

Mikko Rintasalo

# HYBRIDIVOIMALINJOJEN HYÖDYNTÄMINEN RASKAASSA KALUSTOSSA

Kandidaatintyö  
Konetekniikka  
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Tarkastaja: Mikko Vanhatalo  
Toukokuu 2025

# TIIVISTELMÄ

Mikko Rintasalo: Hybridivoimalinjojen hyödyntäminen raskaassa kalustossa  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Konetekniikka  
Toukokuu 2025

---

Tässä tutkielmassa selvitetään, millaisia vaikutuksia hybridivoimalinjoilla voidaan saavuttaa raskaassa kalustossa. Hybridivoimalinjalla tarkoitetaan ajoneuvoteollisuudessa voimalinjaa, jossa on vähintään kaksi eri voimanlähdettä. Tässä tutkielmassa hybridivoimalinjalla tarkoitetaan polttomoottorin ja sähköisen järjestelmän yhdistelmää, eli sähköhybridiä. Tutkielmassa vertaillaan hybridivoimalinjoja erityisesti perinteiseen dieselvoimalinjaan, mutta myös täysin sähköisiin voimalinjoihin. Eri voimalinjoja vertaillaan päästöjen, kustannusten ja elinkaarivaikutusten suhteen erilaisissa käyttötarkoituksissa ja -ympäristöissä. Tarkoituksena on selvittää, voidaanko hybridivoimalinjoja hyödyntää raskaassa kalustossa päästöjen vähentämiseksi. Lisäksi tarkoituksena on selvittää hybridivoimalinjojen taloudellinen kannattavuus sekä mahdollisuudet jälkiasennukselle olemassa olevaan kalustoon.

Tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Ensin tutkielmassa esitellään kolme erilaista hybridivoimalinja vaihtoehtoa, joista kahteen keskitytään tarkemmin. Tämän jälkeen kirjallisuuslähteiden avulla selvitetään hybridivoimalinjojen vaikutukset päästöihin, kustannuksiin ja elinikäen. Tutkimusosuuden kirjallisuuslähteistä suurin osa on aikakauslehtien julkaisuja sekä konferenssiartikkeleita, muissa osioissa käytettiin lähteitä myös hallintoelimiltä ja yhdistyksiltä.

Tuloksina tämän tutkielman perusteella voidaan todeta, että hybridivoimalinjat ovat toimiva ratkaisu osana siirtymää täysin sähköisiin ratkaisuihin. Tietyissä käyttökohteissa hybridivoimalinjojen avulla on mahdollista saavuttaa erittäin merkittäviäkin säästöjä erityisesti päästöissä, mutta myös käyttökustannuksissa. Hybridivoimalinjojen jälkiasennuksen olemassa olevaan kalustoon avulla voidaan laskea tämän teknologian kustannuksia asiakkaille ja pidentää olemassa olevan kaluston käyttöikää huomattavasti. Lisäksi jälkiasennus sopii erittäin hyvin osaksi kiertotaloutta ja vihreää siirtymää.

Avainsanat: Hybridi, raskas kalusto, kuorma-auto, käyttövoima, voimalinja, diesel, kiertotalous

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

- Ei
- Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmanprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia: Scopus AI

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Scopus AI

Käyttötarkoitus: Scopus AI tekoälyn avulla on tässä työssä kerätty tietoa ja hankittu useita lähteitä. Tekoälyn tuloksia ei ole käytetty sellaisenaan, vaan niitä on hyödynnetty lähteiden löytämisessä ja löydettyjen lähteiden arvioimisessa.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tiedonhaku, kaikki työn osiot.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. HYBRIDIVOIMALINJAT .....	2
2.1 Rinnakkaishybridi .....	2
2.2 Sarjahybridi .....	3
2.3 Hydraulihybridi .....	4
3. HYBRIDIVOIMALINJOJEN PÄÄSTÖT, KUSTANNUKSET JA KÄYTTÖIKÄ .....	6
3.1 Päästöt ja polttoaineen kulutus .....	6
3.2 Kustannukset .....	8
3.3 Käyttöikä .....	10
4. TULOKSET .....	11
4.1 Päästövaikutukset .....	11
4.2 Kustannusvaikutukset .....	12
4.3 Käyttöikävaikutukset .....	13
5. YHTEENVETO .....	14
LÄHTEET .....	15

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO<sub>2</sub>

CO<sub>2eq</sub>

REEV

Hiilidioksidi

Hiilidioksidiekvivalentti

Range Extended Electric Vehicle (suom. jatkettun toimintamatkan sähköajoneuvo)

# 1. JOHDANTO

Raskas kalusto ja liikenne aiheuttavat suuren osan maailman päästöistä. Liikenne on energian tuotannon jälkeen toiseksi suurin kasvihuonekaasujen tuottaja maailmassa (UNEP 2024). EU:ssa tieliikenne tuottaa viidenneksen kasvihuonekaasupäästöistä ja tästä yli neljännes tulee raskaasta liikenteestä (Euroopan komissio 2023). Rakennusteollisuudessa työkoneet ja rakentamiseen liittyvät kuljetukset aiheuttavat 11–25 % ja 3,5–12 % koko työmaan CO<sub>2eq</sub>-päästöistä (Weigert et al. 2022).

EU:n tavoite on olla ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä, Suomella sama tavoite on vuoteen 2035 mennessä (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022; Euroopan komissio, ei pvm a). Tavoite ilmastoneutraaliudesta vaatii päästöjen vähentämistä, ja raskaassa kalustossa yleiset dieselmoottorilla toimivat voimalinjat ovat yksi kohde, jossa on paljon potentiaalisia säästöjä. EU:n tavoitteena on vähentää raskaan tieliikenteessä toimivan kaluston, eli kuorma-autojen, bussien ja kaupunkibussien, päästöjä 45, 60 ja 90 % vuosiin 2030, 2035 ja 2040 mennessä verrattuna vuoden 2019 lähtötasoon (Euroopan komissio, ei pvm b). Tämä ei tule olemaan helppo tehtävä, ja ongelman ratkaisemiseen on useita eri lähestymistapoja.

