

SÄHKÖKÄYTTÖISET KAIVOSTYÖKONEET

Mobile electrical mining machines

Tuukka Nurminen

Tiivistelmä

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikka

Tuukka Nurminen

Sähkökäyttöiset kaivostyökoneet

2018

Kandidaatintyö

Tarkastaja: tutkijaopettaja Lasse Laurila

Hakusanat: Sähkökäyttö, akkukäyttö, kaapelikäyttö, kaivostyökone, sähköistyminen

Sähköistyminen ja varsinkin akkukäyttö on yksi kuumimmista trendeistä ajoneuvoihin liittyvässä teknologiassa. Tässä työssä tutkitaan miten sähköistyminen on vaikuttanut kaivostyökoneiden kehitykseen.

Työn tavoitteena on kartoittaa markkinoilla olevia sähkökäyttöisiä kaivostyökoneita, ja niissä käytettäviä teknologioita. Työssä keskitytään pääsääntöisesti akkukäyttöisiin kaivostyökoneisiin, mutta tehdään myös lyhyt katsaus kaapelikäyttöisiin kaivostyökoneisiin ja hybridi kaivostyökoneisiin. Akkukoneista on tarkoitus selvittää, millaisia akkuja niissä käytetään, ja miten niiden lataus suoritetaan. Työssä pyritään selvittämään myös, millaisia moottoreita sähkökäyttöisissä kaivostyökoneissa käytetään, miksi sähkökäyttöön ollaan siirtymässä, ja miten tämä kaikki sähköistyminen vaikuttaa kaivosten sähkönkulutukseen.

Akkukäyttöiset kaivostyökoneet ovat sen verran uutta teknologiaa, että niistä tai niiden teknologiasta ei ole havaittu kattavaa koontia. Työn tavoitteena on koota mahdollisimman kattavasti nämä tiedot yhteen dokumenttiin. Syitä sähkökäytön lisäämiselle kaivostyökoneissa pyritään analysoimaan esimerkiksi kaivosten ilmanvaihtojärjestelmien aiheuttamien kustannusten kautta. Työssä tehdään myös katsaus sähkökäytön tulevaisuuteen kaivostyökoneissa.

Kaivostyökoneissa on selkeästi nähtävissä, että sähkökäyttö ja varsinkin akkukäyttö ovat tällä hetkellä kehityksen pääpainona. Varsinkin LHD (Load-Haul-Dump) kuormaimien kehitystyö on painottunut lähes täysin akkukäytön puolelle. Tämän ovat mahdollistaneet viime vuosina markkinoille tulleet, entistä korkeakapasiteettisemmat ja nopeaa latausta paremmin kestävät akkuteknologiat, kuten esimerkiksi litium-rauta-fosfaatti ja litium-titanaattioksidi. Akkuteknologioiden kehittyessä on todennäköistä, että yhä useampi kaivoskonetyyppi muuttuu

akkukäyttöiseksi. Muutos näkyy esimerkiksi Sandvikin ja Atlas Copcon vasta julkaistuissa täyssähköisissä kaivosjumboissa, jotka hoitavat liikkumisen akkukäyttöisesti ja kytkeytyvät kaapelilla porauksen ajaksi kaivoksen sähköjärjestelmään. Hybridikäyttöjäkin kaivostyökoneissa on, mutta niiden kehitys on täys-sähkökäyttöön verrattuna huomattavasti rajallisempaa.

Symboli- ja lyhenneluettelo

LiFePO₄

LTO (Li₄Ti₅O₁₂)

NMC (LiNi_{1-y-z}Mn_yCo_zO₂)

LHD

Litium-rauta-fosfaatti

Litium-titanaattioksidi

Litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi

Load-Haul-Dump

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Tiivistelmä | 2 |
| Symboli- ja lyhenneluettelo | 4 |
| 1. Johdanto | 6 |
| 2. Akut ja sähkömoottorit..... | 7 |
| 2.1 Akut..... | 7 |
| 2.1.1 Akkujen lataus..... | 9 |
| 2.2 Sähkömoottorit..... | 10 |
| 3. Käytössä olevia sähköisiä kaivostyökoneita | 11 |
| 3.1 Miksi sähkökäyttöisiä kaivostyökoneita? | 11 |
| 3.2 Akkukäyttöisiä kaivostyökoneita | 13 |
| Artisan Vehicle Systems | 14 |
| Atlas Copco..... | 15 |
| GE Fairchild..... | 15 |
| Komatsu | 15 |
| RDH Mining Equipment | 15 |
| Sandvik LH307B..... | 15 |
| Sandvik LZ101LE..... | 17 |
| 3.3 Kaapelikäyttöisiä kaivostyökoneita | 18 |
| 3.4 Akku + kaapelikäyttöisiä kaivostyökoneita | 20 |
| Sandvik DD422iE | 20 |
| Boomer M2C Battery..... | 21 |
| 3.5 Hybridikäyttöisiä kaivostyökoneita | 22 |
| Joy 18HD ja Joy 22HD | 22 |
| 5. Tulevaisuudennäkymiä | 23 |
| 6. Yhteenveto | 24 |
| Lähteet..... | 25 |
| Liitteet | 29 |
| Liite 1 Akkukäyttöisten kaivostyökoneiden teknisiä tietoja | 29 |

