



Väylävirasto
Trafikledsverket

Väyläviraston julkaisu
40/2020

TIEVERKON SÄHKÖISTÄMISEN MAHDOLLISUUDET JA HAASTEET SUOMESSA



Tieverkon sähköistämisen mahdollisuudet ja haasteet Suomessa

Väyläviraston julkaisuja 40/2020

Väylävirasto
Helsinki 2020

Kannen kuva: Väyläviraston kuva-arkisto

Verkojulkaisu pdf (www.vayla.fi)

ISSN 2490-0745

ISBN 978-952-317-794-9

Väylävirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. 0295 34 3000

Tieverkon sähköistämisen mahdollisuudet ja haasteet Suomessa. Väylävirasto. Helsinki 2020. Väyläviraston julkaisuja 40/2020. 104 sivua. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-794-9.

Avainsanat: tieverkot, tieliikenne, sähköistys, ERS

Tiivistelmä

Suomen tavoitteena on puolittaa liikenteen kasvihuonekaasupäästöt vuoteen 2030 mennessä ja vuoteen 2045 mennessä liikenteen tulisi olla kokonaan päästötöntä. Tämä vaatii merkittäviä toimia tieliikenteessä, jonka päästöt muodostavat 93 % kaikesta kotimaan liikenteen päästöistä. Yhtenä päästövähennyskeinona on esitetty tieverkon sähköistämistä, mikä mahdollistaisi ajoneuvojen akkujen lataamisen ajon aikana.

Tässä työssä tarkasteltiin tieverkon sähköistämisen neljää eri pääteknologiavaihtoehtoa, joista ajoneuvon yläpuolelta ajolangasta tapahtuvan latauksen todettiin olevan kypsintä teknologiaa. Ajolangat tarjoavat riittävän lataustehon myös raskaalle kalustolle, mutta toisaalta rajaavat kevyet ja matalat ajoneuvot järjestelmän ulkopuolelle. Induktiivinen lataus mahdollistaa kaikenlaisten ajoneuvojen lataamisen, mutta ei tarjoa riittävää lataustehoa raskaalle kalustolle, mikä heikentää huomattavasti sen sovellettavuutta.

Työssä toteutettiin vaikuttavuusarviointi neljälle esimerkitapaukselle. Tarkasteltaviksi tapauksiksi valittiin vakiintuneet satamalogistiikkaan liittyvät yhteysvälit sekä laajemat maanteiden pääväyliä sisältävät tarkastelut. Tarkasteluissa huomioitiin valittava sähköistysteknologia muuttamalla investointikustannuksen tasoa. Yksittäiset logistiikkaa palvelevat yhteysvälihankkeet eivät tarkastelussa käytetyillä oletuksilla ole yhteiskunta-taloudellisesti kannattavia. Kannattavuus riippuu erityisesti sähköistämisen investointi-kustannuksesta, johon liittyy teknologian kypsymättömyydestä johtuvaa epävarmuutta.

Tieverkon sähköistämällä voi olla suuri päästövähennysvaikutus, joka tosin riippuu toteutuksen laajuudesta. Työn esimerkitapauksilla päästövähennyksen laskennallinen kustannus asettuu useampaan sataan euroon per CO₂-tonni. Yksittäisten logistiikkaa palvelevien yhteysvälien sähköistämällä ei todettu olevan merkittäviä vaikutuksia liikenteen toimivuuteen tai saavutettavuuteen. Vilkasliikenteisten yhteysvälien sähköistämisen voi puolestaan heikentää liikenteen toimivuutta ruuhkautuneessa tilanteessa. Teknologioilla voi olla vaikutuksia tieliikenne- ja sähköturvallisuuteen.

Tieverkon sähköistämisen vaatii olemassa olevan sähköjakeluverkon vahvistamista tai laajentamista. Sähköverkkokustannusten osuuden koko tieverkon sähköistämisestä on eri selvityksissä arvioitu olevan 20–40 %. Lataustehot verkosta voivat nousta merkittäviksi, mikäli raskaan kaluston määrät nousevat paikallisesti suuriksi. Tämä voi aiheuttaa haasteita tehonhallinnalle paikallisesti. Valtakunnan laajuudessa sähköisten tieverkkojen energiankulutuksen ja tehontarpeen arvioitiin tässä työssä olevan hallittavissa.

Nykytiedon ja tämän tarkastelun valossa sähköiset tieverkot voivat olla vaihtoehto päästövähennyksiin erityisesti kuorma-autoissa ja pitkän matkan linja-autoliikenteessä. Keskeisimpinä hidasteina sähköisten tieverkkojen yleistymiselle ovat suuret investointikustannukset ja pitkä sitoutuminen vielä kehittyvään teknologiaan. Lopulta sähköistämisen toteuttamiskelpoisuutta ohjaa päästövähennystavoitteiden kunnianhimo, käytössä olevat muut keinot tavoitteiden saavuttamiseksi sekä tieverkon sähköistämisen kannattavuus suhteessa muihin keinoihin.

Möjligheterna och utmaningarna med att elektrifiera vägnätet i Finland. Trafikledsverket. Helsingfors 2020. Trafikledsverkets publikationer 40/2020. 104 sidor. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-794-9.

Sammanfattning

Finlands mål är att halvera växthusgasutsläpp från transporter år 2030 och 2045 bör transporterna vara helt utsläppsfria. Detta kommer att kräva betydande åtgärder inom vägtransport, som står för 93% av alla inhemska transportutsläpp. En föreslagen lösning för att minska utsläppen är att använda elektriska vägsystem (ERS, electric road system), vilket skulle göra det möjligt att ladda fordonsbatterier under körning.

I detta arbete undersöktes fyra olika huvudsakliga tekniska alternativ för elektrifiering av vägnätet. Laddning från en kontaktledning fanns vara den mest mogna tekniken: kontaktledningen ger tillräcklig laddningskraft även för tunga fordon, men begränsar å andra sidan andra fordon, dvs personbilar utanför systemet. Induktiv laddning tillåter laddning av alla typer av fordon, men ger inte tillräcklig laddkraft för tunga fordon, vilket kraftigt minskar användbarheten.

En konsekvensbedömning genomfördes för fyra fallstudier för att beskriva villkoren, storleken och skalbarheten för ERS. Existerande hamnverksamheter valdes ut för analysen samt en bredare granskningar av betydande vägavsnitt. Granskningarna tog i beaktande ERS-teknologierna via investeringskostnader. Enskilda ERS-projekt ansågs vara socioekonomiskt olönsamma under de antaganden som satts upp. Lönsamheten styrs av investeringskostnaden för ERS, vilket är förknippat med osäkerhet på grund av teknikens omogenhet.

ERS kan ha en stor potential för minskning av utsläpp, även om detta i sin tur beror på omfattning av sådant genomförande. I fallstudierna sattes den beräknade kostnaden för utsläppsminskningen till flera hundra euro per ton CO₂. Elektrifieringen av enskilda logistikanslutningar visade sig inte ha någon betydande inverkan på transportens prestanda eller tillgänglighet. Elektrifiering av högtrafikförbindelser kan i sin tur minska transportens effektivitet i överbelastade situationer. ERS-teknologierna kan också påverka trafiksäkerheten och elsäkerheten.

Elektrifiering av vägnätet kräver förstärkning eller utbyggnad av det befintliga elnätet. Andelen elnätkostnader för elektrifiering av hela vägnätet har i olika studier uppskattats till 20–40%. Laddkraft från nätet kan vara betydande om antalet tunga fordon blir stort lokalt. Detta kan utgöra utmaningar för krafthantering lokalt. Landsomfattande uppskattades energiförbrukning och energibehov för ERS vara hanterbara.

Mot bakgrund av den nuvarande kunskapen och baserat på denna översyn kan ERS vara ett alternativ till utsläppsminskningar, särskilt för lastbilar och långväga busstransporter. De viktigaste hindren för utnyttjandet av ERS är höga investeringskostnader och ett långt engagemang för en fortfarande utvecklande teknik. I slutändan drivs ERS genomförbarhet av ambitionen om utsläppsminskningarna, de andra tillgängliga medlen för att uppnå målen och lönsamheten för ERS relativt andra medel.

The opportunities and challenges of electrifying the road network in Finland. Finnish Transport Infrastructure Agency. Helsinki 2020. Publications the FTIA 40/2020. 104 pages. ISSN 2490-0745, ISBN 978-952-317-794-9.

Abstract

Finland's goal is to halve the greenhouse gas emissions of transport by 2030, and by 2045 transport should be completely emission-free. This requires significant action in road transport, which accounts for 93 % of all domestic transport emissions. One proposed solution of reducing emissions is to utilize electric road systems (ERS), which would make it possible to charge vehicle batteries while driving.

In this work, four different main technology options for electrifying the road network were examined. Charging from an overhead contact line was found to be the most mature technology. The overhead contact line provides sufficient charging power even for heavy vehicles, but on the other hand limit low vehicles i.e. passenger cars outside the system. Inductive charging allows charging of all types of vehicles, but does not provide sufficient charging power for heavy vehicles, which greatly reduces its applicability.

An impact assessment was carried out for four cases. Established port logistics cases were selected for the analysis, as well as broader reviews of main road routes. The reviews took into account the ERS technologies via investment costs. Individual ERS projects were considered socio-economically unprofitable under the assumptions used in the review. Profitability depends in particular on the investment cost of ERS, which is associated with uncertainty due to the immaturity of the technology.

ERS can have a major emission reduction potential, although it depends entirely on the scale of implementation. In the case studies, the calculated cost of the emission reduction was set at several hundred euros per tonne of CO₂. The electrification of individual logistics connections was not found to have a significant impact on transport performance or accessibility. The electrification of high-traffic connections, in turn, can reduce the efficiency of transport in congested situations. The ERS technologies can have an impact on road and electrical safety also.

The electrification of the road network requires the strengthening or expanding of the existing electricity distribution network. The share of electricity network costs in the electrification of the entire road network has been estimated in various studies to be 20–40 %. Charging power from the grid can be significant if the number of heavy vehicles becomes large locally. This can pose challenges to power management locally. Nationwide, the energy consumption and power demand of ERS were estimated to be manageable.

In the light of current knowledge and based on this review, ERS can be an option to emission reductions, especially for trucks and long-distance bus transport. The main obstacles for the utilization of ERS are high investment costs and a long commitment to a still evolving technology. Ultimately, the feasibility of ERS is driven by the ambition of the emission reduction targets, the other means available to achieve the targets, and the profitability of ERS relative to other means.

Esipuhe

Suomi on asettanut kunnianhimoisen tavoitteen olla hiilineutraali vuoteen 2035 mennessä. Tavoitteen saavuttaminen vaatii merkittäviä toimenpiteitä useilla sektoreilla – myös liikenteessä. Liikenteen osalta on jo esitetty erilaisia ehdotuksia päästöjen pienentämiseen. Esitetyt keinot sisältävät mm. sähköakuteknologian, biopolttoaineiden sekä synteettisten polttoaineiden hyödyntämistä. Tieverkon sähköistäminen sen sijaan on aihe, jota vajaa parikymmentä maata eri puolilta maailmaa ovat pilotoimassa tai selvittämässä, mutta joka on Suomessa ollut varsin vähän esillä.

Tämän selvityksen tavoitteena oli tunnistaa tieverkon sähköistämiseen liittyviä mahdollisuuksia ja haasteita Suomen olosuhteissa sekä luoda askelmerkkejä sähköistämisen jatkoselvityksiin sekä mahdolliseen pilotointiin ja laajamittaiseen toteutukseen Suomessa. Työ oli ensimmäinen laajamittaisempi selvitys tieverkkojen sähköistämisestä Suomessa, joten yhtenä tavoitteena oli koota relevantti tieto ko. aiheesta yhteen ja muodostaa perusta tarkemmille arvioinneille.

Selvitys sisältää kirjallisuuskatsauksen aiheeseen liittyvistä kansainvälisistä selvityksistä ja piloteista, vaihtoehtoisista teknologioista sekä varteenotettavista liiketoimintamalleista. Työ sisältää lisäksi arvion tieverkon sähköistämisen edellytyksistä Suomessa huomioiden eri teknologioiden ja liiketoimintamallien soveltuvuuden; lainsäädännölliset edellytykset; potentiaalinen eri ajoneuvotyyppien ja yhteysvälien osalta; vaikutustenarvion liikenteen sujuvuuden, saavutettavuuden, turvallisuuden, perusväylänpidon ja päästöjen näkökulmasta; sekä arviot vaikutuksista sähköverkkoihin ja -markkinoihin. Työssä on lisäksi verrattu tieverkon sähköistämistä muihin potentiaalsiin tieliikenteen päästövähennyskeinoihin.

Työtä ovat Väylävirastosta ohjanneet Tapio Ojanen, Virpi Anttila, Pekka Rajala ja Magnus Nygård. Hankkeen toteutuksesta ovat vastanneet Gaia Consulting Oy:stä Tuukka Rautiainen, Markku Hagström, Tommi Lampikoski ja Juha Vanhanen sekä FLOU Oy:stä Taina Haapamäki, Sami Mäkinen, Tuomo Lapp ja Oliver Heinonen.

Helsingissä kesäkuussa 2020

Väylävirasto

Sisältö

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | VAIHTOEHTOISET TEKNOLOGIAT JA LIIKETOIMINTAMALLIT | 9 |
| 1.1 | Teknologiat | 9 |
| 1.1.1 | Taustaa..... | 9 |
| 1.1.2 | Sähköistettyjen tieverkkojen muodostama teknologiakokonaisuus | 11 |
| 1.1.3 | Teknologiavaihtoehdot liikkeessä tapahtuvaan lataukseen | 11 |
| 1.1.4 | Johtavat rakenteet – ajolanka tien yläpuolella | 13 |
| 1.1.5 | Johtavat rakenteet – kontaktirakenne tien pinnassa/upotettuna | 14 |
| 1.1.6 | Johtavat rakenteet – kontaktirakenne tien sivussa | 16 |
| 1.1.7 | Induktiorakenteet – käämit tien sisällä..... | 18 |
| 1.1.8 | ERS-teknologioiden kustannuksista | 20 |
| 1.1.9 | Yleiset haasteet..... | 21 |
| 1.2 | Liiketoimintamallit..... | 22 |
| 1.2.1 | Taustaa..... | 22 |
| 1.2.2 | Liiketoimintamallit vaativat systeemistä muutosta..... | 23 |
| 1.2.3 | Toimijat ja roolit | 24 |
| 1.2.4 | Palvelupakettivaihtoehdot | 28 |
| 1.2.5 | Tiemaksujen kerääminen | 32 |
| 1.2.6 | Kustannusarvioita..... | 35 |
| 1.2.7 | Rahoitus | 35 |
| 1.2.8 | SWOT-analyysi Suomen näkökulmasta | 36 |
| 1.3 | Sidosryhmien näkökulmia | 38 |
| 1.3.1 | Raskas tavaraliikenne..... | 38 |
| 1.3.2 | Linja-autoliikenne..... | 39 |
| 1.3.3 | Kevyt ajoneuvoliikenne..... | 40 |
| 2 | SÄHKÖISTETTÄVÄN TIEVERKON POTENTIAALI JA LAAJUUS | 42 |
| 2.1 | Lähtökohdat potentiaalin ja laajuuden arviointiin | 42 |
| 2.1.1 | Sähköistetyn tieverkon rooli ajoneuvoliikenteessä yleisesti | 42 |
| 2.1.2 | Sähköistetyn tieverkon käyttökohteet raskailla ajoneuvoilla | 43 |
| 2.1.3 | Sähköistetyn tieverkon käyttökohteet kevyillä ajoneuvoilla..... | 46 |
| 2.2 | Potentiaalin määrittäminen..... | 47 |
| 2.2.1 | Ilmastovaikutukset..... | 47 |
| 2.2.2 | Liikennöintikustannukset..... | 48 |
| 2.2.3 | Vaikutukset infrastruktuuriin..... | 49 |
| 2.2.4 | Tieverkon sähköistämisen potentiaali liikenteen näkökulmasta .. | 50 |
| 2.3 | Case-tarkastelukohteiden potentiaalin arviointi | 50 |
| 2.3.1 | Case-tarkastelukohteiden valinta | 50 |
| 2.3.2 | Keskeisimmät oletukset tarkastelukohteiden laskelmissa | 52 |
| 2.3.3 | Tarkastelukohteiden laskelmien tulokset | 56 |
| 2.3.4 | Yhteenvedo tarkastelukohteiden potentiaalista | 61 |
| 3 | TARVITTAVA SÄHKÖVERKKOKAPASITEETTI JA SEN REGULAATIO | 64 |
| 3.1 | Sähköverkkokapasiteetti..... | 64 |
| 3.1.1 | Case-esimerkkien sähkötehontarve | 64 |
| 3.1.2 | Sähköverkkokapasiteetin toteutusvaihtoehdot..... | 68 |
| 3.2 | Sähköverkkoregulaatio | 72 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4 | TIEVERKON SÄHKÖISTÄMISEN VAIKUTUSTENARVIOINTI..... | 76 |
| 4.1 | Vaikutukset liikenteeseen | 76 |
| 4.1.1 | Tieverkon sähköistämisen laajuus ja taloudellinen kannattavuus | 76 |
| 4.1.2 | Sähköistetyn tieverkon ja rautatiekuljetusten välinen kilpailu..... | 77 |
| 4.1.3 | Vaikutukset liikenteen toimivuuteen | 77 |
| 4.1.4 | Vaikutukset liikenteen toimintavarmuuteen | 78 |
| 4.1.5 | Vaikutukset saavutettavuuteen..... | 78 |
| 4.1.6 | Vaikutukset liikenneturvallisuuteen | 78 |
| 4.1.7 | Vaikutukset perusväylänpitoon | 79 |
| 4.1.8 | Vaikutukset maisemaan | 79 |
| 4.2 | Vaikutukset päästöihin | 80 |
| 4.2.1 | Vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin | 80 |
| 4.2.2 | Vaikutukset ilmanlaatuun..... | 80 |
| 4.3 | Vaikutukset sähkömarkkinoihin | 80 |
| 4.3.1 | Vaikutukset tehotaseeseen..... | 80 |
| 4.3.2 | Vaikutukset energiankulutukseen | 83 |
| 5 | LAINSÄÄDÄNNÖLLISET EDELLYTYKSET | 85 |
| 5.1 | Lainsäädännölliset kysymykset | 85 |
| 5.2 | Lainsäädännön teemat | 86 |
| 5.2.1 | Kilpailulainsäädäntö | 86 |
| 5.2.2 | Omistajuus ja vastuu..... | 86 |
| 5.2.3 | Maankäyttö | 86 |
| 5.2.4 | Ajoneuvotekniikka..... | 87 |
| 5.2.5 | Turvallisuuteen liittyvät kysymykset | 87 |
| 6 | MUUT VAIHTOEHDOT NOLLAPÄÄSTÖISELLE TIELIIKENTEELLE | 89 |
| 6.1 | Kevyt ajoneuvoliikenne..... | 89 |
| 6.2 | Raskas liikenne | 91 |
| 6.3 | Kustannusarvioita vaihtoehtoisista voimansiirroista | 93 |
| 7 | SYNTEESI KESKEISIMMISTÄ HAASTEISTA JA HIDASTEISTA | 95 |
| 8 | EHDOTUKSET JATKOTOIMENPITEISTÄ JA PILOTOINNISTA..... | 99 |
| 8.1 | Vaihtoehdot ensimmäisille piloteille..... | 99 |
| 8.2 | Suositukset jatkoselvityksistä | 100 |
| | LÄHTEET | 102 |

1 Vaihtoehtoiset teknologiat ja liiketoimintamallit

Tiivistelmä luvusta 1

Työssä arvioitiin neljää pääteknologiavaihtoehtoa sähköajoneuvojen liikenteessä tapahtuvaan lataukseen: 1) ajolanka ajoneuvon yläpuolelta tapahtuvaan lataukseen; 2 ja 3) raide/kisko joko ajoneuvon alapuolelta tai sivusta tapahtuvaan lataukseen; sekä 4) langaton/induktiivinen lataus ajoneuvon alapuolelta tapahtuvaan lataukseen.

Järjestelmien kehitys on monelta osin vasta alkuvaiheessa eikä voittavaa teknologiaa ole tiedossa. Teknologioista ajolangat ovat kypsän vaihtoehdon ja tarjoavat riittävän lataustehon raskaalle kalustolle. Induktiivinen lataus mahdollistaa kaikenlaisten ajoneuvojen lataamisen (ajolangat ovat vain raskaalle liikenteelle), mutta ei tarjoa riittävää lataustehoa raskaalle kalustolle.

Eri teknologioista on kokemusta vasta rajatuista piloteista, joista useimmissa kustannusarviot osuvat teknologiasta riippumatta likimain välille 1–2 M€/kaista-km. Liiketoimintamallien näkökulmasta korkeat investointikustannukset ovatkin suurin este teknologioiden yleistymiselle. Toinen merkittävä tekijä on pitkä sitoutuminen vielä kehittyvään teknologiaan.

1.1 Teknologiat

1.1.1 Taustaa

Tieverkon sähköistäminen (yleisesti käytetään termiä Electric Road Systems, ERS) ei ole uusi ajatus, mutta vasta aivan viime vuosina kiinnostus sitä kohtaan on lisääntynyt muutamissa kehittyneissä maissa siihen pisteeseen, että pilotteja yleisillä teillä on toteutettu. Muutoksen taustalla on litium-ioniakku-teknologian kaupallinen läpimurto ajoneuvokäytössä ja sitä kautta sähköisten ajoneuvojen yleistymisen sekä toisaalta hiilidioksidipäästöjen tiukentuneet vähentämistavoitteet ja erityisesti raskaan liikenteen päästöjen merkittävän ja nopean vähentämisen haasteellisuus nykytiedon valossa muilla keinoilla. Taulukossa 1 on listattu viime aikoina toteutettuja tai toteutuksessa olevia pilotteja. Taulukossa mainittujen pilottien lisäksi hankkeita on toteutettu mm. Iossa-Britanniassa, Italiassa ja Etelä-Koreassa.

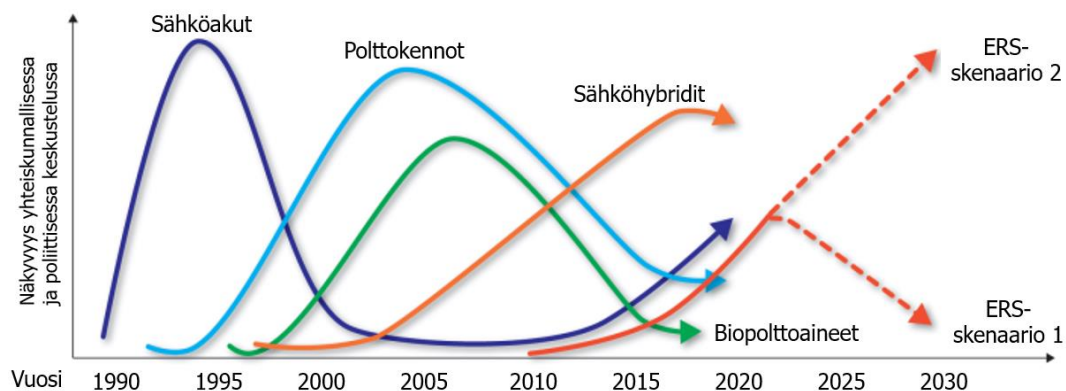
Taulukko 1. Viimeaikaisia tieosuuksien sähköistuspilotteja (Collers 2019).

| Nimi | Sijainti | Teknologia | Liikennöinnin aloitus | Pilottihankkeen lopetus |
|-------------------|----------|---------------|-----------------------|-------------------------|
| FABRIC | Ranska | Induktiivinen | 2014 | 2017 |
| VICTORIA | Espanja | Induktiivinen | 2016 | 2017? |
| E16 Electric road | Ruotsi | Ajolanka | 2016 | 2020 |
| SCAQMD | USA | Ajolanka | 2017 | 2017 |
| eRoadArlanda | Ruotsi | Kisko | 2018 | 2019 |

| Nimi | Sijainti | Teknologia | Liikennöinnin aloitus | Pilottihankkeen lopetus |
|--|----------|------------------------------------|-----------------------|-------------------------|
| ELISA | Saksa | Ajolanka | 2019 | 2022 |
| FESH | Saksa | Ajolanka | 2019 | 2022 |
| eWayBW | Saksa | Ajolanka | 2020 | 2023 |
| Ruotsin liikenneviraston esikaupallinen hankinta | Ruotsi | Kisko ja induktiivinen harkinnassa | 2020 (arvio) | 2022 (arvio) |
| SmartRoad Gotland | Ruotsi | Induktiivinen | 2020 | 2021 |

Viime vuosina aktiivisimpia maita ovat olleet Ruotsi ja Saksa. Pitkäaikaisin käytännön kokemus tieosuuskien sähköistamisestä on Etelä-Koreassa, jossa Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) aloitti pilotoinnin julkisilla teillä vuonna 2009. Siellä kehitettiin useita induktioon perustuvia dynaamisia¹ latausratkaisuja. Nytemmin suurempi osa piloteista on perustunut sähkön johtumiseen ja erityisesti tien yläpuolella kulkevaan ajolankaan (overhead lines), rautateillä koeteltua tekniikkaa hyödyntäen.

Sähköistettyjen tieverkkojen kehityksen kaarta kuvastaa osittain siihen liittyvien teknologioiden näkyvyys tai yleisyys yleisessä liikenneteknologioita käsittelevässä yhteiskunnallisessa ja poliittisessä keskustelussa. ERS-teknologioiden näkyvyyttä suhteessa muihin fossiilisia polttoaineita korvaaviin vaihtoehtoihin on arvioitu kuvassa 1 (Tongur 2018 & Geels 2012). Kyseisen arvion mukaan hybridaajoneuvot hallitsivat vuonna 2018 yleistä keskustelua liikenteen päästövähennyksiin tähtäävien vaihtoehtojen joukossa ja täyssähköiset ajoneuvot olivat niin ikään nousussa. Polttokennojen ja biopolttoaineiden osuudet keskusteluissa olivat puolestaan laskeneet selvästi 2000-luvun alun huipusta. Tongurin (2018) ja Geelsin (2012) näkemyksien mukaan sähkötietyt ovat yleistyneet yleisessä keskustelussa 2010-luvulla selvästi, mikä viittaa siihen, että kyseisiä teknologioita harkitaan aikaisempaa vakavammin yhtenä varteenotettavana keinona tavoiteltaessa liikenteen päästövähennyksiä.

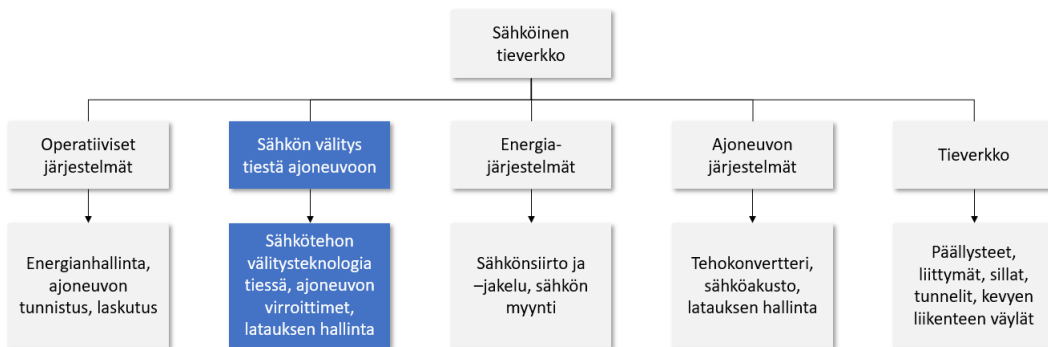


Kuva 1. ERS-teknologian näkyvyys yhteiskunnallisessa ja poliittisessä keskustelussa suhteessa muihin vaihtoehtoihin (mukailtu lähteistä: Tongur, 2018 & Geels 2012).

¹ Ajon aikana eli liikkeessä tapahtuvia.

1.1.2 Sähköistettyjen tieverkkojen muodostama teknologia-kokonaisuus

Tieverkon sähköistäminen on teknologisesti suuri kokonaisuus ja koskettaa monia eri osa-alueita. Kuvassa 2 on tunnistettu sähköisen tieverkon pääteknologiakokonaisuudet, joihin sisältyy sähköä tiestä ajoneuvoon välittävän teknologian lisäksi a) operatiivisia järjestelmiä kuten ajoneuvojen tunnistamista ja laskutusta; b) sähköä siirtoon ja myyntiin liittyviä kokonaisuuksia; c) ajoneuvon sisäisiä järjestelmiä, joilla hallitaan mm. akkujen latausta; sekä d) itse tieverkkoon liittyviä kokonaisuuksia kuten liittymiä, siltoja ja tunneleita.



Kuva 2. Sähköistettyjen tieverkkojen teknologiaosakokonaisuudet (mukailtu lähteestä Sundelin et al. 2016).

Seuraavissa luvuissa esitellään tarkemmin teknologioita sähköä välittämiseksi tiestä ajoneuvoon. Puhuttaessa kirjallisuudessa ERS-teknologioista useimmiten rajaudutaan nimenomaan tähän osakokonaisuuteen.

1.1.3 Teknologiavaihtoehdot liikkeessä tapahtuvaan lataukseen

Sähköajoneuvojen akkujen lataamiseen ajon aikana on käytettävissä kaksi fyysikaalisesti erilaista teknologiaa, jotka on eri vaihtoehtoinen esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Sähköajoneuvojen liikkeessä tapahtuvan latauksen teknologia-vaihtoehdot.

| | |
|---|--|
| Sähkön johtumiseen perustuvat teknologiat (langallinen) | Ajolanka tien yläpuolella |
| | Kontaktirakenne tien pinnassa tai upotettuna tiehen |
| | Kontaktirakenne tien sivussa (turvakaiteessa) |
| Sähkömagneettiseen induktioon perustuvat teknologiat (langaton) | Induktioon perustuvia latausteknologioita on periaatteessa vain yksi, mutta geometrialtaan täysin erilaisia ratkaisuja on kehitetty. Nykyratkaisut lähtevät liikkeelle tiehen upotetuista, peräkkäisistä käämisilmukoista. |

Visuaalista käsitystä yllä mainituista ratkaisuista saa kuvasta 3. Teknologia-
vaihtoehtoja kuvaillaan yksityiskohtaisemmin seuraavissa luvuissa.



Siemens: Ajolanka tien yläpuolella



Elways: Raide upotettuna tiehen



ElonRoad: Raide tien pinnassa



Honda: Kontaktirakenne tien sivussa



Qualcomm: Käämisilmukat tien sisällä (induktio)

Kuva 3. Sähköajoneuvojen ajonaikaiset latausvaihtoehdot²

² SINTEF (2018), Elonroad (2020), Qualcomm (2017)

1.1.4 Johtavat rakenteet – ajolanka tien yläpuolella³

Toimintaperiaate

Ajoneuvo ottaa sähköä virroittimella ajokaistan yläpuolella olevasta ajolanka-parista suoralla liukukontaktilla jatkuvasti (kuva 4). Periaate on sama kuin sähköjunissa ja raitiovaunuissa, mutta tarvitaan kaksi ajolankaa, koska liikutaan kumipyörillä, jotka eristävät ajoneuvon maasta.



Kuva 4. Ajolankaan perustuva latausjärjestelmä ja sen osat.⁴

Johtavat toimijat

Siemens (Saksa) on käytännössä ainoa tätä nimenomaista latausteknologiaa eteenpäin vievä ja tarjoava toimija. Se on kehittänyt järjestelmää vuodesta 2010 lähtien Saksan valtion tuella. Kuorma-autovalmistajat Scania ja Volvo (Ruotsi) ovat osallistuneet systeemin testaamiseen.

Pilotit

Pilotteja yleisillä teillä on jo useita:

- Saksa: Frankfurt 10 km (2019-), Holstein 12 km (2016-)
- Ruotsi: 2 km (2016-)
- USA: California 1,6 km (2016-)

Lisää pilotteja on tulossa, mikä on helppo ymmärtää, koska muita, teknisesti yhtä valmiita ratkaisuja raskaan liikenteen sähköistykseen ei vielä ole tarjolla.

Vahvuudet ja heikkoudet

Ajolanka olisi monella tapaa ihanteellinen latausteknologia paitsi, että se ei sovellu henkilöautoille eikä muille matalille ajoneuvoille. Toinen huolenaihe tämän teknologian laajamittaisen käyttöönoton osalta on yleinen hyväksyttävyyden puute: latausjärjestelmä muuttaa (maan)tiemaisemaa merkittävästi, mistä johtuen suuren yleisön vastustuksen oletetaan olevan myös merkittävää. Lisäksi erikoiskuljetukset voivat asettaa haasteita ajolankateknologian implementoinnille. Raskaan kaluston dynaamiseen lataukseen ajolanka on kuitenkin toistaiseksi ainoa toimivaksi osoitettu teknologia, joten sen käyttöönotolle on tällä hetkellä tilausta. Ajolankalatauksen hyviä ja huonoja puolia on koottu taulukkoon 3.

³ PIARC (2018), SINTEF (2018), Siemens (2017)

⁴ Mukailtu Siemensin esitemateriaalista

Taulukko 3. Ajolankalatauksen vahvuuksia ja heikkouksia.

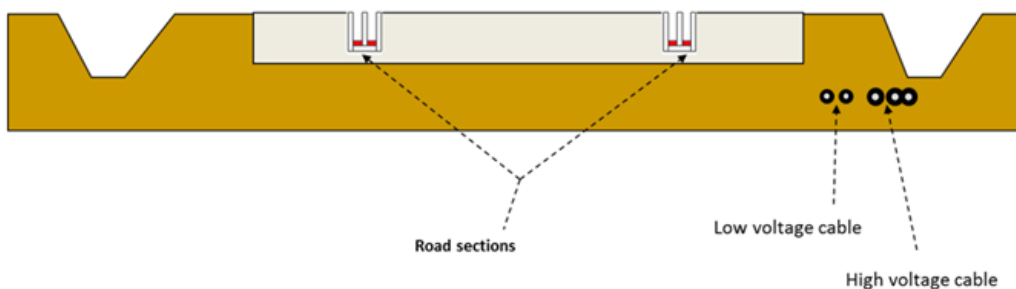
| Vahvuudet | Heikkoudet |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Riittävä tehotaso raskaalle kalustolle • Lataus mahdollista maantie-nopeuksilla (maksimi 90 km/h) • Teknologinen kypsyyys (pilotteja yleisillä teillä; ei vikoja) • Vastaavasta teknologiasta on pitkä kokemus rautateillä ja raitiovaunu-liikenteessä • Ei vaikuta ajotien rakenteisiin (muiden ERS-tekniologioiden käyttö mahdollista samoilla tieosuuksilla) • Ei vaikuta teiden kunnossapitoon • Pienet riskit pilottien toteuttamisessa | <ul style="list-style-type: none"> • Soveltuu vain korkeille ajoneuvoille (kuorma-autot ja bussit) • Vaatii aktiivista virroittimen aseman hallintaa • Muuttaa maisemaa merkittävästi → yleinen hyväksyttävyyys? • Estää korkeat erikoiskuljetukset kyseisillä tieosuuksilla • Saattaa estää pelastustoimia (esim. helikopteria laskeutumasta tielle onnettomuustilanteissa) • Ei uskota soveltuvan kaupunki-ympäristöön (yleistä hyväksyntää ei uskota saavutettavan visuaalisten vaikutusten takia) |

Suomen sää- ja liikenneolosuhteisiin ajolankalatauksen voidaan olettaa soveltuvan teknisesti varsin hyvin, koska vastaavista olosuhteista Ruotsissa (mm. lumi-, räntä- ja rankkasateet, pakkaset) on jo kokemusta eikä teknologian käyttöönottoa estäviä vikoja ole tullut piloteissa esiin.

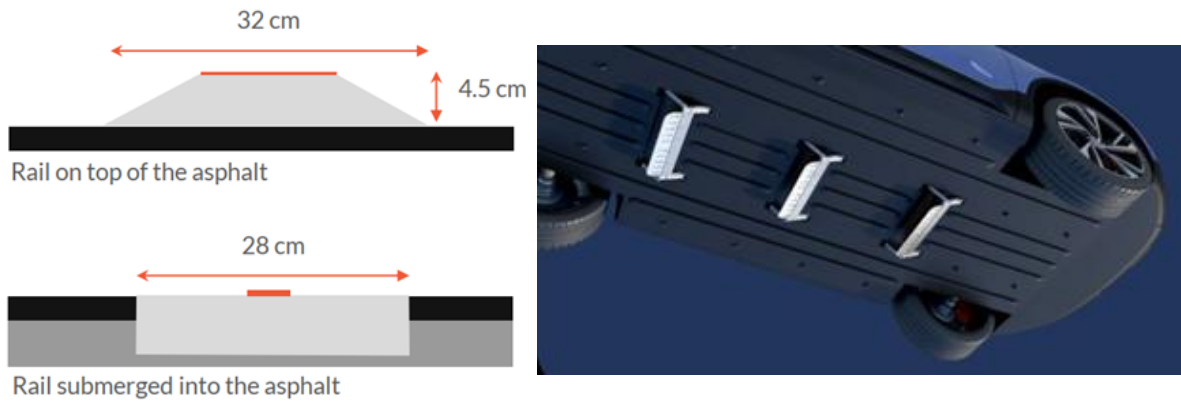
1.1.5 Johtavat rakenteet – kontaktirakenne tien pinnassa/upotettuna

Toimintaperiaate

Ajoneuvo ottaa sähköä virroittimella ajokaistalta, ajoneuvon alapuolella olevasta raiteesta suoralla liukukontaktilla (ks. kuvat 5 ja 6). Kuvan 5 mukaisessa ratkaisussa on kaksoisraide (toinen maadoitusta varten), joihin kumpaankin tarvitaan kontakti ajoneuvosta. Sen sijaan kuvan 6 mukaisessa ratkaisussa on kulkusuunnassa vain yksi kontakti. Siinä latausraide koostuu lyhyistä pätkistä, joista joka toinen on maakontakti.



Kuva 5. Tiehen upotettavat latausraiteet (Elways 2020).



Kuva 6. Tien pintaan kiinnitettävät tai tiehen upotettavat latausraiteet sekä ajoneuvon pohjaan kiinnitettävät virroittimet (Elonroad 2020).

Johtavat toimijat

Alstom (Ranska) on kehittänyt alun perin raitiovaunuliikennettä varten ajo-langattoman ratkaisun, josta se on muokannut kumipyöräliikenteelle soveltuvan version (kaksi kontaktiraidetta yhden sijaan). Ratkaisu on samankaltainen mutta teknisiltä yksityiskohdiltaan erilainen kuin ruotsalaisen Elwaysin (kuva 5), joka on kehittänyt omaa latausjärjestelmäänsä puhtaasti tieliikennettä varten. Niin ikään ruotsalainen Elonroad on lähtenyt liikkeelle tieliikenteen tarpeista, ei muista sovelluksista.

Pilotit

Joitakin pilotteja yleisillä teillä on jo toteutettu ja joitakin on suunnitteilla/alullaan:

- Ruotsi: Elways - eRoadArlanda 2 km, lataustehon maksimi 200 kW, 2017-
- Ruotsi: Elonroad - Lund, kaupungin keskusta, tulossa 2020-2022
- Ruotsi: Alstom/Volvo: Hällered, 400 m testirata, lataustehon maksimi 126 kW, 2014-

Vahvuudet ja heikkoudet

Parasta tien pinnasta saatavassa latauksessa (kaistaraidelataus) on soveltuvuus kaikille nelipyöräisille ajoneuvoille ja riittävä tehotaso raskaalle liikenteelle. Huonoja puolia on kuitenkin paljon ja niiden suhteellinen merkitys riippuu mm. vallitsevista ilmasto-olosuhteista. Taulukkoon 4 on koottu kaistaraidelatauksen hyviä ja huonoja puolia.

Taulukko 4. Kaistaraidelatauksen vahvuuksia ja heikkouksia.

| Vahvuudet | Heikkoudet |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Riittävä tehotaso raskaalle kalustolle • Sovellettavissa kaikille ajoneuvoille • Vähäiset visuaaliset vaikutukset • Runsaasti siirrettävissä olevaa tietotaitoa juna- ja raitiovaunuliikenteestä (Alstom) • Helppo tarkastaa ja huoltaa, koska useimmat komponentit näkyvissä ja saavutettavissa • Virroittimen aseman hallinta sivusuunnassa helppoa (Elonroad) | <ul style="list-style-type: none"> • Avoin ja kosketeltavissa oleva johdintiellä (turvallisuus vaatii erityistoimenpiteitä sen suhteen, milloin raide on jännitteellinen, milloin ei) • Moottoripyöräilijöiden turvallisuus (raiteen ylitys kovassa vauhdissa) & turvallisuus yleisesti (pienempi kitka raiteen kohdalla) • Altis vioittumiselle ja vaurioille (kuluminen, korroosio (teiden suolaamisen vaikutus?), hiekoitus, erilaiset kontaminaatiot) • Ei sovellu mutkaiselle tielle (Elways – pitkä jäykkä raide) • Lumen ja jään vaikutusten hallitseminen epävarmaa • Hankaloittaa tai voi hankaloittaa tien kunnossapitoa |

Suomessa kaistaraidelatausta ei voi nykytiedon valossa pitää erityisen lupaavana vaihtoehtona, olipa valittu teknologia mikä tahansa. Konseptiin liittyy yleisellä tasolla paljon ongelmia, joista kaikkiin ei voida olettaa löydettävän teknisesti tyydyttäviä ja kustannustehokkaita ratkaisuja ainakaan lähitulevaisuudessa. Erityisesti lumen ja jään vaikutusten hallitseminen kustannustehokkaasti on tšekäläisissä ilmasto-olosuhteissa erityisen haastavaa.

1.1.6 Johtavat rakenteet – kontaktirakenne tien sivussa⁵

Toimintaperiaate

Ajoneuvo ottaa sähköä virroittimella tien sivussa olevasta johdinraiteesta (turvakaitteessa) suoralla rullakontaktilla jatkuvasti (kuva 7). Tässäkin tapauksessa, kuten muissakin johtaviin rakenteisiin perustuvissa ratkaisuisissa, tarvitaan kaksi johdinkontaktia. Ajoneuvoon (sen pohjaan) kiinnitetty mekaaninen kontaktivarsi ohjataan turvakaitteelle, jossa kartiomaiset rullat ohjautuvat johdinuraan, kun korkeus on riittävän lähellä oikeaa.

⁵ SINTEF (2018), PIARC (2018)



Kuva 7. Turvakaiteeseen integroitava latausraide ja sen detaljikuva.

Johtavat toimijat

Honda (Japani) on ainoa tätä latausteknologiaa kehittävä toimija.

Pilotit

Toistaiseksi on tiedossa vain prototyyppitestausta Hondan omalla 300 m testi-radalla Japanissa.

Vahvuudet ja heikkoudet

Turvakaiteesta lataaminen välttäisi monet kaistaraidelatauksen ongelmat, mutta toisi mukanaan uudenlaisia ongelmia. Turvallisuus olisi yksi keskeisimmistä: tässä ratkaisussa avoin - ja ainakin autojen ohi kulkiessa - jännitteellinen johdin olisi kaikista helpoiten kenen tahansa ulkopuolisen kosketeltavissa. Toinen olisi epäilemättä käytännöllisyyden puute – turvakaiteen ja ajoneuvojen välissä ei voisi olla minkäänlaista kevyttä liikennettä, ei kiinteitä rakenteita eikä isoja irtokappaleitakaan. Turvakaidelatauksen hyviä ja huonoja puolia on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Turvakaidelatauksen vahvuuksia ja heikkouksia.