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan näistä lähestymistavoista yhtä, hybridivoimalinjoja. Hybridivoimalinjoilla on potentiaalia toimia välimallin ratkaisuna nykymaailmassa, jossa täysin sähköisten ratkaisuiden toimintamatka, -aika tai latauskapasiteetti ei välttämättä ole riittävä. Työ on luonteeltaan kirjallisuuskatsaus ja tutkimuskysymys on ”Miten hybridivoimalinjat vaikuttavat raskaan kaluston elinkaarikustannuksiin, -päästöihin ja -pituu-teen”. Työn tavoitteena on selvittää hybridivoimalinjojen elinkaarikustannukset, valmistuksen ja käytön päästöt, jälkiasennuksen mahdollisuudet olemassa olevaan kalustoon sekä vertailla keskenään erilaisia hybridi-, täysin sähkö- ja perinteisiä dieselratkaisuja edellä mainittujen tekijöiden osalta.

## 2. HYBRIDIVOIMALINJAT

Hybridi tarkoittaa ajoneuvoteollisuudessa voimalinjaa, jossa on vähintään kaksi eri voimanlähdettä. Henkilöautoissa tämä tarkoittaa käytännössä sähköhybridiä eli polttomoottorin ja sähköjärjestelmän yhdistelmää, mutta myös hydraulihybrideitä on olemassa ras-kaassa kalustossa.

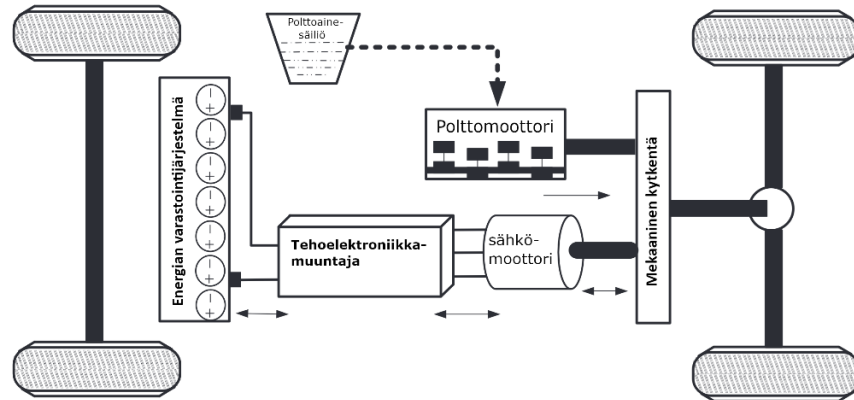
Sähköhybridin tarkoituksena on yhdistää sähkö- ja polttomoottoriajoneuvo ja siten saavuttaa parempi polttoainetalous sekä pienemmät päästöt. Suurimpia etuja hybrideissä ovat pidempi toimintamatka, parempi tehokkuus sekä pienempi polttoaineen kulutus. Kahden teknologian yhdistäminen kuitenkin lisää komponentteja ja painoa sekä moni-putkaistaa kokonaisuutta, mikä saattaa johtaa ongelmiin. (Jain & Kumar 2018)

Yksi sähköhybridien suurimpia etuja on regeneraatio, eli mahdollisuus käyttää sähkömoottoria generaattorina ajoneuvon hidastamisessa ja täten ottaa talteen energiaa, joka muuten olisi kadonnut lämpönä ajoneuvon jarruissa. Tämän avulla voidaan lisätä ajoneuvon polttoainetaloutta ja pienentää jarrutusjärjestelmän ylläpitokustannuksia. Ras-kaassa kalustossa tämä toimii kuten nykyiset hydrauliset hidastimet ja pakokaasujarrut.

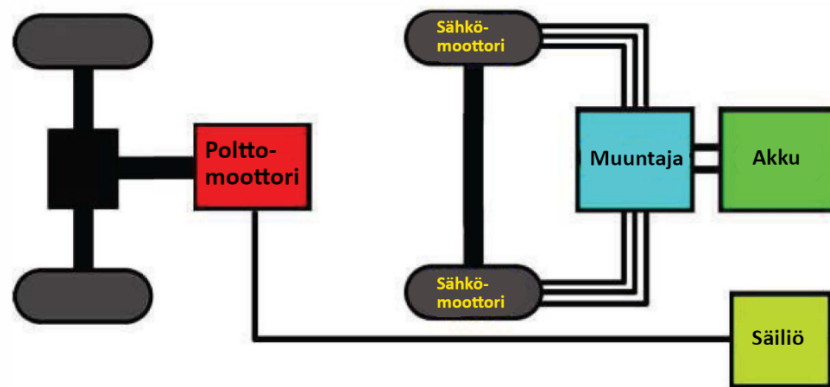
### 2.1 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridi (engl. parallel hybrid) tarkoittaa voimalinjaratkaisua, jossa polttomoottori ja sähkömoottori toimivat yhteen ajoneuvon voimansiirrossa, ja molemmilla on kytkentä renkasiin. Sähkömoottoria käytetään polttomoottorin avustamisessa suurimpien tehontarpeiden aikana, kuten liikkeelle lähdössä ja kiihdyttämisessä. (Zulkifli et al. 2015; Jain & Kumar 2018) Tämä on yleisin henkilöautoissa käytettävä hybriditekniikka (Edmunds 2024).

Ajoneuvoa voidaan liikuttaa polttomoottorilla, sähkömoottorilla tai molemmilla samanaikaisesti, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että on mahdollista valita optimaalinen käyttövoimajakama energian tarpeen ja kulutuksen kannalta (Jain & Kumar 2018). Polttomoottoreilla on tietty kierrosalue, jossa niiden hyötysuhteet ovat korkeimmillaan. Rinnakkaishybridijärjestelmän avulla polttomoottori voidaan mitoittaa toimimaan tällä alueella maantienopeuksissa ja siten sen kokoa ja tehoa voidaan pienentää, koska suurin tehon tarve liikkeelle lähdössä ja kiihdytyksissä voidaan saavuttaa sähkömoottorin avustuksella.



