

samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

TONI LEHTIKANGAS

Kuonankuljetuskaluston sähköistäminen

ENERGIA- JA YMPÄRISTÖTEKNIIKAN
TUTKINTO-OHJELMA
2025

TIIVISTELMÄ

Lehtikangas, Toni: Kuonankuljetuskaluston sähköistäminen
Opinnäytetyö, AMK
Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma
Kesäkuu 2025
Sivumäärä: 39

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja oli Boliden Harjavalta. Opinnäytetyössä tarkasteltiin kuonankuljetuksen sähköistämistä ja analysoitiin sen nykyisiä mahdollisuuksia markkinoilla. Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa sähköisten kuljetusratkaisujen potentiaali ja vaikutukset niin ympäristön, talouden kuin teknologian näkökulmista. Työssä arvioitiin olemassa olevia sähköistämisteknologioita sekä niihin liittyviä markkinoiden kehityssuuntia. Lisäksi tarkasteltiin sähköistämisen tarjoamia hyötyjä ja haasteita perinteisiin kuljetusmenetelmiin verrattuna.

Aineistoa nykytilasta kerättiin Bolideniltä sekä muun muassa polttoaineiden hintojen ja kulutustietojen sekä käytettyjen laatujen osalta kuonankuljetusta operoivalta Valtasiirrolta. Työssä tarvittavia polttoaineiden ja sähköenergian päästöarvoina käytettiin Tilastokeskuksen ja OpenCO2net:n sekä GHG-protokollan käyttämiä arvoja. Energian hintana vertailussa käytettiin Energiateollisuuden julkaisemia arvoja.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin tilannekuva kuonankuljetuksen sähköistämisen nykymahdollisuuksista. Ajoneuvokalustoa ei tällä hetkellä vielä suoraan ole tarjolla tarvittavassa kokoluokassa sähköisenä, kuitenkin kalustoa toimittavien toimijoidenkin mukaan lähivuosina saattaisi jo olla. Päästöjen määrään nykykaluston sähköistäminen vaikuttaisi vähentävästi, joskaan ero ei olisi merkittävä verrattuna käytössä olevaan uusiutuvaan polttoaineeseen. Kustannusvertailu nykyisen ja sähköisen kaluston eroista polttoaineiden ja energian suhteen sen sijaan vaikuttaa merkittävältä, vertailu tehtiin suuntaa antavasti.

Avainsanat: päästökerroin, päästöt, hiilijalanjälki, dieselöljy, sähköistys, kuona, Boliden Harjavalta

ABSTRACT

Lehtikangas, Toni: Electrification of slag transport equipment
Bachelor's thesis
Energy and Environmental Engineering
June 2025
Number of pages: 39

This thesis was commissioned by Boliden Harjavalta. The thesis examined the electrification of slag transport and analysed its current opportunities in the market. The aim of the study was to map the potential and impacts of electric transport solutions from the perspectives of the environment, economy and technology. The thesis evaluated existing electrification technologies and the related market trends. In addition, the benefits and challenges offered by electrification compared to traditional transport methods were examined.

Data on the current state was collected from Boliden and, among other things, from Valtasiirto, which operates slag transport, in terms of fuel prices and consumption data as well as the different grades used. The emission values for fuels and electrical energy required in the work were the values used by Statistics Finland as well as OpenCO2.net and the GHG Protocol. For energy prices, the values published by the Energy Industry were used in the comparison.

As a result of the thesis, a situation picture of the current possibilities of electrification of slag transport was obtained. At the moment, the vehicle fleet is not yet directly available in the required size category in electric form, however, according to the operators supplying the equipment, it may already be available in the next few years. The electrification of the current fleet would reduce emissions, although the difference would not be substantial compared to the renewable fuel currently in use. On the other hand, the cost comparison of the differences between the current and electric fleets in terms of fuel and energy expenses seems significant. However, the cost comparison was indicative.

Keywords: emission factor, emissions, diesel oil, carbon footprint, electrification, slag, Boliden Harjavalta

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 TAUSTA	7
2.1 Hiilijalanjälki, säädökset, standardit ja tavoitteet	8
2.1.1 GHG-protokolla ja Scope 1/2/3	9
2.1.2 Päästökertoimet polttoaineille	11
2.2 Kuonankuljetus Harjavallassa	12
2.2.1 Kiruna UV SH60	14
2.3 Polttomoottorit	14
2.4 Sähkökäyttöiset järjestelmät	15
2.4.1 Akkuteknologiat	16
2.4.2 Johdin- ja kiskojärjestelmät	19
2.5 Hybridijärjestelmät	20
2.6 Kevitsa & Aitik pilotti	21
3 MAHDOLLISIA LAITETOIMITTAJIA	22
3.1 Sandvik	22
3.2 Epiroc	23
3.3 Liebherr	25
3.4 Komatsu	26
3.5 Kamag	27
3.6 Kress	27
3.7 Techne Kirow	28
3.8 Kiruna Utility Vehicle	28
4 VERTAILEVA LASKENTA	28
4.1 Sähkön ja polttoaineiden hinta	29
4.2 Nykyisen kaluston kustannusten ja päästöjen selvitys	30
4.3 Sähköisen kaluston päästöjen ja kulujen selvitys	31
5 TULOSTEN VERTAILU	32
6 RATAKISKOVAIHTOEHTO	34
6.1 Rata, kalusto ja patakuljettimet	34
6.2 Pohdinta	36
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	36
8 YHTEENVETO	38
LÄHTEET	40
LIITE 1: HERKKYYSTARKASTELU POLTTOAINEIDEN HINNAN MUUTOKSILLE (100%±50%)	45

LIITE 2: HERKKYYSTARKASTELU SÄHKÖNHINNAN MUUTOKSIIN, (100%, +50- -30%).	46
LIITE 3: VERTAILU AKKU OSUUDEN KASVAESSA SEKÄ PÄÄSTÖJEN ETTÄ HINNAN SUHTEEN.....	47

1 JOHDANTO

Bolidenin tavoite on olla maailman ilmastoystävällisin ja arvostetuin metallintuottaja. Boliden Harjavallan, myöhemmin BoHan, strategia on olla johtava toimittaja ilmastosiirtymässä, heillä uskotaan läpinäkyvyyteen päästöjen arvioinnissa. Koska alalla käytetty laskentatapa jättää tilaa tulkinnan monimuotoisuudelle, ja tämä vaikeuttaa vertailua, haluaa BoHa laskea päästöt koko prosessille hankinnasta valmistukseen. Työssä selvitetään BoHan CO₂ päästöjen mahdollista madaltamista kuonankuljetuksen sähköistämisen osalta.

Työn tarkoituksena on selvittää millä aikataululla sähköistäminen olisi mahdollista. Lisäksi työssä tarkastellaan kuonankuljetuskaluston sähköistämisen seurauksen eroja verrattuna nykyisin polttomoottorilla käyvään kalustoon, niin päästöjen kuin kustannustenkin valossa.

Tutkimus tuottaa BoHalle tietoa kuonankuljetuskaluston sähköistämisen mahdollisuudesta. Aihe on kiinnostava ja ajankohtainen juuri sähköistyvässä maailmassa. BoHa saa työstä selvityksen, onko siirtymä heille mahdollinen ja ajankohtainen. Työssä selvitetään myös CO₂ päästöjen eroja kaluston sähköistämisen vaikutuksesta. Lisäksi lasketaan käyttöenergian kustannusvaikutuksia mahdollisen sähköisen kaluston sekä nykyisen polttomoottorilla käyvän kaluston välillä. Tarjolla olevien teknologioiden suhteen kustannuksien vertailu tehdään vain käytön vaatiman energiakulutuksen osalta, muun muassa rajaten vaihtoehtoisten tekniikoiden vaatimat infrastruktuurin muutokset ulkopuolelle. Päästöjen arviointi tehdään vain käytön osalta. Sähkön kulutusta arvioidaan karkeasti tekemällä muunnos käytetyn ja määraimitatun polttoaineen energiasisällön mukaan.

2 TAUSTA

”Vuosisadan ajan Boliden on tutkinut, louhinut ja jalostanut perus- ja jalometalleja. Tuotantomme perustuu kokemukseen, innovaatioihin ja moderniin teknologiaan, jotka on kehitetty yhteistyössä pohjoismaisten teknologia- ja insinööritoimistojen kanssa.” (Boliden, n.d.a.)

Bolidenillä on kaivoksia Ruotsissa Aitikissa, Bolidenin alueella sekä Garpenbergissä ja uusimpana Ruotsin Zinkkruvanissa, Irlannissa Tarassa ja Suomessa Kevitsassa sekä uutena kaivoksena Portugalissa Somincor. Sulattoja on Norjan Oddassa, Ruotsissa Rönnskärissä ja Bergsöessä sekä Suomessa Kokkolassa ja Harjavallassa. Muuta toimintaa on lisäksi Ruotsissa, Tanskassa, Englannissa ja Saksassa. Bolidenin tärkeimpiä tuotteita ovat sinkki- ja lyijyharkot, kuparianodit ja katodit, kultaharkot ja hopearakeet, sekä myös muut tuotteet, kuten rikkihappo ja rautahiekka. Suurin osa metalleista kuljetetaan rauta- tai meriteitse teollisuusasiakkaille ympäri Eurooppaa. Kaksi tärkeää loppukäyttäjää ovat rakennus- ja autoteollisuus (Boliden, n.d.a).

Boliden Harjavallassa sijaitsee yhtiön toinen Suomen sulatoista. Se sijaitsee strategisesti tärkeällä paikalla lähellä Porin satamaa, jonne se siirrettiin Imatralta Suomen Itärajalta turvaan pois sodan alta vuonna 1944. Seuraavana vuonna Harjavallassa suoritettiin jo ensimmäinen kuparivalu. Kuparirikaste sulatetaan Harjavallassa kehitetyllä liekkisulatusmenetelmällä, joka on tänä päivänä maailman yleisin kuparirikasteiden sulatustapa. Boliden Harjavallan kuparisulatto on perustettu Outokumpu-yhtiönä vuonna 1936, sekä siirtynyt osaksi Boliden konsernia 2004. Boliden Harjavallassa työskentelee 547 henkilöä ja suomessa Bolidenillä n. 1700 henkilöä. Harjavallan päätuotteet ovat rikkihappo, kupari, nikkelikivi, kulta ja hopea. (Boliden Harjavalta, n.d.)

2.1 Hiilijalanjälki, säädökset, standardit ja tavoitteet

Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) on tärkeä Euroopan unionin säädös, jonka tavoitteena on parantaa yritysten ympäristö- ja yhteiskuntavastuun läpinäkyvyyttä ja vastuullisuutta. Se velvoittaa yrityksiä raportoimaan yksityiskohtaisesti kestävä kehityksen käytännöistään. Tämän avulla sijoittajat, kuluttajat ja muut sidosryhmät saavat luotettavaa ja vertailukelpoista tietoa yritysten vastuullisuudesta. Säädös on pakollinen Suomessa lainsäädännön mukaan yrityksillä joissa 2/3 seuraavista toteutuu: yli 250 työntekijää, yli 40 milj. euron liikevaihto tai yli 20 milj. euron tase. (Greenstep, 2023.)

ESRS-standardit (European Sustainability Reporting Standards) ovat osa CSRD-direktiiviä ja ne määrittelevät, miten yritysten tulee hoitaa kestävyysraportointi. ESRS-standardit kattavat laajan valikoiman ympäristöön, yhteiskuntaan ja hallintoon liittyviä aiheita, kuten ilmastonmuutos, biodiversiteetti, veden ja resurssien hallinta sekä ihmisoikeudet. ESRS-standardit on jaettu useisiin osiin. (Karppinen, 2023.)

Hiilijalanjälki mittaa tuotteen tai toiminnan aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Tuotteiden hiilijalanjälki kattaa koko elinkaaren aikaiset päästöt, kun taas yritysten hiilijalanjälki lasketaan yleensä kalenterivuoden aikana syntyneiden päästöjen perusteella. Laskentaan käytetään standardeja, kuten GHG-protokollaa ja SFS-EN ISO 14067 ja 14064-standardeja. GHG-protokolla jakaa päästöt kolmeen ryhmään: suorat päästöt (scope 1), epäsuorat päästöt ostetusta energiasta (scope 2) ja muut epäsuorat päästöt (scope 3). Laskennan tulokseen vaikuttavat laskennan rajaus ja päästökertoimet, joten tulokset eivät ole suoraan vertailtavissa ilman tarkempaa selitystä. (NIHAK, n.d.) Hiilijalanjäljen suurena käytetään yleisesti hiilidioksidiekvivalenttia (CO₂-ekv.) joka kuvaa kasvihuonepäästöjen yhteisvaikutusta ilmastoon lämpenemispotentiaaliin esimerkiksi sadan vuoden (global warming potential, GWP100) ajan jaksolla. Hiilidioksidiekvivalentti huomioi muiden kasvihuonekaasujen vaikutuksen ilmastoon lämpenemiseen suhteutettuna hiilidioksidiin. Esimerkiksi metaanin vaikutus on 28-kertainen hiilidioksidiin verrattuna. (Lehto, 2024.)

Boliden on kirjannut ilmastotavoitteekseen vähentää Scope 1 ja 2 luokissa absoluutteisesti CO_{2e} (hiilidioksidiekvivalentti) päästöjään 42 % vuoden 2021 tasosta vuoteen 2030 mennessä, sekä Scope 3 luokan päästöjä 30 % samalla aikavälillä (Boliden, 2024, s. 46). Kaiken kuparintuotannon keskiarvo on asetettu vähähiilisen kuparin raja-arvojen mukaisesti; <1,5 t CO₂/t Cu. (Boliden, n.d.c.)