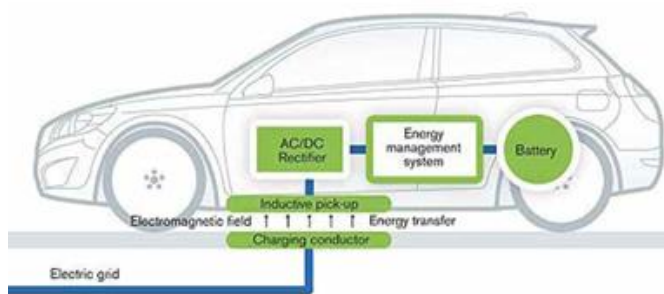
| Vahvuudet | Heikkoudet |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Riittävä tehotaso saavutettavissa raskaallekin kalustolle • Ei yhtä merkittäviä kulumisongelmia kuin tien pintaan suunnitelluilla ratkaisuilla • Vesi, lumi tai jää tiellä ei haittaa • Helpompi ja nopeampi asentaa kuin tiehen integroidut ratkaisut • Helppo tarkastaa ja huoltaa, koska kaikki komponentit näkyvissä ja saavutettavissa | <ul style="list-style-type: none"> • Turvallisuus - avoin ja helposti kosketeltavissa oleva johdin tien sivussa • Vain vähän tietoa saatavissa muuten kuin Japaniksi • Vaatii turvakaiteen melko lähellä ajoneuvoa (Hondan prototyyppi: maksimietäisyys 1,3 m) • Kevyttä liikennettä ei voi olla ajoneuvon ja turvakaiteen välissä – suljetut tieosuudet? • Ei kokemuksia yleisiltä teiltä, ei pilotteja |

Suomen oloihin turvakaidelataaminen soveltuisi periaatteessa teknisesti ihan hyvin, mutta käytännössä teknologia vaatisi samankaltaisia väyliä kuin metrojunilla: korkeat suoja-aidat molemmin puolin tietä estämässä jalankulkijoita ja muuta kevyttä liikennettä pääsemästä tiealueelle. Myös liittymät kyseisille tieosuuksille vaatisivat valvontaa.

1.1.7 Induktiorakenteet – käämit tien sisällä⁶

Toimintaperiaate

Ajoneuvon vastaanottavaan käämiin indusoituu sähkövirtaa sähkömagneettisen kentän välityksellä tien sisällä olevista johdinkäämeistä ilman johtavaa tai mekaanista kontaktia ajoneuvon ja tiensisäisten latausrakenteiden välillä (kuva 8). Periaate on sama kuin muuntajissa, mutta lähettävän ja vastaanottavan käämin välinen magneettinen kytkentä on tässä huomattavasti heikompi johtuen käämien välisestä etäisyydestä. Lisähaasteena on ajoneuvon liikkuminen, mahdollisesti suurella nopeudella, jolloin lataus tapahtuu lyhytkestoisina, peräkkäisinä pulsseina nykyisin tavallisessa lähettävien käämien konfiguraatiossa (kuva 8).



Kuva 8. Periaatekuva induktiolatauksesta ja liikkeessä tapahtuvan induktiolatauksen testiradasta^{7,8}

Johtavat toimijat

Etelä-Koreassa bussien ja muiden kevyempien ajoneuvojen dynaamisella induktiolatauksella on jo melko pitkä historia johtuen aktiivisesta, pitkäjänteisestä tutkimus- ja kehitystyöstä (KAIST) ja sen kaupallistajasta (Dongwon Inc). Muita keskeisiä kaupallisia toimijoita ovat kanadalainen Bombardier ja israelilainen Electreon. Lisäksi dynaamisen induktiolatauksen kehittämiseksi ja kaupallistamiseksi toimii useita tutkimusryhmiä yliopistoista (mm. Oak Ridge), autonvalmistajista ym. Tällä hetkellä maailmalla tehdään laajimmin työtä juuri tämän teknologian kaupallisen kypsyyden saavuttamiseksi.

Pilotit

- Etelä-Korea: KAIST/Dongwon - pilotteja yleisillä teillä vuodesta 2009 alkaen, useita sukupolvia, useita tieosuuksia kaupungeissa; tehot eivät riittäne raskaille ajoneuvoille, ei soveltune maantienopeuksille eikä yhteen muiden induktioon perustuvien ratkaisujen kanssa
- Saksa: Bombardier - kehitystyötä vuodesta 2008 lähtien; useita bussi-reittipilotteja

⁶ SINTEF (2018), PIARC (2018), Electreon (2020)

⁷ Volvo (2013)

⁸ Electreon (2020)

- Belgia: Bombardier - useita bussireittipilotteja
- Ruotsi: Bombardier - yksi bussireittipilotti
- Israel (Ruotsi): Electreon - SmartRoad Gotland, Ruotsi 1,6 km, sähköbussi & sähkökuorma-auto (rakenteilla; testikäytössä 2020–2021)

Vahvuudet ja heikkoudet

Dynaamista induktiolatausta voidaan pitää käyttäjäystävällisenä, tienpidollisesti ihanteellisena ja jopa eleganttina ratkaisuna. Teknologiana se on kuitenkin monimutkaisin tunnetuista vaihtoehdoista ja siihen kohdistuu vielä sekä teknisiä haasteita että standardointiin liittyviä pullonkauloja – eri toimijoiden järjestelmät eivät sovi keskenään yhteen. Lataustehon riittävyys raskaalle kalustolle on myös ollut sitkeä haaste, mutta ilmeisesti ei kuitenkaan ylitsepääsemätön (Electreon, SmartRoad Gotland). Gotlannissa rakenteilla olevan pilotin ja sitä käyttämään tarkoitetun raskaan kaluston yksityiskohdista ei kuitenkaan ole vielä saatavilla tietoa julkisesti. Taulukkoon 6. on koottu dynaamisen induktiolatauksen hyviä ja huonoja puolia.

Taulukko 6. Dynaamisen induktiolatauksen vahvuudet ja heikkoudet.

| Vahvuudet | Heikkoudet |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Ei vaikuta teiden talvikunnossapitoon • Turvallinen tienkäyttäjille ja tietyöläisille • Ei vaikutusta maisemaan • Sovellettavissa kaikille ajoneuvoille • Ei ole altis vahingoittumaan eikä vahingon teoille • Riippumaton sääolosuhteista | <ul style="list-style-type: none"> • Heikommat tehot kuin johtaviin rakenteisiin perustuvissa ratkaisuisa (raskas liikenne haasteellinen) • Asennuksen jälkeen vaikeasti saavutettavissa ja huollettavissa • Tienvarsilaitteita lyhyin välimatkoin • Useita erilaisia fyysisiä konfiguraatioita, joiden yhteensopivuus kyseenalainen tai sitä ei ole (esim. KAIST vs. muut) • T&K-haasteita: synkronointi, kohdistus, yli 100 km/h ajonopeudet |

Suomessa, kuten muuallakin, dynaaminen induktiolataus voisi kenties vastata kaikkiin ajonaikaisen latauksen tarpeisiin - olemalla immuuni sääolosuhteille, aiheuttamatta esteitä muille tienkäyttäjille, olematta vaarallinen. Mutta se ei ole vielä kaupallisesti valmista teknologiaa. Vähintään muutama menestyksekkäs pilotti Suomenkin olosuhteissa tarvitaan ennen kuin sitä kannattaa harkita laajempaan käyttöön maassamme. On myös tarpeen ottaa huomioon kansainvälinen kehitys – yksittäisen maan ei kannata lähteä omille teilleen, koska tietyn teknologiaratkaisun yleistyessä maailmalla, myös autonvalmistajat alkavat tarjota ajoneuvoja, joissa on kyseinen dynaaminen latausvalmius (vakiona tai optiona).

1.1.8 ERS-teknologioiden kustannuksista

Sähköisten tiejärjestelmien (ERS) kustannuksia on vielä vaikea verrata keskenään realistiselta pohjalta. Joistakin järjestelmistä on jo kokemusta useammalta tieosuudelta, joidenkin ensimmäisiä pilotteja valmistellaan, jotkut ovat vielä laboratorioissa kehiteltävänä. Yhdestäkään ei ole laajamittaiseen käyttöön perustuvaa kustannustietoa. Kustannusarviot ovat näin ollen epätarkkoja ja niiden taustalla on eri tapauksissa väistämättä aivan eri tasoista dataa. Näistä rajoituksista huolimatta taulukkoon 7 on koottu kustannusarvioita olemassa olevista ERS-teknologioista tämän hetkisen tietämyksen valossa.

Taulukko 7. Olemassa olevat ERS-teknologiat ja niiden investointien kustannusarviot (PIARC 2018).

| Teknologia | Nimi | Organisaatio(t) (Maa) | Hinta-arviot MEUR/kaistakm | Ajoneuvotyypit |
|--------------------|--------------|--|-------------------------------|---|
| Johtavat rakenteet | eHighway | Siemens & OEMs (Saksa, Ruotsi) | 1,07–2,06 | Raskaat ajoneuvot, bussit |
| Johtavat rakenteet | Elways | eRoadArlanda/ Elways AB (Ruotsi) | 0,39–1 | Kaikki |
| Johtavat rakenteet | Slide-In/APS | Alstom/Volvo (Ruotsi) | 1,08 | Kaikki |
| Johtavat rakenteet | ElonRoad | Elon Road Inc/ Lund University (Ruotsi) | 0,6–1,5 | Kaikki |
| Johtavat rakenteet | HPDC | Honda R&D Ltd (Japani) | ei saatavilla | Kaikki |
| Induktio | OLEV | Dongwon Inc/KAIST (Etelä-Korea) | 0,5 | Bussit, henkilöautot, kevyet ajoneuvot |
| Induktio | PRIMOVE | Bombardier/Scania (Saksa, Ruotsi) | 3,25–6,15 (tavoite 1,7) | Henkilöautot, kevyet ajoneuvot, bussit |
| Induktio | Electreon | Electreon Inc (Israel) | >1 | Henkilöautot, bussit kuorma-autot) |
| Induktio | WPT | Oak Ridge National Laboratory & OEMs (USA) | 1,32 | Henkilöautot |
| Induktio | WPT | University of California, Berkeley (USA) | 1,05 | Henkilöautot, kevyet ja raskaat ajoneuvot |

| Teknologia | Nimi | Organisaatio(t) (Maa) | Hinta-arviot MEUR/kaistakm | Ajoneuvotyypit |
|------------|----------------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| Induktio | CWD | Politecnico di Torino/CRF (Italia) | ei saatavilla - tutkimushanke | Henkilöautot, kevyet ajoneuvot |
| Induktio | IPV | Seat Group (Italia) | ei saatavilla - tutkimushanke | Kaikki |
| Induktio | HALO | Vedecom/Qualcomm Ranska, Saksa) | ei saatavilla | Henkilöautot, kevyet ajoneuvot |
| Induktio | INTIS | Integrated Infrastructure Solutions (Ruotsi) | ei saatavilla | Henkilöautot |
| Induktio | Momentum Dynamics | Momentum Dynamics (USA) | ei saatavilla | Bussit |
| Induktio | Victoria | CIRCE (Centre of Research for Energy Resource and Consumption) (Espanja) | ei saatavilla - tutkimushanke | Bussit |

Kuten taulukosta 7 nähdään, kustannushaitarit, niissä tapauksissa missä sellaisia on ollut saatavilla, ovat leveitä. Vaikka tässä vaiheessa ei voidakaan sanoa, että jokin teknologia olisi muita edullisempi tai kalliimpi, karkeasti yleis-
täten voidaan todeta, että:

- a) mitä yksinkertaisempi järjestelmä, sitä edullisemmin se todennäköisesti on toteutettavissa, ja
- b) useimmat kustannusarviot osuvat teknologiasta riippumatta likimain välille 1–2 MEUR/kaistakilometri.

Vertailuna voidaan todeta, että rataverkon sähköistämisen kustannukset ovat Suomessa vaihdelleet viime aikoina tasolla 0,3–0,4 M€/raidekilometri. Suurimpina selittävinä tekijöinä kustannuseroissa lienevät rataverkkojen sähköistämisen vakiintuneet teknologiat, mittakaavaedut sekä se, että sähköistettävät rataverkot ovat yksiraiteisia verrattuna tieverkon tarpeeseen sähköistää kaistat molempiin suuntiin.

1.1.9 Yleiset haasteet

ERS-järjestelmien kehitys on alkuvaiheessa eikä voittavaa teknologiaa ole tiedossa. Sitä ei myöskään pystytä toistaiseksi ennustamaan luotettavasti. Teknologioita voidaan ja kannattaakin arvioida säännöllisin väliajoin ja pyrkiä vaikuttamaan kansainväliseen kehitykseen siten, että Suomeenkin soveltuva

teknologia tai teknologiat saisivat riittävästi rahoitusta pilotointiin ja sitä kautta mahdollisuuksia kaupalliseen läpimurtoon. Esimerkkinä Ruotsissa ollaan varsin pitkällä ERS-kehitystyössä, mutta siitä huolimatta siellä on valittu strategia, jossa ei haluta vielä tehdä valintaa teknologioiden välillä vaan kehitetään ja pilotoidaan ainakin toistaiseksi kaikkia teknologiavaihtoehtoja.

Järjestelmien standardointi puuttuu, ja sitä myötä yhteensopivuus. Eri teknologiset ratkaisut toimivat eri jännitetasoilla, eri taajuuksilla, erilaisilla virroittimilla ja niin edelleen. Yksittäinen ajoneuvo pystyisi nykylähtökohdista hyödyntämään vain yhtä ERS-järjestelmää, jolloin erilaisia järjestelmiä vilisevän tieverkon kokonaisuudesta ei saisi toimivaa yksittäisen ajoneuvon kannalta eikä kannattavaa ERS-järjestelmäoperaattorin tai investoijan kannalta.

Tieverkon sähköistäminen olisi iso teknologiamurros, johon liittyy muna-kananongelma: ilman latausinfrastruktuuria sitä hyödyntämään kykenevät ajoneuvot eivät yleisty, ja liian vähäisellä ajoneuvomäärällä infran rakentamista ei saa kannattavaksi. Tästä johtuen julkisten toimijoiden rooli pilottien liikkeelle saamisessa on keskeinen ja liiketoiminnan alkuvaiheessa julkisten ja yksityisten tahojen kumppanuushankkeet lienevät välttämättömiä.

1.2 Liiketoimintamallit

1.2.1 Taustaa

Työssä suoritettiin kirjallisuuskatsaus⁹ tieverkon sähköistämisen liiketoimintamallivaihtoehdoista. Tieverkon sähköistämisestä on kokemuksia vasta muutamista maista ja niistäkin vain pilotointi- tai rajatun mittakaavan demonstrointiasteella, minkä johdosta konkreettisia saati testattuja liiketoimintamalleja ei vielä ole. Ruotsissa ja Saksassa mahdollisuuksia ja vaihtoehtoja on hahmoteltu kattavimmin. Aiheesta opitaan vähitellen enemmän, kun eri teknologioita pilotoidaan laajemmassa mittakaavassa yleisillä teillä eri puolilla maailmaa.

Innovaatioita voidaan jaotella Niewenhuisin ja Wellsin (2012) esittelemällä matriisilla, joka huomioi sekä teknologian että liiketoimintamallien kehityksen. Matriisin mukaisesti uuteen teknologiaan ja olemassa olevaan liiketoimintamalliin perustuva toiminta tarkoittaa kilpailemista "*paremmin*". Olemassa olevan teknologian hyödyntäminen uuden liiketoimintamallin mukaisesti puolestaan luokitellaan kilpailemiseksi "*uudentyyppisesti*". Sähköiset tieverkot kuuluvat kategoriaan, jossa tyypillisesti uudistetaan sekä teknologia että liiketoimintamalli, jolloin Niewenhuisin ja Wellsin (2012) matriisin mukaisesti on mahdollisuus päästä kilpailun "*ulottumattomiin*" ja saavuttaa pysyvää ja vaikeasti kopioitavaa kilpailuetua. Systemisiin innovaatioihin, jotka uudistavat sekä teknologiaa että liiketoimintamalleja, liittyy omia haasteita, joita on pohdittu seuraavissa luvuissa.

⁹ Keskeiset lähteet mm.: Tongur 2018, Role of business models in the transition to electric road systems. Petterson et al (2017), National roadmap for electric road systems, EY (2018), Business models and financing for the development of electric roads in Sweden, EY (2019) Roles, actor relations, and risks in the electric roads market

| | | | |
|--------------------|-------|---|--|
| TEKNOLOGIA | Uusi | Competing better "kilpailu paremmin" | Beyond competition "kilpailun ulottumattomissa" |
| | Vanha | Business as usual "nykymuotoinen kilpailu" | Competing differently "kilpailu uudentyyppisesti" |
| | | Vanha | Uusi |
| LIIKETOIMINTAMALLI | | | |

Kuva 9. Liiketoimintamalli- ja teknologiainnovaatioiden matriisi (Niewenhuis ja Wells 2012).

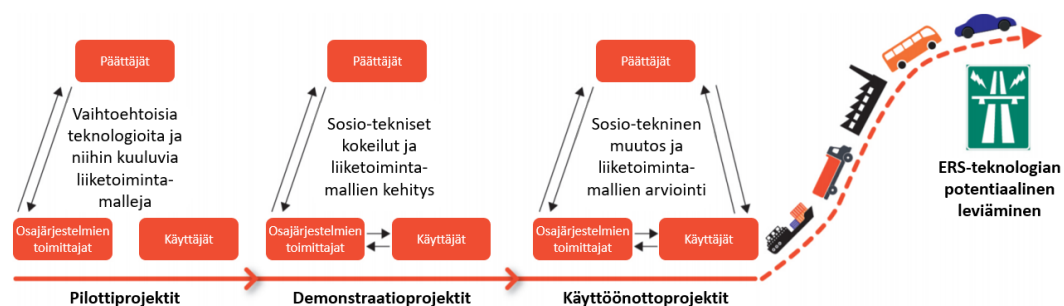
1.2.2 Liiketoimintamallit vaativat systeemistä muutosta

Systeemisten innovaatioiden kuten tieverkon sähköistämisen läpilyönti edellyttää 'sosio-tekniä muutosta' käyttäjäsegmenteissä (raskas liikenne, henkilöautoilijat). Liiketoimintamallien ja sosio-tekniä muutoksen välinen suhde muuttuu siirtymän (murroksen) aikaisissa vaiheissa, kun siirrytään pienimuotoisista eri teknologiavaihtoehtojen kokeilusta koko ekosysteemiä kattavien liiketoimintamallien kehittämiseen ja lopulta käyttöönottoprojekteihin (ks. kuva 10).

Pilottiprojekteissa keskitytään radikaalien innovaatioiden testaamiseen (eri teknologiavaihtoehdot) ilman vuorovaikutusta potentiaalisten käyttäjien kanssa – aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että uusi teknologia ei istu olemassa oleviin liiketoimintamalleihin (Tongur 2018).

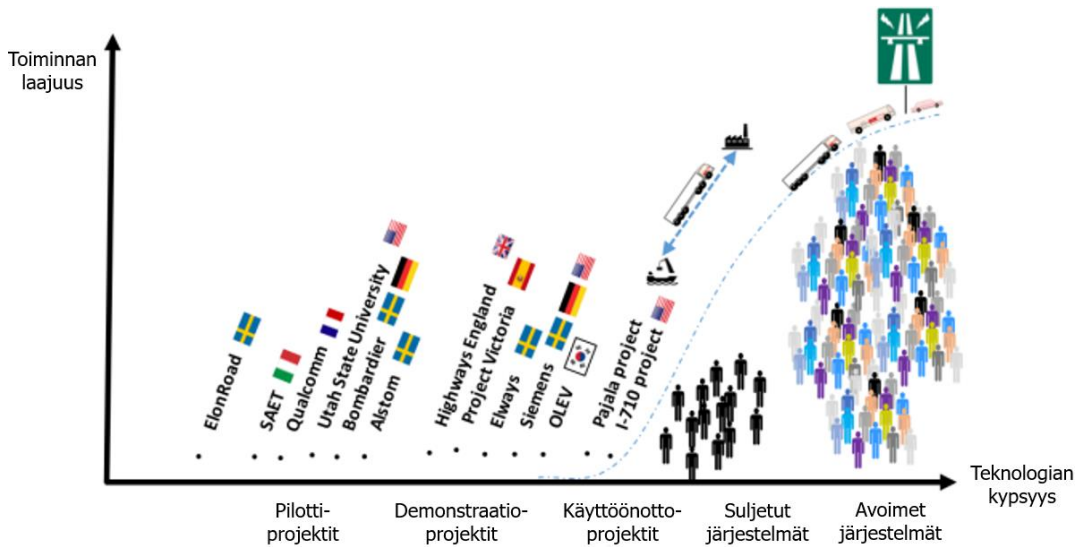
Demonstraatioprojekteissa kehitetään sosio-tekniä kokeilu, jossa toimitaan vuorovaikutuksessa käyttäjien kanssa – uusia liiketoimintamalleja kehitetään uuden teknologian kaupallistamiseksi, mutta niitä ei testata näissä projekteissa käytännössä eikä markkinoilla.

Käyttöönottoprojekteissa keskitytään arvioimaan laajempaa sosio-tekniä muutosta ja testataan liiketoimintamalleja evaluoimalla eri teknologiavaihtoehtojen taloudellista toteutettavuutta, käyttäjien maksuhalukkuutta sekä halukkuutta käyttää uutta infrastruktuuria.



Kuva 10. Liiketoimintamallit eri kehitysvaiheissa (Tongur 2018)

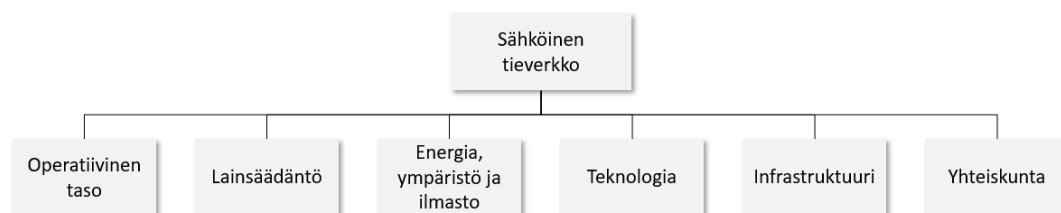
Tieverkon sähköistämässä edetään tapauksesta riippuen käytännössä joko pilotointi- tai demonstraatiovaiheessa (ks. kuva 11). Laajoja useiden kymmenien kilometrien pituisia käyttöönottoprojekteja ei ole vielä toteutettu. Seuraavina luonnollisina vaihtoehtoina on laajentaa käyttöönottoprojekteja suurempiin suljettuihin järjestelmiin, joiden kautta voidaan siirtyä teknologioiden valmiusasteen kehittyessä lopulta avoimiin järjestelmiin.



Kuva 11. Siirtyminen kohti laajamittaisia ERS-järjestelmiä (Tongur & Sundelin 2016).

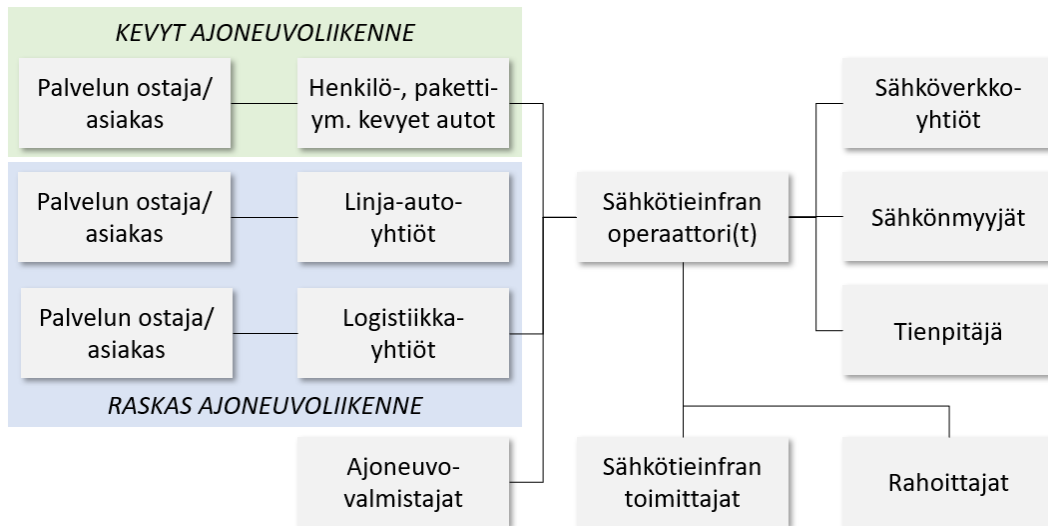
1.2.3 Toimijat ja roolit

Tieverkon sähköistykseen liittyviä toimijoita ja rooleja voidaan tunnistaa esim. Wangin et al. (2019) käyttämällä ryhmittelyllä (ks. kuva 12). Sähköistettyyn tieverkkoon liittyy useita teknologisia ja operatiivisia rooleja/toimijoita sähköinfran toimittajista, laskutus- ja mittausjärjestelmien toimittajiin ja sähköyhtiöihin. Tämän lisäksi sähköiset tieverkot koskettavat laajasti julkista sektoria kuten tienpitäjiä, lainsäätäjiä ja muita viranomaisia. Kokonaisuuteen liittyy myös vahvasti ympäristö- ja ilmastonäkökulmat ja sitä kautta yhteiskunnassa käytävä poliittinen keskustelu tarpeellisista toimita liikenteen päästöjen vähentämiseksi.



Kuva 12. Sähköisen tieverkon sidosryhmätasot (mukailtu lähteestä Wang et al. 2019).

Sähköistetyn tieverkon ekosysteemit rakentuvat laajasta joukosta erilaisia toimijoita aina ajoneuvovalmistajista sähköverkkoyhtiöihin. Tieinfran käyttäjinä voivat toimia sekä raskaat ajoneuvot (kuorma-autot, rekat, linja-autot jne.) että kevyet ajoneuvot (henkilöautot, pakettiautot jne.). Kuvassa 13 on hahmoteltu sähköistetyn tieverkon liiketoimintaekosysteemien toimijoita ja heidän välisiä suhteita. Kuvan jälkeen raportissa on analysoitu toimijoihin liittyviä keskeisiä kysymyksiä.



Kuva 13. Sähköistettyyn tieverkkoon liittyviä toimijoita.

Rahoittajat

Keskeinen haaste liittyy kysymykseen: *kuka on valmis ottamaan riskin sähköisen tieverkkoinfran rakennuttamisesta?* Tieverkon sähköistäminen vaatii suuria pääomia, ja jotta toiminta infralla on kannattavaa, vaatii se suuren määrän liikennettä. Infraan investoinnissa on vastaava muna-kana-ongelma kuin sähköautojen latausinfraan rakentamisessa aikanaan: infraan ei ole kannattavaa investoida jos ei ole sitä hyödyntäviä ajoneuvoja ja ajoneuvoja ei tule jos niitä tukevaa infraa ei ole saatavilla. Sähköiseen tieinfraan liittyy myös teknologiariski, sillä yksinään erilaisia sähköistusteknologioita on saatavilla useita, joiden lisäksi on myös muita vartenotettavia vaihtoehtoja liikenteen päästöjen pienentämiseksi, kuten sähköakuteknologia ja biopolttoaineet.

Aiemmissa selvityksissä valtiolle ehdotetaan aktiivista roolia etenkin infran rakennuttamisessa. Valtion panostukset infran rakentamiseen kannustavat puolestaan yrityksiä ja muita toimijoita toimimaan esim. sähköisen tieverkon operointiroolissa ja/tai osarahoittamaan infrainvestointeja. Valtion rooli on toiminnan edistämisen kannalta merkittävä erityisesti pilotointi- ja demonstrointivaiheissa, joissa toimintaan liittyy suurta epävarmuutta. Valtion lisäksi kirjallisuudessa muiksi potentiaalisiksi rahoittajiksi on mainittu infraan sijoittavat pääomarahastot, jotka tavoittelevat pitkää ja tasaista kassavirtaa. Samaan kategoriaan kuuluvat eläkevakuutusyhtiöt. Investoinnin kestävyys- ja ympäristöhyödyt voivat myös houkutella rahoittajia.

Tämän hankkeen työpajassa todettiin, että julkisen ja yksityisen sektorin yhteistyöhön mahdollisen investoinnin rahoituksessa on useita vaihtoehtoja. Esimerkkeinä investointia varten voidaan perustaa uusi infran omistukseen keskitetty yhtiö, jossa valtio voi olla enemmistö- tai vähemmistöosakkaana.

Rahoitukseen liittyy myös kysymys tieosuuksien omistajuudesta. RISE Viktorian (2018) selvityksessä esitetään kolme vaihtoehtoista skenaariota:

1. Yksityisomisteinen suljettu tie, infran omistajana ja operaattorina yksityinen toimija
2. Kaikille avoin tie, infran omistajana ja operaattorina julkinen toimija
3. Kaikille avoin tie, infran omistajana ja operaattorina yksityinen toimija

Edellä mainittujen vaihtoehtojen lisäksi on myös mahdollista, että infran omistajana toimii julkinen taho, mutta operoinnista vastaa yksityinen toimija. Huomiona esim. Siemensin toimittamissa sähkötiepiloteissa kaikissa rahoittajana on valtio.

Sähköisen tieverkon teknologiatoimittajat

Sähköisille tieverkoille on luvussa 1.1 tunnistettu neljä pääteknologiaa, joihin kytkeytyy useita toimittajia. Teknologiatoimittajien intresseissä on myydä edustamaansa infrastruktuuriratkaisua sekä edistää siihen liittyvää standardointia. Toimittajat voivat myös olla kiinnostuneita tarjoamaan palveluita sähköistettyyn tieinfraan liittyen esim. infran operoinnin osalta. Kirjallisuudessa on todettu, että teknologiatoimittajat eivät ole tyypillisesti olleet rahoittamassa hankkeita (Petterson et al. 2017). Ennen teknologioiden kypsymistä ja laajamittaista implementointia, rahoitukseen liittyvät yhteistyömallit, joissa myös teknologiatoimittajat ovat osallisena, voivat kenties jatkossa olla mahdollisia.

Sähköisen tieverkon operaattori(t)

Sähköisen tieverkon operoinnista vastaavan tahon insentiivi lähteä toimintaan mukaan on mahdollisuus uuteen ja kannattavaan liiketoimintaan. Tieverkon operointiin liittyviä tehtäviä voivat olla esim. tiemaksujen kerääminen sekä siihen liittyvä tiedonvaihto, infran ylläpito ja huolto sekä palveluntarjonta kolmansille osapuolille. Tieverkon operaattori voi olla joko sama toimija kuin tieverkon omistaja tai operointi voi olla eriytetty omaksi kokonaisuudekseen.

Kuten telealalla, yhtenä vaihtoehtona on, että sähköistetyn tieinfraan omistaa yksityis- tai julkisomisteinen toimija ja tieverkon operointi tapahtuu toisen operaattorin toimesta. Infran mahdollistamia palveluita voitaisiin jälleenmyydä kolmansille osapuolille tai palveluoperaattoreille, jotka maksavat käyttömaksuja infran hyödyntämisestä verkon/verkkojen omistajalle/omistajille. Tulevaisuudessa sähköistetyn tieverkon käyttäjä hyödyntäisi eri operaattorien hallinnoimia tieosuuksia liikkuessaan eri alueilla. Aiemmissa selvityksissä suositellaan panostamaan telealalta tuttuihin roaming-sopimuksiin, jotka mahdollistavat käyttömaksujen tilitykset käyttäjän valitsemalle operaattorille.

Ohessa on tekijöitä, jotka on tunnistettu keskeisiksi operaattoritoiminnassa (Petterson et al. 2017):

- Yksityisomisteinen operaattori tarvitsee julkisen toimijan rahallista tukea ja tiettyjä vakuuksia (esim. liikennevolyyymeistä) etenkin toiminnan käynnistysvaiheessa
- PPP-mallien hyödyntäminen (julkisten ja yksityisten toimijoiden innovatiiviset kumppanuusmallit)

- Standardisoidut teknologiat ja ratkaisut: operointi on erittäin hankalaa, jos esimerkiksi yhdellä tieosuudella on useita erilaisia teknologia-ratkaisuja

Sähköisen tieverkon käyttäjät

Sähköisen tieverkon käyttäjinä voivat toimia sekä raskaat ajoneuvot (kuorma-autot, rekat, linja-autot ym.) että kevyet ajoneuvot (henkilö- ja pakettiautot ym.). Riippuen liiketoimintamallista, voidaan tieverkkoa käyttävältä ajoneuvolta vaatia latauksen mahdollistavan johtimen/käämin lisäksi ajomatkaa tai ladattua energiaa mittaava yksikkö, josta tiedot on siirrettävissä tiemaksuja keräävälle taholle. Mittausyksikkö on välttämätön, ellei tiemaksut perustu kiinteisiin kk-maksuihin, tietulleihin tai vastaaviin ratkaisuihin.

Sekä logistiikkapalveluita ostavien tahojen, liikennöintiä hoitavien yritysten että henkilöajoneuvojen näkökulmasta insentiivi sähköiselle tieverkolle on kustannussäästö (EY 2018). Polttoaine on tällä hetkellä kuljettajan jälkeen toiseksi suurin kustannuserä tavaraliikenteessä (The Swedish Association for Road Transport Companies 2016). Mikäli sähköisellä tieverkolla kyettäisiin merkittävästi pienentämään käyttövoimasta aiheutuvia kustannuksia, siirtyisi ajoneuvoja todennäköisesti hyödyntämään kyseistä teknologiaa. Sähköisten ajoneuvojen huoltokustannukset ovat tyypillisesti myös pienempiä kuin polttomoottoriajoneuvojen, mikä voi näkyä ajoneuvojen pidempänä käyttöikänä.

Tieverkon käyttäjien näkökulmasta käyttövoimavalintaan vaikuttavat myös esim. energian saatavuus ja infran operatiivinen luotettavuus. Logistiikka-toimijat optimoivat kuljetusreittejään useiden parametrien perusteella, joissa aikataulun mukaisesti tapahtuvat toimitukset ovat kriittinen tekijä - tämä asettaa suuria vaatimuksia infran saatavuudelle. Keskeinen asia tieverkon käyttäjille ovat myös sähköistettyjen tieosuuksien ulkopuolella kuljettavat kilometrit, joille ajoneuvot tarvitsevat sekundäärisen voimalähteen esim. sähköakuista tai polttomoottorista. EY:n (2018) selvityksessä todetaan, että raskaassa liikenteessä sähkön ja dieselin hybridiratkaisut ovat todennäköisesti aluksi yleisiä, jotta ajoneuvot voivat käyttää tieosuuksia, joilla sähköistystä ei ole käytettävissä. Hybriditeknologian hyödyntäminen parantaa myös liikenteen luotettavuutta tapauksissa, joissa sähkötieinfra ei toimi.

Tämän hankkeen työpajoissa todettiin, että tieverkon sähköistäminen voi raskaassa liikenteessä vaatia jopa kolme rinnakkaista käyttövoimaa: sähköjohtimet, sähköakut sekä diesel. Tämä lisää väistämättä ajoneuvojen kustannuksia ja heikentää toiminnan kannattavuutta. Lisäksi todettiin, että sähköakut vievät raskaassa liikenteessä tilaa kuljetettavalta kuormalta, mikä myös heikentää kannattavuutta.

Jatkossa keskeiseksi tekijäksi muodostuvat kustannussäästöjen lisäksi myös minimitävät ympäristövaikutukset. Raskaan liikenteen edustajille toteutettujen haastattelujen mukaan, logistiikkapalveluita hankkivien yritysten kriteereissä hiilineutraalisuus on yhä tärkeämpi kriteeri ja se tulee jatkossa ohjaamaan liikennettä nykyistä merkittävämmiin.

Ajoneuvovalmistajat

Keskeinen sidosryhmä tieverkon sähköistämisessä ovat ajoneuvovalmistajat. Ajoneuvon lataaminen tieinfrasta vaatii ajoneuvoon joko johtimen tai induktiivisessa latauksessa käämit, joiden kautta sähköenergia siirtyy ajoneuvoon. Johdin ja käämit ovat myös jälkiasennettavissa, mutta kustannustehokkain ratkaisu

olisi sisällyttää ne ajoneuvoon jo massatuotantovaiheessa. Tämä koskee etenkin henkilö- ja pakettiautoja, joissa johtimien osuus ajoneuvon kokonaiskustannuksista on suurempi kuin raskaassa kalustossa.

Ajoneuvovalmistajien valintoja ohjaavat heidän asiakkaiden (kuluttajat ja yritykset) tarpeet ja uusien ajoneuvomallien ja -versioiden suunnittelujaksot voivat olla useiden vuosien pituisia. Tällöin systeemisten muutosten, kuten sähköisen tieverkon laajamittaisen implementoinnin, ennakointi nousee tärkeäksi tekijäksi, jotta tieinfran käyttäjämäärät saadaan tarvittavalle tasolle. Lopulta ajoneuvovalmistajien valintoja ohjaa se, että ovatko kuluttajat valmiita maksamaan lisämaksuja johtimista?

Sähkönmyyjät ja sähköverkkoyhtiöt

Alustavan näkemyksen mukaan tieverkon sähköistämässä vaaditut sähkötehot ovat niin matalat, että sähköistys voidaan hoitaa jakeluverkoista eikä kantaverkolla ole sähköistyksessä roolia. Sähköverkkoyhtiöillä on sähkömarkkinalain mukainen liittämiselvoite, mikä tarkoittaa, että sähköiseen tieverkkoon investoitaessa, jakeluverkkoyhtiöiden tulee tarjota liittytapistettä sähkönkulutukselle. Sähkön jakeluverkkoyhtiöiden näkökulmasta toiminta ei poikkea muusta kulutuksen liittamisestä lukuun ottamatta sitä, että liittytapistettä tieverkolle on todennäköisesti useita. Analogiaa sähköverkkoyhtykennöille voi hakea rautateiden sähköistyksestä.

Sähkönmyyjille tieverkon sähköistäminen voi tarjota uusia liiketoimintamahdollisuuksia ja sähköverkkoyhtiöille nykyisen sähköverkon tehokkaampaa hyödyntämistä. Liiketoimintamallista riippuen sähkönmyynti voi olla osa tieinfran operointia tai tieverkon käyttäjille voidaan tarjota mahdollisuus kilpailuttaa oma sähkönmyyjänsä.

Muita tieverkon sähköistykseen liittyviä sidosryhmiä ovat esimerkiksi sähköturvallisuus-organisaatiot, tutkimuslaitokset, huoltovarmuuskeskus, ministeriöt sekä liikennealan viranomaiset ja poliitikot, infrarakennusyhtiöt, kunnat, fossiilisten polttoaineiden toimittajat ja muut kilpailijat.

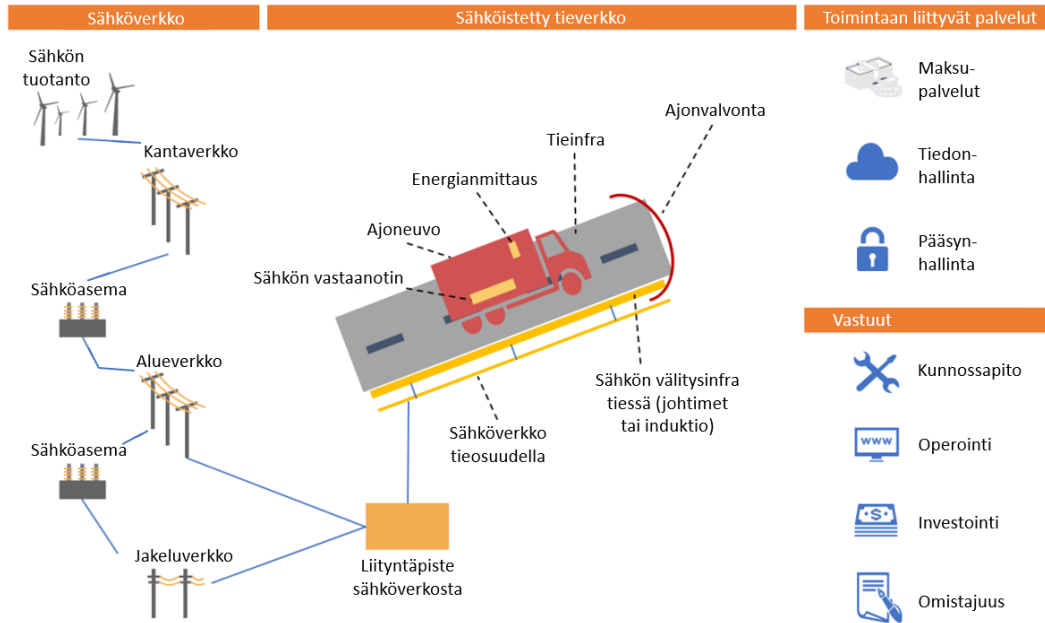
Lainsäätäjät ja muut viranomaiset

Keskeinen sidosryhmä tieverkkoja sähköistettäessä ovat viranomaiset ja erityisesti tieverkon kunnossapidosta vastaavat tahot. Ajolankateknologiat sekä erityisesti tiehen upotettavat tai tien pintaan kiinnitettävät latausteknologiat vaikuttavat olennaisesti perusväylänpitoon kuten päällystystyöhön. Näin ollen tieverkon operaattorin ja tienpitäjän toiminnot liittyvät läheisesti toisiinsa ja niiden välisiä intressejä tulisi koordinoita kokonaistaloudellisesti järkevästi.

Myös liikenteeseen liittyvä lainsäädäntö tulee huomioida tieverkkoja sähköistettäessä, sillä teknologiasta riippuen, sähköistuksen toteutus voi vaatia suuria muutoksia tieinfraan ja liikennöinnin hallintaan. Lainsäädännön muutostarpeita on tässä työssä analysoitu luvussa 3.

1.2.4 Palvelupakettivaihtoehdot

Tieverkon sähköistuksen liiketoimintamallit voivat koostua useista ns. palvelupaketeista. Kuvassa 14 on yhteenveto keskeisimmistä komponenteista, joita tieverkon sähköistykseen liittyy. Palvelupaketit puolestaan nivovat eri komponentteja kokonaisuuksiksi, joita palveluntarjoajat voivat tarjota tieverkon käyttäjille.



Kuva 14. Tieverkon sähköistykseen komponentteja (mukailtu lähteestä EY 2018).