**Kuva 1: Rinnakkaishybridi tapa 1. Muokattu lähteestä (Jain & Kumar 2018)**

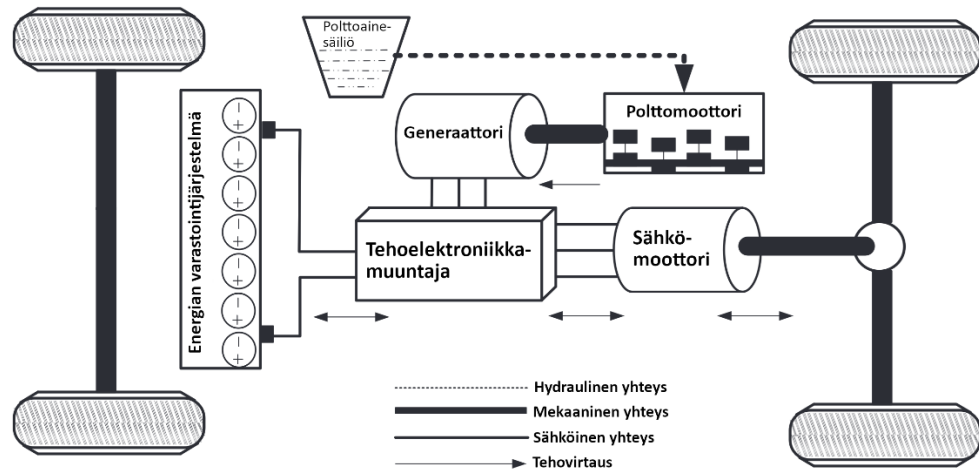


**Kuva 2: Rinnakkaishybridi tapa 2. Muokattu lähteestä (Zulkifli et al. 2015)**

Rinnakkaishybrideitä on kahta erilaista mallia. Ensimmäinen vaihtoehto on kuvan 1 mukaisesti asentaa sähkömoottori toimimaan suoraan osaksi polttomoottorin, vaihteiston ja akselien muodostamaa voimansiirtoa. Toinen vaihtoehto on kuvan 2 mukaisesti asentaa sähkömoottori ajoneuvon akselille, jonne polttomoottori ei välitä voimaa. Esimerkiksi Toyotan Prius toimii ensimmäisellä tavalla, kun Volvon T6- ja T8-varustelutasot tietyissä malleissa toimivat jälkimmäisellä.

## 2.2 Sarjahybridi

Sarjahybridi (engl. series hybrid) tarkoittaa yksinkertaisinta hybridivoimalinjaratkaisua, jossa polttomoottorilta ei ole suoraa mekaanista kytkentää ajoneuvon renkasiin. Kuvassa 3 on esitetty tämän teknologian toimintaperiaate. Ajoneuvon liikuttamisen hoitaa täysin sähkömoottori, ja polttomoottori toimii vain generaattorina energian tuottamiseen. Sähköenergia voi kulkea suoraan sähkömoottorille tai varastoitavaksi akkuun. (Jain & Kumar 2018) Sarjahybridistä käytetään myös joissain yhteyksissä termiä REEV eli Range Extended Electric Vehicle.



**Kuva 3: Sarjahybridi. Muokattu lähteestä (Jain & Kumar 2018)**

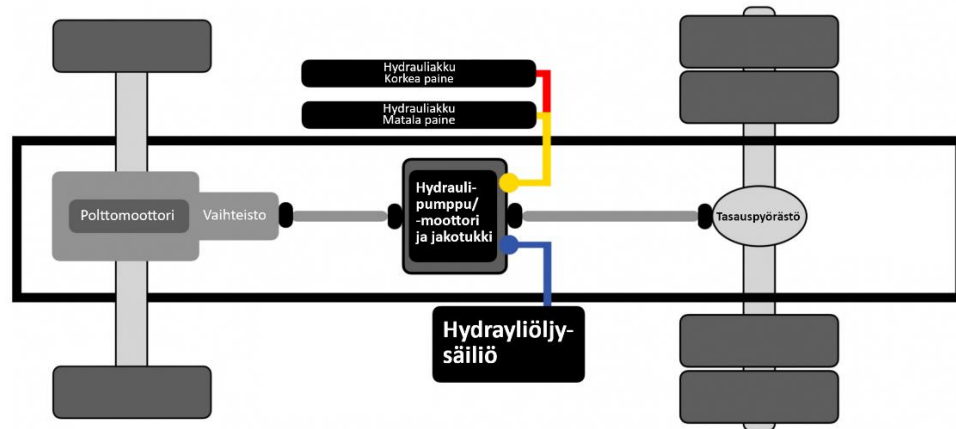
Ajoneuvoa liikuttava sähkömoottori saa energiansa suoraan polttomoottorilta tai akulta, jota voidaan ladata polttomoottorilla tai ulkoisella latauspistokkeellä. Tämän ratkaisun etuja rinnakkaishybridiin verrattuna ovat esimerkiksi suurempi mahdollinen akkukapasiteetti voimansiirrolta vapautuneen tilan vuoksi sekä tekniikan yksinkertaisuus ja hinta.

Polttomoottorin tehtävä on olla vain generaattorina tuottamassa virtaa akuille, eikä sen silloin tarvitse ottaa vastaan suurimpia tehopiikkejä. Koska moottorin on mahdollista toimia ainoastaan parhaalla hyötysuhdealueellaan, se voi myös olla pienempi ja vähäkuluksisempi.

Tekniikan suhteellisen yksinkertaisuuden vuoksi se on hyvä vaihtoehto jälkiasennettavaksi. Jälkiasennus voi olla houkutteleva vaihtoehto sen verrattain alhaisen hinnan ja käyttökustannussäästöjen ansiosta. (Fuengwarodsakul 2009)

### 2.3 Hydraulihybridi

Hydraulihybridi poikkeaa sähköhybrideistä siten, ettei siinä ole polttomoottorin lisäksi sähkömoottoria vaan hydraulijärjestelmä. Hydraulihybridi toimii kuvan 4 mukaisen järjestelmän avulla keräämällä ajoneuvon hidastamisen aikana liike-energiaa hydraulijärjestelmään paineeksi ja edelleen potentiaalienergiaksi. Järjestelmä pumppaa jarrutuksessa nestettä matalapaineakusta korkeapaineakkuun muuntaen liike-energiaa potentiaalienergiaksi ja sen jälkeen paikalta lähdetessä purkaa tätä paineen avulla kerättyä potentiaalienergiaa takaisin liike-energiaksi saman pumpun kautta. (Surawski et al. 2024)



**Kuva 4: Hydraulihybridi. Muokattu lähteestä (Surawski et al. 2024)**

Tällä teknologialla on potentiaalia toimia päästöjen vähennyksessä tietyillä alueilla, joissa raskas ajoneuvokanta on vanhempaa sen suhteellisen helpon jälkiasennuksen ansiosta. Tässä työssä ei kuitenkaan keskitytä tähän teknologiaan tämän enempää, vaan tutkitaan tarkemmin sähköhybrideitä.