2.1.1 GHG-protokolla ja Scope 1/2/3

GHG-protokolla on maailmanlaajuinen standardi, joka auttaa yrityksiä laskemaan ja raportoimaan hiilijalanjälkensä yhdenmukaisella ja vertailukelpoisella tavalla. Vaikka se ei suoraan velvoita yrityksiä, monet direktiivit ja standardit, kuten CSRD-direktiivi ja ESRS-standardit, pohjautuvat siihen.

Protokolla julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 2001 Maailman luonnonvarainstituutin (WRI) ja Maailman liike-elämän kestävän kehityksen neuvoston (WBCSD) toimesta. Sen tavoitteena oli luoda kansainvälisesti standardoitu raportointikehikko ESG-raportointiin (Environmental, Social, and Governance) ja päästölaskentaan.

GHG-protokolla on tärkeä, koska se edistää kestävyysraportoinnin standardisointia, luotettavuutta ja läpinäkyvyyttä. CSRD-direktiivin ympäristöä ja hiili-neutraalisuutta koskevat osiot pohjautuvat GHG-protokollaan, mikä auttaa yrityksiä ymmärtämään päästöraportointivelvoitteitaan. Sijoittajat hyötyvät vertailukelpoisista ja auditoiduista päästöraporteista, jotka mahdollistavat tarkemmat analyysit ja vertailut.

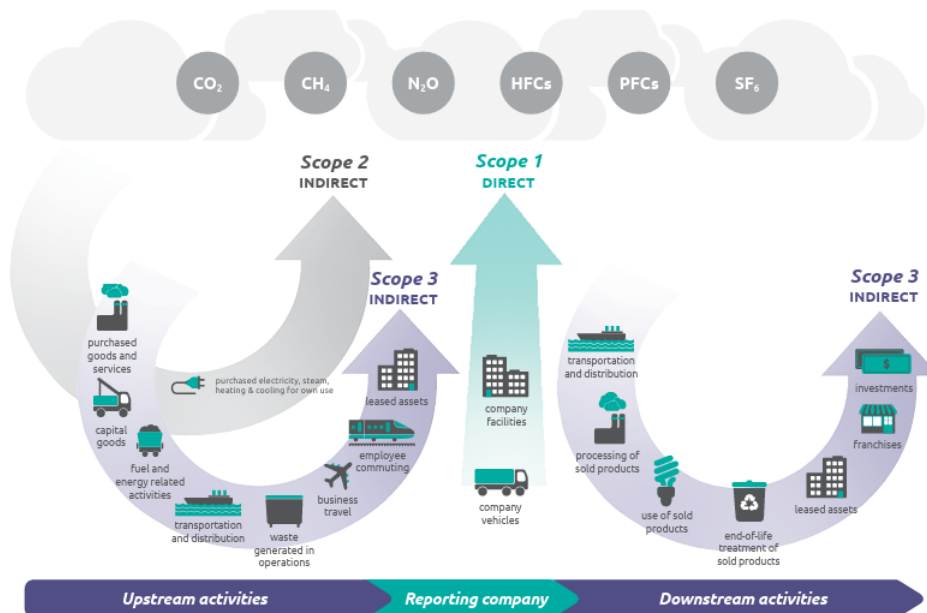
GHG-protokollan mukainen päästöraportointi tarjoaa yrityksille monia merkittäviä hyötyjä. Vihreän siirtymän myötä yritykset voivat vahvistaa kilpailuetuaan entisestään ja erottautua vastuullisella toiminnallaan. Lisäksi avoimet raportit parantavat sijoittajien ja muiden sidosryhmien ymmärrystä yritysten ympäristövaikutuksista, mikä voi lisätä luottamusta ja houkuttaa uusia yhteistyökumppaneita.

Yritysten vastuullisuustoiminnan edistyneisyys voi myös tuoda etua erilaisissa kilpailutuksissa, joissa kestävä kehitys on yhä tärkeämpi valintakriteeri. Lisäksi laadukkaampi data mahdollistaa tarkemman päästöjen vähentämisen ja tukee päätöksentekoa, jolloin yritys voi toimia tehokkaammin ja suunnata resursseja vastuullisemmin. Näin ollen systemaattinen päästöraportointi ei ole pelkästään ympäristöteko, vaan myös strateginen työkalu liiketoiminnan kehittämiseen ja kilpailukykyyn parantamiseen. Kun yritys tietää tarkasti, mikä osa-alue vaikuttaa eniten päästöihin, se voi keskittyä tehokkaasti päästöjen vähentämiseen (EcoOnline, 2024).

Scope 1 sisältää yrityksen omasta toiminnasta syntyvät suorat päästöt. Oman toiminnan aiheuttamat suorat päästöt sisältävät päästöt toimista ja kohteista, joita yritys omistaa tai hallinnoi.

Scope 2 sisältää yrityksen epäsuorat energiankäytön päästöt. Tämä tarkoittaa yrityksen ostaman energia ja lämmön/ jäähdytyksen tuotannosta aiheutuvia epäsuoria päästöjä (NGS Finland, 2023).

Scope 3 sisältää yrityksen muut epäsuorat päästöt. Scope 3 -standardi, joka on osa "Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard" -julkaisua, tarjoaa yrityksille menetelmän arvioida ja raportoida koko arvoketjussa kasvihuonekaasupäästöjä. Tämä standardi kattaa 15 eri päästöluokkaa, jotka sisältävät sekä yrityksen toiminnan ylä- että alavirran päästöt. Alavirran eri kategorioita on 8 ja ylävirran 7 kpl. Scope 3 -päästöjen laskeminen auttaa yrityksiä tunnistamaan merkittävimmät päästölähteet arvoketjussaan ja keskitymään päästövähennystoimiin siellä, missä niillä on suurin vaikutus. Standardi tukee myös strategioita, joissa yritykset voivat tehdä yhteistyötä toimittajien ja asiakkaiden kanssa ilmastovaikutusten vähentämiseksi koko arvoketjussa. (Pankaj Bhatia ym., 2011, s. 5–7 ja 29–31.) Kuvaus Scope 1, 2 ja 3:n ulottuvuuksista kuvassa 1.



Kuva 1. GHG-päästöjen Scope 1, 2 ja 3 kuvaus arvoketjussa (Pankaj Bhatia ym., 2011, s. 5).

Scope 3:n raportointi on yritysstandardin (A Corporate Accounting and Reporting Standard) mukaan vapaaehtoista, toisin kuin scope 1:sen ja 2:sen. Se on suunniteltu lisäämään yhdenmukaisuutta. Scope 3-päästöt muodostavat tyypillisesti >80% organisaatioiden kasvihuonekaasupäästöistä. (NGS Finland, 2023.)

2.1.2 Päästökertoimet polttoaineille


Laskuissa tarvittava päästökerroin dieselpolttoaineelle GHG protokollan Laskentatyökalut ja ohjeistus -sivulla olevasta päästökerrontaulukosta (Taulukko 1) on 2,91 kg CO₂/l (Greenhouse Gas Protocol, 2024).

Taulukko 1. Päästökerroin dieselpolttoaineelle (Greenhouse Gas Protocol, 2024)

Table 1. CO ₂ Emission Factors by Fuel				
Region	Fuel	Fossil CO ₂ EF	Biogenic CO ₂ EF	EF Unit
Other ¹	Jet Kerosene	2,57		kg/L
Other ¹	Aviation Gasoline	2,18		kg/L
Other ¹	Motor Gasoline/Petrol	2,29		kg/L
Other ¹	On-Road Diesel Fuel	2,91		kg/L

Käytetyissä päästökertoimissa on pieniä eroavaisuuksia riippuen ilmoittajasta. Taulukossa 2 alla, Tilastokeskuksen ilmoittama CO₂-päästökerroin, 2,64 kg CO₂/l sekä polttoaineen tehollinen lämpöarvo 42,8 GJ/t. (Tilastokeskus, 2025).

Taulukko 2. Tilastokeskuksen päivitetty päästökerroin ja lämpöarvo diesel polttoaineelle (Tilastokeskus, 2025).

Tilastokeskus 

POLTTAINELUOKITUS 2025

Koodi	Nimike	Vanha polttoainekoodi	Polttoainekohtainen määrä-	CO ₂ -oletuspäästökertoimet koko energiasisältöä kohti (alempaan lämpöarvon mukaisesti)			Oletushapetuskerroin	Tehollinen (alempi) oletus-
				Fossiilinen CO ₂	Bioperäinen CO ₂	Seoksen yhdistetty CO ₂		
				[t/TJ]	[t/TJ]	[t/TJ]		[GJ/yksikkö]
11.30.30	Dieselöljy	1133	t	58,6 *	14,8 *	73,4 *	1,0	42,8
11.30.40	Kevyt polttoöljiv. rikitön	1135	t	68,0 *	5,0 *	73,0	1,0	43,2

Tilastokeskuksen CO₂-kertoimet eivät sisällä muita kasvihuonekaasuja ekvivalenttilisinä vaan ainoastaan palamisessa syntyvän CO₂:n. Ne eivät myöskään sisällä valmistuksesta, kuljetuksesta, yms. syntyviä elinkaaripäästöjä.

Energian säästötoimenpiteiden päästövaikutusten arvioinnissa käytetään joko Suomen keskimääräistä tai marginaaliperusteista CO₂-päästökerrointa. Marginaalikerroin soveltuu kansainvälisiin raportointeihin, mutta yksittäisissä hankkeissa tulisi käyttää keskimääräistä tai sähköntuottajan omaa kerrointa. Tilastokeskuksen mukaan Suomen keskimääräisen sähköntuotannon CO₂-päästöjen kolmen viimeisen tilastovuoden (2021–2023) keskiarvo on 60 g CO₂/kWh. Tämä luku sisältää vain kotimaisen energiantuotannon, eikä tuontisähköä ole huomioitu. Yhteistuotanto on jaettu energiamenetelmällä. (Motiva, 2025.)

2.2 Kuonankuljetus Harjavallassa

Kupariliekkiuunin kuonassa on 2–4 % kuparia, joka saadaan lähes kaikki talteen kuonarikastamalla. Kuona lasketaan suoraan liekkiuunista laskuränniä pitkin kahteen pataan kiirunatunneliin, josta padat kuljetetaan jäähtymään patajäähdytysalueelle pienen vesisuihkun alle. Kuona hidastetaan, jotta sen kemia saadaan edullisemmaksi kuparin talteenottoa varten. (Metsärinta,

2009.) Vuodesta 2016 ajossa on käytetty samanaikaisesti kahta kuonankuljetustrukkia, jotta kuonareikää ei tarvitse välissä sulkea laskun aikana. Yhden kierroksen pituus ajallisesti on n. 12–17 minuuttia. Kierroksella kiirunatrukki lähtee täyden padan kanssa kohti jäähdytysaluetta ja palaa sieltä tyhjän padan kanssa laskien sen paikoilleen kiirunatunneliin. (Hautamäki, 2025.) Kuvassa kaksi on ajoreitti varikolta patatielle (vaalean sinisellä) ja edelleen patatunneliin pohjoiseen ja sieltä patajäähdytysalueelle (tumman sinisellä) patatietä pitkin, lisäksi kuvan oikeassa yläkulmassa on satunnaisempi käynti. Reitin pituus on n. 1.5 km.



Kuva 2. Kuonankuljetusreitti tehdasalueella (Veolia, 2025)

Kuvan kolme oikeassa laidassa kuonapatoja vesisuihkun alla ja vasemmalla jo jäähtyneitä patoja, joista viedään tyhjä pata takaisin täyttöön.



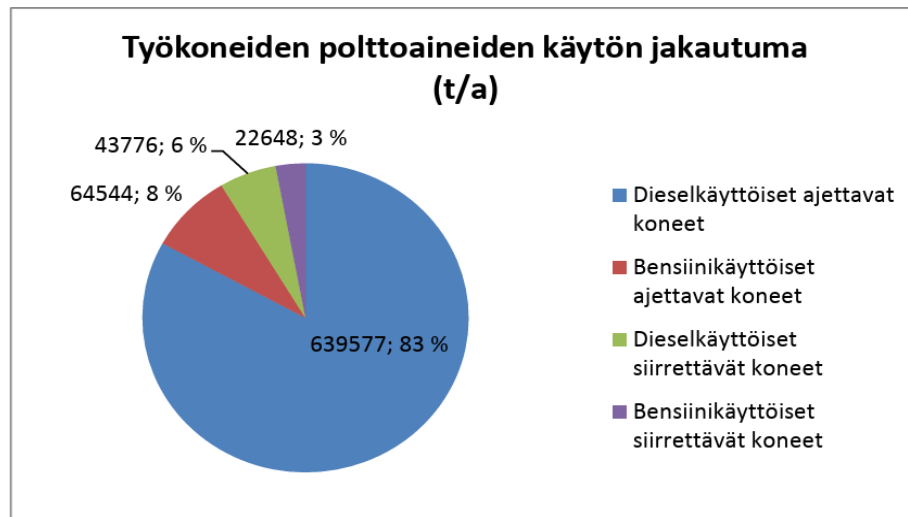
Kuva 3. Patajäähdytysalue.

