien varsilla, jotka tarjosivat liikenneyhteyksiä. Maaliikenteen osuus oli vähäistä, mutta kauppareittien solmu- ja huoltopisteisiin syntyi kaupunkeja ja kyliä. Rautatien keksiminen 1800-luvulla loi saavutettavuutta maaseudulle myös vesiteiden ulottumattomiin sekä kaupunkien ympärille, koska ihmisten päivittäinen elinpiiri kasvoi liikkumisen nopeuden ja kapasiteetin kasvaessa.

Liikenneväylät ovat hallinneet kaupunkisuunnittelua. Monumentaalisen tarkoituksen lisäksi keskeiset kadut ovat muodostaneet kaupungin liikkumisen ytimen. Satamien ja rautatieasemien paikat ovat määrittäneet kaupungin rakennetta. Liikkumisen vaatiman tilan vuoksi kaupunkien asemakaavoja on uudistettu hyvinkin voimakkaasti. Helsingissä Smith-Polvisen liikennesuunnitelmassa (Smith ja Polvinen 1968) kaavailtiin kantakaupunkia halkovia ja osin meren päälle rakennettuja moottoriteitä, korttelirivien purkamista näiden teiden tieltä sekä useiden rakennusten muuttamista pysäköinnin tarpeeseen. Suunnitelma oli osoitus siitä, miten radikaaleja muutoksia Helsingin kantakaupunkiin suunniteltiin, kun liikennejärjestelmä oli muuttumassa joukkoliikennejärjestelmästä henkilöautoilun järjestelmäksi.

2.1 Liikenteen tilantarve

Henkilöautoilu on hallinnut liikennesuunnittelua ja sen kautta yhdyskuntarakenteen suunnittelua 1900-luvun alkuvuosikymmenistä lähtien sitä mukaa, kuin paikallinen aineellinen elintaso on käynnistänyt autoistumiskehityksen. Määrävä yhdyskuntarakenteeseen vaikuttava autoilun ominaisuus on ollut auton vaatima tila. Pysäköityjen autojen tila on täytynyt ottaa huomioon sekä asuntojen

että työpaikkojen ja palveluiden suunnittelussa. Liikkeessä olevien autojen tila on mitoittanut liikenneväylien suunnittelun.

Autojen vaatiman tilan merkitystä kuvaa vertaaminen ihmisten vaatimaan tilaan. Euroopassa asuminen on 30–50 kerrosneliömetriä asukasta kohden, Helsingin luku on 33,6 m² (tilastovuosi 2004). Kerrosala tarkoittaa kaikkea rakennettua lattia-alaa, kuten kerrostaloissa myös porrastiloja, joten asuinhuoneiston pinta-alaa on asukasta kohden vähemmän kuin kerrosalaa. Autotalli tai autopaikka pysäköintilaitoksessa vaatii 25–35 kerrosneliömetriä autoa kohden, pysäköintikentällä maa-alaa tarvitaan 20–25 m². Liikkeessä olevan henkilöauton tilantarve laskettuna ajokaistan leveydestä ja turvallisesta etäisyydestä edeltävään autoon on kaupunkiolosuhteissa nopeudesta riippuen 80–160 m².

Käytännön toteutuneita arvoja saadaan tilastoista. Seuraavassa on tarkasteltu Helsingin maankäytön ja liikenteen tunnuslukuja ennen Sipoon Östersundomin alueen liittämistä Helsingin kaupunkiin. Östersundomin jättäminen tarkastelun ulkopuolelle on tarkoituksenmukaista siksi, että alue on luonteeltaan maaseutua ja se tullaan muuttamaan kaupunkialueeksi. Tarkastelu on tehty tilastovuodelta 2004, joka kuvaa Helsingin kehityksessä vakaata tilaa ajalta ennen satamatoimintojen siirtämistä pois Jätkäsaaresta sekä Sörnäisten ja Kalasataman alueilta ja näiden alueiden rakentamista asuin- ja liikekäyttöön.

Helsingin tilastollisten vuosikirjojen mukaan ennen Östersundomin alueliitosta 1.1.2009 Helsingin Asumiseen käytettyjen alueiden pinta-ala oli 41,3 km², muussa rakentamisessa oli 24,8 km² ja katualueena oli 32,9 km², josta 14,2 km² oli liikenteen, pysäköinnin ja huoltoasemien alaa. Liikenteen toimivuuden kannalta olennaista on suhteuttaa maa-ala liikenteen tilantarpeeseen liittyviin tekijöihin (Taulukko 1). Liikennettä syntyy toisaalta sen perusteella, että ihmiset asuvat ja lähtevät asunnoistaan liikkeelle, toisaalta matkat kohdistuvat aina matkakohteisiin, kuten kauppoihin, työpaikkoihin, asiointipisteisiin ja vapaa-ajan vieton paikkoihin. Asuminen tuottaa kotiperäisiä matkoja ja muu rakentaminen attrahoi matkoja.

Helsingin keskiarvot eivät kuvasta kaupungin rakenteen kykyä selvitä liikenteen kysynnästä. Kantakaupunki ja esikaupunkialueet poikkeavat rakenteeltaan toisistaan. Kantakaupungissa on liikkumiseen tarvittavaa katualueita asukasta kohden yhtä paljon kuin esikaupungeissa, mutta työpaikkaa kohden noin puolet siitä, mitä on esikaupungeissa.

Helsingin kantakaupungin eteläisen suurpiirin työpaikkojen määrä on 124 000 ja asukasmäärä 96 000. Työpaikat ovat siten liikenteen kuormituksen määräävä tekijä. Kantakaupunkiin suuntautuvaa autoliikennettä säännöstellään sisääntuloteiden liikennevaloilla. Valojen läpäisykapasiteetti on asetettu kokemusperäisesti siten, että vältetään liikenteen ruuhkautuminen kantakaupungin katuverkossa. Järjestelyn tarkoitus on pitää kantakaupungin sisäinen liikenne sujuvana, jolloin vähennetään ruuhkassa tapahtuvaa seisovien autojen tyhjäkäyntipäästöjä katukuiluissa. Tyhjäkäyntipäästöt tapahtuvat sisääntuloteilla, joissa niiden ihmisille aiheuttama haitta on vähäisempi (Sane 2010).

Helsingissä käytettävä liikenteen laskentalinja ”niemen raja” ei ole täysin yhtenevä tilastollisen eteläisen suurpiirin kanssa, mutta niemen rajan kulkumuotojakauma antaa käsityksen katualan määrän merkityksestä. Aamuruuhkan aikana kello 6–9 laskentalinjan ylittää noin 32 000 henkilöä keskustaan suuntaan henkilöautoilla, joiden keskimääräinen kuormitus on 1,3 hlö/auto (Haataja ym. 2003). Ottaen huomioon havaittu vuorokausivaihtelu, kantakaupungin 2,46 km²:n katuverkko kyke-

nee käsittelemään 8 200 saapuvaa henkilöautoa tunnissa. Siten Helsingin kantakaupungissa katuverkon kapasiteetti on 3 300 saapuvaa henkilöautoa tunnissa katualan neliökilometriä kohden.

Maa-alan käytön tunnuslukuja Helsingissä					
Maa-alan käyttö [m²]	Liikenne- alue	Torit ja muu katualue	Yhteensä katualue	Asuminen	Muu raken- taminen
Koko Helsinki					
asukasta kohden	25	34	59	74	44
henkilöautoa kohden	73	97	170	214	128
työpaikkaa kohden	38	51	89	112	67
Kantakaupunki (eteläinen suurpiiri)					
asukasta kohden	26	12	38	25	48
työpaikkaa kohden	20	9,2	29	19	37
Esikaupunkialueet					
asukasta kohden	25	38	63	84	44
työpaikkaa kohden	48	72	120	160	83

Taulukko 1. Maa-alan käytön tunnuslukuja Helsingissä ennen Sipoon alueliitosta 1.1.2009. Helsingin tilastolliseen eteläiseen suurpiiriin kuuluvat Vironniemi, Taka-Töölö, Kamppi ja Lauttasaari. Tilastoarvot vuodelta 2004.

Katuala ei ole pelkästään ajoneuvojen käytössä olevaa ajorataa. Helsingissä kadut on luokiteltu leveyden mukaan kolmeen hoitoluokkaan ja ajoradan osuudeksi on laskettu puolet katualueen leveydestä (Hänninen ym. 2005). Henkilöautoliikenteen käytettävissä ei ole kadunvarsipysäköintiin varattu ala eivätkä myöskään joukkoliikenteen kaistat. Näiden osuus on noin 0,2 km². Kun katuverkko on kaksisuuntainen, yhteen suuntaan kulkevan liikenteen käytössä on vain puolet ajoradasta. Yhteen suuntaan on liikenteen käytössä 1,1 km² pinta-alana tai 320 km ajoradan kaistana, jonka leveys on 3,5 metriä.

Liikenteen käytössä olevaa katualaa on kantakaupungissa 20 m² yhtä aamuruuhkan autoliikenteen kohdetta eli työpaikkaa kohden, kun oletetaan, että aamuruuhkassa matkustavien matkan tarkoitus on työmatka. Edellä olevan laskelman perusteella yhtä työpaikkaa kohden on 2,6 metriä ajokais-
taa. Helsingin kokemuksen perusteella tiedetään, ettei tämä katuala riitä siihen, että kaikille työpai-
koille tultaisiin henkilöautoin. Sen sijaan kokemuksesta tiedetään, että kantakaupungin 320 kilo-
metrin pituinen ajokaistaverkosto kykenee vastaanottamaan 8200 henkilöautoa tunnissa. Siten
Helsingin kantakaupungin katuverkon vastaanottokapasiteetti on 26 ha/h/katu-km tai
3 600 ha/h/katu-km².

Kun kokemuksesta tiedetään kantakaupunkiin saapuvien autojen määrä, 24 600 henkilöautoa kol-
men tunnin aikana, kantakaupungissa voi olla yhtä monta työpaikkaa yksin autolla saapuville työn-
tekijöille. Tämän perusteella, jos työajan liukumaksi hyväksytään kolme tuntia, kantakaupungissa

on 100 m² katupinta-alaa yhtä autoilevan työntekijän työpaikkaa kohden. Ajoradan kaistapituutta on 13 metriä.

Helsingistä ei ole tietoa siitä, miten kauan kantakaupunkiin saapuva auto on liikenteessä katuverkolla (Sane 2010). Siksi ei ole tilastotietoa siitä, kuinka monta henkilöautoa katuverkossa on samanaikaisesti liikkeellä, minkä perusteella voisi määritellä, miten paljon yhden henkilöauton käytössä on katualaa tai kaistapituutta. Asiaa voi ainoastaan arvioida siitä lähtökohdasta, että tarkastelualueen laajuus on noin 2,5 x 2,5 kilometriä.

Jos autot jakautuvat tasaisesti tälle ruutukaava-alueelle, suorita katuja ajavien autojen kulkematka on keskimäärin 1,25 km ja poikkeavalle kadulle kääntyvän auton matka keskimäärin 1,9 km. Jos molempia on yhtä paljon, keskimäärin henkilöauto kulkee 1,6 km. Jos asetetaan autojen keskinopeudeksi kantakaupungissa 15 km/h, autot ovat liikenteessä keskimäärin 6,25 minuuttia. Kun alueelle saapuu 8 200 henkilöautoa tunnissa, 6,25 minuutin aikana autoja tulee ja poistuu 854 kappaletta, joka on samanaikaisesti liikenteessä olevien alueelle saapuneiden autojen määrä.

Edellä tehdyin oletuksien autojen kulkemasta matkasta ja keskinopeudesta, kantakaupunkiin saapuvalla henkilöautolla on käytössään 375 metriä ajokaistaa tai 1 300 m² ajoradan pinta-alaa. Mikäli oletukset osuvat oikeaan, Helsingin kantakaupungin rakenteella edellä olevat luvut ovat vaatimus ruuhkautumattomalle henkilöautoliikenteelle.

On syytä ymmärtää, ettei edellä laskettuja lukuja voi yleistää kaikkiin kaupunkeihin eikä edes ruutukaavaa kuvaavaksi. Katuverkon tehtävä on välittää ajoneuvot saapuvilta pääkaduilta pysäköintipaikkoihin. Miten hyvin tämä onnistuu, riippuu katuverkon rakenteesta, pysäköintipaikkojen sijainnista, yksittäisten pysäköintiruutujen saavutettavuudesta sekä alueelta lähtevästä liikenteestä, sen määrästä ja vaikutuksesta saapuvaan liikenteeseen. Korttelikoko vaikuttaa risteysten ja siten risteysviiveiden määrään. Pysäköintilaitokset ja niiden sisäänajojärjestelyt vaikuttavat siihen, miten nopeasti auto voi poistua kadulta ja tehdä siten tilaa muille autoille. Tai tukkia liikennettä, kuten peruutettaessa pysäköintitaskuun, tai lisätä liikennesuoritetta, kuten vapaan pysäköintiruudun etsimisessä tapahtuu.

Kun kantakaupungissa on 124 000 työpaikkaa ja henkilöautoilu voi palvella 24 600 työpaikkaa eli noin 20 % nykyisistä työpaikoista, kantakaupungin maankäytön tehokkuus ja alueen toimivuus perustuvat joukkoliikenteen palveluun.

Jotta yksilöllinen liikenne voisi palvella kantakaupungin työpaikkoja nykyistä paremmin, yhdessä ajoneuvossa tulisi olla enemmän matkustajia tai ajoneuvojen tulisi voida toimia pienemmällä pinta-alalla kuin henkilöauton. Henkilöautojen yleinen kapasiteetti on 5 henkilöä, jolloin teoriassa henkilöautot pystyisivät palvelemaan kantakaupungin kaikki työpaikat, jos jokaisen henkilöauton täyttöaste olisi 100 % ja kaikki olisivat matkalla samaan kohteeseen. Jos hyväksytään henkilöauton pysäköinti siten, että auton matkustajat käyttävät joukkoliikennettä tai kävelevät omiin määränpäihin, liikenne kantakaupungin sisällä ei lisäännä eikä saapuvien henkilöautojen määrää ole alennettava. Tällöin henkilöauton käyttö kuitenkin menettää yksilöllisen liikenteen palvelutason. Käytännössä henkilöauton kapasiteetin käyttöasteen nostaminen ei olekaan realistista.

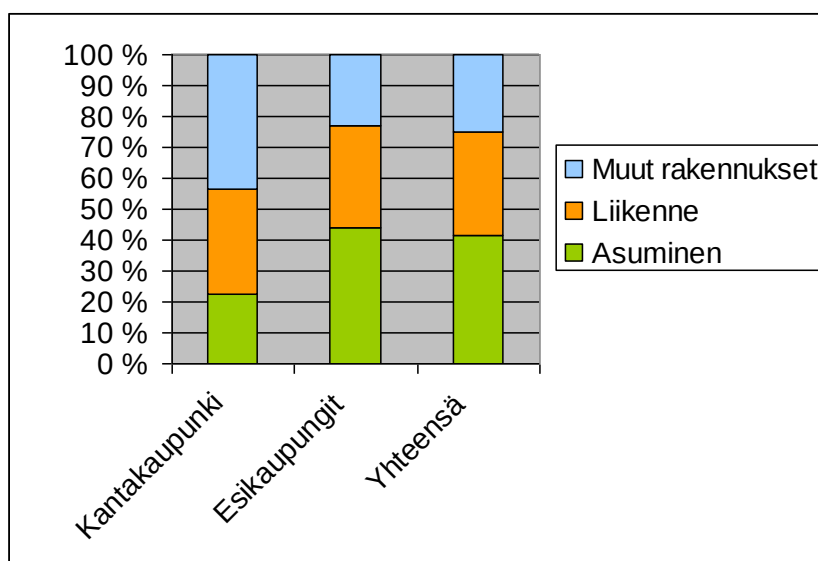
Katuverkon kapasiteetin nosto ajoneuvon pinta-alatarpeen vähentämisellä merkitsee henkilöautoa pienikokoisempia ajoneuvoja, kuten polkupyörät ja muut kaksipyöräiset. Edellytys katualan käytön tehostamiselle on, että ajoneuvo tarvitsee tilaa sivusuunnassa henkilöautoa vähemmän, jolloin ajoneuvoja mahtuu kadulle rinnakkain enemmän kuin autoja. Esimerkiksi polkupyöriä tai skootte-

reita voi olla yhdellä kaistalla kolme rinnan. Kulkusuunnassa tilantarve määräytyy turvallisuuden edellyttämästä etäisyydestä, jota voi lyhentää ainoastaan alentamalla liikennevirran suurinta nopeutta. Ratkaistavaksi ongelmaksi tulee liikennekäyttäytyminen, sillä raskaat ajoneuvot edellyttävät nykyisiä katuverkon mitoituksia, kuten kaistan leveyden, vaikka yksilöllinen henkilöliikenne siirtyisi ajoneuvoihin, jotka eivät tarvitse nykyisen levyisiä kaistoja.

Luonteeltaan erilainen kevyiden ajoneuvojen liikenne edellyttää ehkä katuverkon jäsentämistä eri liikennelajeille tai nykyisestä olennaisesti poikkeavaa liikennekäytäntöä, jotta voidaan sallia rinnan ajo yhdellä kaistalla. Järjestely muistuttaa nykyistä käytäntöä, jossa liikenneverkko on jaettu kevyen liikenteen, moottoriajoneuvoliikenteen ja joukkoliikenteen käyttöön varattuihin verkon osiin.

2.2 Erilaiset kaupunkirakenteet

Vanhimmalla osalla eli kantakaupungissa (tilastollinen Eteläinen suurpiiri) maa-alan käytön suhde poikkeaa koko kaupunkia koskevista luvuista. Asumiseen tarkoitettua maa-alaa on vähän ja muuhun rakentamiseen tarkoitettua paljon. Koko kaupungissa liikenteen käytössä oleva maa-ala on 80 % asumisen käytössä olevasta maa-alasta, mutta kantakaupungissa liikenteen käytössä on 149 % asumisen käytössä olevasta maa-alasta. Sen sijaan verrattaessa liikenteen käytössä olevaa maa-alaa kaikkeen rakentamisen käytössä olevaan maa-alaan, kantakaupunki ja esikaupungit eivät poikkea toisistaan. Liikenteen käytössä on kaikkialla 50–51 % rakennusten käytössä olevasta maa-alan määrästä, mutta kantakaupungissa muun rakentamisen osuus maa-alan käytöstä on yhtä suuri kuin asumiseen tarkoitettun maa-alan osuus esikaupungeissa (Kuva 1).

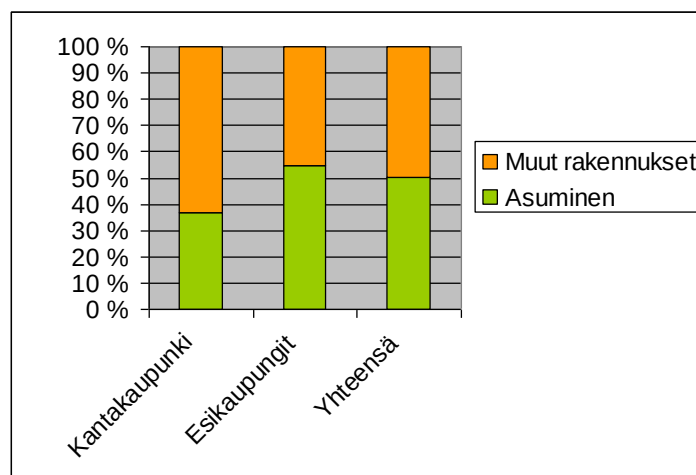


Kuva 1. Rakennetun maa-alan käytön jakautuminen Helsingissä kantakaupungissa ja esikaupungeissa ennen Sipoon alueliitosta 1.1.2009. Tilastoarvot vuodelta 2004.

Helsingissä on rakennettua kerrosalaa yhtä paljon asumiseen ja muuhun käyttöön. Asuinkerrosalaa on 18,8 milj. krs-m² ja muuta kerrosalaa 18,7 milj. krs-m². Asukasta kohden on asuinkerrosalaa 33,6 krs-m² ja muuta kerrosalaa 33,5 krs-m². Henkilöautoa kohden rakennettua kerrosalaa on 194 krs-m², josta siis puolet on asuinkerrosalaa ja puolet muita rakennuksia. Kerrosala jakautuu

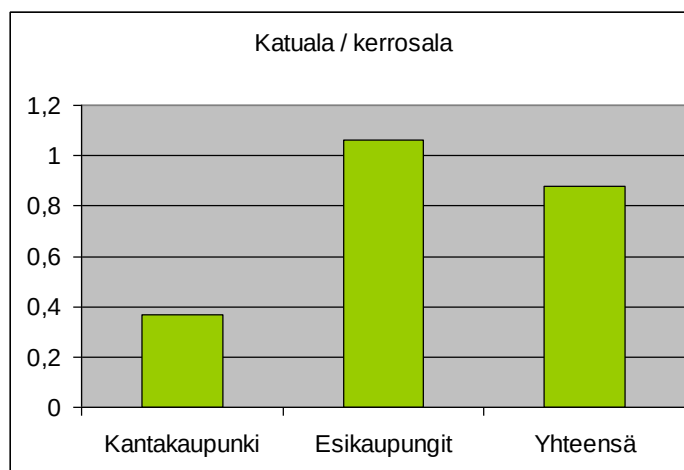
kantakaupungissa eri tavoin kuin koko kaupungissa keskimäärin. Kantakaupungissa vain runsas kolmannes kerrosalasta on asuntoja, kun esikaupungeissa asuinkerrosalaa on yli puolet (Kuva 2).

Helsingissä on 368 000 työpaikka ja työpaikkaomavaraisuus on 134 %. Muuta kuin asuinkerrosalaa on keskimäärin 51 m² työpaikkaa kohden. Tiheysero kantakaupungin ja esikaupunkien välillä on vähäinen, kun kantakaupungissa muuta kerrosalaa työpaikkaa kohden on 49 m².



Kuva 2. Rakennetun kerrosalan käytön jakautuminen Helsingissä kantakaupungissa ja esikaupungeissa ennen Sipoon alueliitosta 1.1.2009. Tilastoarvot vuodelta 2004.

Maankäyttö on kantakaupungissa tehokkaampaa kuin esikaupungeissa. Kantakaupungin korttelitehokkuus on 1,39 kun esikaupunkialueiden korttelitehokkuus on 0,47. Asuin- ja muu rakentaminen on kantakaupungissa suunnilleen yhtä tehokasta, mutta esikaupunkialueella muu rakentaminen on asuinrakentamista tehokkaampaa. Esikaupunkialueiden muun rakentamisen korttelitehokkuus on 0,62. Korttelitehokkuuksien ero johtaa siihen, että katualan ja kerrosalan suhde on kantakaupungissa huomattavasti pienempi kuin esikaupungeissa. Katualan suhde rakennettuun kerrosalaan on koko kaupungissa 0,88, mutta kantakaupungissa katualaa on huomattavasti vähemmän suhdelluvun ollessa 0,37. Esikaupungeissa katualaa on enemmän kuin kerrosalaa suhdelluvulla 1,06 (Kuva 3).



Kuva 3. Katualan ja kerrosalan suhde Helsingissä kantakaupungissa ja esikaupungeissa ennen Sipoon alueliitosta 1.1.2009. Tilastoarvot vuodelta 2004.

Kantakaupunki edustaa sekä tehokasta maankäyttöä että rakennustapaa ajalta ennen autoilun nykyistä valta-asemaa. Kantakaupunkiin suuntautuvista henkilömatkoista noin 55 % vuorokausitallilla ja 60 % aamuruuhkassa klo 6–9 tehdään joukkoliikenteellä (Haataja ym. 2003). Henkilöauton määrä on pysynyt samana 1980-luvulta lähtien. Kantakaupungissa liikenteen käytössä oleva tila siis ei riitä kaikkeen henkilöliikenteeseen henkilöautoiluna, ja kapasiteettiraja on saavutettu jo yli 20 vuotta sitten.

Helsingin positiivinen työpaikkaomavaraisuus merkitsee Helsingin alueen väestömäärän työpäivän aikaista nettolisäystä ja sitä, että liikennejärjestelmää ja katuverkkoa käyttää suurempi väestömäärä kuin Helsingin asukasmäärä.

Tilastotietojen perusteella voi päätellä, että henkilöauton vaatimalla kulkuvälineen katutilalla katutilan määrän tulisi olla selvästi suurempi kuin kerrosalan määrän, jotta liikenne voisi toimia yksilöllisellä kulkuvälineellä. Katutilan määrää ei voi merkittävästi lisätä rakennetussa kaupunkirakenteessa, joten katuverkon henkilökuljetuskapasiteettia voi kasvattaa vain katutilan käyttöä tehostamalla. Katutilan käyttö tehostuu, jos liikenteen ohjauksella voidaan lyhentää aikaa, jonka kulkuväline on katutilassa tai kulkuvälineen henkilöä kohden varaamaa katualueen määrää voidaan vähentää. Tehokkain keino katutilan käytön tehostamiselle on joukkoliikenne. Katutilan tarvetta kasvattaa seudun kasvu, jos yhdyskuntarakenne ja liikkumistottumukset lisäävät kasvun ohessa liikennesuoritetta eli kuljettua matkaa.

2.3 Seuturakenne

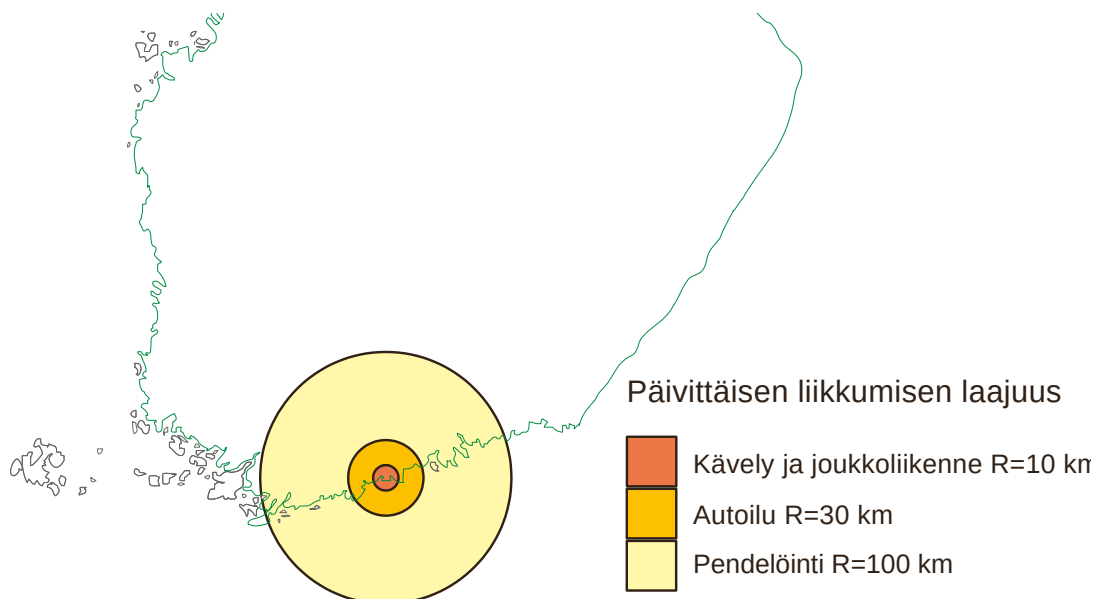
Seudun laajenemisen ja liikenteen suoritteen kasvun yhteys riippuu yhdyskuntarakenteen ominaisuuksista. Yksikeskustaisen kaupunkirakenteen kasvu lisää liikennesuoritetta, koska keskimääräinen matka asuinalueelta keskustaan kasvaa seudun laajentuessa. Monikeskustainen rakenne vähentää liikennesuoritteen kasvun tarvetta, kun palvelut ovat saavutettavissa lyhyemmällä etäisyydellä kuin seudun keskus. Täysin hajautuneessa kaupunkirakenteessa seudun laajeneminen ei kasvata liikennesuoritetta, koska palvelut ja työpaikat ovat kaikkialla seudulla saavutettavissa samalla etäisyydellä.

Liikenne ohjaa seudun laajentumista ihmisen aikabudjetin kautta. Koska ihmiselle ei ole mahdollista kasvattaa rajattomasti matkaan kuluvaan aikaan, liikkumisen teknologia ja käytettävissä oleva aika asettavat rajan päivittäiselle kuljetulle matkalle. Tämä ohjaa yhdyskuntarakenteen kehitystä monikeskustaisuuteen tai hajaantumiseen taikka molempiin. Näin myös näyttää tapahtuneen, kun tarkastellaan kaupunkiseutujen yhdyskuntarakenteiden kehitystä.

Yhdyskuntarakenteen ja liikenteen kannalta olennaista on, että yhdyskuntarakenteen luonne on liikkumistapaan liittyvä mittakaavakysymys, kuten Joutsiniemi (2010) on väitöskirjassaan esittänyt. Helsingin seudusta löytyy seuraavat kolme mittakaavatasoa:

1. Helsingin kantakaupunki on **kävelijän tai joukkoliikenteen**, lähinnä raitiovaunujen käyttäjän kannalta hajautunut ja sekoittunut kaupunkirakenne. Asuntoja, palveluita ja työpaikkoja on kaikkialla helposti saavutettavissa. Vähittäiskaupan rakenteen kehitys on vähentänyt voimakkaasti kantakaupungin kaupan palveluiden määrää viimeisen 40 vuoden aikana, mutta tiheys ei ole ylittänyt kävellen tai joukkoliikennettä käyttäen mahdollista asiointisaavutettavuutta. **Kantakaupunki siis on hajautunut ja sekoittunut kaupunkialue**, jonka sisällä tehdään matkoja kävellen ja joukkoliikenteellä.

2. **Autolla tai autolla liikkumista vastaavalla joukkoliikennematkalla** liikkuvan kannalta kantakaupunki on yksi monikeskustaisen rakenteen keskus. Kantakaupunki on matkan kohde eikä alue, jolla matkoja tehdään. Kohteessa joudutaan matkaa jatkamaan ainakin lii-
tyntäkävelyllä, vaikka kohteella olisi omaakin pysäköintikapasiteettia. Edellä hahmoteltujen
auton tilavaatimusten vuoksi pysäköintijärjestelyt muodostuvat väistämättä laajoiksi siten,
että auton ja kohderakennuksen välille muodostuu minuuttien mittainen kävelymatka. Eri-
tyisesti auton käyttäjän näkökulmasta **Helsingin seutu on** alue, joka on **sekoittunut kau-
punkirakenne**, jossa palveluita (kauppakeskuksia) ja työpaikkoja (teollisuusalueita) on joka
puolella kohtuullisen asiointisaavutettavuuden puitteissa. Automatkoja tehdään tällä alueel-
la.
3. Helsingin seutu kokonaisuudessaan on matkan kohde **pendelöijille**. Heille yhdyskuntara-
kenteen monikeskustaisuus ja sekoittuneisuus ilmenevät kaupunkien tasolla. Yhdyskunta-
rakenne on aluerakenne, jossa on joka puolella ainakin asumismahdollisuuksia kohtuullisen
saavutettavuuden päässä Helsingin seudusta, jossa on tarjolla runsas valikoima työpaikko-
ja. Pendelöijän liikkumismuotoja ovat nopeat junayhteydet ja moottoritiet tai vähän liiken-
nöidyt alemman luokan tiet. Pendelöijälle matkaan sisältyy varsinaisesta kulkutavasta poik-
keava liityntämatka. Auton käyttäjälle se tarkoittaa ajoa hitaassa paikalliskatuverkossa, ju-
nan käyttäjälle kävelyä tai joukkoliikenteen liityntäyhteyttä. **Sekoittuneen yhdyskuntara-
kenteen alue**, jonka sisällä päivittäisiä matkoja tehdään, **on koko etelärannikko** noin tun-
nin matkustusetäisyydellä.



Kuva 4. Sekoittunut kaupunki- tai yhdyskuntarakenne eri liikkumistapojen näkökulmasta suhteessa Helsinkiin. Alueet vastaavat päivittäisen liikkumisen laajuutta. Junalla pendelöiden päivittäisen liikkumisen ja siten koetun sekoittuneen yhdyskuntarakenteen laajuus ulottuu nykyään jo yli 100 kilometrin etäisyyteen.

Edellä esitetyissä kolmessa tapauksessa mittakaavaeron perustana on liikkumisen nopeus. Käytännön elinpiiri muodostuu niistä elementeistä, jotka ovat saavutettavissa käytössä olevin liikkumismuodoin. Saavutettavuuden ulkopuolelle jäävät yhdyskuntarakenteen tarjoamat mahdollisuudet ovat merkityksettömiä. Liikenteen teknisillä ratkaisuilla on siten keskeinen merkitys sille, minkälainen yhdyskuntarakenne on mahdollinen toteuttaa. Suhteessa liikennetekniikkaan kaikki yhdyskun-

tarakenteet voidaan tulkita yhtäläisiksi eli sekoittuneiksi ja hajaantuneiksi rakenteiksi. Keskittyneisyys ja saavutettavuuden heikkeneminen koetaan, kun käytettävä liikennetekniikka ei tee olemassa olevia kohteita saavutettaviksi.

3 Sähkökäyttöiset kulkuneuvot

Kokonaan tai osittain sähkökäyttöisiä kulkuneuvoja on nykyään kaupallisessa käytössä sekä raide- että tieliikenteessä. Eniten sähköistä henkilöliikenteen kapasiteettia on käytössä joukkoliikenteessä, jossa pysyvät reitit mahdollistavat kulkuneuvon jatkuvan sähkön syötön. Kulkuneuvojen maantieteellinen toimintasäde on siten rakennetun sähkönsyöttöjärjestelmän laajuus. Toiminta-ajalla tai ajetun matkan määrällä ei ole rajoitusta kuten akkukäyttöisillä kulkuneuvoilla.

Joukkoliikenteessä osa matkustajista matkustaa seisten. Joukkoliikennekulkuneuvon kapasiteetti lasketaan siten seisomiseen tarkoitetun alan käyttötiheyden perusteella. EU:n alueella hyväksytään kulkuneuvon rekisteröinti seisontatiheydellä 8 hlö/m^2 , mutta hyväksyttävää seisovien matkustajien määrää voi rajoittaa kulkuneuvon suurin sallittu kantavuus. Rekisteröity seisovien matkustajien määrä tarkoittaa viranomaisen hyväksymää turvallisuuskäyttöön perustuvaa seisovien matkustajien määrää.

Käytännössä toteutuva seisovien matkustajien määrä on osa joukkoliikenteen palvelutasoa. Länsi-Euroopassa on käytäntönä laskea seisovien matkustajien määräksi 4 hlö/m^2 , jota on käytetty tässä teoksessa ilmoitettaessa joukkoliikennevälineen kapasiteettia. Liikenteen mitoituksessa voi olla tarkoituksenmukaista käyttää myös alhaisempaa tiheyttä, jotta käytännön tilanteessa on varaa kuormituksen hetkelliselle vaihtelulle. Seisten matkustaminen riippuu myös matkustusajasta. Yli 30 minuutin matkoilla tulisi välttää tarjoamasta matkustamista seisten.

Yksilöllisessä liikenteessä kulkuneuvoissa on vain istumapaikkoja ja on sallittua matkustaa vain istuen sekä käyttäen ajoneuvotyyppin mukaista turvavarustusta, kuten turvavyötä tai kypärää.

Henkilöliikenteessä ei ole määräyksiä tavarankuljetuskapasiteetista. Kun kasvava osa matkoista on vapaa-ajan harrastus- tai asiointimatkoja, tavarankuljetuksen merkitys kasvaa myös. Joukkoliikenteessä tavarankuljetuksen lisäksi lastenvaunujen tai invalidikulkuneuvojen kuljettamiseen on mahdollista käyttää seisovien matkustajien tilaa. Yksilöllisessä liikenteessä kulkuneuvo varustetaan usein erillisellä tavarankuljetuskapasiteetilla. Yksilöllisessä liikenteessä tavarankuljetukseen käytetään usein myös vapaaksi jääviä istumapaikkoja.

3.1 Raideliikenne

Sähkökäyttö yleistyi raideliikenteessä 1800-luvun lopulla. Raiteiden vuoksi sähkön johtaminen sähkökulkuneuvon on helppoa. Alkuaikojen kehitysvaiheen jälkeen koko 1900-luvun raideliikenteen sähkönsyöttöjärjestelmänä hallitsi raiteen yläpuolelle asennettu ilmajohto. Toinen yleinen ratkaisu on pääasiassa maanalaisissa järjestelmissä käytössä oleva virtakisko. 2000-luvun alussa on kehitetty ilmajohdottomia järjestelmiä historiallisia kaupunkiympäristöjä varten.

Sähkökulkuneuvojen virransyöttö ja tehonsäätö perustuivat aluksi tasavirtaan ja sarjavastuksiin sekä moottoreiden ja niiden kenttä- ja ankkurikäänien sarjaan- ja rinnankytkentään. Tämä periaate rajasi ajojohdon jännitteen tasavirtajärjestelmissä alhaiseksi ja rajoitti siten junaliikenteen tehonkäyttöä. Riittävän tehon ratkaisu oli vaihtovirta, jonka jännitettä voitiin veturissa alentaa muuntajalla. Samalla parani sähkökäytön taloudellisuus, kun energiaa ei muutettu vastuksissa lämmöksi. Alhaisen jännitteen (600–1500 V) tasavirtajärjestelmät ovat kuitenkin pysyneet kaupunkiliikenteen ratkaisuna.

Puolijohdetekniikka mullisti sähkökulkuneuvojen tehonsäädön 1960-luvulla. Aluksi sarjavastukset korvattiin tyristorikatkojalla ja 1970-luvulla siirryttiin 3-vaihemoottorikäyttöihin ja nopeuden säätöön taajuusmuuttajalla.

3.1.1 Moottorivaunu ja -juna

Moottorivaunu tarkoittaa omalla moottorilla varustettua matkustajavaununa. Moottorijuna tarkoittaa moottorein varustettua vähintään kahdesta matkustajavaunusta koostuvaa matkustajajunaa. Perusrakenteeltaan sähkömoottorivaunut ja -junat ovat samanlaisia kuin raitiovaunut tai metrojunat. Näiden kaikkien keskinäinen ero on ainoastaan vaunuston perusmitoituksessa.

Rautatieliikenteessä on suuret kaarresäteet jolloin vaunu voi olla pitkä, yleensä 25 metriä. Rautatiekaluston suurin leveys on tavallisesti noin kolme metriä. Istumapaikkoja rautatiekalustossa on noin sata vaunua kohden.



Kuva 5. Pääkaupunkiseudun junakalusto Oy:n moottorivaunujuna "Flirt" eli sarja Sm5 Leppävaaran asemalla huhtikuussa 2010. Juna koostuu neljästä vaunusta ja kokonaispituus on 75,2 metriä.

3.1.2 Raitiovaunu

Raitiovaunu on hevosvetoisista rattaista kehittynyt sähkömoottorivaunu. Raitiovaunu kehitettiin, koska hevonen jaksoi vetää huomattavasti suurempia kuormia kiskojen päällä kuin kadun kivi- tai sorapinnalla. Kun ilmajohto keksittiin 1890-luvulla, hevoset syrjäytyivät nopeasti sähkökäytön yleistyessä. Sähkökäyttöisenä raitiovaunujen kokoa ja nopeutta voitiin kasvattaa. Raitiovaunujen leveyttä rajoittavat tieliikenteen määräykset. Leveydet ovat nykyään 2,3–2,65 metriä. Nykyään Euroopassa noudatetaan saksalaista 75 metrin standardia kadulla kulkevien raitiovaunujen suurimmasta pituudesta. Tällä pituudella yhden yksikön kapasiteetti on 500–750 matkustajaa.

Raitiovaunuilla liikennöitiin aluksi kadulle asennetuilla raiteilla, raitiotiellä. Nykyään raitiotiet pyritään eristämään muusta katuliikenteestä liikenteen ruuhkautumisen haitan välttämiseksi. Raitiotie-

rata sijoitetaan omalle kaistalleen tai erilliselle radalle ja risteyksissä liikennevalot tahdistetaan raitiovaunujen kulun mukaan jotta vältetään sekä raitiovaunujen että autojen tarpeeton pysäyttäminen. Raitiovaunut toimivat raitiotieradan lisäksi rautatie- ja metroradoilla.



Kuva 6. Pariisin raitiolinjan T3 raitiovaunu Alstom Citadis 402 kesäkuussa 2010. Vaunussa on seitsemän osaa ja kokonaispituus on 43,7 metriä.

3.1.3 Metrojuna

Metrojunat on kehitetty matkustajajunaliikenteestä, joka sopeutettiin kaupungin korttelirakenteen olosuhteisiin. USA:ssa 1800-luvun lopulla yleinen tapa oli rakentaa rataa kadun yläpuolelle teräsilloille, joilla junia vetivät höyryveturit. Euroopassa metrot yleistyivät vasta vuoden 1890 jälkeen, kun Lontoossa oli otettu käyttöön ensimmäinen sähköllä toimiva maanalainen junajärjestelmä. Kun sähkökäyttö teki mahdolliseksi täydellisen tunneliin rakentamisen, Euroopassa oli yleistä rakentaa rata katutasen alle. Tunneliin rakentaminen on sittemmin ollut metrojärjestelmien vallitseva käytäntö.