### 3. HYBRIDIVOIMALINJOJEN PÄÄSTÖT, KUSTANNUKSET JA KÄYTTÖIKÄ

Hybridivoimalinjojen avulla on tavoitteena saavuttaa vähennyksiä polttoainekustannuksiin ja ajoneuvon aiheuttamiin päästöihin verrattuna pelkällä polttomoottorilla kulkevaan ajoneuvoon. EU:n ja yksittäisten valtioiden tasolla tavoitteena on erityisesti päästövähennykset. Yksittäisten yritysten kohdalla usein kiinnostaa enemmän ajoneuvon kokonaiskustannukset, joista polttoainekustannukset ovat yksi suurimpia yksittäisiä tekijöitä. Lisäksi laitteiden käyttöikä on olennainen osa päästöjä ja kustannuksia, sillä mitä pidempään laitetta voidaan käyttää sitä vähemmän sen valmistamisesta aiheutuneet päästöt vaikuttavat elinkaaren kokonaispäästöihin. Jos olemassa oleviin ajoneuvoihin on mahdollista ja taloudellisesti kannattavaa asentaa pienempipäästöisiä voimalinjoja saadaan näiden ajoneuvojen käyttöikä pidennettyä sekä päästöjä vähennettyä niin valmistuksesta kuin käytöstä.

#### 3.1 Päästöt ja polttoaineen kulutus

Nykyiset dieselmoottorit ovat hyötysuhteeltaan rajoitettuja noin 50 %:in ja yleensä vielä alemmas raskaassa kalustossa kuten työkoneissa ja muissa valtateiden ulkopuolella toimivissa koneissa. Tähän pienempään hyötysuhteeseen vaikuttaa erityisesti voimakkaat tehon tarpeen muutokset. Tämän ongelman ratkaisemiseksi ison kokoluokan kaivinkoneissa käytetään usein sarjahybridivoimalinjoja. Esimerkiksi maailman suurin kaivoskaivinkone Caterpillar 6120B H FS käyttää sarjahybridivoimalinjaa, jossa energiavaraosena toimii superkondensaattori. Pienemmissä työkoneissa puolestaan on käytössä enemmän rinnakkaishybridivoimalinjoja. Hybridivoimalinjojen mahdollistamaa energian talteenottoa ei ole erittäin suurissa koneissa käytössä, koska energiamäärät ovat todella suuret ja siten tarvittavan energian talteenottojärjestelmän hinta myös kasvaa todella suureksi. Pienemmissä työkoneissa energian talteenottoa kuitenkin käytetään onnistuneesti. Sarjahybridivoimalinjojen avulla on mahdollista saavuttaa jopa 45 % polttoaineen kulutuksen vähennys, mutta valmistuskustannukset nousevat huomattavasti. Rinnakkaishybridillä saavutetaan vain 11 % vähennys polttoaineen kulutuksessa, mutta valmistuskustannuksien nousu on vain noin viidennes verrattuna sarjahybridin valmistuskustannuksiin. (Quan et al. 2021)

Hybridivoimalinjat voivat vähentää polttoaineen kulutusta poistamalla polttomoottorin huonolla hyötysuhteella toimimisen pienissä nopeuksissa, energian talteenotolla jarru-

tuksissa ja mahdollisten lisäkuormien kuten voiman ulosoton sähköistämällä. Lisäkuormien ja apulaitteiden sähköistäminen myös mahdollistaa olemassa olevien ajoneuvojen muuntamisen hybridivoimalinjalle hyödyntämällä vapaaksi jäänyttä voiman ulosottoa toiseen suuntaan. Erityisesti satama-alueilla kuorma-autojen toimintaan sisältyy hyvin paljon kiihdytyksiä, pieniä ajonopeuksia ja lyhyitä siirtymiä. Tässä käyttökohteessa hybridivoimalinjojen avulla voidaan saavuttaa jopa 70–80 % vähennys polttoaineen kulutuksessa, kun taas päiväjakelussa saavutettava vähennys on noin 50 % ja pitkän matkan maantieajossa noin 28 %. (Zhao, Burke & Miller, 2013)

(Mansour et al. 2023) puolestaan toteaa, että hybridivoimalinjoilla ei saavuteta merkittäviä vähennyksiä polttoaineen kulutukseen maantieajossa ja kulutus saattaa jopa lisääntyä hybridivoimalinjan komponenteista johtuvan kasvaneen painon vuoksi. Heidän mukaansa tämä johtuu siitä, että suurin osa maantieajosta tapahtuu vakionopeudella ja energiaa talteen ottavalle hidastamiselle on vähän mahdollisuuksia. He kuitenkin huomauttavat, että hybridivoimalinjat tuovat tiettyjä etuja kevyemmissä kuorma-autoissa ja erityisesti tilanteissa, joissa ajaminen sisältää paljon pysähtymisiä ja liikkeellelähtöjä.

(Rupp, Schulze & Kuperjans 2018) tutkivat kahta keskenään vastaavaa Mercedes-Benz Actros kuorma-autoa, joista toinen oli perinteinen diesel ja toinen rinnakkaishybridi. Hybridi versio painoi noin 500 kg enemmän järjestelmän vaatimien komponenttien vuoksi, jolloin samalla hyötykuormalla lain sallima maksimipaino ylittyi. Vaihtoehtoisilla tavoilla kulkeville ajoneuvoille on kuitenkin sallittua ylittää sallittu maksimipaino, joka kompensoi vaihtoehtoisten voimalinjojen suurempia painoja. Tutkimuksen tuloksena oli 6,2 % vähennys polttoaineen kulutuksessa ja 4,34 tonnia pienemmät CO<sub>2eq</sub> päästöt kuljetettua tonnia kohden elinkaaren aikana verrattuna perinteiseen diesel kuorma-autoon. Hybridivoimalinjan valmistamisesta aiheutuneet päästöt kompensoituvat käytön aikana vähentyneillä päästöillä noin 15 800 km tai 1,5 kuukauden kuluttua. Tulokset perustuvat mäki-selle ajoprofiilille, joka hyödyttää hybridi kuorma-autoa huomattavasti.