2.2.1 Kiruna UV SH60

Tällä hetkellä olemassa oleva kuonankuljetuskalusto on NMV-groupin (Nybergs Mekaniska Verkstad Ab) Kiruna UV SH60 Slag Hauler Ruotsista, näitä kutsutaan ”kiirunoiksi”. NMV yhtymän historia on yli 70-vuotias. (NMV Group, n.d.) Kuonankuljetuskalusto on eri aikoihin hankittua ja täten eri ikäistä. Autoja on viisi, vanhimmat hankittu 2005 ja 2006, seuraava 2011, ja tuoreimmat kaksi, 2019 ja 2023. Kahdessa uusimmassa on tehokkaammat Scanian moottorit. Käytettyjen ”trukkien” maksimi kuormankantokyky on n. 60 t. Kalusto on Bo-Han omistuksessa mutta käyttöä operoi Valtasiirto. (Hautamäki, 2025.) Scania DC13 313A moottoreiden termiseksi hyötysuhteeksi luvataan jopa 50 %. (Henrikson, 2021)

2.3 Polttomoottorit

Työkoneiden yhteenlaskettu polttoaineen kulutus Suomessa on 770 000 t/a, josta 90 % dieselpolttoainetta (lähinnä mpö = moottoripolttoöljy). Päästöjen vähennystoimenpiteet tulee kohdistaa ensisijaisesti juuri dieselkäyttöisiin koneisiin. Työkoneiden sekä liikenteen yhteenlaskettu polttoaineen kulutus on 4600000 t/a, ja työkoneiden osuus tästä 19 %. (Nylund ym., 2016, s.1.) Työkoneiden käyttöikä sekä -aste vaihtelevat merkittävästi eri koneiden välillä. Tyypillinen työkone dieselmoottorin korjausväli vaihtelee n. 8000–10000 tunnin välillä. Kuvassa 4 työkoneiden polttoaineen käytön jakauma vuonna 2015.



Kuva 4 Työkoneiden polttoaineiden käytön jakauma v.2015 (Nylund ym., 2016, s.7)

Työkoneiden CO₂ päästöt olivat samana vuonna (2015) noin 2,4 milj. tonnia. (Nylund ym., 2016, s. 6–7.) Vuonna 2022 työkoneiden kasvihuonekaasupäästöt olivat 2,5 Mt CO₂-ekv., joka on n. 5 % Suomen kokonaispäästöistä. Työkoneiden päästöt ovat pysyneet viime vuosina suurin piirtein samalla tasolla. (Ympäristöministeriö, 2024, s. 67.)

2.4 Sähkökäyttöiset järjestelmät

Sähkösäädin hyötysuhde on ylivoimainen polttomoottoriin verrattuna (85–95 % vs. 25–30 %). Kylmissä olosuhteissa joudutaan kuitenkin huomioimaan mahdollinen ohjaamon lämmitykseen tarvittava lisäenergia. (Motiva, 2024)

Sähkösäädin jaetaan kahteen pääryhmään: DC- (tasavirta) ja AC- (vaihtovirta) moottoreihin. Viime vuosina AC-moottorit ovat syrjäyttäneet DC-moottorit sähkö- ja hybridiajoneuvoissa niiden paremman tehopainosuhteen, laajan vääntöalueen ja ohjattavuuden ansiosta. AC-moottorit ovat myös huoltovaivattomampia ja energiatehokkaampia. Suurin etu AC-moottoreissa on niiden monipuoliset ohjausmahdollisuudet, jotka mahdollistavat nopean vääntömomentin säädön ja tehokkaan energian talteenoton. (Makkonen, 2017, s.7.) Sähkösäädin voidaan jakaa vielä niiden tyyppien mukaan, joista ajoneuvoissa käytetään eniten kolmivaiheisia induktiomuottoreita, harjattomia

kestomagneettitasasähkömoottoreita, synkronireluktanssimoottoreita ja kestomagneettiatahtimoottoreita. (Lindgren, 2020, s.6.)

2.4.1 Akkuteknologiat

Suurin osa akuista perustuu kemialliseen energian varastointiin, joka vapautuu sähkövirran muodossa purkautumisprosessissa. Akut jaetaan primääriakkuihin, joita ei voi ladata uudelleen, ja sekundäärisiin, jotka kestävät toistuvan latauksen. Akku koostuu sarjaan tai rinnan kytketyistä kennoista, joissa elektrolyytti ja elektrodit (katodi ja anodi) mahdollistavat hapettumis- ja pelkistymisreaktiot. Hapettumisreaktio anodilla laskee akun varaustason, kun taas latauksessa energian syöttö nostaa varaustason. Kaikki reaktiot perustuvat ionien ja elektronien liikkumiseen elektrodien välillä.

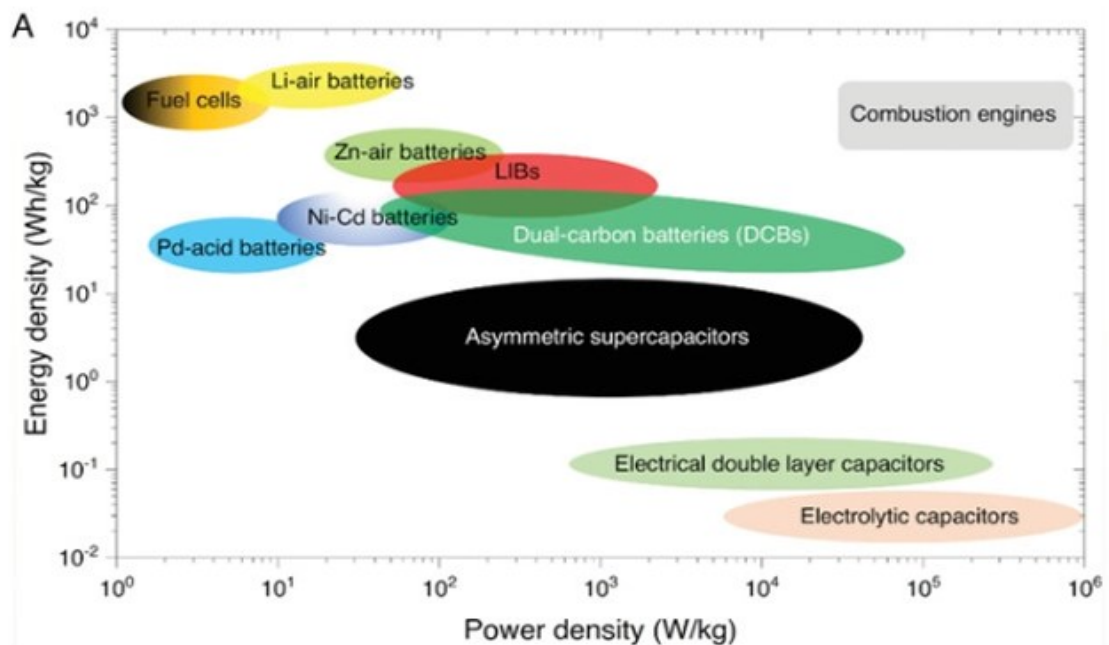
Perinteisissä akuissa käytetään usein ympäristölle haitallisia materiaaleja, kuten nikkeliä ja kadmiumia, jotka ovat myrkyllisiä ja vaikeasti kierrätettäviä. Koboltti, jota tarvitaan sähköajoneuvojen akuissa, on riskialtis sen rajallisen saatavuuden vuoksi. Ympäristöystävällisissä akuissa komponentteja, kuten elektrodit, korvataan kestävämmillä materiaaleilla, esimerkiksi ligniinillä tai ilmalla. Tulevaisuudessa odotetaan kehittyvän kiinteä- tai geelielektrolyyttisiä akkuja, jotka olisivat turvallisempia ja pitkäikäisempiä. Täysin ympäristöystävällisen akun kehittäminen vaatii huomiointia raaka-aineiden hankinnasta käytön jälkeiseen kierrätykseen asti. (Savolainen, 2023.)

Lyijy kuuluu maailman kierrätetyimpiin metalleihin, ja Euroopassa jopa 99 % lyijyakuista päätyy kierrätykseen. Bolidenin lyijyn tuotannosta noin kaksi kolmasosaa perustuu kierrätysmateriaaleihin, joista suurin osa koostuu käytetyistä lyijyakuista. Tämä tehokas kierrätysprosessi vähentää luonnonvarojen kulutusta ja edistää kestävästä metallintuotantoa. (Boliden, 2025.)

Euroopan komission raportti vuodelta 2018, joka antaa katsauksen liittyen akkujen suunnitteluun, tuotantoon ja ympäristöjalanjäljen pienentämiseen, painottaa haitallisten materiaalien vähentämistä, runsaasti saatavilla olevien

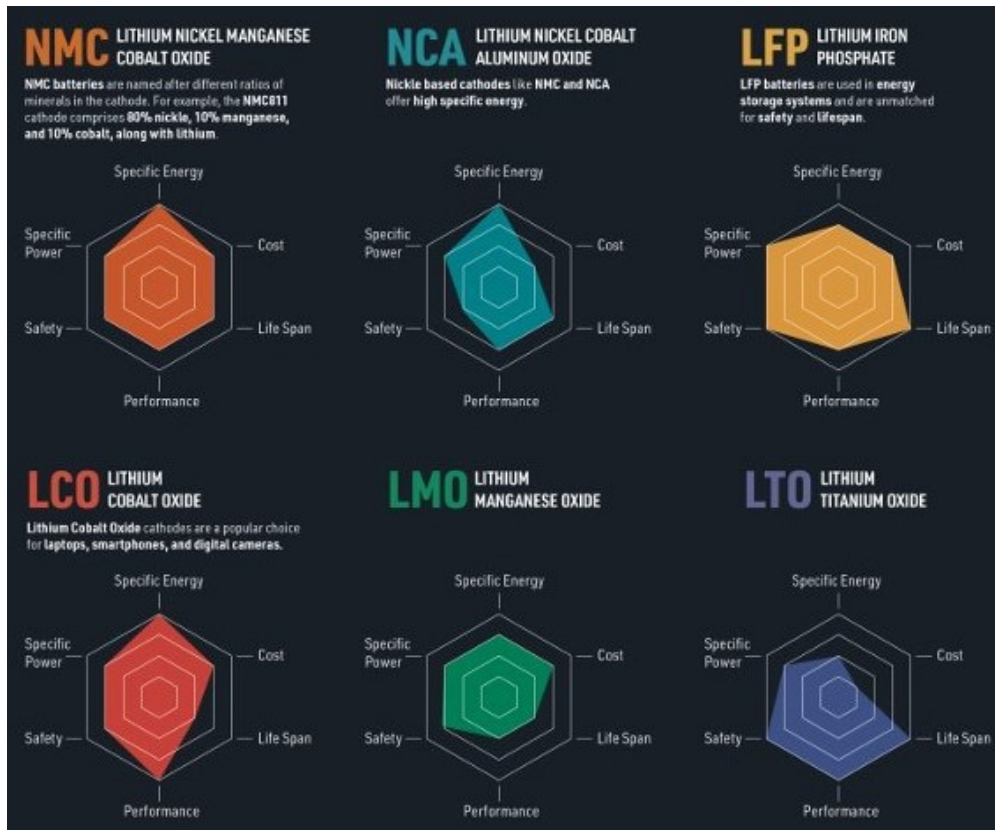
materiaalien käyttöä, energiatihyden ja kierrätettävyyden parantamista, akkujen valmistukseen käytettävän energian puhtautta sekä latauksen hyötysuhteen parantamista ympäristöjalanjäljen pienentämiseksi. (European Commission, 2018, s. 31.)

Kuvassa 5 on eri akkuteknologioiden energia- ja tehotiheyksistä suhteessa polttomoottoriin. Litiumioniakut pysyvät sähköautojen tärkeimpänä energianlähteenä vielä pitkään. Kuitenkin uusien teknologioiden, kuten Solid state- ja natriumioniakkujen, kehittäminen on olennaista ympäristövaikutusten ja kustannusten vähentämiseksi. Akkutuotannon ja -kierrätyksen kestävyuden parantaminen vaatii myös merkittäviä edistysaskeleita sekä teknologiassa että sääntelyssä. (Parkkinen, 2024, s. 37.)



Kuva 5. Kuvaaja energia- ja tehotiheydestä, (Savolainen, 2023).

Eri Litiumioniakutyyppejä on monenlaisia. Kuvassa 6 vertaileva kuvaus eri tyyppien ominaisuuksista.



Kuva 6. Eri Litiumioniakkutyyppejä ominaisuusalueittain, (Parkkinen, 2024).

Litiumioniakut ovat vakiinnuttaneet asemansa ylivoimaisena akkuteknologiana viimeisen vuosikymmenen aikana, kiitos merkittävien kustannussäästöjen, suuremman energiatihedysten ja pidemmän käyttöiän. Niiden hinnat ovat pudonneet jyrkästi, vuodesta 2010 lähtien laskien 1 400 dollarista kilowattitunnilta alle 140 dollariin vuonna 2023. Tämä dramaattinen kustannuskehitys on mahdollistanut laajemman käyttöönoton, erityisesti tutkimuksen, kehityksen ja valmistuksen mittakaavaetujen ansiosta. Lisäksi niiden suurempi energiatiheys verrattuna lyijyakkuun mahdollistaa kevyemmät ja kompaktimmat rakenteet. (IEA. 2024.)

VTT:ltä Tuomas Pinomaa sanoo akkujen olevan keskeisessä roolissa siirtäessä pois fossiilisista polttoaineista ja tiivistää WEF:n (Maailman talousfoorumin) ennustaneen että 60 % käytetyistä sähköajoneuvojen akuista kierrätetään kiinteisiin asennuksiin vuoteen 2030 mennessä. (Pinomaa, n.d.)