Metrojärjestelmät ovat pääasiassa täysin muusta kaupunkiliikenteestä eristettyjä suljettuja järjestelmiä. Metrojen täydellinen eristys muusta liikenteestä tekee mahdolliseksi automatisoida metrojunat ilman kuljettajia toimiviksi. Ranskalainen Matra kehitti 1980-luvulla automaattisen kumipyörillä toimivan VAL-metrojärjestelmän. Myöhemmin automatisointia on sovellettu täysikokoisiin teräspyörillä toimiviin metroihiin.

Metrojunien käyttöjännite on nykyisin yleisesti 750 V tasavirta, joka saadaan tavallisesti radan sivulla olevasta virtakiskosta. Junat ja asemat ovat 100–130 metriä pitkiä ja tavallinen kaluston leveys on 2,65 metriä. Yhden vaunun pituus on radan kaarresäteestä riippuen 16–22 metriä. Yhden junan kapasiteetti on 800–1200 matkustajaa.



Kuva 7. Berliinin metron (U-Bahn) metrojuna sarjaa HK linjalla U2 syyskuussa 2010. Yksi junayksikkö koostuu neljästä vaunusta, joiden välillä matkustamo jatkuu vaunusta toiseen. Yhden junayksikön pituus on 51,6 metriä ja junia liikennöidään kahden yksikön junina.

3.1.4 Duoraitiovaunu

Duoraitiovaunu tarkoittaa raitiovaunua, joka toimii vähintään kahdella energiajärjestelmällä. Duoraitiovaunut otettiin käyttöön Saksan Karlsruhessa 1992 siten, että samat vaunut liikkuvat kaupungin katuraitiotiellä ja rautatieverkolla. Duoraitiovaunu kykenee käyttämään ainakin kahta ajojohdon jännitettä ja sen pyörästö soveltuu sekä raitiotien että rautatien vaihteiden mitoituskeinoon.



Kuva 8. Duoraitiovaunu rautatielinjalla Pariisin raitiolinjalla T4 kesäkuussa 2010. Siemensin valmistama vaunu Avanto S7 koostuu viidestä osasta ja on pituudeltaan 36,5 metriä.

3.1.5 Hybridiraitiovaunu

Hybridiraitiovaunu tarkoittaa raitiovaunua, joka toimii sekä sähköllä että polttonesteellä. Hybridiraitiovaunussa on aggregaatti, joka syöttää raitiovaunuun sähköä ajojohdon sijasta. Kun aggregaatti on mitoitettu vaunun ratamoottoreiden tehon mukaan, hybridiraitiovaunu toimii sähköistämättömällä radalla samalla suorituskyvyllä kuin sähköistetyllä radalla.



Kuva 9. Hybridiraitiovaunu sähköistämättömällä rautatieradalla Ruotsissa 2007. Alstomin valmistama Regio Citadis -mallinen vaunu on toimitettu Kasselin kaupunkiliikenteeseen. Kuva Alstom.

3.1.6 Akkuvaunu

Akkuvaunu tarkoittaa sähkömoottorivaunua, jonka energiavarastona ovat akut. Akkuvaunuja oli käytössä 1900-luvun alkupuolella, mutta polttomoottorivaunut osoittautuivat taloudellisemmiksi sähköistämättömien rataosien liikenteeseen. 2000-luvun alussa akkuvaunuja on otettu käyttöön raitioliikenteessä, kun historiallisesti arvokkaille paikoille ei ole haluttu rakentaa ajojohtoja. Kun akkuja käytetään vain osalla reittiä ja akut voidaan ladata jälleen ajettaessa ajojohtimin varustetulla osuudella, akkujen massa ja kustannus pysyvät kohtuullisina.

3.1.7 Raidetaksi

Raidetaksilla tarkoitetaan raiteeseen tai vastaavaan kiinteään väylään perustuvaa kutsuohjattua järjestelmää, jolle tyypillistä on kuljetusyksikön pieni koko muutamasta henkilöstä alle 20 henkilöön. Englanninkieliset usein käytetyt nimitykset ovat People Mover tai Personal Rapid Transit (PRT), jälkimmäinen erityisesti silloin, kun yksikön koko vastaa henkilöautoa ja järjestelmän toiminta-ajatus on vaunun tilaaminen matkustajan yksilöllistä reittiä varten. Saksankielinen nimitys on Cabinenbahn.

Järjestelmän toiminta perustuu kuljettajattomaan palveluun, millä järjestelmä kilpailee normaalin taksiliikenteen kustannusten kanssa. Kuljettajattomuus johtaa tarpeeseen täydellisestä eristyksestä muusta liikenneympäristöstä. Yleensä suunnitelmat ja muutamat toteutetut järjestelmät ovat ilma-

ratoja, jolla vältetään radan estevaikutus yhdyskuntarakenteessa sekä maanalaisen rakentamisen korkeat kustannukset. Raiteeseen perustuvana raidetaksin luonteva käyttövoima on sähkö.

Raidetaksin idea on peräisin 1960-luvulta, jolloin vaadittava automaatio kävi teknisesti mahdolliseksi toteuttaa. Laajin järjestelmä lienee 1975 avattu Morgantownin PRT, joka palvelee West Virginian yliopistoa. Ratapituus on 13,2 km., asemia on 5 ja reittejä vain yksi. Verkostomaisia raide-taksijärjestelmiä ei useista suunnitelmista huolimatta ole missään. Syynä lienevät toisaalta haluttomuus ryhtyä rakentamaan ratkaisua, josta ei ole kokemuksia sekä suunnitelmien suuret kustannukset suhteessa hyötyihin ja käyttötarpeeseen.

Tuore ja kohtalaisen pitkälle viety laaja raidetaksisuunnitelma on Uppsalaan 2009 suunniteltu järjestelmä, jossa olisi 125 km. rataa ja 162 asemaa. Uppsalan asukasluku on 145 000 ja ennusteen mukaan se kasvaa määrään 196 000 vuonna 2030 (Gustafsson 2009).

3.2 Bussit

3.2.1 Johdinauto

Johdinauto (trolleybussi) on toistaiseksi ainoa laajaan kaupalliseen käyttöön levinnyt sähkökäyttöinen bussi.

Ensimmäinen johdinautolinja otettiin käyttöön vuonna 1910 Bradfordissa Englannissa. Johdinautot yleistyivät kuitenkin vasta 1930-luvulla. Energiansaanti perustuu linjalle rakennettuun ajojohtoverkkoon, josta johdinauto saa jatkuvasti energiaa eikä ajoneuvoikohtaista ajoenergiavarastoa tarvita.

Johdinautot ovat olleet rakenteeltaan polttomoottoribussien kanssa yhteneviä, erona on vain voimanlähde. Ajojohto sallii huokealla rakenteella huippunopeudeksi n. 50 km/h. Kannatinlangallinen rakenne mahdollistaa luotettavasti n. 80 km/h nopeuden, mutta on hinnaltaan noin kaksinkertainen yksilankaiseen rakenteeseen verrattuna.

1900-luvun lopulla johdinautoissa alkoi yleistyä hybridirakenne, jossa johdinauto varustettiin polttomoottoriaggregaatilla. Johdinautolinjoja voitiin muodostaa siten, että osa linjasta ajettiin aggregaatin varassa, eli kyse ei ollut pelkästään varavoimalähteestä poikkeustilanteita varten. Johdinauton hybridirakenne on sarjahybridi, jossa aggregaatti syöttää johdinauton tehonsäätöä virroitintien sijasta.

1990-luvulla otettiin käyttöön useita järjestelmiä, joissa johdinauto kulki osan tai koko matkan pakko-ohjattuna. Pakko-ohjauksen tavoite on säästää bussin tarvitseman ajokaistan leveyttä. Ensimmäinen mittava pakko-ohjattu järjestelmä oli jo 1980-luvulla Essenissä, jossa pakko-ohjaus perustui ajokaistan reunoille asennettuihin ohjaustasoihin ja akseleiden kohdalla ulkoneviin ohjausrulliin (urabussi). Myöhemmissä sovelluksissa on käytetty kaistan keskellä olevaa kiskoa ja bussin alla olevia urapyöriä. Yleisin virroitustapa on johdinautojen kahden ajolangan ilmajohto, mutta käytössä on myös yhden ajolangan ratkaisu, jossa ohjauskisko on paluujohdin. Tässä järjestelyssä erityinen ongelma on varmistaa ajoneuvon maadoittuminen ja tilanne, jossa virroitin on ajolangassa mutta maadoitusyhteyttä ei ole.

Essenissä pakko-ohjattu johdinauto oli rakenteeltaan dieselbussin kaltainen, ja johdinautot korvattiinkin 1990-luvulla vastaavilla dieselbusseilla. Uusimmissa johdinautoissa on käytetty erillisjousitusta ja pyöräkohtaisia ajomoottoreita sekä useita kääntyviä pyöriä.

Johdinauton arveltiin 1900-luvuan alussa olevan raitioliikenteen korvaava nykyaikaisempi ratkaisu. 1930-luvulla raitiovaunut olivat useissa Euroopan kaupungeissa 2-akselisia ja niiden kapasiteetti oli 30–60 matkustajaa. Sekä raitiovaunut että johdinautot saattoivat käyttää perävaunua, jolla kapasiteetti oli tuplattavissa. Siten johdinautot olivat suunnilleen yhtä suuria kuin raitiovaunut, mutta alkuiinvestointina halvempia sekä kaluston että väylän osalta.

Monet johdinautojärjestelmät jäivät kuitenkin lyhytikäisiksi, yhden tai kahden kalustosukupolven pituisiksi. Dieselmoottorin sekä vaihteistojen, kytkinten ja momentinmuunninten kuin myös öljyn hintakehitys tekivät dieselbussista edullisemman ja helpomman ratkaisun kuin johdinauto. Johdinautot säilyivät merkittävänä välineenä sosialistimaissa, joissa asiaan voi olettaa vaikuttaneen länsimaisen dieselbussiteknikan puutteen. Länsimaissa johdinautot ovat säilyneet kaupungeissa, joissa maasto-olosuhteet ovat polttomoottoribusseille haasteelliset. Viime vuosikymmeninä kiinnostus johdinautoihin on ollut kasvussa ympäristösyistä.

Johdinauton kokoa ja kapasiteettia rajoittavat tieliikenteen määräykset ja olosuhteet polttomoottorikäyttöisten bussien tapaan. Kapasiteettia on kasvatettu sekä kaksikerrosratkaisulla että pidentämällä bussia nivelien avulla. Johdinauto on rakenteellisesti hieman polttomoottoribussia joustavampi, koska ei tarvita tilaa polttomoottorille ja mekaaniselle voimansiirrolle. Nivelrakenteisessa johdinautossa vetovoimaa ja kiihtyvyyttä voidaan lisätä varustamalla bussi useilla vetävillä akseleilla.

Pisimmät niveljohdinautot ovat 25-metrisiä ja niiden kapasiteetti on noin 150 matkustajaa, joista istuvia matkustajia on 50.



Kuva 10. Niveljohdinauto Solingenissa Saksassa heinäkuussa 2003.

3.2.2 Akkubussi

Lyijyakkujen kapasiteetin ja painon suhde on liian alhainen bussin energialähteeksi. Akkubussit ovat tulleet kaupalliselle asteelle vasta 1900-luvun lopulla, kun on saatu käyttöön elektroniikkalaitteiden yhteydessä kehitettyjä akkutekniikoita.

Akkubusseja on ollut mittavassa määrin käytössä Kiinassa ainakin Pekingin olympialaisten aikaan. Tekninen ratkaisu Pekingissä olivat vaihtoakut. Bussien suorituskky vastasi normaalia bussia ja bussit olivat yleisen 2-akselisen kaupunkibussin kokoisia. Akkujen kustannus on akkubussin rasite samalla tavoin kuin sähköhenkilöautojen kohdalla.

Akkubussien tulevaisuus on sidoksissa sähköautoteknologian yleiseen kehitykseen. Kun bussissa investointi on suhteessa tehokkaammassa käytössä kuin henkilöautossa, akkubussien voi olettaa yleistyvän nopeammin kuin akkukäyttöisten henkilöautojen.

Akkubussien kapasiteetti ei pääsääntöisesti poikkea muiden bussien kapasiteetista. Suuri akkujen paino voi rajoittaa hyötykuormaa ja siten käytännössä seisovien matkustajien määrää.

3.2.3 Gyrobussi

Gyrobussissa energiaa tallennetaan bussissa pyörivään vauhtipyörään. Vauhtipyörää kiihdytetään pysäkeillä ja bussia ajetaan sähköbussina, joka saa käyttösähkön vauhtipyörän käyttämästä generaattorista. Ensimmäisiä gyrobusseja oli käytössä 1950-luvulla. 1900-luvun lopulla gyrobussin periaatetta on tutkittu uudelleen kehittyneen sähkötekologian valossa. Gyrobussi ei tarvitse yhtä massiivista energiavarastoa kuin akkubussi ja vauhtipyörän lataaminen voi tapahtua erittäin nopeasti. Johdinautoon verrattuna gyrobussi säästää jatkuvan ajojohtoverkon rakentamisen ja gyrobussi kykenee ongelmatilanteissa poikkeamaan lyhyitä matkoja normaalilta reitiltään.

Gyrobussin kapasiteetti ei poikkea muiden bussien kapasiteetista.

3.2.4 Polttomoottorihybridibussi

2000-luvun alussa lanseerattu hybridibussi tarkoittaa rinnakkaishybridibussia. Se on polttomoottorilla varustettu busi, jossa on apujärjestelmänä pienen kapasiteetin akusto tai superkondensaattorit ja generaattorina toimiva sähkömoottori dieselkäytön voimalinjan yhteydessä. Pääenergia on polttoneste ja sähköjärjestelmällä varastoidaan jarrutusenergiaa, jota käytetään apuna liikkeellelähdössä. Käytännön toteutuksissa polttomoottori käy jatkuvasti, mutta vaadittavaan suorituskyyyn päästään alhaisemmalla teholla ja siten pienemmällä moottorilla.

Rinnakkaishybridibussin edut ja haitat ovat yhtenevät rinnakkaishybridihenkilöautojen kanssa. Bussikäytössä hybridistä on kuitenkin suurempi suhteellinen hyöty kuin henkilöautokäytössä, koska bussit pysähtyvät pysäkkien vuoksi useammin kuin henkilöautot.

Rinnakkaishybridibussi on ensisijaisesti polttomoottoribussi, koska sen pääenergialähde ja voimalinja ovat samat kuin polttomoottoribussissa. Rinnakkaishybridibussin rakenne ei sovellu ladattavaan sähkökäyttöön tai ajojohdinten syöttämään energiaan.

Rinnakkaishybridibussin tekniikka sijoitetaan käytännössä katolle ja moottorigeneraattori vaihteiston yhteyteen. Varustelu ei rajoita bussin kapasiteettia tilan tai painon muodossa.

Sarjahybridissä polttomoottori käyttää generaattoria ja tehonsäätö ja voimalinja ovat sähköiset. Periaate on sama kuin raideliikenteessä yleisellä dieselsähköveturilla. Sähköisen voimansiirron etuja ovat polttomoottorin antaman ja pyörällä vaikuttavan vääntömomentin riippumattomuus sekä mekaanisten rakenteiden yksinkertaistuminen ja akseli- tai pyöräkohtaiset ajomoottorit. Sarjahybridin rakenne vastaa johdinautoa tai akkubussia.



Kuva 11. Kaksinivelinen Hessin valmistama sarjahybridibussi koeliikenteessä Pitäjänmäellä toukokuussa 2010. Bussi on muunnos johdinautosta siten, ettei autossa ole virroittimia mutta takapäähän on sijoitettu aggregaatti ja katolle superkondensaattorit. Ajossa dieselmoottori on käynnissä jatkuvasti.

3.2.5 Polttokennobussi

Polttokennobussi on sähkökäyttöinen bussi, jossa sähkö saadaan polttokennosta. Polttokennoa voidaan pitää keinona varastoida sähköä vedyn muodossa, kun polttokennon polttoaineena käytetään sähköllä valmistettua vetyä. Akkuun verrattuna polttokennon etu on nopea energian lataus ajoneuvoon. Haittana puolestaan ovat vedyn käsittelyyn liittyvät hankaluudet ja riskit. Polttokennobusseja on ollut koekäytössä mm. EU:n CUTE-projektissa. Sen tuloksena todettiin polttokennobussin valmistuksen ympäristökuorma kaksinkertaiseksi ja energiankulutus suuremmaksi dieselbussiin nähden.

3.3 Henkilöautot

3.3.1 Ladattava sähköauto

Ladattava sähköauto on akuilla varustettu auto, jossa on yksinomaan sähköinen voimajärjestelmä. Ladattavan sähköauton rakenne ei ole sidottu polttomoottoriauton perusratkaisuihin. Autossa voi olla pyöräkohtaiset moottorit ja akut voivat sijaita hajautettuna, jolloin niiden massa jakautuu tasaisesti kaikille pyörille. Moottori ja voimansiirto eivät siten hallitse auton rakennetta, vaan matkustamo ja tavaratilat voidaan sijoittaa vapaasti.

Ladattavan sähköauton tekninen rajoitus on akkutekniikan heikko energian, tilavuuden ja massan suhde. Sen vuoksi ladattavan sähköauton toimintasäde nykyisen polttomoottoriauton kaltaisena ei

yllä polttonesteauton toimintasäteeseen, vaan jää noin kolmannekseen eli 150–170 kilometriin. Toinen akkutekniikan ongelma on akkujen latausnopeus, joka parin minuutin sijasta on normaalisti muutama tunti. Nopea lataaminen on mahdollista, mutta se lyhentää akkujen elinikää, mikä akkujen korkean hinnan vuoksi ei ole toivottavaa. Yksi ratkaisu tähän on akkujen vaihtaminen ladattuihin. Tällöin autoissa on oltava standardisoitu akkuratkaisu.

Ladattavassa sähköautossa ei saada lämmitystä hukkalämmöstä kuten polttomoottoriautossa. Lyhyillä matkoilla ladattava auto voidaan lämmittää verkkovirralla. Pitkäkestoisessa käytössä lämmitys joko lyhentää toimintasädetä tai on käytettävä polttoaineella toimivaa lämmityslaitetta. Tällöin ladattava sähköauto on osittain polttoainekäyttöinen.

3.3.2 Polttomoottoriauton muunnos

Polttomoottoriauton muunnos on polttomoottorikäyttöiseksi suunniteltu auto, jonka polttomoottoritekniikka korvataan sähkökäytöllä. Esimerkiksi suomalainen Elcat-pakettiauto on muunnosauto, jossa japanilaisvalmisteisia sarjatuotantoautoja rakennettiin teollisesti sähkökäyttöisiksi. Sähköautot-Nyt -yhteisö tarjoaa kuluttajalle mahdollisuuden yksittäisten autojen muuttamiseen sähkökäyttöisiksi sarjavalmisteisia komponentteja käyttäen.

Muunnoksessa polttomoottoriautosta säilyy tavallisesti kaikki muu paitsi moottori, pakoputkisto ja polttoainesäiliö. Auton ajaminen tapahtuu polttomoottoriauton tavoin. Auton lämmitys toteutetaan polttonestettä käyttävällä erillislämmittimellä.

Akuston massa on samaa luokkaa kuin polttomoottorin massa. Siten muunnossähköauton kapasiteetti on lähes sama kuin polttomoottoriautolla. Massamuutos voi vähentää auton hyötykuormaa, jolloin alenee mukana kuljetettavan tavarain suurin sallittu massa.

3.3.3 Polttomoottorihybridi

Polttomoottorihybridihenkilöauto on polttomoottorikäyttöinen henkilöauto, jossa sekä moottorin käyttämätöntä tehoa että jarrutusenergiaa varastoidaan akkuihin tai superkondensaattoreihin. Sähköä käytetään auton liikkeellelähdössä yksinomaaisena energiana tai polttomoottorin apuna. Polttomoottori voi olla auton seistessä sammutettuna ja se käynnistyy automaattisesti latauksen alentuessa tai sähkövetovoiman käydessä riittämättömäksi.

Polttomoottorihybridin tavoite on parantaa polttoaineen käytön kokonaishyötysuhdetta. Polttomoottoria käytetään hyvän hyötysuhteen toiminta-alueella ja liike-energiaa palautetaan sähköksi. Hybridi pääsee pienemmällä polttomoottorilla samaan suorituskykyyn kuin isompi polttomoottori.

3.3.4 Sähkökäyttöinen mopoauto

Mopoauto on EU:n direktiivin 2002/24/EY (kumoaa direktiivin 92/61/ETY) mukainen luokan L6e nelipyöräinen ajoneuvo. Mopoauton omapaino saa olla 350 kg, mihin ei kuitenkaan lasketa sähkötoimisen mopoauton akkujen massaa. Suurin sallittu nopeus on 45 km/h ja diesel- tai sähkömoottorin teho saa olla enintään 4 kW. Mopoauto on rekisteröity kahdelle henkilölle.

Merkittävin mopoauton ominaisuus on, että mopoautoa saa käyttää Suomessa 15-vuotta täyttänyt M-luokan ajokortin eli ”mopokortin” suorittanut henkilö. Diesel- tai sähkökäyttöisellä mopoautolla ei myöskään ole auto- eikä käyttövoimaveroa.

Suomessa myydään käytännössä dieselmoottorilla varustettuja mopoautoja. Niiden EU-normin mukainen polttoaineen kulutus on 3–4 litraa sadalle kilometrille. Pienten valmistusmäärien vuoksi mopoautot ovat suhteessa kalliita normaaleihin autoihin nähden uusien mopoautojen maksaessa 10.000–15.000 euroa.

Suomessa on myyty sähkökäyttöisiä mopoautoja noin 14.000 euron hinnalla. Ranskalaisen Ligier-yhtymän valmistamassa Microcar-merkkisessä sähkötoimisessa mopoautossa omamassa akkuihin on 540 kg. Akkujen kapasiteetti on 9,2 kWh ja toimintasäde on 110 km. jolloin energian kulutus on noin 0,1 kWh/km. Laitteessa on dieselöljyllä toimiva lämmityslaite (Geitel 2009).

Mopoautojen sähköistymiseen ei voi vaikuttaa veropolitiikalla, koska mopoautot ovat jo nyt erityisveroista vapaita.



Kuva 12. Sähkökäyttöinen mopoauto Elo kuvattuna kesällä 2010 Helsingissä. Rekisterikilven paikalla on mopon vakuutuskilpi.

3.4 Henkilökohtaiset sähköajoneuvot

3.4.1 Sähköpolkupyörä

Sähkömoottorilla varustettu polkupyörä voi olla joko sähkökäyttöinen mopo tai sähköavusteinen polkupyörä (englanniksi Pedelec). Näillä on se olennainen ero, että sähköavusteinen polkupyörä ei ole moottoriajoneuvo vaan Ajoneuvolain 19 §:n mukaan polkupyörä, joka ei tarvitse liikennevakuutusta eikä sen käyttäjältä edellytetä ajoneuvojen käyttö lupaa. Sähköavusteisessa polkupyörässä saa olla enintään 250 Watin tehoinen sähkömoottori, joka toimii apumoottorina ja kytkeytyy pois päältä viimeistään nopeudessa 25 km/h.

Sähköpolkupyörä on siis apumootorilla varustettu polkupyörä, joka kulkee ensisijaisesti lihasvoimalla. Sähkökäyttö on apukäyttö, joka keventää polkemista esimerkiksi ylämäissä. Alamäkeä ja jarrutusta voidaan käyttää akkujen lataamiseen. Sähköpolkupyörällä ei ole rajattua toimintasädettä, koska pyörä kulkee aina lihasvoimalla. Pelkällä sähkökäytöllä ajettaessa toimintasäde on 50–70 kilometriä 0,2–0,35 kWh akkukapasiteetilla. Jos pyörässä on jarrutuksen hyväksikäyttö, akkukäytön toimintasäde kasvaa valmistajan ilmoituksen mukaan 180 kilometriin. Akun latausaika on 4–6 tuntia.

Markkinoilla on kahdenlaisia apumootoriratkaisuja. Apumootori akkuineen voi olla sijoitettu poljinakselin yhteyteen tai erillinen apumootori on sijoitettu etu- tai takapyörän napaan. Akku on sijoitettuna esimerkiksi tavaratelineeseen. Apumootorin teho on käyttäjän säädettävissä. Toimintakuntoinen sähköpolkupyörä litiumioniakulla painaa alle 30 kg. Lyijyakullinen pyörä painaa noin 40 kg.

Sähköpolkupyörät ovat yleistyneet viime aikoina niin, että Japanissa vuosimyynti on 300 000 pyörää (TM 2009). Euroopassa sähköpyörien myynti oli 500 000 kappaletta vuonna 2008 (Electricbikkee 2009). Kiinassa sähköpyöriä on käytössä 20–120 miljoonaa kappaletta kaupan vilkastuttua vuonna 2006 (Goodman 2009, CO₂-raportti 2010). Kiinassa sähköpyörillä ei ole Suomen tapaista nopeusrajoitusta. Suomessa sähköpolkupyöriä on ympärivuotisessa käytössä postinjakelussa. Suomalaisia sähköpolkupyörien tuotemerkkejä ovat Helkama ja Tunturi. Suomessa sähköpolkupyörien hinnat ovat 1000–2000 €.

3.4.2 Sähköskootteri

Sähköskootteri on sähkötoiminen skootteri, joka vastaa polttomoottorikäyttöistä skootteria. Moottoritehot ovat 500–800 W, huippunopeus noin 50 km/h ja toimintasäde 50 km luokassa. Skootterit painavat noin 100 kg.

Sähköskoottereita valmistetaan laajassa mitassa Kiinassa ja Intiassa. Entinen englantilainen moottoripyörämerkki BSA avasi Intiassa vuonna 2009 sähköskootteritehtaan, jonka tuotanto on aluksi 150 pyörää päivässä ja tehdas voi kaksinkertaistaa tuotantonsa. Japanilainen Yamaha aloitti syksyllä 2009 Aasian markkinoille suunnatun sähköskootterin valmistuksen. Euroopan markkinoille tulon esteenä Yamahalle on puuttuva sähköjakeluinfra (Electricbikkee 2010).

3.4.3 Invalidikuljettimet

Rajoittuneen liikuntakyvyn henkilöille on tarjolla akkukäyttöisiä 3- ja 4-pyöräisiä kulkuneuvoja. Nämä kulkuneuvot on tarkoitettu yleensä sekä ulko- että sisäkäyttöön, jotta ne palvelevat myös täysin liikuntaesteistä henkilöä. Käyttötarkoituksensa vuoksi kuljettimen koko on minimoitu mahdollisimman lähelle istuimen kokoa. Tavoitteena on, että kuljettimia on mahdollista käyttää kaikissa julkisissa yleisötiloissa myös rakennusten sisällä.

Kuljettimet voidaan varustaa käyttäjän motoristen kykyjen mukaisin hallintalaittein esimerkiksi niin, että kuljetinta voi käyttää, vaikka sekä jalkojen että käsien ja sormien käyttö ei ole mahdollista. Kuljettimeen liittyy jonkinlainen tavarankuljetusmahdollisuus, jotta kuljetinta voi käyttää asiointiin.

Kuljettimia valmistetaan eriasteisiin liikuntarajoitteisiin tarkoitettuina. Esimerkiksi iäkkäät ihmiset voivat hankkia kuljettimen vain sen vuoksi, että pitkien kävelymatkojen tekeminen on liian rasittavaa. Tällöin kuljetin on periaatteessa terveen ihmisen käytössä oleva henkilökohtainen kulkuneuvo.

Ajoneuvolain 2 §:n mukaan invalidikuljetin ei ole lain tarkoittama ajoneuvo, kun moottorin teho on enintään 1 kW ja suurin nopeus 15 km/h.

3.4.4 Segway

Segway on kaksipyöräinen ja yksiakselinen seisten ajettava henkilökohtainen kulkuneuvo. Laitteen toiminta perustuu hyrrääntureihin ja pyöräkohtaisiin moottoreihin, joiden avulla laite pitää itsensä ja käyttäjän tasapainossa. Ensimmäiset Segway-mallit tulivat markkinoille 2001.

Segwayn huippunopeus on 20 km/h ja valmistajan ilmoittama toimintasäde 26–39 km (16–24 mailia) katuliikenteessä. Maastoversion ilmoitettu toimintasäde on 19 km. Segwayn litiumioniakkujen kapasiteetti on 1,04 kWh ja latausaika 8–10 tuntia. Valmistajan ilmoittama keskilukulutus on 0,033 kWh/km (0,052 kWh/maili) laskettuna lataukseen käytetystä energiasta (Heinzmann & Taylor 2009). Akkujen alhaisimmaksi toimintalämpötilaksi valmistaja ilmoittaa -10°C. Segway painaa noin 50 kg.

Segway ei sovi Suomen lainsäädännön ajoneuvomääritelmään. Suorituskyky vastaa mopoa, mutta laitteen varustelu ei täytä ajoneuvolain vaatimuksia. Siten Segwayta ei voi Suomessa rekisteröidä eikä sille saa liikennevakuutusta, mikä johtaa siihen, että sen käyttö yleisillä teillä ei ole sallittua. Segwayt ovat kuitenkin käytössä EU:n alueella, vaikka laitteella ei ole EU-tyyppihyväksyntää. Saksassa postinkantajat käyttävät Segwaytä, Tukholmassa Segwaytä vuokrataan turisteille (Peutere 2005). Englannissa käynnistyi tammikuussa 2010 lakiuudistus, jonka tavoitteena on ottaa Segwayn tapaiset kulkuneuvot lainsäädännön piiriin (DfT 2010).



Kuva 13. Segway-kulkijoita Tallinnassa toukokuussa 2008.

3.5 Tavaraliikenteen sähköajoneuvot

Tavaraliikenne perustuu Euroopassa dieselkäyttöisiin kuorma- ja pakettiautoihin. Sähköä käytetään rautateillä. Kaupunkien jakeluliikenteessä on ollut satunnaisesti käytössä sähkökäyttöisiä ajoneuvoja. Esimerkiksi Englannissa on käytetty sähköajoneuvoja aamulla tapahtuvaan maidon jakeluun meluhaitan vähentämiseksi. Suomessa on ollut käytössä kotimaisia Elcat-sähköpakettiautoja.

Raitioiteita ja johdinautoverkkoja on käytetty 1900-luvun puoliväliin asti jonkin verran tavarankuljetukseen. Sota-aikana ja sodan jälkeen syynä tähän on ollut polttomoottoriajoneuvojen ja polttoaineen puute. Nykyisin sovellukset ovat harvinaisia.

Dresdenissä on käytössä tammikuusta 2001 lähtien rahtiliikenteen viisivaunuinen raitiotiejuna, joka liikennöi Friedrichstadtin logistiikkakeskuksen ja Volkswagenin autotehtaan välillä tunnin vuorovälillä läpi Dresdenin keskustan. Junan pituus on 59,4 metriä, kantavuus on 60 tonnia ja lattia-ala on 214 m².

Zürichissä on ollut vuodesta 2003 käytössä raitiovaunu kierrätysjätteen keräämiseen. Kaksi vanhaa raitiovaunun alustaa on muutettu rahdin kuljetukseen ja ne kiertävät kuukausittaisella aikataululla määrätty keräyspisteet. Keräyspisteinä on sivu- ja vararaiteita, joilla vaunut voivat seistä muuta raitioliikennettä häiritsemättä. Järjestelyä varten on rakennettu yksi raide vaunun purkupaikaksi paikalliselle kierrätyskeskukselle.

Amsterdamissa pilotoitiin vuonna 2007 kaupungin jakelujärjestelmää, jossa rahtiraitiovaunut jakoivat kuljetuksia paikallisiin jakelupisteisiin, joista lähtevät sähkökäyttöiset jakeluautot suorittivat lähijakelun. Pilotoinnin perusteella hanke käynnistettiin ja sen oli määrä valmistua 2012. Rahoitusvaikeuksien vuoksi hanke on pysähtynyt vuonna 2009. Tavoitteena on vähentää jakeluliikenteen päästöjä, poistaa keskustasta jakeluliikenteen kuorma-autot ja niiden muodostamat ruuhkat, tehostaa jakelua sekä laajentaa jakelun toiminta-aika kuorma-autoille asetetuista rajoista.

Wienissä kokeiltiin vuonna 2005 mahdollisuutta rahtiliikenteeseen raitiotieverkolla muun muassa teollisuuslaitosten välisiin kuljetuksiin. Rahtiliikenne olisi toiminut yöllä, jolloin vaunujen seisominen ei olisi haitannut henkilöliikennettä.

Sähkö on yleisesti käytössä tavaraliikenteen palvelussa terminaaleissa ja sisätiloissa, joissa myrkylliset pakokaasut ovat ongelma. Sähkö on tavallinen trukkien energiamuoto. Akkukäyttöiset rautatieasemien laituriajoneuvot olivat yleisiä 1900-luvun jälkipuoliskolla ja akkukäyttöisiä kulkuneuvoja on käytössä suurten lentoasemien sisätilojen liikenteessä. Kaikissa edellä kuvatuissa käyttökohteissa sähkökäytön kanssa kilpailee kaasukäyttöinen polttomoottori.

4 Sähköisen liikenteen energialähteet

Sähkö ei ole primäärienergiaa eli sitä ei esiinny luonnossa ihmisen käytettävissä olevassa muodossa. Sähkö on siten tuotettava muuttamalla primäärienergiaa sähköksi, jolloin sähkö on keino siirtää energiaa. Primäärienergian muuttaminen sähköksi on hyödyllistä myös sen vuoksi, että sähkö on monipuolisella tavalla hyödynnettävissä oleva energian muoto.

Vanhimmat menetelmät tuottaa sähköä ovat vesivoima ja polttoainekäyttöiset voimalaitokset. Näiden rinnalla merkittävä osa sähköstä tuotetaan nykyään ydinvoimalla (Kuva 14). Ydinvoimalaitokset ja pääosa polttoainekäyttöisistä voimalaitoksista ovat turbiiniin perustuvia höyryvoimalaitoksia. Höyryvoimalaitosten polttoaine on tavanomaisesti kiinteätä, eli hiiltä tai biomassaa, joiden käyttö muissa kuin kiinteissä kattiloissa on hankalaa. Neste- ja kaasupolttoaineita käytetään myös polttomoottori- ja polttoturbiinikäyttöisissä voimalaitoksissa.

Tuuli- ja aurinkovoimalat ovat uusia sähköntuotannon keinoja. Tuulivoimalassa ilman liike muutetaan generaattoria pyörittäväksi liikkeeksi tuuliturbiinilla tai potkurilla. Aurinkosähköä tuotetaan pääasiassa valosähköisellä reaktiolla, jossa valon energia muutetaan kemiallisella prosessilla sähköksi. Suuren mittakaavan aurinkoenergiatuotantoon on suunniteltu myös höyryturbiiniprosessia.

Termodynamiikan lakien mukaan lämpöön perustuvat sähköntuotantotavat voivat yltää noin 45 %:n hyötysuhteeseen primäärienergianlähteen energiasisältöön nähden. Parhaiten lämpövoimalaitoksen primäärienergia voidaan hyödyntää, jos hukkalämmölle on käyttöä. Tämä on tilanne teollisuusprosesseissa sekä kaukolämmön jakelussa. Tällöin kuitenkin sähköksi saatava primäärienergian osuus laskee alle 30 %:n, vaikka laitoksen kokonaishyötysuhde on 85 %.

Vesivoimalaitoksen hyötysuhde on parhaimmillaan 90 % veden potentiaalienergiasta. Turbiinin mallista riippuen myös säädettävyys voi olla hyvä. Pelton-turbiinilla hyötysuhde alkaa laskea vasta kun ottoteho laskee alle puolen nimellistehosta.

Tuuli- ja aurinkosähkön ongelmana on tuotannon riippuvuus luonnonoloista. Sen vuoksi keskimääräinen tuotantoteho jää noin neljäsosaan nimellistehosta. Primäärienergian ilmaisuudesta huolimatta tuotantokustannukset ovat tällä hetkellä (2010) muiden energiantuotantotapojen markkinahintaa huomattavasti korkeammat.

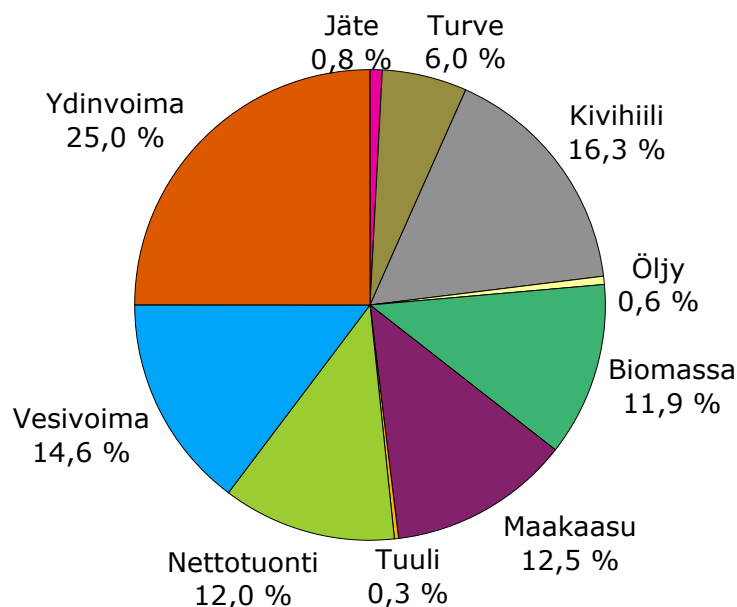
Sähköisen liikenteen kannalta olennaista on, että suhteessa primäärienergiaan sähköinen kulkuneuvo on mielekäs ratkaisu, mikäli primäärienergiaa ei voi sellaisenaan käyttää kulkuneuvossa. Neste- ja kaasun muodossa olevaa primäärienergiaa on edullisinta käyttää suoraan kulkuneuvossa, koska vältetään sähköntuotanto- ja varastointihäviöitä sekä saadaan mahdollisuus jätelämmön hyväksikäyttöön.

Liikenteen sähköistyminen ei sinällään muuta yhteiskunnan energian tarvetta, mutta se muuttaa sitä, missä muodossa primäärienergiaa on hankittava. Polttonesteiden ja kaasun sijasta voidaan hankkia mitä hyvänsä muuta primäärienergiaa, koska kaikki primäärienergia on muutettavissa sähköksi. Liikenteestä tulee myös joustavampi ympäristön kuormituksen kannalta, koska sähköisen liikenteen energiantarve on polttomoottorikäyttöä helpompi tyydyttää kestäväillä ja päästöttömillä energiamuodoilla.

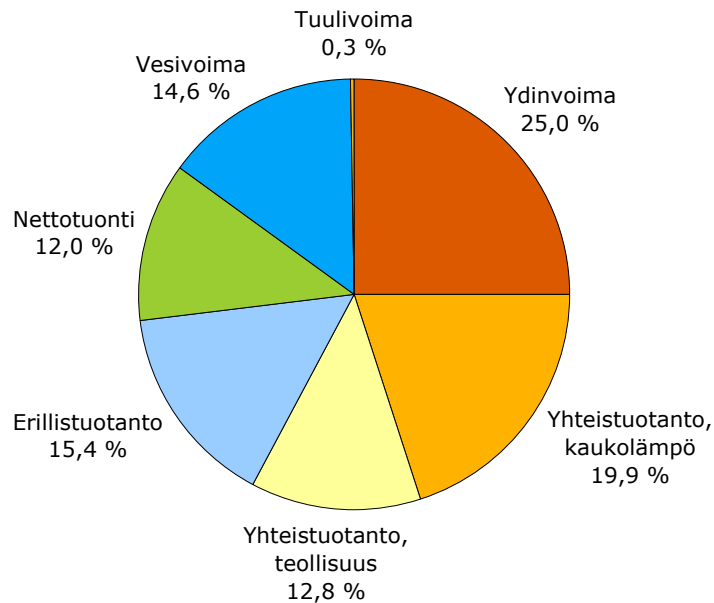
Sähköisen liikenteen taloudellisuus riippuu tarvittavan teknologian teknistaloudellisesta kehityksestä. Sähköisen liikenteen energia voidaan tällä hetkellä (2010) tuottaa halvemmalla kuin polttonesteet ja kaasu, mutta kulkuneuvojen tekniikka on tällä hetkellä (2010) kalliimpaa kuin polttomoottoritekniikka.

