

Juho Elovaara

# RASKAAN LIIKENTEEN SÄHKÖISTÄMINEN

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunnan tiedekunta  
Tarkastaja: Pertti Järventausta  
04/2024

# TIIVISTELMÄ

Juho Elovaara: Raskaan liikenteen sähköistäminen  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta, Sähkötekniikka  
Huhtikuu 2024

---

Raskaan liikenteen kuljetusten tarve ja volyymi ovat kasvussa lähitulevaisuudessa. Samaan aikaan tavoitteena on vähentää kuljetussektorin kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi. Raskas tieliikenne on liikennesektorin suurin saastuttaja, minkä vuoksi on kasvava tarve vaihtoehtoisille, vähäpäästöisemmille voimanlähteille. Raskaan liikenteen vaatimukset voimanlähteille eroavat olennaisesti henkilöliikenteen vaatimuksista ja vaihtelevat eri käyttötarkoituksen mukaan. Lisäksi infrastruktuurin tarpeet poikkeavat kullakin käyttötarkoituksella ja ajoneuvoluokalla.

Työ on kirjallisuuskatsaus, jossa tarkastellaan aluksi raskaan liikenteen kehitystä ja lähitulevaisuuden näkymiä. Työssä tutustutaan tällä hetkellä käytössä oleviin dieselmoottorin sisältämiin voimanlähteisiin ja syihin niiden hallitsevaan asemaan. Katsauksessa käydään läpi kirjallisuudessa yleisimmin esitellyt vaihtoehtoiset käyttövoimat ja tarkastellaan niitä käyttöpotentiaalin, kustannusten sekä infrastruktuurin kehittämisen ja rakentamisen näkökulmista. Lopuksi tarkastellaan lyhyesti raskaan liikenteen sähköistämisen energiantarpeita ja vaikutuksia sähköverkkoon vertaillen eri ratkaisuja. Tarkastellaan myös, miten sähköverkko ja sen kehitys voi vaikuttaa laatusinfrastruktuurin rakentamiseen.

Kaikki työssä tarkastellut voimalähteet on todettu kirjallisuudessa tai pilotoitihankkeissa käytökelpoisiksi ratkaisuisiksi. Työssä tarkasteltavat sähköistysratkaisut ovat akkukäyttöiset ajoneuvot, polttokennokäyttöiset ajoneuvot ja sähköistetyt tiet. Vaihtoehtoiset voimanlähteet ovat eri kehitysvaiheissa, mutta niillä kaikilla on merkittävää potentiaalia. Suurimmat esteet käyttöönotolle liittyvät infrastruktuurin kehittämiseen ja rakentamiseen. Uusien käyttövoimien implementointi koko liikennesektorille edellyttää merkittäviä investointeja.

Tarkastelussa havaittiin, että akkukäyttöisten ajoneuvojen sekä sähköistettyjen teiden potentiaali ja kustannusperusteinen kilpailukyky ovat korkeammalla tasolla kuin yleisesti oletetaan. Näiden käyttökustannusten arvioidaan olevan hyvin kilpailukykyiset dieselmoottoreihin verrattuna jo lähitulevaisuudessa. Polttokennoajoneuvojen kilpailukyky riippuu merkittävästi saatavilla olevan vedyn hinnasta. Nykyiset arviot vedyn hinnasta eivät tee polttokennoajoneuvoista kustannustehokasta vaihtoehtoa, mutta niiden käyttöpotentiaali on muita sähköistettyjä ajoneuvoja huomattavasti suurempi. Joitain raskaan liikenteen pitkiä reittejä tai raskaita kuormia ei voida suorittaa akkukäyttöisillä ajoneuvoilla tai sähköistettyjä teitä hyödyntäen. Näin ollen polttokennoajoneuvoille saattaa löytyä osuus raskaasta liikenteestä, jota ei voida sähköistää muilla keinoin. Käyttöönottoa hidastaa merkittävästi infrastruktuurin puute, jonka kehittäminen ja rakentaminen on kallista vähäisen käytön vuoksi.

Avainsanat: Raskas liikenne, Sähköverkot, Sähkötiet, Sähköinen liikenne

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. RASKAS TIELIIKENNE NYKYÄÄN JA ENNUSTEET LÄHITULEVAISUUDESTA.	2
2.1 Raskaan tieliikenteen määrittely .....	2
2.2 Raskaan tieliikenteen tilastot ja ennusteet .....	3
2.3 Raskaan tieliikenteen käyttövoima nykyään.....	4
3. RASKAAN LIIKENTEEN SÄHKÖISTÄMISEN TEKNOLOGIAT .....	5
3.1 Akkuteknologiat .....	5
3.2 Polttokennoteknologiat .....	6
3.3 Sähköistetyt tiet .....	7
3.3.1 Ajojohtimet.....	8
3.3.2 Kontaktikisko.....	9
3.3.3 Induktiivinen siirto .....	10
4. POTENTIAALI JA KUSTANNUKSET .....	11
4.1 Sähköisten ajoneuvojen käyttöpotentiaali .....	11
4.1.1 Akkukäyttöisten ajoneuvojen käyttöpotentiaali .....	11
4.1.2 Sähköistettyjen teiden käyttöpotentiaali .....	12
4.2 Hankinta ja käyttökustannukset .....	13
4.3 Infrastruktuurin rakentaminen .....	14
5. RASKAAN TIELIIKENTEEN SÄHKÖISTÄMISEN VAIKUTUS SÄHKÖVERKKOON JA SÄHKÖNTUOTANTOON.....	16
5.1 Energian kulutus ja vaikutus tuotantoon.....	16
5.2 Vaikutukset sähköverkkoon .....	17
6. YHTEENVETO.....	18
LÄHTEET .....	19

## LYHENTEET

BEV	Battery electric vehicle (Akkukäyttöinen sähköajoneuvo)
CHV	Catenary hybrid vehicle (Johdin käyttöinen hybridi ajoneuvo)
FCEV	Fuel cell electric vehicle (Polttokenno käyttöinen ajoneuvo)
LNG	Liquefied natural gas (Nesteytetty maakaasu)
kWh	Kilowattitunti
kW	Kilowatti

# 1. JOHDANTO

Tulevaisuudessa fossiilisten polttoaineiden korvaaminen edellyttää siirtymistä vaihtoehtoisten energianlähteiden käyttöön. Nykyinen sähköntuotanto ei ole täysin päästötöntä, mutta kehitys etenee kohti entistä vähäpäästöisempiä ja kestävämpiä energiantuotantomuotoja. Liikennesektorin on mukauduttava käyttämään näitä päästöttömiä energialähteitä, ja tämä muutos on välttämätön erityisesti raskaan liikenteen osalta, mikä vaikuttaa merkittävästi koko liikennesektorin päästötasoihin.

Kuorma-autojen kuljettamien tavaroiden määrä säilyy edelleen merkittävänä tekijänä tulevaisuuden liikenteessä. Kuljetussuoritteet ovat osoittaneet lievää kasvua, ja tulevaisuudessa on ennustettavissa edelleen lisääntymistä kuljetussuoritteiden osalta lyhyellä aikavälillä ja pysyvän vähintään nykyisellä tasolla ainakin vuoteen 2060 saakka. [11] Kuljetusajoneuvojen koot ovat kasvaneet jatkuvasti vuodesta 2013 lähtien, kun voimaan tulleet käyttöasetukset mahdollisti aiempaa suuremmat ajoneuvoyhdistelmät. [21]

Raskaan liikenteen päästöt muodostivat vuonna 2020 noin kolmanneksen kotimaan liikenteen kokonaispäästöistä. Tulevaisuuden ennusteiden mukaan raskaan liikenteen sähköistäminen etenee hitaammin verrattuna henkilöliikenteeseen. [12] Näin ollen on tärkeää kiinnittää erityistä huomiota raskaan liikenteen kestävä kehityksen strategioihin ja teknologisiin innovaatioihin, jotta voidaan lieventää kuljetussektorin ympäristövaikutuksia ja edistää kestävä kehitystä.

Tämä tutkimus on kirjallisuuskatsaus, jossa tarkastellaan raskaan liikenteen nykytilannetta sähköistymisen näkökulmasta. Tutkimuksen toisessa luvussa käsitellään raskaan liikenteen erityispiirteitä koskien kuljetuksia ja niihin liittyviä tarpeita. Kolmannessa luvussa tarkastellaan erilaisia teknologioita, jotka ovat käytössä tai testausvaiheessa raskaan liikenteen sähköistämiseksi. Neljännessä luvussa tutkitaan näiden erilaisten teknologioiden vaikutuksia sähköverkkoon ja energiantuotantoon. Tarkoituksena on luoda kattava kuva siitä, miten raskas liikenne voisi siirtyä kohti sähköistymistä ja mitä vaikutuksia tällä olisi sähköjärjestelmään ja energiantuotantoon.