Keskeisimmät tieverkon sähköistykseen komponentit ovat kuvan 14 mukaisesti:

- sähkön jakeluverkko
- liityntäpiste sähkön jakeluverkosta sähköistettyyn tieverkkoon
- sähköverkko osana sähköistettyä tieverkkoa
- sähkön välitysinfrastruktuuri tiessä (johtimet tai induktio)
- sähkön vastaanotin ajoneuvossa
- sähköajoneuvo
- energiankulutusmittari
- tieinfrastruktuuri
- ajonvalvonta
- maksupalvelut ja siihen liittyvä tiedonvaihto

EY (2018) on selvityksessään muotoillut kyseisistä komponenteista neljä erilaista palvelupakettia, jotka voivat erilaisina yhdistelminä muodostaa pohjan sähköistetyn tieverkon liiketoimintamalleille. Kyseiset palvelupaketit ovat kokonaisuuksia, jotka on tarjottavissa muista kokonaisuuksista irrallisina osina, ja joille on esim. määriteltävissä selkeät toimittajat ja asiakkaat. Ohessa on kuvattu mahdolliset palvelupaketit:

1. Sähköverkon laajennus

Tieverkon sähköistäminen vaatii sähköverkon ulottamista sähköistettävälle tieosuudelle (EY, 2018). Sähköverkkotoiminnan harjoittaminen on Suomessa luvanvaraista toimintaa, jota valvoo Energiavirasto. Sähköverkkotoimintaan kuuluvat verkonhaltijan harjoittama sähköverkon suunnittelu, rakentaminen, ylläpito ja käyttö, verkon käyttäjien sähkölaitteiden liittäminen sähköverkkoon, sähkön mittaus, asiakaspalvelu sekä muut sähkön siirtoon tai jakeluun liittyvät toimenpiteet, jotka ovat tarpeen verkonhaltijan sähköverkossa tapahtuvaa sähkön siirtoa tai jakelua ja muita verkon palveluja varten. Luvanvaraisen sähköverkkotoiminnan piiriin ei kuulu liittymisjohto, jolla esim. yksi sähkönkäyttöpaikka liitetään sähköverkkoon. (Energiavirasto 2019)

EY hahmottelee raportissaan (2018) kolmea vaihtoehtoa sähköverkon laajentamiselle sähköistettävälle tieosuuksille (huom. sähköverkon laajennukset koskevat tässä tiehen upotettavaa tai tien viereen/päälle tulevaan johtimeen sisältyvää sähköverkkoa):

1. sähköverkon laajennukset tieosuuksilla kytketään osaksi nykyisiä sähkön jakeluverkkotoiminnan toimilupia niiltä osin, kuin tieverkko kulkee eri jakeluverkonhaltijoiden verkkoalueilla
2. sähköverkon laajennukset tieosuuksilla toteutetaan uusilla sähkön jakeluverkkotoiminnan toimiluvilla
3. todetaan, että sähköverkon laajennukset tieosuuksilla eivät ole luvanvaraista eivätkä tällöin vaadi toimilupaa.

Vaihtoehto 1 tarkoittaisi, että tieosuuksien sähköverkosta vastaisivat nykyiset sähkön jakeluverkonhaltijat. Vaihtoehdossa 2 tieosuuksien sähköverkosta voisivat vastata nykyiset jakeluverkonhaltijat tai lupa voitaisiin myöntää uusille toimijoille kuten sähköisen tieverkon operaattorille. Vaihtoehdossa 3 sähköverkon laajennuksen toteuttajaa ei rajoiteta.

Ruotsissa tehtyjen selvitysten mukaan, ei ole täysin selvää, miten sähköverkkojen laajennukset tieosuuksilla tulisi toteuttaa nykyisen lainsäädännön puitteissa (EY, 2018). Tieverkon sähköistäminen johtaa uudelleen tilanteeseen, jossa nykylainsäädännön tulkintoja tulee tarkastella uusista näkökulmista. Ruotsin sähkön jakeluverkkotoiminnan lainsäädäntö on Suomen kaltainen, joten mitä todennäköisimmin Suomessa tilanne on vastaava.

Tässä palvelupaketissa rahaliikenne kulkisi sähköisen tieverkon operaattorilta sähköverkkotoimijalle, joka voi tapauksesta riippuen olla joko nykyinen jakeluverkonhaltija tai uuden sähköverkkotoimiluvan haltija.

2. Sähköistetyn tieverkon infrastruktuuri

Tämä palvelupaketti koostuu sähköajoneuvon latauksen mahdollistavan johtavan tai induktiivisen infrastruktuurin rakentamisesta. Pakettiin voi kuulua myös infrastruktuurin operointi tai se voidaan tarjota omana kokonaisuutenaan. Sähkötieinfra voidaan myös yhdistää palvelupakettiin 1, jolloin siihen sisältyy tieverkon tarvitsema sähköverkon laajennus. EY:n selvityksessä (2018) pohditaan sähköverkkotoimijoiden mahdollisuuksia tarjota palvelupaketit 1 ja 2 kokonaisuutena. Kyseiseen malliin liittyy kuitenkin haasteita, sillä jakeluverkkoyhtiöiden toiminta on tarkasti reguloitu ja sähkömarkkinalaki ei esim. salli jakeluverkkoyhtiöiden osallistua sähkön myyntiin. Jakeluverkkoyhtiöillä olisi kenties mahdollisuus osallistua sähkötieinfran rakentamiseen ja operointiin reguloidun liiketoiminnan ulkopuolisena toimintana, mikä vaatisi uuden toiminnan eriyttämistä reguloidusta liiketoiminnasta kirjanpidollisesti ja hallinnollisesti.

Yhtenä vaihtoehtona on myös, että sähkötieinfran toimittajat osallistuvat rahoittajina infrastruktuurin rakentamiseen ja operointiin – tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan ole pidetty varteenotettavana mallina (EY 2018). Todennäköisin vaihtoehto kirjallisuuskatsauksen ja tämän hankkeen työpajan perusteella vaikuttaisikin olevan, että infrastruktuurin rakentamista ja operointia varten tulisi perustaa uudet yhtiöt, joihin haettaisiin tarvittava rahoitus- ja osaamis- pohja erilaisilta toimijoilta.

Rahaliikenne kulkisi palvelupaketissa sähköisen tieverkon käyttäjiltä sen operaattorille ja edelleen sähköisen tieverkon omistajille. Operaattoreita voi olla yhden omistajan tieverkon alueella useita, jolloin rahaliikenne voidaan hoitaa esim. telealalta tutulla roaming-ratkaisulla (Gustavsson et al. 2015). Tällöin tieverkon käyttäjän tulee olla asiakkaana vain yhdelle operaattorille ja operaattorit hoitavat keskenään heidän välisen rahaliikenteen.

3. Ajoneuvojen sovittaminen sähköistettyyn tieverkkoon

Kolmas palvelupaketti koostuu ajoneuvojen sovittamisesta sähköistettyyn tieverkkoon. Sovittamisella tarkoitetaan käytännössä johtimen/virroittimen (johtavia rakenteita hyödyntävät teknologiat) tai käämien (induktiota hyödyntävät teknologiat) asennusta ajoneuvon, jotka mahdollistavat latauksen ajon aikana. Tiemaksuun riippuen ajoneuvolta voidaan vaatia myös mittaus- ja tunnistusjärjestelmä, jolla tiestä ladattu sähköenergia voidaan mitata sekä kohdistaa oikealle ajoneuville. Mittaus- ja tunnistusjärjestelmä ei ole pakollinen, mikäli maksut perustuvat esim. tietulleihin tai kiinteisiin kk-maksuihin.

Virroittimet tai käämit ovat asennettavissa ajoneuvoihin joko ajoneuvon valmistuksen yhteydessä tai jälkikäteen. Ajoneuvon valmistuksen yhteydessä virroittimien/käämien asennus olisi todennäköisesti kustannustehokkaampaa mitta-kaavaetujen ja tehokkaiden tuotantoprosessien johdosta. Toisaalta ajoneuvovalmistajat tuskin asentavat virroittimia/käämejä ajoneuvoihin, jos niille ei ole kysyntää, koska ne nostavat ajoneuvon hintaa. Kysyntää puolestaan ei synny, jos ajoneuvoille ei ole niitä tukevaa infrastruktuuria.

EY pohtii selvityksessään (2018), että pitkällä aikavälillä voi olla järkevää erottaa ajoneuvovalmistus ja virroittimien/käämien asennus omiksi kokonaisuuksiksi. Ajoneuvovalmistuksessa tuotantoprosessien standardointi on keskeinen tekijä, joka ei tällöin häiriintyisi. Lisäksi ajoneuvojen toimivat jälkimarkkinat ovat keskeinen osa erityyppisten ajoneuvojen myyntiä. Jälkimarkkinoiden likviditeetin kannalta on tärkeää, että alun perin ei-sähköiselle tieverkolle suunniteltu ajoneuvo on muunnettavissa sähköiselle tieverkolle sopivaksi ja päinvastoin. Toki ajoneuvojen sovittamisessa sähköiselle tieverkolle tulee aina huomioida esim. käytössä oleva akkukapasiteetti, jonka muutokset voivat myös olla osa tätä palvelupakettia.

Markkinan kypsyessä vaihtoehdoksi tulee myös, että ajoneuvojen sovittamista sähköistettyyn tieverkkoon tarjotaan osana tieverkon operointia (EY 2018). Tällöin tieverkon operaattori voi vastata kokonaisuudesta johon kuuluu esim. virroittimien/käämien leasing-palvelu, tieverkon käyttöpalvelut sekä mahdollisia muita kokonaisuuksia.

Palvelupaketissa tieverkon käyttäjä tai ajoneuvon hankkija maksaa joko ajoneuvovalmistajalle tai palveluntarjoajalle virroittimien/käämien ja niihin liittyvistä palveluista, jotka mahdollistavat ajoneuvon lataamisen sähköistetyssä tieverkossa.

4. Mittaus- ja maksujärjestelmät

Neljäs palvelupaketti sisältää mittaus- ja maksujärjestelmät sekä niihin liittyvät palvelut, kuten tiedonsiirron ja -hallinnan. Palvelupaketin tavoitteena on mahdollistaa ajoneuvojen tunnistus sekä niiden tiestä lataaman sähköenergian mittaus, jotta tieinfran käytöstä voidaan periä maksuja sekä estää tieinfran luvaton käyttö (EY 2018).

Tämän hankkeen työpajan osallistujien näkemys oli, että sähkötieinfran käytöstä tulisi periä maksuja ja maksujen tulisi perustua aiheuttamisperiaatteeseen eli esim. joko tiestä ladattuun energiaan, ajettuihin kilometreihin tai ajoaikaan. Kiinteitä hinnoitteluja ei pidetty toivottavana, koska ne eivät kannusta tehokkuuteen energiankäytössä ja liikennesuoritteissa. Aiheuttamisperiaatteen mukainen hinnoittelu tarkoittaa, että tienkäyttöä tulee kyetä mittaamaan. Mittaukseen on useita eri vaihtoehtoja ja mittauslaitteet voivat sijaita joko autossa tai tieinfrassa. Tiemaksuja on analysoitu omassa luvussa 1.2.5.

Mittaus- ja maksujärjestelmille voi löytyä täysin erillinen toimija tai ne voivat olla osa tieverkon operointia (palvelupaketti 2). Mikäli mittaus- ja maksujärjestelmille on erillinen toimija, liikkuisi rahaliikenne tieverkon operaattorilta mittaus- ja maksujärjestelmien toimittajalle. Tällöin vaihtoehtona on, että operaattori välittää tieverkon käytöstä perittävistä maksuista tietyn osuuden mittaus- ja maksujärjestelmien toimittajalle. Jos mittaus- ja maksujärjestelmistä vastaa tieverkon operaattori, sisältyisi mittauksesta ja maksuliikenteestä aiheutuvat kulut suoraan tieverkon käyttömaksuihin. Tämä yksinkertaistaisi rahaliikennettä, mutta ei käytännössä juuri näkyisi tieverkon käyttäjälle. (EY 2018)

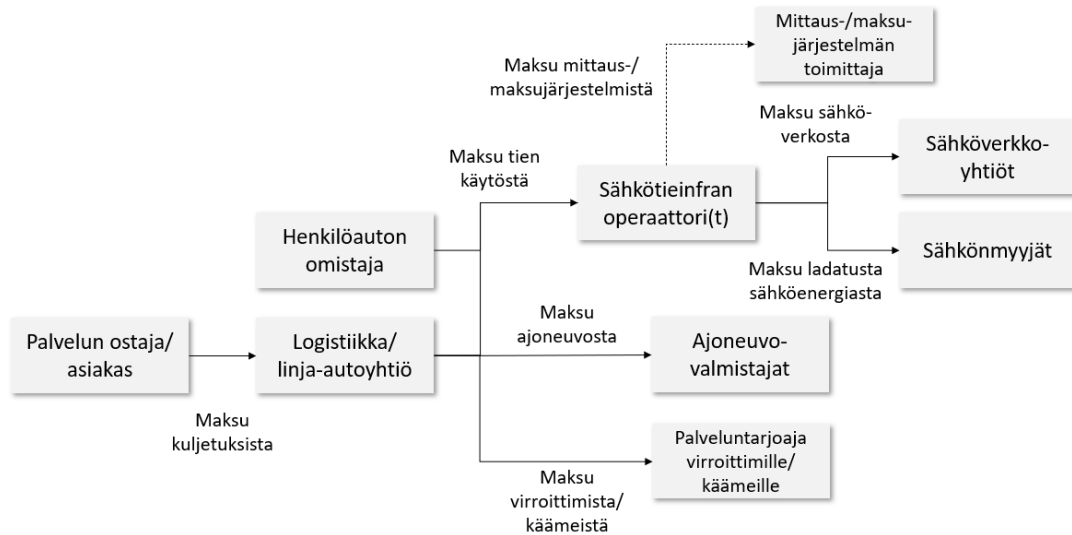
5. Palvelupakettiyhdistelmät

Tehdyissä selvityksissä painotetaan (EY 2018), että palvelupaketteja on mahdollista yhdistää: esimerkiksi yksi operaattori voisi vastata palvelupaketeista 2 ja 4, jolloin operaattori vastaa mittaus- ja maksujärjestelmistä, asiakkaan laskuttamisesta ja sähköön toimittamisesta käyttäjille. Yhdistämällä palvelupaketit 1 ja 2 yksittäinen toimija voisi vastata tieinfraan liittyvän sähköverkon toimivuudesta ja sähköön toimittamisesta ajoneuvoihin. Yksi vaihtoehto operaattorille olisi tarjota yhdistelmää palvelupaketeista 1, 2 ja 4, jolloin operaattori vastaa kokonaisuudessaan tieinfraan liittyvästä sähköverkosta, sähköön toimittamisesta käyttäjille, mittaus- ja maksujärjestelmistä, asiakkaan laskuttamisesta sekä muusta tieverkon operoinnista. Myös muut yhdistelmät palvelupaketeista ovat mahdollisia erityisesti suurissa implementoinneissa. Yksinkertaisissa toteutuksissa esim. vain yksittäisille teollisuustoimijoille tarkoitetuilla tieosuuksilla myös liiketoimintamallit ovat todennäköisesti yksinkertaisempia.

1.2.5 Tiemaksujen kerääminen

Tieverkon sähköistäminen vaatii suuria investointeja ja yhtenä tekijänä investointien kattamiseksi tieverkon käytöstä voidaan periä maksuja. Tiemaksujen keräämiseen on useita teknisiä vaihtoehtoja, joita tarkastellaan jäljempänä. Tiemaksut voivat perustua esim. ajettuihin kilometreihin tai ladattuun energiaan. Kuvassa 15 on yleiskuvaus sähköistetyn tieverkon käyttöön liittyvistä maksuista, jotka tavalla tai toisella liittyvät itse tieverkon operoinnista perittävään maksuun. Teoreettisena vaihtoehtona myös on, että sähköistetyn

tieverkon käytöstä ei peritä lainkaan maksuja – tämä voisi tulla kyseeseen tapauksessa, jossa yksittäiset toimijat investoivat omaan sähköiseen tieverkkoon, joka on suljettu muulta liikenteeltä. Tällaisia tapauksia voisi tulla vastaan esim. satamissa.



Kuva 15. Yhteenveto sähköistetyn tieverkon käyttöön liittyvistä maksuista (mukailtu lähteestä EY 2018)

Sähkötieverkon hyödyntäjiä voivat olla esimerkiksi henkilöautoilijat, tavarantoimittajat erilaisine tavararyhmineen sekä julkinen liikenne. Aiempien selvitysten (EY, 2018 ja 2019) mukaan käyttäjiä voidaan veloittaa esimerkiksi kulutusperusteisesti, kiinteällä kk-maksulla tai näiden kombinaatioilla. Seuraavassa esitetään yhteenveto eri vaihtoehdoista:

- **Tiestä ladattuun energiaan perustuva maksu**, joka mahdollistaa energiatehokkuuden huomioimisen ja läpinäkyvän hinnoittelun. Hinnoittelumallissa voidaan huomioida esim. ajoneuvojen painoerot, jolloin rekan latausmaksu poikkeaa henkilöauton latauksesta. Ladattuun energiaan perustuva maksu vaatii ajoneuvoilta ID-tunnisteen, joilla ne voidaan yksilöidä ja tunnistaa. Ladattu energia voidaan mitata joko ajoneuvossa olevalla mittarilla tai tieinfraassa olevalla mittarilla, jonka mittaukset jyvitetään sovittujen periaatteiden mukaisesti tieverkon käyttäjille.
- **Aikasidonnainen maksu** (esim. minuutti-/tunti-/päiväperusteinen veloitus) ei vaadi ladatun energian mittausta vaan veloitus tapahtuu tiellä kulutetun ajan perusteella. Toteutus on näin ollen yksinkertaisempi kuin ladattuun energiaan perustuva malli. Myös aikasidonnainen maksu vaatii ajoneuvon tunnistamista esim. tietulleilla, joilla voidaan havaita ajoneuvon siirtyminen sähköiselle tieosuudelle sekä sieltä poistuminen. Aikasidonnainen malli kannustaisi tieverkon käyttäjiä myös suunnittelemaan ajettujen matkojen ajankohtaa ja välttämään ruuhka-aikoja, millä voisi olla vaikutusta tieliikenteen sujuvuuteen ja sitä kautta myös päästöihin.

- **Ajomatkan pituuteen sidottu maksu** (per km) on logiikaltaan ja toteutukseltaan vastaava kuin aikasidonnainen maksu. Sähköisellä tieverkolla ajettut kilometrit voidaan mitata esim. kiinteillä tietulleilla tai ajoneuvoissa olevilla mittareilla.
- **Kiinteä hinnoittelu** (esim. kuukausi- tai vuosiperusteinen) voi muiden mallien tapaan sisältää sekä tien käyttöoikeuden että ladatun energian osuuden tai vain toisen näistä. Kiinteään hintaan voidaan liittää erilaisia lisäarvopalveluita kuten huolto-, rahoitus- ja ajoneuvojen leasing-palveluita. Kiinteän hinnoittelun varjopuolena on, että se ei kannusta energia- tehokkuuteen vaan maksimoimaan liikenteen sähköisellä tieosuudella sopimuksen määraamissä puitteissa. Kiinteää ei tämän hankkeen työpajassa koettu tästä syystä houkuttelevaksi vaihtoehdoksi tiemaksuille.
- **Investoinnin ja operoinnin vaatimat kustannukset kerätään veroina.** Aiempien selvitysten mukaan verojen kerääminen voisi olla mahdollista, jos infran rakentaa valtio ja jos toimintaa operoisi valtionhallinnon alainen taho. Tämä tulisi kyseeseen, mikäli sähköinen tieverkko nähtäisiin yleishyödyllisenä investointia, jonka kustannuksia ei haluttaisi kohdistaa yksittäiselle toimijalle. Tämä malli voisi tulla kyseeseen erityisesti toiminnan alkuvaiheissa, kun tieverkon käyttäjiksi pyritään houkuttelemaan kriittistä massaa kannattavan liiketoiminnan mahdollistamiseksi.

Edellä esitellyistä malleista on myös mahdollista muodostaa erilaisia kombinaatioita, ja käyttäjää voidaan veloittaa infran hyödyntämisestä esim. tietullimaksuin vain yhteen suuntaan liikkuessa. Kuvassa 15 on esitetty, että ladattu energia hankittaisiin sähkötieinfraoperaattorin kautta. Voi myös olla mahdollista, että tieverkon käyttäjät voisivat itse kilpailuttaa sähkönmyyjänsä, mutta tämä toimintamalli vaatisi lisäselvityksiä sen yksityiskohtaisen toteutuksen osalta (EY 2018).

Tiemaksuja suunniteltaessa on huomioitava, että sähköisellä tieverkolla voi olla useita operaattoreita, jolloin voi tulla tarpeen kopioida telealalta tuttuja roaming-malleja, joissa käyttäjä maksaa vain yhdelle operaattorille – operaattoreiden hoitaessa heidän välisen maksuliikenteen. Tiemaksujen lisäksi tieverkon käyttäjille aiheutuu myös muutosmaksuja ajoneuvojen päivittämiseksi sähköiselle tieverkolle soveltuviksi (virroitimet/käämit, jotka mahdollistavat lataamisen ajon aikana).

Tämän hankkeen työpajassa todettiin, että tiemaksujen keräämiseen vaadittuun ajoneuvojen tunnistamiseen on jo nyt saatavilla useita eri teknologioita. Tunnistaminen voidaan hoitaa esim. tietullein, satelliitein, RFID:llä tai kamera-tunnistimilla.

Käyttäjän näkökulmasta olennainen kysymys on, että mahdollistaako sähköinen tieverkko kustannussäästöjä nykyisiin toimintamalleihin verrattuna? Mikäli vaihtoehtoiskustannus esim. dieselillä, biokaasulla tai sähkömoottorilla ja -akuilla ilman virroitinta/käämiä on halvempi, ei käyttäjiä tule siirtymään sähköisen tieverkon piiriin. EY toteaa selvityksessään (2018), että sähköisellä tieverkolla voi olla tieosuuksia, joilla kannattavuus on muita osuuksia parempi – tällaisia tieosuuksia ovat ne, joilla on korkea raskaan liikenteen osuus. Hyvän kannattavuuden tieosuudet voivat kenties kompensoida huonomman kannattavuuden osioita kriittisen massan saavuttamiseksi. Toimivien ja tehokkaiden

markkinoiden näkökulmasta on myös tärkeää, että valittava sähköteknologia ei turhaan rajoita kilpailua esim. mahdollistamalla vain tietyn valmistajan ajoneuvojen hyödyntämisen sähköisillä tieverkoilla (EY 2018).

1.2.6 Kustannusarvioita

EY on selvityksessään (2018) arvioinut tieverkon sähköistämisen investointi- ja operointikustannuksia Ruotsissa. Selvityksessä esitetyt luvut ovat karkeita arvioita vaadittavista alkuvaiheen kustannuksista, joihin sisältyy merkittäviä epävarmuustekijöitä esim. induktioteknologian matureettiasteesta johtuen. Ohessa on esitetty yhteenveto kyseisistä kustannusarvioista. Eri teknologioiden kustannuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 1.1.7.

Infrastruktuurin rakentamiskustannukset (CAPEX)

- Johtavia rakenteita hyödyntävät ratkaisut:
 - ajolanka tien päällä: 0,9–1,3 milj. EUR/kaista-km
 - kontaktirakenne tien sisällä: 0,5–1,0 milj. EUR/kaista-km
- Induktiota hyödyntävät ratkaisut:
 - käämit tien sisällä: 1,0–3,1 milj. EUR/kaista-km
- Sähköverkon laajennustyöt: 0,4–0,8 milj. EUR/kaista-km
- Muutokset ajoneuvoihin (johtimet): 0,05–0,08 milj. EUR/ajoneuvo

Operointikustannukset (OPEX)

- Ladatun sähkön hinta: 0,07–0,15 EUR/ajettu km
- Tieverkon huolto- ja kunnossapito: arviolta 1,5 % pääomakustannuksista (Sundelin et al. 2018)

Suomessa sähköistettävän tieverkon laajuutta ja potentiaalia on tarkasteltu luvussa 2. Luvussa 5 on puolestaan arvioitu sähköistämisen kustannuksia esimerkkitapauksissa huomioiden arvioitu potentiaali.

1.2.7 Rahoitus

Tieverkon sähköistäminen vaatii monelta eri toimijalta rahoitusta systeemisen muutoksen aikaansaamiseksi. Rahoitusta tarvitaan mm. sähkötieinfran rakentamiseen, sähköverkkojen laajennuksiin, tieverkon operointiin sekä huoltoon ja kunnossapitoon. EY:n (2018) selvitys ehdottaa, että valtio ei voi rahoittaa kaikkia edellä mainittuja toimintoja. Valtion rooli rahoittajana voi kuitenkin olla välttämätön transiitiojakson aikana, jotta infra saavuttaa kriittisen käyttäjämassan ja sitä kautta kannattavan liiketoiminnan edellytykset. Edellä luvussa 2.3 on pohdittu valtion roolia sähkötieinfran rahoittajana ja omistajana – valtio voi toimia enemmistö- tai vähemmistöomistajana yhtiöissä, joiden roolina on tieinfran omistus/hallinnointi ja/tai tieinfran operointi. Yksityisomistuksessa olevien teiden rahoitukseen valtio ei luonnollisesti osallistu.

Valtion rahoituksen tavoitteena olisi auttaa markkinaehtoisia yrityksiä kehittämään uusia liiketoimintamalleja ja innovaatioita sähköiseen tieverkkoon liittyen sekä yleisesti vauhdittaa tieverkon sähköistymistä. Muita valtion rooliin liittyviä tekijöitä, joilla voidaan vaikuttaa tieverkon sähköistymiseen, on esitetty alla (Petterson et al. 2017):

- Valtio viestii selkeästi roolistaan esim. tieinfran rakentajana, mahdollistajana ja osarahoittajana.
- Valtio sitoutuu pitkäjänteiseen investointikaareen (selvityksissä suositellaan vähintään 10-15 vuoden aikajännettä)
- Valtio tukee tieverkon sähköistystä selkeällä regulaatiolla ja ohjeistuksella
- Valtio tuottaa luotettavat ja realistiset ennusteet odotettavissa olevista liikennevolyymeistä pitkällä aikavälillä. Ennusteisiin voidaan mahdollisesti sitoa tietyt vakuudet: valtio voisi osin tukea operaattorin/ operaattorien toimintaa, jos ennakoitua volyymit eivät vastaa todellisuutta
- Valtio voi edistää standardisoinnin kehittymistä esim. EU:ssa
- Valtio voisi subventoida raskaan liikenteen sähköistymistä tarjoamalla hankintatuki ajoneuvojen hankintaan. Saksassa valtio tukee 40 000 euron asti yli 12 tonnia painavien sähköajoneuvojen hankinnassa.
- Valtio voisi tarjota vero- ja muita etuuksia. Esim. Norjassa sähköautoista ei tarvitse maksaa tienkäyttömaksuja, tien käyttöveroja tai rekisteröintimaksuja.
- Julkiset ja innovatiiviset hankinnat kansallisiin ja alueellisiin tieverkon sähköistyshankkeisiin.

1.2.8 SWOT-analyysi Suomen näkökulmasta

Seuraavassa on esitetty tiivis yhteenveto tieverkon sähköistykseen liittyvistä vahvuuksista, heikkouksista, mahdollisuuksista ja uhkista Suomessa. Analyysi ei ole kattava, vaan sen on tarkoitus toimia yhteenvetona kirjallisuuskatsaukselle sekä hankkeen työpajassa ja haastatteluissa kerätylle tiedolle.

Taulukko 8. Tieverkon sähköistyksen tiivis SWOT-analyysi Suomen näkökulmasta.

Vahvuudet

- Suomen edistyksellinen liikennealan lainsäädäntö ja kansallinen liikenteen alan kasvuohjelma 2018–2022 mahdollistaa uusien palveluiden ja ekosysteemien kehittymisen.
- Suomessa on pitkäjänteinen kokemus vaativien julkisen ja yksityisen sektorin tilaaja-tuottajahankintamallien (PPP- ja allianssiyhteistyömallien) toteuttamisesta, mikä voi auttaa tieverkon sähköistykseen liittyvissä investoinneissa.
- Suomen sähkön jakeluverkot ovat vahvoja ja niiden kapasiteetin oletetaan riittävän tieverkon sähköistyksen tarpeisiin.
- Tietyt teknologiat kuten ajolangat ovat jo melko kypsiä laajempiin implementointeihin, minkä lisäksi raideliikenteestä tutun mallin monistaminen rekka-liikenteeseen voi vauhdittaa toimintaa. Myös autonvalmistajilta löytyy teknologioille soveltuvia ajoneuvoja (esim. Scania ja Volvo Trucks).

Heikkoudet

- Tieinfrainvestoinnin kokoluokka on merkittävä ja sen kannattavuuteen liittyy epävarmuuksia – löytyykö investoinnille rahoittajia?
- Useiden teknologiavaihtoehtojen kehitys on edelleen kesken ja niistä on vain rajattuja testituloksia saatavilla (lähinnä teknologisesta näkökulmasta ilman laajaa asiakaspalautetta). Lataustehot eivät välttämättä ole riittävät raskaalle kalustolle.
- Suomen olosuhteet, kuten lumi, jää ja routa, asettavat haasteita teknologioille erityisesti kunnossapidon näkökulmasta.
- Sähköisen tieverkon monitoimijaympäristön kompleksisuus: valtio ei voi yksin kantaa riskiä ja rahoittaa tieverkon infran rakentamista.
- Kuka ottaa tieverkon operaattorin roolin? Löytyykö soveltuvaa toimijaa ja onko rooli valtakunnallinen vai tarvitaanko useampi alueellinen operaattori?
- Ajolankateknologian vaikutukset maisemasuunnitteluun ja estetiikkaan.

Mahdollisuudet

- Tieinfran rahoitus ja rakentaminen yhdistelmällä yksityisiä ja julkisia toimijoita.
- Potentiaali pienentää raskaan ja kevyen ajoneuvoliikenteen aiheuttamia kasvihuonepäästöjä tavoiteltaessa fossiilitonta liikennettä vuoteen 2045 mennessä.
- Tieverkkojen sähköistämisen työllisyysvaikutukset ja uuden osaamisen kehittäminen.
- Sähköisen tieinfran päälle on mahdollista kehittää uusia lisäarvopalveluita.
- Kannustimet ja muiden (vero)etuuksien kehittäminen kysyntää stimuloimaan.
- Suomi voisi toimia Ruotsin ja Saksan ohella Euroopan johtavana sähköisen tieverkon testialusta ja markkinapaikkana, mikä houkuttelisi alueelle investointeja.
- Logistiikkakustannukset todennäköisesti kasvavat päästörajoitusten kiristyessä ja polttoaineiden kallistuessa. Tällöin sähköajoneuvojen houkuttelevuus paranee toimijoiden hakiessa säästöjä polttoainekustannuksissa.
- Erityisesti induktiivisen latauksen teknologinen kehitys, mikä mahdollistaisi suuret lataustehot hyvällä hyötysuhteella.

Uhkat

- Sähköiselle tieverkolle soveltuvien sähköautojen markkinapenetraatio on ennakoitua hitaampaa ja käyttäjämäärät ovat vaatimattomia – infran käyttöaste jää matalaksi.
- Teknologisten standardien puute, joka johtaa useisiin kilpaileviin teknologioihin ja korkeampiin kustannuksiin.
- Teknologiariski: mikä kehitettävistä teknologioista lyö läpi ja millä aikataululla? Onko riskiä teknologian vanhentumisesta?
- Muutokset lainsäädännössä eivät tarjoa ennakoitavaa toimintaympäristöä eivätkä siten kannusta investointeihin.

- Tarkan kustannusarvion puute tieinfran rakentamisen, operoinnin ja huollon kustannuksista - toiminnan kannattavuus epävarmaa.
- Alan toimijat panostavat kilpaileviin teknologioihin kuten biopolttoaineisiin.
- Tieverkon sähköistämisen vaikutukset liikenteen luotettavuuteen – miten liikenne hoidetaan, jos infra ei ole käytettävissä?
- Sään ääri-ilmiöiden vaikutukset infraan ja teknologisiin ratkaisuihin.

1.3 Sidosryhmien näkökulmia

Hankkeessa toteutettiin työpaja sekä haastatteluja, joilla selvitettiin eri sidosryhmien näkemyksiä tieverkon sähköistämisen mahdollisuuksiin ja haasteisiin Suomessa. Työpajoihin ja/tai haastatteluihin osallistuneita tahoja olivat: Väylävirasto, Traficom, Liikenne- ja viestintäministeriö, Uudenmaan ELY-keskus, Salon kaupunki, Teknologiateollisuus, Energiateollisuus, Tampereen yliopisto, Suomen kuljetus ja logistiikka SKAL ry, GRK Rail Oy, Siemens Mobility Oy, Caruna Oy, Oyj Ahola Transport Abp, VDL Bus & Coach Finland Oy ja Koiviston Auto Oy. Seuraavassa on esitetty työpajoissa ja haastatteluissa esiin nousseita näkemyksiä tieverkkojen eri käyttäjäryhmiin liittyen.

1.3.1 Raskas tavaraliikenne

Tavaraliikenteessä ja liiketoiminnassa ylipäätään trendi on pitkään ollut kohti optimoitua tuotannonohjausta ja varastohallintaa, joka minimoi varastomäärät ja vaatii nopeita toimitusaikoja. Tuotteet pyritään saamaan toimitettavaksi heti, kun ne tulevat varastoon. Tämä aiheuttaa vaihtelua kuljetustarpeisiin, jolloin kuljetusten tehokas hallinta vaatii verkostojen optimointia kulloisenkin asiakastarpeen ja kysynnän mukaan. Vaihtelevat kuljetustarpeet puolestaan vaativat joustavaa reititystä, jolloin ajoreittien dynaamisuus kasvaa. Tämä voi vaikuttaa siihen, miten paljon esim. tiettyjä pääväyliä hyödynnetään raskaassa liikenteessä. Toisaalta tavarankuljetuksen nopeusvaatimusten oletetaan myös kiristävän, mikä osaltaan asettaa vaatimuksia reitti- ja kalustovalinnoille.

Tämän hetken sähköistetyn tieverkon piloteissa raskaan liikenteen ajoneuvot käyttävät pääasiassa kolmea eri käyttövoimaa liikkumiseen: virroitinjärjestelmää, sähköakkuja sekä dieselmoottoria. Jatkon kannalta oleellinen kysymys on, että voidaanko osittain päällekkäisistä voimalähteistä luopua, mikä parantaisi ajoneuvojen kustannustehokkuutta? Sähköakkujen hyödyntämisessä raskaassa kalustossa oleelliseksi kysymykseksi tulee myös akkujen muulta kuormalta viemä tila.

Raskaassa liikenteessä logistiikkaa ohjaa kuljettajien ajo- ja lepoajat. Mahdolliset pysähdykset esim. akkujen lataamiseksi lisäisivät logistiikan kustannuksia ja heikentäisivät kilpailukykyä. Jatkossa autonomisen liikenteen kehittyminen voi mahdollistaa kuljettajien ajo- ja lepoajoista aiheutuvien rajoitteiden purkamista, kun ajoneuvo itse tai muu järjestelmä ottaa enenevässä määrin vastuun ajoneuvon hallinnasta. Autonominen liikenne voi vaikuttaa myös ajoreitteihin, jotka päätetään useiden dynaamisten parametrien perusteella. Optimoitavia

tekijöitä voivat olla esim. käytettävissä oleva energia ja sen hinta, hyödynnettävissä olevat ajoletkat, reittipituus, reitillä sallittu ajonopeus, toimitusaikavaatimukset, tien odotettu ruuhkaisuus jne.

Myös käytettävä kalusto, sen käyttöikä sekä kustannukset vaikuttavat raskaan liikenteen kykyyn ja halukkuuteen hyödyntää sähköistettyä tieverkkoa. Raskaassa liikenteessä uutena ostetun vetoauton tyypillinen käyttöikä on noin 3–5 vuotta ja perävaunujen noin 10 vuotta. Kuten muussakin liikenteessä, kalustolla on jälkimarkkinat ja käytetyn kaluston uusi omistaja voi ajaa vetoautolla huollettuna toiset 3–5 vuotta. Vetoauton hinta uutena on noin 120–150 t€ ja arvion mukaan esim. ajolangan virroitinjärjestelmä aiheuttaisi autoon noin 40 t€ lisäkustannuksen pienessä mittakaavassa toteutettuna (100–500 ajoneuvoa). Massatuotannossa virroitinjärjestelmän kustannus voisi painua noin 10 t€/ajoneuvo tasolle. Muita kuorma-autojen hankintaan liittyviä tyypillisiä kustannusesimerkkejä ovat perävaunujen noin 50–100 t€ ja päällirakenteiden noin 50 t€ kustannukset¹⁰. Edellä esitetyillä kustannuksilla ajolankavirroittimen aiheuttama lisäkustannus perävaunulliselle kuorma-autolle olisi 3–18 %.

Raskaan liikenteen kuljetussopimukset ovat tyypillisesti muutaman vuoden pituisia. Toimijoiden näkemyksen mukaan kuljetusten reaaliaikainen läpinäkyvyys ja niiden aiheuttamat päästöt ovat tekijöitä, jotka kasvattavat merkitystä jatkossa. Vaatimukset päästöjen pienentämisestä voivat määritellä polttoainevalintoja ja käyttövoimateknologioita. Tieverkon sähköistämisen lisäksi muita tunnistettuja vaihtoehtoja päästöjen pienentämiseksi voivat olla esim. biodiesel, biokaasu ja nesteytetty biokaasu. Pohjoismaissa raskaan liikenteen kuormat ovat tyypillisesti Keski-Eurooppaa painavimmat, mikä asettaa Pohjoismaissa rajoitteita esim. biokaasun hyödyntämiseksi riittämättömän teho-/painosuhteen saavuttamisen johdosta. Sähkömoottorin ja -akkujen hyödyntämistä raskaassa liikenteessä rajoittaa tällä hetkellä lähinnä riittämättömän toimintasäde sekä akkujen muulta kuormalta viemä tila. Vaihtoehtoisia tapoja liikenteen päästöjen pienentämiseksi on pohdittu tarkemmin luvussa 6.

1.3.2 Linja-autoliikenne

Linja-autoliikenteessä käytettävä kalusto, liikennöintisopimukset, kaluston käyttöikä sekä kustannukset vaikuttavat linja-autoliikenteen kykyyn ja halukkuuteen hyödyntää sähköistettyä tieverkkoa. Uutena ostetun linja-auton tyypillinen käyttöikä on noin 17–18 vuotta. Dieseliä polttoaineena käyttävien linja-autojen hankintahinta vaihtelee 150 000–400 000 € välillä. Sähköbussuja valmistavat esimerkiksi suomalainen Linkker sekä Scania, Volvo ja Mercedes-Benz. Linkkerin sähköbussuja on testattu Helsingissä jo useita vuosia ja esimerkiksi Espoossa operoi parikymmentä Kiinassa valmistettua sähköbussia.

Linja-autoliikenteen liikennöintisopimukset kaupunkien kanssa ovat tyypillisesti pituudeltaan 1–7 vuotta ja keskimäärin 5 vuotta. Liikennöntikilpailutuksissa kaupungit sanelevat ehdot ajoneuvokalustolle. Ehdossa korostuu enenevästi kaupunkien pyrkimys vähentää ajoneuvojen polttoaineen kulutusta ja kasvihuonepäästöjä sekä lähipäästöjen vähentäminen etenkin kaupunkien sisäisessä liikenteessä. Linja-autot liikkuvat vakioiduilla ajoreiteillä kaupungin sisäisessä liikenteessä. Pyrkimykset vähäpäästöisempään kalustoon sekä vakioitujen

¹⁰ Kustannukset ovat karkeita suuntaa-antavia esimerkkejä. Tapauksesta riippuen todelliset kustannukset voivat poiketa esitetyistä merkittävästikin.

reittien ajaminen voisivat olla tekijöitä, jotka puoltaisivat tieverkon sähköistämistä. Linja-autoliikenteessä tieverkon sähköistämisen lisäksi muita tunnistettuja vaihtoehtoja päästöjen pienentämiseksi voivat olla esim. biodiesel, biokaasu ja nesteytetty biokaasu. Eri sidosryhmien arvioiden mukaan sähköistetyllä tieverkolla voisi olla eniten käyttöpotentiaalia kaukoliikenteen vakioituilla reiteillä. Akkuteknologian kehittyessä akustoja hyödyntävät sähköbussit muodostuvat puolestaan varteenotettavaksi vaihtoehdoksi kaupunkien sisäisessä liikenteessä.

Linja-autoliikenteen operatiivisessa käytössä tieverkon sähköistämisteknologioiden keskeisiksi heikkouksiksi koettiin a) Suomen ilmasto-olosuhteet; b) sähkölatausinfraan vaatimat investoinnit; c) akkuteknologian kehittyminen kilpailevana ratkaisuna; d) standardien puute; ja c) liikennöintisopimusajat kaupunkien kanssa. Ilmasto-olosuhteista haasteina mainittiin kovat lumisateet ja routa. Liikennöintisopimuksissa ratkaistavaksi puolestaan toiminnan jatkuvuuden varmistus, kun liikennöitsijä ja ajokalusto vaihtuvat.

Linja-autoliikenteessä käytettävien sähköakkujen toimintasäde todettiin vielä toimintaa rajoittavaksi tekijäksi. Linja-autojen sähköakkujen arvioitiin kestävän 8–10 vuotta, joten akun vaihto aiheuttaa kalustolle lisäkustannuksia sen käyttöiän aikana. Kaupunkien sisäisessä liikenteessä latauksen osalta on arvioitava sähköbussien lataustarve myös linjojen päässä, mikäli latausteho sähköisellä tieosuudella jää liian matalaksi. Kaukoliikenteessä puolestaan tulee arvioida latauspaikkojen tarvetta varikkoalueilla ja pysäkeillä.

Linja-autoliikenteessä tällä hetkellä potentiaalisimpia keinoja pienentää khk-päästöjä on vaikuttaa kuljettajien ajotapaan. Ajotapaan vaikutetaan esimerkiksi opastamalla ja palkitsemalla polttoainekulutusta säästävistä ajotavasta. Tulevaisuudessa panostetaan erityisesti ajoreittien laadintaan ja optimointiin (esim. rullauksen käynnistämiskäytännöt).

Linja-autoliikenteessä keskeinen ohjaava tekijä on lisäksi aikatauluvaatimukset ja niihin liittyvät sanktiot. Mikäli tietty ajovuoro jää ajamatta, voi siitä koitua operaattorille suuret taloudelliset kustannukset, mikä puolestaan vaikuttaa oleellisesti toiminnan kannattavuuteen. Sähköisen tieverkon tulisikin tarjota luotettava toimintaympäristö linja-autoliikennöitsijöille, jossa sähkönsyöttö on varmistettu kaikissa olosuhteissa eikä esim. rajallinen kaistakapasiteetti aiheuta turhia rajoitteita toimijoille. Tai vaihtoehtoisesti linja-autoissa tulisi olla sekundäärinen käyttövoima esim. dieselistä tai riittävän suuri sähköakkukapasiteetti, jotka kuitenkin nostavat autojen investointikustannuksia ja pienentävät siten sähköisten tieverkkojen kilpailukykyä muita vaihtoehtoja vastaan.

1.3.3 Kevyt ajoneuvoliikenne

Kevyessä ajoneuvoliikenteessä (henkilö- ja pakettiautoliikenne) matkakohtaiset ajosuoritteet ovat keskimäärin pienemmät kuin raskaassa liikenteessä. Kevyessä ajoneuvoliikenteessä on nimensä mukaisesti myös kevyemmät kuljetettavat kuormat, mikä tarkoittaa vähäisempiä vaatimuksia ajoneuvon käyttövoimalle. Kolmantena tekijänä kevyessä ajoneuvoliikenteessä ei etenkin pitkiä etäisyyksiä ajettaessa ole vastaavia ajoaikavaatimuksia ja ajoaikaa rajoittavia tekijöitä kuin raskaassa liikenteessä. Edellä esitetyistä tekijöistä johtuen liikenteen sähköistyminen on kevyessä ajoneuvoliikenteessä huomattavasti raskasta liikennettä edellä.