4.1 Sähkön tuotannon nykytila

Suomessa sähkön tuotanto perustuu polttoaineilla toimiviin höyryvoimalaitoksiin sekä ydinvoimaan, jonka osuus on noin neljännes koko sähköntarpeesta (Kuva 14). Noin kolmannes sähköstä tuotetaan lämmön yhteistuotantona sekä teollisuudessa (12,8 %) että taajamien kaukolämpötuotannon yhteydessä (19,9 %). Toinen kolmannes sähköntarpeesta tuotetaan sähkön erillistuotantona lauhdevoimalaitoksissa (15,4 %) ja vesivoimalla (14,6 %), joita molempia käytetään tuotannon säätöön sähkönkulutuksen vaihteluiden mukaan (Kuva 15).



Kuva 14. Sähkön hankinnan jakautuminen eri tuotantomenetelmiin Suomessa vuonna 2010. Käytetyn sähköenergian kokonaismäärä 2010 oli 87,5 TWh. Suomesa tuotetun sähkön määrä oli 77,0 TWh. Uusiutuvien tuotantomenetelmien osuus sähkön tuotannosta Suomessa oli 31 % ja hiilidioksidineutraalien menetelmien osuus oli 59 % (Energiateollisuus 2011).



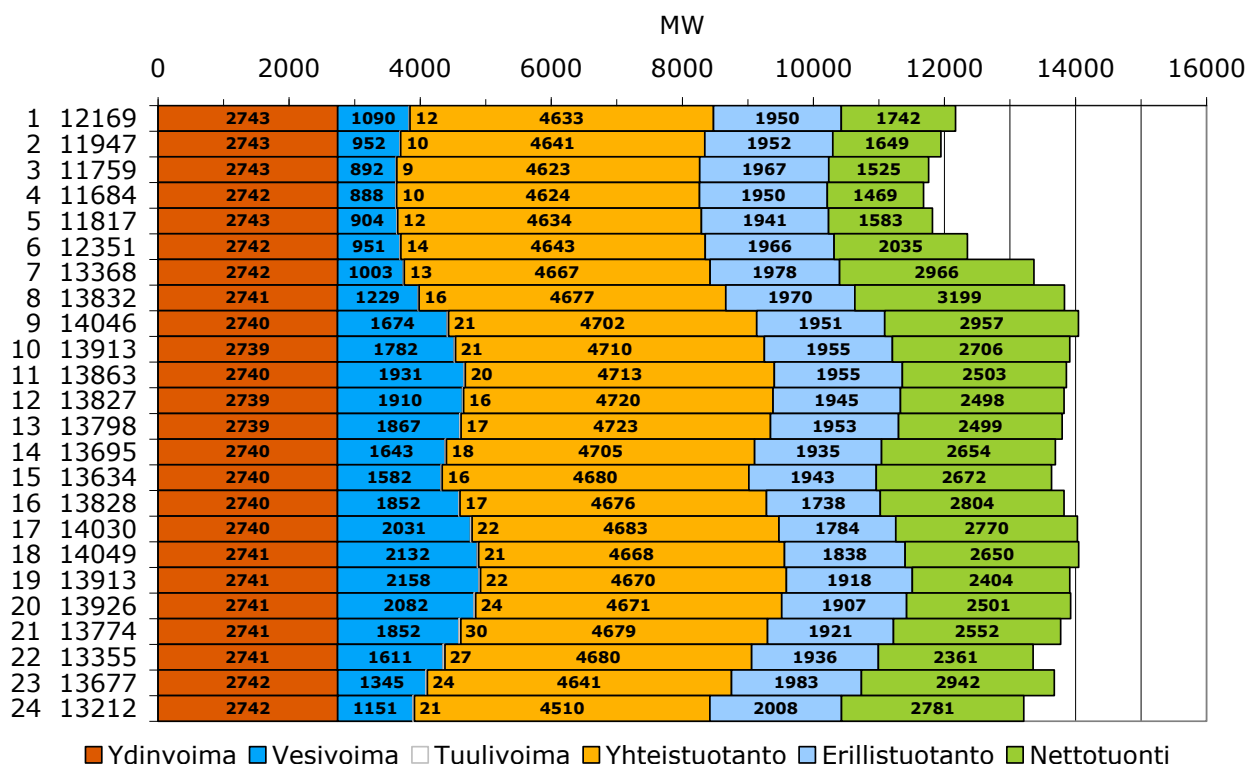
Kuva 15. Sähkön nettohankinta vuonna 2010 voimalaitosten tekniikan mukaan (Energiateollisuus 2011).

Sähkön tuotantoa ohjaavat sekä tiettyyn tuotantoon kohdistuvat ostosopimukset että voimalaitosten tuotantokustannukset.

Uusiutuvan sähköntuotannon osuus Suomen sähkön kulutuksesta, 26,8 %, on eurooppalaisittain suuri. Se johtuu metsäteollisuuden suuresta osuudesta Suomen energiataloudessa. Metsäteollisuuden viimeaikaiset rakennemuutokset ja tuotantokapasiteetin vähentäminen ovat kuitenkin vähentäneet sekä teollisuuden energiantarvetta että sähkön tuotantoa. Tuuli- ja aurinkovoiman vähäinen osuus Suomessa selittyy osittain kummankin heikoista luontaisista edellytyksistä suhteessa etelämpänä sijaitseviin maihin tai Atlantin rannikkovaltioihin.

Nettotuonti sisältää vesivoimaa Norjasta ja Ruotsista sekä ydinvoimaa Venäjältä. Venäjän sähkön tuonnin osuus on noin puolet tuonnista. Norjan ja Ruotsin sähköä ostetaan pohjoismaisen sähköpörssin kautta.

Valtioneuvoston päätös kahden uuden ydinvoimalaitoksen rakentamisesta Suomeen tulee muuttamaan sähkön tuotantorakennetta. Julkisuudessa on arvioitu, että molempien uusien voimaloiden ollessa käytössä Suomen sähköntuotantokapasiteetti on suurempi kuin kulutus, jolloin Suomesta tulee sähkön nettoviejä. Muun sähköntuotannon vähentäminen niin, että tuotanto korvattaisiin ydinvoimalla ei ole mahdollista, koska sähköä tuotetaan erityisesti lämmityskaudella yhteistuotantovoimalaitoksissa. Lisäksi tarvitaan pysyvästi säätövoimaa ydinvoiman heikon tai puuttuvan säädettävyyden vuoksi (Kuva 16). Näistä syistä uudet ydinvoimalaitokset eivät korvaa sellaisenaan nykyisiä hiilivoimaloita. Niiden päästöjä voidaan vähentää vain muuttamalla ne uusiutuvalla polttoaineella toimiviksi.



Kuva 16. Sähkön hankinta tunneittain talvella 2010–2011 ennen 31.12.2010 esiintyneen kulutus-huipun sisältävänä päivänä 29.11.2010. Tuotannon säätö kysynnän mukaiseksi on tapahtunut ensisijaisesti vesivoimalla ja toissijaisesti sähkön tuontia säätämällä (Energiatieteellisyys 2010).

4.2 Liikenteen sähköntarve ja tuotantomahdollisuudet

4.2.1 Kulkuneuvojen liikkumisen sähköntarve

Polttomootorikäyttöisen liikenteen energiankulutus on ajoneuvoissa käytetyn polttoaineen sisältämä energia. Ajoneuvon liikkumiseksi hyödyksi saatu energia on 15–18 % ajoneuvoon tankatun polttonesteen lämpöarvosta (tank-to-wheel efficiency). Vastaava luku sähkökäyttöiselle ladattavalle ajoneuvolle on 70–80 %. Tämä siis tarkoittaa, että sähkökulkuneuvokannan energiantarve on huomattavasti alhaisempi kuin liikenteen polttoaineen kulutuksen lämpöarvo (Kronström 2009).

Polttomootorikäyttöisen henkilöauton kulutus 7–8 L/100 km vastaa energiana 0,63–0,72 kWh/km. Sähkökäyttöisten henkilöautojen energiankulutuksen on arvioitu olevan 0,15–0,25 kWh/km ilman lämmityksen tai ilmastoinnin energiankulutusta mutta sisältäen jarrutusenergian hyväksikäytön. (Kronström 2009). Sähköisten henkilöautojen sähkönkulutus on siten noin 25 % polttomootorikäyttöisten henkilöautojen kuluttamien polttonesteiden energiamäärästä. Suomen henkilöautokanta kuluttaisi siten nykyisillä liikkumistottumuksilla nykyisen kaltaisina autoina vuosittain noin 9,2 TWh eli noin 12 % nykyisestä 90 TWh:n sähkönkulutuksesta.

Raskas liikenne kuluttaa Suomessa 30–40 % tieliikenteessä kuluva 3,9 miljoonasta tonnista polttonestettä. Pitkämatkaisessa rahti- ja linja-autoliikenteessä polttomootorin korvaaminen sähkökäytöllä on nykyisen tiedon valossa vaikeata. Akkuihin perustuva energian varastointi alentaa hyötykuorman kohtuuttoman pieneksi. Polttokennotekniikka tarjoaa massan ja tilavuuden suhteen paremman energiavaraston, mutta hyötysuhde lähtien polttoaineen tuotannosta on heikko ja tekniset vaikeudet ovat vielä merkittäviä (Romana 2010).

Raskaan liikenteen siirtyminen uusiutuvaan energiaan näyttää toistaiseksi olevan helpointa käytämällä biopolttoaineita. Neste Oililla on kaupallisessa tuotannossa oleva prosessi, joka tuottaa maaöljypohjaisen dieselpolttonesteen sellaisenaan korvaavaa nestettä. Neste Oilin prosessi käyttää raaka-aineenaan biorasvoja, kuten öljykasveja. Prosessin hiilidioksidipäästöt ovat noin 40 % maaöljypohjaisen dieselpolttonesteen käytön päästöistä, kun otetaan huomioon palmuöljyn viljely. Chempolis Oy:llä on kaupallisessa tuotantokäytössä oleva prosessi, joka tuottaa biomassasta kuten viljelysjätteestä alkoholia. Prosessi ei edellytä kasvien ravinnoksi kelpaavien osien käyttöä. Alkoholi ei kuitenkaan käy nykyisiin dieselmoottoireihin. Prosessi on energiaomavarainen, joten elinkaaren aikaiset päästöt aiheutuvat prosessilaitoksen rakentamisesta ja prosessin raaka-aineen kuljetuksista. Puumassaan perustuvan energiantuotannon perusteella CO₂-päästöt ovat siten 1–2 g/kWh.

Mikäli raskaan tieliikenteen energiakysymys ratkaistaan biopolttoaineilla, raskaan liikenteen energiatarvetta ei tarvitse ottaa huomioon sähkön tuotantorakenteessa. Raskaan tieliikenteen noin 14 TWh:n energiatarve kilpailee kuitenkin uusituvista energiaraaka-aineista sähkön tuotannon kanssa. Rintalan (2007) mukaan Suomen metsien biomassapotentiaali olisi noin 100 TWh. Kun fossiilisten polttoaineiden osuus sähköntuotannossa on nyt 115 TWh, näihin lukuihin suhteutettuna raskaan tieliikenteen biomassatarve on merkittävä.

4.2.2 Sähkökulkuneuvojen lämmitys ja ilmastointi

Lämmityksen tarve riippuu vuodenajasta. Ajoneuvon rakenteesta riippuen lämmitystä tarvitaan yleensä silloin, kun ulkolämpötila on alle +10°C. Ajoneuvossa tarvitaan lämmityksen lisäksi myös ikkunoiden kosteuden poistoa, joka on järjestetty henkilöautoissa voimakkaalla ilmanvaihdoilla. Ilmanvaihto vältetään joukkoliikenteessä kaksinkertaisin lasein. Kesäisin tarvitaan ilmastointia, suunnilleen silloin, kun lämpötila on yli +15°C ja sää on aurinkoinen.

Joukkoliikenteen sähkökulkuneuvoissa on suora sähkölämmitys. Lämmitykseen voidaan hyödyntää jarrutusenergiaa. Se ei kuitenkaan tarkoita, ettei lämmitys lisäisi järjestelmän käyttämää energiamäärää. Lämmityksen sijasta jarrutusenergiaa on palautettu ajojohtimiin, jolloin saavutetaan noin 30 %:n säästö ajosähkössä. Ajojohtoon palauttamisen mahdollisuus tosin riippuu siitä, kykeneekö sähköasema palauttamaan sähköä jakeluverkkoon ja onko samalla ajojohdon syöttöjaksolla muita kulkuneuvoja kuormana. Jarrutusenergian käyttö ilmastointiin suoraan vaunussa on vaikeampaa kuin lämmityskäyttö. Ilmastointilaitte ei kykene muuttamaan sähköä lämpötilan laskuksi hetkellisesti suurella teholla ja varastoimaan kylmyyttä kuten vastukset kykenevät varastoimaan lämpöä lämmön tuottamisessa.

Henkilöautojen lämmitys on perustunut moottorin hukkalämpöön, jota on polttomoottorin hukkalämpönä käytettävissä lämmitystarpeeseen nähden rajattomasti. Auton vaipan lämpöeristys ei ole ollut kriittinen lämmönkulutukseen vaikuttava tekijä, sillä lämpö johtuu auton sisältä ulos lämmitetyn tuuletusilman mukana. Lämmityksen tasaaminen auton eri osissa on myös perustunut ilman puhaltamiseen, ei paikallaan olevan ilman pysymiseen lämpimänä. Puhallus toimii ilman kuivaamisessa, mikä on välttämätöntä yksinkertaisten lasien pitämiseksi huurtumattomia.

Kun auton liikuttamiseen käytetään noin 10–15 kW:n tehoa, usean kilowatin sähkötehon käyttäminen auton lämmitykseen ja ilmastointiin ei ole hyväksyttävä ratkaisu, kun toimintasäde on pieni jo

pelkän ajoenergian kulutuksella. Kronströmin (2009) mukaan sähköauton sähkölaitteiden hukka-lämpö on 10 % luokassa ja se on sekä vaikeasti hyödynnettävissä että riittämätön.

Jatkuva lämmitys voidaan ratkaista polttoainetta käyttävällä lämmittimellä. Lämmittimiä on nykyään saatavilla 2–5 kW:n tehoisina, ja niitä käytetään nykyään kuorma-autojen seisontalämmityksessä, työkoneissa ja veneissä. Polttoaineen kulutus on maksimiteholla 0,3–0,7 l/h, polttoaineena voi olla bensiini tai dieselöljy. Polttoöljyn tai muun verottoman öljyn käyttö pelkkään ajoneuvon lämmittämiseen tulee selvittää verottajan kanssa. Jos lämmitin käyttää fossiilista polttoainetta, ladattava sähköauto tuottaa käytön aikaisia CO₂-päästöjä.

Liikkeessä olevan auton lämmitystarve on suurempi kuin paikallaan olevalla autolla. Käytännössä päivittäinen talvikäyttö on lyhyitä matkoja, jotka kestävät 15–45 minuuttia. Erillisen polttonestelämmittimen käyttö olisi todennäköisesti suurimmaksi osaksi maksimiteholla käyttämistä. Latausjärjestelyn ansiosta lämmittäminen ennen liikkeellelähtöä on luonteva ratkaisu. Esilämmitys voidaan tehdä nykyiseen tapaan verkkovirralla toimivalla sisälämmittimellä, jolloin ei tarvita polttonestettä eikä ajoneuvon akkukapasiteettia. Periaatteessa sisälämmittimen käyttö ei muuta sähköverkon kuormitusta nykyisestä, koska lämmittimiä käytetään yleisesti jo nyt. Kaupungeissa lämmitystarvetta säästää osin halli- ja luolapaikoitus, joissa auto pysyy ulkolämpötilaa lämpimämpänä.

Sisätilan lisäksi sähköautossa on tarve lämmittää akkuja. Alhainen lämpötila vähentää sekä akun purkautumis- että latauskykyä. Vaikutus on merkittävä nykyisin yleisillä akkutekniikoilla.

Polttonestelämmittimen polttonesteen kulutus on luokkaa 10 % polttomootoriauton kulutuksesta. Mikäli sähköautokanta toimisi polttonestelämmittimillä, vuosittainen sähköautokannan polttonesteen tarve olisi lämmityksen kausitarve huomioiden luokkaa 5 % nykyisen autokannan kulutuksesta. Tämä määrä voisi olla kohtuullisesti tuotettavissa biopolttonesteenä. Hyväksyttävä hintakin voisi olla selkeästi suurempi kuin nykyinen liikennepolttonesteen hintataso, koska pienen tarpeen vuoksi hinnan vaikutus kuluttajan kokonaiskustannuksiin jää kohtalaisen vähäiseksi. 18 000 km:n vuosittaisella ajosuoritteella lämmityspolttoaineen vuosikustannus olisi 100–150 € nykyisillä (1,4 €/l vuosi 2010) liikennepolttonesteiden kuluttajahinnoilla.

Autojen ilmastointilaitteet toimivat polttomoottorilta saatavalla mekaanisella energialla. Erilliset ilmastointilaitteet esimerkiksi matkailuvaunuihin toimivat omalla sähkömoottorilla. Markkinoilla olevien laitteiden jäähdytystehot ovat 0,8–3 kW ja ottoteho on noin puolet tästä. Tavallisesti laite on tehty verkkovirralla, jota on saatavissa leirintäalueilla. Akkukäyttöä varten tarvitaan invertteri. Myytävät ilmastointituotteet ovat usein invertterin ja akkulaturin yhdistelmiä, jotka myös valvovat akun varaustilaa, jotta esim. matkailuauton moottori voidaan käynnistää. Ilmastointi voidaan järjestää esilämmityksen tapaan ennen liikkeellelähtöä verkkovirralla toimivaksi.

Ilmastointilaitetta voi käyttää myös lämpöpumpuna. Tämä vähentää lämmitykseen käytettävän sähköön kulutusta noin puoleen.

Tarkoituksenmukainen ratkaisu on pyrkiä vähentämään sähköauton lämmityksen ja ilmastoinnin tarvetta. Polttomootoriautoissa lämmitystarpeen vähentämiseen ei ole ollut tarvetta, eikä lämmöneristyksen ja ikkunoiden huurtumisen teknologioita ole kehitetty kuin joukkoliikenteessä.

Lämmöneristyksen parantaminen lisää ajoneuvon massaa, mikä ei ole toivottavaa. Osin tämä voitaneen ratkaista optimoimalla energian kulutusta, osin käyttämällä ja kehittämällä tavanomaisista poikkeavia materiaaleja. Kaksinkertaiset lasit lienevät kohtuullinen ratkaisu sivuikkunoissa, mutta

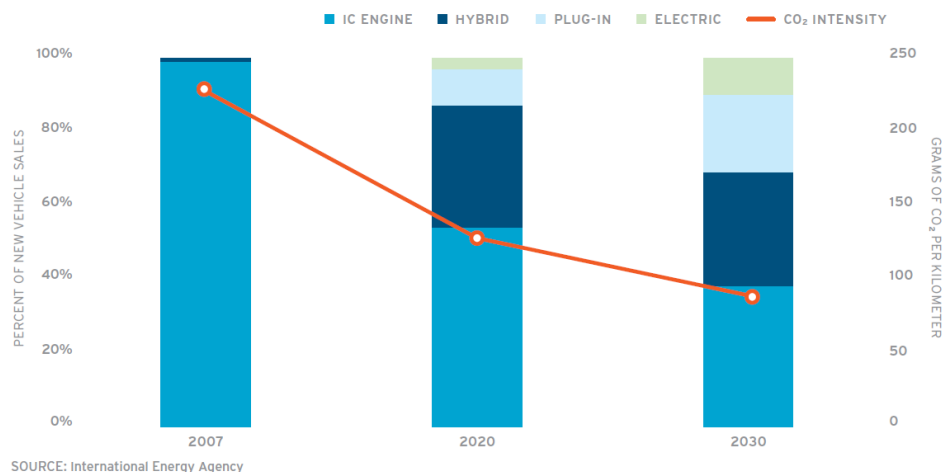
tuulilasissa koko ja muoto tekevät kaksinkertaisuudesta haastavan. Se tarkoittaa, että huurteen poisto puhaltamalla on vaikea välttää tuulilasin osalta. Nykyään on kuitenkin olemassa sähkölämmitettöjä tuulilaseja. Lämmityksen tarvetta voi vähentää vaatetuksella, joskin tällä asialla lienee vähän merkitystä lyhyillä päivittäisillä matkoilla. Lämmityksen ja ilmastoinnin tarvetta vähennetään myös vähentämällä ilman kierrättämistä. Kierrättämisen tarpeeseen voinee vaikuttaa ilman kuivauksella.

Auton säilyttäminen tallissa tai hallipaikoituksessa vähentää lyhyiden matkojen lämmitys- ja ilmastointitarvetta. Kokonaisenergiankulutuksen kannalta lämmitetty talli on kuitenkin huono ratkaisu. Auton jäähtyminen ulkona kompensoidaan autotallin lämmityksen tarpeena. Maanalainen paikoitus ei edellytä lämmitystä. Sisäsäilytys on eduksi akuille, joilla sekä varaus että purkautumiskyky on voimakkaasti lämpötilasta riippuva. Ilmastoinnin tarpeen vähentämiseksi autoa varjostava katos on yksinkertainen ja edullinen ratkaisu, joka ei kuluta myöskään energiaa.

4.2.3 Liikenteen sähkön tuotanto

Henkilöautojen sähkönkulutusta on yleisesti arvioitu koko autokannan sähköntarpeena ja oletta- malla, että autot painavat noin 1400 kg ja ovat muutenkin nykyisten henkilöautojen kaltaisia. Käy- tännössä autokanta ei muutu sähköiseksi kerralla. Suomessa autokannan uusiutuminen on kestä- nyt 19 vuotta ja vuosittain myydään uusia autoja runsas 100 000 kappaletta, joista ladattavien au- tojen osuus on toistaiseksi merkityksetön.

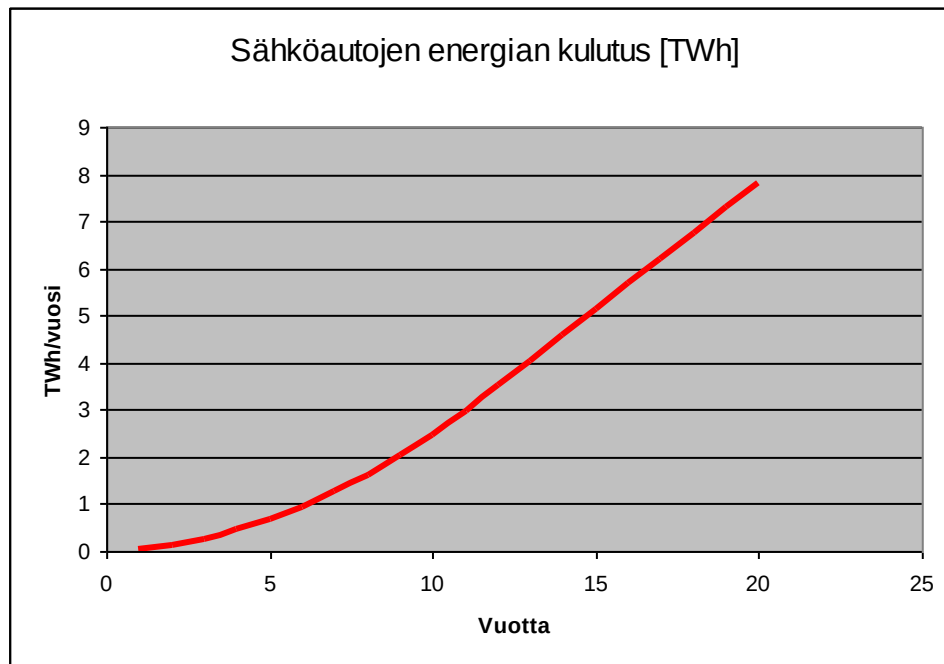
Automarkkinoilla näyttää siltä, että länsimainen autoteollisuus ei ole siirtymässä innolla sähköau- toihin. USA:ssa hybridi- ja sähköautojen myynnin ennakoidaan kasvavan varsin maltillisesti (Kuva 17). Autoalan ansaintalogiikka pohjautuu pitkälti myynnin jälkeiseen liiketoimintaan, jota sähköauto tulee vähentämään. Uusien automallien kehitysaika on useita vuosia ja tuoteperheet elävät 5–7 vuotta. Näistä syistä voi olettaa, että länsimainen autoteollisuus voisi teknistaloudellisten olosuh- teiden puitteissa siirtyä sähköautotuotantoon 10–15 vuodessa.



Kuva 17. Eri teknologioiden osuus uusien autojen myynnistä USA:ssa sekä CO₂-päästöjen kehitys (Electrification Coalition 2009).

Suomen autokannan elinkaaren ja automyyntin olosuhteissa autokannan sähköistymistä voi arvi- oida siten, että vuotuinen automyynti on 150 000 kappaletta. Jos autoteollisuus siirtyisi sähköauto- jen tuotantoon mahdollisimman nopeasti, sähköautojen osuus uusien autojen myynnistä voisi kas-

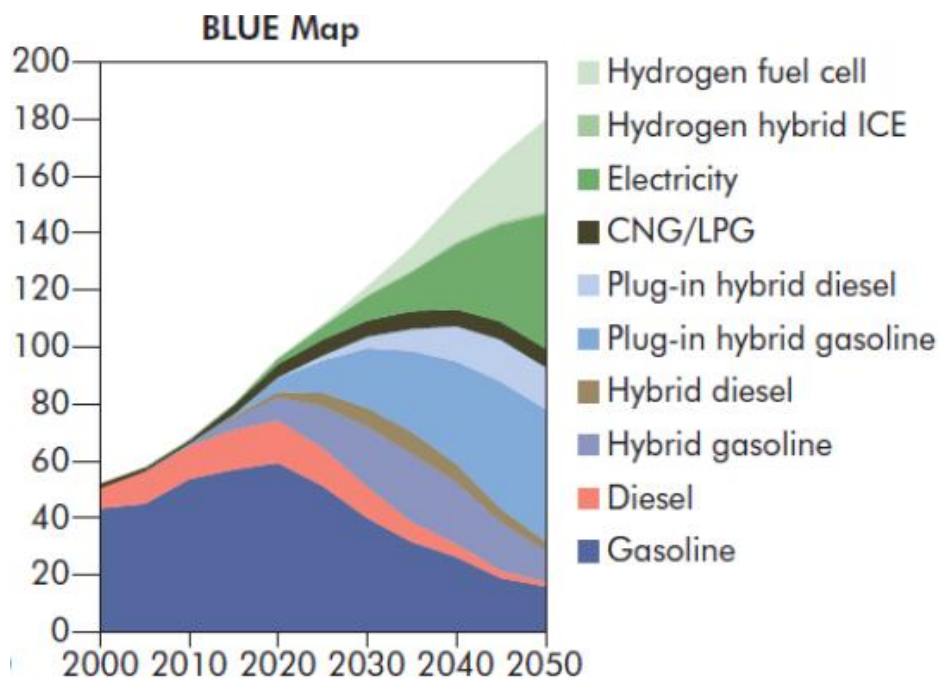
vaa 100 %:iin 12 vuodessa. Henkilöautoliikenteen sähkönkulutuksen kasvu noudattaa silloin kuvan Kuva 18 mukaista käyrää. Se tarkoittaa, että aluksi autojen sähkönkulutus on Suomen sähköntuotannon ja -jakelun kannalta merkityksetön. Siitä ajankohdasta, jolloin ladattavia sähköautoja tulee myyntiin merkittäviä määriä, kuluu vielä seitsemän vuotta, jona aikana autojen sähkönkulutus on alle prosentti Suomen sähkönkulutuksesta. Ajoneuvokannan uusiutumisesta on käsitelty lisää luvussa 5.6.



Kuva 18. Ladattavien sähköautojen energiankulutuksen kasvu lähtien siitä, kun ladattavat autot tulevat myyntiin. Kuvaajassa on oletettu autojen vuosimyyntiksi 150 000 autoa ja ladattavien sähköautojen myynti kasvavaksi 12 vuodessa tasaisesti siten, että kaikki uudet autot ovat ladattavia sähköautoja.

On mahdollista, että esimerkiksi ympäristösyistä autokannan uusiutumista sähköautoiksi tullaan nopeuttamaan viranomaistoimilla, mutta nykyaikaisen auton teknisen käyttöiän perusteella autokannan uusiutuminen tuskin nopeutuu alle 15 vuoden. Lisäksi uusiutumisen käynnistyminen näyttää olevan hidasta heikon tarjonnan vuoksi.

On myös mahdollista, että ladattavan sähköauton rinnalle tulee tarjolle merkittäviä muita uusiutuvaa energiaa käyttäviä ajoneuvoratkaisuja (Kuva 19). Yhtenä syynä tähän ovat arviot Litium-akkujen maailmanlaajuisen tuotantokapasiteetin rajallisuudesta. Ladattavien autojen myynnin osuus voi olla yli puolet, mutta suuren kapasiteetin tarvitsevia pelkästään ladattavia autoja olisi enintään noin neljännes myynnistä. Suurehkoja akkuja tarvitaan myös ladattavissa hybrideissä, mutta akkukapasiteetti voi olla 25–30 % täysin ladattavan auton akkukapasiteetista.



Kuva 19. Henkilöautojen eri energiaratkaisujen kehitys myydyistä autoista vuoteen 2050. Ladattavien ja suuren kapasiteetin akkuja käyttävien autojen osuus (tumma vihreä) on kokonaisuuteen nähden vähäinen (Cazzola 2010).

Kronström (2009) on arvioinut, että kokonaan sähköisen henkilöautoliikenteen aiheuttama 9,2 TWh:n eli 10 %:n sähkönkulutuksen määrällinen nousu ei edellytä lisää sähkön tuotantokapasiteettia, vaan kasvu voidaan kattaa autokannan akkujen älykkäällä latauksella siten, että akut ladataan öisin, jolloin vuorokausivaihtelu alentaa sähkönkulutusta. Tämä edellyttää, että autot tai niiden latauspisteet keskustelevat sähköverkon kanssa ja järjestelmä huolehtii siitä, ettei sähkön tuotantotehoa ylitetä.

Auton käyttäjän kannalta latausjärjestely merkitsee, että kaikki käyttäjät eivät voi itse hallita akkujen latautumista eikä siten voi varmasti tietää, miten akun saa ladatuksi. Jos älykkään latausjärjestelmän ohittaminen on mahdollista, on riski, että ohittamista käytetään ”varmuuden vuoksi”. Tätä käyttäytymistä voi pyrkiä hallitsemaan nopean tai ”varman” latauksen hinnoittelulla tai toimintasäteen pidentämisellä, jolloin kuluttaja hyväksyy paremmin sen, etteivät akut olekaan täydessä latauksessa kun auto otetaan käyttöön. Älykäs latauksen taseus siis merkitsee käytännössä ladattavan auton toteutuvan toimintasäteen lyhenemistä.

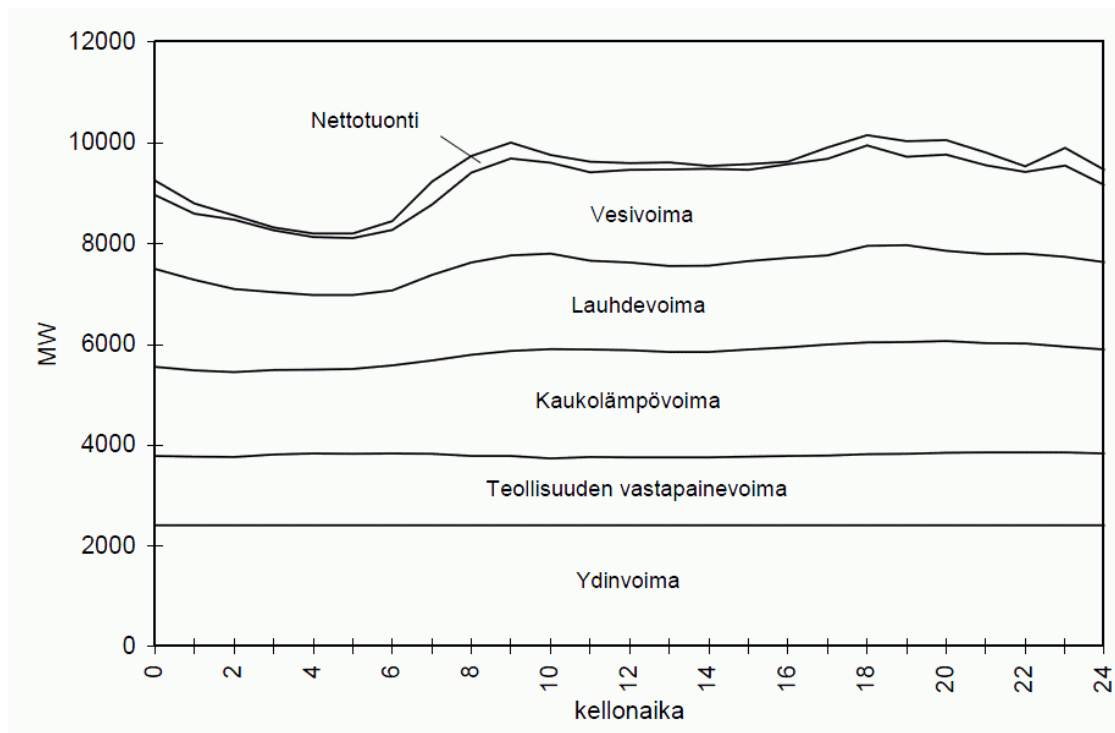
Älykäs lataus tarkoittaa myös sitä, että autojen akkuja ei voi ladata työpäivän aikana, koska latauskuorma osuisi silloin sähkönkulutuksen kuormitushuippuun. Kuluttajalle tämä merkitsee sitä, että auton toimintasädetarve työmatkakäytössä kaksinkertaistuu. Sähköautojen tämänhetkisen 150 kilometrin toimintasäteen ja tilastollisen noin 15 kilometrin työmatkapituuden perusteella tämä ei kuitenkaan ole ongelma.

Kronström arvioi ainoastaan sähkön tuotantokapasiteetin ja autokannan energiantarpeen suhdetta. Ladattavien sähköautojen kannan kasvu voi olla ongelma jakeluverkolle, vaikka tuotantokapasiteetti riittäisikin. Tämä johtuu siitä, että lataus kuormittaa asumista palvelevia keski- ja pienjänniteverkkoja, joita nykyinen päiväaikainen sähkönkulutuksen huippukuorma ei rasita. Ongelmia voi tulla 10–20 kV keskijännitteen ajojohtoverkoissa haja-asutusalueilla ja maakaapeleissa kaupun-

kiympäristössä sekä alle 1 kV:n kiinteistöjen liitännätverkoissa. Paikoin jo nykyään on moottorilämmittinten kuorma ollut ongelma. Älykäs lataus voi säätää näiden verkonosien kuormittumista.

Erillisen sähköntuotannon ja -verkon kuormituksen ongelman voi muodostaa pysäköidyn auton lämmittäminen sähköverkosta aamulla ennen liikkeellelähtöä. Tämä lämmitys vastaa autokohtaisesti nykyistä moottorilämmittimen kuormaa, mutta sähköauton toimintasäteen ja akun toiminnan vuoksi pysäköidyn auton lämmittäminen voi olla välttämätöntä ja sitä tehdään enemmän kuin lohkolämmittimen käyttöä nykyään. Sisä- ja lohkolämmittimen yhteisteho on nykyään 2 kW. Teho on samaa luokkaa kuin autojen yöaikainen latausteho, ja sitä tarvitaan sekä aamuisin että iltapäivisin ulkona pysäköidyille autoille. Pahimmillaan pysäköityjen autojen lämmitys muodostaa tehopiikit, jotka edellyttävät sitä sähköntuotannon lisäkapasiteettia, joka älykkäällä latauksella säästettiin.

Sähköntuotannossa voimalaitosten ajojärjestys perustuu sekä tuotantokustannuksiin että ympäristöhaittoihin. Sähköverkon perustuotanto tehdään ydinvoimalla ja säätövoimana käytetään vesivoimaa. Lämmityskaudella ydinvoiman ja teollisuuden oman sähköntuotannon jälkeisen perusvoiman muodostaa yhteistuotannosta saatava sähkö. Kivihiililauhevoimaloita käytetään sähkön kuormitus- huippuihin, mutta ympäristöystävällisyydestään sekä hinnastaan huolimatta vesivoimaa käytetään ensisijaisena säätövoimana, koska vesivoiman säätäminen on kaikkein helpointa (Kuva 20).



Kuva 20. Sähkön tuotantotavat vuorokauden aikana 16.1.1997 (Pirilä ym. 1997 s.26)

Älykäs latausjärjestelmä tasaa vuorokausivaihtelua, mutta tarvittavan sähkön rajakustannus on keskimääräistä tuotantokustannusta korkeampi. Nykyisellä tuotantorakenteella sähköautojen energia on käytännössä kalleinta ja eniten päästöjä tuottavaa energiaa, pahimmassa tapauksessa sähköautot ovat kivihiililauhdekäyttöisiä. Se, missä määrin yöaikainen akkujen lataaminen tapahtuu kivihiilellä tai vesivoimalla riippune siitä, miten suuri vesivoiman säätömarginalli halutaan pitää sekä lyhyellä aikavälillä että vuositasolla suhteessa käytettävissä olevaan vesimäärään.

Kun sähköntuotannon ominaispäästö on kivihiililauhteella 850 g/kWh, sähköauton ominaispäästö on 176 g/km ilman lämmitystä (Kronström 2009). Yölatauksen keskipäästö olisi puolet tästä, jos latausenergia tuotettaisiin puoliksi hiililauhde- ja vesivoimalla. Ympäristönäkökohdista tämä ei ole kovin kannattavaa, koska sähköhybridillä päästään samaan päästötasoon ja auton lämmitys on ratkaistu. Bensiinimootorilla varustetun Toyota Prius -hybridin polttoaineen kulutukseksi ilmoitetaan 4,3 l/100 km ja CO₂-päästökseksi 104 g/km. Esimerkiksi jos sähköhybridin polttonesteen kulutus on 3 l/100 km ja dieselöljyn CO₂-ominaispäästö on 2,66 kg/litra, hybridauton ominaispäästö on 80 g/km.

Vaikka nykyisen henkilöautokannan muuttuminen ladattaviksi sähköautoiksi ei vaatisi voimalaitos-
tehon lisärakentamista, autoilun päästöjen vähentäminen edellyttää, että fossiilisista voimalaitos-
polttoaineista siirrytään CO₂-neutraaliin tuotantoon nykyisin säätövoimana käytettävän kivihiililauh-
teen osalta. Yöaikainen lataustoiminta ei kuitenkaan poistane nykyisen kaltaista sähköntuotannon
säädettyvyyden tarvetta, vaikka se tasaisikin yöaikaisen sähkötehon alenemista joko määrällisesti,
ajallisesti tai molemmilta osin. Tämä seikka rajoittaa kyseeseen tulevia voimalaitosratkaisuja, joi-
den on oltava säätökelpoisia myös silloin, kun verkosta ladataan sähköautoja. Tämä johtuu siitä,
että autokannan käytössä on vaihtelua, eli yöaikainen lataustarve vaihtelee sekä viikko- että vu-
denaikavaihteluna. Tällä hetkellä käytössä olevia säädettäviä ratkaisuja ovat vesivoima ja biomas-
salauhde.

Kun ehdoksi asetetaan CO₂-vapaa sähköntuotanto, säätövoimaan perustuvan yölatauksen sijasta
voidaan käyttää CO₂-vapaata aurinko- tai tuulivoimaa. Tällöin akkuja voidaan ladata mihin vuoro-
kaudenaikaan hyvänsä. Tällöin kuitenkin autoilun energiantarpeeseen investoidaan uuteen tuotan-
tokapasiteettiin toisin kuin säätövoimaa käytettäessä.

4.2.4 Tuulivoima liikenteen energiatuotannossa

Jos akkujen lataukseen käytetään tuulivoimaa, tuulivoimateho ei edellytä säätövoimaa siten kuin
sähköverkkoon syötettävä tuulivoimateho. Silti tuulivoimakaan ei yksin ratkaise lataustehoa, koska
tuulettomat tai erittäin vähätuuliset jaksot voivat kestää yli useiden öiden (ks. kuva kappaleessa
4.2.6). Matilaisen (2008) mukaan Suomessa voitaisiin varautua 2000 MW:n tuulivoimatehoon
vuonna 2020, kun tekninen maksimi on enintään 9500 MW. Nykyinen (2008) tuulivoimateho on
128 MW. 16 ampeerin liitännässä olevan 2,7 miljoonan ladattavan sähköauton maksimi ottoteho
on 9720 MW ja täysin tyhjiä akkujen 81 GWh:n latausaika olisi 8,3 tuntia. Vuotuisen 9,2 TWh:n
kulutuksen vuorokausikeskiarvo on 25,2 GWh, joten tarvittava minimilatausaika olisi 2,6 tuntia
9720 MW:n teholla. Kun yksityiskäytössä olevat henkilöautot ovat käyttämättöminä vähintään 20
tuntia vuorokaudessa, päivittäisen kulutuksen lataamiseen tarvittava tuotantoteho on 1270 MW eli
vähemmän kuin suunnitelmissa oleva 2000 MW:n tuulivoimateho.