## 2. RASKAS TIELIIKENNE NYKYÄÄN JA ENNUS- TEET LÄHITULEVAISUUDESTA

Raskaan liikenteen tarpeet ovat erilaiset verrattuna henkilöliikenteeseen. Ajoneuvoilta tarvitaan suurta kantavuutta ja pitkiä päivittäisiä ajomääriä. Dieselmoottorit ovat olleet raskaan tieliikenteen merkittävin voimanlähde ja diesel tulee olemaan merkittävin voimanlähde pitkälle tulevaisuuteen.

### 2.1 Raskaan tieliikenteen määrittely

Työssä keskitytään tavaraliikenteeseen ja tarkemmin N2- ja N3-luokana kuorma-autoihin, jotka on määritelty Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksessa 2018/858. Siinä määritellään N2-luokan ajoneuvoiksi kokonaismassaltaan enemmän kuin 3500 kg, mutta enintään 12 000 kg. N3-luokan kuorma-autoiksi määritellään 12 000 kg ylittävät ajoneuvot. N2- ja N3-luokan ajoneuvoihin liittyy olennaisesti niihin liitettävät perävaunut ja niistä syntyvät yhdistelmät. Ajoneuvo yhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa on EU valtioissa sisäisesti viranomaisen päätettävissä. Suomessa yhdistelmän suurin sallittu kokonaismassa riippuu akselimäärästä ja on nykyään enimmillään 76 tonnia 11-akselisessa yhdistelmässä. Eri maiden määräykset ja lainsäädäntö poikkeaa merkittävästi toisistaan. Työssä tarkastellaan lähteitä useasta eri maasta, joten tämä pitää ottaa huomioon tulintoja tehdessä. [26] [5]

Suomessa raskaan liikenteen ajoneuvoa kuljettaville on asetettu ajo- ja lepoaikamääräyksiä, jotka vaikuttavat myös merkittävästi ajoneuvojen kehitykseen. Vuorokauden aikana ajotuntien määrä ei saa ylittää yhdeksää tuntia tai maksimissaan kymmenen tuntia kahdesti kalenteriviikon aikana. Kuljettajan on pidettävä neljän ja puolen tunnin jälkeen 45 minuutin tauko. Lisäksi on säädetty viikon aikana ajettavien tuntien määrä ja vuorokausilevon määrä, mutta ne eivät ole ajoneuvojen kehityksen kannalta yhtä merkittävät säädökset. Kehitettävien ajoneuvojen kantama tulisi siis vastata vähintään neljän ja puolen tunnin ajoa maksimikuormituksella ja 45 minuutin lataustehon tai tankkaamisen vastaavasti tätä kapasiteettia. Vaihtoehtoisesti 9 tunnin käyttöaikaa ilman lataus tai tankkaus mahdollisuutta tauolla. Ylimääräisten lataus tai tankkaus taukojen pitäminen on mahdollista, mutta heikentää ajoneuvon käyttöastetta. [23]

## 2.2 Raskaan tieliikenteen tilastot ja ennusteet

Liikenne- ja viestintäviraston tuottamassa liikenne-ennusteessa on analysoitu liikenne sektorin kehitystä. Liikenne-ennusteessa liikennesuoritteita ennustettiin ajoneuvoluokittain ja tuloksista nähdään, että raskaiden ajoneuvojen luokissa ajosuoritteet ovat pienessä kasvussa tai vähintään vuoden 2021 tasolla vuoteen 2060 asti. [11] Raskaan liikenteen sektorin tarve tulee siis olemaan vähintään nykyisellä tasolla aikavälillä, jolla raskaan liikenteen päästöjen tulisi pienentyä merkittävästi.

**Taulukko 1: Raskaiden ajoneuvojen suorite ennusteet (milj. ajon.km / v) [11]**

Vuosi	Ajoneuvoyhdistelmät	Kuorma-autot ilman perävaunua
2021	1 877	1 419
2030	2 027	1 544
2040	2 076	1 582
2050	2 041	1 555
2060	2 000	1 524

Ajoneuvokannan kehitystä arvioitiin kahdella skenaariolla, WEM (With Existing Measures) ja WAM (With Additional Measures). WEM-skenaario on tehty voimassa olevien päätösten mukaan ja WAM-skenaario tehty tavaraliikenteen päästövähennystarpeen mukaan. [11] Tieliikenne on vastuussa suurimmasta osasta kasvihuonekaasupäästöistä kuljetussektorilla EU:ssa. Vuonna 2021 raskas liikenne tuotti 76 % kaikista kuljetussektorin päästöistä, jonka vuoksi on määritelty tarpeellinen WAM-skenaario, jolla tieliikenteen päästöt saataisiin tavoitteisiin. [6]

**Taulukko 2: Liikennekäytössä olevien ajoneuvojen ennuste WEM-skenaariossa [11]**

WEM-skenaario	2020	2030	2040	2045
Perävaunuttomat kuorma-autot, diesel	69 399	73 702	77 857	78 477
Perävaunuttomat kuorma-autot, kaasu	123	1 046	2 792	3 706
Perävaunuttomat kuorma-autot, sähkö (+vety)	13	525	1 756	2 477
<b>Perävaunuttomat kuorma-autot, yhteensä</b>	<b>69 535</b>	<b>75 274</b>	<b>82 405</b>	<b>84 660</b>
Perävaunulliset kuorma-autot, diesel	265 535	28 037	276 634	26 422
Perävaunulliset kuorma-autot, kaasu	20	631	2 553	4 014
Perävaunulliset kuorma-autot, sähkö (+vety)	23	356	1 159	1 697
<b>Perävaunulliset kuorma-autot, yhteensä</b>	<b>27 009</b>	<b>29 023</b>	<b>31 347</b>	<b>32 134</b>

**Taulukko 3: Liikennekäytössä olevien ajoneuvojen ennuste WAM-skenaariossa [11]**

WAM-skenaario	2020	2030	2040	2045
Perävaunuttomat kuorma-autot, diesel	69 399	65 479	50 785	43 115
Perävaunuttomat kuorma-autot, kaasu	123	4 636	14 820	19 662
Perävaunuttomat kuorma-autot, sähkö (+vety)	13	4 847	17 155	22 480
<b>Perävaunuttomat kuorma-autot, yhteensä</b>	<b>69 535</b>	<b>74 962</b>	<b>82 760</b>	<b>85 257</b>
Perävaunulliset kuorma-autot, diesel	265 535	28 050	27 495	26 324
Perävaunulliset kuorma-autot, kaasu	20	1 088	3 831	5 357
Perävaunulliset kuorma-autot, sähkö (+vety)	23	217	951	1 522
<b>Perävaunulliset kuorma-autot, yhteensä</b>	<b>27 009</b>	<b>29 356</b>	<b>32 277</b>	<b>33 202</b>

WEM-skenaariossa sähköisten ajoneuvojen kehitys on hyvin maltillista. WAM-skenaariossa sähköisten kevyempien perävaunuttomien kuorma-autojen kehitys on merkittävästi voimakkaampaa. Nykyinen lainsäädäntö ei siis velvoita raskaan liikenteen sähköistämiseen, mutta nähdään tarve sähköistymiselle, jotta päästötavoitteisiin päästään.

### 2.3 Raskaan tieliikenteen käyttövoima nykyään

Raskaan tieliikenteen käytössä diesel on huomattavasti yleisin energiamuoto. Suhteellisen halpa diesel on mahdollistanut raskaan liikenteen kilpailukykyisen toiminnan rautatieliikenteen ohella raskaisiin pitkän matkan kuljetuksiin. Dieselin hyötyjä on ollut halpa hinta, suuri energiatiheys ja halpa infrastruktuuri. Dieselin energia hyödynnetään polttomoottorin avulla.

Dieselmoottorit ovat bensamoottoria energiatehokkaampia, kestävämpiä ja yksinkertaisempia. Dieselin käytöstä polttomoottorissa syntyy hiilidioksidiä, typen oksideja ja hiukkaspäästöjä. Bensiinimoottoriin verrattuna hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät, kun taas typpioksiidi- ja hiukkaspäästöt suurempia. Jälkimmäisiä vähennetään moderneissa dieselmoottoreissa hiukkassuodattimilla ja AdBlue-järjestelmillä. Dieselmoottorin toimintaperiaate ei sinällään ole muuttunut historian aikana, mutta moottorit ovat kehittyneet merkittävästi. Tehonsiirto dieselkäyttöisissä ajoneuvoissa koostuu moottorista, kytkimestä ja vaihteistosta, jotta moottoria voidaan ajaa sille parhaalla tehoalueella. Silti dieselkäyttöisten ajoneuvojen energia tehokkuus on vain noin 23 % luokkaa. [2]



## 3. RASKAAN LIIKENTEEN SÄHKÖISTÄMISEN TEKNOLOGIAT

Raskaan liikenteen sähköisten ajoneuvojen kehitys tapahtuu kolmen erilaisen teknologisen ratkaisun avulla: akkukäyttöiset ajoneuvot, vetykäyttöiset ajoneuvot, sähköistetyt tiet ja sähköpolttoaineet. Akkukäyttöiset ajoneuvot johtavat tällä hetkellä henkilöliikennesektorilla, mutta raskaanliikenteen sektorilla energialähteen tarpeet poikkeavat merkittävästi.