Useat ajoneuvovalmistajat ovat julkaisseet mittavia investointiohjelmia sähköautojen suunnittelulle ja valmistukselle lähivuosille. Vastatakseen sähköautojen vaatimaan sähköakkukapasiteetin kysynnän kasvuun, ovat useat toimijat myös investoineet merkittävästi sähköakkujen ja niiden vaatimien materiaalien valmistukseen. Autoteollisuus näyttääkin uskovan vahvasti sähköautojen yleistymiseen ja vauhdittaa sitä toimittamalla markkinoille uusia automalleja. Myös tämän työn työpajassa ja haastatteluissa yleinen näkemys oli, että kevyet ajoneuvot tulevat sähköistymään sähköakkujen yleistymisen ja kapasiteetin kasvun myötä.

2 Sähköistettävän tieverkon potentiaali ja laajuus

Tiivistelmä luvusta 2

Tieverkon sähköistämisen potentiaalia ja sopivaa laajuutta on arvioitu tässä raportissa ilmastovaikutuksiin, liikennöintikustannuksiin sekä infrastruktuuriin liittyvien tekijöiden näkökulmasta. Sekä kevyt että raskas ajoneuvo-liikenne voi hyötyä tieverkon sähköistämisestä, mutta kevyelle ajoneuvo-liikenteelle soveltuviin teknologioihin sisältyy merkittäviä teknologiaan ja kustannuksiin liittyviä epävarmuuksia. Tieverkon sähköistämällä voidaan nopeuttaa erityisesti raskaan liikenteen sähköistymistä ja kasvihuonekaasupäästöjen vähenemistä.

Tieverkon sähköistämiseen liittyviä investointeja on kuitenkin haastavaa saada yhteiskuntataloudellisesti kannattavaksi. Kannattavuus edellyttää merkittäviä käyttäjämääriä. Raskaan liikenteen reitit eivät noudata pelkkiä suurten liikennemäärien tieosuuksia, minkä vuoksi riittävän käyttäjämäärän saavuttaminen edellyttää myös vähäliikenteisempien tieosuuksien sähköistämistä – mahdollisesti suuressakin mittakaavassa. Optimaalisen laajuuden arviointi ja siihen liittyvän investoinnin kannattavuuden arviointi edellyttää yksityiskohtaista selvitystä kuormitetuimmilla tieverkon osilla kulkevien raskaan liikenteen matkojen lähtö- ja määränpäistä.

2.1 Lähtökohdat potentiaalin ja laajuuden arviointiin

2.1.1 Sähköistetyn tieverkon rooli ajoneuvoliikenteessä yleisesti

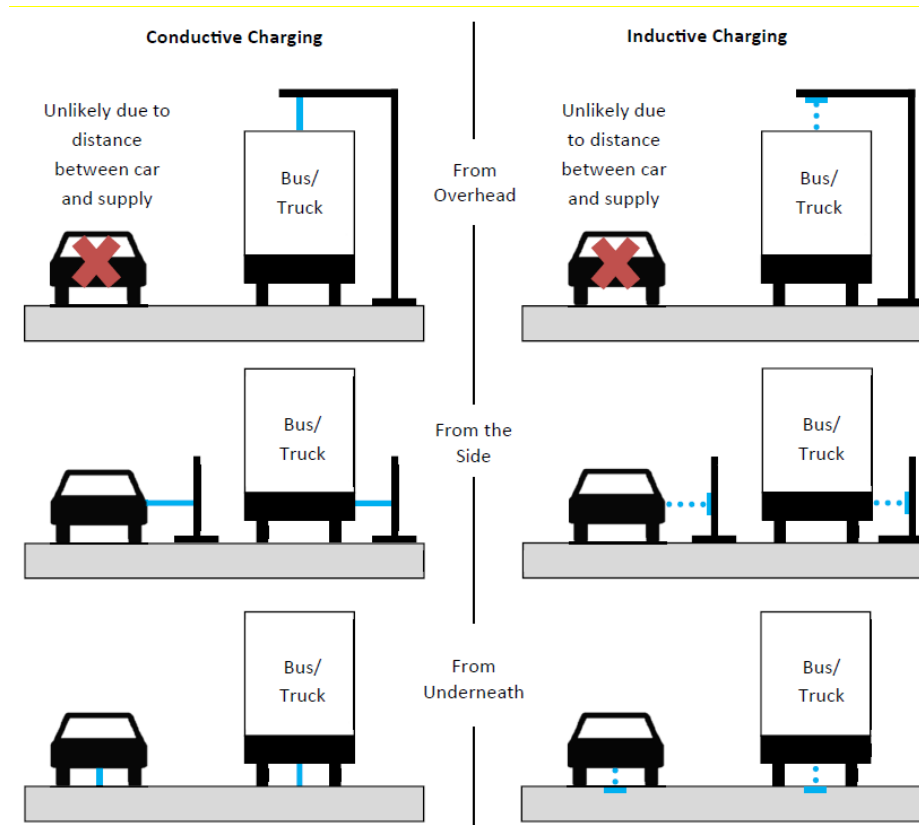
Kevyestä ajoneuvoliikenteestä merkittävän osan arvioidaan sähköistyvän vuoteen 2030 mennessä. Akkuteknologian kehitys mahdollistaa kevyen ajoneuvoluokan sähköistymisen, mutta raskaamman kaluston sähköistäminen oletetaan olevan hitaampaa. Liikenne- ja viestintäministeriön raportissa (2018) esitetään tavoitteeksi vuodelle 2030, että kevyistä ajoneuvoista noin 25 % (670 000 ajoneuvoa) olisi sähkökäyttöisiä. Tavoite raskaiden ajoneuvojen sähköistymiselle on merkittävästi pienempi, noin 6 % (7000 ajoneuvoa).

Taustatekijöinä raskaiden ajoneuvojen hitaammalle sähköistymiselle ovat suuremman energiankulutuksen ja suuren toimintasäteen vaatimien akkujen suhteessa suuremmat koot ja kustannukset. Eräs tieverkon sähköistämisen päätavoitteista onkin ajoneuvojen akkujen koon, ja sitä kautta kustannusten, pienentäminen (Connolly 2017). Kevyet ajoneuvot hyötyvät sähköistetyistä tieverkosta samalla tavoin kuin raskaatkin ajoneuvot.

Sähköistä tieverkkoa hyödyntävillä ajoneuvoilla on todennäköisesti käytettävissä toinenkin rinnakkainen voimanlähde, kuten akku tai polttomoottori. Sähköistetty tieverkko tarjoaa runkoverkon, jota pitkin akulla varustettu ajoneuvo voi liikkua suurimman osan matkasta, mahdollisesti ladata samalla akkua. Akun tarvitsee pitkällä matkalla riittää vain liikkumiseen sähköistetyn tieverkon ja lähtöpaikan tai määränpään välillä. Vaihtoehtoisesti ajoneuvo voi

olla varustettu akun lisäksi polttomoottorilla, mikä mahdollistaa akkukäyttöistä ajoneuvoa suuremman toimintasäteen sähköistetyn tieverkon ulkopuolella.

Kaikki luvussa 1 esitetyt teknologiat tieverkon sähköistämiseen tarjoavat mahdollisuuden raskaan liikenteen sähköistämiseen (kuva 16). Ajouradan yläpuolelle sijoitettavat johtimet eivät sen sijaan todennäköisesti palvele kevyttä ajoneuvoliikennettä (Connolly 2017). Valittavan sähköistysteknologioiden soveltuvuus eri ajoneuvotyypeille ja sen vaikutukset tulisi huomioida sähköistyksen laajamittaisen toteutuksen suunnittelussa.



Kuva 16. Sähköistetyn tieverkon teknologiat ja niiden soveltuvuus kevyille ja raskaille ajoneuvoille (Connolly 2017).

2.1.2 Sähköistetyn tieverkon käyttökohteet raskailla ajoneuvoilla

Elinkeinoelämän näkökulmasta edellytys sähköistetyn tieverkon käytölle on, että sähköistettyä tieverkkoa käyttämällä saavutetaan säästöjä kuljetuskustannuksissa. Mikäli kuljetuskustannukset ovat samalla tasolla kuin vaihtoehtoisessa kuljetustavassa, voi myös vähäpäästöisyydellä ja siihen liittyvillä imagotekijöillä olla merkitystä.

Sähköistetyn tieverkon käyttö raskaassa liikenteessä on kannattavinta sellaisilla yhteysväleillä, joilla kalusto voidaan sitoa pelkästään kyseiselle yhteysvälille, eli ajoneuvot ajavat samalla reitillä edestakaisin, mahdollisesti useita kertoja vuorokaudessa. Tällaisten reittien ominaisuudet riippuvat jonkin verran kuljetettavasta tavaralajista, mutta yleisesti tämä rajaa mahdolliset yhteysvälit melko lyhyiksi.

Pidemmillä yhteysväleillä kuljetusyrietykset pyrkivät hyödyntämään paluukuorman, jolloin reiteistä muodostuu kolmioreittejä tai laajempia kiertoreittejä. Yhteysvälejä arvioitaessa tärkeitä tunnistettavia asioita ovat mm. kuljetusreittien vakioituneisuus – myös paluukuorman osalta. Kuljetusreittien vakioituneisuus edellyttää, että yhteysvälillä kuljetettavan volyymin on oltava huomattava. Esimerkiksi viisi päivittäistä kuormaa puoliperävaunulla tarkoittaa noin 40 000 tonnin kuljetusmäärää vuodessa.

Linja-autoliikenteessä vakioitujen reittien osuus on merkittävä myös pidemmillä yhteysväleillä, minkä vuoksi linja-autoliikenteen kynnys hyödyntää sähköistettyä tieverkkoa on matala. Esimerkiksi valtatiellä 3 Helsinki–Tampere-yhteysvälillä linja-autojen osuus raskaasta liikenteestä on kohdan mukaan kuitenkin vain noin 5–20 %.

Yksittäisillä yhteysväleillä toteutettuna tieverkon sähköistyksen käyttöpotentiaali on tavaraliikenteen osalta suurin puoliperävaunuliikenteessä, jossa vetoauton ei tarvitse odottaa kuorman lastausta tai purkua. Tällöin investointikustannuksiltaan polttomoottoriajoneuvoa kalliimpi sähköajoneuvo on liikenteessä suuremman osan ajasta. Lyhyet odotusajat päätepisteissä myös rajoittavat akkukäyttöisten ajoneuvojen latausmahdollisuuksia ja parantavat sähköistettyä tieverkkoa hyödyntävien ajoneuvojen kilpailuasemaa puhtaasti akkukäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna.

Eri tavararyhmien kuljetusjärjestelmät eroavat huomattavasti toisistaan edellä mainituilla kriteereillä. Seuraavissa kappaleissa on arvioitu potentiaalisimpia tavaralajeja ja yhteysvälejä Suomessa.

Metsäteollisuuden tuotantolaitosten kuljetukset (muu kuin raakapuu)

Metsäteollisuuden suuret tuotantolaitokset synnyttävät kuljetuksia sekä tehtaille (sellua, kemikaaleja ja täyteaineita) että tehtailta (valmiita tuotteita). Useissa tapauksissa kuljetukset lähtevät ja saapuvat samasta satamasta. Sisämaassa sijaitsevien tehtaiden kuljetukset tapahtuvat pääasiassa rautateitse, mutta rannikolla sijaitsevien tehtaiden kuljetukset hoidetaan kuorma-autoilla.

Kuljetusmäärältään merkittäviä tällaisia yhteysvälejä ovat mm.:

- Kemin Ajoksen satama – Kemin metsäteollisuuden tuotantolaitokset (Stora Enso Veitsiluoto ja Metsä Group Pajusaari)
- Kotkan satama – Stora Enson Sunilan tehdas
- Rauman satama – UPM:n ja Metsä Groupin Rauman tehtaot
- Mäntyluodon satama – UPM:n Porin saha
- Kotkan satama – UPM:n Kaukaan tehdas Lappeenrannassa (ratayhteydestä huolimatta yhteysvälillä kulkee huomattava määrä myös kuorma-autokuljetuksia molempiin suuntiin).
- Myös muilla rannikolla sijaitsevilla merkittävillä tuotantolaitoksilla (Kaskinen, Pietarsaari, Oulu) voi olla vastaavia kuljetusvirtoja.

Kaivosten kuljetukset

Kaivokset synnyttävät kuljetuksia kaivoksilta jatkojalostusta tekeville rikastamoille ja metallien tuotantolaitoksille.

Kuljetusmäärältään merkittäviä tällaisia yhteysvälejä ovat mm.:

- Keminmaan Eljärven kaivoksen ja Outokummun Tornion tehtaan väliset kuljetukset. Yhteysväliä on arvioitu tarkemmin luvussa 2.3
- Polvijärven Kylälahden kaivoksen kuljetukset Kaavin rikastamolle
- Myös mahdollisten uusien kaivosten (mm. Sokli) kuljetuksissa voisi olla mahdollista hyödyntää sähköistettyä tieverkkoa.

Kappaletavaran ja elintarvikkeiden kuljetukset

Elintarvikkeiden ja kappaletavaran kuljetuksissa potentiaalisia kohteita kuljetusmäärän näkökulmasta ovat kuljetukset satamista keskusvarastoihin sekä keskusvarastoista terminaaleihin. Keskusvarastojen ja terminaalien väliset kuljetusmatkat ovat kuitenkin varsin pitkiä.

Potentiaalisiksi yhteysväliksi on tunnistettu VTT:n tekemän ehdotuksen perusteella Vuosaaren sataman ja Järvenpään välinen tieyhteys, jossa sijaitsevat kolmen suuren vähittäiskauppaketjun (Kesko, S-ryhmä, Lidl) keskusvarastot. Yhteysväliä on arvioitu tarkemmin luvussa 2.3.

Eri teollisuudenalojen kuljetukset samalla yhteysvälillä

Useamman teollisuusalan kuljetukset samalla yhteysvälillä mahdollistavat sähköistämisen kannattavuuden sellaisilla yhteysväleillä, jotka eivät yhtä teollisuusalaa tarkasteltaessa osoittaudu kannattaviksi. Kuljetusmäärältään merkittäviä tällaisia yhteysvälejä ovat mm.:

- **Vt 2 Harjavalta–Pori–Mäntyluoto**
Harjavallan metalli- ja kemianteollisuuden keskittymä synnyttää suuren määrän kuljetuksia Mäntyluodon ja Tahkoluodon satamien sekä Harjavallan välillä. Jos tämä yhteysväli sähköistetään, voisivat sitä hyödyntää myös Porin metsä- ja metalliteollisuuden kuljetukset.
- **Vt 6 Lappeenranta–Imatra** (+ haarat tärkeimmille tuotantolaitoksille)
Lappeenrannan, Joutsenon ja Imatran sellu-, paperi- ja kartonkitehtaat sekä metsäteollisuuteen liittyvä kemianteollisuus synnyttävät rannikkosatamiin suuntautuvien kuljetusten lisäksi huomattavan määrän seudullisia ja paikallisia kuljetuksia. Tällaisia ovat mm. kemianteollisuuden raaka-aineiden kuljetukset Mustolasta Joutsenoon, kemianteollisuuden tuotteiden kuljetukset Joutsenosta Lappeenrantaan ja Imatralle sekä metsäteollisuuden tuotekuljetukset Mustolaan.
- **Vt 4 Rovaniemi–Sodankylä**
Sodankylä–Rovaniemi-välillä sähköistettyä tieverkkoa voisivat hyödyntää sekä Kevitsan kaivoksen kuljetukset että raakapuun kuljetukset tieterminaaleista. Yhteysväli on kuitenkin huomattavan pitkä.

Tavaraliikenteen näkökulmasta potentiaalisia yhteysvälejä

Alla olevassa taulukossa 9 on listattu tavaraliikenteen näkökulmasta potentiaalisia yhteysvälejä tavaralaji- ja etäisyystietojen kera.

Taulukko 9. Tavaraliikenteen sähköistämiseen potentiaalisia yhteysvälejä.

| Yhteysväli | Tavaralaji | Etäisyys |
|--|----------------------------|-----------|
| Vuosaaren satama – Järvenpää | Elintarvikkeet | 40 km |
| Elijärvi–Röyttä | Kaivosteollisuus | 40 km |
| Kemin Ajoksen satama – Kemin metsäteollisuuden tuotantolaitokset | Metsäteollisuus | 5-15 km |
| Kotkan satama – Stora Enson Sunilan tehdas | Metsäteollisuus | 15 km |
| Rauman satama – UPM:n ja Metsä Groupin Rauman tehtaot | Metsäteollisuus | n. 5 km |
| Mäntyluodon satama – UPM:n Porin saha | Metsäteollisuus | 20 km |
| Kotkan satama – UPM:n Kaukaan tehdas | Metsäteollisuus | 120 km |
| Polvijärven Kylylahden kaivos – Kaavin rikastamo | Kaivosteollisuus | 40 km |
| Mäntyluodon ja Tahkoluodon satamat – Harjavalta | Kaivosteollisuus | 50 km |
| Sodankylä–Rovaniemi | Kaivos- ja metsäteollisuus | n. 170 km |
| Lappeenrannan, Joutsenon ja Imatran metsä- ja kemianteollisuus | Metsä- ja kemianteollisuus | n. 40 km |

2.1.3 Sähköistetyn tieverkon käyttökohteet kevyillä ajoneuvoilla

Kevyen ajoneuvoliikenteen matkojen lähtö- ja määränpäissä on huomattavasti enemmän maantieteellistä hajontaa kuin raskaiden liikenteen vastaavissa. Kevyen ajoneuvoliikenteen saaminen sähköisen tieverkon piiriin laajasti vaatisi siis maantieteellisesti laajempaa sähköistyskokonaisuutta. Liikenteen sähköistämisestä ei voi myöskään sopia samalla tavoin kuin raskaassa liikenteessä yksittäisten kuljetusliikkeiden kanssa. Kevyen ajoneuvoliikenteen siirtyminen tarkasteltavan teknologian piiriin edellyttää raskaan ajoneuvoliikenteen tavoin, että sähköverkon käyttäminen on riittävän edullista verrattuna vaihtoehtoihin käyttövoimiin.

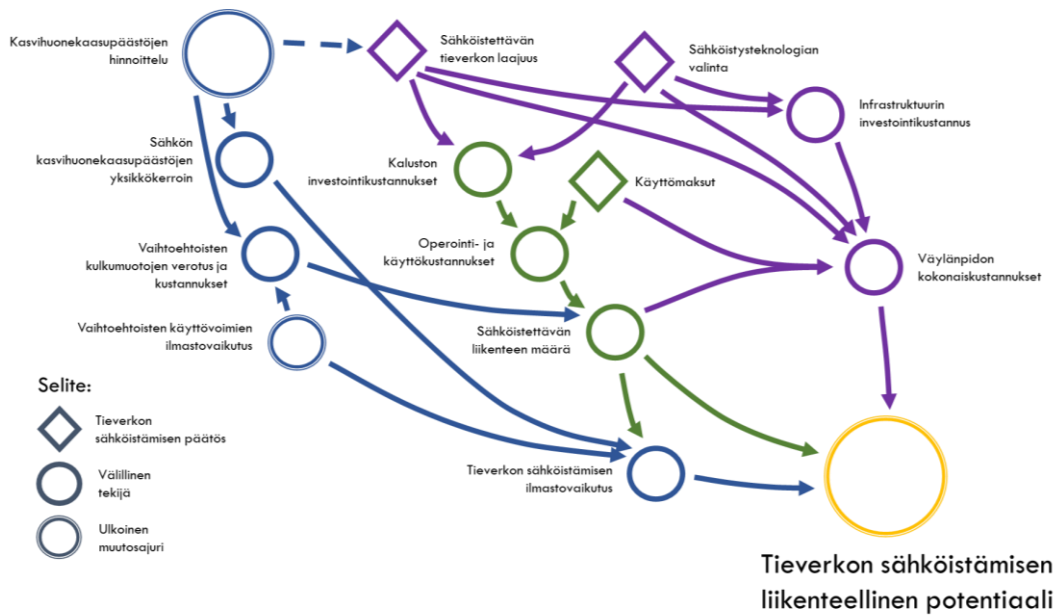
Yksittäisen käyttäjän näkökulmasta sähköistetyn tieverkon on katettava riittävän suuri osuus käyttäjän liikkumasta matkasta, jotta sähköistyksen käyttömahdollisuuden edellyttämät ajoneuvoinvestoinnit tulevat katetuksi. Toisaalta mitä laajemmalle sähköistetty tieverkko ulottuu, sitä pienemmällä ja edullisemmalla akulla kevyt sähköajoneuvo voidaan varustaa liikkumistarpeiden täyttämiseksi sähköistetyn verkon ulkopuolella.

Kevyen ajoneuvoliikenteen siirtämiseksi sähköistetyn tieverkon käyttöön on luultavasti kannattavaa sähköistää tieverkkoa suurimpien liikennemäärien yhteyksistä alkaen.

2.2 Potentiaalin määrittäminen

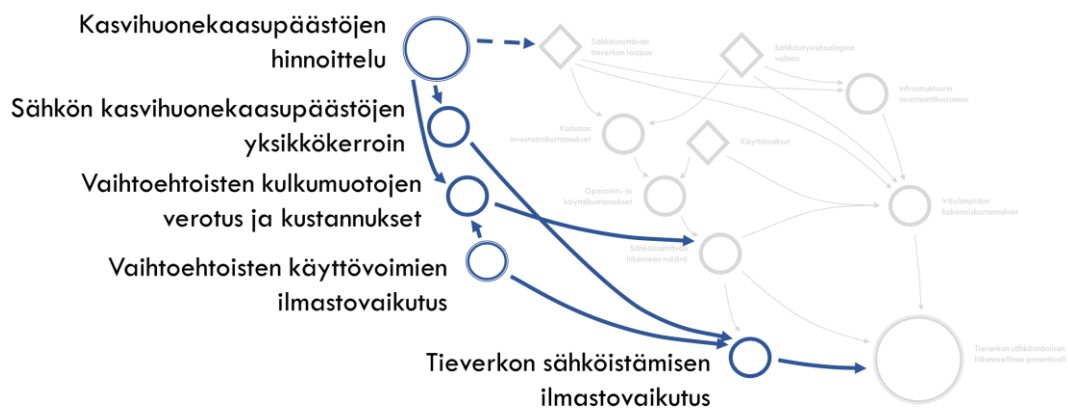
Tieverkon sähköistämisen liikenteellinen potentiaali määriteltiin tarkasteluissa kolmen vaikutusketjun yhteisvaikutuksena (kuva 17). Vaikutuksia on tarkasteltu tarkemmin seuraavissa kappaleissa. Tarkasteltavat vaikutukset ovat:

1. Ilmastovaikutukset
2. Liikennöintikustannukset
3. Vaikutukset infrastruktuuriin.



Kuva 17. Tieverkon sähköistämisen liikenteellisen potentiaalin vaikutusketjut. Sininen väri kuvaa ilmastovaikutuksiin, vihreä liikennöintikustannuksiin ja lila infrastruktuuriin liittyviä tekijöitä.

2.2.1 Ilmastovaikutukset



Kuva 18. Tieverkon sähköistämisen liikenteellisen potentiaalin vaikutusketjujen ilmastotekijät.

Kasvihuonekaasupäästöjen hinnoittelu

Kasvihuonekaasupäästöjen hinnoittelu on keskeinen ajuri tieverkon sähköistämiseksi. Kasvihuonekaasupäästöjen hinnoittelu vaikuttaa suoraan tai välillisesti kaikkiin tässä esitettyihin vaikutusketjuihin.

Sähkön kasvihuonekaasupäästöjen yksikkökerroin

Sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöjen yksikkökerroin määrittelee sähkön käyttämisen ilmastovaikutukset. Kasvihuonekaasupäästöjen hinnan kasvu ajaa siirtymistä uusiutuviin energianlähteisiin sähkön tuotannossa.

Vaihtoehtoisten kulkumuotojen verotus ja kustannukset

Sähköistetylle tieverkolle keskeiset vaihtoehtoiset kulkumuodot ja käyttövoimat tavarakuljetuksissa ovat polttomoottorikäyttöiset kuorma-autot sekä joillakin yhteysväleillä myös raiteliikenne.

Vaihtoehtoisten käyttövoimien ilmastovaikutus

Sähkölle vaihtoehtoisten tavaraliikenteen käyttövoimien ilmastovaikutus vaikuttaa niiden suhteelliseen houkuttelevuuteen ilmastovaikutusten näkökulmasta. Ilmastovaikutus lasketaan polttoaineen ja hyötysuhteen perusteella.

Tieverkon sähköistämisen ilmastovaikutus

Tieverkon sähköistämisen ilmastovaikutus riippuu sille siirtyvän liikenteen määrästä, sähköntuotannon päästöistä, ja sen merkittävyyttä tulee arvioida suhteessa vaihtoehtoisten kulkumuotojen kustannuksiin ja ilmastovaikutuksiin.

2.2.2 Liikennöintikustannukset



Kuva 19. Tieverkon sähköistämisen liikenteellisen potentiaalin vaikutusketjujen liikennöintikustannustekijät.

Kaluston investointikustannukset

Kuljetusyhtiöille syntyy investointikustannuksia kaluston muuntamisesta sähkökäyttöiseksi, akustojen asentamisesta sekä sähkönottolaitteiden asentamisesta.

Käyttömaksut

Infrastruktuurille voidaan asettaa käyttömaksuja, joilla pyritään siirtämään väylänpidosta aiheutuvia kustannuksia väylien käyttäjille. Liian suuret käyttömaksut suhteessa vaihtoehtoisiin polttoaineisiin tekevät infrastruktuurin käytön kannattamattomaksi. Sopiva taso käyttömaksuille määräytyy kannattavuuslaskelmien pohjalta.

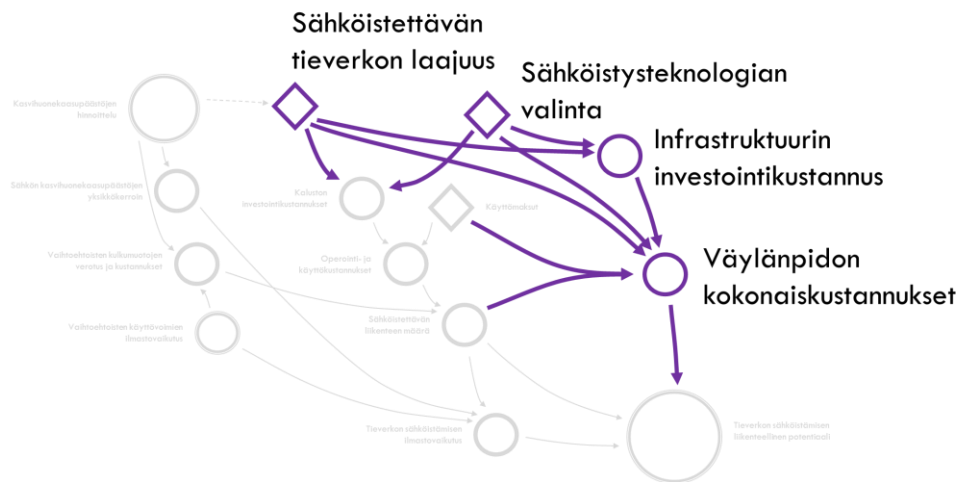
Operointi- ja käyttökustannukset

Operointi- ja käyttökustannukset muodostuvat investointikustannuksesta, kunnossapitokustannuksesta, sähkön kustannuksesta sekä mahdollisesta infrastruktuurin käyttömaksusta.

Sähköistettävän liikenteen määrä

Sähköistettävän liikenteen osuus liikenteestä riippuu sähkökäyttöisten ajoneuvojen operointi- ja käyttökustannusten ja vaihtoehtoisten käyttövoimien taloudellisen kannattavuuden erotuksen perusteella.

2.2.3 Vaikutukset infrastruktuuriin



Kuva 20. Tieverkon sähköistämisen liikenteellisen potentiaalin vaikutusketjujen infrastruktuuritekijät.

Sähköistettävän tieverkon laajuu

Tieverkon sähköistäminen kannattaa todennäköisesti aloittaa yksittäisistä tieosuuksista. Seuraavilla sivuilla on arvioitu potentiaalisimpia sähköistyskohteita ja niiden kannattavuutta. Yksittäisen kohteen kannattavuus riippuu mm. yhteysvälin tavaraliikenteen määrästä ja luonteesta.

Sähköistysteknologian valinta

Tieverkon sähköistäminen voidaan tehdä ajojohdinten, sivukiskon tai tien pohjaan sijoitettavien induktiokäämien avulla. Vaihtoehtoja on vertailtu kattavasti luvussa 1.

Infrastruktuurin investointikustannus

Kilometrikohtaisen investointikustannuksen suuruus riippuu valittavaan sähköistysteknologiaan liittyvistä infrastruktuurin kustannuksista sekä mahdollisista sähköverkon kehitystoimenpiteistä.

Väylänpidon kokonaiskustannus

Väylänpidon kokonaiskustannus muodostuu investointikustannuksesta, kunnossapitokustannuksista sekä mahdollisista käyttömaksuista. Tien ylle sijoitettavien ajojohdinten kunnossapitokustannusten voidaan olettaa olevan lähellä rautatieinfrastruktuurin ajojohtojen kunnossapitokustannuksia. Muiden sähköistysteknologioiden kunnossapidosta Suomen olosuhteissa ei ole laajamittaista kokemusta.

2.2.4 Tieverkon sähköistämisen potentiaali liikenteen näkökulmasta



Kuva 21. Tieverkon sähköistämisen liikenteellisen potentiaalın vaikutusketjut.

Tieverkon sähköistämisen liikenteellinen potentiaali muodostuu infrastruktuuriin, liikennöintikustannuksiin sekä ilmastovaikutuksiin liittyvien tekijöiden yhteisvaikutuksena. Potentiaalia voidaan arvioida väylänpidon kustannusten, verotulojen muutoksen sekä ilmastovaikutusten kautta. Näille yhteinen tekijä on sähköistettävän tieliikenteen määrä tai osuus.

Tieverkon sähköistämisen voidaan arvioida olevan kannattavaa niillä osuuksilla, joilla sähköistämisen kasvihuonekaasupäästöjä pienentävä ilmastovaikutus on suurempi kuin yhteenlaskettu väylänpidon kokonaiskustannusten ja liikenteen käyttövoimaan liittyvien verotulojen muutos.

Sähköistettävän liikenteen määrä on riippuvainen sähköistämisen kannattavuudesta yksittäisen liikenteen käyttäjän tai liikennöitsijän näkökulmasta. Tähän kannattavuuteen voidaan vaikuttaa paitsi muuttamalla infrastruktuuriin liittyvien kustannusten osittamista liikenteen käyttäjille, myös muuttamalla eri käyttövoimien ja liikennemuotojen suhteellista verotusta. Esimerkiksi polttoaineverojen korottaminen kasvattaa sähkölle vaihtoehtoisten käyttövoimien kustannuksia ja tekee tieverkon sähköistämisestä houkuttelevampaa yksittäiselle liikenteen käyttäjälle.

2.3 Case-tarkastelukohteiden potentiaalın arviointi

2.3.1 Case-tarkastelukohteiden valinta

Case-tarkastelujen tavoitteena oli muodostaa ymmärrys tieliikenteen sähköistämisen potentiaalista ja sähköistettävän tieliikenteen laajuudesta. Koska tavoitteena oli löytää lähiajan ratkaisuja ilmastomuutoksen ehkäisemiseen, tukeuduttiin tarkasteluiden lähtökohdissa nykytilanteen tietoihin, kun mahdollista.

Tarkasteluissa arvioitiin vaikutuksia potentiaalisimmiksi tunnistetuissa tapauksissa ja laajempina toteutuksina reunaehto- ja suuruusluokkien ja skaalautuvuuden hahmottamiseksi. Tarkasteltaviksi valittiin seuraavat kohteet:

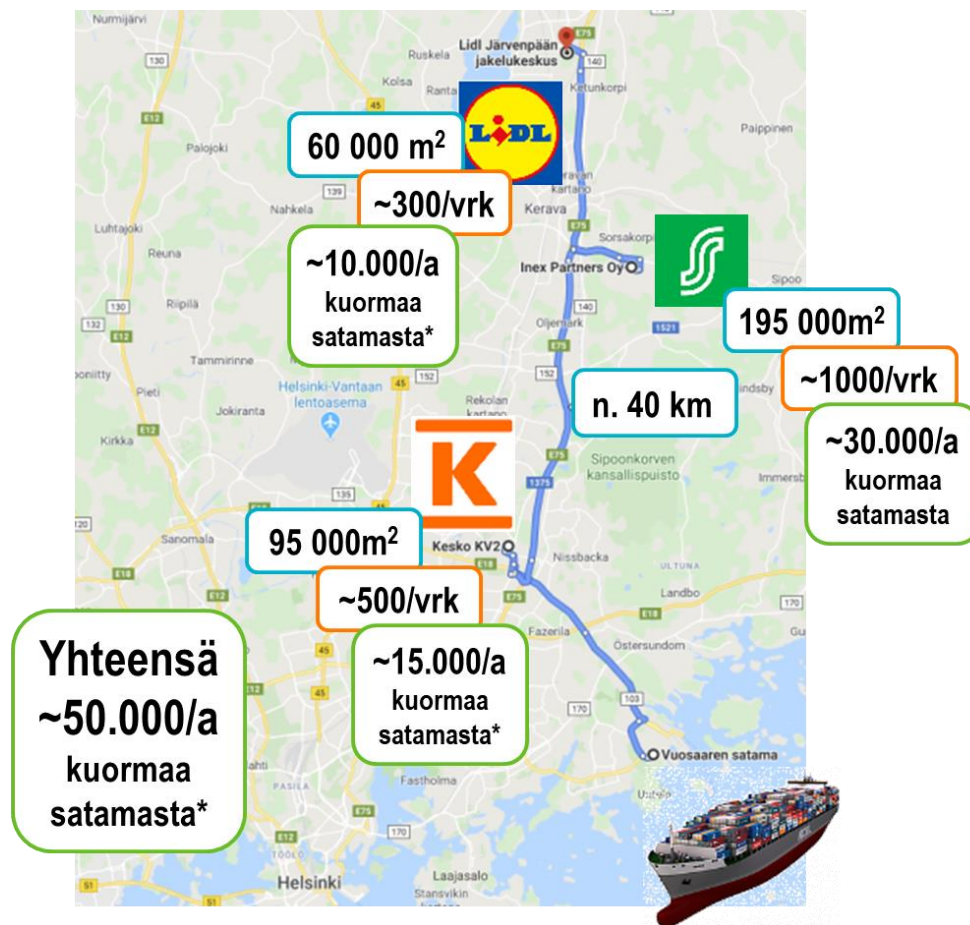
1. Elijärvi–Röyttä *Teollisuuslaitos–satamatarkastelu*
2. Vuosaaren satama – Järvenpää *Laajempi satamalogistiikkatarkastelu*
3. Vt 3 Helsinki–Tampere *Laajempi yhteysvälitarkastelu*
4. Maanteiden pääväyläverkko *Laajempi tieverkkoarkastelu*

Taulukko 10. Tarkastelukohteet, niiden pituudet sekä karkealla tasolla kuvailtu liikenne tarkastelukohteilla.

| Tarkastelu-kohte | Tarkastelu-kohteen laajuus | Tarkastelukohteen liikenteen kuvaus |
|-------------------------------|----------------------------|---|
| 1. Elijärvi–Röyttä | n. 40 km | Liikennemäärä: 22 000 ajoneuvoa/vuosi/suunta (teollisuuden kuljetukset, joiden oletetaan siirtyvän sähköistyksen piiriin) Ajoneuvotyyppi: Kuorma-auto varsinaisella perävaunulla Keminmaan Elijärven kromikaivoksen ja Outokummun Tornion tehtaan välillä kulkee säännöllisesti malmikuljetuksia ympäri vuoden. Malmikuljetukseen käytettyjen ajoneuvojen arvioidaan liikkuvan pelkästään yhteysväliä. |
| 2. Vuosaaren satama–Järvenpää | n. 40 km | Liikennemäärä: 50 000 ajoneuvoa/vuosi/ suunta (teollisuuden kuljetukset, joiden oletetaan siirtyvän sähköistyksen piiriin) Ajoneuvotyyppi: Kuorma-auto varsinaisella perävaunulla Vuosaaren sataman ja Järvenpään välisellä tieyhteydellä sijaitsevat kolmen suuren vähittäiskauppaketjun (Kesko, S-ryhmä, Lidl) keskusvarastot. Yhteysväliä liikennöidään ympäri vuoden 2–3 vuorossa. Kuljetusajoneuvoja arvioidaan käytettävän myös tutkitun reitin ulkopuolella. Sähköistys edellyttää logistiikan muuttamista tältä osin. |
| 3. Vt 3 Helsinki–Tampere | n. 180 km | Liikennemäärä: 3–9 milj. ajoneuvoa/vuosi/suunta, vaihtelee tieosuuden mukaan Liikennemäärästä n. 10 % on raskasta liikennettä Valtatiellä 3 Helsingin Ruskeasuolta Tampereen Viinikkaan kulkee merkittävä määrä raskasta ja kevyttä ajoneuvo-liikennettä. Yhteysvälin raskas liikenne koostuu lukuisista pienistä tavaravirroista, joista suuri osa päättyy etelässä Helsingin ja Hangon satamiin. Tampereen alueella voisi olla potentiaalia kuljetuksia yhdistelevälle sisämaan satamalle sähköistyksen seurauksena. |
| 4. Maanteiden pääväyläverkko | n. 5 500 km | Liikennemäärä: keskimäärin 1,6 milj. ajoneuvoa/vuosi/suunta, vaihtelee tieosuuden mukaan Liikennemäärästä n. 10 % on raskasta liikennettä Pääväylät yhdistävät valtakunnallisesti ja kansainvälisesti suurimmat keskuskeskukset ja solmukohtat, ja ne palvelevat erityisesti pitkien etäisyyksien työmatkaliikennettä sekä elinkeinoelämän tavarakuljetuksia. Kaikkiin maakuntakeskuksiin ulottuu maanteiden pääväylä. Arvio liikennemäärästä perustuu LVM 2018a. |

Tarkastelukohteet edustavat monipuolisesti tarkastelukohteita pienimuotoisesta, yksittäistä logistiikkayhteyttä palvelevasta sähköistyskohteesta (ks. kuva 22) maanteiden koko pääväyläverkon sähköistämiseen. Laaja skaala helpottaa arviointia siitä, millä edellytyksillä ja laajuudella tieverkon sähköistäminen voisi olla kannattava investointi.

Laajempia toteutuksia, Helsinki–Tampere-yhteysvälin ja maanteiden pääväyläverkon sähköistämistä, tutkittiin erikseen tilanteissa, joissa sähköistyksen piiriin saadaan myös osa kevyestä ajoneuvoliikenteestä. Vaihtoehtojen A-versiot on laadittu pelkän raskaan liikenteen näkökulmasta, kun taas B-versioissa on arvioitu myös kevyen ajoneuvoliikenteen siirtyminen sähköisen tieverkon piiriin.



Kuva 22. VTT:n laskelma Vuosaaren sataman ja kolmen suuren vähittäiskauppaketjun keskusvarastojen välisestä yhteydestä (VTT 2020).

2.3.2 Keskeisimmät oletukset tarkastelukohteiden laskelmissa

Tarkastelukohteiden laskelmissa on tehty sekä kohdekohtaisia että kohteille yhteisiä oletuksia laskelmien lähtöarvoista. Monen muuttujan kohdalla epävarmuus todellisesta toteutuvasta arvosta on suhteessa hyvin suuri. Tässä luvussa on esitetty keskeisimmät laskelmien tuloksiin vaikuttavat oletukset, jotta arvioita tieverkon sähköistämisen kannattavuudesta on suoraviivaista päivittää muuttujien arvojen mahdollisesti myöhemmin tarkentuessa.

Kilometrikohtainen investointikustannus

Laskelmat on laadittu seuraavilla oletuksilla investoinnin kilometrikustannuksista:

- Pelkän raskaan liikenteen käyttöön rakennettavan sähköistyksen rakentaminen maksaa **1 milj. € / kaista-km.**
- Sekä kevyen että raskaan ajoneuvoliikenteen käyttöön rakennettava sähköistys **2 milj. € / kaista-km.**

Laskelmat heijastavat kohdassa 1.2.6 laadittua arvioita noin 1–2 milj. €/kaista-km investointikustannuksesta sähköistämiseksi. Lukuja voidaan verrata Suomessa toteutuneisiin rautateiden sähköistämisen investointikustannuksiin, joiden suuruus on noin 0,3 milj. €/km.

Tieliikenteen käyttöön tien ylle rakennettava ajojohdin on monelta osin samankaltainen rautateiden sähköradan kanssa. Tien ylle rakennettava ajojohdin vaatii kuitenkin myös paluujohtimen tien ylle sekä keskimäärin tiheämmän välin kannatinpylväille kompensoimaan tielinjauksien ratayhteyksiä pienimuotoisempaa geometriaa.

Tien ylle rakennettava ajojohdin palvelee vain tietyn korkuisia ajoneuvoja: pääasiassa raskasta liikennettä. Pelkän raskaan liikenteen käyttöön rakennettavan sähköistyksen investointikustannukseksi on sähköradan toteutuneiden investointikustannusten perusteella arvioitu kirjallisuuskatsauksessa (kohta 1.2.6) tunnistetun skaalan pienin arvo.

Tieverkon sähköistäminen kevyen ajoneuvoliikenteen käytettävissä olevalla teknologialla vaikuttaakin sisältävän raskasta liikennettä suurempia epävarmuuksia, jotka on huomioitu laskelmissa suuremmalla kilometrikohtaisella investointikustannuksella.

Suuren mittakaavan toteutuksessa kilometrikohtainen investointikustannus luultavasti jossakin määrin laskee tämän laskelman arvoista kohti sähköradan investointikustannuksia.

Tarkastelukohteiden laskelmissa on oletettu, että sähköistä tietä rakennetaan yhdelle kaistalle suuntaansa koko yhteysvälille. Mahdolliset kalliimmat osuudet esimerkiksi tunneleiden, siltojen tai muiden taitorakenteiden kohdalla voidaan jättää sähköistämättä. Näillä osuuksilla liikennöidään akun tai polttomoottorin voimin.

Voimanlähteiden verotus

Laskelmissa on huomioitu voimanlähteisiin liittyvien verotulojen muutokset valtionalouden näkökulmasta. Siirtyminen pois polttoainepohjaisesta liikenteestä johtaa merkittävään vähenemiseen polttoaineverotuloissa. Laskelmissa sähköistetyn tieverkon käyttövoiman verotuksen on oletettu noudattavan rautatieliikenteen tavoin veroastetta 0 €/kWh.

Kuljetuskustannusten muodostuminen

Laskelmissa on huomioitu kuljetuskustannusten muodostuminen ajoneuvojen käyttöön, käyttövoimaan, henkilöstöön ja pääomaan liittyvien kustannusten sekä yleiskustannusten perusteella. Suuntaa antava arvio sähköistetyn tieverkon mahdollisesta enimmäiskäyttömaksusta on huomioitu case-kohtaisten laskelmien tuloksina. Sähköistettyä tieverkkoa käytävillä ajoneuvoilla energia-

kustannukset ja ajoneuvokustannukset ovat polttomoottoriajoneuvoja pienemmät, mutta pääomakustannukset hieman suuremmat. Ajoneuvojen pääomakustannusten arvioidaan muodostavan noin 10–20 % kuljetuskustannuksista tarkastelukohteen mukaan.