Kun tuulivoiman 90 %:sti luotettava teho on Matilaisen (2008) mukaan 6 % nimellistehosta, vuonna
2020 olisi käytössä luotettavaa tuulivoimatehoa 120 MW. Teknisellä maksimillakin tuulivoimaa olisi
käytössä luotettavasti 570 MW. Sähköautojen akkujen lataustarve on kuitenkin joustava kuorma,
johon ei ole tarpeen soveltaa yleisen sähköverkon tuotannon kuormitettavuuden kriteerejä. Lataus-
tarve voi joustaa siten, että ilman latausta yksittäinen auto voi olla kolme vuorokautta ja autokanta
keskimäärin 1,5 vuorokautta, kun autojen akkukanta toimii tasausenergiälähteenä. Autokanta tar-
vitsisi muun sähköntuotannon tehokapasiteettia vasta toisena perättäisenä tuulettomana vuorokau-
tena, jolloin autokannan käytettävissä olisi yöaikana vapaa säätökapasiteetti.

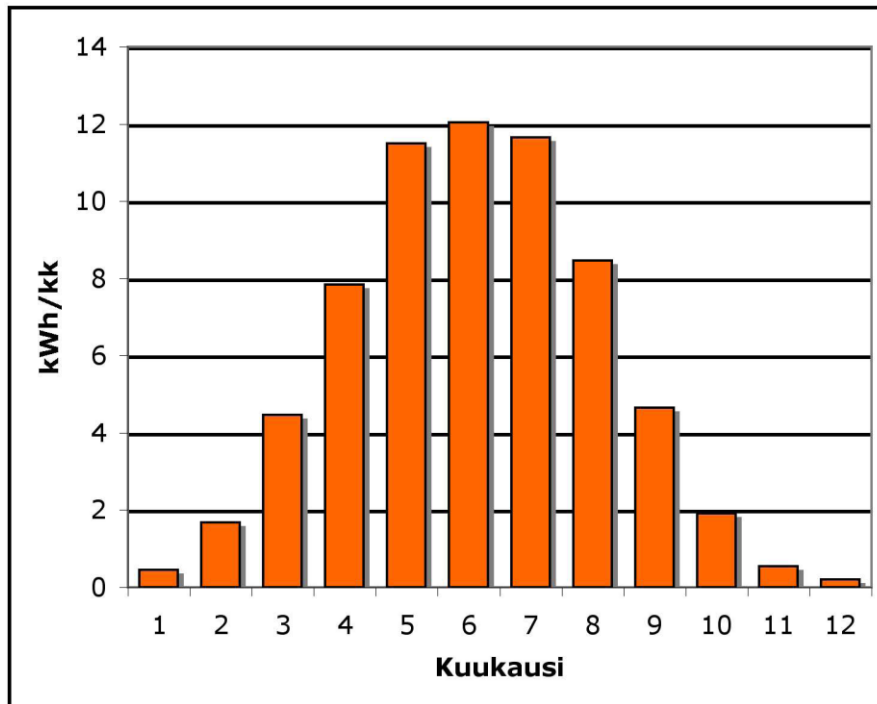
Olennaista on tarkastella tuulivoimatehon kokonaistuotantoa. Holttisen ym. (1996, ss. 38–39) perusteella tuulivoimala tuottaa vuodessa 25 % ja kuukausitasolla vähintään 20 % nimellistehoa vastaavasta tuotannosta. 2000 MW:n tuulivoimateho tuottaisi siten vuosittain 4,4 TWh, joka on alle puolet autokannan energiatarpeesta. 2000 MW:n tuulivoimateho rakennettuna autokannan energialähteeksi olisi siten päästötön autokannan energialähde vain puolelle tarpeesta, mutta tälle tuulivoimateholle ei olisi tarpeen rakentaa varavoimaa.

4.2.5 Aurinkovoima autojen energiatuotannossa

Aurinkopaneelien ominaisteho lataussäätimen ja invertterin hyötysuhde huomioiden on noin 100 W/m^2 . Paneelimyyjien mukaan paneelin tuotannon vuosikeskiarvo Suomessa on 15 % huipputehosta, joka saavutetaan auringon säteilyn suurimmalla teholla 1000 W/m^2 . Tällöin yhden sähköauton 3,6 MWh:n vuosikulutusta varten tarvitaan 28 m^2 aurinkopaneelia, jos auton akut ovat kytkettynä paneeliin aina kun paneeli tuottaa sähköä.

Kiintein akuin varustettu auto on pääsääntöisesti käytössä päivisin valoisaan aikaan, joten paneelin tehokasta aikaa menetetään. Lisäksi marraskuusta tammikuuhun paneelin keskiteho on vain 2 % kesäkuukausien tehosta (Kuva 21). 90 % paneelin tuotannosta saadaan maaliskuusta syyskuuhun olevana ajanjaksona. Jos auton käyttö jakautuu vuoden aikana tasan kaikille kuukausille, yhden kuukauden energiantarve on 300 kWh. Alla olevan kuvan (Kuva 21) perusteella maaliskuussa ja syyskuussa yksi 100 W :n paneeli tuottaa noin 9 kWh. Jos tämä asetetaan sähkömäärän kriteeriksi, yhtä sähköautoa kohden tarvitaan 34 m^2 aurinkopaneelia. Huhtikuusta elokuuhun paneelit tuottavat noin 2 MWh ylimääräistä sähköä mutta talvikuukausina auton on saatava sähköä muista lähteistä 1,2 MWh. Nettoyli jäämä on 0,8 MWh.

Jos aurinkopaneelien pinta-alatarve on $34 \text{ m}^2/\text{auto}$, Suomen 2,8 miljoonan auton autokanta tarvitsee aurinkopaneeleja yhteensä 95 km^2 . Toisin sanoen sivultaan 10 kilometrin kokoinen neliönmuotoinen kenttä aurinkopaneeleja riittää tuottamaan autokannan tarvitseman sähkön. Suomessa on aurinkopaneeliin sopivaa rakennusten kattopinta-alaa 118 km^2 ja julkisivupinta-alaa 34 km^2 (Solpros 2001, s. 6) eli enemmän kuin autojen sähköntarpeen tuotantoon tarvittaisiin.



Kuva 21. Aurinkopaneelista Suomessa saatu energia kuukausittain, kun paneelin maksimiteho on 50 W. (Aurinkopaneelit.pdf)

Aurinkopaneelit ovat vuosivaihtelunsa osalta sopivia tasoittamaan sähkön- ja lämmön yhteistuotannon (CHP) vuosivaihtelua (katso luku 4.3). Talvella on autojen käyttöön saatavilla CHP-sähköä, jota ei kannata tuottaa kesällä, jolloin liikennekäytön aurinkovoimasta on ylitarjontaa. Ongelmaksi jää kuitenkin se, että aurinkosähköä saadaan päivällä, mutta sähkön tarve on suurimmillaan hämärän aikaan. Aurinkosähkö on siten nähtävä muun säätövoiman päiväaikaisena korvaajana. Toinen mahdollisuus on tasata aurinkosähkön tuotantoa autokannan akuilla, jota on käsitelty seuraavassa luvussa.

4.2.6 Ladattavien kulkuneuvojen akkukannan käyttö aurinko- ja tuulisähkön varastona

Ladattavien sähköautojen akkukannasta on ajateltu sähkövarastoa aurinko- ja tuulisähkölle. Ajatus on, että aurinkopaneelit ja tuulivoimalat voisivat aina hyvissä sääoloissa tuottaa sähköä maksimitehollaan, vaikka verkossa ei kuormaa riittävästi olisikaan.

Jotta akkujen käyttö sähkövarastona on mahdollista, on akkujen keskimääräisen lataustilan oltava jatkuvasti alhaisempi kuin täysi lataus. Pelkästään autojen käytön kannalta tilanne on sellainen, että verkossa olevien autojen akut ovat aamuisin täysinä, jolloin autot irtautuvat sähköverkosta. Noin klo 9:00 mennessä suuri osa autoista on palannut verkkoon, ja akkujen lataustila on laskenut. Tällöin 150 kilometrin toimintasäteen latausta on kulutettu liikkumistottumustilastojen mukaan 5–15 %. Jos akkuja ei päivän aikana ladata sähköverkon ylikuormittumisen välttämiseksi, akkujen lataustila autojen palattua kotiin sekä työ- että asiointimatkoilta olisi mahdollisesti 15–45 % lasku täydestä latauksesta klo 20:00.

Aurinkopaneelien ja tuulivoimaloiden tasaustarpeet poikkeavat toisistaan (Taulukko 2). Autoakkujen tasauskäytön kannalta olennaisinta on vuorokauden sisäinen eli tuntivaihtelu tai tasausvaikutus

enintään muutaman vuorokauden ajalla. Vuoden aikana tapahtuvan huomattavan tehonvaihtelun tasaamiseen akut eivät ole käyttökelpoinen ratkaisu.

Taulukko 2. Aurinko- ja tuulivoiman tuotannon vaihtelu eri aikajaksoilla suhteessa nimellistuotantoon.

Tasausjakso	Aurinkovoima	Tuulivoima
Vuosivaihtelu	98–100 %	70–110 % ²⁾
Kuukausivaihtelu	2–100 %	51–157 % ⁴⁾
Vuorokausivaihtelu	0–100 %	0–100 %
Tuntivaihtelu	30–100 % ⁷⁾	0–100 % ⁸⁾

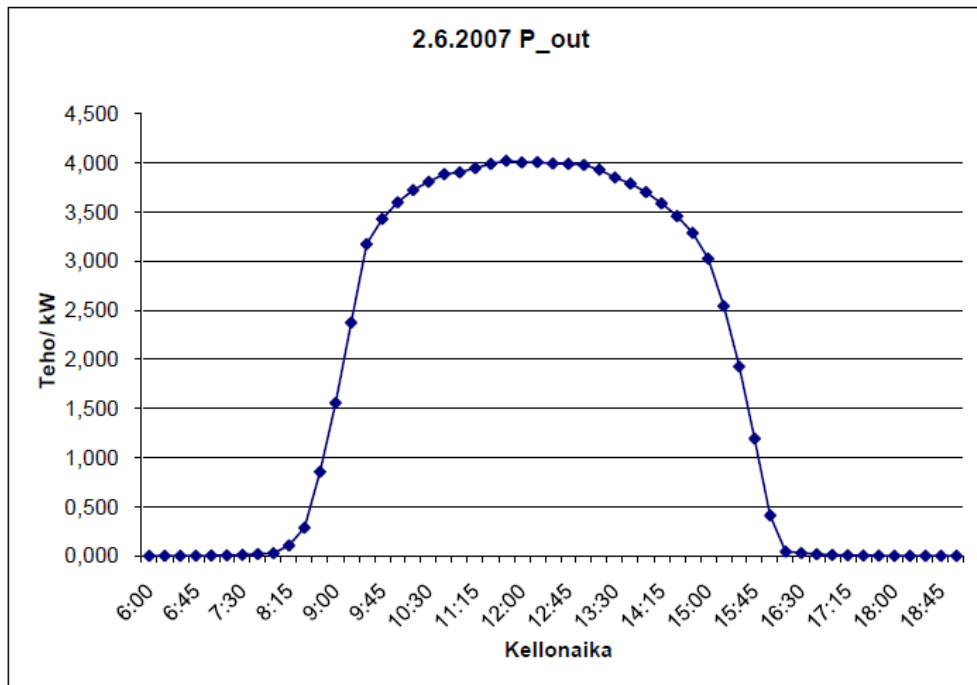
2) Korsnäsin tuulivoimala, Holttinen ym. (1996) s. 18

4) Etelärannikon tuulitilastojen perusteella, Holttinen ym. (1996) s. 28

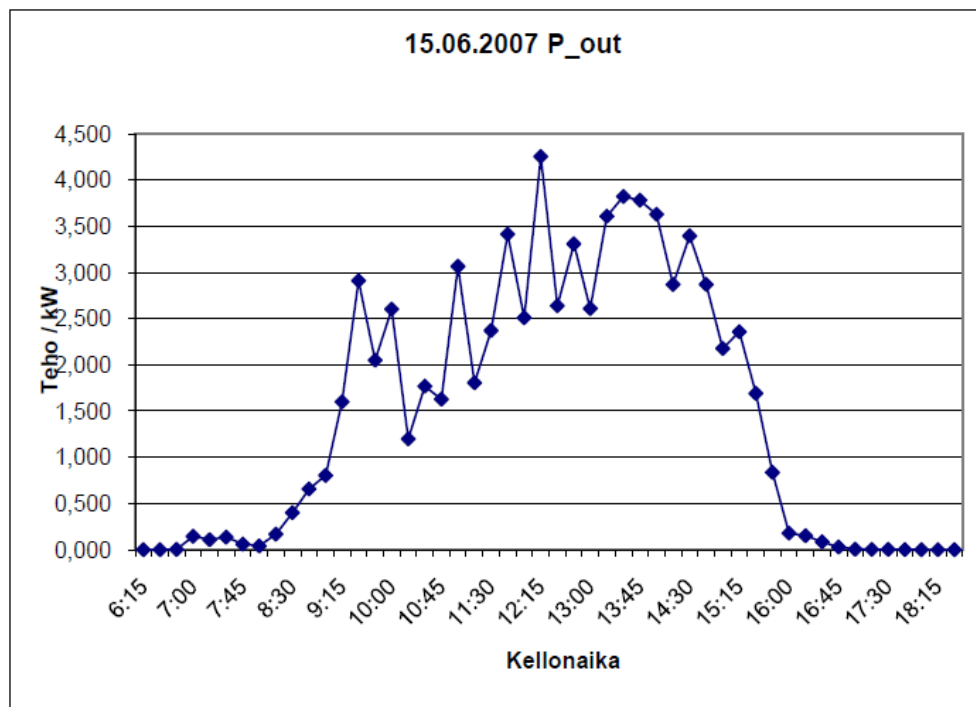
7) TKK:n valotalon tuotantovaihtelu puolipilvisenä päivänä. Schneider (2009) s. 32

8) Tuulimylly on voitava pysäyttää liian suurella tuulennopeudella

Aurinkovoima on säännönmukaista siten, että tuotanto on aina öisin nolla ja kaikkina vuodenaikoina auringonpaisteessa saavutetaan nimellisteho. Vuositasolla vaihtelua aiheuttaa päivän pituuden vaihtelu, auringonvalon tulokulman vaihtelu ja lämpötilan vaihtelu. Näistä lämpötilaan liittyy satunnaisuutta. Lyhyen aikavälin satunnaisuus aiheutuu pilvistä, jotka alentavat valoisuutta ja sähkön tuotantoa. Pilvisyysjaksot vaihtelevat minuuteista vuorokausiin (Kuva 22 ja Kuva 23).

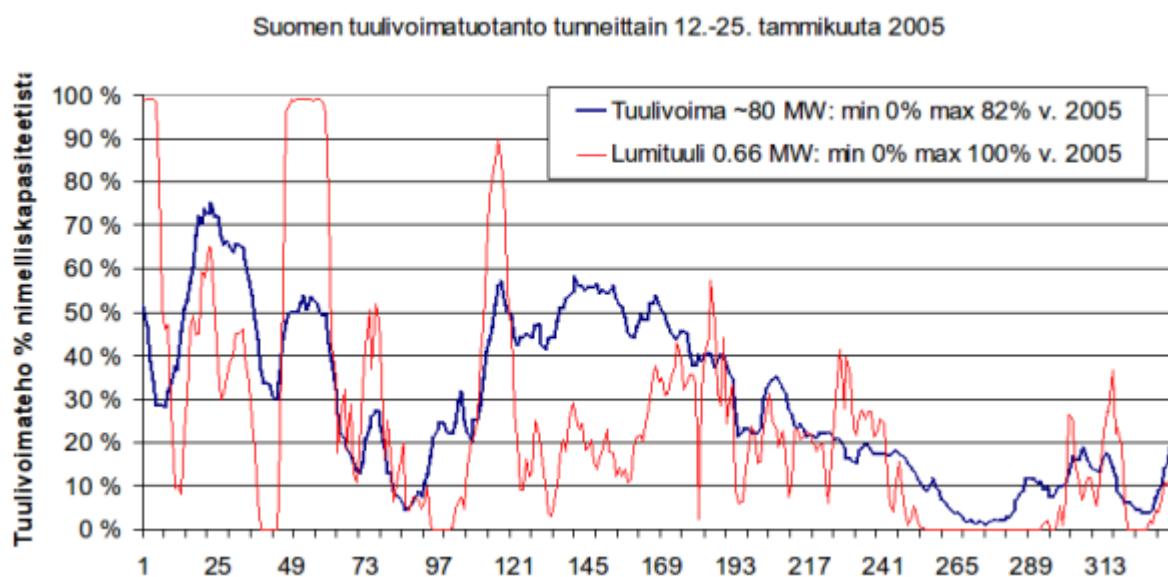


Kuva 22. Aurinkopaneeleiden teho pilvettömänä päivänä TKK:n Valotalossa Otanemessä (Schneider 2009).



Kuva 23. Aurinkopaneelien teho puolipilvisenä päivänä TKK:n Valotalossa Otanemessä (Schneider 2009).

Tuulivoiman tehonvaihtelu on enemmän satunnaista kuin aurinkovoimalla. Tuulivoiman 90 %:n luotettavana tehona pidetään 6 % nimellistehosta (Matilainen 2008 s. 9). Tunnin sisällä on varauduttava 25 %:n säätötehotarpeeseen sekä yksittäisten tuulivoimaloiden pysäyttämiseen myrskyissä. Vuorokauden aikainen vaihtelu on 90 % (Matilainen 2008 s. 8). Vuorokauden aikainen vaihtelu ei ole aurinkovoiman tapaan säännöllistä päivä- ja yövaihtelua. Tuulivoimaloiden hajautus tasoittaa tuulivoimatuotannon tehonvaihtelua valtakunnallisella tasolla (Kuva 24).



Kuva 24. Yksittäisen tuulipuiston (Lumituuli) ja koko Suomen tuulivoimatuotannon tehon vaihtelu kahden viikon aikana tammikuussa 2005. Lähde: Hannele Holttinen, 2007. Tuulivoima 2007 seminaari.

Aurinkopaneelien ja tuulivoimaloiden tuottama sähkö tulisi saada ladatuksi autoakkuihin mahdollisimman lähellä tuotantopaikkaa, jotta tämä sähkö siirto ei kuormittaisi jo muutenkin kuormitettua verkkoa.

Kuluttajan kannalta auton akkujen varastointikäyttö vähentää akkujen tehollista kapasiteettia ja siten auton toimintasädettä. Jotta auto on kuluttajalle käyttökelpoinen, sen minimitoimintasäteen tulisi olla vähintään puolet päivittäisestä ajomatkasta tai vähintään pisimmän yhtenäisen päivittäisen ajorupeaman pituinen. Henkilöliikennetutkimuksen (HLT 2006 taulukko 6_31_tapa.xls/henkilöautoilun jakauma) mukaan henkilöautolla kuljettajana tehdyistä matkoista 80,4 % on pituudeltaan 20 km tai lyhyempiä. Tämän perusteella voi asettaa luotettavan minimitoimintasäteen vaatimukseksi esimerkiksi 40 km. Tämän peruste on, että edestakainen matka tehdään 20 km:n päähän, eikä perillä ole tilaisuutta ladata akkua. Toimintasäteen luotettavuuden takaamiseksi akun varaustilan voi edellyttää olevan esim. 50 km eli toimintavarmuus on silloin 25 %.

Edellä arvioitu luotettavan toimintasäteen minimivaatimus tarkoittaa, että kuluttajan käytössä tulee olla vähintään 50 kilometrin toimintasädettä vastaava 10 kWh:n akkukapasiteetti.

Sähköautolta vaadittavana teknisenä toimintasäteenä pidetään nykyään vähintään 150 kilometriä. Se vastaa 30 kWh:n akuston kapasiteettia. Jos kuluttaja hyväksyy 50 kilometrin päivittäisen toimintasäteen, hän voi luovuttaa sähköntuotannon tasaamiseen 20 kWh:n kapasiteetin. Älykäs latausjärjestelmä voisi toimia siten, että kuluttaja voi itse valita, miten paljon ja milloin hän antaa akkukapasiteettiaan sähköntuotannon käyttöön.

Jos autoa kohden on käytettävissä 20 kWh kapasiteetti sähköverkkoon kytkettynä, yksi auto tarkoittaisi tuulivoiman lataukselle 3,3 kW:n tehoa ja latauksen purulle 1,25 kW:n tehoa. Aurinkovoi- malle vastaavat luvut ovat 2,35 kW lataustehoksi ja 1,8 kW purkutehoksi. Luvut on laskettu oletta- malla, että tuulivoimala tuottaa keskimäärin 30 % maksimitehostaan eli 70 % ajasta tuulivoimala voi seistä. Aurinkopaneelin on laskettu tuottavan keskimäärin 10 tuntia vuorokaudessa. Luvuissa on otettu huomioon, että autot eivät ole koko aikaa kytkettynä sähköverkkoon. Aurinkopaneelin tapauksessa auton olo irti verkosta on arvioitu erikseen valoisana ja pimeänä aikana. Lataus ja purku on ajateltu tapahtuvaksi vuorokauden aikana. Tasaaminen pilvisille päiville alentaa purkute- hoa aurinkopaneelin tapauksessa.

Suomen henkilöautokanta on noin 2,8 miljoonaa autoa, pääkaupunkiseudulla henkilöautoja on 430 000 (tilastovuosi 2009). Edellisen laskelman mukaan ne voisivat tasata tuulivoimaa 9,3 (lata- us) tai 1,4 GW:n (purku) teholla ja aurinkovoimaa 6,6 tai 1,0 GW:n teholla. Vertailun vuoksi todet- takoon, että Helsingin energian kehitysohjelmassa on kaavailtu 1,3 GW:n tuulivoimatehoa, jonka vuosituotanto on 28 % jatkuvasta tehosta. Helsingin energian nykyinen sähkö toimitusteho on luokkaa 0,7 GW.

Kun aurinkopaneelin ominaisteho invertterin ja lataussäätimen hyötysuhde huomioiden on noin 100 W/m², yksi auto voi tasata 24 m² aurinkopaneelipinta-alan sähköntuotantoa. Pinta-ala vastaa pysäköintikentän pinta-alaa yhtä pysäköintiruutua kohden. On kuitenkin huomattava, että vuosi- keskiarvo aurinkopaneelin teholla Suomessa on 15 % paneelin huipputehosta, joka saavutetaan auringon säteilyn teholla 1000 W/m². Marraskuusta tammikuuhun aurinkopaneelin keskiteho on keskimäärin vain 2 % kesäkuukausien tehosta.

Ladattavien sähköautojen akkujen kapasiteetti on siis sellaisessa suuruusluokassa, että sillä voi olla merkitystä sähköntuotannon ja kulutuksen vaihteluiden tasaamisessa. Jos akut ovat kiinteästi

autoihin asennetut, tämä mahdollisuus on olemassa akun tehollisen kapasiteetin ja siten auton toimintasäteen kustannuksella. Se on myös olemassa akkujen käyttöiän kustannuksella, sillä tasauskäyttö lisää akkujen lataus- ja purkukertoja.

Ladattavan sähköauton akut ovat olennainen osa auton kustannusta. Litiumakun hinta on 500–1000 €/kWh. Sähköverkon tasauskäyttöön varattu akkukapasiteetti maksaa siten huomattavan osan sähköauton hinnassa. Litiumfosfaattiakkujen käyttöikä on noin 10 vuotta tai purku-/latauskertojen määränä 3000, kun jäännöslataus on 20 %. 10 kWh:n akun vuosikustannus 5 % korolla on siten 650–1300 € tai päivittäinen korollinen purku-/latauskerran hinta 2,2–4,3 €. Mikäli autoakkuja käytetään sähköverkossa, niiden käyttö on hinnoiteltava, jotta kuluttajaa kohdellaan oikeudenmukaisesti ja jotta kuluttaja suostuu kytkemään auton sähköverkkoon.

Jos latausjärjestelmä perustuu akkujen vaihtoon, sekä kuluttajan että sähköverkon ja -tuotannon ylläpitäjän suhde on toisenlainen. Autoissa olevat akut eivät ole jatkuvasti kiinni sähköverkossa, mutta latausasemilla olevat akut ovat. Akkuja on oltava olemassa periaatteessa kaksinkertainen määrä autoissa ladattaviin akkuihin nähden. Näin ollen sähköverkossa on kytkettynä yhtä paljon akkuja kuin kiinteiden akkujen ratkaisussa, mutta akut ovat verkkoon kytkettynä myös sinä aikana kun autoilla ajetaan.

Kuluttajan palvelun kannalta vaihtoasemilla tulisi olla tarjolla täysiä akkuja. Täysien akkujen tarjoaminen kuluttajille onkin helpompi järjestää vaihtoratkaisussa, sillä verkon tasaukseen tarvittava akkujen lataustilan vaihtelu voidaan hoitaa säätämällä täysin ladattujen akkujen määrää. Jos täysin ladatut akut loppuvat, osittain ladatun akun haitta voidaan hyvittää kuluttajalle hinnoittelun avulla.

Vaihtoakkujärjestelmä on teknisesti parempi akkujen tasauskäytön kannalta kuin kiinteiden akkujen järjestelmä. Vaihtoakkujärjestelmässä myös hinnoittelu muuttuu yksinkertaisemmaksi ja kuluttajan kannalta selkeämmäksi. Vaihtoasemilla on yksittäisiä kuluttajia joustavammat mahdollisuudet sähköön ostoon ja myyntiin, eikä sähköntuotannon tasaustoiminta vaikuta autojen toimintasäteeseen ja käytettävyyteen. Kun sähköön osto ja myynti ovat akkuaseman liiketoimintaa, se voi olla osa vaihtoaseman ansaintalogiikkaa, joka myös tasaa kuluttajille myytävän energian hintaa. Kuluttajalle syntyy myös mahdollisuus harkita, milloin hän ostaa energiaa. Sähkömarkkinoilla tukkuhinnan vaihtelu tapahtuu tiheämmällä syklillä kuin öljymarkkinoilla ja siten myös akkuaseman kuluttajahinta voi vaihdella sen mukaan, onko asemalla tarvetta hankkia kuluttajilta akkukapasiteettia osittain tyhjistäkin akuista vai onko aseman edullisempaa myydä varastossa olevista akuistaan sähköä verkkoon.

Vaihtoakkujärjestelmässäkin akun kytkentä verkkoon ja siten lataus ja purku autoon asennettuna voi olla teknisesti mahdollista. Akkuasemien liiketoiminnan kannalta tämä ei ehkä ole toivottavaa, jolloin asia tulisi säätää hallinnollisella päätöksellä. Kuluttajan kannalta on kuitenkin eduksi, jos hän voi ladata akkuaan myös silloin, kun vaihtoasemien palvelut ovat heikosti saatavilla joko etäisyyden tai vuorokaudenajan vuoksi. Sähköverkon tasaustoiminnon kannalta kuluttajan lataus- ja purkutoiminto on kuitenkin vähemmän merkittävä, koska vaihtoasemille voidaan järjestää tehokkaammat liitännät kuin kuluttajille.

Sekä kuluttajan, akkuvuokraajan, energiantuottajien että julkisen vallan eli verotuksen edun kannalta on välttämätöntä, että kaikissa tapauksissa latausjärjestelmät ovat älykkäitä siten, että sähkön lähde ja lataus- ja purkusykliden ominaisuudet ovat tiedossa. Näitä tietoja tarvitaan sähkö ja sähkö siirron hinnoitteluun, päästöjen optimointiin, akun käytön hinnoitteluun ja verotukseen.

4.3 Liikenteen sähköenergian kustannus

Liikenteen sähköistyminen merkitsee noin 10 %:n sähkön kysynnän kasvua nykytilanteeseen (2010) nähden. Tämän sähkömäärän hankintakustannus riippuu valtakunnan tason energiaratkaisuista. Toisaalta näin suuri kasvu on otettava energiapolitiikassa huomioon.

Sähkön tuotannon talouden perusta on, että ensin tuotetaan halvimalla tavalla tuotettavissa oleva sähkö. Siten sähkön tuotannon lisääminen merkitsee periaatteessa, että lisätuotannon kustannus on suurempi kuin ennen lisäystä vallitseva kustannustaso. Liikenteen energiantuotannon lähtökohtana on myös pidettävä, että liikenteen sähköntarve tuotetaan menetelmillä, joiden ympäristöhaitat ovat nykyistä liikenteen energian kulutusta alhaisemmat ja siten, että liikenteen ilmasto-kuorma alenee.

Sekä teknisesti että poliittisesti pois suljettuja tuotantomenetelmiä ovat vesivoima sekä fossiiliset voimalaitospolttoaineet. Ydinvoimaa ei voi pitää varsinaisesti liikenteen sähköntuotannon keinona, koska ydinvoima ei ole säädettävissä kuin negatiivisesti siten, että kulutuksen vaihtelun ja kiinteän tuotantotehon vaihteleva erotus on myytävissä vientiin. Laajassa mittakaavassa käytössä olevia kysymykseen tulevia tuotantomenetelmiä ovat biopolttoaineet sekä tuuli- ja aurinkovoima.

Biopolttoaineiden tuotantokustannus muodostuu voimalaitoksen investoinnista ja biomassan tuotanto- ja rahtikustannuksista. Suomessa on metsäteollisuudessa kokemusta kaikista biomassaan liittyvistä tuotantovaiheista ja niiden kustannuksista. Kokemus perustuu kuitenkin energiantuotantoon, joka tapahtuu kemiallisen tai mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteena. Esimerkiksi sellun keitto on energiaylijäämäistä, ja sähköä ja lämpöä on kannattanut myydä markkinahintaan ulos sellun tuotantokustannusten alentamiseksi. Vastaava on tilanne hakkeen kanssa. Mekaanisessa metsäteollisuudessa syntyy jätemassaa, joka on myytävissä markkinahintaan. Sekä kuitu- että tukkipuun hakkutähteen korjuu on kustannus, jota markkinahinta ei kata, mutta korjuumarkkina toimii valtion ympäristöperustaisen tuen turvin.

Mekaanista biomassaa poltetaan periaatteessa samanlaisessa voimalaitoksessa kuin fossiilisia polttoaineita. Siten mekaanisen biomassan ja hiilen tai öljyn polton hinnanero muodostuu raaka-aineen hintaerosta voimalaitoksella. Puuperäisen biomassan markkinahintaa energiakäyttöön ei ole tiedossa, koska ensisijaisesti puun kasvu käytetään teollisuuden raaka-aineeksi. Puun laadusta ja käyttökohteesta riippuen teollisuus maksaa puusta 10–25 €/MWh laskettuna puun polttoarvoa kohden. Verrattuna kivihiilen hintaan satamassa Suomessa teollisuus maksaa puuenergiasta 1,5–3 -kertaisen hinnan.

Puun myyntihinnan tulee kattaa kasvatuksen ja korjuun kustannukset. Kun metsän korjuuikä teollisuuden tarpeisiin on noin 50 vuotta, Suomessa ei ole metsää, jota olisi voitu kasvattaa nimenomaan energiantuotantoon halvemmin menetelmin kuin ainespuun kasvatusta. Kuitupuun hintaakaan ei voi pitää luotettavana energiapuun hintana, koska metsien käyttö ja hinnoittelu perustuvat nykyiseen markkinatilanteeseen ja kuitu- ja tukkipuun kysynnän suhteeseen. Kun tukkipuu on kasvatuskustannuksiltaan vaativinta, energiapuun tuotantokustannukset tuskin ovat korkeammat kuin tukkipuulla. Mutta laajassa mitassa eivät ehkä kuitenkaan yhtä halvat kuin kuitupuulla tämänhetkessä markkinatilanteessa, koska kuitupuun kasvatusta hyödyntää yhteisiä resursseja tukkipuun kasvatuksen kanssa.

Biomassan kuljetus on olennainen osa biomassan hinnanmuodostusta, koska metsät kasvavat laajalla alueella ja pääasiassa etäällä asutuksen keskittymistä (Kuva 25). Poltossa saatavan läm-

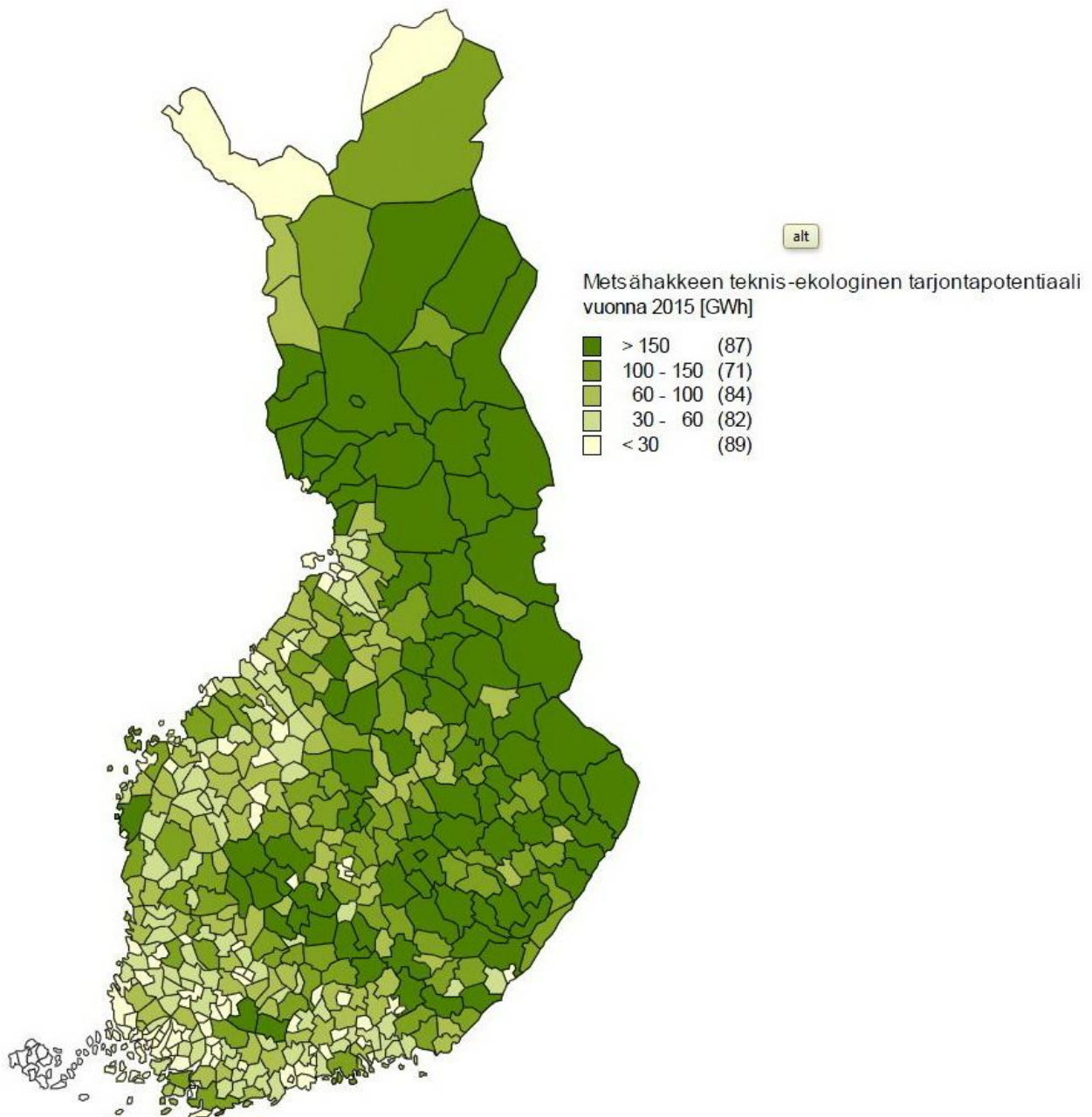
mön hyödyntämisen vuoksi massa on kuljetettava lähelle käyttökohdetta. Puun laajassa polttoainekäytössä keskimääräiset kuljetusmatkat muodostuvat useiden satojen kilometrien pituisiksi, koska asutuskeskittymien läheisimmät metsäalat eivät riitä massan kysyntään.

Energian kuljetustavan valinta on optimointikysymys. Kiinteän polttoaineen, kuten puumassan, ominaispainoa tulisi kuljetuskustannusten alentamiseksi nostaa. Tavoitetiheys on noin 900 kg/m^3 , jolloin saavutetaan auto- ja junakuljetusten kustannusminimi. Puuhakkeen tiheys on noin 300 kg/m^3 , tukkipinon tiheys on noin 500 kg/m^3 . Hakkujäte kannattaa hakettaa lähellä korjuupaikkaa. Sen sijaan polttopuiksi korjattava runkopuu kannattanee kuljettaa tukkina ja hakettaa polttoon sopivaksi käyttöpaikalla.

Kuljetuksen tuotantokustannuksista on vähän julkista tietoa. Kuorma-autokuljetuksista tiedetään markkinahinta. Junakuljetusten tuotantokustannuksista ei ole ollut julkisesti tietoa valtionrautateiden yhtiöittämisen jälkeen. Suomessa ei ole myöskään junarahdin markkinahintaa, koska VR-Yhtymä ei ole saanut rautatierahtiin kilpailijoita, vaikka lainsäädäntö on sen sallinut vuoden 2007 alusta.

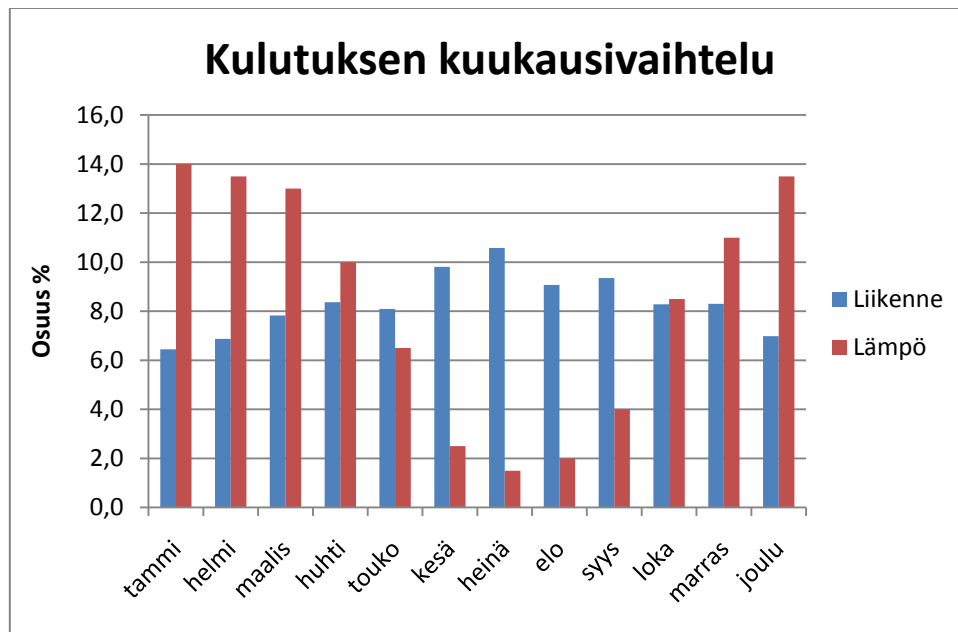
Rautatierahdin tuotantokustannuksia voi arvioida junaliikenteelle muodostettavien yksikkökustannusten avulla laskemalla kaluston investointi- ja ylläpitokustannuksen, henkilö- sekä energiakulut ja rataveron. Näin laskien suomalaisten kaupunkien energiatarpeen mittakaavassa puuhakkeen 300 kilometrin kokojunakuljetus sähkövedolla maksaa noin $1,5 \text{ €/MWh}$ ja vastaava kuorma-autokuljetus $5,9 \text{ €/MWh}$. Laskelmassa on oletettu tarvittavan kaluston olevan yksinomaan biomassakuljetusten käytössä. Junakuljetuksen kustannuksiin on laskettava lisäksi massan kuljetus raiteen luokse kuormauspaikalle sekä jälleekuormauskustannus. Tästä muodostunee noin $0,5 \text{ €/MWh}$. Edellä esitetyt kustannukset eivät sisällä kuljetusyrityksen liiketoiminnan katetta, eli ne vastaavat energia-yrityksen kuljetuskustannuksia omana työnä.

Juna- ja autokuljetuksesta on vielä huomattava, että junakuljetus on hoidettavissa kokonaan tai pääosin sähköenergialla. Autokuljetus on hoidettava polttonesteellä. Junakuljetuksen energian kulutus on $3,4 \text{ kWh}$ kuljetetun energian MWh :a kohden, autokuljetuksessa energiaa kuluu 3 litraa tai 30 kWh kuljetettua biomassan MWh :a kohden.