Henkilöliikenteessä akkukäyttöiset ajoneuvot ovat saavuttaneet laajempaa hyväksyntää, johtuen osittain niiden soveltuvuudesta lyhyen matkan liikenteeseen, käytettävissä olevasta latausinfrastruktuurista ja ajoneuvomallien laajasta saatavuudesta sekä kilpailusta. Raskaassa liikenteessä, vetykäyttöiset ajoneuvot nousevat mukaan kilpailuun, sillä ne tarjoavat pidempiä toimintamatkoja ja mahdollistavat nopeamman tankkauksen, mikä on kriittistä pitkän matkan kuljetuksissa. Sähköistetyt tiet kilpailevat myös raskaanliikenteen sektorilla tarjoamalla samoja hyötyjä akkukäyttöisiin ajoneuvoihin verrattuna.

Näiden teknologinen jakautuminen osoittaa tarvetta tunnistaa ja huomioida eri liikennemuotojen ainutlaatuiset tarpeet ja suosia kullekin liikennemuodolle optimaalisia ratkaisuja. Kilpailu sähköistysstrategioiden välillä edellyttää syvällistä ymmärrystä erilaisten liikennemuotojen erityisvaatimuksista ja teknologisten ratkaisujen soveltuvuudesta kyseisiin käyttöympäristöihin. Erityisesti raskaan tieliikenteen käyttöympäristö on moninainen ja vaativampi verrattuna henkilöliikenteen ympäristöön, mikä asettaa lisähaasteita teknologian kehittämislle ja soveltamiselle.

### 3.1 Akkuteknologiat

Akkukäyttöisissä ajoneuvoissa energia varastoidaan akustoon, joka asennetaan ajoneuvoon. Akun energiaa käytetään sähkömoottorin tai -moottoreiden käyttämiseen. Ajoneuvon sähkömoottoreita voidaan käyttää myös liike-energian talteenotossa jarruttamalla moottorin avulla. Akkukäyttöisten ajoneuvojen hyötyjä ovat hiljaisempi ääni, päästötön toiminta ja hyvä suorituskyky. Akkukäyttöisten ajoneuvojen ongelmana yleisesti pidetään menetettyä kuljetuskapasiteettia, jota ajoneuvon akun paino vähentää. [15]

Yleisin akkukäyttöisten ajoneuvojen akkutyyppe on litiumioni akku. Litiumioni akulla on hyvä energiatiheys, hyvä energia tehokkuus ja käyttöikä. Akkukäyttöisten ajoneuvojen energia tehokkuus on arvioitu olevan noin 68 %, joka on diesel ajoneuvoja merkittävästi suurempi. [2]

Ajoneuvoissa käytössä on kaksi rakenteellisesti poikkeavaa topologiaa. Ensimmäisessä ratkaisussa sähkömoottori korvaa perinteisen polttomoottorin sille tyypillisessä rakenteessa. Moottorin teho siirretään keskitetysti vaihteiston ja akselin kautta renkaille. Toisessa vaihtoehdossa hyödynnetään sähkömoottorin eroa perinteisiin polttomoottoreihin, joka mahdollistaa useamman moottorin käytön saman aikaisesti. Näin tehon tuotanto hajautetaan moottorien välille ja moottoreilla syötetään tehoa erikseen renkaille. Hajautetussa rakenteessa voidaan käyttää erilaisia ratkaisuja, kuten suoraa syöttöä moottoreilta tai yhdistettynä vaihteistoihin. Modernit sähkömoottorien ohjausteknologiat ovat mahdollistaneet moottoreiden elektronisen ohjauksen niin, että hajautetut ratkaisut ovat kustannustehokkaita ja käytännöllisiä. [29]

Tutkimuksissa on vertailtu akkukäyttöisten kuorma-autojen voimanlähteitä ja voimansiirtoa. Tutkimuksessa vertailtiin vähintään prototyyppi vaiheessa olevia sähköisiä kuorma-autoja julkisesti saatavilla olevien tietojen perusteella. Tutkimuksen tulosten perustella arvioitiin, että keskitetty voimansiirto on energiatehokkaampi ratkaisu. Keskitetyn voimansiirron vahvuutena on mahdollisuus käyttää moottoria tehokkaammin vaihteiston avulla. Hajautettuun ratkaisuun vaihteistojen lisääminen on monimutkaisempaa. Toisaalta tutkimuksessa arvioitiin, että asetelma voi muuttua sillä hajautettu voimansiirto on vielä kehitysvaiheessa ja tutkimuksessa tarkastellut ajoneuvot eivät olleet massatuotannossa. [30]

### **3.2 Polttokennoteknologiat**

Vedyn hyödyntämistä uusiutuvan energian varastointimenetelmänä harkitaan monilla eri aloilla sen joustavuuden vuoksi. Vedyn käyttö energianlähteenä toimii polttokennojen avulla. Polttokenno tuottaa sähköenergiaa sähkökemiallisessa prosessissa. Polttokenno koostuu akun tavoin anodista ja katodista. Anodissa polttoaine hapettuu ja luovutettu elektroni kulkee sähköpiirin kautta katodille tuottaen energiaa. Polttokennoon ei varata energiaa kuten akkuihin, joten polttokenno käyttöiset ajoneuvot tarvitsevat myös pienen akun, jolla vastataan energian tarpeen muutoksiin ja jonka avulla polttokennoa voidaan käyttää tehokkaammalla alueella. Tarvittava akku on kuitenkin suhteellisen pieni verrattuna akkukäyttöisiin ajoneuvoihin. Vedyllä toimivan polttokennon reaktiossa muodostuva jäännöstuote on vesi, mikä tekee vedystä erityisen puhtaan energiamuodon. Vaikka siirtymävaiheessa vetyä ei tuotettaisi puhtaasti uusiutuvalla energialla, päästöjä ei synny liikenteessä vaan keskitetysti tuotantolaitoksissa. Tämä piirre tekee vedystä houkuttelevan vaihtoehdon ympäristöystävällisen energiantuotannon kannalta. [9]

Polttokenokäyttöiset ajoneuvot on todettu konseptina toimivaksi raskaan tieliikenteen käyttökohteissa. Akkuihin verrattuna vedyn suurempi energiatiheys mahdollistaa suuremman kantavuuden ja kantaman ajoneuville. Vedyn varastointiin ajoneuvossa tarvitaan huomattavasti enemmän tilaa dieseliin verrattuna, mutta raskaiden ajoneuvojen tapauksessa tila ei yleensä ole ongelma vaan olennaisempaa on varastoidun energian massa. Akkuihin verrattuna vedyn varastointi on kuitenkin selvästi tehokkaampaa. Polttokennojen hyödyt korostuvat pitkän matkan kuljetuksissa, joissa energiatehokkuus ja pitkä toimintasäde on keskeinen osa suorituskykyä. [1] Vetykäyttöiset ajoneuvot hyötyvät akkukäyttöisten ajoneuvojen tapaan monista samoista hyödyistä kuten jarrutusenergian talteenotosta ja hyvästä suorituskyvystä. Polttokenokäyttöisten ajoneuvojen hyötysuhde on arvioitu olevan noin 45 % luokkaa, joka on merkittävästi enemmän kuin dieseliillä mutta vähemmän kuin akkukäyttöisillä ajoneuvoilla. [2]