Hiilidioksidipäästöjen kustannus

Laskelmissa on huomioitu hiilidioksidipäästöjen kustannukset arvolla 77 €/t-CO₂. Arvo on noin kaksi kertaa vuoden 2013 mukainen hankearvioinnin yksikköarvo hiilidioksidipäästölle (40 €/t-CO₂). Siirtyminen dieselin käytöstä sähköiseen liikenteeseen näkyy laskelmien tuloksissa eriteltyinä euromääräisinä hyötyinä. Nämä euromääräiset hyödyt on diskontattu laskelmissa nykypäivään.

Vaihtoehtoisten voimanlähteiden kasvihuonekaasupäästöjen kehittyminen

Laskelmissa on oletettu uusiutuvien polttoaineiden sekoitussuhteen liikenne-polttoaineissa kasvavan sataan prosenttiin infrastruktuurin pitoajan loppuun mennessä. Kevyiden ajoneuvojen päästöjen oletetaan tämän lisäksi vähenevän akkukäyttöisten sähköajoneuvojen ja hybridiajoneuvojen yleistyessä.

Tarkasteluajanjakso

Laskelmissa on käytetty infrastruktuurin pitoaikana 30 vuotta. Pitoajan jälkeen investoinnin jäännösarvo on 0 €. Luvut heijastelevat epävarmuutta ajoneuvoteknologian kehityksestä tulevaisuudessa.

Diskonttaus korko

Diskonttauskorkona laskelmissa on käytetty 3,5 % vuosikorkoa. Luku vastaa hankearvioinneissa käytettyä arvoa.

Tarkastelukohtaisessa hyötylaskelmassa esitetyt arvot on diskontattu nykypäivään. Tarkastelukohteittain hiilidioksidipäästöille esitettyä tonnikohtaista hintaa tai tuottoastetta ei kuitenkaan ole diskontattu.

Liikennemäärien kehittyminen

Laskelmissa käytetyt liikenne-ennusteet vastaavat vuoden 2019 liikennemääriä. Perusteluna nykytilanteen lukujen käytölle on, että teknologiaa tarkastellaan lähiajan ratkaisuksi kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Samalla laskelmasta saadaan rajattua pois yksi spekuloitava asia.

Case-tarkastelukohteita on verrattu skenaarioon, jossa sähköistystä ei tehdä, eikä raskas ajoneuvoliikenne siirry dieselistä vaihtoehtoisiin käyttövoimiin.

Sähköistystä käyttävän liikenteen osuus

Sähköistystä käyttävän liikenteen osuuden on oletettu vaihtelevan tarkastelukohteittain Taulukko mukaisesti. Tarkastelukohteissa 1 ja 2 arvio on tehty olettaen, että sähköistys toteutetaan yhteistyössä kuljetusliikkeiden kanssa, jolloin voidaan varmistua kaiken liikenteen siirtymisestä käyttämään sähköistettyä tieverkkoa.

Taulukko 11. Sähköistystä käyttämään siirtyvän liikenteen osuus tarkastelu-kohteittain.

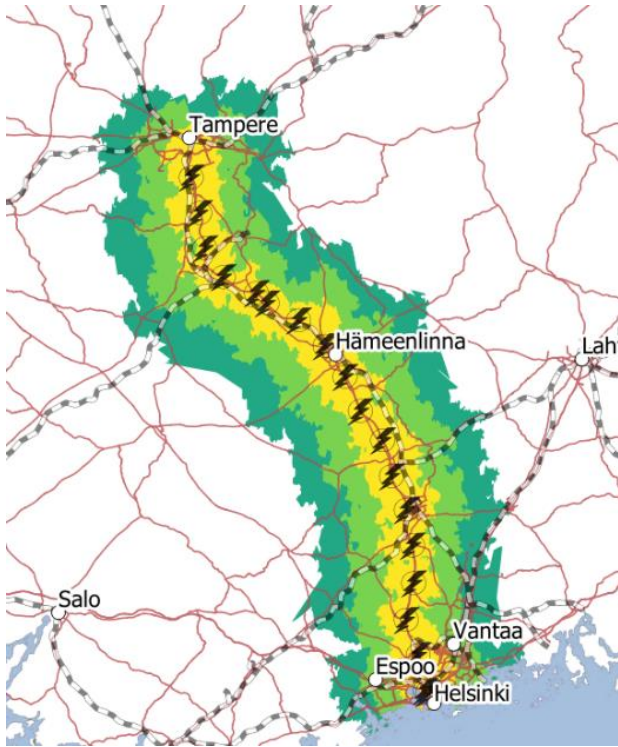
| Case | Vaihtoehto | Sähköistä tieverkkoa käyttävän raskaan liikenteen osuus tarkasteltavasta liikenteestä | Sähköistä tieverkkoa käyttävän kevyen ajoneuvoliikenteen osuus tarkasteltavasta liikenteestä |
|------|----------------------------|--|--|
| 1 | Elijärvi-Röyttä | 100 % - yhteysvälin raskaan liikenteen oletetaan koostuvan yhdistelmäajoneuvoista | 0 % |
| 2 | Vuosaaren satama-Järvenpää | 100 % - yhteysvälin raskaan liikenteen oletetaan koostuvan yhdistelmäajoneuvoista | 0 % |
| 3A | Vt 3 Helsinki-Tampere | 50 % yhdistelmäajoneuvoliikenteestä. Yhdistelmäajoneuvoihin lasketaan puoli- ja varsinaisella perävaunulla varustetut ajoneuvot. | 0 % |
| 3B | | 50 % kaikesta raskaasta liikenteestä kohteella | 10 % |
| 4A | Maanteiden pääväyläverkko | 50 % kaikesta raskaasta liikenteestä kohteella | 0 % |
| 4B | | 50 % kaikesta raskaasta liikenteestä kohteella | 10 % |

Tarkastelukohteessa 3 arviot sähköistä tieverkkoa käyttämään siirtyvästä liikenteestä ovat luonteeltaan hypoteettisia. Merkittäväällä osuudella etenkin yhteysvälin raskaasta liikenteestä matkojen lähtö- ja saapumisalueet eivät ole tarkasteltavan osuuden läheisyydessä. Tarkasteluja voidaan tarkentaa jatkotöissä, jos alustavat tarkastelut osoittavat teknologialle potentiaalia.

Lähtö- ja määränpään etäisyys sähköistetyistä verkosta määrittää vaihtoehtoisten voimanlähteiden tarpeen yksittäiselle matkalle: lähellä sijaitsevat kohteet ovat saavutettavissa sähköistetyistä kohteesta suhteessa pienellä akulla, kun taas etäisyyden kasvaessa ajoneuvo tarvitsee vastaavasti suuremman akun tai esimerkiksi polttomoottorin sähkömoottorin rinnalle – mikä kasvattaa sähköistystä hyödyntävien ajoneuvojen kustannuksia vastaavasti. Tarkasteluun 3A on sisällytty pelkät yhdistelmäajoneuvot, sillä niiden arvioidaan kulkevan keskimäärin pidempiä osuuksia yhteysvälin matkalla.

Kuvassa 23 on esitetty 10, 20 ja 30 kilometrin ajosäteellä valtatiestä 3 sijaitsevat alueet Helsinki-Tampere-yhteyksillä. Verrattuna valtatie 3 tarkasteluihin (Case 3A ja 3B) maanteiden pääväyläverkon tarkastelussa (Case 4A ja 4B) suurempi osuus matkoista kuljetaan valmiiksi sähköistettävällä verkolla. Tällöin sähköverkon käyttö on potentiaalisempi vaihtoehto suuremmalle osalle tieverkolla nykyisin tehtävistä matkoista. Mikäli sähköistykseen käyttäminen on huomattavan edullista verrattuna muihin käyttövoimiin, voi sähköistys ohjata

liikennettä siirtymään pääväylille myös muilta reiteiltä. Kohteen 3 tavoin tarkastelukohteen 4 arviot sähköistystä käyttämään siirtyvästä liikenteestä ovat luonteeltaan hypoteettisia.



Kuva 23. 10, 20 ja 30 km ajosäteellä valtatiestä 3 sijaitsevat alueet yhteysvälillä Helsinki–Tampere.

2.3.3 Tarkastelukohteiden laskelmien tulokset

Kohde 1: Elijärvi–Röyttä

Kohteen investointikustannukset ovat arviolta **83 milj. €**. Investoinnista syntyy nykypäivään diskontattuna 30 vuoden pitoajalla **7,4 milj. €** kokonaishyödyt, jotka jakautuvat seuraavasti:

| | |
|------------------------------|--------------|
| Kuljetuskustannukset | 20 milj. € |
| Polttoaineverotulot | -13 milj. € |
| Päästökustannukset | 2,9 milj. € |
| Väylien ylläpitokustannukset | -2,8 milj. € |

Kuljetusyhtiön kannattaa siirtyä käyttämään sähköistystä yhteysvälillä, mikäli sen käytöstä perittävät verot ja maksut alittavat **1,1 milj. €/a**. Ajoneuvokilometriä kohden tämä luku olisi keskimäärin **0,62 €/ajoneuvokilometri**.

Kohteen tuottoasteeksi muodostuu **0,005**. Investoinnin tuottoaste on laskettu jakamalla keskimääräisen tarkasteluvuoden hyödyt investoinnin suuruudella. Lukua ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohteen ilmastovaikutus on suuruudeltaan keskimäärin **2000 t-CO₂/vuosi** tarkasteluajanjaksolle laskettuna. Luku perustuu päästöjen vähenemiseen siirryttäessä polttoaineista sähköön liikenteen käyttövoimana, ja siinä on

huomioitu mm. biopolttoaineiden sekoitussuhteen kasvaminen ja sähkön päästökertoimien pieneneminen tarkasteluajanjaksolla. Jos Eljäjärvi–Röyttä-yhteys sähköistettäisiin ilmastotoimenpiteenä, hiilidioksiditonin hinnaksi muodostuisi noin **1300 €/t-CO₂** tarkasteluajanjaksolle laskettuna. Hinta on laskettu jakamalla investoinnin nettokustannukset ilman päästökustannuksia tarkasteluajanjakson ilmastovaikutuksella. Lukuja ei ole diskontattu nykyhetkeen.



Kuva 24. Maanteiden pääväyläverkko (Väylä 2020a).

Kohde 2: Vuosaari–Järvenpää

Kohteen investointikustannukset ovat arviolta **83 milj. €**. Investoinnista syntyy nykypäivään diskontattuna 30 vuoden pitoajalla **9,4 milj. €** hyödyt, jotka jakautuvat seuraavasti:

| | |
|------------------------------|--------------|
| Kuljetuskustannukset | 24 milj. € |
| Polttoaineverotulot | -16 milj. € |
| Päästökustannukset | 3,5 milj. € |
| Väylien ylläpitokustannukset | -2,8 milj. € |

Kuljetusyhtiöiden kannattaa siirtyä käyttämään sähköistystä yhteysväylillä, mikäli sen käytöstä perittävät verot ja maksut alittavat **1,2 milj. €/a**. Ajoneuvokilometriä kohden tämä luku olisi keskimäärin **0,50 €/ajoneuvokilometri**.

Kohteen tuottoasteeksi muodostuu **0,006**. Investoinnin tuottoaste on laskettu jakamalla keskimääräisen tarkasteluvuoden hyödyt investoinnin suuruudella. Lukua ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohteen ilmastovaikutus on suuruudeltaan **2600 t-CO₂/vuosi**. Luku perustuu päästöjen vähenemiseen siirryttäessä polttoaineista sähköön liikenteen käyttövoimana, ja siinä on huomioitu mm. biopolttoaineiden sekoitussuhteen kasvaminen ja sähkön päästökertoimien pieneneminen tarkasteluajanjaksolla. Jos Vuosaari–Järvenpää-yhteys sähköistettäisiin ilmastotoimenpiteenä, hiilidioksiditonin hinnaksi muodostuisi noin **940 €/t-CO₂** tarkasteluajanjaksolle laskettuna. Hinta on laskettu jakamalla investoinnin nettokustannukset ilman päästökustannuksia tarkasteluajanjakson ilmastovaikutuksella. Lukuja ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohde 3A: Vt3 Helsinki–Tampere

Kohteen investointikustannukset ovat arviolta **360 milj. €**. Investoinnista syntyy nykypäivään diskontattuna 30 vuoden pitoajalla **230 milj. €** hyödyt, jotka jakautuvat seuraavasti:

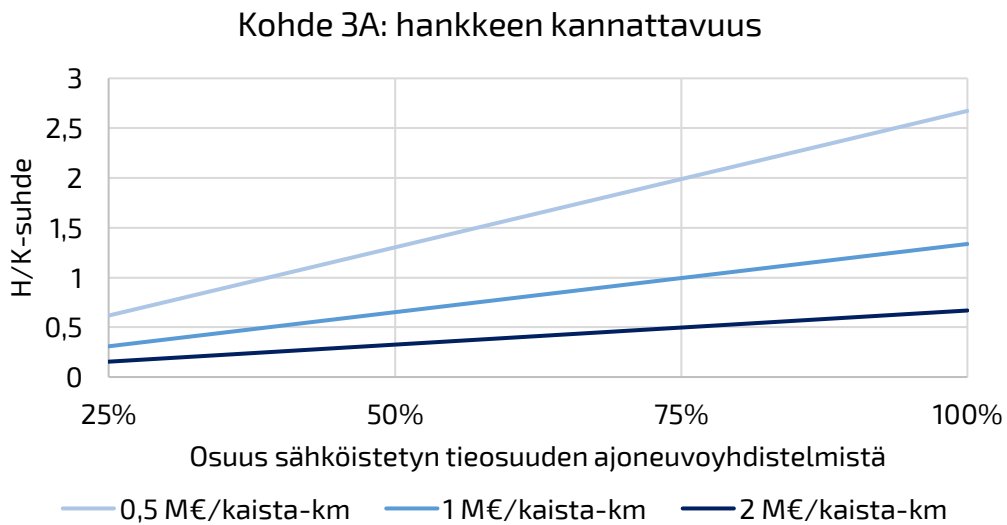
| | |
|------------------------------|--------------|
| Kuljetuskustannukset | 480 milj. € |
| Polttoaineverotulot | -320 milj. € |
| Päästökustannukset | 67 milj. € |
| Väylien ylläpitokustannukset | -2,8 milj. € |

Kuljetusyhtiöiden kannattaa siirtyä käyttämään sähköistystä yhteysvälillä, mikäli sen käytöstä perittävät verot ja maksut alittavat **13 milj. €/a**. Ajoneuvokilometriä kohden tämä luku olisi keskimäärin **0,62 €/ajoneuvokilometri**.

Kohteen tuottoasteeksi muodostuu **0,035**. Investoinnin tuottoaste on laskettu jakamalla keskimääräisen tarkasteluvuoden hyödyt investoinnin suuruudella. Lukua ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Tarkastelukohdetta on arvioitu myös suhteessa kannattavuuden herkkyyteen keskeisille epävarmuuksille (kuva 25). Sähköistämishankkeen kannattavuus riippuu merkittävästi sähköistystä käyttävän liikenteen osuudesta sekä investointikustannusten suuruudesta.

Jotta yhdistelmäajoneuvoja palveleva sähköistysjärjestelmä olisi yhteiskuntataloudellisesti kannattava VT3:lla Helsinki–Tampere-välillä, tulisi merkittävän osan yhteysväliä käyttävistä yhdistelmäajoneuvoista siirtyä sähköistetyn tieosuuden käyttäjiksi.



Kuva 25. Tarkastelukohde 3A:n hyöty-/kustannussuhteen herkkyys sähköistystä käyttämään siirtyvän ajoneuvoyhdistelmäliikenteen osuudesta sekä investoinnin kilometrikohtaisesta kustannuksesta.

Kohteen ilmastovaikutus on suuruudeltaan **46 000 t-CO₂/vuosi**. Luku perustuu päästöjen vähenemiseen siirryttäessä polttoaineista sähköön liikenteen käyttövoimana, ja siinä on huomioitu mm. biopolttoaineiden sekoitussuhteen kasvaminen ja sähkön päästökertoimien pieneneminen tarkasteluajanjaksolla. Jos Helsinki–Tampere-yhteys sähköistettäisiin ilmastotoimenpiteenä, hiilidioksiditonin hinnaksi muodostuisi noin **140 €/t-CO₂** tarkasteluajanjaksolle laskettuna. Hinta on laskettu jakamalla investoinnin nettokustannukset ilman päästökustannuksia tarkasteluajanjakson ilmastovaikutuksella. Lukuja ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohde 3B: Vt3 Helsinki–Tampere

Kohteen investointikustannukset ovat arviolta **710 milj. €**. Investoinnista syntyy nykypäivään diskontattuna 30 vuoden pitoajalla **630 milj. €** hyödyt, jotka jakautuvat seuraavasti:

| | |
|------------------------------|---------------|
| Kuljetuskustannukset | 1 200 milj. € |
| Polttoaineverotulot | -760 milj. € |
| Päästökustannukset | 163 milj. € |
| Väylien ylläpitokustannukset | -12 milj. € |

Tien käyttäjien kannattaa siirtyä käyttämään sähköistystä yhteysvälillä, mikäli sen käytöstä perittävät verot ja maksut alittavat **66 milj. €/a**. Ajoneuvokilometriä kohden tämä luku olisi raskaille ajoneuvoille keskimäärin **0,62 €/ajoneuvokilometri** ja kevyille ajoneuvoilla noin **0,08 €/ajoneuvokilometri**.

Kohteen tuottoasteeksi muodostuu **0,047**. Investoinnin tuottoaste on laskettu jakamalla keskimääräisen tarkasteluvuoden hyödyt investoinnin suuruudella. Lukua ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohteen ilmastovaikutus on suuruudeltaan **110 000 t-CO₂/vuosi**. Luku perustuu päästöjen vähenemiseen siirryttäessä polttoaineista sähköön liikenteen käyttövoimana, ja siinä on huomioitu mm. biopolttoaineiden sekoitussuhteen kasvaminen ja sähkön päästökertoimien pieneneminen tarkasteluajanjaksolla. Jos Helsinki–Tampere-yhteys sähköistettäisiin ilmastotoimenpiteenä, hiilidioksiditonin hinnaksi muodostuisi noin **75 €/t-CO₂** tarkasteluajanjaksolle laskettuna. Hinta on laskettu jakamalla investoinnin nettokustannukset ilman päästökustannuksia tarkasteluajanjakson ilmastovaikutuksella. Lukuja ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohde 4A: Maanteiden pääväylät

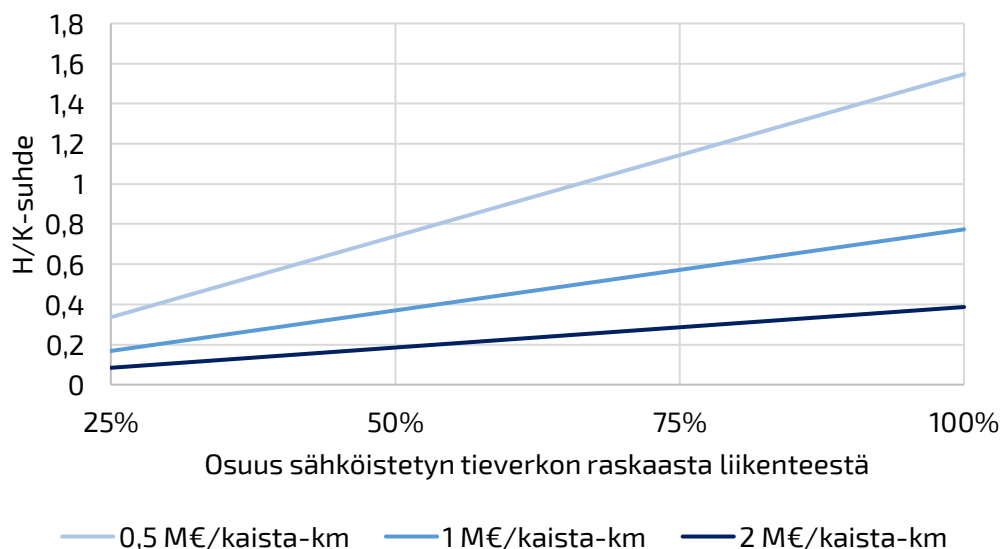
Kohteen investointikustannukset ovat arviolta **11 mrd. €**. Investoinnista syntyy nykypäivään diskontattuna 30 vuoden pitoajalla **4,2 mrd. €** hyödyt, jotka jakautuvat seuraavasti:

| | |
|------------------------------|----------------|
| Kuljetuskustannukset | 9 000 milj. € |
| Polttoaineverotulot | -5 700 milj. € |
| Päästökustannukset | 1 300 milj. € |
| Väylien ylläpitokustannukset | -390 milj. € |

Kuljetusyhtiöiden kannattaa siirtyä käyttämään sähköistystä yhteysvälillä, mikäli sen käytöstä perittävät verot ja maksut alittavat **480 milj. €/a**. Ajoneuvokilometriä kohden tämä luku olisi keskimäärin **0,57 €/ajoneuvokilometri**.

Kohteen tuottoasteeksi muodostuu **0,020**. Investoinnin tuottoaste on laskettu jakamalla keskimääräisen tarkasteluvuoden hyödyt investoinnin suuruudella. Lukua ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohde 4A: hankkeen kannattavuus



Kuva 26. Tarkastelukohde 4A:n hyöty-/kustannussuhteen herkkyyss sähköistystä käyttämään siirtyvän raskaan liikenteen osuudesta sekä investoinnin kilometrikohtaisesta kustannuksesta.

Tarkastelukohdetta on arvioitu myös suhteessa kannattavuuden herkkyyteen keskeisille epävarmuuksille (kuva 26). Siirryttäessä kaikkein vilkkaimmin liikennöityjen teiden ulkopuolelle, on hankkeen kilometrikohtaiset rakennuskustannukset oltava hyvin alhaiset, jotta hanke olisi yhteiskuntataloudellisesti kannattava.

Kohteen ilmastovaikutus on suuruudeltaan **860 000 t-CO₂/vuosi**. Luku perustuu päästöjen vähenemiseen siirryttäessä polttoaineista sähköön liikenteen käyttövoimana, ja siinä on huomioitu mm. biopolttoaineiden sekoitussuhteen kasvaminen ja sähkön päästökertoimien pieneneminen tarkasteluajanjaksolla. Jos maanteiden pääväylät sähköistettäisiin ilmastotoimenpiteenä, hiilidioksiditonin hinnaksi muodostuisi noin **370 €/t-CO₂** tarkasteluajanjaksolle laskettuna. Hinta on laskettu jakamalla investoinnin nettokustannukset ilman päästökustannuksia tarkasteluajanjakson ilmastovaikutuksella. Lukuja ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohde 4B: Maanteiden pääväylät

Kohteen investointikustannukset ovat arviolta **23 mrd. €**. Investoinnista syntyy nykypäivään diskontattuna 30 vuoden pitoajalla **5,3 mrd. €** hyödyt, jotka jakautuvat seuraavasti:

| | |
|------------------------------|----------------|
| Kuljetuskustannukset | 11 000 milj. € |
| Polttoaineverotulot | -7 000 milj. € |
| Päästökustannukset | 1 500 milj. € |
| Väylien ylläpitokustannukset | -390 milj. € |

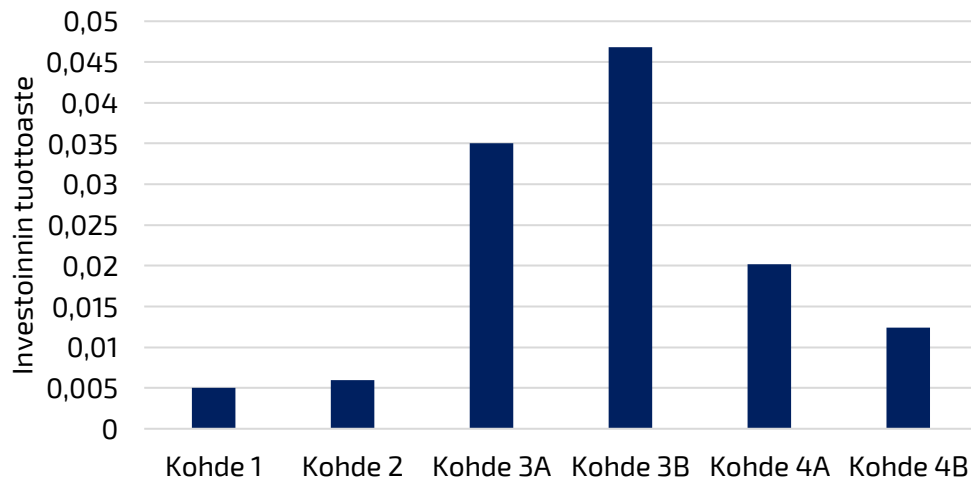
Tien käyttäjien kannattaa siirtyä käyttämään sähköistystä, mikäli sen käytöstä perittävät verot ja maksut alittavat **600 milj. €/a**. Ajoneuvokilometriä kohden tämä luku olisi raskaille ajoneuvoille keskimäärin **0,57 €/ajoneuvokilometri** ja kevyille ajoneuvoilla noin **0,08 €/ajoneuvokilometri**.

Kohteen tuottoasteeksi muodostuu **0,012**. Investoinnin tuottoaste on laskettu jakamalla keskimääräisen tarkasteluvuoden hyödyt investoinnin suuruudella. Lukua ei ole diskontattu nykyhetkeen.

Kohteen ilmastovaikutus on suuruudeltaan **1 000 000 t-CO₂/vuosi**. Luku perustuu päästöjen vähenemiseen siirryttäessä polttoaineista sähköön liikenteen käyttövoimana, ja siinä on huomioitu mm. biopolttoaineiden sekoitussuhteen kasvaminen ja sähkön päästökertoimien pieneneminen tarkasteluajanjaksolla. Jos maanteiden pääväylät sähköistettäisiin ilmastotoimenpiteenä, hiilidioksiditonin hinnaksi muodostuisi noin **630 €/t-CO₂** tarkasteluajanjaksolle laskettuna. Hinta on laskettu jakamalla investoinnin nettokustannukset ilman päästökustannuksia tarkasteluajanjakson ilmastovaikutuksella. Lukuja ei ole diskontattu nykyhetkeen.

2.3.4 Yhteenveto tarkastelukohteiden potentiaalista

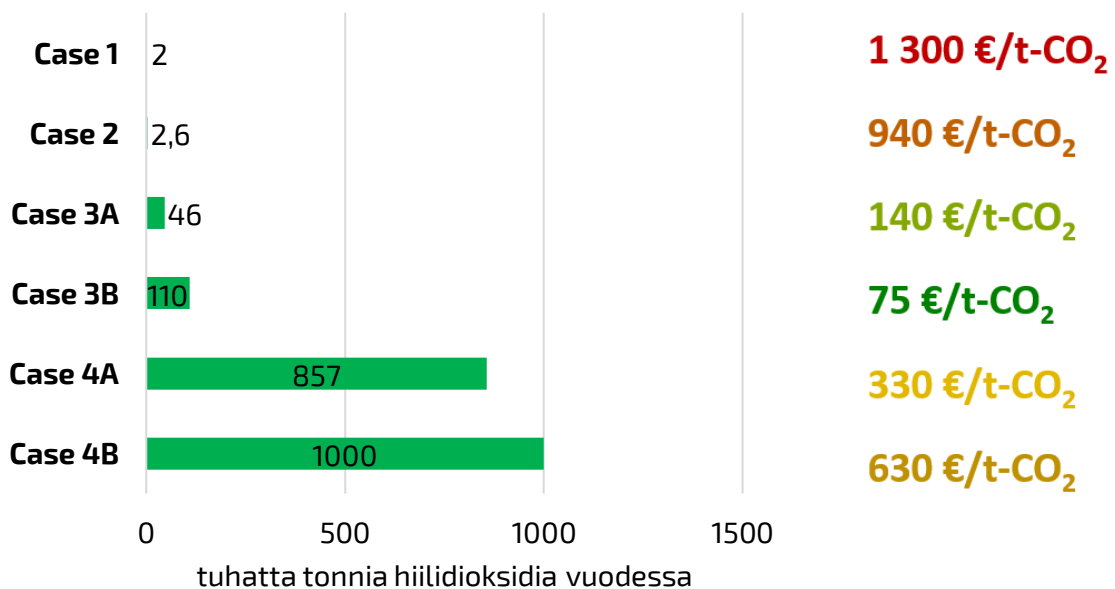
Yksikään tarkastelukohteista ei osoittautunut yhteiskuntataloudellisesti kannattavaksi laskelmissa käytetyillä arvoilla ja oletuksilla. Lähimpänä yhteiskuntataloudellista kannattavuutta oli tarkastelukohde 3B, jossa osa sekä tavara- että henkilöliikenteestä siirtyi käyttämään sähköistystä. Kohteen 3B investoinnin tuottoasteeksi arvioitiin 0,047, kun taloudellinen kannattavuus 30 vuoden pitoajalla edellyttäisi tuottoasteeksi yli 0,055.



Kuva 27. Investoinnin tuottoaste tarkastelukohteittain. Vuosituottoja ei ole diskontattu.

Laskelmien perusteella kannattavimman kohteen 3B lähtöarvoihin liittyy tarkastelukohteista merkittävin määrä epävarmuutta, ja todellinen arvo voi joustaa lopulta molempiin suuntiin tarkempien selvitysten perusteella. Kohteiden laskelmista epävarmuus on suhteessa pienintä kohteissa 1 ja 2. Nämä kohteet ovat kuitenkin käsitellyistä yhteyksistä yhteiskuntataloudellisesti vähiten kannattavia.

Tarkastelukohteet asettuvat samaan järjestykseen kuin tuottoasteen perusteella, mikäli kriteerinä käytetään hiilidioksidipäästöjen yksikkökustannusta, jos tieverkon sähköistämistä käsittelee puhtaasti ilmastotoimenpiteenä (kuva 28).



Kuva 28. Tarkastelukohteiden sähköistämisen kasvihuonekaasupäästöjä pienentävä vaikutus (vasemmalla) sekä yksikkökustannukset ilmastopäästöille tarkasteluajanjaksolle laskettuna (oikealla). Lukuja ei ole diskontattu nykypäivään.

Tarkastelukohteet 4A ja 4B vähentävät merkittävästi muita kohteita enemmän kasvihuonekaasupäästöjä. Laajan sähköisen tieverkon rakentaminen mahdollistaa muita tarkastelukohteita suuremman liikennemäärän siirtymisen sähköisen tieverkon käyttäjiksi, mikä vastaavasti aiheuttaa muita kohteita merkittävästi suuremmat päästövähennykset.

On huomionarvoista, ettei tarkastelukohteiden 3A ja 4A kasvihuonekaasupäästöt eroa samassa suhteessa B-vaihtoehtojen kasvihuonekaasupäästöistä. Eroavaisuus on seurausta siitä, ettei tarkastelukohteeseen 3A ole sisällytetty muita raskaita ajoneuvoja kuin yhdistelmäajoneuvot (ks. taulukko 11).

Tarkasteluissa ilmastopäästöjen vähenemisestä syntyvät euromääräiset hyödyt ovat suuruudeltaan noin kahdeksasosa liikenteelle kuljetus- ja ajoneuvokustannusten pienenemisestä syntyvistä hyödyistä. Suurimmassa osassa tarkastelukohteista hiilidioksiditonin yksikkökustannuksen valinnalla ei ole merkittävää vaikutusta kohteiden kannattavuuteen. Lähimpänä yhteiskuntataloudellista kannattavuutta olevassa kohteessa 3B hiilidioksiditonin yksikkökustannuksen puolitoistakertaistaminen arvoon 115 €/t-CO₂ riittäisi kuitenkin siihen, että kohde vaikuttaisi kannattavalta.

Polttoaineverojen osuus arvioitujen tarkastelukohteiden raskaassa liikenteessä vaihtelee noin kahdeksasosasta viidesosaan liikennöntikustannuksista. Verojen osuuteen vaikuttavat mm. kaluston käytön tehokkuus ja ajoneuvoikohtaisen kuorman suuruus. Mikäli polttoainevoja ei olisi huomioitu laskelmissa, tarkastelukohteittain arvioitujen hyötyjen suuruus olisi noin kolmasosan pienempi.

Kilometrikohtaisen investointikustannuksen suuruus vaikuttaa merkittävästi investointien kannattavuuteen. Mikäli pelkälle raskaalle liikenteelle soveltuvan sähköistysteknologian investointikustannus jäisi alle 0,5 milj. €/kaista-km, voisi myös koko maanteiden pääväyläverkon sähköistäminen olla teoriassa yhteiskuntataloudellisesti kannattavaa, jos kaikki osuuksilla kulkeva raskas liikenne siirtyisi käyttämään sähköistystä. Vastaavasti kevyelle ajoneuvoliikenteelle soveltuvan teknologian investointikustannuksen asettuminen tasolle 1 milj. €/kaista-km tarkoittaisi tarkastelukohteen 3B (Vt 3 Helsinki–Tampere, kevyt ajoneuvoliikenne huomioituna) olevan selvästi kannattava laskelmissa tehdyillä oletuksilla.

3 Tarvittava sähköverkkokapasiteetti ja sen regulaatio

Tiivistelmä luvusta 3

Tieverkon laajamittainen sähköistämisen vaatii merkittäviä panostuksia sähköverkkokapasiteetin kasvattamiseen jakeluverkoissa. Tehontarpeet voivat paikallisesti nousta melko suuriksi lyhytaikaisissa kysyntäpiikeissä esim. letka-ajon seurauksena. Eri selvityksissä sähköverkkokustannusten osuudeksi koko sähköisen tieverkon investointikustannuksista on arvioitu olevan 20–40 %.

Sähköverkkoregulaation näkökulmasta sähköisen tieverkon vaatimalle sähköverkolle on kaksi vaihtoehtoa: sähköverkko voidaan nähdä ei-reguloituna kiinteistön sisäisenä verkkona tai osana nykyisiä reguloituja sähkön jakeluverkkoja. Keskeisimpänä erona kyseisissä vaihtoehdoissa on, että kiinteistön sisäisellä verkolla voi olla vain yksi sähkönkäyttäjä (tieverkko-operaattori), kun reguloitu jakeluverkko puolestaan mahdollistaa useat sähkönkäyttäjät.

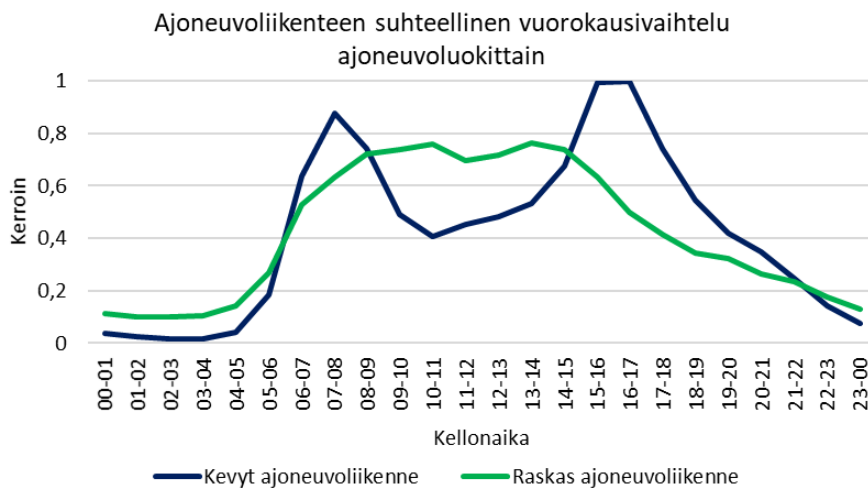
3.1 Sähköverkkokapasiteetti

3.1.1 Case-esimerkkien sähkötehontarve

Luvuissa 4.1 ja 4.2 on arvioitu edellä luvussa 2 esitettyjen case-esimerkkien vaatimaa sähköverkkokapasiteettia ja sen toteutustapoja sekä yleisesti sähköverkkoregulaatioon liittyviä kysymyksiä. Tarvittavaa sähköverkkokapasiteettia on arvioitu eri case-esimerkkien huipputehontarpeen perusteella. Tehontarpeen vaihtelua on puolestaan analysoitu alla sekä vuorokauden sisällä että kausittain.

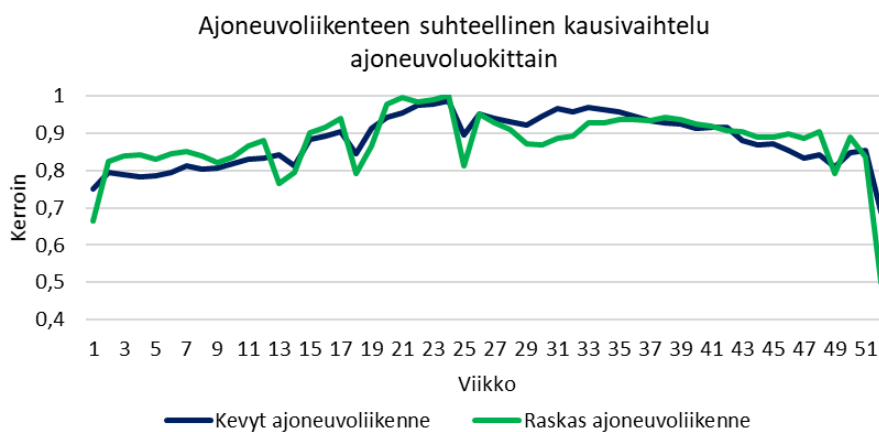
Kuvassa 29 esitetty kevyen ja raskaan ajoneuvoliikenteen vuorokausivaihtelu on laskettu keskiarvona viiden eri puolilla Suomea sijaitsevan suuren liikennemäärän LAM-pisteen mittaustiedoista. Tiedot ovat kolmen eri arkipäivän liikenteestä viikoilta 3, 4 ja 43. Kuvasta nähdään, että kevyen ajoneuvoliikenteen huiput ajoittuvat arkipäivinä työmatkaliikenteestä johtuen aamuun noin klo 8:00 tienoille sekä iltapäivään noin klo 16:00–17:00 tienoille. Liikennemäärät ovat alle 40 % huipusta aikavälillä 19:00–06:00.

Raskaassa ajoneuvoliikenteessä vuorokausivaihtelu noudattaa kevyestä ajoneuvoliikenteestä poikkeavaa jakaumaa. Raskaan liikenteen jakauma mukaillee niin ikään 8 tunnin standardityöpäivää liikennemäärien ollessa melko tasaisia klo 8:00–15:00 eikä kevyen ajoneuvoliikenteen mukaisia aamu- ja iltapäivähuippuja esiinny.



Kuva 29. Ajoneuvoliikenteen suhteellinen vuorokausivaihtelu ajoneuvoluokittain

Kuvassa 30 esitetty kausivaihtelukäyrä on tuotettu Väyläviraston julkaisun: *Tieliikenteen kausivaihtelu (2020b)* pohjalta. Raskaan ajoneuvoliikenteen kertoimet on poimittu julkaisusta sellaisenaan, ja kevyt ajoneuvoliikenne on laskettu keskiarvona KVL yli 8000 ajon/vrk tieosuuksille tarkoitettujen kausivaihteluluokkien viikkokohtaisista kertoimista. Kertoimet perustuvat LAM-mittaustietoihin. Kuvasta nähdään, että sekä kevyessä että raskaassa ajoneuvoliikenteessä liikennemäärät kasvavat kesäkuukausina. Raskaassa ajoneuvoliikenteessä talvikuukausien liikennemäärät ovat noin 10–15 % pienemmät kuin viikoilla 19–23 touko-kesäkuussa nähtävä huippu. Kevyessä ajoneuvoliikenteessä ero talvi- ja kesäkuukausien välillä on hieman suurempi talvikuukausien liikennemäärien ollessa noin 15–20 % kesäkuukausia pienempi. Myös kevyessä ajoneuvoliikenteessä huippu ajoittuu touko-kesäkuun vaihteeseen ennen juhannusta. Raskaasta ajoneuvoliikenteestä poiketen kevyen ajoneuvoliikenteen määrät pysyvät suhteellisen korkeina myös kesälomakaudella viikoilla 26–35. Sekä raskaassa että kevyessä ajoneuvoliikenteessä liikennemäärissä on nähtävissä selvät kuopat pyhinä kuten pääsiäisenä, vappuna, juhannuksena ja jouluna.

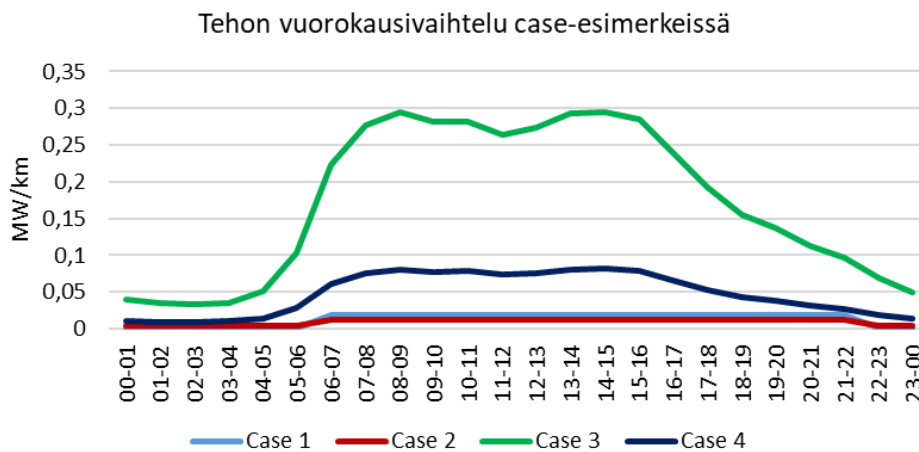


Kuva 30. Ajoneuvoliikenteen suhteellinen kausivaihtelu ajoneuvoluokittain.

Kuvassa 31 on case-kohtaisesti arvioitu sähkötehon kausi- ja vuorokausivaihtelua sekä vuoden huipputehoa. Mahdollisten lyhytaikaisten kysyntäpiikkien kuten letka-ajon vaikutusta ei laskelmissa ole huomioitu. Huipputehot on arvioitu seuraavilla oletuksilla.

- Casessa 1 (Elijärvi–Röyttä) on arvioitu vain raskaan liikenteen siirtymistä sähköistyksen käyttöön. Liikennemäärä n. 22 000 ajoneuvoa/vuosi/suunta. Yhteysvälin pituus: 40 km
- Casessa 2 (Vuosaari–Järvenpää) on niin ikään arvioitu vain raskaan liikenteen siirtymistä sähköistyksen käyttöön. Liikennemäärä n. 50 000 ajoneuvoa/vuosi/suunta. Yhteysvälin pituus: 40 km
- Casessa 3 (VT3 Helsinki–Tampere) 50 % raskaasta ajoneuvoliikenteestä ja 10 % kevyestä ajoneuvoliikenteestä osuudella siirtyy käyttämään sähköistystä. Yhteysvälin pituus: 180 km
- Casessa 4 (maanteiden pääväylät) 50 % raskaasta ajoneuvoliikenteestä ja 10 % kevyestä ajoneuvoliikenteestä osuuksilla siirtyy käyttämään sähköistystä. Yhteysvälin pituus: 5 500 km

Laskelmissa viikonloppujen vaikutusta ei ole huomioitu, vaan viikkoihin on oletettu 7 arkipäivää, mikä ei aivan täsmää ajoneuvoliikenteen rytmiin. Lisäksi erityisesti casessa 4 tieosuuksien välisissä tehontarpeissa voi esiintyä suuria eroja ja vuorokauden sisäisen vaihtelun jakaumat eroavat toisistaan, mikä on syytä huomioida.