Kuva 25. Metsähakkeen alueellinen tarjontapotentiaali vuonna 2015 (Iikkanen ym. 2009)

Biomassan käytön kustannus liikenteen sähköntuotannossa riippuu myös siitä, missä määrin biomassaa voidaan käyttää CHP-tuotannossa. Liikenteen energian kysynnällä on vähäinen kuukausivaihtelu, mutta lämmön kysynnällä kuukausivaihtelu on voimakas (Kuva 26). Esimerkiksi Helsinki vähentää huomattavasti omaa sähköntuotantoaan kesäajaksi lämmönkysynnän alentuessa, koska on edullisempaa ostaa sähköä kuin ajaa voimalaitoksen lämpö lauhteeksi mereen. Näin tehdään tilanteessa, jossa Helsingin energian CHP-laitosten polttoaineina ovat kivihiili ja maakaasu.



Kuva 26. Kotimaan henkilöautomatkojen suoritteen ja kaukolämmön kulutuksen kuukausivaihtelu. (HLT 2006: http://hlt.fi/tulokset/ajalliset_vaihtelut.htm ja HELEN 2009: <http://www.energia.fi/fi/kaukolampo/kaukolampo/asiakkuus/kulutus>)

Yllä olevan kuvion mukaisella liikenteen ja lämmön kysynnän kuukausijakaumalla liikenteen 9,2 TWh:n sähkön tuotanto edellyttäisi 23 TWh:n biomassan käyttöä, josta 7,0 TWh saataisiin käytetyksi lämpönä ja 5,7 TWh olisi jäädytettävä ympäristön lämpökuormaksi kun laitoksen häviö on 5 %. Vuositasolla hyötysuhde polttoaineen lämpöarvoon nähden on 70 %. Jos lasketaan biomassan hinnaksi edellä esitetyn perusteella 15 €/MWh noudettavana yleisen liikenteen ulottuvilta ja 2 €/MWh siirrosta rautatien kuormauspaikalle ja tuotuna junalla voimalaitokselle, energian raaka-ainehinta voimalaitoksella on 17 €/MWh. Kun biomassan kustannus jaetaan hyödyksi saadun sähkön ja lämmön osalle, liikenteen sähkön raaka-aineen hinta on 24 €/MWh.

Jos biomassaa halutaan hyödyntää tehokkaammin eli käyttämällä biomassaa ainoastaan CHP-tuotantoon, lämmön tarve määrää sähkön tuotannon määrän. Tällöin biomassan tarve on 12,7 TWh ja tuotetun energian kustannus 18 €/MWh. Mutta muilla keinoin on tuotettava 4,1 TWh lämmityskauden ulkopuolella.

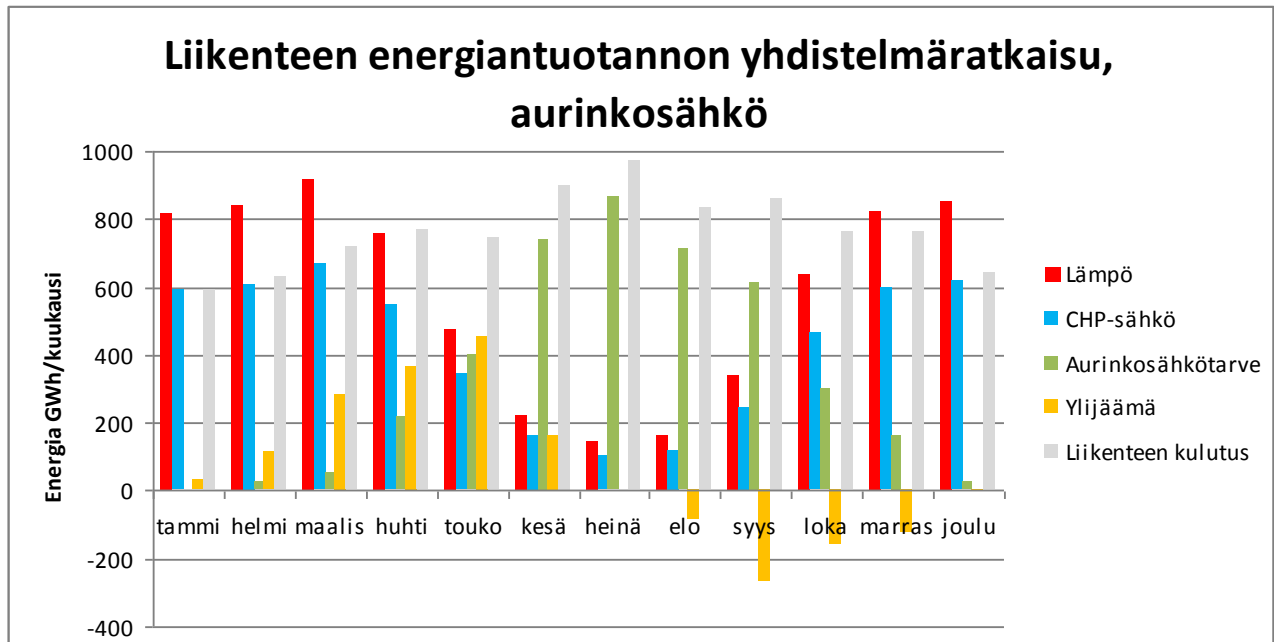
Tuulienergian hinta muodostuu pääasiassa investoinnista ja vähäisessä osin tuulimyllyn ylläpitokuluista. Tuulivoiman markkinahintatasoon vaikuttaa tarvittavan varakapasiteetin kustannus, kun tuulivoimalan kuormana on sähköverkon suora sähkön käyttö. Kuten edellä on todettu, tuulivoima ei tarvitse varavoimaa suoran kuorman tavoin, jos tuulimyllyjä käytetään akkujen lataukseen, jolloin akut tasaavat tuotantotehon vaihtelun.

Tuulivoimalan hintana pidetään 3 €/W ja käytännössä tuotetun sähkön hintatasona 90 €/MWh. Hinta vastaa voimalan 25 vuoden käyttöikää Suomen tuuliolosuhteissa.

Aurinkovoimalan valmistuksen hintatasona pidetään Euroopassa 3 €/W. Kiinassa on sanottu aurinkovoimalan hinnan kehittyvän nopeasti luokkaan 1 \$/W, mikä olisi laitteiden vientihinta Kiinasta. Jos aurinkovoimalan ja sen oheislaitteiden käyttöikä pidetään 25 vuotta ja käytetään Keski-Suomen sääolosuhteita eli 15 % saantoa vuositasona nimellistehoon nähden, aurinkosähkön hinta-

taso on 160 €/MWh eurooppalaisin tuotantokustannuksin mutta 45 €/MWh kiinalaisella vientihinnalla.

Tuuli- tai aurinkovoima eivät näytä kannattavilta pelkkään biomassaan verrattuna. Molemmilla on kuitenkin potentiaalia täydentää biomassan käyttöä kesällä lämmityskauden ulkopuolella, jolloin biomassan CHP-tuotanto ei tuota riittävästi sähköä. Tällainen yhdistelmäratkaisu aurinkovoimaan perustuvana on esitetty kuvassa alla (Kuva 27).



Kuva 27. Liikenteen energiantuotantoratkaisu, jossa on yhdistetty CHP-tuotanto biomassalla ja sähköntuotanto aurinkopaneeleilla. Ylijäämä tarkoittaa CHP-sähkön ja aurinkopaneelien yhteisen sähköntuotannon ja liikenteen sähköntarpeen erotusta. Alkuvuoden positiivinen ylijäämä merkitsee ylituotantoa. Negatiivinen ylijäämä tarkoittaa, että kyseisinä kuukausina liikenteen sähköä on saatava muusta lähteestä. (Henkilöautosuoritteiden kuukausijakauma.xls)

Vaikka pelkkä biomassalla olisikin edullinen ratkaisu liikenteen koko sähköntuotantoon, se ei ehkä tule kysymykseen siksi, että ei ole tarkoituksenmukaista käyttää biomassaa kesällä lauhdetuotantoon. Hukkaan menevän biomassan määrä on lähes yhtä suuri kuin tuotannosta saatava lämpö, ja vesistöjen lämpökuorma on myös ympäristöhaitta.

Yhdistelmäratkaisussa lähtökohtana on lämmön kysyntä. Lämpö tuotetaan CHP-laitoksella, jolla tuotetaan sähköä sillä teholla, joka lämmön tuotannon yhteydessä on teknisesti mahdollinen ilman lauhdutusta. Laitoksen lämmöntuotantoteho on skaalattu tammikuun liikenteen sähköntarpeen perusteella. Liikenteen sähkön tarpeen ja lämmön rinnalla tuotetun sähkön erotus tuotetaan aurinkovoimalla. Aurinkovoiman teho on skaalattu suurimman liikenteen sähköntarpeen eli heinäkuun mukaan, jolloin CHP-sähkön tuotantoteho on alhaisimmillaan.

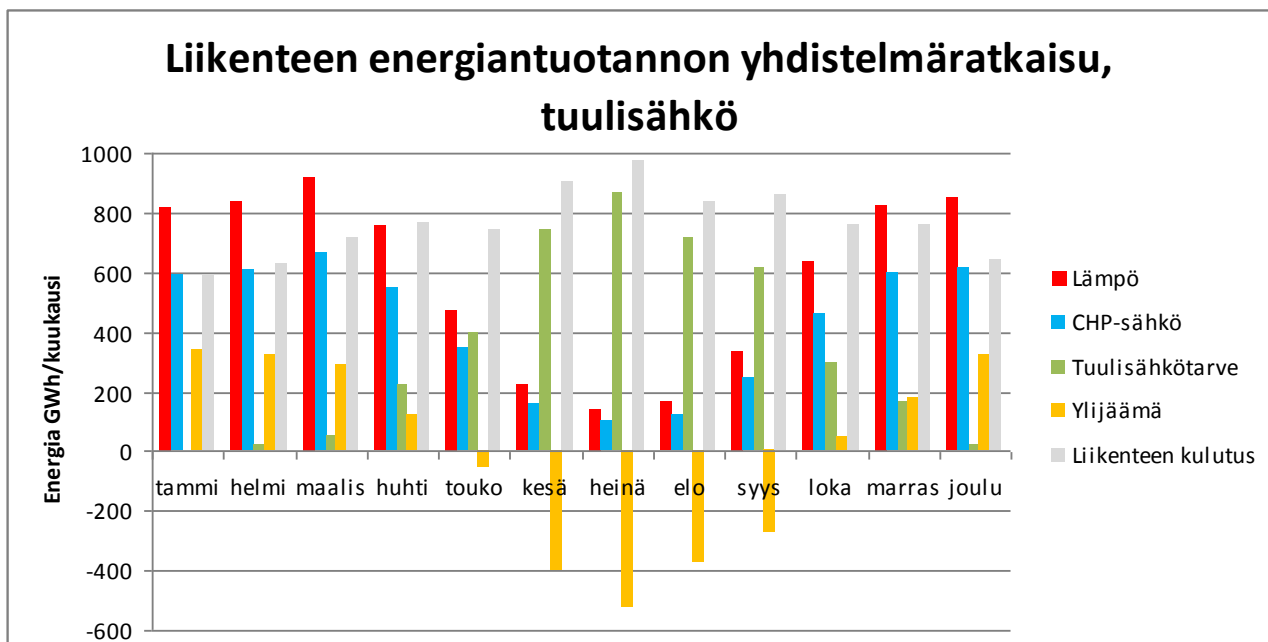
Järjestely tuottaa ylimääräistä sähköä keväällä 1,4 TWh (Kuva 27, oranssi pylväs), mutta syksyllä järjestelmässä on vajausta 0,64 TWh. Nettotulos on, että järjestelmän ylijäämä on 0,76 TWh.

Ratkaisun kustannus liikenteen tarvitsemalle sähkölle on 90 €/MWh eli sama kuin pelkän tuulivoiman ratkaisu, kun biovoiman kustannus on 18 €/MWh ja aurinkosähkön 160 €/MWh sekä ylijää-

mäsähkön markkinahinnaksi on laskettu 50 €/MWh. Liikenteen sähkö asettuu 50 €/MWh markkinahinnan tasolle, jos aurinkovoiman kustannus on 85 €/MWh eli noin 2 €/W. Laskelmassa oletetaan, että lämpö myydään polttoaineen hintaan 18 €/MWh.

On selvä, ettei esitetty yhdistelmäratkaisu ole yhtä edullinen kuin mikä hyvänsä markkinasähköön perustuva ratkaisu, jos markkinasähkön hinta on vähemmän kuin aurinkosähkölle laskettu 160 €/MWh.

Yhdistelmäratkaisu voidaan tehdä myös tuulivoimalla, jos tuulivoiman yli- ja alijäämät voidaan tasata markkinasähkön hinnalla. Tuulivoiman pienemmän kuukausivaihtelun vuoksi järjestelmän tasaustarve vuoden aikana kasvaa. Kun tuulivoima mitoitetaan niin, että se kattaa vuoden aikana CHP-tuotannosta puuttuvan sähkön määrän, liikenne tarvitsee suurimmillaan 0,53 TWh tasausta heinäkuussa. Talvikuukausina ratkaisu tuottaa ylijäämäsähköä, enimmillään 0,34 TWh tammikuussa. Liikenteen sähkön hinnaksi tulee edellä esitetyin hintatiedoin 50 €/MWh (Kuva 28).



Kuva 28. Liikenteen energiantuotantoratkaisu, jossa on yhdistetty CHP-tuotanto biomassalla ja sähköntuotanto tuulivoimalla. (Henkilöautosuoritteiden kuukausijakauma.xls)

Sähköntuotannon kokonaiskuormituksen kannalta tuulivoimaratkaisu on huonompi kuin aurinkovoima, koska tasaus ei kompensoi yleistä CHP-tuotantoon liittyvää tasaustarvetta, vaan lisää sitä. Ratkaisevaa kokonaisedullisuudelle on tuulisähkön tasauksen markkinahinta. Jos myynti- ja ostohinnat poikkeavat toisistaan, se vaikuttaa liikenteen sähkön hintaan. Yhdistelmäratkaisu on kuitenkin kokonaisuudessaan edullisempi kuin pelkkä tuulivoimaratkaisu.

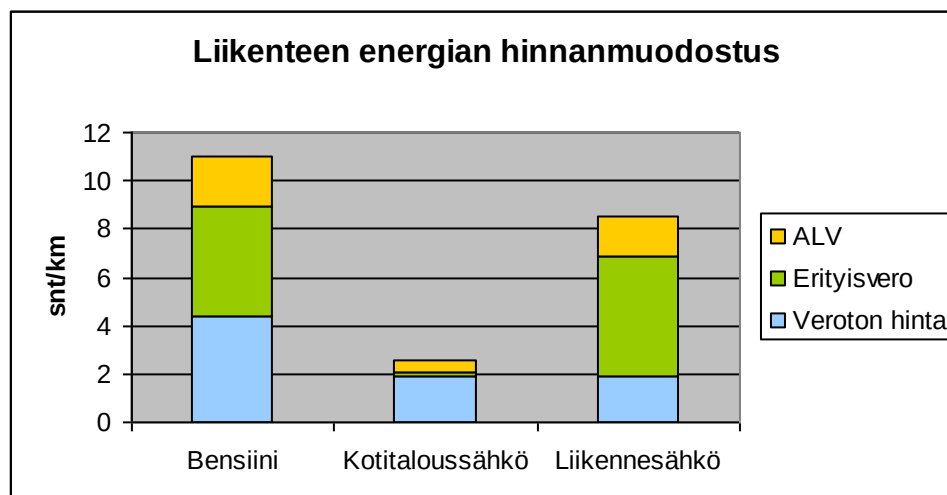
Liikenteen tarvitseman sähkön määrä on niin suuri, että sillä on luultavasti merkittävä vaikutus sähkön hintatasoon Suomessa. Se voi vaikuttaa myös sähkön tuotantokustannuksiin Suomessa. Tämän arvioinnissa on tehtävä oletuksia energiamarkkinoiden tulevasta kehityksestä sekä Suomessa että kansainvälisesti. Suomen energiantuotanto riippuu fossiilisten polttoaineiden ja uraanin sekä ydinvoimalaitosten osalta globaaleista markkinoista ja sähkön markkinahinta lähialueiden sähkömarkkinoihin liittyvistä ratkaisuista.

4.4 Liikenteen sähkön hinnoittelu

Liikenteen energian öljyosuuden vähentämisen tarkoitus ei ole muuttaa liikenteen kuluttajahintaa, mutta kuluttajahinnan muutoksella voidaan ohjata siirtymistä fossiilisista polttonesteistä sähköön. Valtion ohjauskeinoin voidaan vaikuttaa sekä ajoneuvojen että energian verotukseen. Muutamissa valtioissa on myös subventoitu sähköajoneuvojen hankintaa. Ajoneuvojen verotuksen ohjausmahdollisuudet ovat vähäiset tai olemattomat sen vuoksi, että verottomanakin sähköautot ovat alkuvaiheessa kalliimpia kuin polttomoottoriautot, mikä johtuu suurelta osin akkujen kustannuksesta. Energian verotuksessa sen sijaan on merkittävä ohjauksen mahdollisuus.

Liikenteen energia polttonesteinä maksaa nykyisin (2010) Suomessa ja Euroopassa noin 0,16 €/kWh, joka tarkoittaa henkilöautoille noin 0,11 €/km. Kotitaloussähkön hinnan ollessa Suomessa 0,13 €/kWh sisältäen sähkön siirron ja verot, ladattavan sähköauton energian hinnaksi kuluttajalle tulee 0,026 €/km, noin neljännes polttonestekäyttöisen auton energian hinnasta. Polttoaineneiden kuluttajahinta sisältää runsaasti veroja, joiden osuus Suomessa on noin 60 %. Tähän sisältyy polttoainevero, joka on noin 40 % kuluttajahinnasta. Polttoaineen veroton hinta on siten 0,044 €/km. Sähkön kuluttajahinta sisältää veroa huomattavasti vähemmän. Arvonlisäveron lisäksi hinnassa on sähkövero, 1,07726 snt/kWh, joka on noin 8 % sähkön kuluttajahinnasta keväällä 2010. Yhteensä sähkön kuluttajahinnassa on veroja noin 27 % ja sähkön ja sähkön siirron veroton kuluttajahinta on 0,017 €/km (Kuva 29).

Liikenteen verotus on ensisijaisesti fiskaalista, eli vero kerätään valtion yleisiin menoihin. Valtiontalouden kannalta liikenteestä tulisi kerätä veroja euromääräisesti yhtä paljon riippumatta liikenteen energiaratkaisusta. Nyt veroa kerätään polttonesteestä 0,066 €/km. Jotta verokertymä sähköautoista olisi sama kuin polttomoottoriautoista, liikennesähkö tulisi hinnoitella maksamaan noin 0,085 €/km (Kuva 29). Tällöin sähköauton käytön hintaetu kuluttajalle olisi 0,025 €/km eli 23 % nykyistä ajoenergiaa vähemmän. Keskimääräisen 18 000 km:n vuosisuorituksen perusteella kuluttajan kustannusetu on silloin 450 € vuodessa.



Kuva 29. Liikenteen energian hinnanmuodostus. Liikennesähkössä valtion verotulot ovat samat kuin nyt polttonesteen hinnan verotuksesta.

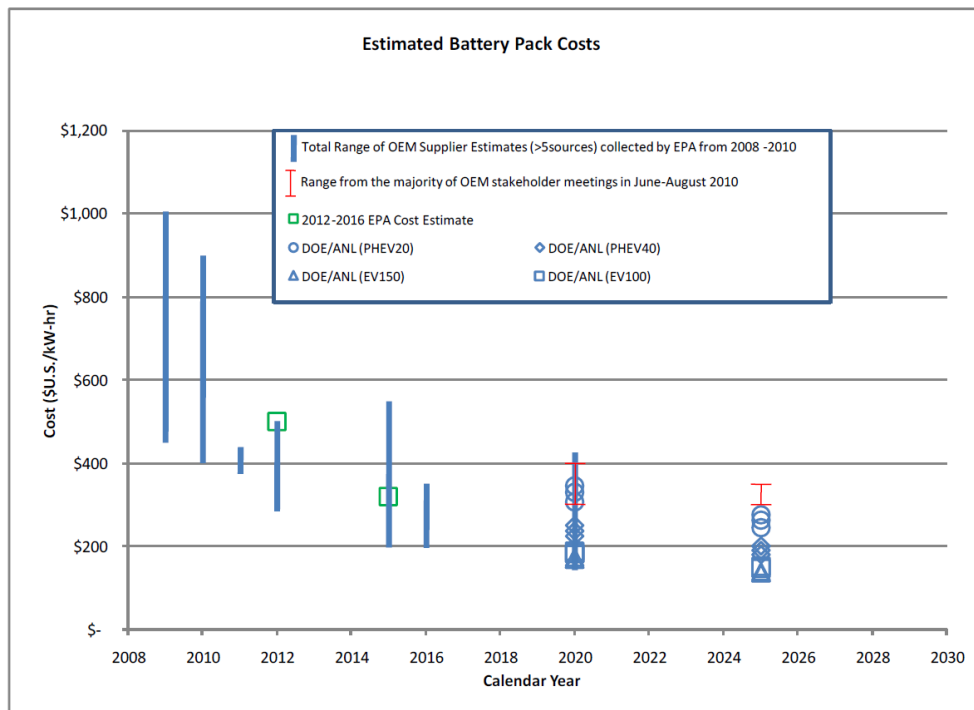
Valtion energiaverokertymä autoa kohden on nyt 1 190 € vuodessa. Kun sähköauto ladataan kotitaloussähköllä, verokertymä on 126 € vuodessa. Tämä merkitsee, että valtio tulee tukeneeksi sähköautoilua keskimäärin 1 060 eurolla vuodessa sähköautoa kohden. Kun tämän lisäksi lasketaan

kuluttajan 450 € vuosietu alhaisemmasta energian hinnasta, kuluttajan kokonaishyöty on 1 510 €/vuosi.

Sähköön siirtymisen tuoma kuluttajan kustannusetu on 19 vuoden käyttöiän perusteella 8 600 €, jos valtio kerää liikenteen energiasta saman euromääräisen veron kuin nyt polttonesteestä. Tämän kuluttajan edun nykyarvo diskontattuna 5 % korolla on 5 470 €. Jos valtio luopuisi liikenteen energian verotuksesta kokonaan esimerkiksi kuluttajan hankkiman ensimmäisen sähköauton osalta tukeakseen siirtymistä sähköautoihin, kuluttajan etu 19 vuoden ajalta olisi 18 270 €, jonka nykyarvo diskontattuna on 11 680 €.

Kun sähköauton hinta muodostuu karkeasti siten, että auto ilman akkuja maksaa suunnilleen polttomoottoriauton verran, akkukustannuksen voi ajatella olevan osa energiakustannusta. Polttonesteen ja sähköenergian 450 €/vuosi hinnanerotuksella 10 vuotta tai 3000 latausta kestävä akku saa 5 % korolla maksaa 3 500 €. Kotitaloussähkön hinnalla kuluttajan hyöty vastaa 11 700 € arvoista akustoa. Käytännössä henkilöauton akustoa ei saa energiakustannusten hyödyllä kummassakaan tapauksessa, sillä 150 kilometrin toimintasäteeseen riittävä 30 kWh:n akusto maksaa tällä hetkellä 15 000–30 000 €.

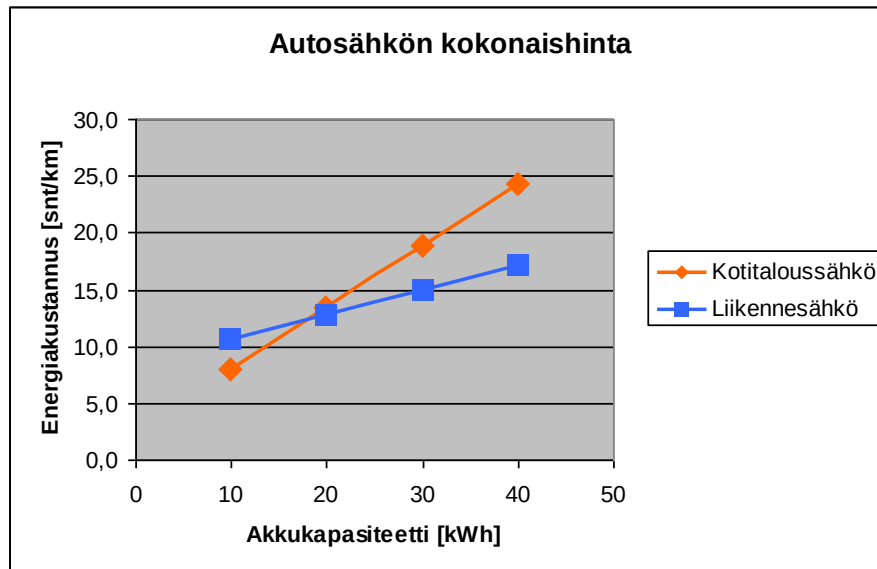
Analyttikoiden ennusteet akkujen hintakehityksestä alihankintamarkkinoilla ovat 300–400 \$/kWh vuonna 2015 ja 200–300 \$/kWh vuonna 2025 (Kuva 30), joten akkujen hinnat laskevat. Ennustettu alhaisinkaan hinta ei riitä siihen, että tämänhetkinen polttonesteen ja sähkön hintaero kattaisi riittävän akuston kustannuksen, jos liikennesähköä verotetaan euromääräisesti yhtä paljon kuin liikennepolttonestettä. 30 kWh:n akustolla kilometrin energiakustannus on 15 snt kun polttonesteellä kustannus on 11 snt/km (Kuva 31).



Kuva 30. Litiumakkujen ennustettu hintakehitys (EPA 2010).

Ladattavan sähköauton energiakustannuksia voi arvioida siten, että aluksi ladattavan sähköauton kotitaloussähkö ei sisällä liikenteen energiaveroa, mutta akut ovat kalliita. Tulevaisuudessa liiken-

teen energiaa verotetaan kuten nykyään, mutta akut ovat halvempia. Kuluttajan kustannukset ovat nyt ja tulevaisuudessa suunnilleen samat, noin 13 snt/km, kun auton akkukapasiteetti on 20 kWh. Tämä perusteella kuluttajan kannattaa aluksi tyytyä pieneen akkukapasiteettiin ja lyhyeen toimintasäteeseen ja pidentää toimintasädettä vasta kun akkujen hintataso laskee. Vaikka liikennesähkön verotus nousisikin nykyisen liikenne-energian verotuksen tasolle, akkujen hinnanlasku tasoittaa kuluttajan maksamaa energian kokonaiskustannusta (Kuva 31).



Kuva 31. Ladattavan sähköauton energian kokonaishinta, joka sisältää energian ja akun kuoletuksen. Energian veroton hinta on nykyinen 1,9 snt/km. Kotitaloussähkö sisältää nykyiset kotitalouden sähköön kuuluvat verot 0,7 snt/km ja akun ominaishinta on 750 €/kWh. Liikennesähkö sisältää saman euromääräisen veron kuin polttoneste nyt eli 6,6 snt/km ja akun ominaishinta on 300 €/kWh. Akun käyttöaika on 10 vuotta ja korkokanta 5 %.

Jos sähköautojen käyttöikä pysyy nykyisten autojen tapaan 19 vuodessa, jokainen auto tarvitsee elinaikanaan kaksi akustoa. Lähivuosien aikana hankitut ensimmäiset akut ovat kalliimpia kuin toiset akut, joten ladattavan sähköauton energiakustannus tulee akkujen osalta laskemaan. On kuitenkin mahdollista, että muista akkukäyttöisistä laitteista tuttu ilmiö voi vaikuttaa myös automarkkinoille. Useiden akkukäyttöisten laitteiden eliniäksi on muodostunut akun elinikä, koska uuden akun kustannus on suuri siihen nähden, että ostaisi kokonaan uuden ja kehittyneemmän laitteen. Vaikka sähköautot ovat yksinkertaisempia ja rakenteiltaan kestävämpiä kuin polttomoottoriautot, akkujen rajallinen kestoikä ja pysyvästi korkea hinta suhteessa auton hintaan voivat johtaa autojen käyttöajan lyhenemiseen ainakin ensimmäisten, ominaisuuksiltaan kehittymättömien sähköautojen kohdalla.

Suomen nykyisen lainsäädännön tilanteessa akkujen latausjärjestelmä vaikuttaa sähköautoilun verokohteluun. Kun akut ovat kiinteä osa sähköautoa, akkuja verotetaan ajoneuvoverolla. Jos akut ovat vaihdettavia, akkujen verotus siirtyy energiaverotukseen, mikäli sähköauto myydään ilman akkuja ja akuista maksetaan vuokraa energian myyjälle osana energian hintaa. Tällä hetkellä (2010) kuluttajalle on edullisempaa ostaa akut auton mukana, koska auton kuluttajahinnassa on veroja noin 40 % ja energiassa 60 %.

Sähköautojen yleistymisen kannalta auton osto ilman akkuja on eduksi. Kuluttajan hintamielikuva muodostuu enemmän kauppahinnasta kuin elinaikaisista käyttökustannuksista, joiden ennustami-

seen liittyy epävarmuutta. Ilman akkuja myytävän uuden sähköauton kuluttajahinta olisi todennäköisesti polttomootoriautoa halvempi, vaikka autoverotus olisi sama polttomoottori- ja sähköautoilla. Pitkällä aikavälillä on lisäksi todennäköistä, että sähköautojen tuotantokustannukset tulevat yksinkertaisen rakenteen vuoksi olemaan alhaisemmat kuin polttomootoriautoilla.

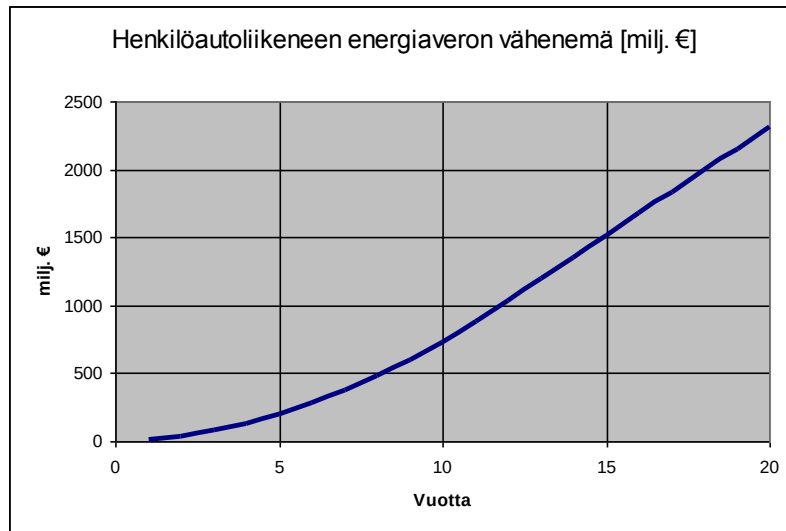
Sähköauton energian hinnoittelussa tulee ottaa huomioon myös energian tuotanto. Nykyinen sähkön hinta ja siihen perustuva edellä oleva arviointi perustuvat tämän hetken tuotantorakenteeseen sekä Suomessa pohjoismaiseen Nordpoolin markkinahintaan. Jos sähkö tuotetaan yöaikaan muun sähkön kulutuksen alenemisesta vapautuvalla säätövoimakapasiteetilla, liikenteen sähkö tuotetaan kalliimmalla tuotantomenetelmällä kuin markkinoilla oleva sähkö keskimäärin. Oikeudenmukaista lienee silloin hinnoitella liikennesähkön tuotantokustannukset kattava hinnanosuus korkeammaksi kuin muulla sähköllä. Muussa tapauksessa sähköntuotannon keskimääräinen yksikkökustannuksen nousu jakautuu kaikkien sähkön käyttäjien maksettavaksi eli tapahtuu tulonsiirto kaikilta sähkön käyttäjiltä autoilijoille.

Vastaavaa periaatetta tulee soveltaa, mikäli liikenteen käyttöön rakennetaan uutta tuotantokapasiteettia. Kevään 2010 arvioiden mukaan mittava tuulivoiman lisärakentaminen merkitsee, että tuulisähkön tuotantokustannus on noin kolminkertainen vallitsevaan markkinahintaan nähden. Jos tuulivoimaa rakennetaan liikenteen tarpeeseen, tulee liikennesähkö hinnoitella tuulivoiman todellisen tuotantokustannuksen perusteella. Sama koskee aurinkosähköä. Edelleen liikennesähkön ja muiden kuluttajien oikeudenmukaisen kohtelun kannalta liikennesähkön kuluttajille on myös laskettava hyvitystä siitä, jos liikenteen sähköjärjestelmä akkuineen hyödyttää muuta sähköntuotantoa esimerkiksi vähentämällä kalliin ja päästöjä tuottavan säätövoiman käyttötarvetta.

Edellä olevasta käy selväksi, että liikennesähkön hinnoittelu erikseen muusta sähkön myynnistä edellyttää autojen älykästä latausjärjestelmää. Muutoin on mahdotonta tietää, miten paljon sähköä on kulutettu lataamalla sitä autoihin ja miten lataustoiminta vaikuttaa sähkön tuotantoon ja hankintaan. Edellä lasketut hintaesimerkit osoittavat myös sen, että ilman älykästä latausjärjestelmää valtio tukee sähköautojen käyttö verohelpotuksella automaattisesti ilman erillistä tukemispäätöstä.

Kysymys siitä, onko kokonaisuuden kannalta tarkoituksenmukaista, että valtio tukee sähköautojen yleistymistä verohelpotuksilla, tulee ratkaista toisaalta poliittisena päätöksenä, toisaalta perustuen ulkoisvaikutuksiin, joita sähkön käyttö polttonesteiden sijasta liikenteen energiana aiheuttaa. Yksi mahdollinen ulkoisvaikutus on ajoneuvoakkujen käyttö sähköntuotannon tasauksessa. Erityisesti vaihtoakkuperiaatteessa sähköverkon kuorman ja sähköntuotannon tasausvaikutus voi olla taloudellisesti hyvinkin merkittävä tekijä ajoneuvoihin myytävän sähkön hinnanmuodostuksen kannalta.

On myös ratkaistava, miten kauan on tarkoituksenmukaista käyttää sähköautoon siirtymistä suosivaa vero-ohjausta. Alkuvaiheessa vero-ohjauksella ei ole suurta merkitystä, mutta kuuden vuoden kuluttua sähköautojen markkinoille tulosta liikennesähkön verottomuus ylittää 10 % osuuden henkilöautoliikenteen energiaveron tulosta, jos sähköautojen oletetaan yleistyvän luvussa 4.2.3 esitetyllä tavalla (Kuva 32). Fossiilisten polttoaineiden kansainvälinen verokohtelu mm. päästökaupan osana sekä maaöljyn jalostustuotteiden kuluttajahinnan kehitys voivat johtaa hyvinkin lyhyessä ajassa siihen, ettei sähköauton kilpailukyvyn kannalta ole tarpeen jatkaa alennettua verokohtelua.



Kuva 32. Henkilöautojen energiasta perittävien verotulojen vähenemä, kun ladattavien sähköautojen määrä yleistyy 150 000 auton vuosimyyntiin 12 vuodessa ja autojen käyttämän sähkön verotus on sama kuin kotitaloussähköllä.

5 Sähköinen liikkuminen ja liikenteen tulevaisuudenkuva

5.1 Kulkuneuvotekniikan kehitysmahdollisuuksia

Kulkuneuvojen energiankulutus ei ole muuttunut merkittävästi nykyisin käytössä olevien teknologioiden vakiinnuttua. Tätä selittää kulkuneuvon energiankulutuksen kuvaaminen Davisin yhtälöllä tai sen muunnelmilla, jotka jakavat kulkuneuvon energiankulutuksen kiinteään sekä massasta, nopeudesta ja nopeuden neliöstä koostuviin osiin. Kulkuneuvon massa on ratkaisevassa osassa energiankulutuksessa, ja henkilökuljetuksessa hyötykuorman osuus moottoriliikenteessä on hyvin pieni, noin 10 %:n luokassa.

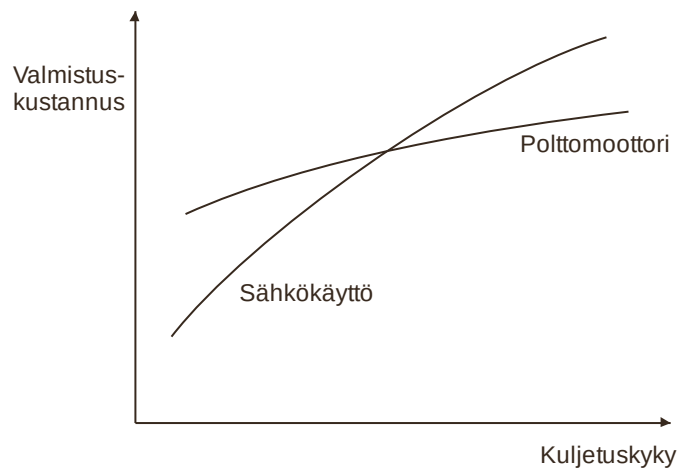
Sekä polttomoottori- että sähkömoottoritekniikassa on saavutettu perusinnovaatioiden jälkeen hyötysuhteen paranemista tarkentuneen valmistus- ja säätötekniikan ansiosta. Mutta vastapainoksi kulutusta on lisätty muiden ominaisuuksien vuoksi. Ilmastoinnista on tullut yksi viimeisimpiä energian kulutuksen lisääjiä. Mutta merkittävä lisääjä on ollut autoihin liittyvä mielikuva. Mielikuvasyistä autojen koko ja massa kasvavat ja kuluttajat ovat mieltyneet mielikuvaratkaisuihin, jotka lisäävät energiankulutusta. Tällaisia ovat varustelu yleensä, mutta erityisesti suuret moottorit ja leveät renkaat.

Autojen energiankulutuksen kehitystä lienee ohjannut ensisijassa energian hinta. Esimerkiksi USA:n automarkkinoilla yleistyneiden ”katumaastureiden” menekki romahti hyvin nopeasti kun polttoaineen hinta nousi 2000-luvun ensimmäisen vuosikymmenen lopulla USA:n talouskriisin yhteydessä. Yksittäinen esimerkki on sotilasajoneuvo HMMWV:n siviiliversion Hummer H1:n kohtalo. Kun kuluttajat halusivat ostaa sotilasajoneuvoa siviilikäyttöön, ryhdyttiin valmistamaan erillistä siviiliversiota. Miehisyyttä uhoavan mallin myynti tyrehtyi ja sen valmistus lopetettiin 2006 polttonesteiden hintojen noustua. Brändin omistaja, General Motors, ajautui vaikeuksiin eikä rahoittanut yli 2500 kg painavan ja 25 litraa sadalle kilometrille kuluttavan auton kehittämistä USA:n autoille määrättyjen ympäristönormien mukaiseksi.

Sähkökäyttöisten ajoneuvojen kohdalla energian hinta tuskin ohjaa kehitystä, koska sähköä on teknisistä syistä aina saatavilla halvemmalla kuin polttonesteitä. Ajoneuvojen sähkön kulutuksen alentamisen paineet tulevat tarpeesta pidentää toimintasädettä ja alentaa akkuihin sitoutuvaa pääomaa. Jos ajatellaan nykyisenkaltaisen auton 150 kilometrin toimintasädettä sähköautona, energian kulutuksen puolittaminen tuplaa toimintasäteen tai alentaminen kolmasosaan kasvattaa toimintasäteen käytännössä samaan kuin polttomoottoriautojen tavallinen toimintasäde on nykyään. Energian kulutuksen alentaminen on todennäköisesti helpompaa kuin akkuteknologian kehittämisen siten, että kapasiteetti kasvaa 2–3 -kertaiseksi sekä tilavuuteen, massaansa että hintaan nähden.

Kun sähkötoiminen ajoneuvo on polttomoottorikäyttöön nähden absoluuttisesti yksinkertaisempi ja tuotantotekniikoiden osalta edullisempi, ajoneuvojen reaalihintaa tulee todennäköisesti laskemaan verrattuna nykyisiin autoihin. Teknisten laitteiden markkinat ovat usein kehittyneet siten, että reaalihinnan lasku on johtanut ominaisuuksiltaan laajentuneeseen mallivalikoimaan ja tilanteeseen, jossa kuluttajat hankkivat useita eri tuoteversioita sen sijaan, että aiemmin on hankittu vain yksi, jolla on pyritty kattamaan kaikki käyttötarpeet. Vastaava kehitys ajoneuvoissa tarkoittaa, että kotitaloudessa olisi enemmän ajoneuvoja kuin enintään yksi aktiivista ajokortti-ikäistä henkilöä kohden. Ajoneuvot olisivat erilaisia ja sama henkilö käyttäisi eri ajoneuvoa eri tarkoituksiin.