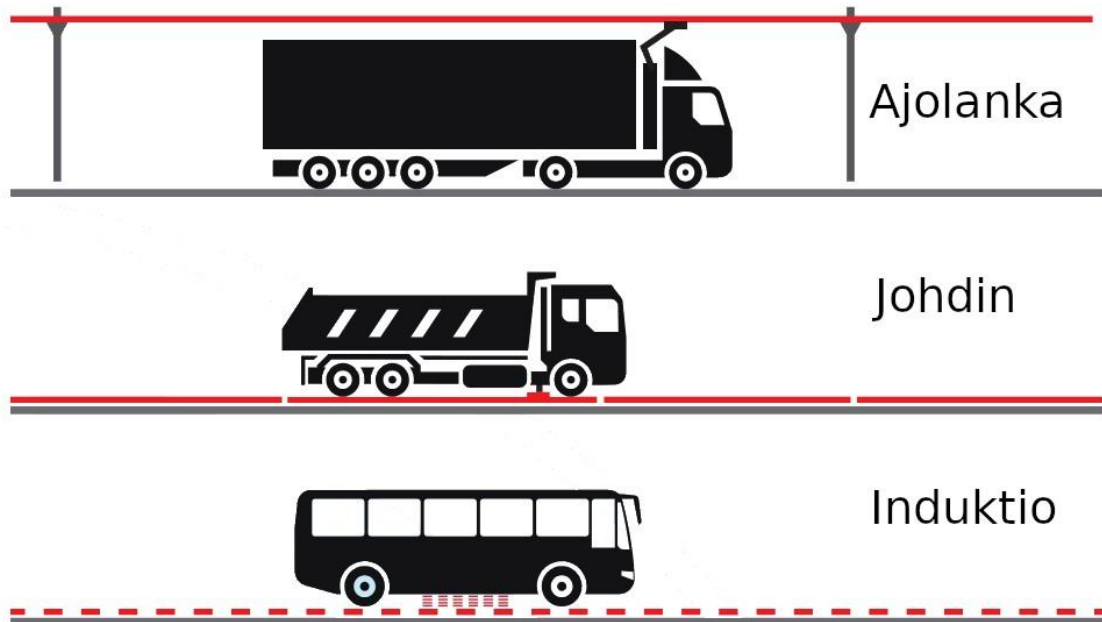
Esimerkiksi Daimler on panostanut polttokenno teknologiaa käyttävään kuorma-autoon Mercedes-Benz brändillään. Mercedes-Benz GenH2 prototyyppi kuorma-auto on testikäytössä ja sillä on tehty lupaavia testejä, jotka osoittavat vedyn vahvuudet pitkän matkan kuljetuksissa. 40 tonnin ajoneuvolla suoritettu 1047 kilometrin matka onnistuttiin toteuttamaan 80 kilogrammalla vetyä. [3]

### 3.3 Sähköistetyt tiet

Sähköistettyjen teiden konsepti esitetään yhtenä ratkaisuna hiilineutraalin kuljetuksen edistämiseen. Sähköistetyllä tiellä tarkoitetaan infrastruktuuria, jossa ajoneuvot voivat ottaa käyttöönsä sähköenergiaa liikkuessaan. Tämä teknologinen lähestymistapa mahdollistaa sähköistettyjen teiden integroinnin muihin sähköistysteknologioihin hybridimallin avulla. Hybridimallilla polttomoottori käyttöisiä ajoneuvoja voidaan myös päivittää käyttämään sähköisiä teitä, jolloin saadaan käyttöön sähköistettyjen teiden hyödyt, kun tie on saatavilla. 3

Sähköenergian siirtämiseksi tieltä ajoneuvoon on käynnissä kokeiluja, joissa tutkitaan kolmea erilaista konseptia. Sähköistävät konseptit ovat ajojohtimet, johdinkiskot ja induktiivinen siirto. Nämä kolme teknologia konseptia ovat havainnollistettu kuvassa 1. Sähköistettyjä teitä on mahdollista toteuttaa suljetussa ja avoimessa systeemissä. Suljetussa systeemissä käyttäjä on yksittäinen toimija ja käyttö yksilöllistä. Esimerkkinä suljetusta systeemistä on kaivostoiminta, jossa ajoneuvo malleja on yksi ja reitti ei ole muuttuva. Avoimessa mallissa käyttäjäryhmä on moninainen ja ajosuoritteet ovat monipuolisia. Esimerkkinä avoimesta systeemistä on julkiset tiet. Avointen mallien osalta on rat-

kaistavana monia asioita kuten käytetyn energian mittaaminen ja systeemien standardisointi. Suljetut systeemit nähdään ensimmäisenä askeleena, koska mittavaa standardisointia ei tarvitse tehdä. [28]



*Kuva 1: Sähköistettyjen teiden konseptit. Muokattu lähteestä [7].*

### 3.3.1 Ajojohtimet

Pisimmällä oleva ratkaisu tieosuuksien sähköistämiseen on perinteiset ajojohtimet. Ajojohtimia on ollut käytössä rautatieliikenteessä noin 130 vuotta, joten teknologialla on vakaata tekninen pohja jo valmiiksi. Ajojohdinjärjestelmiä on ollut käytössä kaupungeissa 1900-luvun alussa mutta halpa diesel syrjäytti ne. Nykyinen lähestymistapa keskittyy pitkien matkojen kuljetusten tarpeeseen, sillä akkukäyttöisten ajoneuvojen joustavuus on kaupunkiympäristössä merkittävä etu. Ajojohdinratkaisuissa asennetaan ajojohtimia suurten teiden yhdelle kaistalle, joka mahdollistaa energian siirron ajoneuvoon. Ajojohdinjärjestelmät ovat tarkoitettu pääsääntöisesti raskaalle liikenteelle ja johdinten käyttö matalimmilla ajoneuvoilla kuten henkilöautoilla ei ole käytännössä mahdollista johdinten asennuskorkeuden takia. Tieliikenteeseen suunniteltujen ajojohtimien uusina piirteinä verrattuna muihin käyttötarkoituksiin on nopea liittyminen sekä poistuminen ja avoimissa systeemeissä kustannusten seuranta liittyvillä ajoneuvoilla.

Ajojohdinjärjestelmät ovat kypsä sähköistetyn tien ratkaisu, ja siitä on olemassa valmiita tuotteita. Esimerkiksi Siemens tarjoaa eHighway ratkaisuaan, jota on asennettu useassa

pilotti hankkeessa Euroopassa. Samaa ratkaisua tarjotaan myös raskaan liikenteen käyttöön myös tieverkon ulkopuolelle esimerkiksi kaivosteollisuuteen. [19]

Teille asennettuja ajojohtimia on pilotointihankkeissa asennettu Ruotsissa, Yhdysvalloissa ja Saksassa. Ruotsissa aiempien pilottihankkeiden perusteella päätettiin ensimmäisestä pysyvästä pilottihankkeesta, joka sijoittuisi E20 tielle Hallsberg - Örebro välille. Hanke laitettiin kuitenkin jäihin myöhemmin vuonna 2023 kasvaneiden kustannusten ja inflaation takia. Projekti kuitenkin odottaa lisärahoitusta, jolla se voitaisiin käynnistää uudelleen. [24]

### 3.3.2 Kontaktikisko

Toinen menetelmä teiden sähköistämistä varten on tiehen upotettava tai tien reunaan ilmaan asennettava kontaktikisko, jonka avulla erityyppiset ajoneuvot voivat liittyä siihen. Tällaiset kiskot eivät ole rajoitettuja ainoastaan raskaalle liikenteelle, vaan ne soveltuvat myös henkilöliikenteen ajoneuvoille. Mahdollisuus liittyä myös muilla ajoneuvoilla mahdollistaa suuremman käyttäjäryhmän ja käyttöasteen sähköistetylle tielle. Kontaktikisko ratkaisut eivät ole kehittyneet yhtä pitkälle kuin vastaavat ajolankaratkaisut.

Johdinkiskolla vältetään ajojohtimien kannakkeiden rakentamiselta, mutta tienpintaan asennettava kisko tuo omat haasteensa. Asentamista varten tie pitää tehdä kokonaan uudestaan ja olosuhteet kuten lumi tai jää voivat aiheuttaa ongelmia tiessä olevalle kiskolle ja siihen liittyville ajoneuvoille. Asennus on mahdollista tehdä tien pintaan asennettavana johtimena tai tiehen upotettavana kiskona. Kiskon rakenteet ovat merkittävästi pienemmät ajojohtimiin verrattuna riippumatta toteutuksesta, mikä mahdollistaa paljon pienemmän näköhaitan verrattuna ajojohtimiin. Toisaalta johtimen sijaitessa maan tasalla, voi se aiheuttaa vaaratilanteita. [7]

Tämän tyyppisestä tiestä on pilotointihanke Ruotsissa usean eri valmistajan kanssa. Ruotsissa pilotointihankkeessa on yhdistetty Arlandan lentokenttä ja 2 kilometrin päässä oleva teollisuusalue tiessä olevalla sähköraiteella. Lundissa on tehty Elonroad -yrityksen kanssa yhteistyössä pilottihanke, jossa asennettiin tien pintaan kontaktikisko. [4]