(Lombardi et al. 2020) vertailee sarja- ja rinnakkaishybridien jälkiasennusta raskaaseen kalustoon. Heidän mukaansa rinnakkaishybridi suoriutuu paremmin kuin sarjahybridi kaikissa ajosykkeissä, mutta sarjahybridilläkin saavutetaan selkeitä vähennyksiä polttoaineen kulutukseen. Vähennykset ovat 14–29 %, ajosyklistä riippumatta keskimäärin 22 %. Lisäksi työssä tutkitaan hukkalämmön talteenottoa, jonka avulla on mahdollista vähentää polttoaineen kulutusta vielä ylimääräiset 2 %. Tutkimuksessa ajoneuvon alkupe räinen moottori säilytettiin jälkiasennuksessa, joka haittaa erityisesti sarjahybridin lukuja. Uuden moottorin asentaminen olisi kuitenkin kallista ja siten nostaisi jälkiasennuksen kustannuksia huomattavasti. (Innocenti et al. 2024) tutki myös jälkiasennusta, mutta tutkimuskohteena oli henkilöauto ja jälkiasennettava voimalinja oli hybridin sijasta täysin

sähköinen. Tutkimuksen lopputuloksena kuitenkin on, että jälkiasennuksella elinkaari-päästöt laskevat huomattavasti ja käyttöikä kaksinkertaistui, verrattuna uuden vastaavan ajoneuvon ostamiseen.

(Khan & Huang 2023) tutki erityisesti rakennustyömailla käytettävien kaivinkoneiden päästöjä ja vertaili keskenään viittä erilaista voimalinjavaihtoehtoa täysin dieselkäyttöisestä täysin sähköiseen vaihtoehtoon. Muut vaihtoehdot olivat hybridivoimalinjoja kolmella eri kokoisella akustolla. Heidän tutkimuksensa pääkohteena oli erityisesti erilaiset kaivinkoneen koko elinkaaren aikana aiheutuvat päästöt, niiden kokonaismäärät ja missä vaiheessa elinkaarta päästöt tuotetaan. Tutkimuksen tuloksena oli, että erityisesti CO<sub>2eq</sub> päästöjen osalta isompien akustojen asentaminen vähentää elinkaari-päästöjä olennaisesti, johtuen suurelta osin käytön aikaisten päästöjen vähenemiseen. Mitä suurempi akusto ajoneuvossa on, sitä suurempi osa sen CO<sub>2eq</sub> päästöistä aiheutuu valmistuksesta, ylläpidosta ja elinkaaren lopetuksesta. Suuremmat akustot vähentävät CO<sub>2eq</sub> ja monia muita päästöjä, mutta ne lisäävät ympäristön ekotoksisuutta. Tutkimuksen mukaan akustoilla varustettujen ajoneuvojen päästöistä ja haittavaikutuksista suhteessa suurempi osa syntyy erityisesti valmistuksessa, lukuun ottamatta syöpää aiheuttavaa myrkyllisyyttä ja järvien rehevöitymistä.

### 3.2 Kustannukset

(Mansour et al. 2023) toteavat, että eliniän kokonaiskustannukset kasvavat hybrideillä 50 % ja täysin sähköisillä vaihtoehdoilla 100 % verrattuna perinteiseen diesel kuorma-autoon. Tämä on huolimatta siitä, että hybridien tapauksessa polttoaineen kulutus parantuu heidän mukaansa hieman. Kokonaiskustannuksien kasvu voidaan selittää heidän mukaansa enimmäkseen korkeilla akustojen hinnoilla. He myös toteavat, että näiden tietojen valossa tarvitaan kannustavia poliittisia toimia, jotta näihin ympäristölle ystävällisempiin teknologioihin sijoitetaan.

(Mattetti et al. 2025) keskittyy erityisesti hybridivoimalinjojen tehokkuuteen maatalous-traktoreissa ja siten saavutettaviin säästöihin. Heidän tutkimuksensa mukaan hybridivoimalinjalla varustettu traktori saavutti 7,2–13,1 %:n kustannus säästöt, riippuen käyttöasteesta ja akuston koosta. Suurimmat säästöt saavutettiin, kun suurin osa käytetystä energiasta otettiin akustosta, eli kun traktoria käytettiin enimmäkseen vähän tehoa vaativiin tehtäviin. Heidän mukaansa isompien akustojen asentaminen ei kuitenkaan välttämättä ole taloudellisesti kannattavaa, sillä käytön aikana saavutettavavilla säästöillä ei onnistuta kattamaan suuremman hankintahinnan eroa oletetun käyttöiän aikana.

(Vora et al. 2017) esittää useammalla eri käyttötavalla viiden vuoden välein vuodesta 2015 vuoteen 2030 hybridivoimalinjojen kannattavuutta. Kannattavuutta mitataan ajoneuvon takaisinmaksuajassa, eli kauanko ajoneuvolla pitää tehdä töitä, jotta sen elinkaaren kokonaiskustannukset ovat pienemmät, kuin sen tekemä tuotto. Kokonaiskustannuksissa verrataan erityisesti akuston vaihtojen määrää, ja sen vaikutusta takaisinmaksu-aikaan. Tutkimuksen oletuksena on omistajien hyväksymä 2 tai 3 akuston vaihtoa sekä kahden vuoden takaisinmaksu-aika. Vuoden 2030 skenaarioon mennessä ylivoimaisesti suurin osa tutkituista ajoneuvovaihtoehdoista jokaisella käyttötavalla päätyivät halutulle alueelle, mutta vuoden 2025 skenaariossa vielä osalla käyttötavoista tähän tavoitteeseen ei päästä.

(Beligoj et al. 2022) tutki hybridivoimalinjojen käyttöä maataloustraktoreissa erityisesti elinkaarikustannuksien osalta. Tutkimuksen mukaan suurimmat säästöt käyttökustannuksissa saavutetaan, kun suoritetaan matalaa tehoa vaativia töitä, joissa polttomoottori ei toimi optimaalisimmalla hyötysuhteellaan. Näissä tilanteissa polttomoottorin pienentäminen on hyödyllistä, koska siten polttomoottoria voidaan käyttää enemmän korkeammalla hyötysuhteella ja näin voidaan saavuttaa noin 15 % säästöä kustannuksissa. Jos traktoria käytetään tasaisella voimalla ja polttomoottori voi toimia parhaalla hyötysuhteellaan, käyttökustannuksien ero hybridin ja perinteisen dieselmoottorillisen traktorin välillä on häviävän pieni. Joissain tilanteissa, jotka vaativat suuren määrän akkujen lataamista polttomoottorilla toiminnan aikana hybridi saattaa olla jopa kalliimpi, koska polttomoottorin hyötysuhteen kasvaminen ei kompensoi kaksinkertaisen energiamuutoksen luomia energiahäviöitä. Kuitenkin polttomoottorivoimalinjan suhteellisen hinnan noustessa hybridiin verrattuna tulee hybridistä kannattavampi vaihtoehto, eli mitä kalliimpi polttomoottorivoimalinja on, sitä kannattavampi hybridivoimalinja on.