Sähköisen ajoneuvorakenteen etuja ovat mekaaninen yksinkertaisuus ja hyvä tehon ja toimintojen suhde tilavuuteen ja massaan. Polttomoottoriautoon nähden huonompaa on energiavaraston heikko suorituskyky verrattuna polttoainesäiliöön. Ajoneuvon energiatalouden kehittämisessä sähkötekniikalle ominainen alhainen massa tarjoaa lähtökohdan ajoneuvon oman massan alentamiseen. Rakenteen yksinkertaisuus ja siten valmistamisen alhaiset kustannukset tekevät taloudellisesti mielekkääksi suunnitella keveitä ajoneuvoja siten, että kuljetuskapasiteetin aleneminen on kuluttajan kannalta hyväksyttävää. Eli ajoneuvojen kuljetuskyky ja valmistuskustannus seuraavat toisiaan toisin kuin polttomoottoriautoilla (Kuva 33).



Kuva 33. Periaate polttomoottori- ja sähkökäyttöisen ajoneuvon tuotantokustannusten ja kuljetuskyvyn suhteesta.

5.2 Liikkumisen energiantarve

Liikkumisen energiantarvetta voi arvioida joko kokemusperäisesti mittauksin tai teoreettisesti ns. Davisin kaavalla, jolla kuvataan liikkeessä olevan kulkuneuvon kulkuvastusta. Davisin kaava on tehty 1900-luvun alussa rautatieliikenteen kokemusperäisten energiankulutustietojen perusteella, mutta kaavan neljään termiin jaettua rakennetta käytetään edelleen arvioitaessa mm. kiskokaluston energiankulutusta. Davisin kaavan perusmuoto on:

$$\{1\} \quad F = A + B \times m + C \times V + D \times V^2$$

jossa:

A = kiinteä kulkuvastus, joka aiheutuu kulkuneuvon omasta rakenteesta, kuten moottoreiden ja vaihteistojen häviöistä

B = ajoneuvon massasta aiheutuva kulkuvastus, joka aiheutuu mm. pyörien ja akselilaakereiden vierintäkitkasta

C = nopeudesta aiheutuva kulkuvastus, joka aiheutuu kiskokalustossa mm. pyöräkerän siniliikkeestä radalla

D = ilmanvastuksesta aiheutuva kulkuvastus, joka muodostuu poikkipinta-alasta ja ilmanvastuskertoimesta sekä ilman tiheyden puolikkaasta

Autojen kulkuvastuslaskelmissa käytetään usein vain toista ja neljättä termiä. Ensimmäisen termin pois jättämisellä sivuutetaan moottorin ja voimalinjan sisäiset vastukset, jotka voidaan ajatella otetuksi huomioon auton yleisenä hyötysuhteena. Kolmannen termin pois jättämisestä voi perustella tieliikenteen osalta sillä, ettei renkaan ja tienpinnan kontaktissa ole raideliikenteen tapaista laippa-

pyörän ja kiskon välistä vaikutusta tai muuta merkittävää vaikutusta, joka muuttaa vierintävastusta nopeuden muuttuessa.

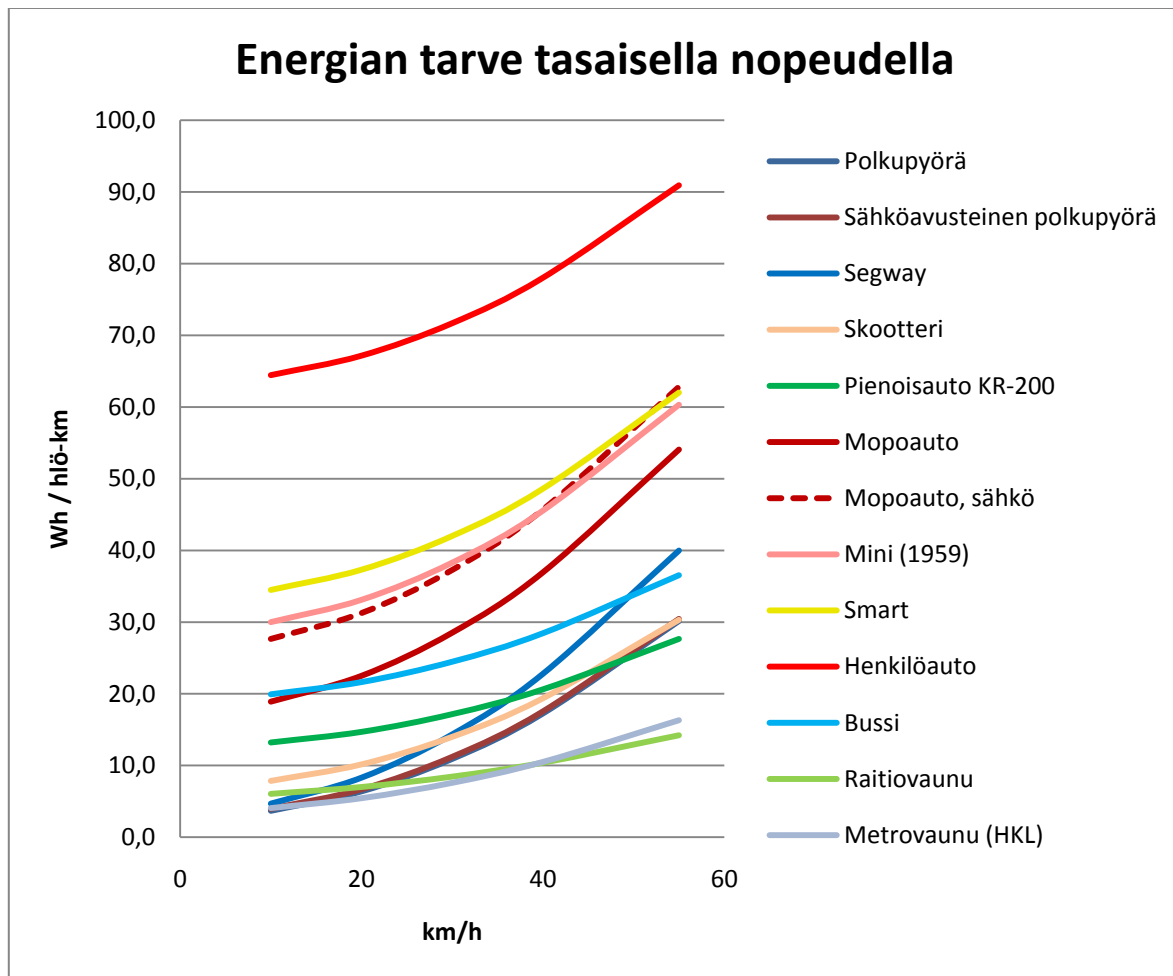
Seuraavassa on kuvattu liikenteen energiankulutusta erilaisin henkilöliikenteen kulkuneuvoin, joiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa Taulukko 3. Tarkastelu sisältää erilaisia henkilöautokonsepteja yleisen 5 henkilölle rekisteröidyn henkilöauton lisäksi. Joukkoliikennettä edustavat bussi, raitiovaunu ja metrojuna. Bussin ominaisuudet vastaavat pääkaupunkiseudun joukkoliikenteen keskimääräistä bussia. Raitiovaunu vastaa tyypillistä eurooppalaista noin 30 metriä pitkää raitiovaunua. Metrojunan tiedot ovat Helsingin metrojunista, ja ne soveltuvat myös paikallisliikennejunien ominaisuuksiin. Joukkoliikenteen hyötykuorma on laskettu kuormitusasteista, jotka ovat tarjottujen ja käytettyjen paikkakilometrien suhde, joka toteutuu Helsingin liikenteessä.

Taulukko 3. Eri kulkuvälineiden hyötykuormasuhteet, omapainot ja kuormat.

Kulkuväline	Hyötykuormasuhte	Oma massa [kg]	Hyötykuorma [kg]
Polkupyörä	75 %	25	75 kg
Sähköavusteinen polkupyörä	68 %	35	75 kg
Segway	60 %	50	75 kg
Skootteri	44 %	95	75 kg
Pienoisauto KR-200	25 %	230	75 kg
Mopoauto	18 %	350	75 kg
Mopoauto; sähkö	12 %	560	75 kg
Mini (1959)	11 %	650	75 kg
Smart	9 %	730	75 kg
Henkilöauto	5 %	1450	75 kg
Bussi	8 %	12.000	14 x 75 kg
Raitiovaunu	6 %	41.000	35 x 75 kg
Metrojuna (HKL)	7 %	32.000	34 x 75 kg

Kulkuneuvoissa on 1900-luvun lopulla kiinnitetty kasvavaa huomiota ilmanvastuskertoimeen. Henkilöautojen muotoilulla on päästy keskimäärin arvoon 0,3, joka on mitattu arvo ja sisältää siten kulkuneuvon alustan ja tienpinnan välin vaikutuksen. Polkupyörien ilmanvastuskertoimet ovat lähellä yhtä ja riippuvat ajoasennosta. Moottoripyörillä ja skoottereilla ilmanvastuskertoimet ovat myös lähellä yhtä, mutta muotoilun ansiosta polkupyöriä alhaisemmat.

Davisin kaavalla laskien tasaisella nopeudella energian tarve henkilökilometriä kohden on korkein erilaisilla henkilöautolla, kun lasketaan käytännössä toteutuvalla joukkoliikenteen 20 %:n käyttöasteella ja verrataan henkilöauton kuljettajaan. Kevyillä henkilöautoilla, kuten Smart tai alkuperäinen vuoden 1959 Mini, päästään lähelle bussia. Mopoauton energiantarve on suunnilleen sama kuin bussilla. Raidejoukkoliikenne ja henkilökohtaiset ajoneuvot eli skootteri, polkupyörä ja Segway ovat samassa luokassa, kuitenkin niin, että nopeuden noustessa raideliikenteen energian kulutus jää selvästi alle henkilökohtaisten ajoneuvojen (Kuva 34).

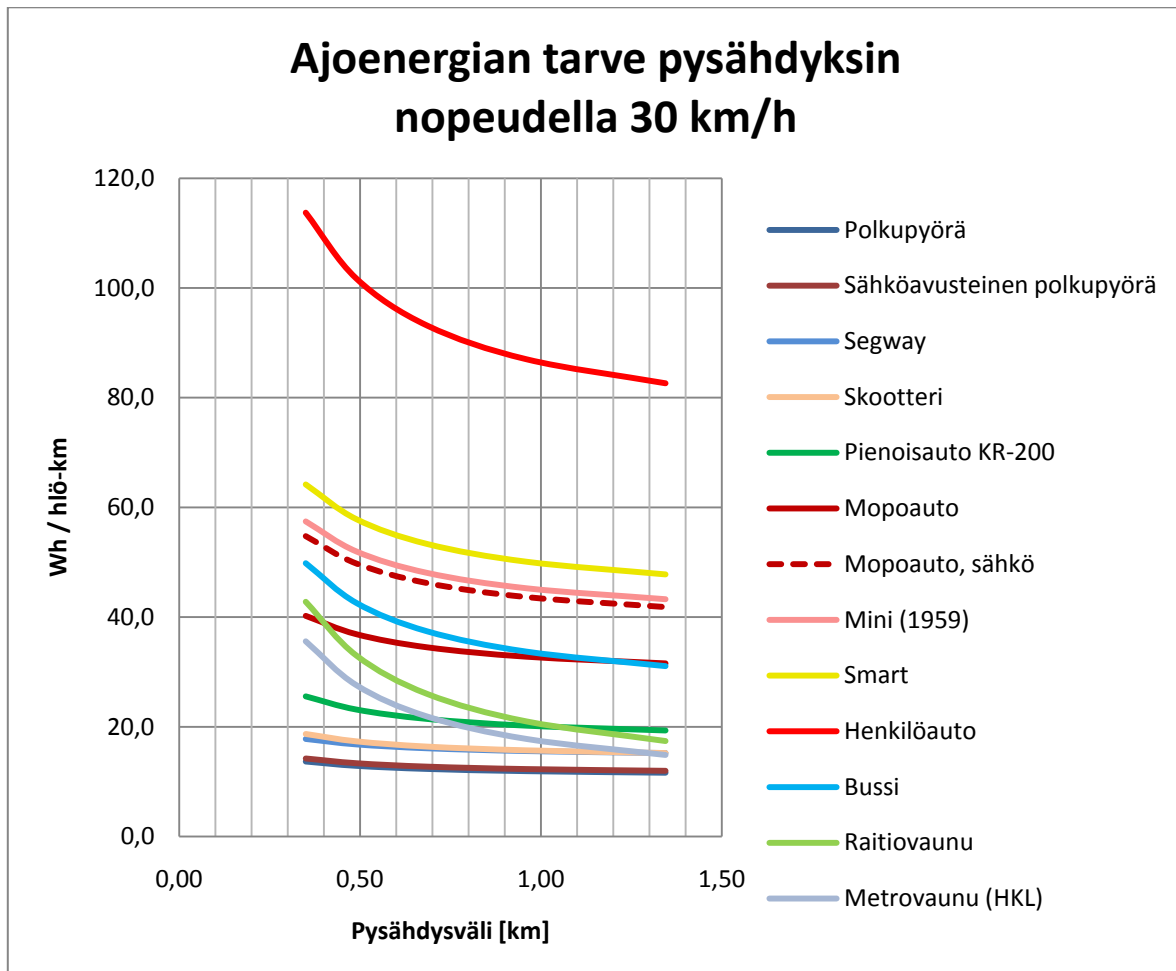


Kuva 34. Energian tarve erilaisin kulkuvälinein tasaisella nopeudella. Joukkoliikenteen käyttöaste on 20 % tarjotuista paikkakilometreistä. Massat ja ilmanvastuskertoimet ovat tyypillisiä arvoja. mopoauton kohdalla tiedot ovat Axim-merkkisestä mopoautosta, josta on myös sähköversio. (Ajoneuvojen energiankulutus.xls)

Kaupunkiolosuhteissa käytännössä toteutuvilla 20 % kuormitusasteella ja nopeudella 25–35 km/h raidejoukkoliikenne ja henkilökohtaiset ajoneuvot tarvitsevat noin 10 Wh/hlö-km energiaa, joka on 1/7 henkilöauton ja 2/5 bussin energiantarpeesta. Ilmanvastus kasvattaa käytännöllisiin maksiminopeuksiin eli 55 km/h luokkaan henkilökohtaisten kulkuvälineiden energiantarpeen arvoon 30 kWh/hlö-km. Samalla nopeustasolla maksimaalinen auton energiantarve on luokkaa 90 kWh/hlö-km ja raideliikenteellä 15 kWh/hlö-km.

Energiantarve riippuu liikenneolosuhteista, kuten tiedetään autojen vakioituista kulutusmittauskäytännöistä. Edellä laskettuihin arvoihin verrattuna kokemukseräinen ladattavan sähköauton kulutus 0,2 kWh/km on yli kaksinkertainen tässä laskettuun nähden. Tilastoarvo Helsingin sähkökäyttöisestä joukkoliikenteestä on 0,11 kWh/hlö-km eli noin kymmenkertainen tässä laskettuun tasaiseen nopeuteen nähden. Joukkoliikenteen suurempaa eroa autoon nähden selittää se, että raideliikenteessä energiaa kuluu pääasiassa kiihdytykseen kun autossa energiaa kuluu merkittävästi myös nopeuden ylläpitämiseen. Joukkoliikenteen kokemukseräinen energiankulutusarvo sisältää myös valaistuksen ja ilmastoinnin. Sähköhenkilöauton kulutus ei sisällä ilmastointia.

Alla olevassa kuvassa (Kuva 35) on laskettu kiihdytyksissä kulutettavan liike-energian vaikutus energian kulutukseen kun nopeus kiihdytysten välillä on 30 km/h. Laskelma on tehty ottamatta huomioon kiihdytyksen aikaista hyötysuhdetta mutta toisaalta jättämättä huomiotta Davisin kaavan nopeuden muutos kiihdytyksen ja hidastuksen aikana. Pysähdysten aiheuttama energian tarpeen vaikutus on laskettu Davisin kaavalla ja laskennallisella liike-energialla.



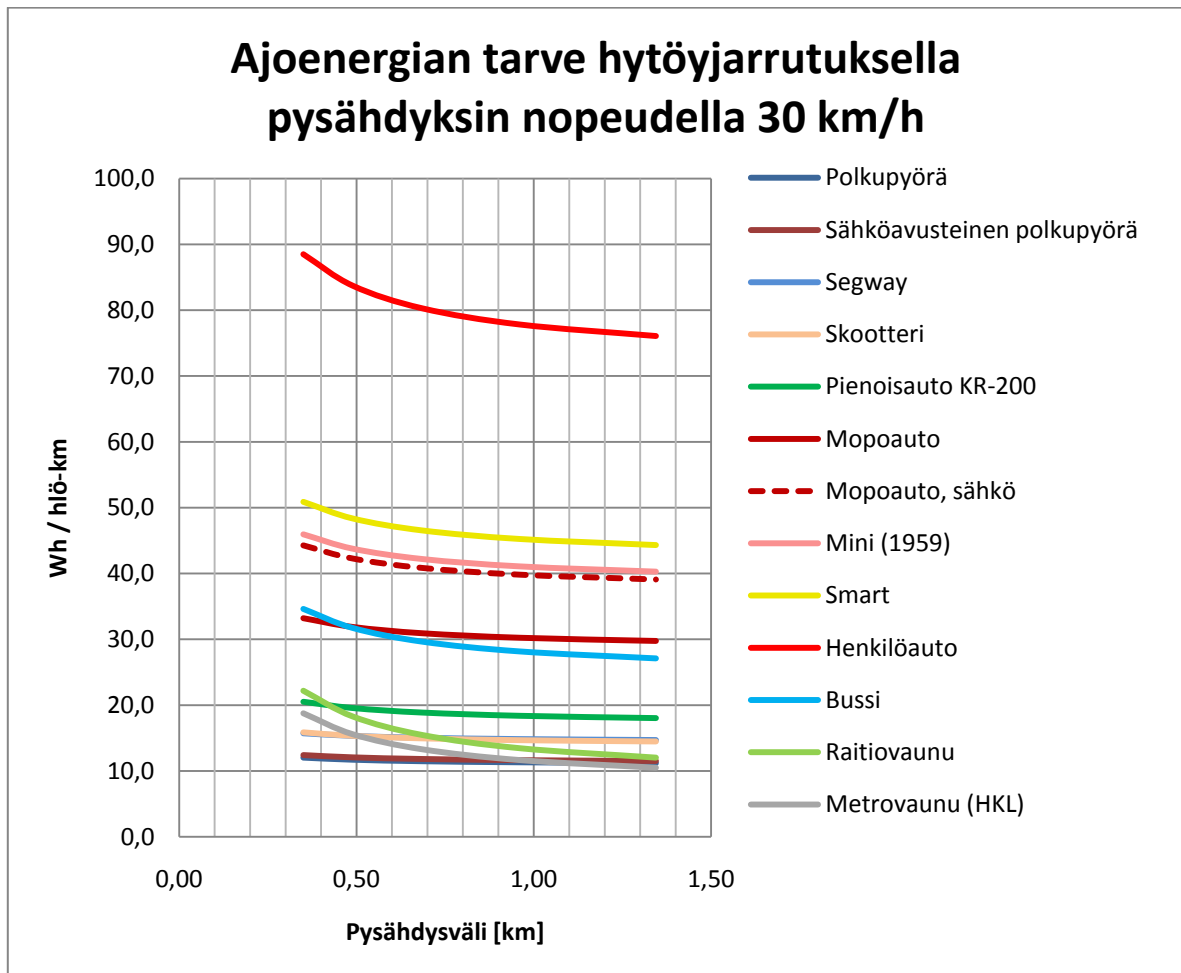
Kuva 35. Eri kulkuvälineiden energian tarve käytettyä matkustajakilometriä kohden pysähdysvälin muuttuessa tasaisen ajon nopeuden ollessa 30 km/h. Jarrutusenergiaa ei käytetä hyväksi.

Kuva 35 osoittaa pysähdysten voimakkaan merkityksen energian kulutukselle sekä joukkoliikenteessä että henkilöautoilla, joiden kaikkien hyötykuormasuhde jää selvästi alle 10 %:n. Kuvan lyhin pysähdysväli on 350 metriä, joka on likimain sama kuin henkilöautojen EU-normikulutuksen ECE 15 kaupunkiajon pysähdysväli. Euroopassa joukkoliikenteen pysähdysvälit liikenne-etuusiksi ovat luokkaa 500 metriä. Siten kaupunkiliikenteessä tulee verrata joukkoliikenteen energiankulutusta 500 metrin pysähdysväliä yksilöllisen liikenteen 350 metrin pysähdysväliin.

Henkilöautojen sähkökäyttöjen normaali ominaisuus on palauttaa jarrutuksessa liike-energia takaisin sähköenergiaksi. Joukkoliikenteessä tämä hyötyjarrutus on noin 1980-luvulta lähtien ollut sähkökäyttöjen ominaisuus, jota ei kuitenkaan aina ole voitu käyttää hyväksi. Hyötykäyttöä on rajoittanut se, etteivät syöttöasemat ole kyenneet toimimaan kuormana ja palauttamaan energiaa takaisin.

sähköverkkoon. Tämä on ollut tarpeen siksi, että muut samalla syöttöjaksolla olevien kulkuneuvojen jarrutus- ja kiihdytysjaksot eivät osu ajallisesti samaan hetkeen.

Akkukäytöissä akut toimivat aina kuormana ja nykyisellä tekniikalla liike-energiasta saadaan sähköksi parhaimmillaan noin 70 %. Kuva 36 esittää edellä kuvatun pysähtelevän liikenteen energiatarpeen, kun kulkuneuvot käyttävät liike-energian talteenottoa.



Kuva 36. Eri kulkuvälineiden energian tarve käytettyä matkustajakilometriä kohden pysähdysvälin muuttuessa tasaisen ajon nopeuden ollessa 30 km/h. Jarrutusenergiaa voidaan palauttaa sähköksi 60 % liike-energiasta.

Jarrutusenergian talteenotto parantaa energian tarvetta suhteellisesti eniten huonolla hyötykuormalla eli henkilöautolla ja joukkoliikenteessä. Erilaisten autojen energian tarve on kuitenkin edelleen suurempi kuin joukkoliikenteessä, mutta bussi ja 350 kg omamassan mopoauto ovat suunnilleen samassa energian tarpeessa.

Nykyisen kaltaisen henkilöauton ominaisuuksissa yhdistyvät sekä suuri kulkuvastus että suuri oma massa ja siten alhainen hyötykuorma, joka on jopa huonompi kuin raskasrakenteisessa raideliikenteessä. Sähkökäyttöisen mopoauton vertaaminen polttomoottorikäyttöiseen osoittaa, ettei auton sähköistäminen ole tavoitteen mukaista siten, että auton massa sähköistyksen vuoksi olennaisesti nousee. Eli kun pyritään alentamaan liikkumisen energiankulutusta, sähkökäyttöisen kulkuvälineen rakennetta ei ole tarkoituksenmukaista tehdä nykyisten henkilöautojen kaltaiseksi. Tavoitteeksi

tulee ottaa kulkuvälineen oman massan vähentäminen ja siten hyötykuorman osuuden lisääminen. Pysähdysten suuri merkitys energian kulutukselle osoittaa, että jarrutuksessa saatavan energian hyväksikäyttäminen on myös olennainen mahdollisuus parantaa energiataloutta, mutta se ei poista henkilöauton suuren oman massan ja alhaisen hyötykuorman merkitystä.

5.3 Liikkumisen energian käytön hyötysuhteen parantaminen

Liikkumisen energian käytön hyötysuhteella tarkoitetaan tässä ihmisen liikkumiseen kuluvan energiamäärän vähentämistä kuljettua matkaa kohden. Tässä ei puututa ihmisen liikkumisen määrään ja liikkumisen tarpeen vähentämiseen. Liikkumisen tarpeen vähentämisellä parannetaan liikkumisen hyötysuhdetta suhteessa ihmisen tarpeisiin. Tätä asiaa käsitellään luvussa 5.9 Yhdyskuntarakenteen ja kulkutottumusten kehitys.

Edellä olevan perusteella ihmisen liikkumisen energian käytön hyötysuhteen parantamisen olennainen keino on kulkuvälineen hyötykuormasuhteen parantaminen. Periaatteellisella tasolla kulkuneuvokannan tulisi vastata liikkumistarpeita siten, että kulkuneuvot eivät tarjoa turhaa kuljetuskapasiteettia siten, että kuljetetaan turhaa kapasiteettia vastaavaa kulkuneuvon omaa massaa.

Edellä on todettu (Kronström 2008), että nykyisen autokannan ajosuoritteen tarvitsema energiamäärä olisi sähköautoina 9,2 TWh. Henkilöliikennetutkimuksen (HLT 2006) aineiston perusteella 55 % henkilöautosuoritteesta tehdään yhden henkilön eli pelkän kuljettajan kuormalla ja 18,5 % suoritteesta henkilöautossa on enemmän kuin 2 henkilöä eli tarvitaan nykyisen kaltainen takapenkillä varustettu auto. Matkoina laskettuna vastaavat osuudet ovat 63 % pelkkä kuljettaja ja 12,3 % enemmän kuin kaksi henkilöä.

Suuruusluokkana noin 80 % henkilöautosuoritteesta voitaisiin toteuttaa nykyisenkaltaista noin 1,5 tonnin painoista henkilöautoa pienemmällä 2-paikkaisella ajoneuvolla. Jos tällaisen ajoneuvon oma massa olisi noin 400 kg, sähköisen henkilöautoliikenteen energian tarve voisi olla 3–4 TWh eli 33–42 % pienempi kuin nykyisenkaltaisen autokannan tapaisilla raskailla henkilöautoilla, mikäli teoreettisen energian tarpeen ja käytännön kulutuksen suhde on kevyellä sähköautolla sama kuin raskaalla sähköautolla.

Edellä laskettu sähköisen autokannan 9,2 TWh:n energiatarve perustuu tekniikkaan, jossa jarrutusenergiaa hyödynnetään noin 60 % palautettuna kulkuneuvon akkuihin. Arvio ei sisällä ajoneuvon lämmityksen ja ilmastoinnin energiankulutusta.

Ajoneuvojen kehityksessä on viime aikoina kiinnitetty runsaasti huomiota ilmanvastukseen ja autojen muotoilulla on saavutettu selvä ilmanvastuksen alentuminen. Ilmanvastuksella ei kuitenkaan ole suurta merkitystä kaupunkiliikenteessä. Kun henkilöautolle on edellä laskettu 350 metrin pysähdysvälillä ja nopeudella 30 km/h energian tarpeeksi hyötyjarrutuksella 89 Wh/km, tasaisen 30 km/h nopeuden energian tarve on 72 Wh/km.

Maantieliikenteessä ilmanvastus on merkittävämpi. 80 km/h nopeudella 1450 kg:n henkilöauton energian tarve on 122 Wh/km ja samalla ilmanvastuskertoimella olevan 400 kg:n ajoneuvon energian tarve on 68 Wh/km, kun otsapinta-ala on oletettu kevyemmällä ajoneuvolla 17 % henkilöautoa pienemmäksi. Massan alennuksen ja ajoneuvon koon merkitys on tässä tapauksessa 44 %. Nopeudella 80 km/h kevyemmän ja pienemmän ajoneuvon energiatarpeen alenemisen potentiaali on siten samassa luokassa kuin kaupunkiajossa.

Todettakoon samalla, että joukkoliikenteen energian tarve suhteessa muihin kulkuneuvoihin käy selvästi vähäisimmäksi nopeuden noustessa. Raideliikenteessä energian tarve on alle 30 Wh/km/hlö ja bussilla 56 Wh/km/hlö, kummatkin 20 %:n paikkakilometrien käyttöasteella.

5.4 Energiataloudelliset kulkuvälineet

Edellä olevan perusteella energiataloudellisen henkilökohtaisen ajoneuvon tulee olla pienikokoinen. Pienikokoisia ajoneuvoja eli pienoisautoja valmistettiin 1950- ja 1960-luvuilla ja osin 1980-luvulle asti erityisesti Ranskassa ja Saksassa. Pienoisautojen käyttötarkoitus oli pääasiassa arki-liikkuminen, vaikka muutamia urheilullisiakin malleja valmistettiin. Suosituimpia malleja valmistettiin kymmeniä tuhansia kappaleita. Saksalaista Goggomobilia valmistettiin noin 200.000 kappaletta.

Pienoisautojen valmistaminen perustui 1950-luvulla henkilöautojen korkeaan hintaan sekä lainsäädännöllisiin rajoihin. 3-pyöräisyys tai suorituskykyrajat merkitsivät ajoneuvon rekisteröintiä muuksi kuin autoksi, jolloin ei tarvittu auton ajokorttia eikä ajokortti-ikää ja ajoneuvolla oli autoa alhaisempi vero. Polttoaineen kulutus oli usein autoihin verrattuna pieni, mutta halvan öljyn aikana asialla ei ollut suurta merkitystä. Paino- ja kustannussyistä pienoisautoissa oli usein 2-tahtimoottori. Sen melu- ja pakokaasut kävivät 1960-luvulla pienoisautojen imagohaitaksi.

Pienoisautojen perusrakenteet vastasivat usein sitä, mitä energiataloudelliselta talviolosuhteisiin soveltuvalta ajoneuvolta nykyäänkin edellytetään. Ajoneuvo tarjoaa sääsuojan ja sen suorituskyky riittää päivittäiseen ja pääsääntöisesti yksin tapahtuvaan arkiliikkumiseen kaupunkiseudun liikenneolosuhteissa. Vähintään kolme pyörää pitää ajoneuvon pystyssä ja tekee mahdolliseksi ajamisen liukkaalla tienpinnalla. Suosituimmat 3-pyöräiset mallit kuten Isetta ja Messerschmitt perustuvat leveään etuakseliin, joka takaa hyvän vakavuuden kaarreaajossa. Tosin Isetta oli 3-pyöräinen vain niissä maissa, joissa lainsäädäntö rajasi pyörien lukumäärän. Perusversiossa oli lyhyt taka-akseli (Kuva 37).

Katetut pienoisautot painoivat yleensä 300–400 kg, mutta keveimmät omamassat ovat olleet vain runsaan 100 kg. Moottoreiden tehot olivat noin 10 kW. Pienisaatot olivat usein alle kolmen metrin pituisia ja leveys ja korkeus noin 1,4 metriä.



Kuva 37. Pienoisautot olivat yleisiä 1950- ja 1960-luvuilla, jolloin niitä valmistettiin erityisesti Ranskassa ja Saksassa. Useat mallit olivat 3-pyöräisiä. Kuvan Isetta 250 on kuitenkin 4-pyöräinen, vaikka raideväli taka-akselilla onkin kapeampi kuin etuakselilla. Kuva 16.6.2010 A. Alku.

Pienoisautojen menekin tyrehtymisen selittänee pienten autoiksi rekisteröityjen ajoneuvon tulo markkinoille 1950-luvun lopussa. Esimerkiksi Fiatin mallit 600 (vuodesta 1955) ja 500 (vuodesta 1957) sekä BMC:n Mini (vuodesta 1959) olivat lähes saman kokoisia kuin pienoisautot, mutta niissä oli tilaa neljälle henkilölle ja Fiat 600:ssa ja Minissä oli 4-tahtimoottori ja ”oikean auton” suorituskyky. Nämä pienet autot oli myös hinnoiteltu kilpailukykyisiksi pienoisautoihin nähden. Näiden autojen onnistuneisuutta osoittaa, että ne elivät eri malliversioina yli 20 vuotta ja niitä myytiin useita miljoonia.

Pienoisauto syntyi uudelleen Euroopassa, kun EU hyväksyi vuonna 2002 ”mopoauton” eli kevyen nelipyörän. Direktiivin 2002/24/EY (kumosi direktiivin 92/61/ETY) mukainen luokan L6e ajoneuvo saa painaa 350 kg ilman akkuja, diesel- tai sähkömoottorin teho saa olla 4 kW, bensiinimoottorin suurin iskutilavuus on 50 cm³, sen voi rekisteröidä enintään kahdelle ja huippunopeus saa olla enintään 45 km/h. Mopoautoa saa Suomessa käyttää mopokortilla, eli autoa saa ajaa jo 15-vuotias. Mopoauto siis on pienoisautojen toisinto sikäli, että säädösten rajoituksin on luotu auto, jonka ajamiseen ei tarvita ajokorttia eikä autosta makseta autoveroa. Autoja koskevista säädöksistä poiketen mopoautolla ei ole ympäristövelvoitteita eikä esimerkiksi sähkökäyttöisyydestä ole kulluttajalle etua.

Markkinoilla on hyvin vähän tai ei lainkaan ajoneuvoja, joilla tavoitellaan henkilökohtaisen liikkumisen energian kulutuksen alentamista eli siirtymistä pois polttomoottorikäyttöisistä henkilöautoista. Esimerkiksi mopoauton tarkoitus ei ole olla ympäristöystävällinen ja energiatehokas liikkumisväline. Kun kohderyhmänä ovat alle ajokortti-ikäiset, joiden vaihtoehtoiset kulkutavat ovat pyöräily,

joukkoliikenne tai mopedi, mopoauto lisää näiden liikkujaryhmien energian kulutusta ja ympäristö-rasitusta.

Moottoripyörän ja skootterin rakenteesta on kehitetty kaupallisiksi tuotteiksi 3-pyöräisiä versioita, jotka pysyvät itse pystyssä liikennevaloissa ja pysäköitäessä. Näiden laitteiden kuljetuskapasiteetti on samantapainen kuin kaksipyöräisillä versioilla. Laitteiden osittainen tai täysi kattaminen on mahdollista.

Tekniikan Maailma -lehden koeajon (Lehtonen 2007) mukaan Piaggion kolmipyörä (Kuva 38) on vakaa ja turvallisempi kuin kaksipyöräinen sekä asfaltin päällä olevalla irtosoralla että soratiellä. Kokemukset viittaavat siihen, että laite olisi ajettavissa myös talviolosuhteissa.



Kuva 38. Piaggion 3-pyöräinen skootteri. Malli on pysäköity tukijalalle nostettuna, vaikka pysäköitäessä etujousitus on lukittavissa pystyasentoon.

Englantilainen moottoripyörävalmistaja BSA patentoi vuonna 1966 3-pyöräisen kulkuneuvon rakenteen ja valmisti 1970-luvulla 3-pyöräistä mopedia nimellä Ariel-3, jossa oli kaksi takapyörää. BSA:n patentti päättyi japanilaiselle Hondalle, joka on valmistanut omaa vastaavaa mopediaan pääasiassa Japanin markkinoille vuodesta 1981. Vuonna 1982 markkinoille tullutta mallia Gyro (Kuva 39) valmistetaan edelleen. Kiinalainen Xingyu Industry valmistaa samaan rakenteeseen perustuvaa osittain katettua mallia XY150ZK (Kuva 40), josta on ainakin suunniteltu myös sähkökäyttöistä versiota. XY150ZK-malli on ollut myynnissä myös Suomessa hintaan noin 2500 €.



Kuva 39. Hondan Gyro-mopedin Canopy-mallin tuotanto alkoi 1990. Laitteeseen kuuluu tuulilasi ja katto sekä 62 litran tavaratila. Moottori ja voimansiirto muodostavat taka-akselin kanssa kokonaisuuden, joka on nivelletty kaksipyöräisten tapaan sivuttain taittuvaan runko-osaan. Kuvalähde Wikipedia Commons.



Kuva 40. Xingyun valmistama 3-pyöräinen osittain katettu skootteri XY150ZK. Laitteessa on tilaa kahdelle ja selkänojan takana on myös pieni tavaratila. Laitteen pituus on 2,2 ja leveys 0,67 metriä, omapaino on 160 kg. Kuvalähde Xingyu.

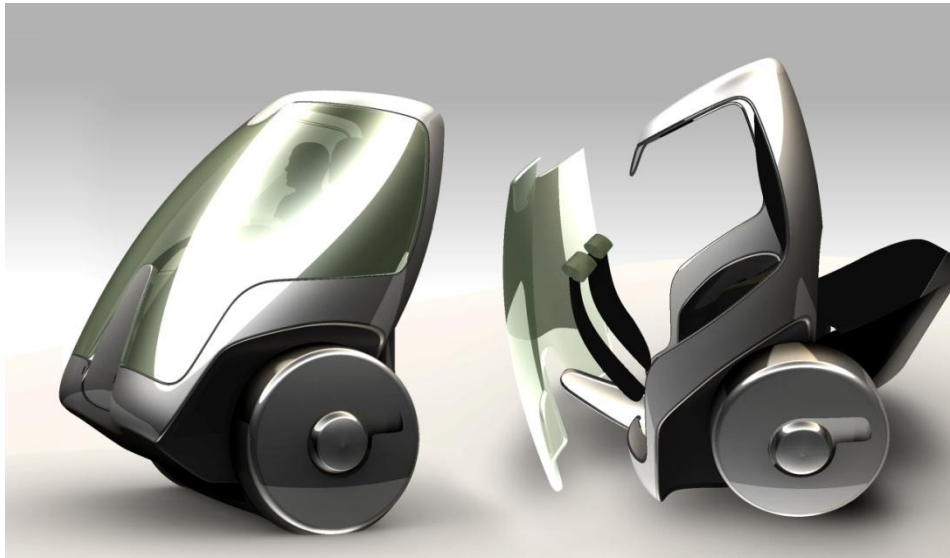
Suunnitelma- ja prototyyppeasteella on useita kevyitä ajoneuvoja. Ranskalainen Sidam on suunnitellut yksipaikkaista tavaratilalla varustettua 3-pyöräistä ajoneuvoa (Kuva 41). Ajoneuvo on tarkoitettu kevyeen jakeluliikenteeseen. Segway-kuljettimesta on olemassa prototyyppeasteella 2-paikkainen istuen matkustettava ja katettavissa oleva versio Puma (Kuva 42 ja Kuva 43). Puma tarjoaa sääsuojan ja kuljetuskapasiteetin joko toiselle henkilölle tai henkilön tilalle tavaralle. Peugeot plus (Kuva 44) on esimerkki katetusta kolmipyörästä, joita on ideoitu tulevaisuuden henkilökohtaisiksi ajoneuvoiksi. Perusrakenne on sama kuin muutamissa nykyään markkinoilla olevissa 3-pyöräisissä moottoripyörissä sekä 1960-luvun pienoisautoissa, eli etuakseli on 2-pyöräinen ja takana on yksi vetävä pyörä.



Kuva 41. Sidam Xnovo on yksipaikkainen tavaratilalla varustettu kolmipyörä. Kuvalähde Sidam.



Kuva 42. Segwayn tekniikkaan perustuva 2-paikkainen yhden akselin ajoneuvon versio. Kuvalähde www.scientificamerican.com



Kuva 43. Designtutkielma Segway Puma:sta. Kuvan lähde General Motors.



Kuva 44. David Vargasin designtutkielma nimellä Peugeot plus tehtynä vuoden 2007 Peugeot design kilpailuun. Tilaa on kahdelle henkilölle. Ajoneuvon pituus on 2,2 ja leveys 1,2 metriä. Kuvalähde <http://psipunk.com/peugeot-brings-three-wheeled-eco-vehicles-to-style/>

Henkilökohtaisten ajoneuvojen käytännön minimitoiksi voi markkinoilla ja suunnitteilla olleiden laitteiden perusteella arvioida noin 2 metrin pituuden, 0,7 metrin leveyden ja 1,7 metrin korkeuden. Tähän tilavuuteen saa mahtumaan 1–2 henkilöä ja 60–100 litraa tavaraa. Kun laitteen tulee tarjota sääsuoja, ajoneuvo kannattaa muotoilla umpinaiseksi, jolloin minimoidaan ilmanvastus. Geometrisien muotojen ilmanvastusarvojen perusteella voi arvioida, että ilmanvastuskertoimeksi muodostuu 0,2.

Realistinen omapaino ilman akkuja lieenee 100–150 kg. Akkujen massa riippuu ajoneuvon käyttötottumuksista sekä käyttöympäristön latausmahdollisuuksista. Tässä hahmotellun ajoneuvon teoreettinen energiankulutus 350 metrin pysähdysvälillä on noin 15 Wh/km. Kun oletetaan, että toteutuva ladatun sähköön kulutus on samassa suhteessa kuin sähköhenkilöautolla, todellinen kulutus olisi 30 Wh/km. Sadan kilometrin toimintasäde edellyttää 3 kWh:n akkukapasiteettia, joka nykyisten Li-Ion-akkujen tekniikalla merkitsee 15 kg:n massaa ja 6 litran tilavuutta eli käytännössä polttomoottoriauton käynnistysakun tapaista esinettä.

5.5 Tavarankuljetuksen tarve

Henkilöautolla tehdyistä matkoista noin kolmannes on ostos- ja asiointimatkoja, mikä tarkoittaa, että merkittävä osa henkilöauton käytöstä on tavarankuljetus. Tarvittavaa tavarankuljetuskapasiteettia kuvaa paitsi autojen tavaratilojen koko, myös kauppojen ostoskärryjen tilavuus. Näiden perusteella tavarankuljetukseen tulisi varata 100–200 litraa tilavuutta.