### 3.3.3 Induktiivinen siirto

Kolmantena menetelmänä esitetään induktiivisesti energiansiirtoa mahdollistavaa tietä. Menetelmä edellyttää induktiivisten lähettimien sijoittamista tien alle ja vastaanottimien integrointia ajoneuvoihin. Järjestelmä mahdollistaa sähköenergian siirtymisen kontaktittomasti ajoneuvoon. Induktiivisen siirron hyötyjä ovat riippumattomuus olosuhteista ja monikäyttöisyys. Induktiivista siirtoa voisi hyödyntää kaikki liikenteessä olevat ajoneuvot. Induktiivisen tien käytössä esiintyy merkittäviä energiahäviöitä. Siirron häviöt ovat myös yksi merkittävimmistä haasteista, jonka vuoksi konsepti mielletään taloudellisesti hankalaksi. Induktiivisen siirron hyötysuhteeksi on arvioitu noin 88 %, kun taas kontaktillisen siirron hyötysuhde noin 95 %. Hyötysuhteen ero syntyy pääosin suuremmasta määrästä komponentteja, jota tarvitaan siirron mahdollistamiseen. Sähköistettyjen teiden osalta on kustannusnäkökulmasta merkittävää, kuinka suuri osa tiestä tarvitsee sähköistää, jotta ajoneuvon akun taso saadaan pidettyä vakiona. Induktiivisessa siirrossa siirrettävä teho vaihtelee ajoneuvon ja käämien paikan suhteen, kun taas kontaktillisilla siirto menetelmillä teho pystytään pitämään tasaisena. Tämän takia kontaktillisilla siirtomenetelmillä sähköistetyn tien osuus koko tiestä tarvitsee olla 50 % vähemmän kuin kontaktillisilla ratkaisuilla. [17] Yksi ensimmäisistä tällaisista pilottihankkeista on ”Smart Road Gotland” Ruotsissa, jossa on rakennettu 1,6 kilometriä induktiivisesti sähköistettyä tietä. Sähköistetty osuus otettiin käyttöön 2020 ja käyttö lopetettiin 2023. Pilottihankkeessa käytettiin kuorma-autoja ja linja-autoja. [20]

## 4. POTENTIAALI JA KUSTANNUKSET

Tässä luvussa käsitellään sähköistysratkaisuiden käyttöpotentiaalia ja kustannuksia. Kustannuksista tutkitaan ajoneuvojen käyttäjille syntyviä hankinta ja käyttökustannuksia ja niitä verrataan nykyhetkellä käytössä oleviin ratkaisuihin. Osiossa tarkastellaan eri ratkaisuja kustannuksien kehitys arvioita. Lisäksi arvioidaan infrastruktuurin rakentamiskustannuksia ja niiden jakautumista eri ratkaisuille.

### 4.1 Sähköisten ajoneuvojen käyttöpotentiaali

#### 4.1.1 Akkukäyttöisten ajoneuvojen käyttöpotentiaali

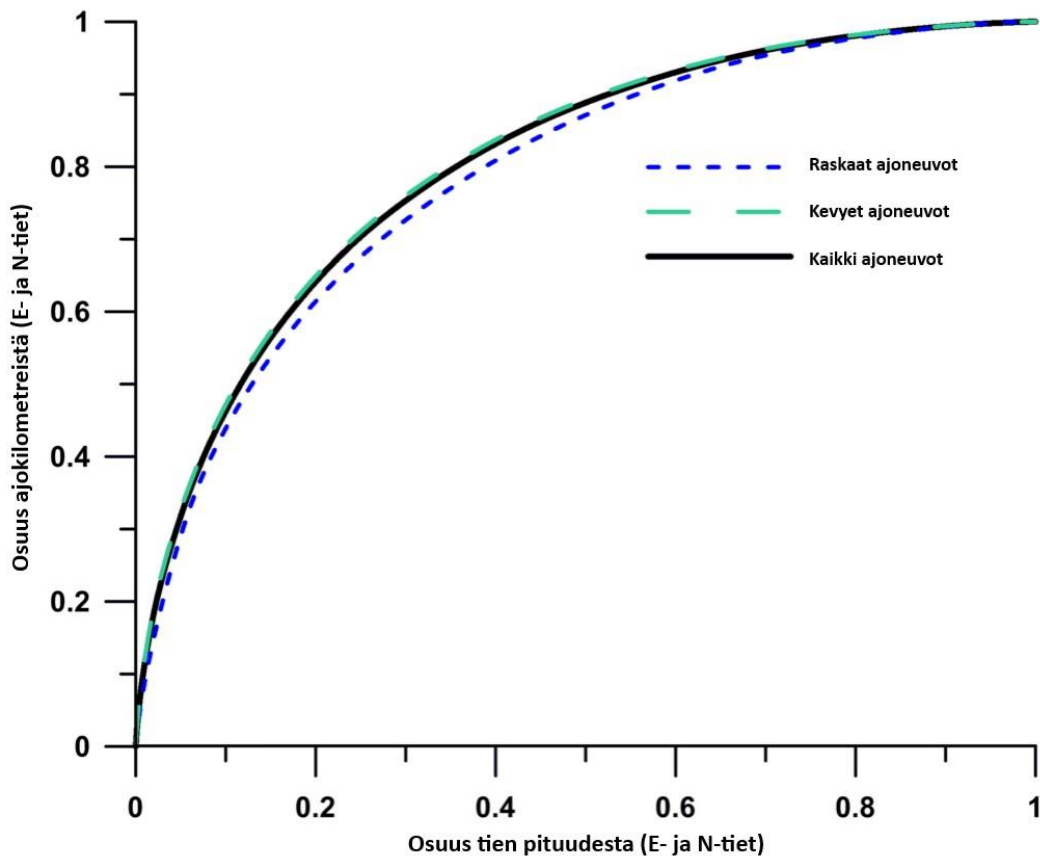
Sähköistetyn liikenteen potentiaalia on tutkittu vuonna 2018 julkaistussa tutkimuksessa, jossa analysoitiin sähköistetyn kuorma-auto liikenteen potentiaalia Suomessa ja Sveitsissä. Analyysissä arvioitiin ajoneuvojen ja infrastruktuurin kehitystä neljällä alueella. Akkukapasiteetti, akun energiatiheys, 8 tunnin hidaslatausteho ja 2 tunnin pikalatausteho. Analyysin tulokset näyttivät, että nykyaikaisilla akkukäyttöisillä kuorma-autoilla voitaisiin ajaa Suomessa noin 50 % matkoista ja vastaavasti Sveitsissä 52 %. Analyysissä arvioidujen teknisten kehitys askelten jälkeen Suomessa voitaisiin kattaa 81 % matkoista ja 61 % ajosuoritteesta. Vastaavasti Sveitsin tapauksessa luvut olivat merkittävästi suuremmat, 93 % ja 86 % vastaavasti. Analyysissä huomattiin, että jo pelkällä ajoneuvojen akkujen kehityksellä on merkittävin vaikutus potentiaaliin. [14]

Maiden välillä eroavaisuutta havaittiin matkojen pituudessa ja kuljetusten koossa. Suomessa kuljetusmatkat ja ajoneuvojen koot ovat merkittävästi suuremmat, joten kokonaisuutena potentiaali jää merkittävästi pienemmäksi. Suomessa pidempien kuljetusmatkojen takia pikalatauksella ja akkujen koolla on merkittävämpi vaikutus. Sveitsissä nopeaa latausta huomattavasti merkittävämpi osa on ajoneuvojen kantaman kehittyminen. Ajoneuvojen kantaman kehittyessä kevyempien ja lyhyempien kuljetusten potentiaali kasvaa merkittävästi. [14]

Raskaimmilla yhdistelmillä nähdään, että suuremman akkukapasiteetin kantaminen parantaa käyttöpotentiaalia, kun taas kevyemmällä ajoneuvoilla pienempi potentiaali suuremman akun kanssa. Pienillä ajoneuvoilla kuitenkin on tunnistettu kaikissa tilanteissa suhteellisen hyvä potentiaalin taso, joten tässä tilanteessa se ei juurikaan vaikuta käytettävyyteen. [18]

### 4.1.2 Sähköistettyjen teiden käyttöpotentiaali

Sähköistettyjen teiden käyttöpotentiaali on verrannollinen sähköistetyllä tieosuudella kuljettuihin kilometreihin. Ruotsissa tehdyssä tutkimuksessa tarkasteltiin sähköistettyjen teiden potentiaalia Ruotsin ja Norjan tapauksessa. [25] Ruotsin ja Norjan E- ja N-tiet, jotka kattavat noin 8 % Ruotsin ja 12 % Norjan maanteistä, jotka vastaavat suurin piirtein Suomen valtateitä. Suomessa valtatie kattavat 11 % maanteistä. [22] Samassa tutkimuksessa arvioitiin, että sähköistämällä 25 % E- ja N- teistä pystyttäisiin sähköistämään 70 % kaikesta näiden teiden liikenteestä. Vastaavasti 50 % osuuden sähköistamisellä saavutettaisiin 85 % osuus kaikesta liikenteestä. Kuvassa 2 esitetty ajokilometrien osuuden jakauma tien pituuden osuuden suhteen.