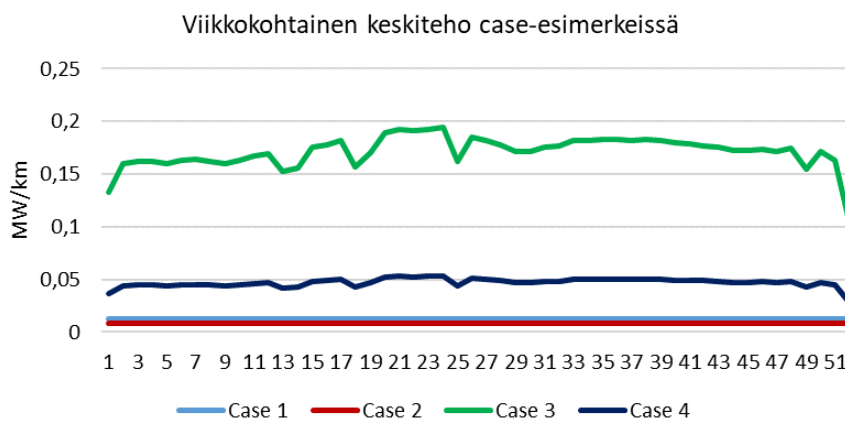
Kuva 31. Tehon vuorokausivaihtelu case-esimerkeissä.

Kuvasta 31 nähdään, että suurin tehontarve tie-km kohden on casessa 3, jossa raskaan ajoneuvoliikenteen määrä on suuri kohtuullisen lyhyellä tieosuudella. Kyseisessä arvioissa oletettiin lisäksi myös kevyen ajoneuvoliikenteen siirtyvän osittain käyttämään sähköistä tieverkkoa. Casessa 3 tehontarve on suurimmillaan noin 0,3 MW/km, kun se casessa 4 jää noin 0,08 MW/km tasolle. Casessa 4 100 % raskaasta ajoneuvoliikenteestä oletettiin hyödyntävän sähköistä tieverkkoa, mutta kyseisessä esimerkissä tieverkon pituus on huomattavasti suurempi kuin casessa 3, minkä johdosta keskimääräinen km-kohtainen tehon-

tarve jää pienemmäksi. Caseissa 1 ja 2 puolestaan sähköistä tieverkkoa hyödyntävät ajoneuvomäärät ovat huomattavasti pienemmät, minkä johdosta tehontarve jää myös pienemmäksi noin 0,01–0,02 MW/km tasolle.

Kuvassa 31 esitettyjen tehontarpeiden lisäksi työssä arvioitiin tehontarve myös kehä III:n Helsinki-Vantaan lentokentän liittymän ja Tuusulanväylän välillä, jossa raskaan ja kevyen ajoneuvoliikenteen määrät ovat keskimääräistä selvästi suuremmat. Tehontarpeeksi kyseisessä pisteessä saatiin 1,0 MW/km sisältäen liikenteen molempiin suuntiin. Kyseisen sijainnin LAM-datan perusteella laskettu vuoden huipputeho on noin 1,2 MW/km.

Kuvassa 32 on arvioitu eri case-esimerkkien keskimääräisen tehontarpeen kausivaihtelua. Casessa 3 keskimääräinen tehontarve vaihtelee läpi vuoden noin 0,15–0,20 MW/km välillä keskiarvon ollessa 0,17 MW/km, joka on 51 % kyseisen casen huipputehosta. Casen 4 keskiteho on 0,05 MW/km, joka on 50 % huipputehosta. Caseissa 1 ja 2 keskimääräiset tehontarpeet ovat pienemmät (0,009–0,01 MW/km), mutta niissä tehonkäyttö on tasaisempaa keskiarvon ollessa 67 ja 77 % kyseisten casien huipputehoista.



Kuva 32. Viikkokohtainen keskiteho case-esimerkeissä.

Taulukossa 12 on esitetty kirjallisuudesta poimittu arvio sähköisen tieverkon tehontarpeesta (Öko-Institut, 2018). Kyseisessä arvioissa sähköisen tieverkon jatkuvaksi tehonsyötöksi arvioitiin 1–4 MW/km ja ajoneuvojen lataustehoksi 120–240 kW. 180 kW latausteholla ja 1 MW/km jatkuvalla tehonsyötöllä koko järjestelmä kykenisi palvelemaan kerralla 2 778 ajoneuvoa ja ajoneuvosykliksi eli ajoneuvojen väliseksi ajassa mitattavaksi etäisyydeksi muodostuisi 16 sekuntia. Kyseisessä raportissa todetaan, että myös lyhyet ylikuormitustilanteet, jolloin ajoneuvojen lukumäärät ja tehonkulutukset ylittävät taulukossa xx mainitut raja-arvot, ovat mahdollisia (Öko-Institut, 2018).

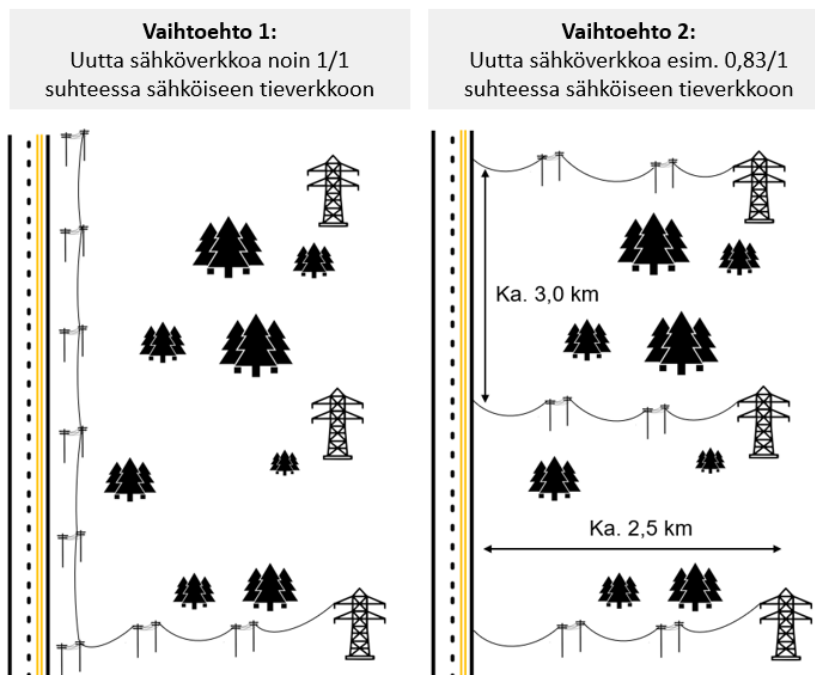
Taulukko 12. Öko-Insitutin näkemyksiä sähköisen tieverkon tehontarpeeseen (2018).

| | | | |
|---|----------|----------|----------------|
| Tieverkon laajuus (kaistat molempiin suuntiin) | 1 000 km | 4 000 km | 8 000 km |
| Jatkuva tehonsyöttö per km | 1 MW/km | 2 MW/km | 2–4 MW/km |
| Jatkuva tehonsyöttö yhteensä | 0,5 GW | 4 GW | 8–16 GW |
| Ajoneuvojen lukumäärä koko tieosuudella | | | |
| • 120 kW latausteholla | 4 167 | 33 333 | 66 667–133 333 |
| • 180 kW latausteholla | 2 778 | 22 222 | 44 444–88 889 |
| • 240 kW latausteholla | 2 083 | 16 667 | 33 333–66 667 |
| Ajoneuvosykli per suunta (180 kW latausteholla) | 16 s | 8 s | 8–4 s |

3.1.2 Sähköverkkokapasiteetin toteutusvaihtoehdot

Sähköisen tieverkon tarvitseman sähköverkkoliittynän rakentamiseen on karkeasti kaksi vaihtoehtoa: 1) uusi tienvarsijohto koko sähköistettävän tieosuuden pituudelle; tai 2) liityntäjohtot sähköistettävälle tieosuudelle tasaisin välimatkoin olemassa olevasta sähköverkosta. Kyseiset vaihtoehdot on kuvattu seuraavalla sivulla kuvassa 33.

Toteutusvaihtoehdon valintaan vaikuttaa etäisyys olemassa olevasta sähköverkosta sekä tehontarve. Edellisissä luvuissa esitetyillä tehontarpeilla liityntä sähköiselle tieverkolle tehtäisiin todennäköisesti keskijänniteliittymänä jakeluverkosta. Kirjallisuudessa esitetyissä sähköisen tieverkon piloteissa liittymänä on tyypillisesti ollut 20 kV (10–30 kV) keskijänniteliittymä, josta virta muunnetaan tieverkolle soveltuvaksi matalajännitteiseksi (< 1 kV). Vertailuna rautateilla on käytössä kaksi sähköistysjärjestelmää: 25 kV ja 2x25 kV. Rautateiden tehontarve on keskimäärin 5 MW/km.

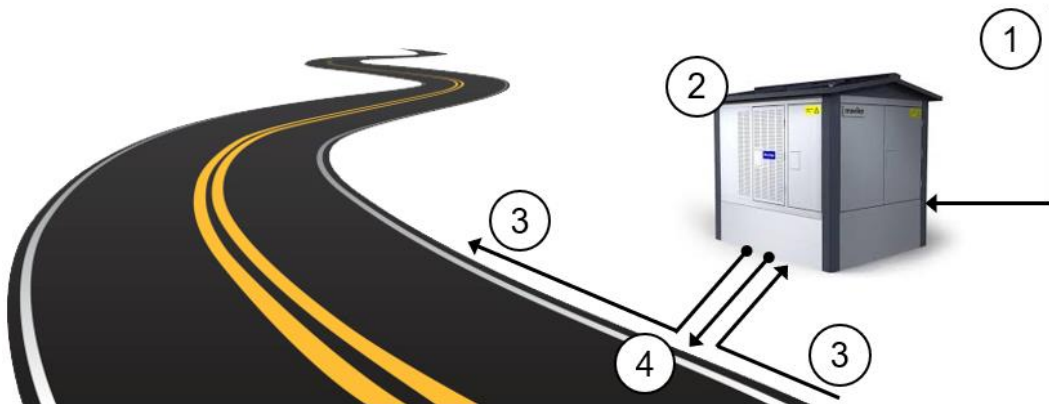


Kuva 33. Vaihtoehtoiset toteutustavat sähköverkolle.

Erityisesti ajolankateknologiaa hyödynnettäessä on mahdollista tuoda sähkö tien varteen melko harvakseltaan. Siemens on omissa laskelmissaan esittänyt, että sähköä voisi tuoda tieosuudelle 3 km välein ja heidän oletuksen mukaan olemassa oleva sähköverkko on keskimäärin 2,5 km päässä tieverkosta (vaihtoehto 2 kuvassa 33). Tällöin uutta sähköverkkoa tarvittaisiin 0,83 km jokaista sähköistä tieverkko-km kohden. Muita kuin ajolankateknologiaa hyödynnettäessä sähköä tieverkolle tarvitaan huomattavasti pienemmin välimatkoin, joten realistisin vaihtoehto useimmiten on vaihtoehto 1 eli sähköjohto tien varressa. Tällöin uutta sähköverkkoa tarvitaan 1 km jokaista sähköistä tieverkko-km kohden.

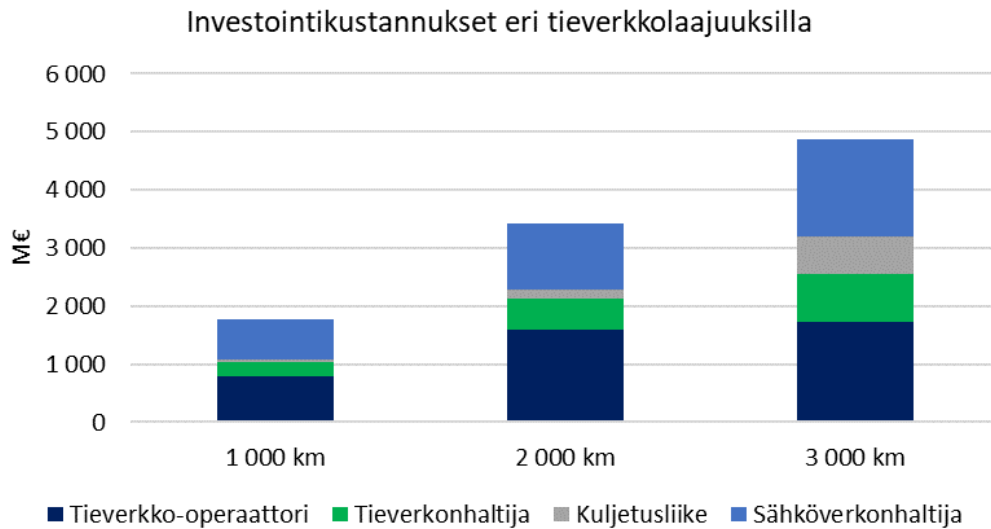
Kuvassa 34 on esitetty tarkempi kuva sähköisen tieverkon sähköverkkoliittymän toteutuksesta ja siihen liittyvästä vastuunjaosta. Sähköverkkoregulaatiota ja sähköverkkoon liittyviä vastuita on pohdittu yksityiskohtaisemmin luvussa 3.2, mutta alla on karkealla tasolla esitetty sähköverkkoliittymän osakokonaisuudet.

1. sähkönsyöttö olemassa olevasta jakeluverkosta tyypillisesti 10–30 kV keskijänniteliittymänä (jakeluverkkoyhtiön vastuulla)
2. jännitteen muuntaminen keskijännitteestä pienjännitteeseen (voi olla joko jakeluverkkoyhtiön tai tieverkko-operaattorin vastuulla)
3. tieverkon suuntaisesti tarvittaessa rakennettava sähköverkko (voi olla joko jakeluverkkoyhtiön tai tieverkko-operaattorin vastuulla)
4. liityntä sähköverkosta ajoneuvoon latauksen välittävään tieverkkoon (tieverkko-operaattorin vastuulla)



Kuva 34. Sähkönsyöttö sähköiselle tieverkolle (Trafikverket 2017).

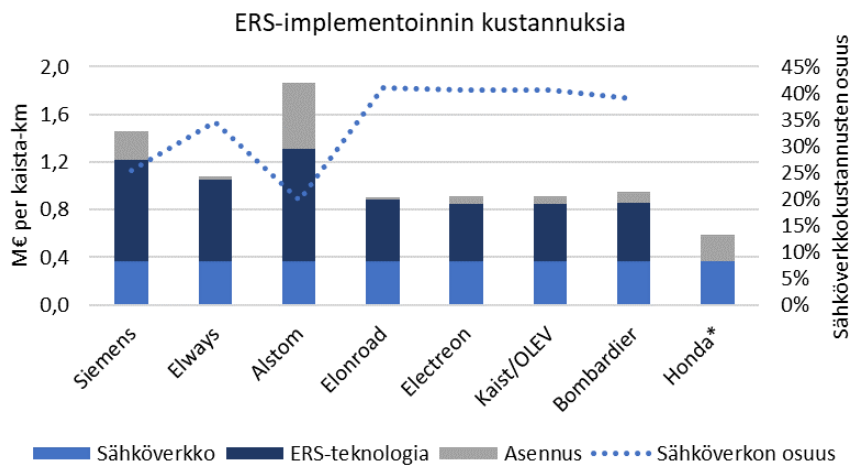
Ruotsissa toteutetuissa piloteissa ajoneuvojen lataus sähköisellä tieverkolla tapahtuu 600–800 V jännitteellä joko tasa- tai vaihtovirralla. Matala jännite mahdollistaa esitetyn arvion mukaan jo markkinoilla olevien komponenttien hyödyntämisen ajoneuvoissa, mikä pienentää ajoneuvoihin kohdistuvia kustannuspaineita. Sähköisen tieinfran näkökulmasta matala jännite puolestaan heikentää energiatehokkuutta ja lisää siten kustannuksia, sillä sähkönsyöttö jakeluverkosta tulee toteuttaa tiheimmin siirtohäviöistä johtuen. Suurempaa jännitettä hyödyntämällä sähkönsiirron häviöt muodostuisivat pienemmiksi ja sähkönsyöttö voitaisiin suunnitella tehokkaammaksi. Optimaalista jännitetasoa tutkitaan mm. CENELECin työryhmissä (Trafikverket 2017). Myös tehonhallinta latauksen yhteydessä voi vaatia jännitteiden nostoa ja tulevaa kehitystä varten jännitetaso tulisi lukita yhteisesti sovitulle tasolle.



Kuva 35. *Investointikustannukset eri tieverkkolaajuuksilla (Trafikverket 2019).*

Tieverkkoa varten rakennettavan sähköverkon kustannusten suuruudesta on vaikea saada tarkkaa arviota ilman yksityiskohtaista verkon suunnittelua, jossa arvioidaan kaikki tarvittavat komponentit verkon laajuuden ja tehontarpeen mukaan. Sähköverkkokustannukset vaihtelevat suuresti sijainnin ja tieosuuden mukaan ja riippuu mm. tehontarpeesta ja etäisyydestä olemassa olevaan sähköverkkoon (Taljegard et al. 2019). Suuntaa-antavia arvioita sähköverkkokustannusten osuudesta voidaan kuitenkin tehdä kirjallisuudessa esitettyjen arvioiden perusteella. Kuvassa 35 on esimerkiksi esitetty Trafikverketin (2019) teettämän selvityksen arvio, jossa tieverkon kokonaiskustannukset vaihtelevat yhteensä noin 1,6–1,8 M€/tie-km välillä, josta sähköverkkokustannusten osuus on 33–40 % eli noin 0,55–0,70 M€/tie-km. Kyseisessä arviossa sähköverkkokustannukset pienenevät suhteessa hieman tieverkon laajuuden kasvaessa.

Kuvassa 36 on puolestaan esitetty toinen arvio sähköverkkokustannusten osuksista teknologiavaihtoehdoittain. Kyseisessä arviossa on analysoitu kahdeksan eri toimittajan teknologioita sähköiselle tieverkolle – teknologioiden sisältäessä luvussa 1 esitetyt teknologiat sekä johtaville rakenteille että induktiolataukselle. Sähköverkkokustannukset on arvioitu kullekin teknologialle noin 0,40 M€/kaista-km tasolle ja niiden suhteelliset osuudet vaihtelevat arvioissa 20–41 % välillä kokonaiskustannuksista.



Kuva 36. ERS-implementoinnin kustannuksia (Trafikverket 2019) *Hondan toteutukselle ei ole esitetty lainkaan sähköverkkokustannuksia.

Olsson (2013) on puolestaan selvityksessään arvioinut sähköverkkokustannuksia kahdella tehontarpeella: 6,7 MW/tie-km ja 1,4 MW/tie-km. Kyseisessä arviossa sähköinen tieverkko perustuu johtaviin rakenteisiin ja ulottuu 447 km matkan Tukholmasta Göteborgiin. Sähköteho tieverkolle syötetään alueella jo sijaitsevasta 130 kV suurjänniteverkosta sekä rakennettavasta uudesta 30 kV keskijänniteverkosta, joka tarvittaessa voi mahdollistaa myös tuulivoiman liittynän verkkoon. Sähköverkko on toteutettu rengasverkkona, joka mahdollistaa sähkönsyötön myös tilanteessa, jossa yksi siirtojohto vioittuu. Ajoneuvojen lataus tapahtuu esimerkissä 750 V tasajännitteellä.

Keskimääräinen tehontarve Olssonin (2013) selvityksen kahdessa esimerkissä on 6,0 MW/tie-km ja 0,96 MW/km, mutta huomioiden ajoneuvojen latauksessa sekä sähkönsiirrossa tapahtuvat häviöt, on todellinen tehontarve edellä esitetty maksimiskenaarion 6,7 MW/tie-km ja perusskenaarion 1,4 MW/tie-km. Maksimiskenaarion sähköverkko-kustannusten suuruudeksi selvityksessä arvioidaan 1,95 M€/tie-km, joista 12 % aiheutuvat 130 kV verkon ja 88 % 30 kV rakentamisesta ja vahvistamisesta. Maksimiskenaariossa 130 kV sähköverkkoon rakennetaan viisi uutta 130 kV sähköasemaa sekä niiden vaatimat siirtojohdot nykyisten 17 sähköaseman rinnalle. Lisäksi verkkoa vahvistetaan kolmella uudella 400/130 kV muuntajalla olemassa oleviin sähköasemiin. 30 kV verkko rakennetaan skenaariossa täysin alusta kaikkine komponentteineen. 75–80 % 30 kV verkon kustannuksista tulee sähköasemista, joilla muunnetaan sähkötehon jännite, virta ja taajuus sähköisen tieverkon vaatimuksia vastavaksi. 30 kV verkon kustannukset perustuvat asiantuntijanäkemyksiin ja niihin liittyy suurta epävarmuutta, sillä tarkkoja kustannuksia uudelle verkolle ei voi määrittää ilman yksityiskohtaista verkon suunnittelua. (Olsson 2013)

Perusskenaariossa 130 kV verkko vaatii vain marginaalisia muutoksia. 30 kV verkon rakentaminen noudattaa maksimiskenaarion periaatteita, joissa esim. etäisyys 130 kV sähköasemalta lähimmälle 30 kV sähköasemalle on arvioitu olevan keskimäärin 5 km. Perusskenaariossa 1,5 MW sähköliittymän kustannuksiksi on arvioitu 0,41 M€, kun maksimiskenaariossa 6,7 MW sähköliittymän kustannukset ovat 1,17 M€. Kokonaisuutena perusskenaarion sähköverkkokustannuksiksi arvioidaan 0,67 M€/tie-km, joista 130 kV verkon osuus on 10 % ja 30 kV verkon osuus 90 %. (Olsson 2013)

Olsson (2013) toteaa selvityksessään, että sähköverkkokustannuksiin liittyy suurta epävarmuutta ja implementoinneissa voi olla saavutettavissa mitta-kaavaetuja laajojen toteutusten yhteydessä. Lisäksi voidaan olettaa, että hinnat kyseisessä selvityksessä esitetyistä vuoden 2013 arvoista ovat pienentyneet tähän päivään mennessä. Sähköverkon ylläpitokustannukset selvityksessä on arvioitu olevan 1–2 % investointi-kustannuksista, joka todetaan olevan sopiva taso erityisesti suurjännitteiselle verkolle, mutta voi olla liian suuri keski- ja pienjännitteiselle verkolle (Olsson 2013). Yleisistä tekijöistä sähköverkkokustannuksiin vaikuttaa erityisesti sähköjohdoissa ja -kaapeleissa käytettävän kuparin hinta.

Edellä esitetyistä arvioista voidaan todeta, että sähköverkon laajentamiseen ja vahvistamiseen liittyvät kustannukset muodostavat merkittävän osan sähköisen tieverkon kustannuksista. Lisäksi voidaan olettaa, että itse ERS-tekniologioiden kustannukset voivat pienentyä merkittävästikin teknologioiden kypsyessä, jolloin sähköverkon kustannukset voivat kasvaa suhteellisesti vielä suuremmiksi. Kustannuksia vertailtaessa on hyvä muistaa, että kirjallisuudessa esitettyjen sähköverkkokustannusten sisältämät komponentit voivat vaihdella eri selvitysten välillä – esim. edellä esitettyjen sähköverkon kustannusarvioiden sisällöistä ei ole täysin tarkkaa tietoa. Yleisesti tieverkkojen sähköistyksessä puhuttaessa sähköverkkokustannukset sisältävät kaiken KJ-liittymästä eteenpäin, mutta eroavaisuuksia voi tosiaan esiintyä. Lisäksi on hyvä huomioida, että sähköverkko voi vaatia tiealueen laajentamista, mikä vaatisi neuvottelua maanomistajien kanssa ja voi aiheuttaa lisäkustannuksia sähköverkolle (Trafikverket, 2017).

3.2 Sähköverkkoregulaatio

Suomen sähköverkon rakenne on esitetty kuvassa 34. Sähköverkko koostuu suurjännitteisistä kanta- ja jakeluverkoista sekä keski- ja pienjännitteisistä jakeluverkoista. Lisäksi esim. maantieteellisesti tarkasti rajatuilla teollisuusalueilla voi esiintyä suljettuja jakeluverkkoja. Kantaverkon sekä suur-, keski- ja pienjännitteisten jakeluverkkojen kautta sähkö toimitetaan kuluttajille esim. kauppa-, asuin- ja liikekiinteistöihin, joiden sisällä on kiinteistön sisäinen sähköverkko. Kantaverkko koostuu 400-, 220- ja tärkeimmistä 110 kV:n siirtojohdoista. Suurjännitteiset jakeluverkot puolestaan kattavat valtaosan 110 kV:n johdoista. Jakeluverkot 110 kV:n sähköasemilta kuluttajille koostuvat suurimmaksi osaksi 20 kV:n keskijännitejohdoista sähköasemien ja jakelumuuntajien välillä sekä 0,4 kV:n pienjänniteverkosta jakelumuuntajilta kuluttajille.



Kuva 34. Suomen sähköverkon osa-alueet.

Sähköverkkotoiminta kantaverkossa ja eri jännitetason jakeluverkoissa on luvanvaraista toimintaa ja sitä saa harjoittaa Suomessa vain Energiaviraston myöntämällä luvalla (sähköverkkolupa). Luvanvaraista ei ole sähköverkkotoiminta, jossa sähköverkolla hoidetaan vain kiinteistön tai sitä vastaavan kiinteistöryhmän sisäistä sähköntoimitusta¹¹.

Sähköverkkotoiminta on luonnollista monopolitoimintaa ja siten mm. sen laatua ja tuottoa valvotaan Energiaviraston toimesta. Jakeluverkonhaltijalla on yksinoikeus rakentaa jakeluverkkoa vastuualueellaan. Suomessa oli vuonna 2018 77 sähkön jakeluverkkoyhtiötä, 11 suurjännitejakeluverkkoyhtiötä sekä kanta-verkkoyhtiö Fingrid.

Sähköautojen latauspalvelun tarjoaminen ei kuulu sähkömarkkinalainsäädännössä tarkoitettuun luvanvaraiseen sähköverkkotoimintaan. Siten kuka tahansa voi asentaa latauspisteitä tontilleen ja alkaa tarjota niiden kautta lataussähköä sähköautoihin. Sähkömarkkinalain 9 §:n 2 momentin perusteella sähköverkonhaltijan velvollisuutena on liittää pyynnöstä ja kohtuullista korvausta vastaan toiminta-alueellaan olevat tekniset vaatimukset täyttävät käyttöpaikat verkkoonsa (liittämisvelvollisuus).

Sähköistetylle tieverkolle on sähköverkkoregulaation näkökulmasta kaksi päävaihtoehtoa: a) sähköverkko voidaan nähdä ei-reguloituna kiinteistön sisäisenä verkkona, kuten tehdään VR:n omistamien raideliikenteeseen liittyvien sähköverkkojen kanssa; tai b) sähköverkko voidaan nähdä reguloituna jakeluverkkona osana nykyisten jakeluverkkoyhtiöiden sähköverkkolupia ja toimialueita. Näitä vaihtoehtoja ja niiden vahvuuksia sekä heikkouksia on pohdittu alla.

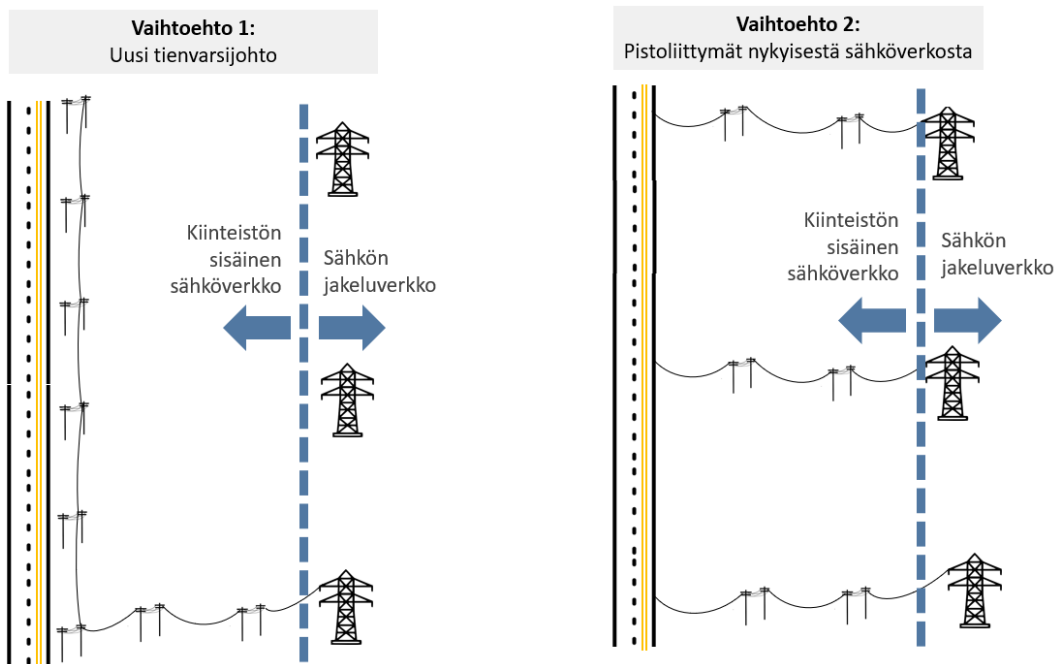
Ei-reguloitu kiinteistön sisäinen verkko

- Käytännössä tieverkko voitaneen katsoa kiinteistön/kiinteistöryhmän sisäiseksi sähkönjakeluverkoksi, mikäli tiekiinteistöt ovat saman tahon hallinnassa ja rajautuvat toisiinsa.
- Perinteisesti kuitenkin kiinteistöverkon käyttäjillä on sähkömarkkinalain 72 §:n mukaisesti oikeus tehdä sähköverkkosopimus paikallisen jakeluverkonhaltijan ja sähkönmyyntisopimus haluamansa sähkön myyjän kanssa, jolloin kiinteistöverkonhaltijan on mahdollistettava mittaus käyttöpaikalle. Tällöin Energiaviraston tulkinnan mukaan kiinteistöverkonhaltija ei myöskään voisi periä maksua kiinteistön sisäisestä sähkönjakelusta. Tässä haasteena on se, että sähköajoneuvot katsottaisiin sähkönkäyttöpaikoiksi. Näin ei ole koskaan tehty, joten se voi vaatia lakimuutosta.
- Mikäli sähköisen tieverkon tarvitsema sähköverkko toteutettaisiin kiinteistön sisäisenä verkkona, menisi jakeluverkkoyhtiön ja kiinteistön sisäisen verkon vastuuraja todennäköisesti keskijänniteliittymässä, josta eteenpäin verkon rakentaminen ja ylläpito olisi kiinteistön sisäistä verkkoa operoivan toimijan vastuulla.
- Kiinteistön sisäiselle verkolle edellytyksenä on, että verkolla on vain yksi sähkönkäyttäjä tai kuten edellä on todettu, sähköverkolla hoidetaan vain kiinteistön tai sitä vastaavan kiinteistöryhmän sisäistä sähköntoimitusta.

¹¹ Sähkömarkkinalaki: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Oidp446250144>

Tämä käytännössä tarkoittaa, että sähkökäyttäjänä kyseisessä vaihtoehdossa on tieverkko-operaattori, joka laskuttaa tieverkon käyttäjiä kokonaispalvelusta, joka sisältää myös sähkön.

- Malli ei mahdollista tieverkon yksittäisten käyttäjien kilpailuttavan kuluttamaansa sähköä. Yksittäinen autoilija tai logistiikkayhtiö ei siis voi valita tieverkon kautta kuluttamalleen sähkölle omaa sähkönmyyjäänsä vaan sähkön liittyvät palvelut on hankittava tieverkkoa operoivalta taholta.
- Omistajana tieverkon sähköverkolle on kyseisessä vaihtoehdossa joku muu kuin alueen nykyinen jakeluverkkoyhtiö. Omistaja voi olla erillinen yhtiö tai esim. tieverkko-operaattori, joka vastaa tieverkon käyttöön liittyvien palveluiden järjestämisestä ja laskuttamisesta.
- Kiinteistön sisäistä sähköverkkoa ei koske nykyinen sähköverkkotoiminnan valvontamalli esim. hinnoittelun kohtuullisuuden osalta, mikä antaa vapauksia palveluiden hinnoittelulle ja erilaisten palvelupakettien luonnille.
- Malli tukee EU-tasolla edistettävää kehitystä, jonka mukaan reguloidun sähköverkkotoiminnan laajuutta pyritään minimoimaan, ja sähköverkkotoimintaan liittyviä palveluita pyritään saattamaan kilpailuille markkinoille.

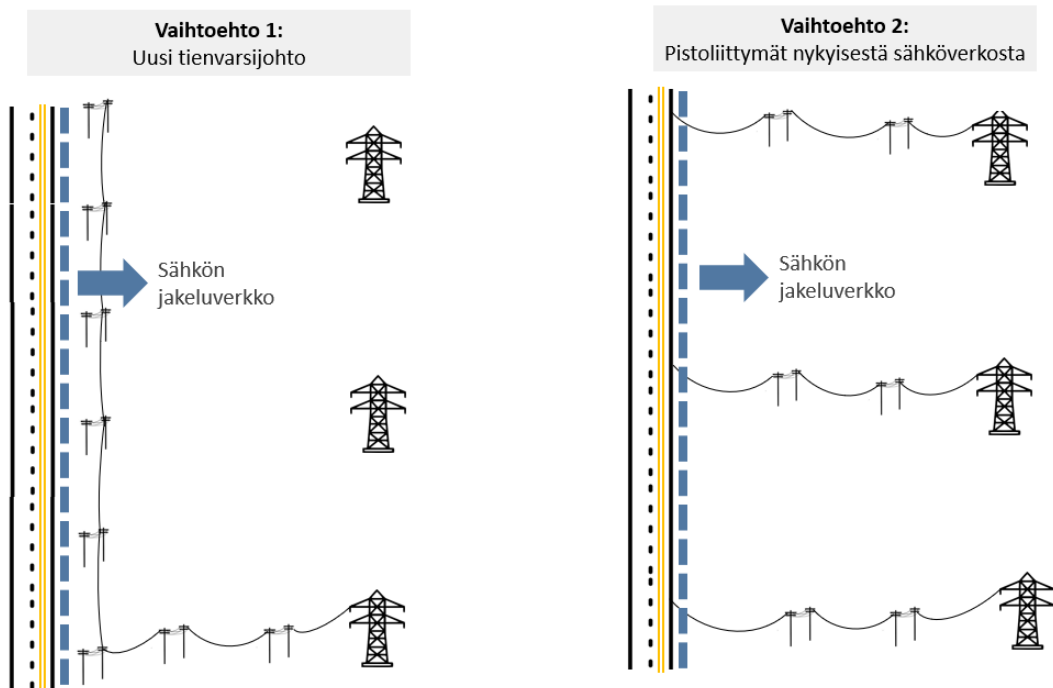


Kuva 35. Sähköverkon vastuurajat kiinteistön sisäisissä verkoissa.

Reguloitu jakeluverkko

- Sähköisen tieverkon tarvitsema sähköverkko sisältyy tässä vaihtoehdossa nykyisten jakeluverkkoyhtiöiden sähköverkkolupiin niiden maantieteellisillä vastuualueilla. Sähköverkko sisältää KJ-liittymän sekä liityntäjohdot nykyisestä sähköverkosta tieverkolle (ks. kuva 35). Tienvarsijohdon tapauksessa johto/kaapeli kuuluu jakeluverkkoyhtiölle.

- Uuden sähköverkon omistajia ovat nykyiset jakeluverkkoyhtiöt ja niiden toimintaa valvotaan nykyisen Energiaviraston koordinoiman valvontamallin mukaisesti.
- Malli mahdollistaa tieverkolle useat sähkönkäyttäjät ja tietyillä mittaukseen liittyvillä reunaehdoilla käyttäjien sähkön kilpailuttamisen.
- Malli ei poissulje vaihtoehtoa, että tieverkko-operaattori hankkisi edelleen keskitetysti sähkön ja laskuttaisi käyttäjiä myös sähkönkulutuksesta. Mikäli tieverkko-operaattori ryhtyisi tässä tapauksessa myös sähkönmyyjäksi, koskisi sitä sähkön vähittäismarkkinoilla toimivan sähkönmyyjän velvoitteet esim. tasevastuun ja markkinatiedonvaihdon osalta.
- Jakeluverkkoyhtiöiden vastuualueita pyritään EU-tasolla mieluummin rajaamaan kuin laajentamaan, jota tämän vaihtoehdon mukainen toteutus ei välttämättä tukisi.



Kuva 36. Sähköverkon vastuurajat reguloidussa jakeluverkossa.

Molemmissa malleissa sähkönmittaus ja mittalaitedirektiivi saattaa aiheuttaa haasteita, mikäli sähkönkulutuksen laskutus tapahtuu ajoneuvoissa olevien mittausten perusteella. Mittalaitedirektiivi asettaa vaatimuksia mm. mittausten tarkkuudelle ja mittalaitteiden näytöille. Erityisesti reguloidussa jakeluverkko-toiminnassa sähkönkulutuksen mittaukselle ja mittalaitteille on tarkat vaatimukset, joiden mukaan kuluttajan tulee mm. pystyä tarkistamaan mittalaitteen näytöltä laskutuksen perusteena olevat lukemat.

4 Tieverkon sähköistämisen vaikutustenarviointi

Tiivistelmä luvusta 4

Tieverkon sähköistämisen vaikutukset riippuvat sähköistystä käyttämään siirtyvän liikenteen määrästä ja sähköistettävän tieverkon pituudesta. Tieverkon sähköistäminen vähentää liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä, mutta samalla liikennejärjestelmä muuttuu jonkin verran haavoittuvaisemmaksi ja turvattommammaksi. Sähköistäminen voi mahdollisesti vaikuttaa myös alueiden saavutettavuuserojen kasvamiseen ja raideliikenteen osuuden vähentymiseen rahtiliikenteessä. On mahdollista, että liikenteen toimivuus ruuhkautuneissa tilanteissa kärsii.

Tieverkon laajamittaisella sähköistamisellä on kohtuullisen merkittävä vaikutus valtakunnan tasolla sähkötehontarpeeseen ja sähkönkulutukseen, jotka ovat kuitenkin hallittavissa esimerkiksi olemassa olevia Suomen ja muiden maiden välisiä siirtoyhteyksiä hyödyntämällä. Lisääntyvän sähkönkulutuksen seurauksena sähköomavaraisuus pienenee, ellei kotimaista tuotantoa lisätä.

4.1 Vaikutukset liikenteeseen

4.1.1 Tieverkon sähköistämisen laajuus ja taloudellinen kannattavuus

Tieverkon sähköistäminen on teknisesti mahdollista toteuttaa hyvin erilaisissa mittakaavoissa. Pienimmillään sähköistäminen toisi hyötyjä yksittäisten logistiikkaa palvelevien yhteysvälien muodossa, ja laajimmillaan sähköistäminen voisi tarkoittaa esimerkiksi Suomen maanteiden pääväyläverkon sähköistämistä. Näiden laajuuden ääripäiden sähköistäminen ei kuitenkaan ole tämän raportin tarkastelujen perusteella yhteiskuntataloudellisesti kannattavaa.

Vilkasliikenteisillä yhteysväleillä (esim. valtatie 3 Helsinki–Tampere) sähköistäminen voi olla yhteiskuntataloudellisesti kannattavaa, mikäli kilometrikohtainen investointikustannus pysyy riittävän matalana, ja riittävän suuri osuus liikenteestä siirtyy käyttämään sähköistystä. Kannattavuuden varmistaminen edellyttää tarkempia selvityksiä, joissa huomioidaan kuljetusten ja matkojen lähtö- ja määränpäättämällä tasolla.

Vaikuttaa todennäköiseltä, että sähköistyksen kannattavuus vaatii useampia vilkasliikenteisiä sähköistettyjä yhteysvälejä riittävän sähköistyksen käyttäjien osuuden saavuttamiseksi. Sähköistystä ei kuitenkaan todennäköisesti kannata ulottaa koko maanteiden pääväyläverkolle. Osa pääväyläverkon väylistä on niin vähäliikenteisiä, että investointi on merkittävä suhteessa ilmastovaikutuksiin ja vaikuttavampia toimenpiteitä on todennäköisesti löydettävissä muualta.

Liikenneinfrastruktuurin käyttäjien näkökulmasta liikennöinnin kannattavuus sähköistetyllä tieverkolla riippuu sähköistyksen käyttöön kohdistuvien maksujen suuruudesta. Sähköistyksen käyttöön siirtyminen on kuljetusyritykselle tai liikenteen käyttäjälle kannattavaa, mikäli sähköistyksen käytöstä mahdollisesti

perittävä käyttömaksu tai -vero ei ylitä sähköistyksen käytöstä syntyviä säästöjä. Säästöt siirtymisessä polttomootoriliikenteestä sähköistyksen käyttöön syntyvät pääosin polttoainekulujen ja -verojen pienenemisestä. Valmiiksi sähköllä kulkeva liikenne puolestaan hyötyy mahdollisuudesta pienempään akkukapasiteettiin ajosäteen kärsimättä.

4.1.2 Sähköistetyn tieverkon ja rautatiekuljetusten välinen kilpailu

Sähköistetyn tieverkon ja rautatiekuljetusten välistä kilpailuasetelmaa voidaan arvioida vasta yleisellä tasolla, koska sähköistettyä tieverkkoa hyödyntävän kaluston pääoma- ja ylläpitokustannusten tasosta ei ole tarkkaa tietoa. Myöskään sähköistetyn tieliikenteen mahdollisesti maksamista veroista ja maksuista ei ole tietoa, mutta todennäköisesti ne muodostavat vain pienen osan kokonaiskuljetuskustannuksista.

Rautatiekuljetuksen alkuinvestointi on suuri, mutta suoriteperusteiset kustannukset pienet. Kuorma-autokuljetuksessa alkuinvestointi on pieni, mutta suoriteperusteiset kustannukset suuremmat. Tästä seuraa, että kuorma-auton ja junan kustannusfunktiot ja kilpailukykyiset käyttöalueet leikkaavat tyypillisesti 100–200 kilometrin kuljetusetäisyyden välillä. Kilpailukykyiset etäisyydet vaihtelevat tavaralajeittain ja yhteysväleittäin. Rautatiekuljetus voi olla kilpailukykyinen lyhyillä suuren volyymin yhteysväleillä ja tiekuljetukset vastaavasti pitkillä pienen volyymin kuljetuksilla.

Tiekuljetuksen vahvuuksia ovat sen kustannustehokkuus pienissä kuljetuserissä ja joustavuus; toisin kuin rautatieliikenne, se ei ole sidottu tietyille reitille ja tiettyihin aikatauluihin. Lyhyillä yhteysväleillä sähköistetty tieverkko voi houkuttaa kuljetuksia rautateiltä tieverkolle. Pääosin kuljetusmuotojen markkinasegmentit ovat kuitenkin erilaisia. Kuljetusmuotojen kilpailukykyyn rajamaastossa olevien rautatiekuljetusvirtojen arvioidaan olevan taipuvaisia siirtymään pitkällä aikajänteellä tieverkolle.