Kulkuneuvon tavarankuljetuksen tarve on sidoksissa liikkumistottumuksiin ja yhdyskuntarakenteen palvelurakenteeseen. Henkilöautoon perustuva kauppakeskuskulttuuri vähentää kaupan asiointikertojen määrää ja lisää kerralla kuljetettavan tavarankuljetuksen määrää, kun kaupan fyysinen saavutettavuus heikkenee eli etäisyys ja kaupassakäyntiin kuluva aika kasvavat. Ero näkyy esimerkiksi kaupunkikeskustan ja esikaupunkien kauppakeskusten ostoskäyttäytymisessä siten, että kertaostos on kauppakeskuksissa selvästi suurempi kuin keskustan kaupoissa. Kauppakeskuksissa asioidaan henkilöautoin ja keskustan kaupoissa kävellen ja joukkoliikenteellä. Keskustan tai muun lähellä olevan kaupan asiakkaan tavarankuljetustarpeen määrää kuvaa kaupan ostoskorin koko, noin 15 litraa.

Jos kulkuneuvot ovat kevyempiä kuin nykyiset henkilöautot, niiden tavarankuljetuskapasiteetin tarve riippuu siitä, minkälaiset liikkumis- ja asiointitottumukset vallitsevat kevyempien kulkuneuvojen yhteydessä. Esimerkkinä voi mainita Amsterdamin, jossa pyöräily on erittäin yleinen liikkumismuoto. Amsterdamissa ovat yleisiä noin 50 litran tavarankuljetuslaatikolla varustetut polkupyörät. Toisen esimerkin tarjoaa Japani ja siellä yleiset Honda Gyro -kolmipyörämopedit (Kuva 39), joissa on noin 60 litran tavaratila. Suomessa polkupyörissä on yleistynyt tavarakori, jonka tilavuus on 10–15 litraa.

Suomessa tehdyn asuin ympäristötutkimuksen mukaan kaikenikäiset kuluttajat toivovat lähellä olevia kaupan palveluita ja riippumattomuutta henkilöautosta ja kauppakeskuksista (Koistinen ja Tuorila 2008). Tämän perusteella voi pitää mahdollisena kehityksenä, että kuluttajien tarpeita vastaavien henkilökohtaisten kulkuneuvojen ollessa saatavilla ja yleisiä, kaupassa asioidaan lähellä ja usein. Tällöin kertaostosten määrä pienenee jolloin myös kulkuneuvon tavarankuljetuksen tarve alenee.

Tavarankuljetustarpeen määrän määrittänee jokin käytännöllinen usein kuljetettavan pakkauksen tilavuus. Suurimpia päivittäistavarakaupan pakkauksia ovat talous- ja WC-paperit sekä vaippapakkaukset. Siten käytännöllinen minimitarve lieenee yksi kookas pakkaus sekä yksi kookas kauppa-kassallinen muuta tavaraa. Tällöin päädytään noin 50 litran kuljetuskapasiteettiin.

Kuten henkilöautoissa, myös henkilökohtaisissa kulkuneuvoissa voi olettaa kuluttajien arvostavan monikäyttöisyyttä. Siten tavarankuljetuskapasiteetti voisi olla yhdistetty mahdollisuuteen kuljettaa

toista henkilöä. Tällöin käytettävissä oleva tavarankuljetuksen tilavuus voisi olla huomattavasti suurempikin kuin 50 litraa. Esimerkiksi nykyisten henkilöautojen istuimilla on tilaa kuljettaa kodinkoneita pakkauslaatikoissaan, vaikka pakkaukset eivät mahdu tavaratilaan.

5.6 Ajoneuvokannan uusiutuminen

Suomessa henkilöautojen käyttöikä on nykyään keskimäärin 19 vuotta (HLT 2006). Joukkoliikennevälineistä polttomoottoribussit ovat lyhytikäisimpiä. Busseilla on myös jälleenmyyntimarkkinat siten, että bussit kiertävät Suomessa isoista kaupungeista pienempiin. Pienissä kaupungeissa bussien käyttöaste on usein alhaisempi kuin isoissa kaupungeissa. Isoissa kaupungeissa bussien käyttöaika on 12–15 vuotta. Osa käytetyistä busseista myydään ulkomaille. Johdinautot kestävät polttomoottoribusseja pidempään ja kansainvälisesti niiden käyttöikä pidetään 15–20 vuotta, kun elinaikana johdinautolle tehdään yksi peruskorjaus.

Käytännössä ajoneuvokannan uusitutumiseen vaikuttaa uusien autojen hinta ja käyttökustannusten kehitys. Kuluttajien halukkuus uusia auto riippuu vaihtamisen kustannuksista ja käyttökustannusten muutoksesta. Tämän päivän markkinahinnoilla sähkö on polttonesteisiin verrattuna halpaa. Vuosittaiset polttoainekulut keskimääräisellä vuosittaisella ajomäärällä 17 300 km (HLT 2006) ovat noin 1 800 €. Sähköauton energian vuosikustannus kotitaloussähköllä olisi noin 450 €. Tämä kustannusero vastaa noin 5 000 € välirahan kolmen vuoden rahoituskustannusta. Jos sähköauto ladataan kotitaloussähköllä, sähköauton käyttäjä saa valtiolta tukena polttoaineveron suuruisen veroedun, jolloin sähköauton käyttökulujen vähäisyys polttomoottoriautoon olisi todennäköisesti merkittävä vaikutus kuluttajien halukkuuteen uusia henkilöautokantaa.

Vaikka energiakustannukset voivat laskea, sähköauton hankintahinta ei saisi olla merkittävästi autojen nykyistä hintatasoa korkeampi. Alkuvaiheessa hinta kuitenkin lienee olennaisesti nykyistä autojen hintatasoa korkeampi uuden teknologian, pienten tuotantomäärien ja erityisesti akkujen kalleuden vuoksi.

Ajoneuvokannan uusiutumisella on myös teknisiä ja tuotannollisia esteitä. Markkinakelpoista tuotetta ei vielä ole olemassa, joten uusiutuminen ei voi vielä alkaa. Kun kaupallisesti kypsiä tuotteita saadaan markkinoille, niiden tuotanto on todennäköisimmin rajallista ja myös hinta on korkea. Autoteollisuuden konekanta soveltuu polttomoottoreiden valmistamiseen. Akkutuotanto on luonteeltaan täysin toisenlaista kuin nykyisten autojen valmistaminen, joten tuotannon muuttuminen polttomoottoreista akkujen ja sähkömoottoreiden tuotantoon ei voi tapahtua lyhyessä ajassa. Erityisesti akkujen osalta näyttää siltä, että merkittävä osa auton arvosta siirtyy pois autotehtaiden käsistä, mikä ei houkuta nykyistä autoteollisuutta edistämään sähköautotuotantoon siirtymistä.

Autokannan nopea uudistuminen tarkoittaa autotuotannon kokonaiskapasiteetin tarpeen tilapäistä voimakasta kasvua. Autoteollisuuden näkökulmasta sellainen ei ole toivottavaa. Kapasiteetin nostaminen edellyttää investointeja, jotka nopean uusiutumisvaiheen jälkeen kysynnän laskiessa jäisivät vajaakäyttöön. Seurauksena olisi myös autokannan ikärakenteen yksipuolistuminen, joka saat-taisi heijastua tulevaisuuteen siten, että automarkkinoille syntyisi jaksollinen kysynnän vaihtelu kun ensimmäisen ikäpolven sähköautot tulisivat uusintaikään. On siis mahdollista, ettei autoteollisuus edes halua sopeutua nopeaan autokannan uudistukseen sähköisiksi, koska sellainen muuttaisi markkinat epävakaisiksi.

Autoteollisuuden kyvystä sopeutua voimakkaisiin markkinoiden muutoksiin saatiin kokemuksia 2009 talouskriisin aikana. Sekä USA:ssa että Euroopassa päädyttiin tukemaan autoteollisuutta suoraan julkisista varoista, jotta olisi välttytty konkurseilta ja autoteollisuuden työntekijöiden jäämiseltä työttömiksi.

Arvaamattoman tekijän voi muodostaa Intian ja Kiinan autoteollisuus. Molemmissa maissa teollisuus on voimakkaassa kasvuvaiheessa, jolloin teollisuudella on kasvun ansiosta kykyä ja mahdollisuus sopeutua uudenaikaiseen tuotantoon. On kuitenkin mahdollista, että kasvavalla teollisuudella ei ole resursseja kasvaa sekä länsimaiden vientimarkkinoille että kotimarkkinoille. Poliittiset paineet saattavat asettaa kotimarkkinat ensisijaisiksi, koska vientituloista on saatava hyötyä aineellisen elintason kasvuun kotimaassa. Silloin vientipotentiaali olisi rajallinen, jotta kapasiteettia riittää myös kotimaisen kysynnän kattamiseen.

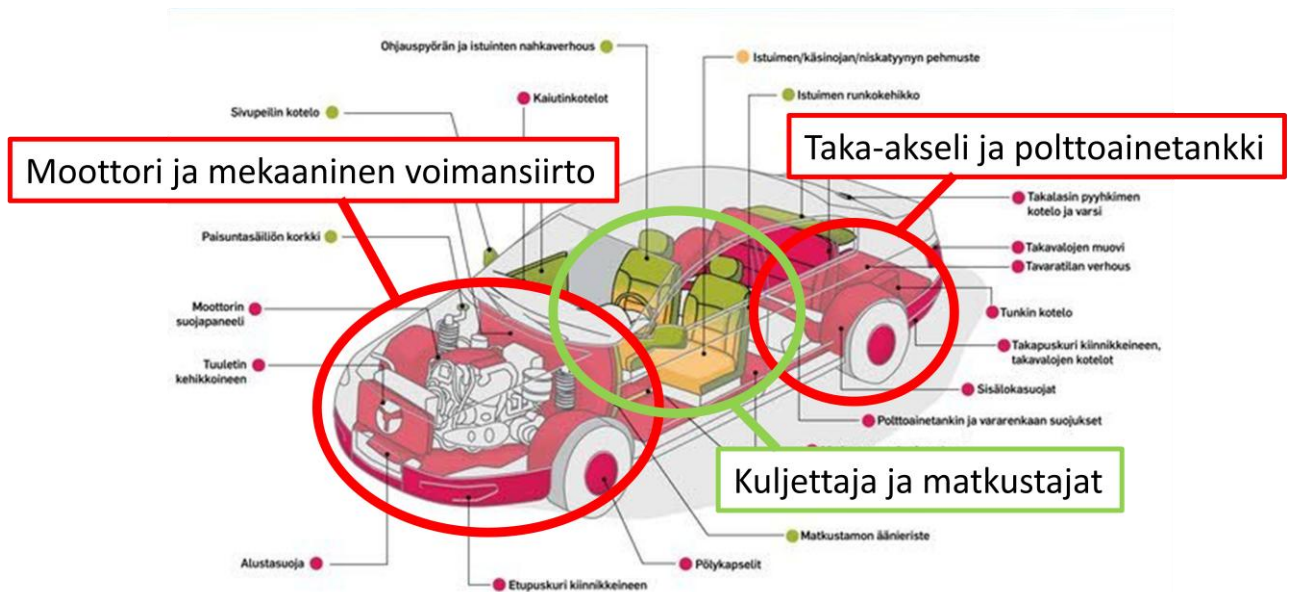
Jos siis syntyy tilanne, jossa maailman autoteollisuus ei kykene tuottamaan sähköautoja, kansalliset autokannan uudistumisponnistelut ovat turhia. Ne johtaisivat verotuottojen menetykseen ja kilpailutilanteen vääristymiseen ilman toivottua hyötyä autokannan nopeasta uusiutumisesta.

Autoteollisuuden kannalta parempi kehityspolku on edetä alkuvaiheessa kohti polttomoottorihybridä. Vanha konekanta on silloin edelleen tarpeen ja uudenlaisen tuotannon volyymitarve on alhaisempi. Uudet komponentit, erityisesti akut, eivät ole tuotteen toiminnan kannalta yhtä kriittisessä asemassa kuin ladattavassa sähköautossa.

5.7 Kulkuvälineiden tekniset mahdollisuudet

Sähkön käyttö kulkuvälineiden energiamuotona antaa nykyisiin kulkuneuvoihin verrattuna monipuolisemmat mahdollisuudet kulkuvälineiden teknisiin ratkaisuihin. Erityisesti autotekniikkaa hallitsee 1900-luvun alussa vakiintunut auton perusrakenne. Siinä autossa on yksi mekaanista voimaa tuottava voimanlähde ja mekaaninen voimansiirto pyöriin. Henkilöautoissa on käytössä vain kaksi perusratkaisua, taka- ja etupyörävetoiset autot. Joukkoliikenteessä sähkö on ollut käyttövoimana jo 1800-luvun lopulta, joten joukkoliikenteen kulkuvälineiden teknisiä ratkaisuja ei voine pitää sen rajoittamina, ettei niissä ole voitu käyttää energiamuotona sähköä.

Henkilöauton perusrakenteelle on ominaista, että polttomoottori ja mekaaninen voimansiirto hallitsevat auton rakennetta (Kuva 45). Moottori ja voimansiirto vievät tilaa suunnilleen yhden ihmisen tarvitseman tilavuuden verran ja niiden massa on 100–200 kg. Muut välttämättömät komponentit eli pyörät, akselisto, jousitus ja runko painavat yhteensä vähintään 250–400 kg. Henkilöauton oma massa on siten niin suuri, noin 1 500 kg, että se hallitsee auton suorituskyvyn mitoitus, mikä johtaa siihen, ettei käytännössä kannata tehdä autoja kuin vähintään neljälle henkilölle. Tämä puolestaan ratkaisee autojen päämitat. Matkustamon leveyden on oltava vähintään metri ja pituuden 1,8 metriä. Tämä johtaa edelleen siihen, että autot ovat lyhimmillään kolmen metrin pituisia.



Kuva 45. Polttomoottikäyttöisen henkilöauton perusrakenne. Kuvassa on nykyään yleinen etupyörävetoinen auto.

Kulkuvälineen rakenteella on merkitys kulkuvälineen käytettävyydelle sekä aiheutuville ympäristövaikutuksille. Henkilöauton vaatimaa tilaa on käsitelty tarkemmin kappaleessa 0. Liikkuvan henkilöauton tilantarve määräytyy nopeudesta aiheutuvien turvallisten etäisyyksien ja ajoradan kaistan leveyden perusteella, jolloin auton koko ei ole merkittävä tekijä. Katuverkon käytännön tilantarve riippuu katuverkon rakenteesta, kuten risteyksien määrästä ja siitä, miten ajoneuvot poistuvat katuverkolta pysäköintiin. Autojen pysäköintitilan tarve määräytyy auton koon perusteella. Sekä pysäköintiruudun että pysäköintilaitoksen ajoväylien koko perustuvat auton kokoon.

Pysäköintiruudun pituus on Suomessa 5 metriä ja vastakkaisten ruutujen etäisyys 6,5 metriä. Istuva ja polkimia käyttävä kuljettaja tarvitsee pituussuunnassa tilaa noin 1,2 metriä, joten pysäköintiruudun pituus hyötypituuteen nähden on erittäin suuri. Yleinen lyhyt henkilöauto, kaksipaikkainen Smart for 2 oli ensi versiossaan 2,5 metriä pitkä, mutta 2006 julkaistu uusi korimalli oli 2,7 metrin pituinen. Pieninä pidettävät kevytrakenteiset ja kaksipaikkaiset mopoautot ovat 3–3,2 metriä pitkiä. Jo vuonna 1959 julkaistu ja vuoteen 2000 valmistettu englantilainen Mini oli 3,05 metriä pitkä, mutta siinä oli tilaa neljälle henkilölle. Mini ei kuitenkaan täyttäisi nykyisiä auton korin kolarikäyttäytymisen rakennevaatimuksia.

Edellä olevan perusteella voi arvioida, että pysäköintiruudun ja niihin liittyvän ajoväylän pinta-alasta olisi poistettavissa ainakin 40 %, jos kaksipaikkaisten kulkuneuvojen valmistaminen ja myynti olisi mielekäs ratkaisu. Tällöin kenttäpysäköinnin tilantarve ajoneuvoa kohden olisi 12–15 m². Laitospysäköinnissä tilantarpeen vähennys ei olisi suhteessa aivan yhtä suuri, koska kerrosten välisten ajoramppien tilantarpeeseen ei auton pituus vaikuta. Käytännön tilansäästön ongelma on, että autojen pieneneminen ei pienennä kaikkia autoja. Kun liikenteessä on eri kokoisia autoja, tarvitaan pysäköintitilaa myös suurille autoille ja ajoradat ja -kaistat on mitoitettava suurimman liikenteessä olevan ajoneuvon mukaan.

Sähkökäyttöisessä kulkuneuvossa ei ole voimansiirtoon liittyviä rajoituksia siten kuin polttomoottoriajoneuvoissa. Sähkökäyttö skaalautuu kulkuneuvon käyttötarkoituksen mukaan eikä rajoita rakenteellisia ratkaisuja. Siten sähkökäytöllä on polttomoottorikäyttöä parempi potentiaali vähentää

sekä kulkuneuvon omaa massaa että tilavuutta. Sähkökäyttö ei kuitenkaan vaikuta kuljettajan ja matkustajan suojaamisen edellyttämiin rakenteisiin.

Henkilökohtaisten kulkuneuvojen toteuttaminen on polttomoottorikäyttöä helpompaa, samoin voimakoneen hallinta, jolloin sähkömoottoreita on helpompi käyttää kuluneuvon hallintaan kuin mekaanista voimajärjestelmää.

Kokonaisuutena sähkökäyttö antaa mahdollisuuden irtautua nykyisten kulkuneuvojen konsepteista. Periaatteessa sähkökäyttöisyys siihen liittyvine ominaisuuksineen tekee mahdolliseksi fyysisesti minkäläisen kulkuvälineen hyvänsä. Esimerkkinä tästä vaikka Segway, jollaista ei ole ollut mahdollista tehdä polttomoottorikäyttöisenä ja ennen nykyisellä tasolla olevaa tieto- ja anturitekniikkaa. Ajatuksenvapauden siivittäjänä voi ajatella esim. pyörien sijasta jaloilla kulkevaa kulkuneuvoa, jolloin hyötynä on, ettei kulkuneuvo tarvitse pyörälle välttämätöntä tasaista alustaa.

Edellä luvussa 5.2, Liikkumisen energiantarve, on osoitettu, että ihmisen kulkemiseen tarvittava energia kasvaa hyötykuorman osuuden vähentyessä. Nykyisen kaltaisen henkilöauton lähes 120 Wh/km kaupunkiliikenteen energiatarpeesta voidaan päästä 20–40 Wh/km energiatarpeeseen, kun kulkuvälineen massa vastaa yhden henkilön kulkuvälineen tarvetta eikä nykyisten henkilöautojen 5 henkilön ja noin 400 litran tavarankuljetuksen tarvetta.

Henkilökohtaisten keveiden kulkuvälineiden teoreettinen energian tarve on 20–35 % henkilöauton energiatarpeesta. Käytännön polttomoottoriajoneuvoissa suhde ei ole yhtä hyvä, vaan polttoaineen kulutus on 30–50 % henkilöauton kulutuksesta. Sähkökäytöllä voi olettaa päästävän kuitenkin lähemmäksi teoreettisia suhteellisia eroja sähkökäyttöjen polttomoottorikäyttöjä paremman rakenteellisen hyötysuhteen vuoksi sekä sen vuoksi, että sähkökäytöissä tulee mahdolliseksi jarrutusenergian hyödyntäminen.

Nykyisten liikkumistottumusten mukaan vain 20 % henkilöautosuoritteesta edellyttää enempää kuin kahden henkilön kuljetuskapasiteettia. Jos siis ajatellaan, että sähköinen kulkuneuvotekniikka tekisi mahdolliseksi, että 80 % henkilöautosuoritteesta kuluttaisi suoritetta kohden puolet viisipaikkaisten ”raskaiden” sähköhenkilöautojen energiankulutuksesta, henkilöautokannan energiankulutus olisi 40 % pienempi kuin alussa oletettu 9,2 TWh vuodessa, joka vastaa nykyisellä sähköntuotannon ominaispäästöllä ja henkilöautosuoritteella 47 g/km. Keskimääräinen henkilöautokannan päästö olisi 28 g/km, kun henkilöautojen ajosuorite on sama kuin nyt mutta 80 % henkilöautoista kuluttaisi energiaa puolet nykyisenkaltaisten henkilöautojen energiankulutuksesta.

Ympäristötavoitteiden vertailuvuonna 1990 Suomen henkilöautokannan ajosuorite oli 33,4 mrd. km. ja vuonna 2009 46,0 mrd. km. (Liikennevirasto 2010). Ajosuorite on siten kasvanut 37,5 %. Nykyisen henkilöautokannan keskipäästöllä 180 g/km tavoitetta vastaava päästöjen vähentymä on 85 % ja keskimääräinen tavoitepäästö 26 g/km, jos henkilöautosuorite ei kasva. Tieliikenteen vuosikasvu on ollut noin 2 % viimeisen 15 vuoden aikana. Jos kasvu jatkuu 1 % vuosikasvuna, suorite kasvaa 1,5-kertaiseksi vuoteen 2050. Silloin ominaispäästön tulisi laskea yli 90 % tämänhetkisestä eli arvoon 17,5 g/km henkilöautokannalle keskimäärin, jotta päästötavoite toteutuu (Taulukko 4).

Edellä oleva tarkoittaa, että henkilöautoilun sähköistymiseen liittyvät ajoneuvotekniset mahdollisuudet eivät riitä päästötavoitteiden toteutumiseen. Teknisten keinojen lisäksi tarvitaan joko ratkaisuja sähkön tuotannon päästöjen olennaiseksi vähentämiseksi tai liikkumistottumusten ja siten yhdyskuntarakenteen muuttamiseksi tai molempia.

Taulukko 4. Keinoja liikenteen päästöjen vähentämiseksi. Henkilöautokannan keskimääräinen tavoitepäästö vuonna 2050 on 18 g/km, jos henkilöautosuorite kasvaa vuosittain 1 %. Henkilöautojen tavoitepäästö 2050 on arvioitu 1,2 miljardiksi kiloksi vuodessa.

Keino	Keskipäästö CO ₂ g/km	Kokonaispäästö Gkg/v	
		Nykyinen ajosuorite	1 % suoritteen kasvu 2050 asti
Nykyinen henkilöautoilu	180	8,3	12,4
Raskaat sähköautot	47	2,2	3,2
Henkilökohtaiset ajoneuvot 80 %	28	1,3	1,9
Tavoite 2050	17,5	0,8	1,2

Yhteenvedona voi todeta, että sähkötekniikka edistää mahdollisuuksia tehdä henkilökohtaisia kulkuneuvoja ja parantaa hyötykuormasuhdetta. Kulkuneuvon koon pienentämisestä on vain vähän hyötyä yhdyskuntarakenteen tilansäästölle, koska liikenneverkko on mitoitettava suurten ajoneuvojen mukaan, ja kulkusuunnassa määräävä tekijä on nopeus eikä ajoneuvon koko. Kulkuneuvon kokonaismassan alentamisella on merkittävä vaikutus energian kulutukseen ja sitä kautta päästöihin. EU:ssa asetettua päästötavoitetta, 80 % vuoden 1990 päästötasosta ei kuitenkaan voida saavuttaa pelkästään ajoneuvotekniikan keinoin. On vaikutettava myös liikkumistottumuksiin ja sähköntuotannon päästöihin.

5.8 Uudet kulkuvälineet ja kulkutottumukset

Yleinen oletama liikenteen sähköistymisestä puhuttaessa on polttomoottorin korvaaminen sähkömoottorilla ilman, että ajoneuvojen ja liikenneympäristön perusrakenteet muuttuvat. Kun katsotaan muutamien muiden alojen teknologiamurroksia, tyypillistä on ollut, että aluksi uudella teknologialla jäljitellään entisiä tuotekonsepteja. Kun uusi teknologia käy tutuksi ja edulliseksi, on vuorossa tuotekonseptin muuttuminen.

Esimerkki tällaisesta kehityksestä on nykyaikainen älypuhelin, joka yhdistää aiemmin erillisinä laitteina olleet puhelimen, kameran, television ja levysoittimen (Kuva 46). Kaikki laitteet kehittyivät ensin sähköisiksi ja digitaalisiksi, mutta ne olivat vanhaan tapaan erillisiä ja vain yhteen tarkoitukseen soveltuvia laitteita. Kun näiden laitteiden teknologia oli yhtenevä, ne voitiin yhdistää yhdeksi laitteeksi, jossa on kaikkien alkuperäisten laitteiden ominaisuudet sekä uusia alkuperäisille laitteille mahdottomia ominaisuuksia.

Liikenne ja liikennevälineteollisuus on hyvin verrattavissa puhelimiin, kameroihin, televisioon ja levysoittimiin. Televisiota lukuun ottamatta perustekniikka on peräisin teollistumisen alkua ajoilta. Televisio on noin 50 vuotta nuorempi, mutta myös televisio pysyi hyvin samanlaisena 1900-luvun loppuun. Nykyaikainen henkilöauto on rakenteeltaan lähes samanlainen kuin 1900-luvun alussa, ja rakennetta hallitsevat polttomoottori ja mekaaninen voimansiirto, kuten käy ilmi edeltä luvussa 5.7.



Kuva 46. Esimerkki teknologiamurroksesta, joka on johtanut myös tuotekonseptien täydelliseen murrokseen. Puhelimet, kamerat, televisiot ja levysoittimet muuttuivat ensin elektronisiksi ja digitaalisiksi entisten laitteiden tapaisiksi erillislaitteiksi. Kun ne olivat kehittyneet teknologialtaan yhte-neviksi, niistä syntyi uusi laitekonsepti, älypuhelin. Evoluutio on vähentänyt sekä laitteiden massan että energiantarpeen.

Kuten älypuhelimien ja sen integroimien laitteiden kanssa, myös liikenteen kanssa voi tapahtua samanlainen tuotannon ja kulutustottumusten täydellinen muutos. Älypuhelimien tuottajat ja valmistajat eivät ole entisiä puhelin-, kamera-, televisio- tai levysoitinvalmistajia. Viime aikojen merkittävimmät ja kiinnostavimmat uutuudet ovat tietokone- ja ohjelmistoyritysten markkinoille tuomia tuotteita. Tuotantorakenne poikkeaa täysin entisten laitteiden valmistajien ideologiasta, jossa keskeisessä asemassa oli oma tehdas. Nykyisin tuotebrändin omistaja vain suunnittelee ja markkinoi tuotetta. Valmistus tapahtuu alihankintana ja hyödyntäen eri komponentteihin erikoistuneiden valmistajien teknologista osaamista omalla alueellaan.

Tällainen kehitys on jo käynnissä liikenteen alalla. Laadullisesti ja määrällisesti kiinnostavimmat sähköautotuotteet tulevat muilta kuin perinteisiltä autovalmistajilta. Aasian nousevilla talouksilla on vahva ote, ja ne hallitsevat jo kevyiden sähköajoneuvojen markkinoita, joista Eurooppaan tuodaan mm. sähköpolkupyöriä ja sähköskoottereita.

Älypuhelimien tapaan uudet liikenteen sähköiset tuotteet voivat osaltaan ratkaista perinteisiin autoihin liittyviä teknisiä rajoituksia. Jos ajoneuvot kevenevät ja niiden hyötysuhde paranee, tarvitaan pienempiä akkuja. Silloin maailman litiumtuotanto riittää useampaan ajoneuvoon kuin jos tarvitaan isoja akkuja raskaisiin autoihin. Pieni akku on myös halvempi ja siten akku ei ole enää niin suuri kustannuskynnys kuin tällä hetkellä ja nykyisen henkilöauton tapaiseen kulkuneuvoon.

Tietotekniikka- ja puhelinteollisuuden tapainen hajautettu alihankintaan perustuva tuotanto on ajoneuvosuunnittelijoille ja myyjille joustavampi kuin nykyaikaisen autoteollisuuden raskaaseen metal-

liteollisuuteen perustuva rakenne. Vanhoissa autotehtaissa ei ole halua muuttaa tuotantoa nopeasti, vaan vasta sitä mukaa kun työstökoneet ja tuotantolinjat vanhenevat eli investoinnit on käytetty loppuun. Alihankintaan perustuvassa tuotannossa tällaisia rajoituksia ei ole. Tuotemerkki voi siirtyä sähköautoon helposti vaihtamalla alihankkijaa sellaiseen, jolla on kyky tuottaa sähköautoja.

Sähköinen kulkuneuvoteknologia tulee tarjoamaan kulkuneuvoja, jollaisia ei vielä ole olemassa. Ne voivat olla esimerkiksi kevyempiä ja helpommin käytettäviä kuin nykyiset kulkuneuvot. Ne voivat soveltua esimerkiksi samaan tarkoitukseen kuin polkupyörät, mutta ovat monipuolisempia ehkä tavaroiden kuljetuksessa tai soveltuvat pidempiin matkoihin ja vaikeampiin sääoloihin sekä henkilöille, joiden kunto ei riitä pitkiin pyörämatkoihin.

Sähköisten kulkuneuvojen tilantarve voi olla huomattavasti pienempi kuin autojen tai jopa polkupyörien. Sähköisten kulkuneuvojen älykyys saattaa tehdä mahdolliseksi tiheän liikkumisen yhteisellä väylällä tai automaattisen pysäköinnin sen jälkeen, kun kuljettaja jää kulkuneuvosta pois kohdepaikan oven edessä. Ja vastaavasti oma kulkuneuvo on tilattavissa ovelle lähdettäessä. Älykyyttä voi olla mahdollista hyödyntää myös reitinvalinnassa reagoinnissa liikenteen häiriötilanteisiin. Tällaista ohjausta voidaan käyttää myös hyödyksi liikenneverkon huolto- ja korjaustilanteissa siten, että ajoneuvot ovat tietoisia paikoista, joista niiden kulku on estetty.

Kynnys liikkumiseen voi madaltua, mutta myös muuttua erilaiseksi kuin autojen kanssa. On helppo lähteä liikkeelle lähialueelle kävelyetäisyyttä pidemmälle, mutta liikkuminen useiden kilometrien päähän kuten on tapana henkilöautolla, lakkaa kiinnostamasta. Siirtyminen ajoneuvosta jalankulkijaksi voi helpottua olennaisesti, koska ei tarvita kookasta pysäköintitilaa kuten autoille ja kontakti ympäröivän tilan kanssa voi olla parempi kuin autoon sulkeutuneena.

5.9 Yhdyskuntarakenteen ja kulkutottumusten kehitys

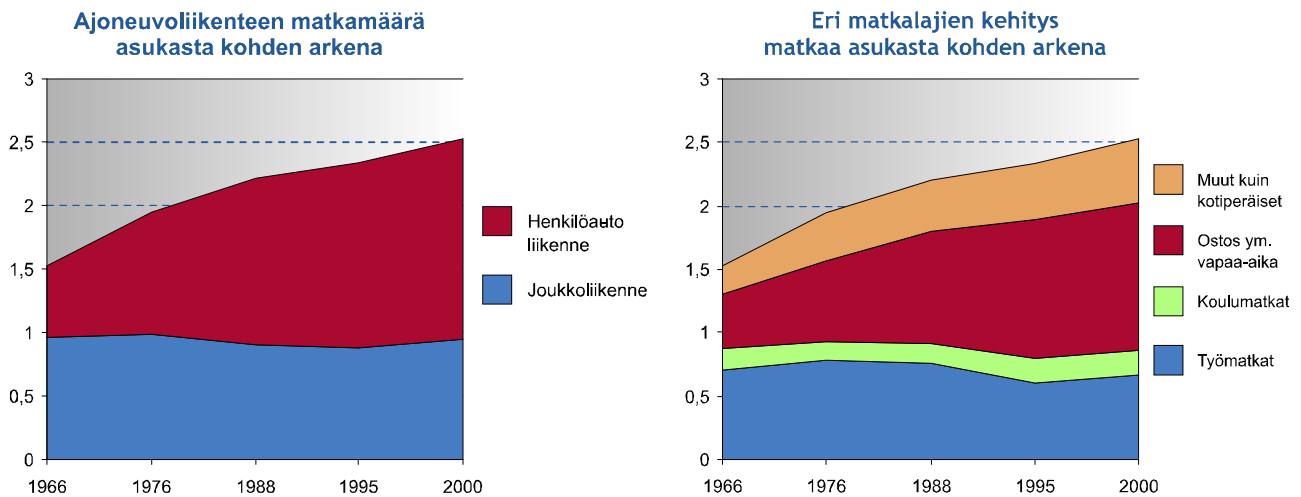
Liikenne ja liikkuminen rakennetussa ympäristössä on mahdollista vain liikenneväyliä käyttäen. Liikenneväylät ovat myös hallinneet ja ohjanneet rakennetun ympäristön muodostumista. Paikkoihin, joihin on vaikea tai mahdoton tehdä liikenneyhteyksiä, ei myöskään rakenneta. Toisaalta rakentaminen hakeutuu liikenneyhteyksien äärelle, missä yhteyksiä on valmiina.

Liikenteen kehityksen vaikutus on ollut maaseudulla vähäinen. Maatalousyhteiskunnassa maaseudulla sijaintia ohjasivat luonnonolot, kuten vesistöt ja viljelykseen ja laiduntamiseen soveltuva maasto. Kaupungeissa liikenteellä on keskeinen rooli. Kaupunkien kehityshistoriassa erottuu selkeästi vesiliikenteen merkitys sekä 1800-luvun teollistumisen yhteydessä syntynyt koneellisen maaliikenteen vaikutus.

1900-luvun loppupuolelle asti länsimaissa oli käytäntönä uusia kaupunkeja purkamalla vanhoja rakennuksia, jolloin myös asemakaava uusittiin. Tekniikan kehitys teki mahdolliseksi korkeammat rakennukset ja katuja levennettiin kasvaneen liikenteen tarpeeseen. Teollistumisen aikaan tultaessa siirryttiin kävelykaupungista joukkoliikennekaupunkiin ja 1950-luvulta alkaen myös Euroopassa autokaupunkiin. Autokaupunki aloitti kaupunkirakenteen hajautumisen (urban sprawl), kun funktionalismin ja lähiöperiaatteen mukaan kaupungin toiminnot pyrittiin eriyttämään ja asuminen sijoittamaan korttelikaupunkia terveellisempänä pidettyihin metsälähiöihin.

Eriytetty kaupunkirakenne lisäsi liikkumista ja liikennettä. Helsingissä joukkoliikenteellä tehtyjen matkojen määrä asukasta kohden on pysynyt suunnilleen ennallaan, mutta autolla tehtyjen matko-

jen määrä on lisääntynyt (Kuva 47). Lisäys johtuu sekä ihmisten vapaa-ajan käytön aktivoitumisesta että jakeluliikenteen korvautumisesta kaupunkilaisten noutoliikenteellä. Kuljettu matkan pituus on myös kasvanut. Se johtuu liikenteen nopeutumisesta, sillä matkustamiseen käytetty aika on pysynyt ennallaan.



Kuva 47. Kulkutavan ja matkan tarkoitusten kehitys Helsingissä vuosina 1966–2000 (Helsinki 2003).

Autoilun määrän kasvulla on kuitenkin raja, joka johtuu liikenneverkon kapasiteetin täyttymisestä sekä kaupunkiekonomiasta. Maan arvolla ja liikenteen kustannuksella on kytkeä, joka tarkoittaa, että maa-ala on arvokkaampaa käytettynä rakentamiseen kuin liikenteen tilaksi kun lähestytään kaupungin keskusta-aluetta. Käytännössä tämä johtaa siihen, että on sellainen maankäytön tehokkuuden arvo, johon asti liikenne voi perustua nykyisen kaltaiseen autoon. Tehokkaampi maankäyttö edellyttää vähemmän tilaa vieviä liikenneratkaisuja.

Eurooppalaisten kaupunkien käytännön ongelmaksi 1900-luvun lopulla on osoittautunut autoilun rajojen saavuttaminen, joka ilmenee tieverkon ruuhkautumisena. Aiemman kaupunkikehittämisen keino olisi ollut purkaa toimimattomaksi käynyt kaupunkirakenne ja korvata se uusilla rakennuksilla ja liikenneverkolla. Tällaista ei kuitenkaan pidetä poliittisesti mahdollisena, mutta merkittävämpi ongelma lienee se, ettei kaupunkirakenteen uudistukselle ole halukasta maksajaa. Aiemmin kaupunkirakenteen uudistaminen rakennuksia purkamalla rahoitettiin kasvavalla rakennusoikeudella eli maankäytön tehokkuuden lisäämisellä. Lisätilan tekeminen liikenteelle merkitsee maankäytön tehokkuuden alentumista, josta kukaan ei ole halukas maksamaan.

Vanhimmissa kaupunkirakenteissa maankäytön tehokkuus on luonnostaan alentunut asumisväljyyden kasvun kautta. Tämän vaikutus on kuitenkin vähäinen, ja kiinteistöjen arvonnousu voi johtaa jopa vaikutuksen kumoutumiseen. Siten nykyään on hyväksyttävä, että yhdyskuntarakenne uudistuu ja sopeutuu liikenteen tekniikan kehitykseen hyvin hitaasti tai ei ollenkaan. Nopein keino muuttaa yhdyskuntarakennetta on muuttaa rakennusten käyttötarkoitusta. Esimerkiksi Helsingissä pula toimitiloista johti 1970-luvulla mittavaan asuntojen muuttamiseen toimistotiloiksi.

Käyttötarkoituksella ja liikenneratkaistuilla on myös vuorovaikutus. Liikkeet menestyvät parhaiten, kun liikennetila muutetaan jalankulkua varten. Ruuhkautuminen lisää liikenteen ympäristöhaittoja, mikä vähentää halukkuutta asumiseen kuin myös asiointiin. Jäljelle jäävät vähemmällä liikenteellä toimivat kaupunkitoiminnot tai alhaisen taloudellisen tuoton toiminnot, joille alhaiset kiinteistökus-

tannukset ovat merkittävämpiä kuin ympäristön laatu. Pahimmassa tapauksessa alueelle ei löydy enää käyttötarkoitusta.

Eurooppalaisille kaupungeille tyypillistä on myös alueellinen kaupunkirakenteen muuttuminen siten, että keskustojen lähiympäristöjen teollisuus- ja liikennealueet kuten satamat ja muu logistiikka-toiminta siirtyvät tai siirretään muualle (Kuva 48). Nämä alueet ovat arvokkaampia rakennettavaksi asumis- ja toimistokäyttöön kuin entisessä käyttötarkoituksessa. Toisaalta tiiviin kaupunkirakenteen ympäröimiksi tulleiden teollisuus- ja logistiikka-alueiden liikenneyhteydet ovat muuttuneet huonosti teollisuuden ja logistiikan tarpeisiin soveltuviksi.



Kuva 48. Tyhjentynyttä Jätkäsaaren sataman varastokenttää kesäkuussa 2010. Alue muutetaan tiiviiksi kaupunkirakenteeksi joka on Helsingin kantakaupungin läntinen laajennus.

Alueiden käyttötarkoituksen muutos muuttaa kaupunkirakennetta, mutta tämäkin muutos on hidas. Kaupungit pystyvät kasvamaan vain 1–2 %:n vuosivauhdilla. Uusilla alueilla voidaan soveltaa uusia liikennetarkoituksia (Kuva 49), mutta ne eivät muuta vanhojen alueiden liikennetarkoituksia, vaikkakin voivat kuormittaa lisää vanhaa liikennejärjestelmää. Uusien alueiden liikennetarkoitusten ratkaisuena on myös vaatimus yhteensopivuudesta vanhojen alueiden kanssa. Kokonaan uusia ratkaisuja voidaan soveltaa vain uusien alueiden sisäiseen ja vierekkäin olevien uusien alueiden väliseen liikenteeseen. Muuten uusien ratkaisujen on oltava sellaisia, että niitä voidaan soveltaa myös vanhoihin kaupunkirakenteisiin.



Kuva 49. Vantaan kaupunki on suunnitellut Marja-Vantaalle rakennettaville uusille lähiöalueille ilman kuljettajan ohjausta toimivia autoja. Tällaista kuljetinta kokeiltiin Tikkurilassa aidatulla alueella toukokuussa 2009.

Sähköinen ajoneuvoteknologia voi tuottaa uusia liikennratkaisuja, kuten ilman ihmisen ohjausta ja kiskoja toimivan kuljettimen, jolla on vähäiset ympäristöhaitat eikä paikallisia päästöjä (Kuva 49) tai ihmistä seisten kuljettavan yksiakselisen laitteen, jonka tilantarve on vain hieman suurempi kuin joukkoliikenteessä matkustavan ihmisen liikennetilanteen tarve (Kuva 13). Tällaiset laitteet voivat luoda uusia kulkutottumuksia, kun ne täyttävät kävelyn sekä pyöräilyn ja autoilun väliin jäävää toiminnallista liikkumistavan aukkoa.