(Watts, Ghosh & Hinshelwood 2021) mukaan olemassa olevaan henkilöautoon sähköisen voimalinjan jälkiasentaminen saattaa maksaa jopa uuden vastaavan sähköauton verran, jolloin jälkiasentaminen ei ole houkuttelevaa. Heidän mukaansa esimerkiksi busseihin jälkiasentaminen saattaa kuitenkin maksaa vain puolet uuden vastaavan ajoneuvon hinnasta, jolloin jälkiasentamisen houkuttelevuus kasvaa huomattavasti. He toteavat, että valmistuskapasiteetin noustessa ja erityisesti akkujen hintojen laskiessa jälkiasentamisesta saattaisi tulla houkuttelevampi vaihtoehto uuden auton ostamiselle. Heidän mielestään tämän kannustamiseksi pitäisi valtioiden sisällyttää jälkiasennukset osaksi hybridi- ja sähköajoneuvojen hankintatukia.

### 3.3 Käyttöikä

(Rupp, Schulze & Kuperjans 2018) mukaan uuden maantiekäytössä olevan kuorma-auton käyttöikäksi voidaan olettaa noin 8 vuotta tai noin miljoona ajettua kilometriä. Heidän tutkimuksessaan molempien vertailukohteiden oletettu käyttöikä on sama.

(Watts, Ghosh & Hinshelwood 2021) toteaa, että jälkiasennuksien avulla on mahdollista pidentää olemassa olevan kaluston käyttöikää huomattavasti ja siten olemassa olevia ajoneuvoja ei tarvitse romuttaa. Tämä olisi heidän mukaansa myös hyvin osana kiertotaloutta tukemalla kierrätystä ja uudelleen käyttöä uuden valmistamisen sijasta. Lisäksi jälkiasennuksien avulla olisi heidän mukaansa mahdollista lisätä akkukäyttöisten sähköajoneuvojen osaa liikenteestä järkevällä vauhdilla, samalla vähentäen tarvetta valmistaa kokonaan uusia sähköajoneuvoja lähitulevaisuudessa.

(Innocenti et al. 2024) tekemässä tutkimuksessa ajoneuvon käyttöikä on mahdollista jopa tuplata jälkiasentamalla sähköinen voimalinja alkuperäisen tilalle. Oletettu käyttöikä on kuitenkin vain 100 000 km, koska tutkinnan kohteena on pienikokoinen henkilöauto.

## 4. TULOKSET

### 4.1 Päästövaikutukset

Tutkimuksien perusteella voidaan todeta, että hybridivoimalinjojen avulla on mahdollista vähentää raskaan kaluston päästöjä, mutta vähennyksen määrä riippuu erittäin voimakkaasti käyttökohteesta ja tehon tarpeesta. Tilanteissa, joissa tehoa tarvitaan jatkuvasti ja tasaisesti ei hybridivoimalinjoilla saavuteta merkittäviä päästövähennyksiä, koska polttomoottori toimii jo parhaalla tehosuhteellaan eikä siten hybridivoimalinjan mahdollistamasta polttomoottorin kuormituksen tasaamisesta saavuteta hyötyä. Kun kuormitus on vaihtelevampaa ja tehon tarve aaltoilevampaa on hybridivoimalinjoilla mahdollista saavuttaa suuriakin päästövähennyksiä.

Parhaissa tilanteissa hybridivoimalinjojen avulla voidaan saavuttaa jopa 70–100 % vähennys polttoaineen kulutukseen ja siten myös käytön aikaisiin päästöihin. Toisaalta, jos hybridivoimalinjalla saavutetaan 100 % vähennys polttoaineen kulutukseen eli ajoneuvolla toimitaan pelkällä sähköllä, on järkevämpää käyttää täysin sähköistä voimalinjaa hybridin sijaan. Täysin sähköinen voimalinja on myös perusteltavissa tilanteisiin, joissa hybridillä saavutetaan hieman pienempi kuin 100 %:in polttoainekulutuksen vähennys, koska täysin sähköiseen ratkaisuun on mahdollista asentaa suurempi akusto polttomoottorin puuttumisen ansiosta ilman, että ajoneuvon kokonaismassa kasvaa ja näin saavuttaa parempi toimintamatka tai -aika.

Akustoilla varustettujen ajoneuvojen elinkaaripäästöistä suhteessa suurempi osa muodostuu valmistusvaiheessa. Näiden ajoneuvojen päästöt keskittyvät erityisesti lähiympäristövaikutuksiin eivätkä niinkään CO<sub>2eq</sub> päästöihin, jotka ovat matalammat. Elinkaaren aikaiset CO<sub>2eq</sub> päästöt ovat sähköistetyillä ajoneuvoilla elinkaaren alussa korkeammat, mutta ne kompensoituvat käytössä suhteellisen nopeasti riippuen saatavista vähennyksistä polttoaineen kulutuksessa ja akuston valmistuksessa aiheutuneiden päästöjen määrästä.

Huonoimmissa tilanteissa hybridivoimalinjalla saatetaan jopa kasvattaa elinkaaripäästöjä. Tällainen tilanne voi esiintyä, jos käytössä ei elinkaaren aikana saavuteta merkittävää polttoaineen kulutuksen vähennystä, tai polttoaineen kulutus jopa lisääntyy hybridikomponenttien aiheuttaman kasvaneen painon vuoksi, eikä siten valmistuksessa aiheutuneita päästöjä saada koskaan kompensoitua. Tällaisia tilanteita on erityisesti jo aiem-

min tässä luvussa mainitut tilanteet, joissa tehon tarve on tasaista. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi enimmäkseen tasaisilla maanteillä toimivat pitkää matkaa ajavat kuorma-autot.

Uusien sähköistettyjen ajoneuvojen valmistamisesta johtuvien päästöjen määrän vuoksi voisi olla järkevää harkita olemassa oleviin ajoneuvoihin hybridijärjestelmän jälkiasentamista. Näin voidaan vähentää valmistuksesta aiheutuneita päästöjä, pienentää ajoneuvon käytön aikaisia päästöjä ja pidentää sen elinkaarta. Elinkaaren alun ja lopun suhteelliset päästöt pienenevät, kun elinkaaren pituus kasvaa. Kokonaispäästöt pysyvät myös pienempinä, kun vanhan ajoneuvon romuttamisen ja uuden ajoneuvon valmistamisen sijaan valmistetaan vain osa komponenteista ja lopulta joudutaan romuttamaan vain yksi ajoneuvo.