**Kuva 2: Ajokilometrien osuus tieosuuden pituuden suhteen Ruotsissa ja Norjassa E- ja N-teillä. Muokattu lähteestä [25]**

Nämä tulokset osoittavat, että merkittävän suuri käyttöpotentiaali sähköistetyille teille saadaan kohdistamalla pieni sähköistysaste käyttöasteeltaan suurimmille teille. Raskaanliikenteen osalta tässä korostuu selvästi suurempi käyttöaste valtateillä verrattuna



henkilöliikenteeseen. Raskasliikenne on siis erityisen hyvä sähköistettyjen teiden osalta, koska suurin osa ajokilometreistä ja näin myös suurin osa päästöistä keskittyy lyhyelle matkalle. [25]

## 4.2 Hankinta ja käyttökustannukset

Sähköisten ajoneuvojen taloudellinen kilpailukyky on merkittävä osa potentiaalia. Sähköisten ajoneuvojen kilpailukykyyn vaikuttaa merkittävästi latausinfrastruktuuri, akkujen kustannukset ja ominaisuudet. Nykyisillä akkujen teknisillä ominaisuuksilla ja kustannuksilla kilpailukyky heikkenee ajoneuvojen koon kasvaessa ja tämä nähdään saatavilla olevien ratkaisujen kilpailukyvyssä. Jos akkujen teknisiä ominaisuuksia saadaan parannettua ja kustannuksia vähennettyä sekä nopeita latausmahdollisuuksia on saatavilla, tilanne voi kääntyä ympäri. Mikäli kehitys tapahtuu optimististen arvioiden mukaan, kilpailukyky kasvaa ajoneuvon koon mukaan. Toisaalta jo nykyisten teknologioiden ja optimististen arvioiden puolivälissä olevilla teknologioilla olisi mahdollista päästä tilanteeseen, jossa ajoneuvon koko ei vaikuttaisi merkittävästi kilpailukykyyn. Kilpailukykyyn vaikuttavia akkujen teknisiä ja taloudellisia ominaisuuksia ovat energiatiheys, energiakapasiteetin hinta ja lataussyklien määrä. Lataussyklien määrä on huomattu merkittäväksi osaksi kilpailukykyä. Suuren määrän lataussyklejä kestävät akut vähentävät merkittävästi käyttökustannuksia, joka on ammatillisessa liikenteessä merkittävämpi osa kuin investointikustannukset. [18]

**Taulukko 4: Vertailukelpoiset kustannukset [8]**

Atribuutti	Yksikkö	Diesel	LNG	FCEV	BEV	CHV
Investointi kustannus	EUR	128 673	195 910	174 000	185 177	152 000
Energian kulutus	kWh/km	2,46	2,78	2,25	1,23	1,6
Käyttökustannus	EUR/km	0,143	0,143	0,137	0,126	0,107
CO2 päästöt	kg/kWh	0,324	0,242	0,306	0,202	0,196

Taulukossa 4 on esitetty arvioidut vertailukelpoiset investointi- ja käyttökustannukset kehitetyille ratkaisuille vuodelle 2030. Ajoneuvojen hankintakustannusten osalta dieselajoneuvot ovat merkittävästi vaihtoehtoisia voimalähteitä käyttäviä ajoneuvoja halvempia. Hankintakustannukset ovat kuitenkin kaupallisessa liikenteessä pieni osa ajoneuvon elinkaaren kustannuksista. Raskaalle liikenteelle olennaisempi osa on käyttö- ja energiakustannukset. Käyttökustannusten osalta sähköistetyt tiet ja akkukäyttöiset ajoneuvoratkaisut ovat merkittävästi muita ratkaisuita edullisempia. Edulliset käyttökustannukset

set perustuvat sähköisen voimalähteen yksinkertaisuudesta ja pienemmästä huoltotarpeesta verrattuna muihin käyttövoimaratkaisuihin. Myös energian kulutuksen osalta sähköistetyt tiet ja akkukäyttöiset ajoneuvot poikkeavat muista ratkaisuista merkittävästi matalammilla energian kulutuksilla. Hyöty saadaan sähkömoottorien ja erittäin hyvästä hyötysuhteesta. Pienestä energian kulutuksen takia myös hiilidioksidi päästöt ovat muita ratkaisuja merkittävästi pienemmät. [8]

**Taulukko 4: Kokonaiskustannukset eri ratkaisuille (€/km) [8]**

Käyttövoima	80 000 km/vuosi	140 000 km/vuosi
Diesel	0,82	0,68
LNG	0,93	0,72
FCEV	1,01	0,83
BEV	0,85	0,65
CHV	0,8	0,64

Taulukossa 4 on esitetty kokonaiskustannukset eri ratkaisulle kahdella eri vuotuisella ajomäärällä. Kustannuksiin otettu huomioon investointi-, käyttö-, huolto- ja polttoainekustannukset. Pienemmällä ajomäärällä on arvioitu akkukäyttöisten ajoneuvojen ja sähköistettyjen teiden olevan kustannuksiltaan verrattavissa dieselkäyttöisiin ajoneuvoihin. Suuremmilla ajomäärillä sähkötoimiset ratkaisut saavat vielä suuremman hyödyn ratkaisujen hyötysuhteesta ja energian hinnasta johtuen, jolloin nämä ratkaisut ovat dieseliäkin edullisempia. Nesteytetty maakaasu tulee myös kilpailulliseksi ratkaisuksi, kun ajomäärät ovat suuremmat, sillä näillä ajoneuvoilla on muihin ratkaisuihin verrattuna merkittävästi suurempi investointikustannus. Polttokennoajoneuvojen kustannukset ovat molemmissa arvioissa merkittävästi muita ratkaisuita suuremmat. Jotta polttokenno käyttöiset ajoneuvot olisivat kilpailukykyisiä, tarvittaisiin noin 20–25 % halvempaa vetyä polttoaineeksi. [8]

### 4.3 Infrastruktuurin rakentaminen

Yksi merkittävistä kysymyksistä on infrastruktuurin rakentaminen. Dieselille vaihtoehtoisille voimalähteille on tehty lähinnä infrastruktuuri pilotti projekteja. Kaupalliset ratkaisut ovat vasta suunnitteilla ja odottavat eri ratkaisuiden kehittymistä. Lataus tai polttoaineiden tankkaus infrastruktuuri on suhteellisen kallista ja millään ratkaisulla ei vielä ole tarpeeksi käyttöä, jotta investoinnit olisivat kannattavia. Sähköautoja varten kehitettyjä latausratkaisuja voidaan hyödyntää myös raskaammille ajoneuvoille, mutta pienemmällä

teholla. Tämä ei kuitenkaan mahdollista täyttää käyttöpotentiaalia etenkin työtehtävien aikana tai välissä suoritettavilla latauksilla.

Akkukäyttöisille ajoneuvoille vaaditaan pikalatausten lisäksi yö lataus mahdollisuus, sillä suuri osa käytetystä energiasta ladataan yöllä. Latauspaikkoja täytyy rakentaa merkittävästi hajautetusti tai keskitetysti moneen eri käyttötarkoitukseen. Raskaan liikenteen ja muun hyötyliikenteen osalta on tutkittu tarvetta rakentaa keskitettyjä latauskenttiä. VTT:n teettämässä kyselyssä [16] selvitettiin latauskenttien tarvetta ja toteuttamista. Raskaalle liikenteelle havaittiin tarvetta suuren latausnopeuden latauskentille. Latauskenttien käytöstä havaittiin tarve latauspaikkojen varaamiselle, mutta myös ilman varausta tarpeellisesti. Latauskenttien lataustehon saatavuus haluttaisiin aina täysin saataville ja tätä varten latauskentille on ehdotettu käytettäväksi energiavarastoja, joilla voitaisiin mahdollistaa täysi teho kiireisimmillä ajoilla myös pienemmällä sähköliittymällä. [16]

Liikenne- ja viestintäministeriön teettämässä tutkimuksessa [13] tarkasteltiin raskaan liikenteen latausinfrastruktuurin tarvetta. Suurin tarve latausinfrastruktuurille todettiin valtatien varsilla ja solmupisteissä. Kaupunkiseudun sisäiselle liikenteelle on todettu eri tarpeet ja ne on tunnistettu vastaavasti latauskenttämallisissa. Pitkän matkan liikenteeseen on perusteltua kehittää yhteiskäyttö operointia raskaan liikenteen yritysten kesken, sekä yhteiskäyttöä henkilöliikenteen kanssa kehityksen alkuvaiheessa. Raskaan liikenteen hidas sähköistyminen on todettu ongelmaksi sijoituksen tekemiseen, joten yhdistämällä henkilöliikenne tähän latausinfrastruktuuriin alkuvaiheessa, mahdollistettaisiin isompien investointien tekeminen. [13]