Akkujen lataushäviöt ovat yksi huomioon otettava seikka. Tyypillisesti akun latauksen hyötysuhde on 75–95 prosenttia. (Rudschies, 2022.)

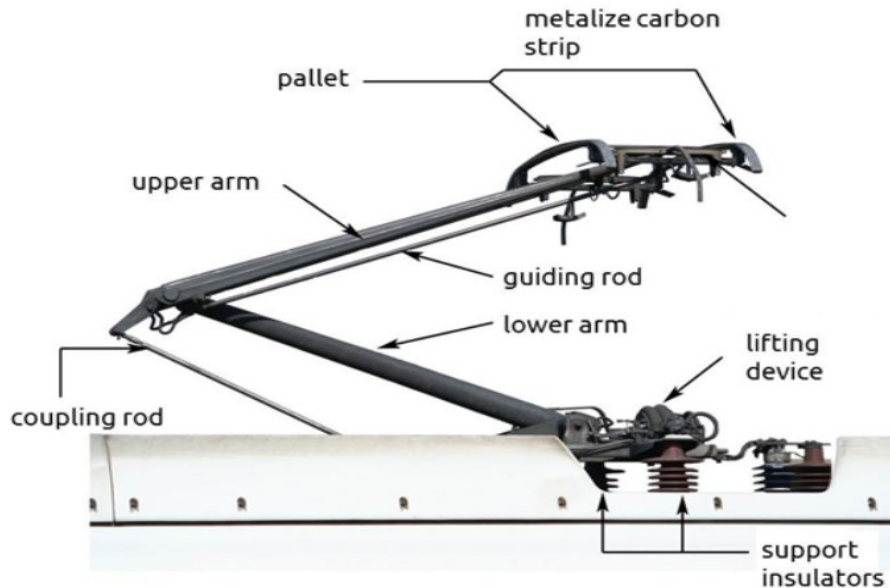
2.4.2 Johdin- ja kiskojärjestelmät

Johdinautot ovat ympäristöystävällisiä, paikallispäästöttömiä ja hiljaisia sähkömoottoreidensa ansiosta, minkä lisäksi niiden kiihdytys on tasainen ja energiatehokas, ja huollon tarve on vähäinen. Liikennöinti on kustannustehokasta, minkä vuoksi järjestelmiä on käytössä ja laajennetaan edelleen. Johdinautoja suositetaan ekologisuuden takia, ja ne eivät ole riippuvaisia öljypohjaisista polttoaineista. Vahvan vääntövoimansa ansiosta ne soveltuvat erityisesti mäkisille reiteille.

Haittapuolina ovat korkeat investointi- ja pääomakustannukset, minkä vuoksi ne ovat kannattavia vain vilkkaimmilla reiteillä. Johdinautot vaativat ilmajohtojen ja syöttöasemien rakentamista, mutta investoinnit ovat silti pienemmät kuin raideliikenteessä, joka mahdollistaa suuremman kuljetuskapasiteetin. Korkeasta alkuinvestoinnista huolimatta laajamittainen käyttö voi tehdä johdinauto liikennöinnistä taloudellisesti järkevää (Nordlundin liikennesivut, 2011).

Ratasähköjärjestelmä on rataverkon sähkönjakeluverkko, joka mahdollistaa liikkuvan kaluston energiansiirron. Se koostuu ajojohdinjärjestelmästä, paluuvirtapiiristä, sekä sähkönsyöttöjärjestelmästä, joihin kuuluvat sähkönsyöttöasemat ja erottimet. Lisäksi kokonaisuus sisältää tekniset järjestelmät, jotka vastaavat sähkön jakelusta ajojohtimeen, varmistuen energiatehokkaan ja luotettavan rataliikenteen toiminnan. (Helsingin kaupunki, 2025)

Pantografi on virroitin, jota käytetään raideliikenteessä sähkövirran siirtämiseen liikkuvaan kalustoon. Se asennetaan kulkuneuvon katolle ja kerää virran yläpuolisesta ajojohtimesta, säätyen automaattisesti langan kireyden mukaan. Tyypillisesti järjestelmässä on yksi ajojohto, kun paluuvirta kulkee radan kautta takaisin sähköverkkoon. Pantografi on laajasti käytetty virrankeräystekniikka junissa, raitiovaunuissa ja muissa sähköisissä raidekuljetuksissa. Kuvassa 7 on tyypillinen virroitimen rakenne (Railssystem.net, n.d).



Kuva 7. Virroitin. (Railssystem.net, n.d.)

Sähkövetokalustoon kuuluvat sähköveturit ja -junat, jotka saavat tarvitsemansa tehon radan yläpuolella olevasta ajolangasta virroitimen kautta. Sähköveturi voidaan liittää vetämään erilaisia vaunuyhdistelmiä, kun taas sähköjuna on kokonaisuus, jossa vetokalusto ja muut tilat muodostavat yhtenäisen rakenteen—esimerkiksi Pendolino toimii näin. (Saarinen, 2009, s. 18)

2.5 Hybridijärjestelmät

Henkilöautohybrideissä yleisin voimanlähteiden yhdistelmä on polttomoottori ja sähkömoottori. Polttomoottorin ja hydraulisen järjestelmän yhdistelmä on harvinainen henkilöautoissa, mutta yleisempi raskaissa ajoneuvoissa ja työkoneissa. Vauhtipyöräteknikkaan perustuva energiavarasto on harvinainen, ja tunnetuin sovellus on Formula 1-autojen KERS-järjestelmä, joka otettiin käyttöön kaudella 2009. (Motiva, 2025.)

Raskaissa työkoneissa järjestelmät voivat olla erikoisempia kuten maasähköhybridejä esimerkiksi maasähkö-akku tai maasähkö-polttomoottori yhdistelmiä. Pisimmällä sähköistys on maanalaisissa työkoneissa. Kaivoksissa maasähköllä toimivia koneita on ollut jo vuosien ajan, ja nyt niitä korvataan akkusähköisillä versioilla (Tervola, 2024).

2.6 Kevitsa & Aitik pilotti

Boliden investoi 300 miljoonaa SEK:iä (27,4 M€) sähköistetyn liikenteen laajentamiseen Aitikin ja Kevitsan avolouhoksissa vuosina 2020–2021. Vuonna 2018 käynnistettiin pilottihanke Aitikissa, jossa asennettiin 700 metrin sähköinen johdinlinja ja muutettiin neljä kaivosautoa sähkökäyttöisiksi. Tämä paransi tuottavuutta ja vähensi dieselin kulutusta. Aitik oli ainoa arktisessa ilmastossa sijaitseva kaivos, jossa on sähköinen johdinlinja. Kaivokselle rakennettiin vielä kolme kilometriä sähköistä johdinautolinjaa ja kymmenen kuorma-autoa muutettiin sähkökäyttöisiksi, näiden on arvioitu vähentävän kuljetusten kasvihuonekaasupäästöjä 15 %.

Kevitsassa muutettiin vielä tämän jälkeen 13 kaivosautoa sähkökäyttöisiksi ja rakennettiin 1,8 kilometriä sähköistä johdinautolinjaa, tämän odotetaan vähentävän kasvihuonekaasupäästöjä 9 %. Järjestelmät otettiin käyttöön vaiheittain vuoteen 2022 asti. Investoinnin valmistuttua dieselin kulutuksen on laskettu vähentyvän 5 500 m³ vuodessa, lisäksi tuottavuus ja kuljettajien työympäristö on parantunut alhaisemman melun ja vähentyneen huoltotarpeen ansiosta.

Aitikin pilottihanke on saanut tukea Ruotsin energiavirastolta ja toteutettiin yhteistyössä ABB:n, Eitechin, Caterpillarin ja Pon Equipmentin kanssa. Kuorma-autojen sähkövirtaa tuottavat ilmajohdot on valmistettu Aitikissa louhitusta kuparista. (Boliden, n.d.b.)

Tekniseksi ratkaisuksi valittiin ensimmäiseen vaiheeseen Aitikkiin kuljetusautojen sähköistäminen ajojohtimilla, jotka ovat samanlaisia kuin rautatiesoveluksissa käytettävä tekniikka. Vastaavia ratkaisuja on käytetty vuosikymmeniä vaihtelevalla menestyksellä. Kuljetusautoina vakiokuorma-autot Caterpillar 795F varustettiin AC-sähkökäyttöjärjestelmällä. Kevitsassa käytetty auto kaivosto Komatsu 830E-5.

Kaivoksessa toteutettu vaunujärjestelmä avaa mahdollisuuden akkukäyttöisten sähköisten kiviautojen dynaamiseen lataukseen. Yksi projektissa tutkittu konsepti on seuraavan sukupolven kaivoslaitteet. Tämä konsepti perustuu

järjestelmään, jossa dieselmoottori korvataan akulla, mikä mahdollistaa ympäristöystävällisemmän ja tehokkaamman toiminnan. Akku latautuu ajettaessa ylämäkeen vaunulinjalla, jolloin liike-energiaa hyödynnetään latausprosessissa. Kuljetus tapahtuu tasaisesti akusta saatavalla sähköllä, mikä takaa vaudeuden ja energiatehokkuuden. Lisäksi akun lataaminen tapahtuu hidastamalla laskeutuessa, mikä mahdollistaa energian talteenoton ja optimoi järjestelmän kokonaiskulutuksen. Akun avulla voidaan varmistaa myös tasainen kulku kaivurin luokse sekä takaisin vaunulinjalle, jolloin liikennöinti on sujuvaa ja hallittua. Tämä järjestelmä edistää kestävästä kehitystä ja parantaa energian hyödyntämistä tehokkaasti. Tällaisen järjestelmän simulaatiot, joissa käytetään pilottiprojektin todellista dataa ja eri valmistajien energian varastointijärjestelmien realistisia suorituskykylukuja, osoittivat, että ratkaisu pystyisi hallitsemaan kaivoksen tuotantoa ilman dieselin kulutusta. Vaikka tämä on muutama vuosi ajassa edellä, alan kanssa käydään keskusteluja siitä, miten tämä voidaan toteuttaa. (Rikard & Ranggård, 2020, s. 47–51.)

3 MAHDOLLISIA LAITETOIMITTAJIA

Laitetoimittajiin oltiin yhteydessä sähköpostein sekä suoraan soittamalla. Laitetoimittajilta kysyttiin heidän kalustonsa sähköistyksen mahdollisuuksista. Vastauksia viestein saatiin hyvin niukasti. Lisäksi tutkittiin laitetoimittajien kotisivuilta olevasta materiaalista, löytyykö heiltä sähköistä kuonankuljetus kalustoa. Kun alkoi näyttää selvältä, että tarvittavan kaltaista kumipyöräkalustoa ei vielä markkinoilla suoraan ole, kartoitettiin tarjonnan nykytila sähköistymisen sekä ylipäätään kuonankuljetuksen osalta.

3.1 Sandvik

Sandvik TH550B on Sandvik Mining and Konstruktion Oy:n valmistama akkukäyttöinen dumperi, jonka kuormankanto kyky 50 t ja omamassa 49,6 t. Moottoriteho 4*180 kW. Akkuteknologiana Litium-rautafosfaati (LiFePo₄ tai LFP).

Akkupaketin paino on 8300 kg, kapasiteetti 576 Ah ja nimellinen energiasisältö 354 kWh, sekä jatkuva saatava teho 540 kW. Akun vaihdon sanotaan sujuvan 3 minuutissa eikä toimitus vaadi kuljettajan hytistä poistumista. Lisäksi laitteessa on ns. käärysakku, jonka nimellinen energiasisältö on 22 kWh ja kapasiteetti 72 Ah, käärysakku painaa 280 kg. Hydraulioiljyn tilavuus on 156 l. Laite on paikallispäästötön (Sandvik, 2024).

Sandvik Mining and konstruktion Oy:n kotipaikka on Tampere ja se on perustettu jo vuonna 1897. Sandvik ei kuitenkaan valmista tällä hetkellä kuonankuljetuskalustoa. Kuvassa 8 on Sandvikin TH550B sähködumpperi. Sandvikilla oltiin kiinnostuneita keskustelemaan mahdollisista tulevaisuuden mahdollisuuksista. Heiltä on tulossa kaupalliseen tuotantoon vuoden 2027–28 seudulla isompi akkudumpperi, Sandvik TH665B, jolla on poikkeuksellinen 65 tonnin kantavuus. Tehdastestauksien jälkeen Kaliforniassa, sen käyttökelpoisuutta testataan vielä Sunrise Dam -kultakaivoksessa Australiassa ennen kaupallisen tuotannon alkamista. (Huff, 2022.)



Kuva 8. Sandvik TH550B BEV (Sandvik, 2024.)

3.2 Epiroc

Epiroc on kaivos- ja rakennusteollisuuden johtava innovatiivisten ratkaisujen toimittaja. Yritys auttaa asiakkaitaan parantamaan tuottavuutta, vähentämään kustannuksia ja toimimaan kestäväen kehityksen mukaisesti laajan tuote- ja

palveluvalikoiman avulla. Heiltä löytyy sähköisellä voimalinjalla Kaivosauto MT42 SG Trolley. Kyseessä virroitinlinjasta päävoimansa saava sähköinen maankuljetus ajoneuvo, eli ns., sähködumpperi, jonka kuljetuskapasiteetti on 42 t, ja omamassa 37 t. Siinä on päämoottorilla 2*260 kW vetotehoa sekä 2*1100 Nm vääntövoimaa, ja apumoottorilla 160 kW tehoa ja 600 Nm vääntö. Sen litium-nikkeli-mangaani-koboltti (NMC) akkupaketissa on 225 kWh kapasiteetti. Tälle laitteelle laitetoimittaja lupaa 50 % tehostusta nousuissa verrattuna perinteiseen MT42 S:n. Vaunujärjestelmän dynaaminen lataus antaa kuljetinautolle virtaa tarvittaessa ja lataa samalla akkua. Ei tarvetta pysähtyä tankkaamaan, lataamaan tai vaihtamaan akkua, vain jatkuvaa kuljetusta. Dumpperia voi käyttää johdinjärjestelmällä ja akulla.