## 4.2 Kustannusvaikutukset

Tutkimuksien mukaan hybridivoimalinjoilla on mahdollista saavuttaa jopa 15 %:in säästö elinkaarikustannuksissa, mutta tämä perustuu hyvin hybridille sopivaan käyttöprofiiliin. Yhden tutkimuksen mukaan hybridivoimalinjat kasvattavat elinkaarikustannuksia jopa 50 %, joka perustuu suurimmalta osin voimalinjan vaatiman akuston hintaan.

Hybridivoimalinjojen avulla on mahdollista pienentää ajoneuvon elinkaarikustannuksia, riippuen ajoneuvon käyttöprofiilista. Kuten päästöillä, suurimmat säästöt kustannuksissa saavutetaan, kun ajoneuvon kuormitus on vaihtelevaa ja tehon tarve aaltoilevaa. Erityisesti käytön aikaiset kustannukset laskevat näissä tilanteissa parantuneen polttoainetalouden kannalta, mutta hankintahinta saattaa olla huomattavastikin kalliimpi perinteiseen dieselvoimalinjaan verrattuna.

Hybridivoimalinjoilla varustettujen ajoneuvojen hankintahinta on usein kalliimpi perinteiseen dieselvoimalinjalta varustettuun ajoneuvoon verrattuna. Sopivissa käyttökohteissa hybridi voi maksaa itsensä takaisin, eli kalliimpi hankintahinta kompensoituu käytössä pienemmillä kustannuksilla, jopa muutamassa kuukaudessa. Kannattavuuteen vaikuttaa olennaisesti polttoaineen hinta, saavutettava polttoainekulutuksen vähennys, dieselvoimalinjan hinta hybridiin verrattuna ja mahdolliset tuet sekä verohelpotukset. Isommat akustot vaikuttavat hybridin hankintahintaan olennaisesti, ja mitä enemmän hybridi maksaa dieselvoimalinjaan verrattuna, sitä pidempään takaisinmaksussa kestää.

Raskaassa kalustossa hybridivoimalinjojen jälkiasentaminen olemassa oleviin ajoneuvoihin voi olla taloudellisesti kannattavaa. (Watts, Ghosh & Hinshelwood 2021) totesi,

että bussien tapauksessa sähköisen voimalinjan asentaminen maksaisi noin puolet uuden vastaavan ajoneuvon ostamisesta. Jälkiasennuksella on mahdollista pienentää kulutusta jopa 30 % ja siten myös olennaisesti käyttökustannuksia.

Jälkiasennuksen hintaan vaikuttaa olennaisesti voidaanko olemassa olevaa polttomootoria käyttää osana voimalinjaa. Erityisesti rinnakkaishybridien kohdalla tämä on usein mahdollista ja usein se on myös halvin tapa toteuttaa jälkiasennus. Sarjahybrideissä olemassa olevan moottorin säilyttäminen ei usein ole säästöjen kannalta kannattavaa, koska ajoneuvojen alkuperäiset moottorit ovat tarpeettoman suuria ja siten kuluttavat enemmän polttoainetta kuin on tarve akustojen lataamiseen.

Erityisesti akustojen hintojen laskiessa ja valmistuskapasiteetin kasvaessa tulee jälkiasentamisesta varteen otettava vaihtoehto uuden ajoneuvon ostamiselle, olettaen että olemassa oleva ajoneuvo on muilta osiltaan käyttökuntoinen. Kannattavuuteen vaikuttaa myös ajoneuvon muiden osien ja mahdollisten lisälaitteiden hinta ja käyttökunto.

### **4.3 Käyttöikävaikutukset**

Uusilla hybridivoimalinjoilla varustetuilla ajoneuvoilla voidaan todeta olevan vähintäänkin vastaava käyttöikä perinteisempiin dieselvoimalinjoihin verrattuna. Hybridivoimalinjoissa olevat akustot kuluvat käytössä, mutta ne ovat vaihdettavissa ja elinkaaren aikana olehtuksena onkin 2–3 akuston vaihtoa.

Hybridivoimalinjojen avulla on myös mahdollista pidentää ajoneuvon käyttöikää jälkiasennuksilla. Parhaimmassa tapauksessa hybridivoimalinjan jälkiasennuksella voidaan jopa kaksinkertaistaa olemassa olevan ajoneuvon käyttöikä, kun alkuperäinen voimalinja on tullut elinkaarensa päähän. Jälkiasennuksien avulla on myös mahdollista lisätä sähköisten ajoneuvojen osuutta liikenteessä pienemmillä kustannuksilla ja ilman, että tarvitsee valmistaa täysin uusia ajoneuvoja.

## 5. YHTEENVETO

Käyttökohteissa, joissa ajoneuvolta tarvittava voima on erittäin vaihtelevaa ja toiminta-aika tai -matkat ovat pitkiä, voidaan hybridivoimalinjojen avulla saavuttaa suuriakin säästöjä niin päästöissä kuin kustannuksissakin. Tällaisia käyttökohteita ovat esimerkiksi kuorma-autoilla maakuntajakelu ja erilaisia lisälaitteita hyödyntävät ajoneuvot, kuten nosturi- ja betoniautot. Lisäksi useiden työkoneiden käyttöprofiili soveltuu hybridivoimalinjojen hyödyntämiseen.

Maantieliikenteeseen hybridivoimalinjoissa ei ole juurikaan potentiaalia suhteellisen taasaisten kuormitusten ja pitkien toimintamatkojen vuoksi. Säästöjä on saatavissa jotain prosenttiyksiköitä, mutta kokonaiskustannuksissa ei saavuteta juurikaan säästöjä. Vuoristoissa ja mäkisillä reiteillä säästöjä on mahdollista kerryttää kuitenkin huomattavasti, kuten (Rupp, Schulze & Kuperjans, 2018) totesivat. Tämä käyttökohde on kuitenkin hyvin optimistinen ja erittäin optimaalinen hybridille, joten sen erikoisuuden vuoksi on huomioon ottaminen mahdollisissa päätöksissä tehtävä varoen.