Kokonaisuutena sähköistettyjen teiden infrastruktuurin rakentaminen on helpon lähesyttävä malli, sillä sen täysimittaista toteuttamista ei vaadita, jotta ajoneuvot voisivat alkaa hyödyntämään tätä. Sähköistettyjen teiden suurin hyöty saadaan jo pienemmillä investoinneilla, mutta yksinään se ei voi kaikkea liikennettä sähköistää. Sähköistettyjen teiden infrastruktuurin rakentamisen on arvioitu kustantavan 0,4–1,1 M€/km, joka sekin on vain kirjallisuuteen perustuva arvio. [25] Käyttökustannuksiin vaikuttaa merkittävästi myös saadaanko sähköistettyihin teihin liitettyä myös henkilöliikennettä, joka vähentäisi kustannuksia ajoneuvokilometrejä kohden. Henkilöliikenteen lisääminen myös lisäisi kustannuksia, sillä henkilöautot eivät pysty käyttämään samoja riippujohtimia, joita raskas liikenne käyttäisi. Myöskään henkilöliikenteestä saatava päästöjen vähennys hyöty ei ole yhtä suuri kuin vastaavasti raskaalla liikenteellä. Sähköistetyille teille ei vielä ole avointa standardia, johon perustuen voitaisiin tehdä infrastruktuuri investointeja. [25]

## 5. RASKAAN TIELIIKENTEEN SÄHKÖISTÄMISEN VAIKUTUS SÄHKÖVERKKOON JA SÄHKÖN- TUOTANTOON

Raskaan liikenteen sähköistäminen aiheuttaa merkittäviä vaikutuksia sähköverkon kuormitukseen ja hallintaan. Tämän liikennesektorin energiantarpeet ovat erityisen korkeat, minkä vuoksi se vaatii huomattavia lataustehoja vuorokauden ympäri. Tässä osiossa keskitytään analysoimaan, kuinka raskaan liikenteen energiankulutus jakautuu ajan suhteen ja miten tämä kulutusprofiili vaikuttaa sähköntuotannon sekä -siirron infrastruktuuriin.

### 5.1 Energian kulutus ja vaikutus tuotantoon

Raskaan liikenteen tarvitseman sähköenergian aikariippuvainen jakautuminen riippuu käytetyistä ratkaisuista ja niiden painoarvoista. Akkukäyttöisten ajoneuvojen sähkönkulutus määräytyy lataushetken mukaan, kun taas esimerkiksi sähköistettyjen teiden osalta ajosuoritteen hetkellä. Sähkölataus voi ajoittua kahdella eri tavalla. Käyttöajan ulkopuolella tapahtuva lataus tapahtuu yleisesti yöaikaan tai vuorotehtävissä toisen vuoron aikaan. Suurin osa ajosuoritteista tehdään päiväsaikaan, joten merkittävä osa hitaan latauksen energiasta ladataan yöaikaan. Käyttöajan aikana tapahtuva lataus tapahtuu suuritehoisilla latausasemilla taukojen ohessa tai tarpeen mukaan. [14]

Akkukäyttöiset ajoneuvot ovat myös raskaassa liikenteessä merkittävästi dieselkäyttöisiä ajoneuvoja energiatehokkaampia. Kun verrataan loppukäytön energiatehokkuudeltaan nykyisiä dieselajoneuvojen ja pessimistisiä arvioita sähköisten ajoneuvojen kehitymisestä, nähdään, että sähköiset ajoneuvot ovat kaksi kertaa energiatehokkaampia. Kun taas arvioidaan optimistisempi kehitys sähköajoneuvoille, ero muuttuu kolminkertaiseksi. Sähköisten ajoneuvojen energiankulutuksen kokonaisuuteen kuitenkin vaikuttaa merkittävästi enemmän sähköntuotanto ja siirto, mikä tekee energiatehokkuuden arvioinnista kokonaisuutena hankalaa. [27]

Sähköistettyjen teiden osalta energian tarve ajoittuu ajosuoritteen hetkelle, sillä ajoneuvot käyttävät sähköistetystä tiestä saadun energian pääosin suoraan. Tiestä saatavilla olevaa energiaa on myös mahdollista ladata akkuihin, joka lisää käyttöajan aikana tapahtuvaa energian kulutusta. Sähköistettyjen teiden energian kulutusta on arvioitu tutkimuksessa Ruotsin tieliikenteessä. Raskaanliikenteen energian kulutus sähköistetyillä teillä ajoittuisi pääosin klo 8–22 välille ja yöaikaan se putoaisi kolmannekseen. [10]

## 5.2 Vaikutukset sähköverkkoon

Sähköverkko ja sähköisten ajoneuvojen vaikutus on kaksisuuntainen. Suuret latausaset ja kasvava energian kulutus vaikuttavat sähköverkkoon merkittävästi, mutta toisaalta olemassa oleva sähköverkko on yksi merkittävimmistä kustannuksiin vaikuttavasta muuttujasta. Kustannustehokkaassa latausasemasuunnittelussa olemassa oleva sähköverkko vaikuttaa merkittävästi aseman sijaintiin, lataustehoon ja latauspaikkojen määrään.

Sähkönlaatu on rajoittava tekninen ominaisuus, joka vaikuttaa latausasemien sijoitteluun. Sähkönlaatuun liittyy jännitteen ominaisuuksia kuten ali- tai ylijännite, taajuus poikkeamat, harmoniset yliaallot ja epäsymmetria. Latausasemille tyypillisimpiä ongelmia on jännitteeseen liittyvät ilmiöt. Optimaalisesti sijoitetulla asemalla jännitetasot pysyvät hyväksyttävällä alueella, kun taas huonoon paikkaan sijoitetun latausaseman jännitetasot voivat heitellä merkittävästi vaikuttaen koko alueen sähkönlaatuun. [31]

Latauspaikkojen sijoittaminen ja mitoittaminen tieliikenneverkkoon tulee vaatimaan investointeja verkon osalta. Yhteistyöllä latausasemien suunnittelun kanssa mahdollistetaan nopea rakentaminen, kun uuden verkon tarve minimoidaan. Sähköverkon rakentaminen ja kehitys on perinteisesti seurannut maantieteellisesti asutusta ja teollisuutta, mutta raskaan liikenteen tarve poikkeaa tästä merkittävästi. Logistiikka- ja liikennesolmupisteissä usein on valmista kapasiteettia, mutta raskaalla liikenteellä on lataustarvetta myös näiden solmupisteiden välillä, jotka yleensä sijoittuvat valmiin kapasiteetin ulkopuolelle. Suunnittelussa tärkeä osa on tiedostaa lataustehon tarve, jonka perusteella voidaan arvioida eri liityntämahdollisuuksia. Sähköverkon rakentamisen osalta nopeimmat projektit ovat tilanteessa, jossa tarvittava latausteho saadaan olemassa olevalta sähköasemalta tai keskijännite johtolähdöstä. Rakennusprojektit pitenevät ja kallistuvat merkittävästi, jos rakennustarve on uudelle sähköasemalle tai korkeajännitelinjoille. Sähköverkon osalta olisi olennaista lähteä kehittämään latausverkkoa kokonaisuutena ajoissa, jotta verkon kehityksessä voitaisiin ottaa huomioon tulevaisuuden latausteho tarpeet. [13]

## 6. YHTEENVETO

Työssä tarkasteltiin raskaan tieliikenteen sähköistämisen vaihtoehtoja. Työssä tarkasteltiin akkukäyttöisiä ajoneuvoja, polttokenokäyttöisiä ajoneuvoja ja sähköistettyjen teiden ratkaisuja. Sähköistettyjen teiden osalta esiteltiin eri ratkaisut, niiden tekniset erot ja pilotointihankkeita. Suomessa on tehty hyvin vähän selvitystä sähköistetyistä teistä, eikä pilotointihankkeita ole aloitettu. Muissa pohjoismaissa ja Euroopan maissa sähköistettyjä teitä on tutkittu ja pilotointihankkeita on toteutettu. Tarkastelu tehtiin aihepiirin julkaisujen ja tutkimusten perusteella. Raskaan tieliikenteen sähköistyksen tarve on merkittävä, sillä liikenteen päästöjä on vähennettävä merkittävästi.

Seuraavaksi työssä vertailtiin teknologioita potentiaali- ja kustannusnäkökulmasta. Ratkaisujen potentiaalien tarkastelussa huomattiin, että koko raskaan liikenteen sektorin sähköistäminen vaatii merkittävää kehitystä kaikilla osa-alueilla. Potentiaalien tarkastelun perusteella raskaan liikenteen sektori voi tulevaisuudessa olla käyttövoimaltaan moninaisempi kuin muu liikennesektori. Kustannusten kehityksessä nähtiin myös merkittäviä eroja lyhyellä aikajaksolla, mutta pidemmällä jaksolla kehitys vaikuttaa tasaavan teknologioiden eroja kustannusten osalta. Kehitys on kuitenkin vaikeaa ennustaa, sillä etenkin vetyinfrastruktuurin kehitys on hyvin alkuvaiheessa. Sähköistettyjen teiden kustannukset osoittautuivat jo nykyisellä teknologian tasolla kustannustehokkaaksi ratkaisuksi, mutta sen käyttö vaatii myös toisen voimanlähteen, jota käytetään hybriditoiminnossa.