4.1.3 Vaikutukset liikenteen toimivuuteen

Yksittäisten logistiikkaa palvelevien yhteysvälien sähköistämällä ei arvioida olevan merkittäviä vaikutuksia liikenteen toimivuuteen tai saavutettavuuteen. Kuormamäärät jäivät tarkastelluissa esimerkeissä 1–2 alle 200 ajoneuvoon päivässä suuntaansa, mikä on pieni osuus kaikesta yhteysväleillä kulkevasta liikenteestä.

Vilkasliikenteisten yhteysvälien sähköistäminen heikentää liikenteen toimivuutta ruuhkautuneessa tilanteessa, mikäli useampikaistaisella tieosuudella vain yksi kaista sähköistetään suuntaansa, ja sähköistyksen piiriin siirtyneiden ajoneuvojen osuus lähestyy yhden kaistan kapasiteettia. Vaikutusta pienentävät kuitenkin akku- ja hybridikäyttöiset ajoneuvot, jotka voivat mahdollisesti siirtyä ajamaan ruuhkaisimpia osuuksia sähköistämättömälle, rinnakkaiselle kaistalle tai yhteydelle.

Ruuhkautuneessa tilanteessa on lisäksi mahdollista, että sähköistä tieverkkoa hyödyntävien ajoneuvojen tarve päästä tietyille sähköistetyille kaistalle heikentää ruuhkautuneen liikenteen sujuvuutta. Mahdollinen vaikutus lienee kuitenkin melko pieni.

4.1.4 Vaikutukset liikenteen toimintavarmuuteen

Sähkösaannista riippuvainen liikenne on polttomoottoriliikennettä alttiimpi laajamittaisille häiriöille. Mahdolliset sähkökatkojen on mahdollista koskea pidempiäkin teiosuoksia, jolloin liikennöinti kahden kaupungin välillä voi pahimmillaan keskeytyä kokonaan sähköisellä kalustolla vian korjaamisen ajaksi. Sähköverkon suunnittelussa tulee huolehtia riittävästä toimintavarmuudesta keskeisillä yhteysväleillä.

Lyhyempää osuutta koskevilla katkoksilla ei ole merkittävää vaikutusta liikenteeseen, mikäli sähköistystä hyödyntävät ajoneuvot on varustettu akustolla tai polttomoottorilla. Katkoskohtien ohi voidaan ajaa ajoneuvojen vaihtoehtoisilla voimanlähteillä. Samasta syystä myös risteysalueet, taitorakenteet ja tunnelit voidaan jättää sähköistämättä, kun sähköistys jatkuu jälleen taitorakenteen jälkeen.

Sähköistysinfran vikaantuminen ja niihin liittyvät huolto- ja korjaustoimenpiteet saattavat aiheuttaa lyhytkestoisia häiriöitä kaikkeen teiosuudella tapahtuvaan liikenteeseen.

4.1.5 Vaikutukset saavutettavuuteen

Suuremman mittakaavan sähköistäminen voi vähentää liikenteestä yksilölle ja tavaraliikenteen operaattoreille kohdistuvia kustannuksia ja sitä kautta parantaa alueiden saavutettavuutta. Saavutettavuus kasvaa etenkin sähköistettävien väylien läheisyydessä. Samalla saavutettavuuserot vilkasliikenteisten väylien varrella sijaitsevien alueiden ja maaseudun välillä kasvavat.

4.1.6 Vaikutukset liikenneturvallisuuteen

Tutkitut sähköistysteknologiat ovat erilaisia vaikutuksiltaan liikenneturvallisuuteen. Teknologioilla on jossain määrin erilaiset virheskenaariot, joihin varautuminen pitää huomioida huolellisen riskienarvioinnin avulla.

Ajojohtimeen perustuva sähköistys on altis ajolangan katkeamiselle tai tippumiselle ripustuksesta. Mahdolliset huonosti kunnossapidetyt virroitimet yksityisissä ajoneuvoissa kohottavat riskiä langan putoamiselle. Pudonnut ajojohdin aiheuttaa fyysisen iskun vaaran lisäksi sähköiskun vaaran liikkujille.

Kontaktirakenne tien sivussa tai pinnassa voi mahdollistaa sähköiskun vaaran sisältäviä tilanteita, jos ajoneuvosta joudutaan nousemaan virtakiskon läheisyydessä. Virtakisko voi lisäksi olla altis virroitimen jumiutumiseksi tai muille fyysisille iskuille, jos virtakiskossa on vaurio. Jumiutuminen tai isku virroitimeen voi aiheuttaa ajoneuvon käyttäytymisen odottamattomalla tavalla.

Päällysteen alla sijaitsevilla induktiosilmukoilla ei ole fyysisen kontaktin puuttumisen vuoksi suoria vaikutuksia liikenteeseen. Saattaa kuitenkin olla mahdollista, että induktiosilmukat saavat jotkin auton osat kuumenemaan tai sähköistymään vaarallisesti, jos induktioon ei ole varauduttu ajoneuvoa suunnitellessa.

Kaikilla teknologioilla mahdolliset välittömät esteet ja onnettomuuspaikat voidaan tarvittaessa kiertää, sillä ajoneuvojen akuilla tai muilla vaihtoehtoisilla voimanlähteillä voidaan liikkua vähintäänkin lyhyitä osuuksia.

4.1.7 Vaikutukset perusväylänpitoon

Tieverkon sähköistäminen vaikuttaa väylänpitoon sähköistyksen vaatimien rakenteiden kautta. Arvioitujen sähköistysteknologioiden rakenteet eroavat toisistaan merkittävästi. Kaikki sähköistysteknologiat kasvattavat perusväylänpidon kustannuksia paitsi teknologiakohtaisia rakenteita koskevan väylänpidon osalta, myös muiden rakenteiden perusparannuksessa huomioon otettavien asioiden vuoksi.

Ajojohtimeen perustuva sähköistys on toiminnaltaan samankaltainen kuin rata- tai raitiotiesähköistys. Kunnossapitomenetelmät ja -kustannukset sekä kunnossapitoon liittyvät haasteet ovat kohtuullisen tarkasti ennakoitavissa, sillä ajojohtimet ovat käytössä rauta- ja raitiotieliikenteessä.

Kontaktirakenteet tien sivussa tai pinnassa ovat tieliikenteen olosuhteisiin sovellettuna teknologioita, josta Suomessa ei ole kokemusta. Keskeisiä selvitettäviä tekijöitä ovat kiskon toimivuus ja elinikä lumisissa ja jäisissä olosuhteissa. Mahdollinen huono toimivuus voi tarkoittaa muita sähköistysteknologioita merkittävästi suurempia kontaktirakenteiden kunnossapito- ja puhtaanapitokustannuksia etenkin talviolosuhteissa. Lisäksi teiden talvikunnossapitoon kuuluva aeraus, hiekoitus ja suolaus voivat vahingoittaa kontaktirakenteita.

Tien alle sijoitettavat kontaktirakenteet lisäävät kustannuksia lähes kaikissa tiepäälysteisiin liittyvissä ylläpitotöissä, kun päällyste rakennetaan kontaktirakenteiden ehdoilla. On mahdollista, etteivät teiden päällystetöissä nykyisin käytettävät työkonet sovellu sellaisenaan kontaktirakenteita sisältävän tiepäälysteen rakentamiseen tai uusimiseen.

Myöskään päällysteen alla sijaitsevista sähkönsyöttöön tarkoitetuista induktiosilmukoista niiden vaatimien rakenteiden kunnossapidosta ei ole kokemusta Suomessa. Vaikuttaa todennäköiseltä, että niiden kunnossapito on tässä raportissa käsitellyistä teknologioista edullisinta, sillä niihin ei liity liikkuvia kontaktirakenteita. Silmukoiden päällä oleva päällyste vertautunee siltojen tai muiden taitorakenteiden päällysteisiin kunnossa- ja ylläpidon osalta.

Kaikki tien alle sijoitettavat rakenteet vaativat huolellisesti suunnitellut perustukset, sillä rakenteet todennäköisesti sietävät routa- ja muita painumia muita tierakenteita vähemmän. Huonosti perustetuissa olosuhteissa sähköistysrakenteet voivat erilaisen mekaanisen käyttäytymisensä vuoksi edellyttää muita vastaavia tieyhteyksiä raskaampia ja kalliimpia pohja- ja päällysrakenteiden ylläpitotoimia.

4.1.8 Vaikutukset maisemaan

Teiden alle tai sivuun sijoitettavat sähkönsyöttörakenteet eivät aiheuta vaikutuksia tieyhteyksien maisemaan. Tien päälle sijoitettavat rakenteet sen sijaan muuttavat merkittävästi tieyhteyksien maisemaa. Arvokkaiden maisemaympäristöjen kohdalla voi olla mahdollista jättää lyhyitä osuuksia sähköistämättä maisemallisten arvojen säilyttämiseksi.

4.2 Vaikutukset päästöihin

4.2.1 Vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin

Taloudellisesti kannattavissa tieverkon sähköistyshankkeissa kasvihuonekaasupäästöjä pienentävä vaikutus syntyy sähköistämisen sivutuotteena. Mikäli yksittäisiä logistiikkaa palvelevia yhteysvälihankkeita toteuttaa ilmasto-toimenpiteinä, kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen kustannus voi ylittää tuhat euroa hiilidioksiditonnilta 30 vuoden pitoajalle arvioituna.

Ilmastovaikutuksen suuruus riippuu siirtyvän liikenteen osuudesta sekä sähköistettävien osuuksien pituudesta. Mikäli maanteiden pääväylät sähköistetään, voi sähköistämisen ilmastovaikutus olla suuruudeltaan jopa miljoona tonnia hiilidioksidia vuodessa 30 vuoden pitoajalle arvioituna.

Tieverkon sähköistys vaikuttaa ensisijaisesti raskaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen pienenemisen kautta. Kevyen ajoneuvoliikenteen päästöjen on arvioitu pienenevän 30 vuoden aikajänteellä suhteessa raskasta liikennettä enemmän akkukäyttöisten sähköajoneuvojen ja vähäpäästöisten polttoaineiden yleistymisen myötä, jolloin myös tieverkon sähköistämällä on pienempi vaikutus päästöihin.

4.2.2 Vaikutukset ilmanlaatuun

Tieverkon sähköistäminen ohjaa sähköajoneuvojen yleistymiseen tieliikenteessä, mikä pienentää liikenteen ilmanlaatua heikentäviä lähipäästöjä. Vaikutuksella on suurin merkitys kaupunkiolosuhteiden tiheään asutuilla alueilla, joissa huonosta ilmanlaadusta kärsijöitä on harvaan asuttuja alueita enemmän.

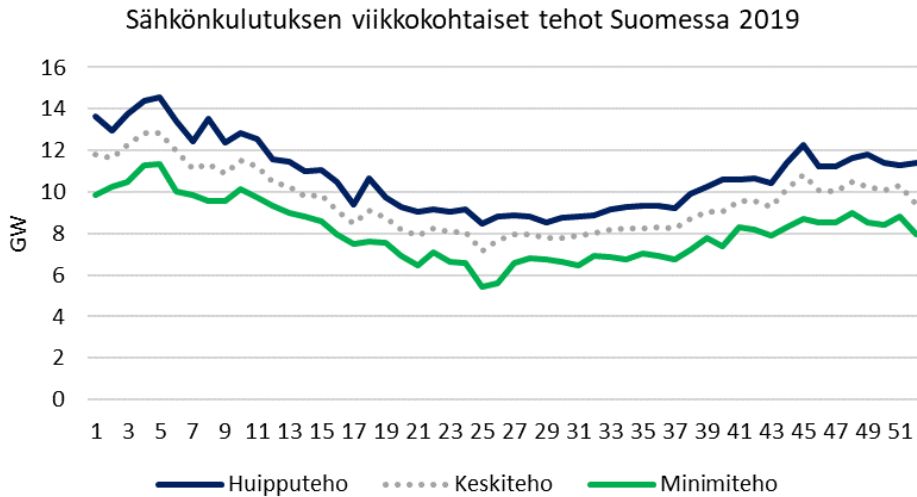
4.3 Vaikutukset sähkömarkkinoihin

Sähköisten tieverkkojen vaikutuksia sähkömarkkinoihin on seuraavissa alaluissa analysoitu tehotaseen ja energiankulutuksen näkökulmista. Tarkastelu on tehty luvussa 2 esiteltyjen case-esimerkkien perusteella, joiden lisäksi on arvioitu osittain myös liikenne- ja viestintäministeriön liikenteen ilmasto-politiikan työryhmän valmisteleman raportin: *"Toimenpideohjelman hiilettömään liikenteeseen 2045 (ILMO)"* mukaisten sähköajoneuvojen vaikutusta Suomen tehotaseeseen ja energiankulutukseen. Vertailemalla tieverkon sähköistyksen case-esimerkkejä ILMO-raportin mukaisiin arvioihin, saadaan vertailupohjaa tieverkon sähköistyksen todellisille vaikutuksille.

4.3.1 Vaikutukset tehotaseeseen

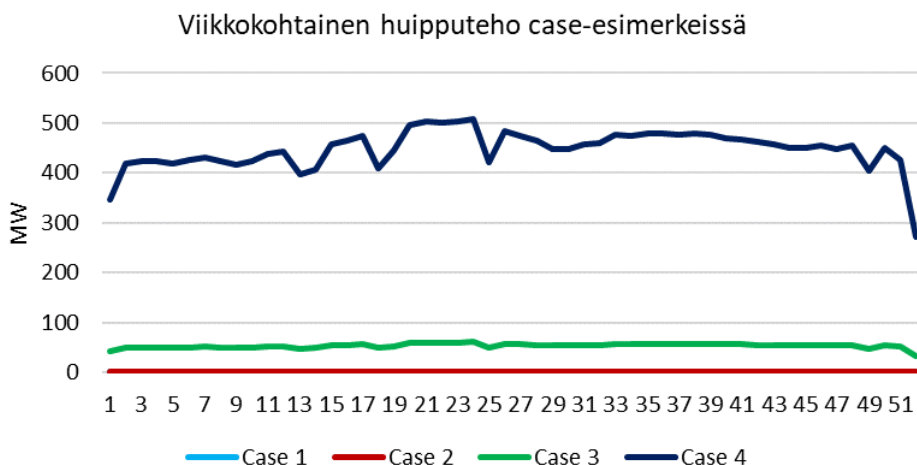
Koko Suomen sähkönkulutuksen huipputeho vuonna 2019 oli noin 14,5 GW (Tilastokeskus, 2020). Kulutuksen huipputeho on pysynyt melko tasaisena viime vuodet. Suurin kulutushuippu nähtiin vuonna 2016, jolloin sähkönkulutus kasvoi korkeimmillaan 15,1 GW tasolle. Kulutushuiput ajoittuvat kylmille ajanjaksoille pääasiassa tammikuusta helmikuun loppuun. Liikenteen kausivaihtelusta johtuvat kulutushuiput puolestaan ajoittuvat tyypillisesti kesäkuukausille (ks. kuva 37), mikä voi osittain helpottaa liikenteen aiheuttamaa kuormaa sähkömarkkinoille. Kuvassa 38 seuraavalla sivulla on kuvattu vuoden 2019 huipputehot eri viikkoina. Viikon 5 huipputehosta 14,5 GW sähkötehontarve pienenee

kesäkuukausien 8,5 GW tasolle eli noin 42 %. Koko Suomen tasolla tehontarpeessa on siis merkittävää vaihtelua kylmien ja lämpimien ajanjaksojen välillä.



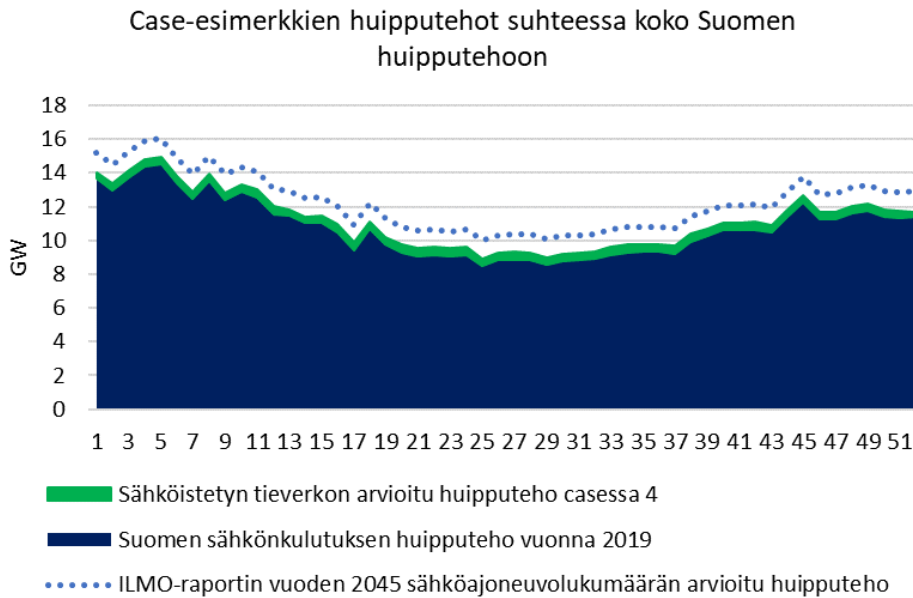
Kuva 37. Sähkönkulutuksen viikkokohtaiset tehot Suomessa 2019.

Kuvassa 38 on esitetty sähköisten tieosuuksien koko laajuudessa laskettu huipputeho. Kokonaishuipputeho riippuu case-esimerkeissä kahdesta tekijästä: 1) ajoneuvojen lukumäärän kautta laskettavasta tehontarpeesta per tie-km; sekä 2) yhteysvälin pituudesta. Vaikka case-esimerkissä 3 tehontarve oli tie-km kohden suurin, nousee casen 4 tehontarve kokonaisuutena suurimmaksi johtuen kyseisen esimerkin pitkästä 5 500 km:n yhteysvälistä. Casessa 4 huipputeho nousee suurimmillaan 508 MW tasolle vaihteluvälin ollessa 271–508 MW. Case 3:ssa tehontarve jää noin 60 MW:iin ja casien 1 sekä 2 tehontarpeet alle 1 MW:n.



Kuva 38. Viikkokohtainen huipputeho case-esimerkeissä.

Kuvassa 39 on laskettu case-esimerkin 4 vaikutus koko Suomen viikoittaiseen tehohuippuun. Esimerkissä sähköisen tieverkon tehohuippu vaihtelee edellä esitetyn mukaisesti välillä 0,27–0,51 GW välillä. Koko Suomen tehohuippu puolestaan vaihtelee välillä 8,5–14,5 GW. Näin ollen sähköisen tieverkon vaikutus koko Suomen tehohuippuun on noin +2,4–5,6 %.



Kuva 39. Case-esimerkkien viikkokohtaiset huipputehot suhteessa koko Suomen vuoden 2019 huipputehoon.

Kuvassa 39 on lisäksi ILMO-raportin vuoden 2045 sähkö- ja hybridiajoneuvojen lukumäärillä arvioitu viikoittainen sähkötehtotarve, jonka arvioitiin olevan noin 1,5-kertainen keskimääräiseen tuntikeskitehohon nähden. Tehontarpeeksi saatiin näin ollen keskimäärin 1,5 GW. Kyseisellä arviolla ILMO-skenaarion vaikutus koko Suomen vuoden 2019 tehohippuun olisi noin +10,4–17,9 %.

Taulukko 13. ILMO-raportin sähkö- ja hybridiajoneuvomäärät vuonna 2045 (LVM 2018b).

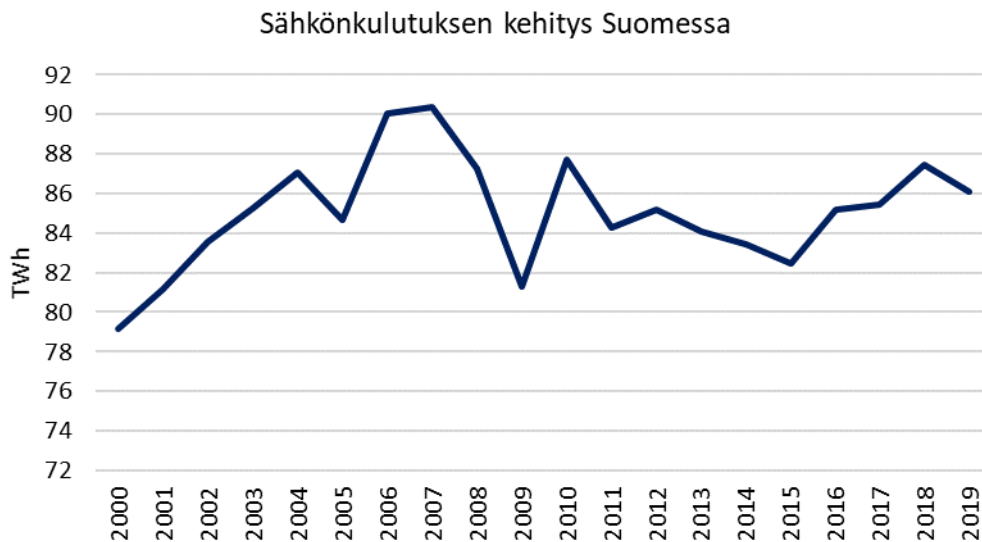
| | Ajoneuvojen lukumäärä yht. | Sähköajoneuvojen osuus | Ladattavien hybridi-ajoneuvojen osuus |
|--------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Henkilöautot | 2 618 180 | 75,6 % | 6,5 % |
| Pakettiautot | 310 450 | 52,9 % | 0,0 % |
| Linja-autot | 12 994 | 65,0 % | 0,0 % |
| Kuorma-autot | 94 216 | 35,9 % | 0,0 % |

Asennettua voimalaitoskapasiteettia oli Suomessa noin 17,6 GW vuoden 2018 lopussa ja Energiavirasto on arvioinut talvikaudella 2019–2020 kulutushuipun aikana käytettävissä olevan tuotantokapasiteetin Suomessa olevan noin 11,9 GW (Energiavirasto, 2019). Ruotsista Suomeen on siirtoyhteyksillä tuontikapasiteettia yhteensä 2,7 GW. Venäjän siirtoyhteyksien kokonaistuontikapasiteetti on 1,5 GW, josta 1,3 GW on kaupallisessa käytössä. Virosta siirtoyhteyksien tuontikapasiteetti on yhteensä 1,0 GW. Lisäksi Ahvenanmaan ja Manner-Suomen välillä on kapasiteetiltaan 0,1 GW kaapeli, joka toimii varayhteytenä poikkeustilanteissa. Tuontikapasiteettia muista maista on siis yhteensä 5,1 GW. (Energiavirasto, 2019)

Energiavirasto on arvioinut Suomen tehotaseeksi 2019–2020 talvikaudella erittäin kylmänä talvipäivänä ilman tuontia -3,4 GW (Energiavirasto, 2019). Tämä tarkoittaa, että maksimaalinen tuontikapasiteetti huomioiden, tehotase on noin 1,7 GW ylijäämäinen. Tehotase riittäisi siis kattamaan arvioidun case 4:n tehovaikutuksen (0,6 GW) sekä ILMO-raportin vuoden 2045 mukaisen sähkö- ja hybridiajoneuvomäärän (1,5 GW).

4.3.2 Vaikutukset energiankulutukseen

Sähkön vuosikulutus Suomessa on 2000-luvulla vaihdellut karkeasti välillä 80–90 TWh (Tilastokeskus, 2020). Suurin vuosikulutus nähtiin toistaiseksi vuonna 2007, jolloin sähkönkulutus kipusi 90,4 TWh:iin. Kyseisen vuoden jälkeen sähkönkulutus pieneni merkittävästi finanssikriisin aiheuttaman taloudellisen taantuman johdosta eikä kulutus ole viimeisten vuosien kasvusta huolimatta noussut vuoden 2007 huipputasolle.

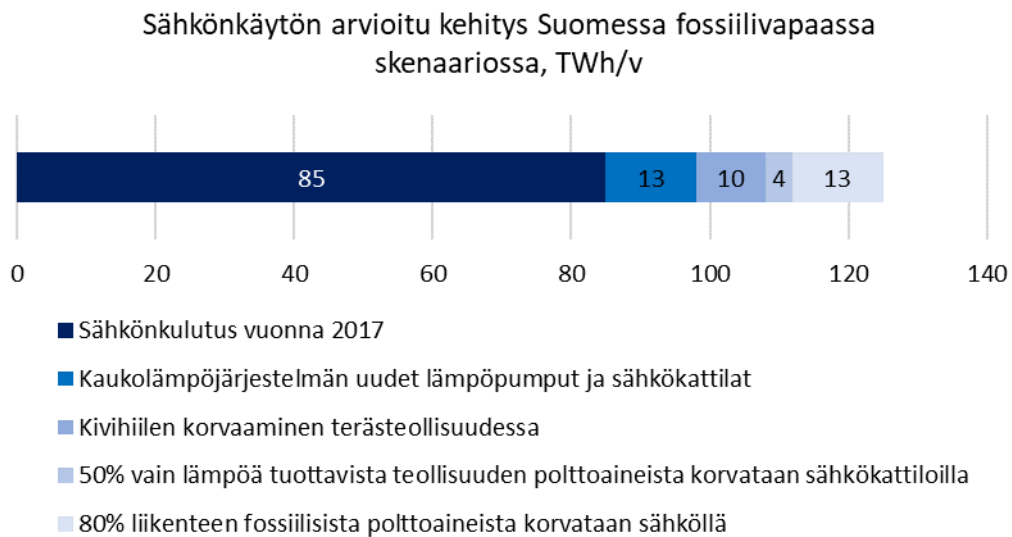


Kuva 40. Sähkönkulutuksen kehitys Suomessa 2000-luvulla.

Liikenteen sähköistymisellä voi jatkossa olla merkittävä vaikutus sähkönkokonaiskulutukseen Suomessa. Tässä työssä laskettiin case-esimerkin 4 vaikutukset sähkönkulutukseen, sillä kyseisessä kaikki maanteiden pääväylät kattavassa esimerkissä sähkönkulutus oli kokonaisuutena tarkastelluista esimerkeistä suurin. Kun huomioidaan edellä työssä esitellyt liikenteen keskimääräiset vuorokausi- ja kausivaihtelut, saadaan casen 4 sähkön vuosikulutukseksi 2,2 TWh. Puolestaan ILMO-raportin vuoden 2045 mukaiselle skenaariolle sähkönkulutus on arviolta 7,9 TWh. Näin ollen laajamittainen sähköisten tieverkkojen toteutus lisää sähkönkäyttöä Suomessa noin 2,6 % vuoden 2019 tasoon verrattuna. ILMO-raportin vuoden 2045 skenaarion mukainen tilanne puolestaan lisää sähkönkäyttöä noin 9,2 % vuodessa. Määrät ovat kokonaisuutena merkittäviä, mutta huomioiden vuonna 2007 saavutettu sähkönkulutuksen huippu, voidaan olettaa, että pitkälle aikavälille jaettuna kyseinen sähkönkulutuksen lisäys ei aiheuttaisi sähkömarkkinoiden toimintaan merkittäviä haasteita. Lisäys voidaan kattaa joko uudella kotimaisella tuotannolla tai kasvattamalla siirtokapasiteettia naapurimaista.

Laskelmien tulokset erityisesti ILMO-skenaariolle riippuvat merkittävästi tehdyistä oletuksista esim. ajoneuvoteknologian energiatehokkuuden kasvun osalta. ILMO-skenaariossa sähkön osuudeksi koko liikenteen energiankulutuksesta saatiin noin 34 %.

Oleellinen kysymys jatkossa sähkömarkkinoiden näkökulmasta on arvioida sähkönkulutuksen kehitystä kokonaisuutena huomioiden liikennesektorin lisäksi myös muiden sektoreiden vaikutukset sähkönkulutukseen ja huipputehoon. Eri toimialat valmistelevat parhaillaan hiilitiekarttoja, joissa eri toimintojen ja prosessien sähköistys on keskeisessä roolissa. Esimerkkinä Smart Energy Transition -hankkeessa on arvioitu sähkönkäytön kehitystä Suomessa fossiilivapaassa skenaariossa. Kyseisen arvion mukaan vuotuinen sähkönkäyttö Suomessa kokonaisuutena voi kasvaa nykyisestä lähes 50 % johtuen lämmityksen, teollisuuden prosessien ja liikenteen sähköistymisestä. Skenaariossa oletettiin, että 80 % liikenteen fossiilisista polttoaineista korvattaisiin sähköllä, minkä seurauksena liikenteen sähkönkäyttö kasvaisi 13 TWh/v tasolle (Auvinen, 2019). Kokonaisuutena on myös hyvä muistaa, että Pohjoismailla on yhteiset sähkömarkkinat, joissa siirtokapasiteettien rajoitteet huomioiden, uusi tuotanto voi sijoittua minne tahansa Pohjoismaissa. Toisaalta myös muiden Pohjoismaiden sähkönkulutuksen ja -tuotannon muutokset vaikuttavat Suomessa sähkön saatavuuteen ja siten hintaan.



Kuva 41. Sähkönkäytön arvioitu kehitys Suomessa fossiilivapaassa skenaariossa (Auvinen 2019).

5 Lainsäädännölliset edellytykset

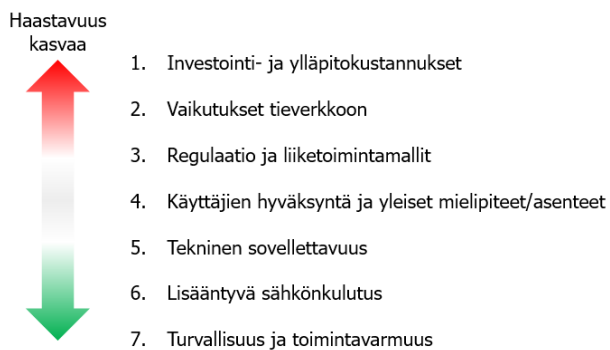
Tiivistelmä luvusta 5

Tieverkon sähköistäminen vaikuttaa mahdolliselta ilman muutoksia nykyiseen lainsäädäntöön. Nykyinen lainsäädäntö ei erityisesti käsittele tieverkon sähköistämistä, mutta yleispiirteisen katsauksen perusteella ei myöskään asetu esteeksi.

Lainsäädännön vaatimusten täyttäminen edellyttää joka tapauksessa pitkäjänteistä työtä: esimerkiksi ajoneuvojen teknisten vaatimusten ja tyyppi-hyväksynnän järjestäminen voi osoittautua useamman vuoden kestäväksi prosessiksi.

5.1 Lainsäädännölliset kysymykset

Lainsäädäntöön ja liiketoimintamalleihin liittyvät kysymykset on nostettu Piarcin julkaisussa (PIARC 2018) kolmanneksi haastavammaksi osa-alueeksi sähköisten tieverkkojen toteutuksessa investointi- ja ylläpitokustannusten ja tiehen liittyvien vaikutusten jälkeen (kuva 42).



Kuva 42. Tieverkon sähköistämiseen liittyvät kysymykset järjestettynä haastavuuden mukaan (mukailtu lähteestä: PIARC 2018).

Tähän lukuun on kerätty kirjallisuudessa ja asiantuntijahaastatteluissa esiin nousseita lainsäädännöllisiä kysymyksiä. Selvitys ei ole kattava ja aukoton kuvaus aihealueesta. Tarkempi lainsäädännöllinen tarkastelu edellyttää myös teknologian tarkempaa määrittämistä.

Tieverkon sähköistämiseen liittyvät säädökset eivät koske pelkästään liikennettä, vaan myös kuluttajien oikeuksia, hankintoja ja kilpailua, energiantuotantoa, terveyttä ja turvallisuutta, ympäristönsuojelua ja maankäyttöä. PIARCin selvityksessä (2018) tunnistaa seuraavat lainsäädännölliset teemat, jotka saattavat edellyttää tarkempaa tarkastelua tai muutoksia:

- Kilpailuun liittyvät kysymykset
- Omistajuuteen ja vastuuseen liittyvät kysymykset
- Maankäyttöön ja maanomistukseen liittyvät kysymykset
- Sähkömarkkinoihin liittyvät kysymykset
- Ajoneuvotekniikkaan liittyvät kysymykset. (PIARC 2018)

Esiin nostettuja teemoja on käsitelty seuraavissa luvuissa lukuun ottamatta sähköverkkoregulaatiota, joka on käsitelty luvussa 4.

5.2 Lainsäädännön teemat

5.2.1 Kilpailulainsäädäntö

Hankintalain (1397/2016) tavoitteena on tehostaa julkisten varojen käyttöä, edistää laadukkaiden, innovatiivisten ja kestävien hankintojen tekemistä sekä turvata yritysten ja muiden yhteisöjen tasapuoliset mahdollisuudet tarjota tavaroita, palveluja ja rakennusurakoita julkisten hankintojen tarjouskilpailuissa.

Jos valitulla teknologialla on vain yksi valmistaja, nousee esiin kysymys monopolista. Lisäksi kysymykseen nousee vaihtoehtoisten ja kilpailevien ratkaisuiden yhteensopivuus. Tällä hetkellä kehitetyt teknologiat eivät ole keskenään yhteensopivia.

On mahdollista, että valitulla teknologialla on vain yksi valmistaja, johon liittyvä monopoliasema edellyttää sääntelyä. Suomessa määräävän markkina-aseman väärinkäyttö on kielletty kilpailulaissa (7 §, 948/2011).

5.2.2 Omistajuus ja vastuu

Sähköisen tieverkon toimitusmalleihin on erilaisia vaihtoehtoja. Eräs sopiva toimitusmalli saattaa olla Public-Private-Partnership (PPP), jossa teknologia asennetaan yleisille teille, mutta sen omistaa ja sitä ylläpitää yksityinen yritys. (PIARC 2018.)

Tämä nostaa esiin seuraavia kysymyksiä:

- Yksityisen toimijan omistaman laitteiston asentaminen yleiselle tielle.
- Kriittisen infrastruktuurin kysymykset.
- Vastuukysymykset liittyen onnettomuuksiin ja häiriöihin.
- Käyttäjätietojen käsittelyyn liittyvät tietoturvakysymykset. (PIARC 2018.)

5.2.3 Maankäyttö

Maantie- ja rautatiealueet on Suomessa yleensä hankittu valtion haltuun lunastamalla ne. Yleisistä teistä annetun lain (243/1954) mukaan alueet lunastettiin pysyvällä käyttöoikeudella tietarkoituksiin, mutta maantielain voimaantulon eli 1.1.2006 jälkeen maantietalueet on lunastettu omistusoikeuksin. (Ekroos & Seppälä 2018).

Väyläsuunnittelun ja toteuttamisen näkökulmasta nykyinen lainsäädäntö ei estäne tieverkon sähköistämistä. Yksityisen toimijan toimesta tehty sähköistämisen etenisi tiealueen käytön lupamenettelyn kautta. Lupamenettelystä korostuvat liikenneturvallisuus- ja kunnossapitoasiat. Tieverkon sähköistys palvelee tienkäyttäjiä – asian käsittely eroaa esim. kaupallisesta käytöstä tai sellaisista kaapeli-asennuksista, jotka voidaan katsoa tiealueiden toissijaisiksi käyttötarkoituksiksi.

5.2.4 Ajoneuvotekniikka

Tyyppihyväksyntä on ajoneuvon tai ajoneuvokomponentin valmistajan kannalta varmin keino varmistaa valmistamansa tuotteen kelpoisuus tieliikenteessä käytettäväksi. Tyyppihyväksynnällä tarkoitetaan kansainvälisesti tai kansallisesti tunnustettua menettelyä, jossa hyväksyntäviranomainen varmentaa ajoneuvo- tai komponenttityypin täyttävän sitä koskevat tekniset vaatimukset. Suomessa tyyppihyväksyntäviranomaisena toimii Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. Tyyppihyväksyntää voi hakea ainoastaan tyyppihyväksyttävän tuotteen valmistaja tai valmistajan tähän valtuuttama edustaja. (Traficom 2020.)

Tieliikenteen tyyppihyväksynät voidaan sääntelyperustan mukaan jakaa kolmeen osa-alueeseen: EU- ja EY-tyyppihyväksyntöihin, YK:n alaisen UNECE:n sääntöjen mukaisiin E-tyyppihyväksyntöihin sekä kansalliseen sääntelyyn perustuviin tyyppihyväksyntöihin.

ECE-R100 on säädetty Yhdistyneiden kansakuntien Euroopan talouskomission, eli UNECE:n säädöksellä 100. Säädös määrittelee sähköajoneuvojen tieliikennekelpoisuuden vaatimukset. Tieverkon sähköistämiseen liittyvien ratkaisujen teknisten vaatimusten valmistelu tyyppihyväksyntää varten EU:n ja UNECE:n toimielimissä voi kestää vuosia työn aloittamisesta. Kirjoitushetkellä ei ole ollut tietoa, että valmistelu olisi aloitettu. Ajoneuvojen hyväksynnän voi kuitenkin hoitaa myös kansallisen lainsäädännön turvin.

Teknologian sijoittaminen ajoneuvoon voi vaikuttaa mm. ajoneuvojen pituuteen ja korkeuteen. Ajoneuvojen sallituista pituuksista ja korkeuksista säädellään tieliikennelaissa.

Erityisesti induktioteknologioiden sähkömagneettiseen säteilyyn liittyy regulaatiokysymyksiä. EMC-direktiivillä säännellään sähkömagneettista yhteensopivuutta. Sähkölaitteen ja -laitteiston häiriöpäästöjen ja -sietojen on oltava vaatimustenmukaisia. Kaikki sähkölaitteet tai -laitteistot vaikuttavat toisiinsa, kun ne ovat yhteydessä toisiinsa tai ovat lähellä toisiaan. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden, EMC, tarkoitus on varmistaa, etteivät sähkölaitteet tai -laitteistot häiritse tai häiriinny toisista laitteista tai laitteistoista.

5.2.5 Turvallisuuden liittyvät kysymykset

Lisäksi nousevat esiin turvallisuuskysymykset, kuten:

- Tienkäyttäjien turvallisuus häiriötilanteessa
- Tiealueiden rajaaminen häiriö- ja huoltotoimenpiteissä
- Rakenteet esteinä ja rakenteiden turvallisuus.

Vaikutukset turvallisuuteen riippuvat käytetystä sähköistysteknologiasta. Ajolankateknologia on tietystä määrin verrattavissa sähköistettyyn rataan. Rautatieradalla liikkumista on rajoitettu Rautatielaissa (304/2011), mutta tieympäristössä toteutettuna liikkumista ei voida rajoittaa vastaavalla tavalla. Sähköistetyllä tiellä liikkumisen näkökulmasta tieverkon sähköistys on lähempänä kaupunkiraideympäristöä, josta on säädetty Laissa kaupunkiraide liikenteestä (1412/2015). Kumpikaan laki ei sellaisenaan koske sähköistettyä

tieliikenneympäristöä. Sekä rautatie- että kaupunkiraideympäristössä sähköisyyttä hyödyntävä raideliikenne on aina ammattiliikennettä, mutta tiealueella liikenne koostuu pääosin yksityisestä liikenteestä.

Maantieverkon turvallisuuden huomioinnista ja Väyläviraston tienpidon turvallisuusjohtamisjärjestelmästä on säädetty Laissa liikennejärjestelmästä ja maanteista (503/2005). Väyläviraston turvallisuusjohtamisjärjestelmällä varmistetaan tienpitoon liittyvien turvallisuusriskien hallinta.

6 Muut vaihtoehdot nollapäästöiselle tieliikenteelle

Tiivistelmä luvusta 6

Sekä raskaalle että kevyelle ajoneuvoliikenteelle on useita vaihtoehtoja, joilla voidaan pienentää liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä. Kaikkiin vaihtoehtoihin liittyy kuitenkin haasteita, joiden vuoksi yksikään ratkaisu ei ole lyönyt itseään täysin läpi.

Nollapäästöisen tieliikenteen keinokokoelma yhdistäneekin useita eri ratkaisuita.

Kevyessä ajoneuvoliikenteessä sähköistäminen sähköakuteknologiaa hyödyntämällä vaikuttaa olevan suuntaus, johon ollaan menossa. Biopolttoaineet ja synteettiset polttoaineet voivat olla potentiaalinen ratkaisu, mutta niihin liittyy mm. saatavuus- ja kustannushaasteita. Toisaalta kustannustekijät ovat hidaste myös monelle muulle vaihtoehdolle.

Raskaan ajoneuvoliikenteen sähköistämässä tieverkon sähköistäminen on nykytiedon valossa huomattavasti keskeisemmässä roolissa kuin kevyen ajoneuvoliikenteen tapauksessa. Muita potentiaalisia keinoja raskaan liikenteen päästöjen pienentämiseen ovat mm. uusiutuva diesel ja nykyisin myös LNG/LBG.

6.1 Kevyt ajoneuvoliikenne

Tieliikenteen päästöjen pienentämiseen on useita vaihtoehtoja ja todennäköisin keinovalikoima, jolla nollapäästöinen tieliikenne on saavutettavissa, yhdistänee useita eri ratkaisuja. Vaihtoehtoja tieverkon sähköistämälle on arvioitu kevyen ajoneuvoliikenteen näkökulmasta taulukossa 14. Monet vaihtoehtojen tunnistetuista vahvuuksista ja heikkouksista ovat yhteisiä sekä kevyen että raskaan ajoneuvoliikenteen näkökulmasta, mutta erojakin on. Raskaan ajoneuvoliikenteen näkökulmaa on tarkasteltu luvussa 6.2.

Kevyen ajoneuvoliikenteen sähköistäminen – tieverkkoa sähköistämällä tai ilman – on suunta, johon tällä hetkellä ollaan laajalti menossa. Se ei ole mahdollista suurensakaan mittakaavassa, mutta ongelmiakin on: latauksen hitaus, julkisten latauspisteiden vähyys, pitkän matkan akkujen suuri tilan tarve ja massa. Ja jos Li-ioniakkuja ladataan pikalatauksella usein, niiden elinikä laskee. Tällaiset ongelmat tulevat kasvamaan, kun sähköautojen määrä kasvaa. Lisäksi latausinfra rakentaminen kuten myös akkujen kierrätys tulevat vaatimaan suuria investointeja. Niinpä vaihtoehtojen ja täydentävien päästöttömien käyttövoimien etsiminen on hyvinkin perusteltua.

Biopolttoaineet ja tulevaisuudessa erityisesti synteettiset uusiutuvat polttoaineet ovat realistisia vaihtoehtoisia käyttövoimia sähkölle myös kevyessä ajoneuvoliikenteessä. Biopolttoaineiden pitkän tähtäimen näkymiä synkistää ennen kaikkea kestävien raaka-aineiden rajallisuus, joten biopolttoaineista ei ole kuin osaratkaisuksi tai ylimenokauden osaratkaisuksi. Sen sijaan synteettiset polttoaineet koko kirjollaan kantavat lupausta jopa kattavasta vaihtoehtoisesta ratkaisusta. Mutta ne eivät ole valmiita laajaan kaupalliseen käyttöön vielä

moniin vuosiin. Kuinka kauan siihen menee, on vaikea arvioida – ja se riippuu hyvin paljon myös siitä, panostetaanko niiden kehittämiseen vai ei.