Maansiirtokoneissa hybridivoimalinjat ovat erittäin toimiva ratkaisu, sillä akkujen tai superkondensaattorin tuoma lisäpaino ei haittaa toiminnassa ja tehon tarve on hyvin vaihtelevaa, jolloin polttomoottori ei pääse toimimaan tehokkaimmillaan. Maailman isoimmissa maansiirtokoneissa hybridivoimalinjat ovatkin enemmistössä.

Hybridivoimalinjojen jälkiasentamisella olemassa olevaan kalustoon on todella paljon potentiaalia. Sen avulla voidaan pidentää olemassa olevan kaluston käyttöikää, vähentää päästöjä ja pienentää käyttökustannuksia. Hinta on kuitenkin ratkaiseva tekijä ja akustojen koko vaikuttaa siihen olennaisesti. Lisäksi suuri osa sähköistetyn kaluston hankintaan kohdistettavista tuista ja verohelpotuksista ei koske olemassa olevan kaluston jälkiasennusta. Tästä aiheesta oli saatavilla suhteellisen vähän tietoa, ja sen lisätutkiminen olisi mielenkiintoista ja erityisesti kiertotalouden näkökulmasta kannattavaa.

## LÄHTEET

Beligoj, M., Scolaro, E., Alberti, L., Renzi, M. & Mattetti, M. (2022) 'Feasibility Evaluation of Hybrid Electric Agricultural Tractors Based on Life Cycle Cost Analysis', *IEEE Access*, 10, pp. 28853–28867. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3157635>.

Edmunds, D. (2024) *What Is a Hybrid Car and How Do They Work? Car and Driver*. Saatavissa (viitattu 5.3.2025): <https://www.caranddriver.com/features/a26390899/what-is-hybrid-car/>

Euroopan komissio (2023) *CO2 emission standards for Heavy-Duty Vehicles*, *European Commission - European Commission*. Saatavissa (viitattu 2.3.2025) [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_23\\_763](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_23_763)

Euroopan komissio (ei pvm a) *2050 long-term strategy - European Commission*. Saatavissa (viitattu 2.3.2025) [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_en)

Euroopan komissio (ei pvm b) *Reducing CO<sub>2</sub> emissions from heavy-duty vehicles - European Commission*. Saatavissa (viitattu 2.3.2025) [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en)

Fuengwarodsakul, N.H. (2009) 'Retrofitting a used car with hybrid electric propulsion system', in *2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. 2009 6th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chonburi, Thailand: IEEE, pp. 114–117. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/ECTICON.2009.5136977>.

Innocenti, E., Berzi, L., Del Pero, F. & Delogu, M. (2024) 'Life cycle greenhouse gas emissions of retrofit electrification: Assessment for a real case study', *Results in Engineering*, 23, p. 102454. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102454>.

Jain, S. & Kumar, L. (2018) 'Fundamentals of Power Electronics Controlled Electric Propulsion', in *Power Electronics Handbook*. Elsevier, pp. 1023–1065. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811407-0.00035-0>.

Khan, A.U. & Huang, L. (2023) 'Toward Zero Emission Construction: A Comparative Life Cycle Impact Assessment of Diesel, Hybrid, and Electric Excavators', *Energies*, 16(16), p. 6025. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/en16166025>.

Lombardi, S., Villani, M., Bella, G. & Tribioli, L. (2020) 'Retrofit of a Heavy-Duty Diesel Truck: Comparison of Parallel and Series Hybrid Architectures with Waste Heat Recovery', in *Conference on Sustainable Mobility*, pp. 2020-24–0015. Saatavissa: <https://doi.org/10.4271/2020-24-0015>.

Mansour, C., Islam, E., Vijayagopal, R., Pagerit, S. & Rousseau, A. (2023) 'Assessing the Potential Consumption and Cost Benefits of Next-Generation Technologies for Medium- and Heavy-Duty Vehicles: A Vehicle-Level Perspective', in *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. *2023 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Milan, Italy: IEEE, pp. 01–08. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023.10403136>.

Mattetti, M., Annesi, G., Intrevado, F.P. & Alberti, L. (2025) 'Investigating the efficiency of hybrid architectures for agricultural tractors using real-world farming data', *Applied Energy*, 377, p. 124499. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124499>.

Quan, Z., Ge, L., Wei, Z., Li, Y.W. & Quan, L. (2021) 'A Survey of Powertrain Technologies for Energy-Efficient Heavy-Duty Machinery', *Proceedings of the IEEE*, 109(3), pp. 279–308. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2021.3051555>.

Rupp, M., Schulze, S. & Kuperjans, I. (2018) 'Comparative Life Cycle Analysis of Conventional and Hybrid Heavy-Duty Trucks', *World Electric Vehicle Journal*, 9(2), p. 33. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/wevj9020033>.

Surawski, N.C., Awadallah, M., Zhao, E., Zhou, S., Dunn, T., Hall, C. & Walker, P.D. (2024) 'Reducing real driving fuel consumption and emissions with a hydraulic hybrid vehicle', *Science of The Total Environment*, 954, p. 176549. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176549>.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2022) 'Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia'. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2022:53 Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>.

UNEP (2024) 'Distribution of greenhouse gas emissions worldwide in 2023, by sector.', *Statista*. Saatavissa (viitattu 2.3.2025): <https://www-statista-com.libproxy.tuni.fi/statistics/241756/proportion-of-energy-in-global-greenhouse-gas-emissions/>

Vora, A.P., Jin, X., Hoshing, V., Saha, T. & Shaver, G. (2017) 'Design-space exploration of series plug-in hybrid electric vehicles for medium-duty truck applications in a total cost-of-ownership framework', *Applied Energy*, 202, pp. 662–672. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.090>.

Watts, R., Ghosh, A. & Hinshelwood, J. (2021) 'Exploring the Potential for Electric Retrofit Regulations and an Accreditation Scheme for the UK', *Electronics*, 10(24), p. 3110. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/electronics10243110>.

Weigert, M., Melnyk, O., Winkler, L. & Raab, J. (2022) 'Carbon Emissions of Construction Processes on Urban Construction Sites', *Sustainability*, 14(19), p. 12947. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su141912947>.

Zhao, H., Burke, A. & Miller, M. (2013) 'Analysis of Class 8 truck technologies for their fuel savings and economics', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 23, pp. 55–63. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2013.04.004>.

Zulkifli, S.A., Mohd, S., Saad, N. & Aziz, A.R.A. (2015) 'Split-parallel through-the-road hybrid electric vehicle: Operation, power flow and control modes', in *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. *2015 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA: IEEE, pp. 1–7. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/ITEC.2015.7165774>.