Raskaan tieliikenteen sähköistämisen energian tarvetta ja vaikutuksia sähköverkkoon tarkasteltiin osana kokonaisuutta. Vuorokauden aikana tarvittava energia ei määrältään ole haastava energiantuotannon kannalta, mutta kulutushuippujen ajoitus voi aiheuttaa käytettävän teknologian mukaan tarvetta investoinneille. Raskaalle tieliikenteelle suunnitelluilla latausasemilla käytetään suuria lataustehoja ja ne ajoittuvat vuorokauden aikana epätasaisesti. Suurin investointitarve on sähköverkossa varsinkin latausinfrastruktuurin rakentamista varten. Latausasemia varten tarvitsee rakentaa uusia sähköasemia ja johtolähtöjä, jotta sähköön laatu saadaan pidettyä hyväksyttävällä tasolla.

# LÄHTEET

- [1] María de las Nieves Camacho, Daniel Jurburg, Martín Tanco, Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 47, Issue 68, 2022, Pages 29505-29525, ISSN 0360-3199, Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319922029068>
- [2] Cunanan C, Tran M-K, Lee Y, Kwok S, Leung V, Fowler M. A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles. *Clean Technologies*. 2021; 3(2):474-489. Saatavissa (viitattu 15.1.2024): <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028>
- [3] Daimler Truck #HydrogenRecordRun: Mercedes-Benz GenH2 Truck cracks 1,000-kilometer mark with one fill of liquid hydrogen, 2023. Saatavissa (viitattu 15.12.2023): <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-truck-hydrogenrecordrun-mercedes-benz-genh2-truck-cracks-1000-kilometer-mark-with-one-fill-of-liquid-hydrogen-52369346>
- [4] Elonroad. Partners. Trafikverket. Saatavilla (viitattu 23.4.2024): <https://www.elonroad.com/partners/trafikverket>
- [5] European Alternative Fuels Observatory. EU classification of vehicle types. Verkkojulkaisu. Saatavilla (viitattu 23.4.2024): <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/vehicle-types>
- [6] European environment agency: Greenhouse gas emissions from transport in Europe. 2023. Saatavissa (Viitattu: 15.12.2023): <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport>
- [7] F3. Electric Road Systems, ERS. Verkkojulkaisu. Saatavilla (viitattu 23.4.2024): <https://f3centre.se/en/fact-sheets/electric-road-systems-ers/>
- [8] Gnann, T., Plötz, P., Kühn, A., & Wietschel, M. (2017). How to decarbonise heavy road transport. Saatavilla (viitattu: 23.4.2024): [https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/4-346-17\\_Gnann.pdf](https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2017/4-346-17_Gnann.pdf)
- [9] IEA, *Prospects for Hydrogen and Fuel Cells*, Energy Technology Analysis, OECD Publishing. 2005. Paris. Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://doi-org.lib-proxy.tuni.fi/10.1787/9789264109582-en>
- [10] D. Jelica, M. Taljegard, L. Thorson, F. Johnsson, Hourly electricity demand from an electric road system – A Swedish case study, *Applied Energy*, Volume 228, 2018, Pages 141-148, ISSN 0306-2619, Saatavissa (Viitattu 15.1.2024): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918309140>
- [11] Liikenne- ja viestintäministeriö: Valtakunnalliset liikenne-ennusteet ISBN=978-952-311-826-3. 2022. Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/VLE%202022.pdf>
- [12] Liikenne ja viestintäministeriö: Ennuste: Tieliikenteen päästöt laskevat hieman ennakoitua nopeammin – syynä sähköautojen yleistyminen. 2021 Saatavissa (viitattu:

15.12.2023): <https://lvm.fi/-/ennuste-tieliikenteen-paastot-laskevat-hieman-ennakoitua-nopeammin-syyna-sahkoautojen-yleistyminen-1509917>

[13] Liikenne- ja viestintäministeriö: Raskaan liikenteen ajoneuvojen latausinfra: Tarveselvitys. Saatavilla (viitattu: 23.4.2024): <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-917-8>

[14] Heikki Liimatainen, Oscar van Vliet, David Aplyn, The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis, Applied Energy, Volume 236, 2019, Pages 804-814, ISSN 0306-2619, Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261918318361>

[15] Sergio Manzetti, Florin Mariasiu, Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 51, 2015, Pages 1004-1012, ISSN 1364 0321 Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006577>

[16] Muona, T., Paakkinen, M., Farzam Far, M., & Hajduk, P. (2021). Latauskentät: esiselvitys. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-00376-21. Saatavilla (viitattu: 23.4.2024): [https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/45108458/Latauskentat\\_esiselvitys.pdf](https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/45108458/Latauskentat_esiselvitys.pdf)

[17] T. Navidi, Yue Cao and P. T. Krein, Analysis of wireless and catenary power transfer systems for electric vehicle range extension on rural highways, 2016 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), Urbana, IL, 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/PECI.2016.7459224. Saatavissa (viitattu 15.1.2024): <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7459224>

[18] Björn Nykvist, Olle Olsson, The feasibility of heavy battery electric trucks, Joule, Volume 5, Issue 4, 2021, Pages 901-913, ISSN 2542-4351, Saatavissa (viitattu 17.12.2023): <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435121001306>

[19] Siemens. eHighway. Verkkojulkaisu. Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://www.mobility.siemens.com/global/en/portfolio/road/ehighway.html>

[20] Smart Road Gotland. Verkkojulkaisu. Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://www.smartroadgotland.com>

[21] Suomen virallinen tilasto (SVT): Tieliikenteen tavarankuljetukset ISSN=1798–2995. 2020. Helsinki: Tilastokeskus Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): [http://www.stat.fi/til/kttav/2020/kttav\\_2020\\_2021-04-21\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/kttav/2020/kttav_2020_2021-04-21_tie_001_fi.html)

[22] Suomen virallinen tilasto (SVT): Tietilasto [verkkojulkaisu]. ISSN=2670-336X. 2020. Helsinki: Tilastokeskus. Saatavilla (viitattu: 23.4.2024): [https://www.stat.fi/til/tiet/2020/tiet\\_2020\\_2021-04-15\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/tiet/2020/tiet_2020_2021-04-15_tie_001_fi.html)

[23] Suomen Kuljetus ja Logistiikka SKAL ry. Ajo- ja lepoaikasäädökset. Verkkojulkaisu. Saatavilla (viitattu: 23.4.2024): <https://skal.fi/kuljetusala/ajo-ja-lepoaikasaadokset/>

[24] Swedish transport administration, Electric Road E20, Hallsberg–Örebro, 2023, Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://bransch.trafikverket.se/en/startpage/projects/Road-construction-projects/electric-road-e20-hallsbergorebro/>

[25] Taljegard, M., Thorson, L., Odenberger, M., & Johnsson, F. (2020). Large-scale implementation of electric road systems: Associated costs and the impact on CO2 emissions. International Journal of Sustainable Transportation, 14(8), 606–619. Saatavilla (viitattu: 23.4.2024): <https://doi.org/10.1080/15568318.2019.1595227>



- [26] Tieliikennelaki. 10.8.2018/729. Saatavilla (viitattu: 23.4.2024): <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2018/20180729#mvs>
- [27] Fan Tong et al 2021 Environ. Res.: Infrastruct. Sustain. 1 025007 Energy consumption and charging load profiles from long-haul truck electrification in the United States. Saatavissa (Viitattu 15.1.2024): <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2634-4505/ac186a/meta>
- [28] S. Tongur and H. Sundelin, "The electric road system transition from a system to a system-of-systems," 2016 Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), Singapore, 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ACEPT.2016.7811529. Saatavissa (Viitattu 15.1.2024): <https://ieeexplore.ieee.org/document/7811529>
- [29] Verbruggen, F.J.R.; Silvas, E.; Hofman, T. Electric Powertrain Topology Analysis and Design for Heavy-Duty Trucks. *Energies* 2020, 13, 2434. Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://doi.org/10.3390/en13102434>
- [30] Wolff, S.; Kalt, S.; Bstieler, M.; Lienkamp, M. Influence of Powertrain Topology and Electric Machine Design on Efficiency of Battery Electric Trucks—A Simulative Case-Study. *Energies* 2021, 14, 328. Saatavissa (viitattu: 15.12.2023): <https://doi.org/10.3390/en14020328>
- [31] X. Zhu, B. Mather and P. Mishra, Grid Impact Analysis of Heavy-Duty Electric Vehicle Charging Stations, 2020 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), Washington, DC, USA, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGT45199.2020.9087651. Saatavissa (Viitattu 15.1.2024): <https://ieeexplore.ieee.org/document/9087651>