Uudenlaiset kulkutottumukset eivät ole pelkästään matkan tekeminen yhdellä kulkutavalla, vaan entistä monipuolisempien matkaketjujen syntyminen. Esimerkiksi Marja-Vantaan suunnittelijat kaavailivat ihmisen ohjaamatonta kuljetinta ratkaisuksi raskaan raideliikenteen liityntäliikennemuodoksi, jotta joukkoliikenne olisi autoiluun nähden kyllin houkuttelevaa. Vaikka kuljetin ei turvallisuussyistä voi kulkea kävelyvauhtia nopeammin, se olisi kuitenkin kävelyä vaivattomampi ja soveltuisi siten kävelyä pidempiin liityntäetäisyyksiin. Laitteen liikkumisympäristö voisi olla autokatuja vähemmän tilaa vaativaa ja luonteeltaan viihtyisämpi.

Kulkutottumus ei ole pelkästään tekninen ratkaisu, vaan palvelutuote, joka koostuu käytettävissä olevan kulkuvälineen lisäksi väylästä ja reitistä, kulkuvälineen käyttöoikeudesta ja saatavuudesta sekä ajankohdasta, täsmällisyydestä ja muista laadullisista tekijöistä. Kaupunkiympäristössä yleisyyt eri kulkutapojen sekakäyttö (Volti & Karasmaa 2006). Työssäkäyntialueen laajentuminen johtaa liikenteen kannalta toiminnallisesti yhteen sopimattomien alueiden välisen liikenteen kasvuun, jolloin osa matkoista on pakko tehdä useammalla kuin yhdellä kulkutavalla. Tällöin tulee myös tek-

nisesti mahdolliseksi, että matkustaja omistaa kulkuvälineitä, kun kulkuvälineiden pitkäaikaiseen seisottamiseen ei ole tilaa. Usean välineen omistaminen on myös kallista.

Kuten Marja-Vantaan tapauksessa, kaupunkiseudun liikkumisen palvelutuotteessa vuokratun liikkumiskapasiteetin osuus matkustamisessa laajenee ja voi saada uusia muotoja kevyinä sähkökäyttöisinä ja älykkäinä kulkuvälineinä. Tällainen kehitys laajentaa liikkumisen mahdollisuutta sekä nuorten että iäkkäiden suuntaan ja lisää tiiviiden kaupunkirakenteiden määrällistä saavutettavuutta. Yhdyskuntarakenteen sekoittuneisuuden rakeisuus voi tihentyä, kun helpon ja vaivattoman liikkumisen tarjoama saavutettavuus lisää liikkeiden ja palveluiden käyttäjäpotentiaalia liikennetilän käytön tehostuessa suhteessa autoiluun ja palvelu- ja saavutettavuusetaisyyden kasvaessa suhteessa kävelyyn.

Olennaista on, että positiiviset vaikutukset ihmisten liikkuvuuteen ja yhdyskuntarakenteen saavutettavuuden lisääntymiseen on saatavissa silloin, kun sähköinen kulkuvälineteknologia hyödynnetään uudenaikaisissa kulkuvälineissä ja niiden tarjoamissa uusissa palveluissa. Se, että ainoastaan muutetaan nykyisenkaltaiset henkilöautot sähkökäyttöisiksi; ei kehitä liikennejärjestelmää eikä yhdyskuntarakennetta.

5.10 Liikenteen päästöjen vähentämisen potentiaali

Sähkön käytöllä kulkuneuvojen energiamuotona tavoitellaan liikenteen aiheuttaman ilmastokuorman vähentämistä. Vuonna 2007 EU asetti tavoitteekseen vähentää kasvihuonekaasujen päästöjä 60–80 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Maailmanlaajuisesti on voimassa Kioton pöytäkirja, jossa vuodelle 2012 asetettiin tavoitteeksi 8 %:n vähennys vuoden 1990 päästötasosta. Kööpenhaminan ilmastokokouksessa joulukuussa 2009 EU-maat ilmoittivat oman tavoitteensa olevan 30 % vähennys vuoden 1990 tasosta vuoteen 2020 mennessä.

Sähköisten kulkuneuvojen tutkimuksen kannalta merkittävin tavoitevuosi on 2050. Vuosi 2020 on liian lähellä, jotta voisi olettaa toteutuvan sellaisia massiivisia muutoksia, jotka merkitsisivät sähkön merkittävää osuutta liikenteen energiamuotona suhteessa vuoden 2010 tilanteeseen. Tämä johtuu edellä esitetyistä ajoneuvokannan uusiutumisen hitaudesta sekä siitä, millä nopeudella yhdyskuntarakenne voi muuttua. Vuoteen 2050 on aikaa 40 vuotta, joka on riittävä aika sekä ajoneuvokannan uusiutumiselle että ennen sitä edellytettävälle tekniselle kehitykselle ja suunnittelutyölle.

Seuraavassa esitetään niitä vaatimuksia ja mahdollisuuksia, joita sähköisessä liikenteessä voi olla käytettävissä, jotta vuoden 2050 tavoite liikenteen osalta on saavutettavissa. Samalla arvioidaan etenemispolkuja ja sitä, mikä voisi olla tilanne vuonna 2020.

Liikenteen sähköenergian tuotantoa käsiteltiin luvussa 4,

Sähköisen liikenteen energialähteet. Esitetyn perusteella voi todeta, että liikenteen sähköistämisen tarvitsema sähkön kulutuksen 9,2 TWh:n vuotuinen kasvu on katettavissa päästöttömillä sähkön-tuotantomenetelmillä eli biomassalla, aurinkovoimalla ja tuulivoimalla erilaisin yhdistelmin. Tämä merkitsee sitä, että jos muun sähköntuotannon tuotantomenetelmien profiili pysyy ennallaan, koko sähkön tuotannon ominaispäästö alenee siltä osin, mitä 9,2 TWh:n päästötön tuotannon lisäys vaikuttaa. Kun sähkön vuosittaisena kokonaistuotantona pidetään 90 TWh ja nykyisenä CO₂ ominaispäästönä 260 g/kWh, liikenteen päästöttömän sähköntuotannon kanssa kokonaistuotannon ominaispäästö on 236 g/kWh.

Olennaisen muutoksen tähän kehitykseen voi tuoda eduskunnan päättämien kahden ydinvoimaluvan mukaisten ydinvoimalaitosten toteutuminen tarkastelujakson aikana. Todennäköisimmin nämä voimalat valmistuisivat aikana, jolloin ajoneuvokannan sähköistyminen on vasta meneillään.

Kokonaisuuden kannalta ei voi ajatella siten, että liikenteen sähköistyminen merkitsee liikenteen päästöjen poistumista, jos liikenteen edellyttämä lisätuotanto on päästötöntä. Sähköntuotannossa on kokonaisuutena tarve vähentää päästöjä, ja päästöttömät sähkön tuotannon keinot ovat rajalliset. Toisin sanoen, myös muu sähkön tuotantotarve kilpailee samoista rajallisista päästöttömistä tuotantoresursseista kuin liikenne.

Liikenteen eduksi voidaan katsoa se, että sähköinen liikenne sopivalla tavalla toteutettuna tuo mahdollisuuden aurinko- ja tuulisähkön tuotannon varastoimiseen ja siten molempien käytännön tuotantomäärien kasvuun. Tämän perusteella voitaisiin osoittaa liikenteen käyttämälle sähkölle alhaisempi ominaispäästö, koska akkujen varastointikapasiteetti mahdollistaa alhaisemman kokonaistuotannon ominaispäästön kuin ilman akkuja. Tämän ”hyvityksen” oikeudenmukainen määrittäminen on kuitenkin vaikeata, eikä hyvitys muuta kokonaispäästöjen määrää. Siksi tässä ei ole laskettu liikenteen sähkön ominaispäästölle eri arvoa, vaan ominaispäästön arvona käytetään koko sähkön tuotannon ominaispäästöä silloin, kun käytetään päästöttömiä tuotantomenetelmiä liikenteen sähkönkulutuksen sähkömäärän tuotantoon.

Henkilöautojen CO₂-ominaispäästö Suomessa uusimmalla polttomoottoritekniikalla eli EURO5 -normien mukaisella moottorilla on tällä hetkellä 164 g/km. Koko henkilöautokannan päästö on 180 g/km (Mäkelä 2009). Kun sähkökäyttöisen henkilöauton sähkönkulutuksena pidetään 0,2 kWh/km ja sähkön ominaispäästönä 236 g/kWh, sähköhenkilöauton ominaispäästö on 47 g/km. Pelkkä autojen sähköistyminen alentaisi henkilöautoilun päästöjä siten 74 % nykytilanteeseen nähden. Koska vertailuvuonna 1990 liikennesuorite on ollut alhaisempi kuin nyt, pelkkä sähköistyminen ei riitä vuoden 2050 päästötavoitteen saavuttamiseen.

Tavoitetta 80 %:n päästöjen vähenemisestä ei siten saavuteta pelkästään sillä, että henkilöauto-kanta muuttuu sähkökäyttöiseksi. Lisäksi on käytettävä esimerkiksi seuraavia keinoja:

- Henkilöautoliikennesuoritteiden vähentäminen
- Joukkoliikenteen käyttösuuden lisäys
- Kulkuvälineiden muut tekniset ratkaisut, kuten hyötykuormasuhteen parantaminen
- Sähköntuotannon ominaispäästöjen alentaminen

5.11 Liikennevälineiden omistus ja hallinta

Suomessa henkilöautot ovat yksityisessä hallinnassa joko käyttäjän omaisuutena tai työsuhteen kautta henkilökohtaisessa käytössä. Työsuhdeautot ovat usein vuokrattuja siten, että vuokra sisältää auton hinnan lisäksi huoltokulut. Auton vuokraus yksityiskäyttöön on harvinaista. Yhteiskäyttö-autoja tarjoaa käytännössä vain yksi yritys, City Car Club. Senkään palvelut eivät ole käytettävissä edes pääkaupunkiseudulla kuin keskustassa ja sen välittömässä läheisyydessä.

Helsingissä oli vuoteen 2009 kaupunkipyöräjärjestelmä, jossa polkupyöriä sai lainata veloituksetta.

Taksipalvelu on käytettävissä kaikkialla Suomessa. Taksia käytetään vähän arkiliikkumiseen. Päivisin taksit ovat liikematkustamisen käytössä, iltaisin ja öisin taksit palvelevat vapaa-ajan viettäjiä. Taksin hinnoittelu koetaan kalliiksi verrattuna henkilöauton tai joukkoliikenteen käyttöön.

Kulkuneuvojen omistusrakenne haittaa sellaisten matkaketjujen käyttöä, joihin sisältyy yksilöllisen liikenteen osuuksia muussa vaiheessa kuin kotiperäisen matkan alussa ja vastaavasti paluusuunnassa lopussa. Siten polkupyöra- ja autoliityntä ovat mahdolliset vain sellaisiin kohteisiin, joihin pääsee joukkoliikenteellä perille kävelyetäisyydelle. Poikkeuksena on Helsingin metro, jossa polkupyörien kuljettaminen on sallittua ilman lisämaksua ja jossa on ylikapasiteettia niin, että pyörien kuljetus ei haittaa ihmisten kuljettamisen palvelua.

Omistusrakenne tukee myös ajoneuvokannan ylikapasiteettia. Suhteellisen harvoin autoa tarvitsevat ostavat auton, koska kokevat auton vuokrauksen tai taksin käytön kalliiksi. Näin hankittuja autoja käytetään harvoin tai niitä käytetään silloinkin, kun autoa ei tarvittaisi. Mutta koska auto on käytettävissä, sitä käytetään. Autojen keskimääräinen vuotuinen 18 000 kilometrin ajokilometrimäärä osoittaa, että jälkimmäinen tapaus on yleinen.

Liikennevälineiden omistamisen muuttuminen kuluttajan omistamisesta vuokrauksen suuntaan voi tapahtua joko nykyisen leasingkäytännön tapaan tai käyttötilannekohtaisena vuokrauksena. Käyttötilannekohtainen vuokraus voi olla myös osana joukkoliikennematkaketjua siten, että joukkoliikennelippu oikeuttaa vuokraukseen tai alennukseen vuokrasta.

Leasingkäytännöllä on vähän vaikutusta liikkumistottumuksiin. Kulkuneuvon hallinta on samanlaista kuin omistettaessa, jolloin kulkuneuvon käytettävyys ei poikkea omistetusta kulkuneuvosta. Leasingilla ei siten vähennetä päästöjä käytön vähentämisen kautta. Päästöjä vähennetään sen kautta, että kulkuneuvo huolletaan säännöllisesti ja teknologia uusiutuu, kun päätös kulkuneuvon poistamisesta on leasingyrityksellä. Polttomootorikulkuneuvot voidaan poistaa nopeammin ja kuluttajalle sähkökulkuneuvon käyttöön saanti on pienempi kynnys kuin sitoutuminen ostamiseen ja mahdolliseen korkeaan hintaan. Leasingkäytäntö voi siten nopeuttaa siirtymistä sähköisiin kulkuneuvoihin, mutta se ei vähennä autojen käyttöä ja liikenteen määrää.

Käyttötilannekohtaisessa vuokrauksessa kulkuneuvoa ei koeta omaksi. Käytettävyys voi silti olla jopa parempi kuin omistetussa tai pysyvästi vuokratussa kulkuneuvossa. Kuluttajalla on käytettävissään kuhunkin käyttötilanteeseen sopiva kulkuneuvo (kaksipyöräinen, pieni henkilöauto, edustava henkilöauto, pakettiauto), joka on mahdollisesti pysäköitynä lähempänä kuin pysyvästi hallittu pysäköintipaikka. Kulkuneuvojen käyttö matkaketjujen osana tulee hyvin joustavalla tavalla mahdolliseksi. Henkilökohtaisen kulkuneuvon puute matkan loppupäässä ei rajoita joukkoliikenteen käyttöä tai aiheuta lisäkustannusta esimerkiksi matkalla, joka suuntautuu toiselle paikkakunnalle.

Kuluttajalle ei myöskään ole kustannuksia pysäköinnistä matkakohteessa. Esimerkiksi lentomatkan aikana ei tarvita pysäköintipaikkaa käyttämättömänä seisovan henkilöauton seisottamiseen.

Käyttötilannekohtainen vuokraus soveltuu huonosti harvaan yhdyskuntarakenteeseen. Kulkuneuvojen saatavuuden voi rinnastaa joukkoliikenteen pysäkkien saavutettavuuteen. Esimerkiksi jos omakotialueella kysyntä on yksi ajoneuvo viittä taloutta kohden, ajoneuvo on saatavilla keskimäärin vain joka viidennen tontin kohdalla. Omakotialue on myös sellainen alue, jossa kysyntä on yksisuuntaista ja kulkuneuvojen tehokas käyttö edellyttää operaattorin hoitamaa palautusajoa. Vaihtoehtoisesti täytyisi olla ilman kuljettajaa kulkevien kulkuvälineiden järjestelmä, jolloin kulkuväline voi palata itsenäisesti noutamaan seuraavaa käyttäjää.

Nykyisin omistetun henkilöauton saa käyttöön halvemmalla kuin millään tavoin vuokratun auton, kun kuluttaja suostuu käyttämään vanhaa autoa ja tinkii auton huollosta tai huoltaa itse. Tämä on auton omistamiseen liittyvien statusarvojen ohella merkittävä kilpailutekijä vuokraukseen nähden sekä haitta sähköisen ajoneuvokannan yleistymiselle. Leasingkäytäntö ei voi olla kustannuksiltaan kilpailukykyinen omistamiseen verrattuna, koska kulkuneuvon käyttö ei ole tehokkaampaa kuin omistettaessa. Käyttötilannekohtainen vuokraus sen sijaan voi kilpailla omistamisen kanssa sekä kulkuneuvon että pysäköintitilan omistamista tehokkaamman käytön ansiosta.

Henkilöautokannan sähköistämisen edistämiseksi on eduksi, että tarjolle tulisi kilpailukykyisesti hinnoiteltuja vuokrausratkaisuja. Leasingkäytännön etu on kuluttajalle valmiiksi järjestetty rahoitus sekä vapaus olla sitoutumatta uuteen ja epävarmaksi koettuun teknologiaan. Alan toimintaedellytysten edistämiseksi leasingkäytäntöä tulisi ehkä laajentaa nykyiseen nähden iäkkäämpiin autoihin, jolloin leasing olisi paremmin kilpailukykyinen vanhoihin käytettyihin autoihin tyytyville kuluttajille. Alan yrittäjille tämä tulee sähköajoneuvojen myötä todennäköisesti paremmaksi liiketoiminnaksi kuin polttomootoriautojen kanssa, koska sähköautot todennäköisesti vikaantuvat vähemmän ja tarvitsevat ikääntyessään suhteessa vähemmän ennakoitua huoltoa kuin polttomootoriautot.

Käyttötilannekohtaisessa vuokrauksessa olisi luultavasti myös eduksi, että markkinoille tulisi ikääntyneiden autojen omistamisen vaihtoehdoksi suunnattuja tuotteita. Toisin sanoen tarjolla olisi edullisesti hinnoiteltuja iäkkäitä ja laadultaan heikompia ajoneuvoja.

Molemmille vuokraustavoille on liiketoiminnan kannattavuuden vuoksi tarpeen tarjota edullisempia iäkkäiden tuotteiden ratkaisuja, koska tekniikan kehittyminen tulee alkuvaiheessa johtamaan ajoneuvojen nopeaan tekniseen vanhentumiseen. Maksukykyiset asiakkaat vaativat uutta teknologiaa usein ja on mahdollista, että sopimuskaudet tästä syystä lyhenevät. Vanhenevalle ajoneuvokannalle on kuitenkin oltava jokin järkevä markkina, joka siis voisi olla huokeahintainen vuokraus.

Akkujen korkean hinnan vuoksi olisi sähköisten kulkuneuvojen yleistymiseksi eduksi, että akkujen ja autojen hankinta olisi erotettu. Vaihtoakkujärjestelmässä kuluttaja ei joudu sijoittamaan akkuun vaan maksaa akusta vuokraa. Autossa kerralla kiinni oleva akkukapasiteetti voi olla pienempi kuin kiinteiden akkujen järjestelmässä, koska sähkönsiirto autoon on mahdollista muutamassa minuutissa. Kuluttajalla voisi myös olla mahdollisuus valita autoon otettava akkumäärä. Jos autoa käytetään kaupunkiliikenteessä ja alle 50 km päivässä, riittää investoida pieneen akkukapasiteettiin. Enemmän autoa käyttävä ostaisi tai vuokraisi akkuja tarpeensa mukaan.

Julkisen vallan toimesta tulisi vuokrausta suosia, koska siten voidaan edistää sähköisten kulkuneuvojen yleistymistä sekä tehostaa ajoneuvokannan käyttöä. Molemmat asiat ovat eduksi myös ympäristötavoitteiden kannalta. Tällä hetkellä akkujen vuokraus ei vaikuta verokohteluun. Tarkoi-

tuksenmukaista voi olla, että autovero perittäisiin euromääräisesti nykyisen suuruisena akuttoman auton hinnassa ja akut olisivat auto- ja polttoaineverosta vapaat.

6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Sähkö on ollut liikenteessä käyttövoimana jo 1800-luvun loppupuolelta lähtien, mutta yksilöllisen liikenteen käyttövoimana öljystä jalostetut polttonesteet ovat olleet hallitsevia. Sähköstä on kiinnostuttu 1900-luvun lopulta ympäristösyistä. Sähkö on paikallisesti päästötön ja sähköä voidaan tuottaa uusituvien luonnonvarain ja hiilidioksidineutraalisti.

Suomessa nykyisen henkilöautokannan energian kulutus sähkökäyttöisiksi muutettuna merkitsisi 10 %:n lisäystä sähkön käyttöön. Älykkäällä yöaikaisella latauksella tämä sähkömäärä on tuotettavissa nykyisellä voimalaitoskapasiteetilla, mutta sähkömäärä on tuotettava säätövoimalla eli vesi-voimalla tai hiililauhteella. Tarvittava 9,2 TWh:n sähkömäärä olisi tuotettavissa myös Suomessa kasvavalla biomassalla. Sähkömäärä voitaisiin tuottaa myös aurinkopaneelein tai tuulivoimalla, kun käytetään hyväksi sekä autojen akkujen sähköntuotannon tasausominaisuutta että pitkällä aikavälillä tuotannon tasausta muun energiantuotannon kuten sähkön ja kaukolämmön yhteistuotannon kanssa.

Sähkön hinnoittelu ja verotus perustuvat sähkön teollisuus- ja kotitalouskäyttöön. Liikenteen energialla on erityisvero, jota ei voida periä ilman älykästä lataustekniikkaa sähköä käyttäviltä ajoneuvoilta. Ilman tätä teknologiaa valtio tulee tukeneeksi jokaista kotitaloussähköllä ladattavaa sähköautoa noin 1100 € verohuojennuksella vuodessa. Liikenteessä käytettävän sähkön hinnasta merkittävän osan muodostavat akkujen kustannukset. Jos euromääräinen liikennesähkön vero on sama kuin nykyinen polttoaine-energian vero, yhdessä akkujen kanssa liikenteen sähkö tulee kalliimmaksi kuin polttoneste tällä hetkellä.

Eri liikennevälineiden energian tarve hyödyksi kuljettua henkilökilometriä kohden vaihtelee tasaisella nopeudella suhteessa 1:10 siten, että 1450 kg:n omamassainen henkilöauto tarvitsee 10 kertaa niin paljon energiaa kuin henkilöraide liikenne. Käytännön liikenteessä ja erityisesti kaupunkiliikenteessä ratkaisevaa energian tarpeelle on pysähtyminen. Sähköisen ajoneuvotekniikan merkittävä etu on mahdollisuus palauttaa liike-energiaa. Tämä parantaa henkilöauton asemaa suhteessa henkilöraide liikenteeseen, mutta auto tarvitsee silti energiaa noin kuusi kertaa enemmän. Energiantarpeen kannalta ratkaisevaa on henkilöauton suuri oma massa, joka on enimpään osaan henkilöauton käyttöä tarpeettoman suuri.

Sekä energian tarpeen että kaupunki- ja katutilankäytön kannalta sähköisen kulkuvälinetekniikan mahdollisuus on uudenlaisissa kulkuvälinekonsepteissa. Polttomoottorikäyttöisten autojen muuttaminen sähkökäyttöisiksi ei vaikuta liikennejärjestelmän toimintaan eikä poista ruuhkautumista eikä muita liikenteen ympäristöongelmia kuin pakokaasupäästöt. Sähkökäyttö on polttomoottorikäyttöä joustavampi rakenteellisesti, ja siksi ovat mahdollisia sellaiset kulkuvälineiden ja niiden käytön konseptit, joihin polttomoottori ei ole soveltunut.

Autoliikenteen sähköistyminen sekä liikkumistottumusten ja yhdyskuntarakenteen muutokset ovat pitkäkestoisia prosesseja. Se antaa aikaa sopeutua muutokseen mutta hidastaa toivottujen vaikutusten toteutumista. Haasteelliseksi tulee myös uudenlaisten alueiden ja niiden liikenteen yhteensovittaminen vanhan yhdyskuntarakenteen kanssa. Jo nyt on ongelmana taajamien reuna- ja haja-asutusalueiden ja seutukeskuksen liikennejärjestelmien yhteensopimattomuus: haja-alueilla ei voi järjestää joukkoliikennettä mutta kaupunkikeskustoissa enemmistö ei mahdu liikkumaan autoilla.

Sähköiset kulkuvälineet kuten sähköavusteiset polkupyörät tai kolmipyörät, kuljettajatta kulkevat sähkökuljettimet tai Segwayn tapaiset kulkuvälineet laajentavat ihmisten liikkuvuutta kävelyn mahdollisuuksista. Mutta nämä laitteet eivät sovi samaan liikennetilaa nykyisenkaltaisten autojen kanssa. Katu- ja liikennetilan säästäminen vähemmän tilaa vievin ratkaisuin edellyttää siten katutilan jakamista eri käyttötarkoituksiin, eikä nykyinen jako jalankulun ja pyöräilyn sekä moottoriliikenteen tiloihin riitä.

Sähköinen akkukäyttöisten kulkuvälineiden teknologia on kehitysvaiheessa ja toistaiseksi sekä kallista että heikkoa saatavuudeltaan. Länsimainen autoteollisuus ei näytä olevan halukas luopumaan öljypohjaisesta teknologiasta ja siihen liittyvästä merkittävästä jälkimarkkinasta. Muutamissa maissa julkinen valta on tukenut vahvasti sähköautojen yleistymistä. Alkuvaiheen korkeat hinnat sekä odotukset huokeammista ja paremmista tuotteista vähentävät kuluttajien kiinnostusta ostaa sähköautoja ja niiden akkuja. Erilaiset vuokraamiseen perustuvat käytännöt voivat olla keino edistää sähköisten kulkuvälineiden yleistymistä.

Autoilun sähköistymiselle on tekniset mahdollisuudet, mutta poliittisella päätöksellä on valittava, mihin suuntaan liikennejärjestelmää halutaan kehittää ja minkälaisia tavoitteita saavuttaa. EU:ssa hyväksytyjen päästötavoitteiden täyttyminen vuodelle 2050 ei näytä onnistuvan pelkästään autojen sähköistämällä, jos auto konseptina säilyy ennallaan ja energiantuotannosta ei tule CO₂-neutraalia. Autojen sähköistäminen ei poista tarvetta vähentää liikkumistarvetta ja liikennettä elin- ja asumisympäristöjen parantamiseksi. Energian kulutuksen vähentäminen edellyttää kevyempiä kulkuneuvoja, henkilöautoilun korvaamista jakelulla ja korkeatasoista joukkoliikennettä tiiviissä rakenteessa kuten kaupunkikeskustoissa.

Yhteenvedo työssä käytetyistä tilastoarvoista

Akun kapasiteetti/paino -suhde (Li-Ion) 0,202 kWh / 1 Kg
(<http://www.batteryuniversity.com/parttwo-55.htm>)
Akun kapasiteetti/paino -suhde (Li-Ion) 1 kWh / 10 Kg (Haakana 2008)
Akun kapasiteetti/tilavuus -suhde (Li-Ion) 0,514 kWh / 1 L
(<http://www.batteryuniversity.com/parttwo-55.htm>)
Akun käyttöikä (litiumfosfaatti) 10 vuotta (Akkuvalmistajan spesifikaatio)
Akun lataus-/purkukertojen määrä (litiumfosfaatti) 3000 (Akkuvalmistajan spesifikaatio)
Akun ominaishinta kuluttajalle 5 000–10 000 € / 10 kWh (European Batteries Oy)
Aurinkopaneelin ominaisteho säätäjän ja invertterin hyötysuhde huomioiden 100 W/m² (Aurinkopaneelit.pdf)
Aurinkopaneelin vuosituotantoa vastaava keskimääräinen teho Keski-Suomessa 15 W/m² (Aurinkopaneelit.pdf)
Henkilöautolla ajatun työmatkan pituus 15 km (HSL-alueella keskimäärin)
Henkilöauton keskimääräinen käyttöaika Suomessa 19 vuotta (HLT 2006)
Henkilöauton keskimääräinen käyttösuorite Suomessa 18.000 km/vuosi (HLT 2006)
Henkilöauton keskimääräinen päivittäinen käyttösuorite 80 % todennäköisyydellä enintään 40 km (Henkilöliikennetutkimuksen (HLT 2006 6_31_tapa.xls) henkilöautoilun jakauma)
Henkilöauton kuluttajahinnan verojen osuus, noin 40 %
Kivihiilen markkinahinta satamassa Suomessa laskettuna polttoarvoa kohden 8 €/MWh
Liikennepolttonesteen kuluttajahinnan verojen osuus, noin 60 % (
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Polttoainevero> 8.4.2010 17:18)
Liikennepolttonesteen kuluttajahinta laskettuna polttoarvona 0,16 €/kWh
Puuhakkeen tiheys 300 kg/m³
Puun markkinahinta teollisuudelle laskettuna polttoarvona 10–25 €/MWh
Puutukin tiheys pinottuna 500 kg/m³
Suomen henkilöautokanta 2,8 miljoonaa autoa (tilastovuosi 2009)
Sähköautokannan vuosittainen energiankulutus Suomessa 9,2 TWh (Kronström 2009)
Sähköauton käytännöllinen akkukapasiteetti 30 kWh (150 km toimintasäde)
Sähköauton ominaisajoenergian kulutus (tank-to-wheel) 0,2 kWh/km (Kronström 2009)
Sähkön kuluttajahinta 0,13 €/kWh (<http://www.sahkonhinta.fi/summariesandgraphs> 8.4.2010 17:12)
Sähkön tuotannon ominaispäästö Suomessa 260 g/kWh (Energiateollisuus 2010)
Tuulivoimalan vuosituotantoa vastaava keskimääräinen teho osuutena nimellistehosta 25 % (Holtinen ym. 1996, ss. 38–39)
Tuulivoiman suunniteltu rakennettava kokonaisteho Suomessa 2000 MW (Matilainen 2008)

Lähdeluettelo

Andersson, Harri (1993): Rakennettu ympäristö – kaupunkirakentamisen modernina projektina. Väitöskirja. Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskuksen julkaisuja A:10.

Cazzola, Pierpaolo (2010): Achieving a Low Carbon Transport System Worldwide. International Energy Agency, WP-29 Roundtable Geneva, 24 June 2010.

<http://www.unece.org/trans/events/2010/104%20Pierpaolo%20Cazzola%20IEA.pdf> Luettu 4.2.2011

CO₂-raportti (2010): Kiinassa jo yli 100 miljoonaa sähköpolkupyörää. Verkkolehti 25.2.2010 8:55.

http://www.co2-raportti.fi/index.php?page=ilmastouutisia&news_id=2034 Luettu 3.3.2010

DfT (2010): Electric Personal Vehicle (EPV) consultation.

<http://www.dft.gov.uk/consultations/open/2010-01/> Luettu 5.3.2010 14:45

Electricbikee (2009): Eurobike 2009 to Feature E-bikes. <http://www.electricbikee.com/eurobike-2009-to-feature-e-bikes/> Luettu 3.3.2010

Electricbikee (2010): Yamaha To Introduce Electric Scooters to New Markets. 31.1.2010.

<http://www.electricbikee.com/electricbikes/electric-scooter/> Luettu 3.3.2010

Electrification Coalition (2009): Electrification Roadmap. Revolutionizing Transportation and Achieving Energy Security.

Energiateollisuus (2011): Energiavuosi 2010 sähkö.

http://www.energia.fi/fi/ajankohtaista/lehdistotiedotteet/energiavuosi_2010_sahko.html

Luettu 28.1.2011

EPA (2010): Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards for Model Years 2017-2025. U.S. Environmental Protection Agency.

www.epa.gov/otaq/climate/regulations/ldv-ghg-tar.pdf Luettu 1.2.2011

Geitel, Peter (2009): Tämä vehje kulkee sähköllä! www.iltasanomat.fi 7.2.2009 12:23

<http://www.iltasanomat.fi/autot/1641313> Luettu 7.7.2010

Goodman, David (2009): Despite Ban, Electric Bikes Gain Favor on City Streets, The New York Times, verkkolehti 20.10.2009.

<http://cityroom.blogs.nytimes.com/2009/10/20/despite-ban-electric-bikes-gain-favor-on-city-streets/> Luettu 6.2.2010

Gustafsson, Bengt (2009): Future transit system for Uppsala. Beamways AB.

<http://beamways.com/file/uppsala%20report%20translated%20brief.pdf> Luettu 19.4.2010

Haataja, Seppo; Hellman, Tuija; Lilleberg, Irene (2003): Liikenne ja matkustajamäärät. Julkaisussa Liikenne Helsingissä 2002. Helsingin kaupungin tietokeskus, Tilastoja 2003:3. ISBN 1455-7231

Heinzmann, John David; Taylor, Michael (2009): The Role of the Segway® Personal Transporter (PT) in Emissions Reduction and Energy Efficiency. Segway Inc. 2009.

http://www.segway.com/downloads/pdfs/emissions_reduction_whitepaper2009.pdf Luettu 5.3.2010

HELEN (2009): Kaukolämmön kulutus.

<http://www.energia.fi/fi/kaukolampo/kaukolampo/asiakkuus/kulutus> Luettu 16.4.2010

Helsinki (2003): Liikenne Helsingissä 2002. Tilastoja 2003:3. Helsingin kaupungin tietokeskus, Helsinki 2003. ISBN 1455-7231

HLT (2006): Valtakunnallinen henkilöliikennetutkimus 04–05. www.hlt.fi. Luettu 11.10.2009

Hänninen, Salla; Hellén, Sanna; Lettenmeier, Michael; Autio, Sakari (2005): Katujen materiaali-panos. Luonnonvarojen käyttö Helsingin katujen rakentamisessa ja ylläpidossa. MareiaEuro. HKR:n julkaisut 2005:1 / HKR-Ympäristötuotanto.

likkanen, Pekka; Sirkiä, Ari; Elo, Juha; Saijonmaa, Pekka (2009): Puupolttoaineiden kuljetusten optimointi. Keiteleen kanavatyöryhmän taustaselvitys. Loppuraportti 29.12.2009. Merenkululaitos, Ramboll Finland Oy, Pöyry Energy Oy.

Joutsiniemi, Anssi (2010): Becoming Metapolis – A Configurational Approach. Datutop 32:2010. ISBN 978-952-15-2311-3. Tampere 2010.

Koistinen K; Tuorila H (2008): Millainen olisi hyvä elinympäristö? Asukkaiden näkemyksiä elinympäristöstä, asumisesta ja palveluista eri elämänvaiheissa. Kuluttajatutkimuskeskuksen julkaisuja 9/2008.

Kronström, Kai (2009): Sähköajoneuvot Suomessa -selvitys. Biomeri Oy. 2.7.2009.

Kurri Jari & Laakso Jukka-Matti 2002: Pysäköintipoliittiset toimet ja niiden vaikutukset pääkaupunkiseudulla. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuusto (YTV), liikenneosasto.

Lehtonen, Lexi (2009): TM parivertailu, Piaggio MP3 ja Vespa GTS, Kolmas pyörä toden sanoo? 2.5.2007 <http://tekniikanmaailma.fi/kaksipyoraiset/vertailut/tm-parivertailu-piaggio-mp3-ja-vespa-gts> Luettu 20.7.2010 13:36

Liikennevirasto (2010): Tietilasto 2009. Liikenneviraston tilastoja 2 2010.

LYYLI -tutkimusohjelma. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja PJS, C 2002:18. Helsinki.

Matilainen, Jussi (2008): Tuulivoiman vaikutuksia voimajärjestelmään. Esitelmä, Sähkön kysyntäjoustoseminaari 1.10.2008. http://www.fingrid.fi/attachments/fi/media/esitysaineisto/kysyntajoustoseminaari_011008.pdf

Mäkelä, Kari (2009): Lipasto, Liikenteen päästöt, henkilöautot keskimäärin. 15.12.2009. <http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/henkiloliikenne/tieliikenne/henkilautot/hakeskim.htm> Luettu 16.7.2010 19:35

Peutere, Pietari (2005): Tieliikennelaki ei tunne Segwaytä. HS.fi 6.8.2005. <http://www.hs.fi/autot/artikkeli/Tieliikennelaki+ei+tunne+Segwayt%C3%A4/HL20050806SI1AL03d3d> Luettu 5.3.2010 14:39

Pirilä, Pekka; Ranne, Aulis; Järvinen, Pekka; Luoma, Päivi (1997): Sähkölle ympäristöluokittelu? Ympäristöluokittelun perusteita. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1878. Espoo 1997. 71 s. ISBN 951-38-5178-8 <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>

Rintala, Jukka (2007): Arvio biomassan pitkän aikavälin hyödyntämismahdollisuuksista Suomessa. Työ- ja elinkeinoministeriö 6.2.2007.

Romana, Leo (2010): Potential Solutions for Electric Vehicles in Bus and Delivery Traffic. Master's thesis in Aalto university School of science and technology, Department of Electrical Engineering.

Sane, Kari (2010). Puhelinkeskustelu 17.8.2010.

Schneider, Tom (2009): Aurinkosähköjärjestelmien tuottaman tasavirran käyttö toimistorakennusten LED-valaistusjärjestelmissä. Diplomityö TKK 2009. <http://lib.tkk.fi/Dipl/2009/urn100106.pdf>
Luettu 22.4.2010 10:10

Solpros (2001): Aurinkoenergia Suomen olosuhteissa ja sen potentiaali ilmastonmuutoksen torjunnassa [WWW]. Helsinki, Solpros. 2001. http://www.kolumbus.fi/solpros/reports/3rdeport_final.PDF.
Luettu 22.4.2010 9:26

TM (2009): Polkupyörävertailu, Tekniikan maailma 13.2009.

Voltti, Ville; Karasmaa, Nina (2006): Kulkutapojen rinnakkaiskäyttö ja siirtymäpotentiaali. Liikenne- ja viestintäministeriö 21/2006. ISBN 952-201-541-5.

Kuvat

Kuva 5 Pääkaupunkiseudun junakalusto Oy:n moottorivaunujuna "Flirt" eli sarja Sm5 Leppävaaran asemalla huhtikuussa 2010. Juna koostuu neljästä vaunusta ja kokonaispituus on 75,2 metriä. Tiedosto P1050616.JPG

Kuva 6 Pariisin raitiolinjan T3 raitiovaunu Alstom Citadis 402 kesäkuussa 2010. Vaunussa on seitsemän osaa ja kokonaispituus on 43,7 metriä. Tiedosto P1080208.JPG

Kuva 7 Berliinin metron (U-Bahn) metrojuna sarjaa HK linjalla U2 syyskuussa 2010. Yksi junayksikkö koostuu neljästä vaunusta, joiden välillä matkustamo jatkuu vaunusta toiseen. Yhden junayksikön pituus on 51,6 metriä ja junia liikennöidään kahden yksikön junina. Tiedosto P1100197.JPG. Tietolähde http://de.wikipedia.org/wiki/BVG-Baureihe_HK_31.1.2011_11:01

Kuva 8 Duoraitiovaunu rautatielinjalla Pariisin raitiolinjalla T4 kesäkuussa 2010. Siemensin valmistama vaunu Avanto S7 koostuu viidestä osasta ja on pituudeltaan 36,5 metriä. Tiedosto P1070818s.jpg

Kuva 9 Hybridiraitiovaunu sähköistämättömällä rautatieradalla Ruotsissa 2007. Alstomin valmistama Regio Citadis -mallinen vaunu on toimitettu Kasselin kaupunkiliikenteeseen. Kuva Alstom. Tiedosto Citadis rannalla.jpg

Kuva 10 Niveljohdinauto Solingenissa Saksassa heinäkuussa 2003. Tiedosto DSCF0690.JPG

Kuva 11 Kaksinivelinen Hessin valmistama sarjahybridibussi koeliikenteessä Pitäjänmäellä touko-kuussa 2010. Bussi on muunnos johdinautosta siten, ettei autossa ole virroittimia mutta takapäähän on sijoitettu aggregaatti ja katolle superkondensaattorit. Ajossa dieselmoottori on käynnissä jatkuvasti. Tiedosto P1050790.JPG

Kuva 12 Sähkökäyttöinen mopoauto Elo kuvattuna kesällä 2010 Helsingissä. Rekisterikilven paikalla on mopon vakuutuskilpi. Tiedosto P1090122.JPG

Kuva 13 Segway-kulkijoita Tallinnassa toukokuussa 2008. Tiedosto P5242029.JPG

Kuva 47 Kulkutavan ja matkan tarkoitusten kehitys Helsingissä vuosina 1966–2000 (Helsinki 2003). Tiedosto s19-s41.cdr

Kuva 48 Tyhjentyntä Jätkäsaaren sataman varastokenttää kesäkuussa 2010. Alue muutetaan tiiviiksi kaupunkirakenteeksi joka on Helsingin kantakaupungin läntinen laajennus. Tiedosto P1060241.JPG

Kuva 49 Vantaan kaupunki on suunnitellut Marja-Vantaalle rakennettaville uusille lähiöalueille ilman kuljettajan ohjausta toimivia autoja. Tällaista kuljetinta kokeiltiin Tikkurilassa aidatulla alueella toukokuussa 2009.

Laskelmien lähdetaulukot

Liikenne ja yhdyskuntarakenne

Luvussa esitettyjen tunnuslukujen laskenta: Katualat helsingissä.xls

4.2.6 Ladattavien kulkuneuvojen akkukannan käyttö aurinko- ja tuulisähkön varastona

HLT 2006 taulukko 6_31_tapa.xls/henkilöautoilun jakauma

Autoakut verkon tasaajina.xls

4.3 Liikenteen sähköenergian kustannus

Helsingin energiantuotanto.xls/Puun kuljetus.xls

5.2 Liikkumisen energiantarve

Ajoneuvojen energiankulutus.xls