Epirocilla oltiin kiinnostuneita pohtimaan vaihtoehtoa, jossa mietittäisiin nykyisen Bohalla käytössä olevan kaluston sähköistämistä. Epirocilta kerrottiin, että heidän voimalinjaansa on toimitettu muillekin laitevalmistajille. ABB on Epirocilla laitetoimittajana pantografin, moottoreiden, inverttereiden ja muuntajien osalta. (Epiroc, n.d.) Kuvissa 9 ja 10, MT42 SG Trolley johdinlaitteistoineen.



Kuva 9. Kaivosauto MT42 SG Trolley sivulta (Epiroc, n.d.)



Kuva 10. 42 t johdinauto ja ajojohtimet (Epiroc, n.d.)

3.3 Liebherr

Liebherr tarjoaa järeää dumperikalustoa myös sähköisenä versiona, esimerkiksi heidän T 264 Battery Electric kaivoskuorma-auto. Tällä 240 t kuljetusratkaisulla on sekä staattinen että dynaaminen lataus mahdollista. Staattinen laturi on saatavana sekä manuaalisena että robottiversiona, ja se sisältää jopa 6 MW:n automaattisen kytkentäjärjestelmän megawatin latausjärjestelmän (MCS) liittimellä, joka voi ladata T 264 BE:n alle tunnissa.

Dynaamiseen latausjärjestelmään kytkettynä akkukäyttöiset sähkökuorma-autot käyttävät verkkoenergiaa virtalähteenä kuljetussegmenttien aikana. Liebherr tarjoaa kaivosautoihinsa kahta erilaista dynaamista latausratkaisua: Trolley Assist System; jossa käytetään yläpuolista virroitinta, joka liittää kuorma-autojen sähkökäyttöjärjestelmän kaivoksen sähköverkkoon. Se on suunniteltu akkusähköisille kaivosautoille. Sekä, Liebherr Power Rail; joka luokkariippumattoman konseptinsa ansiosta hyödyntää kuorma-auton kylkeen asennettua

tankoa ja perustuu Liebherrin olemassa olevaan vaunutankotekniikkaan. Se on suunniteltu helposti asennettavaksi ja siirrettäväksi paikan päällä.

Sähköpyörämootoreiden lisäteho tarkoittaa suurempia nopeuksia nousuissa. Liebherr tarjoaa tällä hetkellä virroitinratkaisun koko kuorma-autovalikoimaansa, mukaan lukien upouusi T 264 Battery Electric. (Liebherr, n.d.a.) Liebherr ei kuitenkaan valmista kuonankuljetuskalustoa. Kuvassa 11 virroitinavustusjärjestelmä T 264:ssa.



Kuva 11. T 264 Battery Electric ja dynaaminen latausjärjestelmä ohjaamon yllä. (Liebherr, n.d.b.)

3.4 Komatsu

Komatsulta löytyy dumperiajoneuvoja juuri esimerkiksi kaivosteollisuuteen myös sähköistettyinä versioina useampia. Esimerkkinä Komatsun 830E-5 on käytössä Boliden Kevitsan kaivoksella kivenkuljetukseen. Komatsun vaunun avustusjärjestelmä lupaa kulkea ylämäkeä lähes kaksi kertaa nopeammin sähköisenä kuin polttomoottoriversiona, ja kuitenkin kuluttaa jopa 70 % vähemmän polttoainetta verrattuna vastaavan luokan Komatsu dumpereihin. Etuna on myös moottorin käyttöiän piteneminen. (Komatsu, n.d.) Kuvassa 12 on kuva johdinpyloneista sekä niistä virtansa saavasta dumperista.



Kuva 12. Johdinpylonit sekä auto. (Komatsu, n.d.)

3.5 Kamag

Kamag on Saksalainen Tii-group:iin (Transport Industry International) kuuluva yritys, jolla on yli 30 vuoden kokemus erilaisten teollisuus- ja erikoisajoneuvojen valmistamisesta. Kamagilta löytyy perinteinen polttomoottorilla toimiva kuonankuljetusajuri (Tii-Kamag, 2025), valitettavasti ei kuitenkaan sähköistä kalustoa tähän tarkoitukseen.

Kamagilla kuitenkin on esimerkkinä sähköinen ePrecisionMover, jonka maksimikuorma on 30 t. Laitteessa on 140 kWh:n akkupaketti. Syiksi ettei Kamagilla ole tarjolla kuonankuljetukseen sähköistä versiota, kerrottiin aggressiivisen ympäristön metalliteollisuudessa sekä kylmän sään ja järeän kokoluokan.

3.6 Kress

Kress-yhtymä on maailman johtava kuonankuljetuskaluston valmistaja yli 50 vuoden kokemuksella, sen alustoja on saatavilla laajassa valikoimassa aina 250 t kantavuuteen asti. Yhtiön kotipaikka on Brimfield, Illinois, Yhdysvallat, yhtiöllä on myös toimipiste Euroopassa, Saksassa. Jokainen kuljetus vaunu räätälöidään kunkin yksittäisen työmaan tuotantovaatimusten ja mittarajoitusten mukaan. Käyttövoimansa ne saavat Caterpillarin tehomoduuleist. (Kress, 2025.) Kotisivuilla ei ole kuitenkaan minkäänlaista mainintaa sähköisestä

kalustosta eikä sähköposti tiedusteluun asian tiimoilta vastattu, joten heiltä ei saatu tietoa mahdollisuudesta kaluston sähköistämiseksi.

3.7 Techne Kirow

Techne kirow Gmbh on suunnitellut ja rakentanut metalliteollisuudelle jo yli 25 vuotta kuonankuljetuskalustoratkaisuja. Sen kotipaikka sijaitsee Saksassa, Leipzigissä. (Techne kirow, n.d.) Ei kuitenkaan ole mitään mainintaa sähköisestä kalustosta kotisivuilla eikä sähköpostitiedusteluun asian tiimoilta vastausta, joten heiltäkään ei saatu tietoa kaluston mahdollisuudesta sähköistämiseksi.

3.8 Kiruna Utility Vehicle

Tällä hetkellä olemassa oleva kuonankuljetuskalusto BoHalla on pääosin NMV-groupin (Nybergs Mekaniska Verkstad Ab) Kiruna UV SH60 Slag Hauler Ruotsista. NMV yhtymän historia on yli 70-vuotias. (NMV Group, n.d.) Sähköistytiedusteluun sähköpostein ei sähköistymisen osalta saatu vastausta, eikä heidän sivuillaan mainintaa sähköisestä kalustosta.

4 VERTAILEVA LASKENTA

Jotta mahdollisen sähköisen ja olemassa olevan polttomoottorikäyttöisen ajoneuvokaluston kulutus- ja päästömäärien vertailu olisi mahdollista, tarvittiin vielä polttoaineiden energiasisällöt. Tässä käytettiin osiossa 2 ”Tausta”, taulukon 2 mukaista keskiarvoista polttoaineenlämpöarvoa 43 MJ/kg.

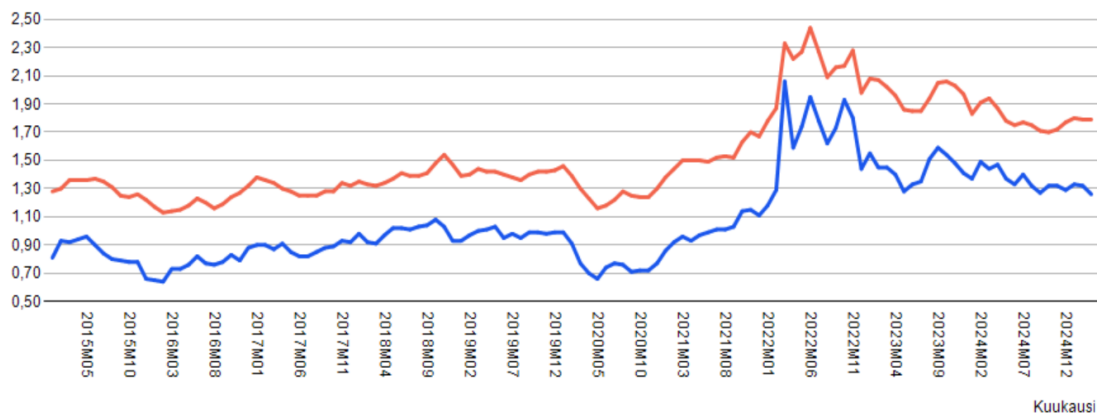
4.1 Sähkön ja polttoaineiden hinta

Laskentoihin käytettiin sähkön tukkuhinnan keskiarvoa Suomessa, jonka Energiateollisuus julkaisee vuodenvaihteessa yhteen kokoamistaan sähkön tukkuhintatilastoista. Energiateollisuuden sivuilta löytyvästä taulukosta, vuosilta 2010–2024, saatiin keskihinnaksi 59,27 €/MWh, kuviossa 1.



Kuvio 1. Sähkön vuosikeskihinta 2010–2024 (Energiateollisuus, 2024)

Polttoaineen keskihintojen kehitys saatiin tilastokeskuksen tietokannasta, kuviossa 2.



Kuvio 2. Polttonesteiden keskihintoja, sininen= kevytpolttoöljy, punainen= diesel (€/l) (Tilastokeskus, 2025)

Näiden polttoaineiden keskihintojen mukaan arvioitiin nykyisiä käyttövoima kustannuksia. Laskentaa suoritettiin myös tiettyjen vuosien todellisten maksettujen polttoainekustannusten mukaan.

4.2 Nykyisen kaluston kustannusten ja päästöjen selvitys

Jotta voitiin tehdä vertailevaa laskentaa eroista nykyisen ja sähköisen kaluston välillä, piti selvittää nykykaluston polttoaineen laatu ja kulutustiedot. Valtasiirrolta saatiin kahdelta satunnaiselta vuodelta koko vuoden seuranta, joista löytyi käytettyjen polttoaineiden tankkaustietoja, sisältäen hinnan ja määrät, sekä vaihtelevat laadut. Vuoden sisällä on käytetty useita eri laatuja, joten vertailua-kin tehdään useammalla laadulla.

Käytössä olevan kaluston päästöt selvitettiin laskemalla kulutettu polttoaine kerrottuna päästökertoimella. Lasku suoritettiin yhden kalenterivuoden kulutustietojen mukaan. Kulutustiedot saatiin Valtasiirron edustajalta ja päästökerroin mm. OpenCO2.net palvelusta. Kuvassa 13 on käytetyn polttoaineen päästökerroin uusiutuvan polttoaineen osalta. Luvussa 5, kuvio (3) on graafinen kuvaaja, joka näyttää erot päästömäärissä nykyisten ja mahdollisen sähkökäyttöisten välillä laskentavuodelta.

Nimi	Neste MY, uusiutuva polttoöljy (elinkaari), CO2-ekvivalentti
Päästötyyppi	
Päästökerroin	9,00 t/TJ
CO2/CO2-ekvivalentti	CO2-ekvivalentti
Elinkaaren vaiheet	
Päivitetty	2023

Kuva 13. Käytetyn polttoaineen päästökerroin (OpenCO2net, 2023.)

Lisäksi suoritettiin vertaavaa havainnointia GHG-protokollan dieselpolttoaineen päästöarvolla saatuun CO₂-päästömäärään.

Nykyisen kaluston polttoainekustannukset selvitettiin laskemalla kulutettu polttoaine kerrottuna polttoaineen keskimääräisellä hinnalla. Laskuihin otettiin

vertauksen vuoksi diesel, kevyt polttoöljy sekä Neste MY uusiutuva. Näille suoritettiin myös herkkyystarkastelua hinnan muutosten suhteen. Liitteessä 1 on herkkyystarkastelu eri polttoaineiden hinnan muutoksille.

4.3 Sähköisen kaluston päästöjen ja kulujen selvitys

Sähkön hankinnasta aiheutuva päästöarvo määräytyy käytetyn sopimustyyppin mukaan. Suomessa vuonna 2024 jo 95 % tuotetusta sähköstä oli hiilidioksidineutraalia. Vertailu suoritettiin kuitenkin keskiarvon mukaan.

Täysin sähköllä kulkeva laitteisto on paikallispäästötön mutta liikkumiseen tarvittavan energiantuotanto aiheuttaa päästöjä. Päästökertoimena käytettiin kohdassa 2.1.2 ilmoitettua sähköntuotannon keskiarvo kerrointa 60 g CO₂/kWh.

$$\text{Kaava: Aktiviteettimuuttuja} * \text{Päästökerroin.} \quad (1)$$

Aktiviteettimuuttuja tarkoittaa muuttujaa, josta päästöjä syntyy ja Päästökerroin tarkoittaa toiminnasta ilmakehään vapautuvien päästöjen määrä laskentayksikköä kohti. (Hiilijalanjäljen laskenta, 2024.) Laskentataulukko (5) on liitteessä 2.