Muut keinot, joita lukuisissa selvityksissä on tutkittu ja arvioitu – mm. energia-
tehokkuuden parantaminen, suoritteen pienentäminen, siirtyminen raideliiken-
teeseen – ovat hyviä ja tarpeellisia päästöjen vähentämiseksi. Mikään niistä ei
voi kuitenkaan olla pientä osaratkaisua merkittävämpi. Mutta koska ne ovat
helposti toteutettavissa (ainakin jossain määrin), ne on syytä toteuttaa joka
tapauksessa.

*Taulukko 14. Vaihtoehdot tieverkon sähköistämiseksi kevyen ajoneuvo-
liikenteen näkökulmasta. Vahvuuksia ja heikkouksia arvioitu
suhteessa tieverkon sähköistämiseen.*

| Vaihtoehto | Vahvuudet | Heikkoudet |
|---|--|---|
| Biopolttoaineet (nykyiset) | Jakeluinfra olemassa (nestemäiset) Ajoneuvokanta olemassa (nestemäiset) Nykyiset ajoneuvot soveltuvat sellaisenaan/ helposti konvertoitavissa biopolttoaineille Koko tiestö käytettävissä Biokaasua voidaan tuottaa paikallisesti paikallisista raaka-aineista | Tuotantoa ei ole (juuri) mahdollista lisätä kestävästi (nestemäiset) eli ei riitä yksinään lähellekään nollapäästöisyyttä Raaka-aineiden niukkuus tulee johtamaan hintojen nousuun Sekoitusrajat (etanoli, FAME, RME) Kaasu- ja flex fuel-ajoneuvovalikoima suppea & suppeneva? Biokaasun tuotannon heikko kannattavuus Kaasun jakeluinfra hyvin puutteellinen Uhkana biopolttoaineiden marginalisoituminen EU:ssa? |
| Synteettiset polttoaineet (vety, metaani, metanoli, synteettinen bensiini & diesel, levädiesel) | Raaka-ainepotentiaali periaatteessa rajaton Vapaa reitin valinta & koko tiestö käytettävissä Voidaan hyödyntää ilmastolle ja ympäristölle haitallisia teollisia CO ₂ -päästöjä ja jätevesiä | Tuotantoprosessi monimutkainen/kallis/vaatii paljon sähköä/ hyötysuhteeltaan huono/ei vielä kaupallinen Tuotantoinfra puuttuu Jakeluinfra puuttuu (H ₂)/ hyvin puutteellinen (CH ₄) Suuri tilan tarve autossa (H ₂ & CH ₄) |
| Akkuteknologia (pitkän matkan kapasiteetti) | Vapaa reitin valinta & koko tiestö käytettävissä Energiatehokas | Lataaminen hidasta & paikallaan Latausinfra puutteellinen Kallis Suuri tilan tarve & massa autossa |

| Vaihtoehto | Vahvuudet | Heikkoudet |
|---|---|--|
| Energia- tehokkuuden parantaminen | Ei vaadi muutoksia infraan eikä mainittavia teknologisia innovaatioita (keinoja on olemassa) | Vain pieni osaratkaisu (potentiaalia rajallisesti) |
| Suoritteen pienentäminen | Ei vaadi uutta teknologiaa eikä muutoksia infraan | Vain pieni osaratkaisu (ollakseen iso osaratkaisu pitäisi ihmisten käyttäytymisen muuttua radikaalisti) |
| Siirtyminen raide- liikenteeseen | Ei vaadi uutta teknologiaa eikä suuria muutoksia infraan | Vain (pieni) osaratkaisu (rata- verkko ei ole eikä voi olla kattava; ollakseen iso osa- ratkaisu pitäisi ihmisten käyttäytymisen muuttua radikaalisti) Massiivinen siirtyminen raiteille vaatisi lisäinvestointeja raide- ja kalustokapasiteettiin |

6.2 Raskas liikenne

Raskaan ajoneuvoliikenteen sähköistämässä tieverkon sähköistäminen on nykytiedon valossa huomattavasti keskeisemmässä roolissa kuin kevyen ajoneuvoliikenteen tapauksessa. Tämä johtuu pitkälti siitä, että raskaan kaluston liikuttaminen vaatii paljon energiaa ja sillä ajetaan usein pitkiä matkoja, eli tarvittaisiin paljon kallista akkukapasiteettia, jos sähköistetyn tieverkon tukea ei olisi. Koska muita valmiita ratkaisuja tieverkon sähköistämiseen raskasta kalustoa varten ei vielä ole kuin ajolanka tien yläpuolella – mitä pidetään esteettisesti ongelmallisena, vaihtoehtoja etsitään myös raskaalle liikenteelle. Toisaalta näihin päiviin asti raskaan liikenteen sähköistämistä on pidetty niin vaikeana tehtävänä, että uusiutuvaa dieseliä ja nykyisin myös LNG:tä/LBG:tä pidetään ehkä potentiaalisempina ratkaisuin raskaan liikenteen CO₂-päästöjen taltuttamisessa. Tulevaisuudessa kyseiset polttoaineet voitaisiin myös helposti korvata täysin vastaavilla synteettisillä polttoaineilla. Voidaankin sanoa, että raskaan liikenteen tapauksessa kilpailutilanne ei ole yhtä suosiollinen liikenteen sähköistämälle kuin kevyen ajoneuvoliikenteen tapauksessa. Myös kynnys siirtyä dieselistä sähköön voi raskaassa liikenteessä olla suurempi kuin dieselistä LNG:hen/LBG:hen. Tieverkon sähköistämisen vaihtoehtoja on arvioitu raskaan liikenteen näkökulmasta taulukossa 15.

Muihin päästövähennyskeinoihin pätee pitkälti samat vahvuudet ja heikkoudet kuin kevyen liikenteen tapauksessakin. Suoritteen pienentäminen tosin on vaikeampaa raskaan kuin kevyen ajoneuvoliikenteen osalta, koska tavarankuljetuslogistiikka on jo optimoitu aivan toisella tavalla kuin pääasiassa ihmisten logistiikka kevyessä ajoneuvoliikenteessä. Myös raiteille siirtyminen (merkittävässä määrin) on haastavampaa raskaan liikenteen osalta, koska kumipyöräkuljetus on paljon joustavampi kuljetustapa kuin raideliikenne, joka vaatisi kuitenkin lähes poikkeuksetta kumipyöräkuljetusta raiteiden kummassakin päässä.

Taulukko 15. Vaihtoehdot tieverkon sähköistämiseksi raskaan ajoneuvo-liikenteen näkökulmasta. Vahvuuksia ja heikkouksia arvioitu suhteessa tieverkon sähköistämiseen.

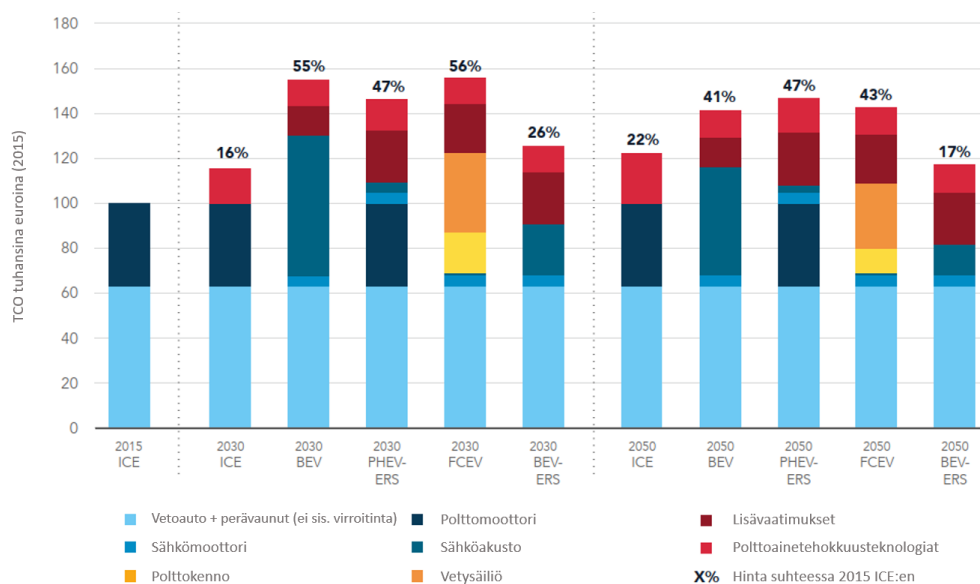
| Vaihtoehto | Vahvuudet | Heikkoudet |
|--|--|---|
| Biopolttoaineet (nykyiset) | Jakeluinfra olemassa (nestemäiset) Ajoneuvokanta olemassa (nestemäiset) Ajoneuvokanta ja -valikoima kasvaa (nesteytetty kaasu) Koko tiestö käytettävissä LNG-infraa voidaan hyödyntää myös LBG-jakelussa | Tuotantoa ei ole (juuri) mahdollista lisätä kestävästi (uusiutuva diesel) eli ei riitä yksinään nollapäästöisyyteen Raaka-aineiden niukkuus tulee johtamaan hintojen nousuun Biokaasun tuotannon heikko kannattavuus – potentiaalia kyllä olisi osaratkaisuksi, mutta tuotantoa ei synny ilman tukitoimia Jakeluinfra puutteellinen (CH ₄) Uhkana biopolttoaineiden marginalisoituminen EU:ssa? |
| Synteettiset polttoaineet (vety, metaani & diesel, levädiesel) | Raaka-ainepotentiaali periaatteessa rajaton Koko tiestö käytettävissä Voidaan hyödyntää ilmastolle ja ympäristölle haitallisia teollisia CO ₂ -päästöjä ja jätevesiä LNG-infraa voidaan hyödyntää myös synteettisen kaasun jakelussa | Tuotantoprosessi monimutkainen / kallis / vaatii paljon sähköä / hyötysuhteeltaan huono / ei vielä kaupallinen Tuotantoinfra puuttuu Jakeluinfra puuttuu (H ₂), jakeluinfra puutteellinen (CH ₄) |
| Akkuteknologia | Koko tiestö käytettävissä Energiatehokas | Lataaminen hidasta & paikallaan (ei aikaa odotella matkan varrella) Ajoneuvoja ei ole (vielä) yleisesti saatavilla Latausinfra puuttuu Kallis |
| Energiatehokkuuden parantaminen | Ei vaadi muutoksia infraan eikä mainittavia teknologisia innovaatioita (keinoja on olemassa) | Vain pieni osaratkaisu (potentiaalia rajallisesti) |
| Suoritteen pienentäminen | Ei vaadi uutta teknologiaa eikä muutoksia infraan | Vain pieni osaratkaisu (potentiaalia vähän tai ei lainkaan) |

| Vaihtoehto | Vahvuudet | Heikkoudet |
|--------------------------------|----------------------------|--|
| Siirtyminen raideliikenteeseen | Ei vaadi uutta teknologiaa | Vain pieni osaratkaisu ilman infran täydentämistä (rataverkko ei ole kattava) Massiivinen siirtyminen raiteille vaatisi lisää raide- ja kalusto-kapasiteettia, mahdollisesti myös uutta rataa (=kallista) |

6.3 Kustannusarvioita vaihtoehtoisista voiman-sirroista

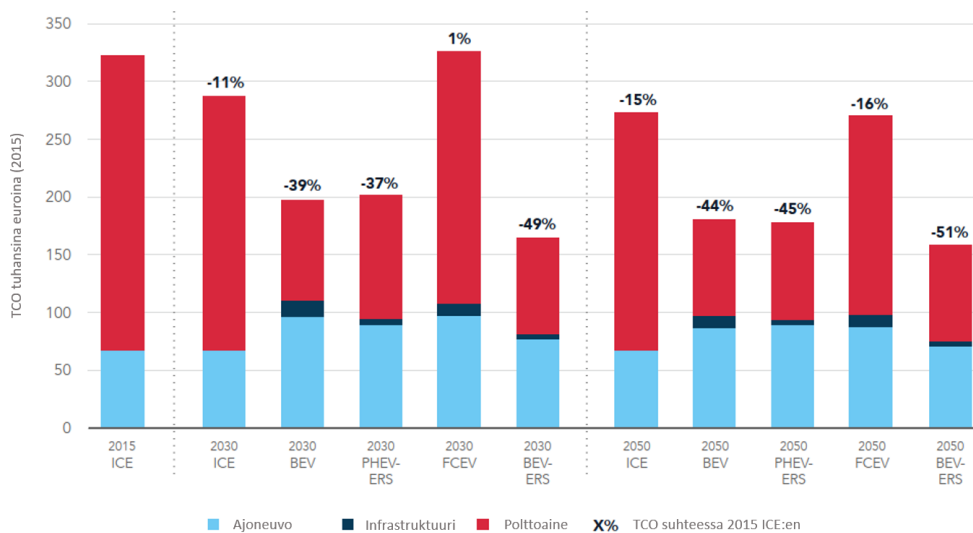
Seuraavassa on esitetty kustannusarvioita erilaisia käyttövoimia ja voimansiirto-menetelmiä hyödyntävistä raskaista ajoneuvoista suhteessa diesel-rekkoihin (ICE). Vertailussa on mukana täyssähköiset rekat (BEV), sähköistä tieverkkoa ja sähköakkuja hyödyntävät ERS-rekat (BEV-ERS), hybridirekat, jotka hyödyntävät sekä sähköistä tieverkkoa että vaihtoehtoisista voimansiirtoa (PHEV-ERS), sekä polttokennorekat (FCEV). ERS-rekkojen osalta tarkastelu rajoittui vain ajolankateknologiaan. (European Climate Foundation, 2019).

Diesel-rekkojen oletetaan kyseisen selvityksen mukaan olevan vielä vuonna 2030 hankintakustannuksiltaan edullisempia kuin täyssähkö-, ERS-, ERS-hybridi- tai polttokennorekkojen. Kyseisten dieselin kanssa kilpailevien teknologioiden kustannusten oletetaan pienenevän vuoteen 2050 mennessä teknologioiden kypsyessä ja tuotantomäärien kasvaessa, jolloin sähköistä tieverkkoa ja sähköakkuja hyödyntävien ERS-rekkojen oletetaan olevan hankintakustannuksiltaan jo edullisempia kuin diesel-rekkojen. (European Climate Foundation, 2019)



Kuva 43. Arvio raskaan ajoneuvon hankintakustannuksista vuosina 2030 ja 2050 erilaisilla voimansiirroilla verrattuna polttomoottori-ajoneuvoon (European Climate Foundation, 2019)

European Climate Foundationin selvityksessä (2019) on rekkojen hankintakustannusten lisäksi arvioitu ajoneuvojen operoinnin kokonaiskustannuksia viiden vuoden aikajaksolta huomioiden rakennettavan infrastruktuurin ja polttoaineiden kustannukset. Arvion mukaan sähköiset rekat (täyssähkö, ERS ja ERS-hybridi) olisivat jo vuoteen 2030 mennessä kokonaiskustannuksiltaan edullisempia kuin diesel-rekat, mikäli nykyinen akkuteknologian kehitystrendi jatkuu. Kyseisessä arvioissa huomionarvoista on, että täyssähköisten rekkojen infrastruktuurikustannukset ovat suuremmat kuin ERS-rekkojen. Täyssähköiset rekat vaatisivat mittavan latauspisteverkoston ja niille riittävän vahvan sähköverkon, joka mahdollistaa suuret lataustehot. Polttokennoja hyödyntävät vetyrekat arvioidaan kyseisessä selvityksessä saavuttavan diesel-rekkojen kustannustason vuoteen 2050 mennessä. Polttokennorekoissa polttoaineen eli vedyn hinnan oletetaan olevan huomattavasti kalliimpi kuin sähkönsäntä vuosina 2030 ja 2050, mikä tekee kyseisestä vaihtoehdosta muita kalliimman ratkaisun. (European Climate Foundation, 2019)



Kuva 44. Arvio raskaan ajoneuvon operoinnin 5 vuoden kokonaiskustannuksista vuosina 2030 ja 2050 erilaisilla voimansiirroilla verrattuna polttomoottoriajoneuvoon (European Climate Foundation, 2019)

Vaikka sähköisten rekkojen todetaan European Climate Foundationin selvityksessä (2019) olevan jo vuonna 2030 kokonaiskustannuksiltaan edullisempia kuin diesel-rekkojen, mainitaan selvityksessä haasteeksi ajoneuvojen korkeammat hankintakustannukset. Erityisesti pienille logistiikkatoimijoille korkeat hankintakustannukset voivat olla suuri este, mikä korostaa poliittisen päätöksenteon tärkeyttä, jolla mahdollistetaan teknologinen kehitys ja puhtaat käyttövoimat.

7 Synteesi keskeisimmistä haasteista ja hidasteista

Tieverkon sähköistykseen liittyviä haasteita ja hidasteita on pohdittu tämän raportin luvuissa 1–5. Haasteet ja hidasteet voivat liittyä mm. teknologiaan, liiketoiminta-malleihin, lainsäädäntöön tai sähköisen tieverkon vaikutuksiin tieliikenteen sujuvuuteen, turvallisuuteen ja kustannuksiin. Taulukoissa 16–20 on esitetty yhteenveto keskeisimmistä haasteista ja hidasteista sekä arvioitu niiden merkittävyyttä laadullisesti asiantuntijanäkemyksiin perustuen. Haasteiden ja hidasteiden merkittävyys riippuu oleellisesti mm. valittavasta teknologiasta.

Taulukko 16. Yhteenveto tieverkon sähköistämisen tiellä olevista keskeisimmistä teknologisista haasteista ja hidasteista Suomen olosuhteissa (5 = suuri, 1 = pieni).

| Keskeisimmät teknologiset haasteet | Merkittävyys (1–5) |
|--|--------------------|
| Teknologioiden suuret investointikustannukset | 5 |
| Induktiivisen latauksen matala latausteho | 4 |
| Ajolankojen soveltumattomuus kevyille ajoneuvoille | 4 |
| Induktiivisen latauksen sähkömagneettiset vaikutukset | 4 |
| Vaikutukset tieverkon kunnossapitoon ml. talvikunnossapito | 3–4 |
| Maisemahaitat (ajolangoissa) | 1–4 |
| Talviolosuhteiden kuten roudan vaikutukset | 3 |
| Vaihtoehtoisten teknologioiden standardien puute | 2 |
| Vaatimukset virroittimien kunnonvalvonnalle | 2 |
| Eri teknologioiden alttius vioittumiselle | 2 |

Teknologian ja liiketoimintamallien näkökulmasta keskeisin haaste liittyy infrastruktuurin suuriin investointikustannuksiin, jotka vaikuttavat toiminnan kannattavuuteen sähköistetyillä tieosuuksilla. Laajamittaisesti toteutettuna tieverkkojen sähköistäminen vaatii myös erittäin mittavaa työpanosta. Siemenarvion mukaan 2 kaistan sähköistäminen 4 000 km tieosuudella Saksassa tarkoittaisi 8 km valmistuutta tietä jokainen työpäivä kymmenen vuoden ajan ja vaatisi 1 000 työntekijää. Laajamittaiset toteutukset vaativat siis pitkää sitoutumista valittuun teknologiaan ja pitkäjänteistä suunnittelua.

Jotta toiminta sähköisillä teillä saadaan kannattavaksi, vaativat ne suuria liikennemääriä, mikä puolestaan vaatii laajoja implementointeja. Induktiivista latausta voisi hyödyntää sekä raskas että kevyt ajoneuvoliikenne, mutta siinä haasteena on raskaalle kalustolle liian matalat lataustehot. Ajolangat puolestaan mahdollistavat riittävän lataustehon, mutta ne eivät sovellu korkeutensa vuoksi kevyille ajoneuvoille, mikä rajaa käyttäjäjoukkoa pienemmäksi. Suomen olosuhteissa teknologialle asettaa myös haasteita talviolosuhteet, kuten routa, joka vaikeuttaa talvikunnossapitoa ja lisää kunnossapidon kustannuksia. Maisemahaitat voivat paikoitellen olla suuri este erityisesti ajolankavaihtoehdon implementoinnille.

Taulukko 17. Yhteenveto tieverkon sähköistämisen tiellä olevista keskeisimmistä liiketoiminnallisista haasteista ja hidasteista Suomen olosuhteissa (5 = suuri, 1 = pieni).

| Keskeisimmät liiketoimintamalliset haasteet | Merkittävyys (1–5) |
|---|--------------------|
| Teknologioiden suuret investointikustannukset | 5 |
| Sähkötieverkon epävarmat käyttäjä- ja liikennemäärät | 5 |
| Pitkä sitoutuminen valittavaan teknologiaan | 4–5 |
| Ajoneuvovalmistajien rooli ja asema | 4–5 |
| Kokemuksen puute teknologioiden implementoinnista | 3 |
| Sähkötieverkon vaikutukset muiden käyttövoimien verotukseen | 3 |
| Virroittimien jälkiasennusmahdollisuudet | 2–3 |
| Investointien vaatima julkisen sektorin tuki | 1–3 |
| Kyseessä monopolimarkkina, jota tulee reguloida | 2 |
| Käyttömaksujen vaatiman mittauksen ja laskutuksen haasteet | 1–2 |

Liiketoimintamallien näkökulmasta merkittävin haaste on edellä esitetyt suuret investointikustannukset sekä epävarmuus sähköisen tieverkon käyttäjämääristä. Sähköisen tieverkon investoinnit ovat tekniseltä pitoajaltaan pitkiä, mikä yhdistettynä niihin liittyvään tekniseen epävarmuuteen ja toisaalta kilpailevien ratkaisujen kuten akkuteknologian nopeaan kehitykseen, voi jarruttaa sähköisten tieosuuksien investointeja. Myös ajoneuvovalmistajien valinnat kehitettävistä automalleista vaikuttavat oleellisesti sähköisen tieinfran tulevaisuuteen. Yhtenä vaihtoehtona voisi olla virroittimien tehokkaiden jälkiasennusmarkkinoiden kehittyminen, jolla voitaisiin varmistaa riittävä ajoneuvokanta sähköiselle tieverkolle. Sähköiset tieverkot vaativat väistämättä julkista investointitukea, mikä voi vaikuttaa myös muiden käyttövoimien verotukseen, joka puolestaan johtaa poliittiseen keskusteluun tuettavista liikennemuodoista ja voi vaikuttaa sähköisten tieverkkojen yleistymiseen.

Taulukko 18. Yhteenveto tieverkon sähköistämisen tiellä olevista keskeisimmistä lainsäädännöllisistä haasteista ja hidasteista Suomen olosuhteissa (5 = suuri, 1 = pieni).

| Keskeisimmät lainsäädännölliset haasteet | Merkittävyys (1–5) |
|---|--------------------|
| Ajoneuvolainsäädännön muutoshitaus | 3 |
| Sähkötieverkon vaikutukset muiden käyttövoimien verotukseen | 3 |
| Kyseessä monopolimarkkina, jota tulee reguloida | 2 |
| Tiealueen käyttöön liittyvät haasteet | 2 |

Lainsäädännöllisestä näkökulmasta ei havaittu merkittäviä tekijöitä, jotka estäisivät tai hidastaisivat sähköiseen tieinfraan tehtäviä pilotteja. Laajamittaisilla toteutuksilla voi olla vaikutuksia ajoneuvolainsäädäntöön, jolloin tulee huomioida EU-tasolla tehtävät linjaukset, mikä puolestaan aiheuttaa hitautta päätöskäytännönpanoon ja voi vaikuttaa teknologioiden implementointiin. Sähköisistä tieverkoista on toteutettu kansainvälisesti vasta rajattuja demonstraatioita eikä kaikista lainsäädäntöön vaikuttavista tekijöistä ole kokemusta.

Taulukko 19. Yhteenveto tieverkon sähköistämisen tiellä olevista keskeisimmistä liikenteellisistä haasteista ja hidasteista Suomen olosuhteissa (5 = suuri, 1 = pieni).

| Keskeisimmät liikenteelliset haasteet | Merkittävyys (1–5) |
|---|--------------------|
| Sähköturvallisuusriskit | 1–5 |
| Liikenneturvallisuusriskit | 1–4 |
| Haitat ja vaikutukset pelastustyöhön | 1–4 |
| Sähkötieinfran toimintavarmuus | 2 |
| Lisääntyvän kunnossapidon vaikutus liikenteen sujuvuuteen | 2 |
| Sähköistettyjen kaistojen ruuhkautuminen | 1 |
| Vaikutukset liikenteen kehitystrendeihin | 1 |

Liikenteellisestä näkökulmasta sähköisten tieverkkojen toteutukselle ei ole tunnistettu varsinaisia esteitä, mutta sähkö- ja liikenneturvallisuuteen sekä tieverkolla tehtävään pelastustyöhön liittyy vaatimuksia, jotka voivat pahimmillaan rajoittaa toteutuksia merkittävästikin. Erityisesti Suomen olosuhteissa tiehen upotettaviin tai tienpintaan rakennettaviin johtimiin kohdistuu riskejä mm. roudan, aurausautojen ja tien urautumisen vaikutuksista. Lisäksi jännitteisiin virroittimiin liittyy sähköturvallisuusriskejä alueilla, joissa ihmisillä on pääsy virroittimien läheisyyteen.

Taulukko 20. Yhteenveto tieverkon sähköistämisen tiellä olevista keskeisimmistä päätöksentekoon liittyvistä haasteista ja hidasteista Suomen olosuhteissa (5 = suuri, 1 = pieni).

| Keskeisimmät päätöksentekoon liittyvät haasteet | Merkittävyys (1–5) |
|---|--------------------|
| Pitkä sitoutuminen valittavaan teknologiaan | 4–5 |
| Monitoimijaympäristön asettamat haasteet | 4 |
| Sähkötieverkon vaikutukset muiden käyttövoimien verotukseen | 3 |

Sähköisten tieverkkojen toteutukset koskettavat useita eri toimijoita, mikäli kyseessä ei ole rajattu esim. tietyn teollisuuslaitoksen ja terminaalin välille tehtävä sähköistys, jonka on tarkoitus palvella vain muutamaa teollista toimijaa. Monitoimijaympäristö asettaa omat haasteensa sähköisten tieverkkojen investointeihin liittyviin päätöksiin ja voi hidastaa päätöksentekoa. Muualla Euroopassa toteutuneet sähköisen tieverkon pilotit ovat tyypillisesti vaatineet valtion sijoittajaksi, jolloin väistämättä esiin nousee kysymys investoinnin rahoituksesta, joka puolestaan voi vaikuttaa muiden käyttövoimien verotukseen. Verotukselliset asiat voivat kokonaisuutena olla tekijä, joka hidastaa sähköisiin tieverkkoihin liittyvää päätöksentekoa. Kenties keskeisimpänä haasteena päätöksenteon näkökulmasta on kuitenkin sitoutuminen vielä tällä hetkellä epävarmaan teknologiaan. Kuten tämän raportin luvussa 1 todetaan, liittyy eri teknologioihin omat vahvuudet ja heikkoudet eikä ole selvää, mikä teknologia – jos mikään – tulee nousemaan muiden yläpuolelle. Lisäksi kilpailevat vaihtoehdot kuten sähköakku-, vety- ja biopolttoaineteknologiat kehittyvät vauhdilla, mikä ei kannusta sitoutumaan seuraaviksi kymmeniksi vuosiksi teknologiaan, johon liittyy epävarmuutta joko teknisestä tai taloudellisesta näkökulmasta.

Päätöksentekoon voi vaikuttaa myös se, että hyödyt elinkeinoelämän kuluihin voivat tulla 5–10 vuoden viiveellä rakentamisen aloittamisesta. Päätöksenteko vaatiikin pitkäjänteistä suunnittelua ja sitoutumista valittuun polkuun. Vertailuna tosin on todettavissa, että myös ratakankkeiden investointien takaisinmaksuajat voivat olla pitkiä.

8 Ehdotukset jatkotoimenpiteistä ja pilotoinnista

8.1 Vaihtoehdot ensimmäisille piloteille

Tämän raportin luvussa 1 todetaan sähköisten tieverkkojen vaativan systeemistä muutosta, jossa tulisi edetä asteittain pienimuotoisista ja rajatuista pilotointi- ja demonstraatiohankkeista laajempiin useiden kymmenien kilometrien pituisiin käyttöönottoprojekteihin, joita voidaan ensin toteuttaa suljettuina järjestelminä, ja sitä kautta siirtyä teknologioiden valmiusasteen kehittyessä lopulta laajoihin avoimiin järjestelmiin. Suomessa ollaan tältä osin vielä kehityksen alkupäässä eikä kokemusta sähköisistä tieverkoista ole kertynyt pienimuotoisista piloteistakaan. Luonnollista siis on pohtia, mistä ja miten pilotointi voitaisiin aloittaa.

Yleisesti pilotoinnista on todettavissa, että tämän työn kirjallisuuskatsauksen mukaisesti selkeää voittavaa teknologiaa ei tällä hetkellä ole ennustettavissa, joten pilotointia ei kannata rajata vain yhteen teknologiaan. Näin on menetelty myös Ruotsissa, jossa kaikki pilotit on tarkoitus lisäksi purkaa pilottiajanjakson jälkeen. Pilotointia suunniteltaessa onkin syytä miettiä, tuleeko järjestelmä jäämään osaksi jatkokehitettävää kokonaisuutta vai onko se kertaluontoinen kokeilu. Samalla on syytä pohtia pilottien tavoitteita. Ensimmäisten pilottien tavoitteina harvoin on taloudellinen kannattavuus vaan tekninen kokeilu ja radikaalien innovaatioiden testaaminen.

Ensimmäisten sähköisten tieverkkojen pilottien kustannusten tulee pysyä suhteellisen pieninä, joten pilotoitavat tieosuudet on oltava matkaltaan kohtuullisen lyhyitä. Tieosuuksilla tulisi olla ennakoitavat liikennemäärät ja tienkäyttäjät tiedossa, jotta voidaan varmistua sähköteiden käytöstä ja sitä kautta tärkeän kokemuksen karttumisesta. Kevyille ajoneuvoille kohdistetut pilotit eivät tällöin tule todennäköisesti kyseeseen, koska kevyiden ajoneuvojen reitit ovat huomattavasti vakiintumattomampia kuin raskaiden ajoneuvojen. Ympäristövaikutuksia ja kasvihuonekaasupäästövähenemiä tavoiteltaessa yksittäisen raskaan ajoneuvon merkitys on lisäksi kevyttä ajoneuvoa huomattavasti suurempi, jolloin pilotin vaikuttavuus on todennäköisesti raskailla ajoneuvoilla suurempi.

Yhtenä vaihtoehtona on valita pilotoitavat tieosuudet yhteistyössä esim. tiettyjen teollisten toimijoiden kanssa samalla varmistaen ajoneuvoinvestoinnit sähköiselle tieverkolle. Käyttäjiä houkutellakseen pilotin taloudelliset hyödyt on oltava selvästi tunnistettavissa tai pilotin on pitkällä aikavälillä edistettävä pilottiin osallistuvien käyttäjien liiketoimintaa muilla tavoin. Tieverkon aiheuttamat kustannukset käyttäjille tulee siis olla ennakoitavissa, mikä tarkoittaa mm. selkeää pilotointiajakajaksoa ja tukea rakennettavan infrastruktuurin ylläpidolle riittävän pitkällä aikavälillä, läpinäkyvyyttä tieverkon mahdollisiin käyttömaksuihin, selkeyttä erilaisista tukimekanismeista esim. ajoneuvohankintoihin jne.

Tässä työssä tarkastelluista case-esimerkeistä kaksi ensimmäistä eli Elijärvi-Röyttä välin teollisuuslaitos-satama-tarkastelu ja Vuosaaren satama-Järvenpää välin laajempi satamalogistiikkatarkastelu ovat sellaisia, joiden kaltaisista ympäristöistä voi löytyä myös pienemmän mittakaavan toteutusvaihtoehtoja sähköisille tieosuuksille. Satamalogistiikka ja sisämaan logistiikkaterminaalit yleisesti ovat kohteita, joihin liittyvässä liikenteessä on mahdollisuuksia sähköisten tieverkkojen pilotoinnille.

8.2 Suositukset jatkoselvitysaiheista

Sähköisten tieverkkojen investointien edistäminen vaatii pilotointia ja lisää kokemusta eri teknologioiden soveltuvuudesta Suomen olosuhteisiin. Potentiaalia teknologioiden hyödyntämiselle on erityisesti raskaassa liikenteessä. Huomioiden sähköisten tieverkkojen investointeihin liittyvä pitkä aikajänne, on suunnitelmia niiden hyödyntämiseen syytä tarkentaa tulevien vuosien aikana myös Suomessa.

Keskeinen jatkoselvitysten aihe on soveltuvien pilottikohteiden tunnistaminen. Tähän liittyen tulisi myös kartoittaa tieverkkojen sähköistämistä kiinnostuneet toimijat – sekä julkiset että yksityiset. Ensimmäisiä pilotteja toteutettaessa on myös tärkeää selvittää talviolosuhteiden vaikutukset tieverkon kunnossapitoon. Jo tehdyissä selvityksissä sekä mm. tämän hankkeen työpajassa nostettiin talviolosuhteet, kuten routa ja lumi, esiin mahdollisesti tieverkon sähköistystä rajoittavina tekijöinä, mutta talviolosuhteiden vaikutuksista ei juurikaan ole käytännön kokemusta. Kyseinen asia on merkittävä erityisesti tiehen upotettavien tai tien pintaan asennettavien teknologioiden osalta ja olisi syytä selvittää nykyistä tarkemmin.

Koska tieverkon sähköistäminen nähdään potentiaalisena keinona pienentää erityisesti raskaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä, olisi soveltuvaa laatia alustava karkean tason suunnitelma laajamittaisemmallekin tieverkkojen sähköistämiseksi, jossa tunnistettaisiin aikataulu- ja kustannusraamit, joilla sähköistystä tulisi tai olisi mahdollista edistää. Laajamittainen sähköistys vaatii suuria investointeja – esimerkkinä tässä työssä tarkastellun case-esimerkin, jossa kaikki maanteiden pääväylät sähköistettäisiin, kustannusarvioksi haarucoitiin 11–23 mrd.€. Kyseisen kokoluokan investoinnit vaativat vääjäämättä vuosien valmistelevan työn ja niiden implementointi ajoittuu pitkälle aikajaksolle. Huomioiden Suomen valtion hiilineutraalisuustavoite vuoteen 2035 mennessä ja liikenteen päästöjen puolittaminen vuoteen 2030 ja nollaaminen vuoteen 2045 mennessä, voidaan todeta, että merkittäviä päästövähenemäi aikaansaavilla toimenpiteillä on kiire. Tästä syystä olisi tärkeää tunnistaa, mikä rooli tieverkkojen sähköistyksellä voi olla koko valtion päästövähenemistavoitteen saavuttamisessa. Implementointisuunnitelmassa olisi hyvä myös selvittää yleisesti rahoitusmalleja ja niihin liittyen valtion ja julkisen sektorin roolia investointien rahoituksessa.

Osassa kirjallisuuslähteitä nostettiin esiin mahdollisuus liittää esim. tuulivoimaloita sähköistä tieverkkoa varten rakennettavaan sähköverkkoon. Yksi jatkoselvityksen aihe olisikin tarkastella sähköisten tieverkkojen rinnalla toteuttavien hankkeiden mahdollisuudet ja synergiat eri hankkeiden välillä. Vaihtoehtona voi esim. olla tiedonsiirto- ja käsittelykapasiteetin lisääminen tieverkoille erilaisten sensorien ja laitteiden muodossa esim. onnettomuuksien ja tien kunnon seurantaan.

Kehitystyö sähköisten tieverkkojen teknologioiden ja liiketoimintamallien osalta etenee jatkuvasti esim. Saksassa ja Ruotsissa, joilla on jo aiheeseen liittyvää yhteistyötä. Suomi on markkinana pieni, joten erityisen tärkeää olisi löytää yhteiseurooppalaisia ratkaisuja, joihin liittyvä kehitystyö on taattu myös jatkossa. Jatkon kannalta olisi luontevaa selvittää yhteistyömahdollisuudet sähköisissä tieverkoissa jo muutenkin tärkeiden kauppakumppanien Ruotsin ja Saksan kanssa.

Lähteet

Auvinen, K. 2019. Kohti fossiilivapaata Suomea teknologiamurroksessa. Saatavilla: <https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/JulkaisuMetatieto/Documents/EDK-2019-AK-237332.pdf>

CollERS. 2019. Overview of ERS concepts and complementary technologies. Saatavilla: <https://hafenstrom.com/dynamic-electric-road-system-to-be-built-in-sweden>

Connolly. 2017. *Economic viability of electric roads compared to oil and batteries for all forms of road transport*. Energy Strategy Reviews, vol. 18, pp. 235-249.

Ekroos, A. & Seppälä, J. 2018. Maantie- ja rautatiealueen toissijainen käyttö. Rakennelmien sijoittamisen menettelyiden oikeudellinen tarkastelu. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 3/2018.

Electreon. 2020. Technology. Saatavilla: <https://www.electreon.com/technology>

Elonroad. 2020. How it works. Saatavilla: www.elonroad.com

Elways. 2020. Our Solution. Saatavilla: <https://elways.se/our-solution/>

Energiavirasto. 2019. Sähkön toimitusvarmuus vuonna 2019. Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12722768/Raportti-s%C3%A4hk%C3%B6n-toimitusvarmuus-2019.pdf/9d7138aa-8893-97e3-338d-a3559edb0c9c/Raportti-s%C3%A4hk%C3%B6n-toimitusvarmuus-2019.pdf>

European Climate Foundation. 2019. Trucking into a Greener Future.

EY. 2018. Business models and financing for the development of electric roads in Sweden. Saatavilla: https://www.trafikverket.se/contentassets/445611d179bf44938793269fe58376b6/dokument/affarsmodeller-elvagar_slutrapport-180821-_en-final-190320.pdf

EY. 2019. Roles, actor relations, and risks in the electric roads market. Saatavilla: https://www.trafikverket.se/contentassets/445611d179bf44938793269fe58376b6/dokument/the_electric_roads_market-roles_actor_relations_and_risks.pdf

Geels, F. W. 2012. A socio-technical analysis of low-carbon transitions: introducing the multi-level perspective into transport studies. *Journal of transport geography*, 24, 471-482.

Gustavsson, M. G. H., Börjesson, C., Kenani Dahlgren, H., Moberger, L., and Petersson, J. 2015. Feasibility study on payment systems for electric roads", RISE Viktoria.

LVM. 2018a. *Liikenne- ja viestintäministeriön asetus maanteiden ja rautateiden pääväylistä ja niiden palvelutasosta*. Perustelumuiotio. Saatavilla: https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/68f47823-caf3-428d-b9a5-cf7167d3f3bb/65f4db36-2a3d-447b-95ba-165f02c80b1f/MUISTIO_20181121071955.pdf

LVM. 2018b. Toimenpideohjelma hiilettömään liikenteeseen 2045. Saatavilla: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161210/LVM_13_18_Toimenpideohjelma%20hiilettomaan%20liikenteeseen%202045%20Liikenteen%20ilmastopolitiikan%20tyoryhman%20loppuraportti.pdf

Nieuwenhuis, P., & Wells, P. 2012. New Business Models for Alternative Fuel and Alternative Powertrain Vehicles: An Infrastructure Perspective, Background paper for the IFP/IEA. In ITF Workshop on "Developing infrastructure for alternative transport fuels and power-trains to (Vol. 2020, pp. 2030-2050).

Olsson, O. 2013. Slide-in Electric Road System. RISE Viktoria.

Petterson et al. 2017. National roadmap for electric road systems. Saatavilla: https://www.trafikverket.se/contentassets/445611d179bf44938793269fe58376b6/dokument/national_roadmap_for_electric_road_systems_20171129_eng.pdf

PIARC. 2018. Electric Road Systems: A Solution for the Future? Challenges in ERS Implementation. A PIARC Special Project 2018. Saatavilla: https://www.trafikverket.se/contentassets/2d8f4da1602a497b82ab6368e93baa6a/piarc_elvga.pdf

Qualcomm. 2017. Qualcomm Demonstrates Dynamic Electric Vehicle Charging. Saatavilla: <https://www.qualcomm.com/news/releases/2017/05/18/qualcomm-demonstrates-dynamic-electric-vehicle-charging>

Siemens. 2017. Wickert B., eHighway, Electrified heavy duty road transport, Siemens AG.

SINTEF. 2018. Suul J.A. & Guidi G., Technology for dynamic on-road power transfer to electric vehicles, Overview and electro-technical evaluation of the state-of-the-art for conductive and inductive power transfer technologies, Work package 2, Electric Infrastructure for Goods Transport (ELinGO), SINTEF Energy Research (2018)

Sundelin, H.; Gustavsson, M.G.H.; Tongur, S. 2016. The maturity of electric road systems. In Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles and International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC 2016), Toulouse, France, 2–4 November 2016.

Sundelin, H., Mellquist, A.-C., Linder, M., Gustavsson, M., Börjesson, C., and Pettersson, S. 2017. Feasibility study of business ecosystems for electric roads", RISE Viktoria.

Taljegard, M., Thorson, L., Odenberger, M., Johnsson, F. 2019. Large-scale implementation of electric road systems: Associated costs and the impact on CO2 emissions.

The Swedish Association for Road Transport Companies. 2016. The road haulage industry with areas of activity.

Tilastokeskus. 2020. Energian hankinta ja kulutus. Saatavilla: <https://tilastokeskus.fi/til/ehk/>

Tongur, S. 2018. The role of business models in the transition to Electric Road Systems. Shift: Sustainable Horizons in Future Transport.

Tongur, S., & Sundelin, H. 2016. The electric road system transition from a system to a system-of-systems. In Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), Asian Conference on (pp. 1-8). IEEE.

Traficom 2020. Tyyppihyväksyntä. Saatavilla:

<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/tieliikenne/tyyppihyvakysynta>

Trafikverket. 2017. National roadmap for electric road systems. Saatavilla:

https://www.trafikverket.se/contentassets/445611d179bf44938793269fe58376b6/dokument/national_roadmap_for_electric_road_systems_20171129_eng.pdf

Trafikverket. 2019. National roadmap for Dynamic Electrified road systems, ERS. PowerPoint presentation 2019-09-12.

Volvo. 2013. [https://www.media.volvocars.com/uk/en-](https://www.media.volvocars.com/uk/en-gb/media/pressreleases/134930/volvo-car-group-completes-successful-study-of-cordless-charging-for-electric-cars)

[gb/media/pressreleases/134930/volvo-car-group-completes-successful-study-of-cordless-charging-for-electric-cars](https://www.media.volvocars.com/uk/en-gb/media/pressreleases/134930/volvo-car-group-completes-successful-study-of-cordless-charging-for-electric-cars)

VTT. 2020. Tiedoksianto Juhani Laurikko 26.3.2020.

Väylä. 2020a. Pääväyläverkko. Verkkosivu. [Vierailtu 8.5.2020]. Saatavilla:

<https://vayla.fi/liikennejarjestelma/paavaylaverkko>

Väylä. 2020b. Tieliikenteen kausivaihtelu. Saatavilla:

https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/176327/VJ%2012-2020_978-952-317-757-4.pdf?sequence=1

Wang, Q., Baalsrud Hauge, J., Meijer, S. 2019. Adopting an Actor Analysis Framework to a Complex Technology Innovation Project: A Case Study of an Electric Road System.

Öko-Institut. 2018. Oberleitungs-Lkw im Kontext weiterer Antriebs- und Energieversorgungsoptionen für den Straßengüterfernverkehr.



Väylävirasto
Trafikledsverket

ISSN 2490-0745
ISBN 978-952-317-794-9
www.vayla.fi