Sähköisen kaluston kustannukset laskettiin suuntaa antavasti suurella marginaalilla, koska sopivaa sähköistä vaihtoehtoa ei ollut saatavilla, eikä sen variaatiomahdollisuuksia voitu arvioida tarkasti. Herkkyystarkastelussa huomioitiin sähkön hinnan muutokset sekä akkukäytönosuuden vaikutukset sähkön kokonaiskulutukseen ja siten hintaan. Akku- ja johdinratkaisun (kiinteä) kustannusosuutta tarkasteltiin, missä akkukäytön osuus vaihteli välillä 0–100 %. Tästä kuvaus liitteissä 2 ja 3.

Sähkönkulutus arvioitiin käytetyn polttoaineen energiasisällön kautta. Arvio tehtiin mitattujen polttoainetietojen mukaan, muuttaen kulutustieto sopivaan yksikköön ja huomioimalla käytössä olevan kaluston tyypillisen hyötysuhteen.

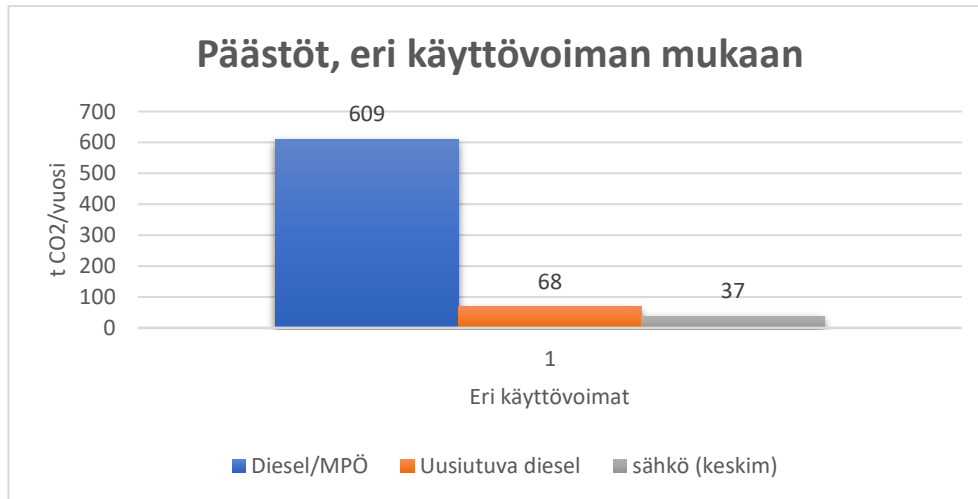
Tämän jälkeen huomioitiin eri vaikutus akkukäyttöistä arvioidessa kuin kiinteään johdintekniikkaan perustuvaa arvioitaessa. Akkukäyttösuudessa täytyi huomioida myös lataushäviöt ja suorassa (kiinteä/johdin) vain sähkömoottorin hyötysuhde.

5 TULOSTEN VERTAILU

Selvityksen mukaan vielä ei markkinoilla ole saatavilla valmista kuonankuljetusajoneuvokalustoa vaaditulla kapasiteetillä sähköisenä. Sähköisten kuljetuskoneiden kehitys tuntuu kuitenkin nyt olevan vauhdissa ja markkinoilla selvästi jonkinlaista kiinnostusta kaluston sähköistämiseen.

Mahdollisuus päästöjen vähenemään on merkittävä, jos siirrytään (kun aika on) täysin sähköiseen kalustoon dieselpolttoaineesta sekä kohtalainen myös erilaisin hybridiratkaisuin toteutetuilla vaihtoehdoilla. Kuitenkin uusiutuvalla dieselpolttoaineella päästöt jäävät myös perinteisiä matalammiksi. Täysin akkutekniikalla liikkuvan kaluston päästöt olisivat kuitenkin samaa luokkaa kuin nykyisinkin osin käytössä olevalla uusiutuvalla polttoaineella.

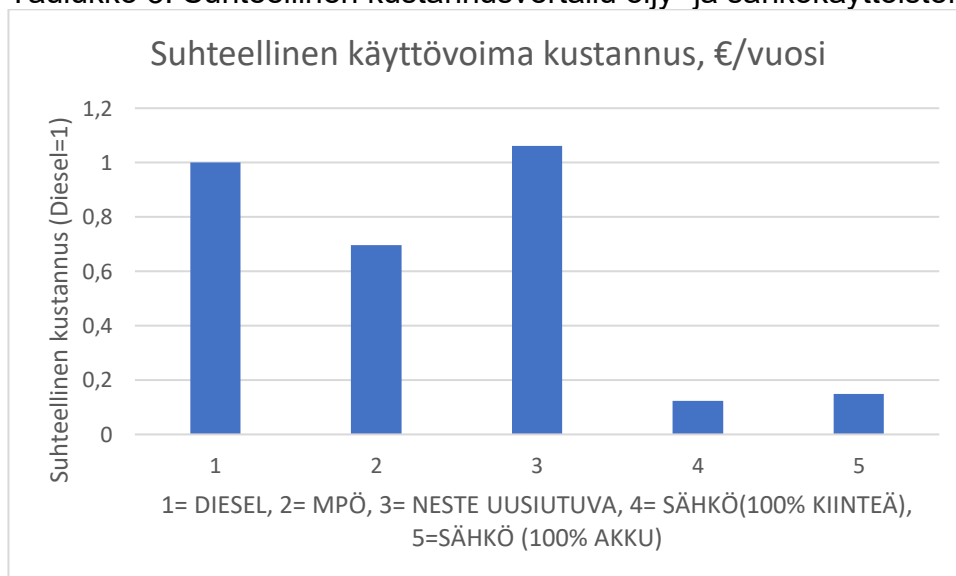
Kuviossa 3 on vertailu johdinsähköisen, diesel-, sekä uusiutuvan dieselpolttoaineen välillä päästöissä. Tulos kuitenkin riippuu käytössä olevasta sähkösovimustyyppistä, sähköäkin saa hankittua päästöttömästi ja vertaus tehty kohdassa 2.1.2 ilmoitetun keskimääräisen sähköntuotannon päästöarvon mukaan. Trendi sähkönhankinnasta aiheutuvasta päästökertoimesta näyttää kulkevan selvästi alaspäin. Viimeisenä saatavilla olevana julkaisuvuonna (2024) päästökerroin on enää noin puolet laskuissa käytetystä kolmen viimeisen vuoden keskiarvosta. Tämä vielä parantaa saatuja tuloksia sähkön eduksi.



Kuvio 3. Päästöt eri energiamuodoilla

Sähkökäyttöisten laitteiden energiakustannukset näyttävät selkeästi pienemiltä kuin fossiilisten polttoainekulut. Kuitenkin kokonaiskustannuksissa pitäisi huomioida hinnan lisäksi muuttuvat huolto-, ja muut ylläpito ja oheiskulut, joita ei tässä työssä pyrittykään selvittämään. Taulukossa (3) on suhteellinen kustannusvertailu dieselin, kevyen moottoripolttoöljyn, Neste MY uusiutuvan sekä sähköisten käyttövoimien välillä.

Taulukko 3. Suhteellinen kustannusvertailu öljy- ja sähkökäyttöisten välillä.



Trukkien käyttöprofiilia seisotuksen osalta ei selvitetty. Tulokset vain paranevat, mikäli seisotusta on merkittävästi harrastettu, koska sähköä ei juuri paikalla ollessa kulu.

6 RATAKISKOVAIHTOEHTO

Lisäksi yhtenä lisävaihtoehtona on kiskoilla kulkeva junavaunumallinen kuljetusratkaisu, jota tutkittiin konseptitasolla. Se on varteenotettava mahdollisuus. Tämä vaatisi merkittäviä panostuksia infrastruktuuriin, ja ylipäättään selvityksiä onko kiskoja edes mahdollista ja kustannustehokasta rakentaa. Sulanlaskupaikalla ns. kiirunatunnelissa tilan vähäisyys voi olla rajoittava tekijä. Lisäksi matkalla jäähdytysalueelle on yksi julkisen junaradan ylitys ja tämän sillan kantavuus sekä muut rajoitukset tulisi selvittää. Siirtymän nousu ja tien kaarrekulmat vaativat tarkempaa kartoitusta sekä patojen jäähdytysalueen soveltuvuus ylipäättään kiskoajoon pitäisi myös selvittää.

6.1 Ratakalusto ja patakuljettimet

Kiskoilla kulkevia kuonankuljettimia löytyy maailmalta. Kuva 14 on havainnollistava kuva kuonankuljetus kippivaunuista kiskoilla ja niiden veturista.

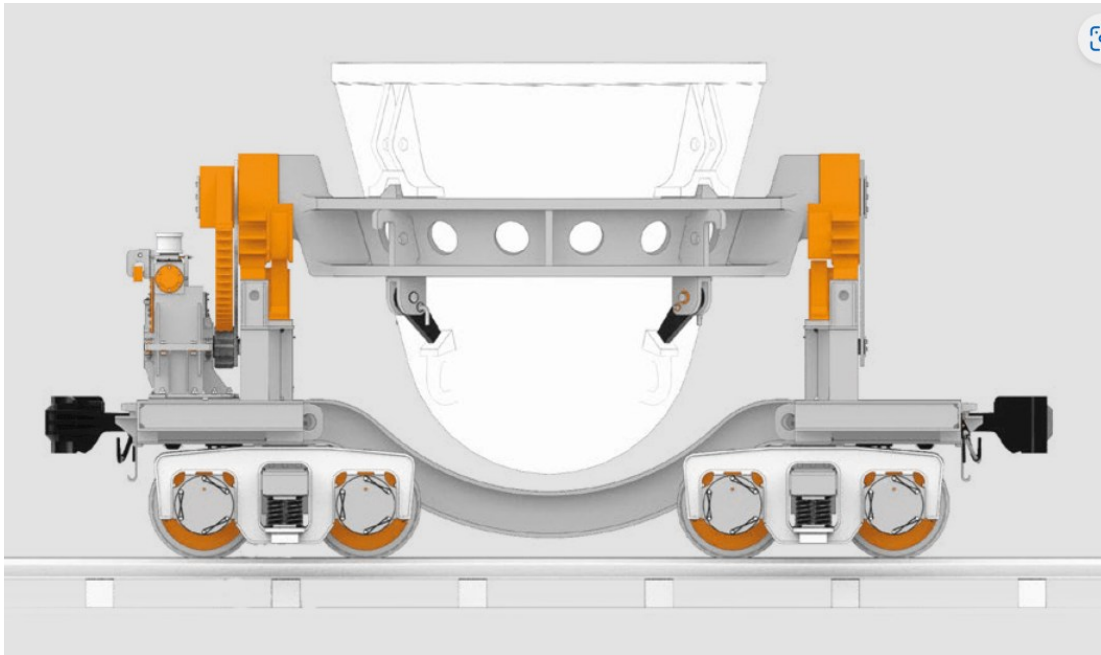


Kuva 14. Havainnollistava kuva kuonankuljetuskippivaunuista ja veturista. (Burns, 2024)

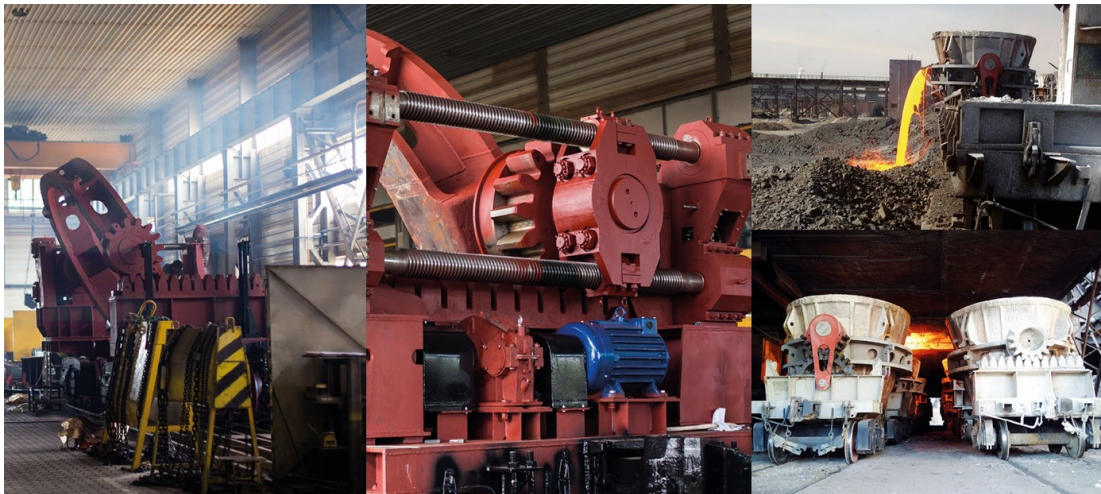
Euroopassa esimerkiksi Ukrainalainen Magma on vuonna 1996 perustettu erikoiskalustoa valmistava yritys, joka on erikoistunut suurikokoisten laitteiden, koneiden, mekanismien ja varaosien suunnitteluun ja valmistukseen, kattaen metallurgisen tuotannon kaikki vaiheet, kuten sintrauksen, koksi- ja kemiantellisuuden, masuunit, konvertterit ja valssauksen.

Magmalta löytyy erilaisia kuonankuljettimia ja vaunuja. Kuvissa 15 ja 16 Magman patakuljetin kalustoa, Kuonankantaja SHN-S-16, jonka padan tilavuus

13m³, nopeus 15 km/h akselikuorma maksimissaan 400 kN sekä minimi kääntösäde 75 m ja omamassa 42,5 t. Pata voidaan kipata tällä laitteella mutta se tarvitsee kuitenkin liikutukseen erillisen veturin tai muun voimanlähteen.

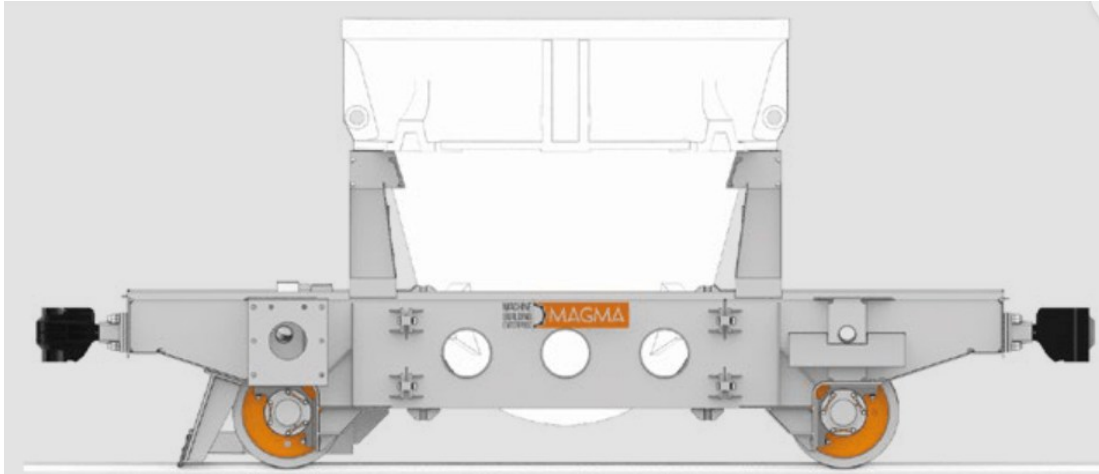


Kuva 15. Kuonankuljetukseen tarkoitettu kallistava patavaunu. (Magma, n.d.)



Kuva 16. Kuvissa SHN-16 kippimekanismista. (Magma, n.d.)

Kuvassa 17 on Magman itseliikkuva kuonapadankuljetin, Kuonan kantaja ShS-100-4800, jonka hyötykuorma on 100 t, tilavuus on 16 m³ ja ajonopeus 48 km/h Tätä ei ole varustettu kippaavalla patamekanismilla, mutta tämä malli liikkuu omalla voimanlähteellä (Magma, n.d). Molempia Magman tuotteita löytyy eri variantteina (koko, yms).



Kuva 17. Kuonapadan itseliikkuva kiskokuljetusvaunu. (Magma, n.d.)

6.2 Pohdinta

Kiskoilla kulkeva vaihtoehto vaatisi monenlaisia mainittuja lisäselvityksiä (mm. kuinka muu liikenne sujuu, jos kiskot asennetaan yms.). Tässä työssä kisko-vaihtoehto mm. sen laajuuden vuoksi (sisältäen juuri raskaan infrastruktuurin muutoksen yms.) jätettiin kuitenkin pääosin ulkopuolelle. Kuitenkin maininta tällaisestakin vaihtoehdosta sisällytettiin työhön.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Johdinkäyttöiseen laitevalintaan päädyttäessä pitäisi selvittää sen vaatiman infrastruktuurin muutoksien kustannukset sekä ylipäätään johdintekniikan soveltuminen kuonankuljetukseen sen erityispiirteiden vuoksi. Lähtökohtaisesti pitäisi selvittää riskit, joita sulankuonan kuljetus sähkötekniikalle aiheuttaa. Täysin johdinsähköinenkin kalusto tarvitsisi todennäköisesti rinnalleen jonkin apuvoimanlähteen eli kyse olisi ns. hybridikokoonpanosta. Tässä voisi käyttää hybridinä joko akkua tai polttomoottoria kuten kohdan 2.6 pilotissa. Tällöin pääosa siirtomatkasta kuljettaisiin johdinvirralla, ja ajolenkin toisessa tai molemmissa päissä – täyden padan otto tunnelista sekä sen lasku jäähdytysalueelle vaihteleviin paikkoihin – tapahtuisi irti kytkettynä ns. apuvoimanlähteellä,

sekä varikolle siirtymät. Myös vaihtoehtoisesti voidaan pohtia vanhan ole-massa olevan kaluston käyttöä juuri mainituissa kohdissa, eli molemmissa päissä, ns. purkuun ja kyytiin ottoon. Tällöin voitaisiin pääkuljetus hoitaa pel-kästään johdin tai kisko vaihtoehdolla. Tämän selvityksen laajuudella joh-din/kiskojärjestelmä näyttäytyi sekä halvimpana että vähäpäästöisimpänä käy-tön osalta. Päästöt ja käyttökustannukset jäisivät mataliksi myös, vaikka pää-dyttäisiin hybridi vaihtoehtoon.

Vertaavaa laskentaa tehtiin 0–100 % akun käyttöosuuksille, jolloin kustannuk-set ja päästöt kasvoivat noin 20 %, johdinsähköstä täysin akkukäyttöiseen ver-rattuna. Kaluston kestävyys on yksi riskitekijä, johon ei tässä työssä keskitytty, asia lähinnä vain tiedostettiin. Samoin hinnan vaihtelut sekä sähkön että käy-tetyn fossiilisen polttoaineen suhteen ovat riskitekijöitä, ja nämä huomioitiin työssä tekemällä herkkyystarkasteluja. Herkkyystarkasteluja suoritettiin niin sähkön hinnan muutoksien mukaan kuin eri fossiilisten polttoaineiden laatujen sekä hinnan muutosten mukaan.

Pitkäaikaiset kokonaisvaikutukset ovat kuitenkin epävarmat kaluston käytän-nön kokemusten puutteen takia. Kuinka pitkäikäisiä uudet laitteet olisivat ja kuinka sähköiset laitteet kestäisivät tarkoituksenmukaisissa olosuhteissa sekä mm. kuinka huollettavia ne ovat. Tältä osin myös ympäristövaikutusten arvi-ointi on haastavaa koska ei voida ns. edelläkävijöinä tietää sähköisen kaluston kestoikää ja uusimistarvetta. Kuitenkin kuten todettua, sähköiset kalustovaih-toehdot ovat toteutustavasta riippuen paikallispäästöttömiä ja täten mahdolli-suus paikallispäästöjen vähenemään on selvästi.

Riskit mm. nestemäisen polttoaineen (sis. turvallisuus ja terveysriskit niin va-rastoinnin kuin käsittelyn sekä ympäristön pilaantumisen yms.) suhteen pie-nenisivät, kun alueelle ei enää tarvitsisi toimittaa niin paljon nestemäistä polt-toainetta. Toisaalta alueella kuitenkin toimii muitakin diesel/mpö käyttöisiä työ-koneita, joten alueelle edelleen toimitettaisiin dieselpolttoaineita. Lisäksi akku-käyttöisen kuonankuljetuskaluston akun turvallisuus on tärkeä huomioitava te-kijä. Nykyakut ovat syttyessään erittäin vaikeasti sammutettavia, mikä koros-tuu erityisesti sulan kuonan käsittelyssä. Sulankuonan kuljetus on jo

ennestään aiheuttanut haasteita, erityisesti vuodenaikojen vaihtuessa ja kelien muuttuessa liukkaammiksi.

Tämän konseptitasontyön jälkeen suositellaan selvittämään erikseen tuon sivutun kiskokuljetusvaihtoehdon sekä selvittämään tarkasti kuonankuljetuksen aiheuttaman energiatarpeen jakaantuminen. Nyt energiatarve määritettiin kirjattujen polttoaine tankkauksien perusteella. Tämä ei tarjoa tietoa siitä, paljonko energiaa käytetään itse täysien patojen siirtoon jäähdytykseen, ja paljonko jäähdytyksen jälkeiseen tyhjennykseen sekä muihin siirtymisiin. Tämä vastaisi tarkemmin BoHan haluun selvittää kiskoliikenteen mahdollisuus ja sen tarjoama säästöpotentiaali. Raideliikenne vaihtoehtokin olisi mahdollisesti vain siirtoon, ja patojen tyhjennys ja muu oheisajo ei välttämättä kiskoilla onnistuisi, vaan tämä hoidettaisiin jotenkin muuten ja tällöin ei voida säästöjenkään ajatella olevan aivan näiden tulosten mukaisia.

8 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, millä aikataululla kuonankuljetuksen sähköistäminen olisi BoHalle mahdollista sekä arvioida sen toteutettavuutta ja ajankohtaisuutta. Selvityksen perusteella markkinoilla ei ole vielä suoraan saatavilla perinteistä, kumipyörillä toimivaa sähköistä kuonankuljetuskalustoa, minkä vuoksi sen saatavuus ei vastaa kysyntää aikataulullisesti.

Kuitenkin luvun 3 toimijoilla oli kiinnostusta aloittaa keskustelut BoHalla olemassa olevan kaluston sähköistämisen mahdollisuudesta, hieman samaan tapaan kuin luvussa 2, kohdan 6 pilotissa. Tämä vaihtoehto kannattaisi selvittää.

Harjavallassa ei ole vielä tarvittavaa infraa, kuten kiskoja yms., vaikka markkinoilla on jonkin verran kiskoilla kulkevaa kalustoa. Lisäksi kiskokaluston

soveltuvuus alueelle edellyttää tarkempaa arviointia, minkä vuoksi se jätettiin pääosin tarkastelun ulkopuolelle (ks. luku 6).

Kustannusten väheneminen käytön osalta olisi merkittävä siirryttäessä sähköiseen kalustoon, kuten luvussa 5 esitetään. Samoin päästöjen väheneminen olisi huomattavaa, mikä tekisi sähköistämisestä ympäristön kannalta positiivisen vaihtoehdon.

Työssä lähteinä käytettiin pääasiassa tilastotietoja sekä yritysten julkaisuja ja raportteja. Varmistettiin tilaajan kanssa, että työ ei sisällä yrityssalaisuuksia ja täten on julkaisukelpoinen. Työ vei minut kiinnostavalle matkalle työkoneiden sähköistyvään maailmaan. Työn alussa oli hieman epäselvää, mitä työ tulisi sisältämään, mutta työn edetessä - kuten usein tapana on - tämäkin pääosin kirkastui ja osoittautui varsin mielenkiintoiseksi. Tämän työn jälkeen olen entistäkin pätevämpi alani asettamien haasteiden ratkomisessa.

LÄHTEET

- Boliden. (2025). Lead. Haettu 3.6.2025 osoitteesta <https://www.boliden.com/products/our-products/lead/>
- Boliden. (2024). Sustainability Index 2023. Haettu 20.2.2025 osoitteesta <https://investors.boliden.com/sites/boliden-ir/files/pr/202403050637-3.pdf>
- Boliden. (n.d.a.). Metals For modern life. Haettu 13.2.2025 osoitteesta <https://www.boliden.com/>
- Boliden. (n.d.b.). Ilmastoviisaat kuljetukset. Haettu 13.3.2025 osoitteesta <https://www.boliden.com/sustainability/case-studies/climate-smart/>
- Boliden. (n.d.c.). Low-Carbon and Recycled Copper. Haettu 16.6 osoitteesta <https://www.boliden.com/products/our-products/GTM/low-carbon-copper/>
- Boliden Harjavalta. (n.d.). Sulatot. Haettu 13.2.2025 osoitteesta <https://www.boliden.com/operations/smelters/boliden-harjavalta>
- Burns, A. (2024). Ladle Rail Car: Transporting Molten Metal. American-rails.com. <https://www.american-rails.com/ladle.html>
- EcoOnline. (2024). GHG-protokolla pähkinänkuoressa. Haettu 19.2.2025 osoitteesta <https://www.ecoonline.com/fi/blogi/ghg-protokolla/>
- Energiateollisuus. (2024). Sähkön hintatilasto. Haettu 4.4.2025 osoitteesta <https://energia.fi/tilastot/sahkotilastot/sahkon-hintatilasto/>
- Epiroc. (n.d.). Minetruck MT42 SG Trolley. Haettu 16.4.2025 osoitteesta https://www.epiroc.com/content/dam/epiroc/underground-mining-and-tunneling/lhd/minetruck/minetruck-mt42-sg-trolley/9869%200246%2001%20Minetruck%20MT42%20SG%20Trolley%20Technical%20Specification_digital.pdf
- European Commission. (2018). Towards the battery of the future. Directorate-General for Environment. <https://op.europa.eu/publication-detail/-/publication/31fa724f-c202-11e8-8bb4-01aa75ed71a1>
- Greenhouse Gas Protocol. (2024). Stationary Combustion. Haettu 21.3.2025 osoitteesta https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fghgprotocol.org%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2F2024-05%2FEmission_Factors_for_Cross_Sector_Tools_V2.0_0.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK
- Hautamäki, J. (2025). Opinnäytetyöohjaajan sähköpostiviesti.
- Helsingin kaupunki. (2025). Ratasähkö. Haettu 14.5.2025 osoitteesta <https://raitiotieohje.fi/ratasahko/#masthead>

Henrikson, M. (2021) Scania uusi neljä moottoriaan tehokkaammiksi – puristussuhde jopa 23:1. Raskassarja. <https://www.raskassarja.fi/scania-uusi-nelja-moottoriaan-tehokkaammiksi-puristussuhde-jopa-231/>

Huff, B. (2022). Sandvik introduces underground mining's largest-capacity BEV truck. Sandvik. <https://www.rocktechnology.sandvik/en/news-and-media/news-archive/2022/02/sandvik-introduces-underground-minings-largest-capacity-bev-truck/>

IEA. (2024). Batteries and Secure Energy Transitions. <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/executive-summary>

Karppinen, R. (2023). Kestävyyseraportoinnin uudet ESRS-standardit on julkaistu. Tofuture. <https://tofuture.fi/uudet-esrs-standardit-julkaistu>

Komatsu. (2025). Trolley assist system. Haettu 9.4.2025 osoitteesta <https://www.komatsu.com/en/technology/smart-mining/loading-and-haulage/trolley-assist-system/>

Kress. (n.d.). Kress slag pot carrier. Haettu 12.3.2025 osoitteesta <https://www.kresscarrier.com/CarriersSlagPot.html>

Lehto, H. (15.1.2024). Hiililaskenta ja hiilijalanjälki: mitä se on ja miksi se on tärkeää? Sweco. <https://www.sweco.fi/blog/hiililaskenta-ja-hiilijalanjalki-mita-se-on-ja-miksi-se-on-tarkeaa/>

Liebherr. (n.d.a.). T 264 Battery Electric. Haettu 4.4.2025 osoitteesta <https://www.liebherr.com/en-fi/mining-equipment/equipment/mining-trucks/t264-battery-electric-7513069>

Liebherr. (n.d.b.). T 264 Battery Electric. Haettu 27.3.2025 osoitteesta <https://assets-cdn.liebherr.com/assets/api/d674ff64-a652-4a74-8615-57f1cacc75a/Original/>

Lindgren, M. (2020). Hybridi- ja sähköautojen moottorit [AMK-opinnäytetyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/342901/Lindgren_Mikko%20Hybridi-%20ja%20s%c3%a4hk%c3%b6autojen%20moottorit.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Magma. (n.d.). Equipment. Haettu 19.5.2025 osoitteesta <https://magma.ua/en/equipment/>

Makkonen, T. (2017). Kuorma-auton muunnoshybridijärjestelmän suunnittelun pääkohdat [AMK-opinnäytetyö, Metropolia Ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/134737/Makkonen_Tatu.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Metsärinta, M-L. (2009) Opinnäytetyöohjaajan sähköpostiviesti.

Motiva. (23.10.2024). Sähköauton valinta ja käyttö. Haettu 14.3.2025 osoitteesta [https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/sahkoautoillen - arjen alykas sahkoautoilu/sahkoauton tekniikka ja akku](https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/sahkoautoillen_-_arjen_alykas_sahkoautoilu/sahkoauton_tekniikka_ja_aku)

Motiva. (5.3.2025). CO2-päästökertoimet. https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-paastokertoimet

Motiva. (28.2.2025). Hybridiautotyypit. Haettu 27.3.2025 osoitteesta https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/vaalitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/hybridiautot/hybridiautotyypit

NGS Finland. (2023). GHG-protokolla päästölaskennassa. Haettu 7.3.2025 osoitteesta <https://ngsfinland.fi/ghg-protokolla-paastolaskennassa/>

NIHAK. (n.d.). Hiilijalanjäljenlaskenta. Haettu 14.3.2025 osoitteesta <https://www.nihak.fi/fi/hiilijalanjaljen-laskenta/>

NMV Group. (n.d.). SH60 Slag Hauler. Haettu 13.3.2025 osoitteesta <https://www.nmvgroup.se/en/produkt/sh60-slag-hauler/>

Nordlundin liikennesivut. (2011). Johdinautot. Haettu 16.4.2025 osoitteesta <https://jno.1q.fi/johdinautot.htm>

Nylund, N., Söderena, P. & Rahkola, P. (2016) Työkoneiden CO2 päästöt ja niihin vaikuttaminen. [https://www.transsmart.fi/files/426/Tyokoneiden CO2 paastot ja niihin vaikuttaminen.pdf#:~:text=Ty%C3%B6koneiden%20yhteenlaskettu%20polttoaineen%20kulu-tus%20on%20noin%20770%20000,toimenpiteet%20tulee%20t%C3%A4st%C3%A4%20syyt%C3%A4%20kohdistaa%20ensisijaisesti%20dieselk%C3%A4ytt%C3%B6isiin%20koneisiin.](https://www.transsmart.fi/files/426/Tyokoneiden_CO2_paastot_ja_niihin_vaikuttaminen.pdf#:~:text=Ty%C3%B6koneiden%20yhteenlaskettu%20polttoaineen%20kulu-tus%20on%20noin%20770%20000,toimenpiteet%20tulee%20t%C3%A4st%C3%A4%20syyt%C3%A4%20kohdistaa%20ensisijaisesti%20dieselk%C3%A4ytt%C3%B6isiin%20koneisiin.)

OpenCO2net. (2025). Neste MY, uusiutuva polttoöljy (elinkaari). <https://www.openco2.net/fi/paastokertoimet/polttoaine/nestemy-uusiutuva-polttooljy-elinkaari/5419>

Pankaj, B., Cynthia, C., Andrea, B., David, R., Laura, D. & Holly, L. (2011) Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard. Greenhouse gas protocol. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Corporate-Value-Chain-Accounting-Reporting-Standard_041613_2.pdf

Parkkinen, J. (2024). Akkuteknologia: Sähköautojen tulevaisuus [AMK-opinnäytetyö, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/876176/Parkkinen_Jermu.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Pinomaa, T. (n.d.) Akkuteknologiat. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/akkuteknologiat>

Railsystem.net. (n.d.) Pantograph. Haettu 15.5.2024 osoitteesta <https://railsystem.net/pantograph/>

Rikard, M. & Ranggård, J. (2020). Trolley electrification of haul trucks in Aitik and Kevitsa mines. Materia. https://vuorimiesyhdistys.fi/wp-content/uploads/2020/12/Materia_5-2020.pdf

Rudschies, W. (2022). Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden. ADAC. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/ladeverluste-elektroauto-studie/>

Saarinen, V. (2009). JUNAN KONTAKTIHIILIIEN KUNNON VALVONTA VIRROITTIMEN VALOKUVAUKSEEN PERUSTUVALLA LAITTEISTOLLA. [pro gradu työ, Teknillinen korkeakoulu]. Aaltodoc. <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/33bc3f59-a251-4ec0-8dcb-aeedcf27e6ca/content>

Sandvik. (2024). Sandvik TH550B battery electric truck. Haettu 27.3.2025 osoitteesta <https://go.rocktechnology.sandvik//490131/2023-07-13/dwsqfn>

Savolainen, V-P, (2023). Ympäristöystävälliset akkuteknologiat ja niiden kaupallistuminen älykkäissä työkoneissa [Kandidaatintyö, Tampereen yliopisto]. Trepo. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/147641/SavolainenVille-Petteri.pdf?sequence=2>

Techne kirow. (n.d.). Metallurgy. Haettu 12.3.2025 osoitteesta <https://www.techne-kirow.de/>

Tervola, J. (2024). Suomalainen kaivoskone lataa itse omat akkunsa 10 tonnin lastin kanssa ilman päästöjä – Näin työkoneiden sähköinen vallankumous etenee. Tekniikka & Talous. <https://www-tekniikkatalous-fi.lillukka.samk.fi/uutiset/suomalainen-kaivoskone-lataa-itse-omat-akkunsa-10-tonnin-lastin-kanssa-ilman-paastoja-nain-tyokoneiden-sahkoinen-vallankumous-etenee/f74bfacb-a7a2-4a32-8a98-a4ed47297142>

Tilastokeskus. (2025). Polttoaineluokitus 2025. Haettu 9.4.2025 osoitteesta https://view.officeapps.live.com/op/view.aspx?src=https%3A%2F%2Fstat.fi%2Fmedia%2Fuploads%2Ftup%2Fkhkinv%2Fkhkaasut_polttoaineluokitus_2025.xlsx&wdOrigin=BROWSELINK

Tilastokeskus. (2025). 12ge -- Polttonesteiden kuluttajahinnat (sisältää alv:n), 1988M01-2024M12. Haettu 20.3.2025 osoitteesta https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ehi/statfin_ehi_pxt_12ge.px/chart/chartViewLine/

Tii-Kamag. (2025). Metallurgy. Haettu 12.3.2025 osoitteesta <https://www.tii-group.com/tii-kamag/our-solutions/slag-pot-carrier/kamag-slagpotcarrier>

Veolia. (2025). [Harjavallan Suurteollisuuspuisto]. <https://www.veolia.fi/harjavalta-0>

Virtanen, P. (22.5.2023). Vastuullisuusraportointi muuttuu pakolliseksi – mitä uudesta CSRD-säädöksestä tulisi tietää?. Greenstep. Haettu 7.3.2025 osoitteesta <https://greenstep.fi/artikkelit/vastuullisuusraportointi-muuttuu-pakolliseksi--mita-uudesta-csrd-saadoksesta-tulisi-tietaa>

Ympäristöministeriö. (7.6.2024). Ilmastovuosikertomus 2024. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165736/YM_2024_25.pdf?sequence=1

LIITE 1: HERKKYYSTARKASTELU POLTTOAINEIDEN HINNAN MUUTOKSILLE (100%±50%)

Hinnan muutos	100% = 1	1,25	1,5	0,75	0,5	
Diesel keskihinta, v.2019 muk. (tilastokeskus)	1,41	1,76	2,11	1,06	0,70	€/l
Kustannus vuodessa	s	a	l	a	t	€/a
Kevyt polttoöljy keskihinta, v.2019 muk. (tilastokeskus)	0,98	1,23	1,47	0,74	0,49	€/l
Kustannus vuodessa	t	u	s	a	l	€/a
Neste MY PO - 10/-32 (BoHa/valtas.kul utuksen muk., 2024)	1,49	1,87	2,24	1,12	0,75	€/l
Kustannus vuodessa	a	t	t	u	.	€/a

LIITE 2: HERKKYYSTARKASTELU SÄHKÖN HINNAN MUUTOKSIIN, (100%, +50- -30%).

Sähköllä kustannus (karkea)	Sähköllä kustannus arvio sähkön hinnan muutos huomioiden, €/a								
	10 %	20,00 %	30,00 %	40,00 %	50,00 %	-10,00 %	-20,00 %	-30,00 %	
36318	39949	43581	47213	50845	54476	32686	29054	25422	€/a
36681	40349	44017	47685	51353	55021	33013	29345	25677	€/a
37044	40748	44453	48157	51862	55566	33340	29635	25931	€/a
37407	41148	44889	48629	52370	56111	33666	29926	26185	€/a
37770	41547	45324	49101	52879	56656	33993	30216	26439	€/a
38134	41947	45760	49574	53387	57200	34320	30507	26693	€/a
38497	42346	46196	50046	53895	57745	34647	30797	26948	€/a
38860	42746	46632	50518	54404	58290	34974	31088	27202	€/a
39223	43145	47068	50990	54912	58835	35301	31378	27456	€/a
39586	43545	47503	51462	55421	59379	35628	31669	27710	€/a
39949	43944	47939	51934	55929	59924	35954	31960	27965	€/a
40313	44344	48375	52406	56438	60469	36281	32250	28219	€/a
40676	44743	48811	52879	56946	61014	36608	32541	28473	€/a
41039	45143	49247	53351	57455	61558	36935	32831	28727	€/a
41402	45542	49683	53823	57963	62103	37262	33122	28981	€/a
41765	45942	50118	54295	58471	62648	37589	33412	29236	€/a
42128	46341	50554	54767	58980	63193	37916	33703	29490	€/a
42492	46741	50990	55239	59488	63737	38242	33993	29744	€/a
42855	47140	51426	55711	59997	64282	38569	34284	29998	€/a
43218	47540	51862	56183	60505	64827	38896	34574	30253	€/a
43581	47939	52297	56656	61014	65372	39223	34865	30507	€/a

LIITE 3: VERTAILU AKKUOSUUDEN KASVAESSA SEKÄ PÄÄSTÖJEN ETTÄ HINNAN SUHTEEN

kerroin	1 -->	1,2 Akku	Suora	Yhteensä, (suora+akku)		Sähkön käytön päästöt (karkea)	Sähköllä kustannus (karkea)
				kg CO2/a	€/a		
Akkuajon osuus (0-100%)	0 %	0	0	615553	615553 kWh/a	36933	36318
	5 %	0,05	36933	584776	621709 kWh/a	37303	36681
	10 %	0,1	73866	553998	627865 kWh/a	37672	37044
	15 %	0,15	110800	523220	634020 kWh/a	38041	37407
	20 %	0,2	147733	492443	640176 kWh/a	38411	37770
	25 %	0,25	184666	461665	646331 kWh/a	38780	38134
	30 %	0,3	221599	430887	652487 kWh/a	39149	38497
	35 %	0,35	258532	400110	658642 kWh/a	39519	38860
	40 %	0,4	295466	369332	664798 kWh/a	39888	39223
	45 %	0,45	332399	338554	670953 kWh/a	40257	39586
	50 %	0,5	369332	307777	677109 kWh/a	40627	39949
	55 %	0,55	406265	276999	683264 kWh/a	40996	40313
	60 %	0,6	443198	246221	689420 kWh/a	41365	40676
	65 %	0,65	480132	215444	695575 kWh/a	41735	41039
	70 %	0,7	517065	184666	701731 kWh/a	42104	41402
	75 %	0,75	553998	153888	707886 kWh/a	42473	41765
	80 %	0,8	590931	123111	714042 kWh/a	42843	42128
	85 %	0,85	627865	92333	720198 kWh/a	43212	42492
	90 %	0,9	664798	61555	726353 kWh/a	43581	42855
	95 %	0,95	701731	30778	732509 kWh/a	43951	43218
	100 %	1	738664	0	738664 kWh/a	44320	43581