1. Johdanto

Sähköistyminen on viime vuosina ollut ja tulee olemaan tulevaisuudessakin hyvin vahva trendi ajoneuvoihin liittyvässä teknologiassa. Sähköistyminen on alkanut kiinnostaa myös kaivosteollisuudessa, missä liikkuvien työkoneiden sähköistymisen tuoma paikallisten päästöjen vähentyminen näkyy suoraan säästönä maanalaisten kaivosten jo ennestään korkeissa ilmavaihtokustannuksissa. Sähköistymistä kaivosteollisuudessa ovat edesauttaneet viime vuosina kaupalliselle tasolle kehittyneet uudenlaiset akkuteknologiat, kuten litium-rauta-fosfaatti, litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi ja litium-titanaattioksidi. Uusien akkuteknologioiden avulla kaivostyökoneita on voitu sähköistää laajemmalla rintamalla kuin esimerkiksi jo vuosikymmeniä käytetyllä kaapelisyöttötekniikalla, jossa kaapelin kömpelyys on rajoittanut laitteiden applikaatioita. Vielä toistaiseksi akkukapasiteetti on sen verran rajallinen, että esimerkiksi kaivosporaukseen niistä ei pelkästään ole. Akkukapasiteetin rajallisuus on ajanut kaivostyökoneita valmistavat yritykset kehittämään kaapelikäytön ja akkukäytön yhdistelmiä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että työkoneiden siirtoajo tapahtuu akkukäyttöisesti, ja enemmän tehoa vaativampaa työtä varten ne kytketään kaapelilla sähköverkkoon.

2. Akut ja sähkömoottorit

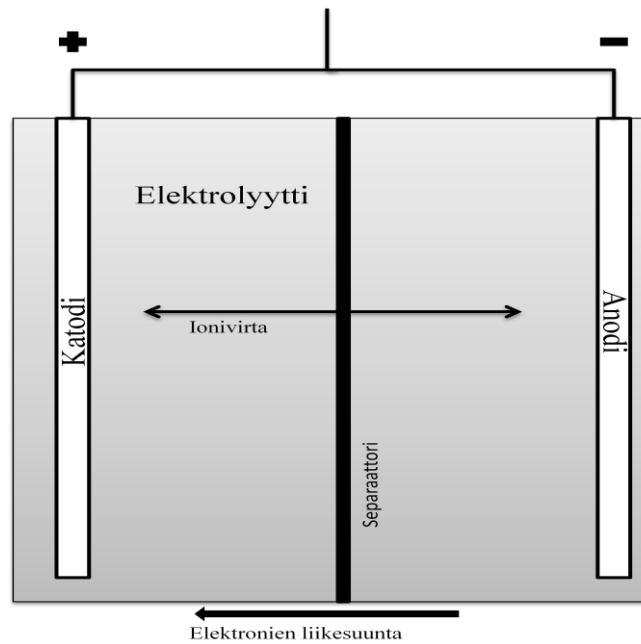
Akut ja sähkömoottorit ovat peruseräiteiltään jo yli toista sataa vuotta vanhoja keksintöjä. Akkuteknologiat ovat tosin vasta viime vuosikymmenen aikana kehittyneet materiaalien osalta sille tasolle, että niitä voitaisiin hyödyntää energianlähteenä raskaissa sovelluksissa, kuten kaivostyökoneissa. Tässä kappaleessa käsitellään aluksi akkukäyttöisissä kaivostyökoneissa käytettyjä akkuteknologioita, ja niiden ominaisuuksia verrataan keskenään. Kappaleen loppuosassa tehdään katsaus sähkömoottoreihin ja erityisesti oikosulkumoottoreihin.

2.1 Akut

Akkukkenno koostuu positiivisesta elektrodista (katodi), negatiivisesta elektrodista (anodi) ja elektrolyytistä, joka erottaa katodin ja anodin fyysisesti toisistaan. Nestemäistä elektrolyyttiä käytettäessä on kennossa käytettävä separaattorina huokoista kalvoa, joka varmistaa, että anodi ja katodi eivät kosketa toisiaan sähköisesti. Separatuurin mahdollistamana nestemäinen elektrolyytti eristää anodin ja katodin toisistaan. Peruseräiteeltään elektrolyytti on ionisesti johtava ja sähköisesti eristävä, joka mahdollistaa hapetus-pelkistys-reaktion elektrodeissa.

Akkujen latautuvuus perustuu palautumiskykyiseen hapetus-pelkistys-reaktioon anodi- ja katodimateriaalien välillä. Kennon avoimen piirin jännite tulee katodin ja anodin välisestä kemiallisesta potentiaalierosta. Akun todellinen jännite saadaan, kun avoimen piirin jännitteestä vähennetään akun läpi kulkevan virran ja akun sisäresistanssin tulo.

Akkukäyttöisissä ajoneuvoissa, mukaan lukien kaivostyökoneet, yleisin käytössä oleva akkutyyppe on litium-ioni akku. Litium-ioniakut käyttävät Li^+ -ionia interkalaatiomateriaalina anodille ja katodille, joiden välillä Li^+ -ionit liikkuvat elektrolyytissä, joka on imeytettynä separaattoriin. Interkalaatio (*Eng. Intercalation*) on kemiallinen reaktio, jossa vieras atomi tai molekyyli asettuu toisen aineen atomikerroksissa oleviin tyhjiin väleihin. Jotta akku saadaan purkutilaan, katodimateriaalien tulee olla litium-metallioksiedeja, ja anodimateriaalien hiiltä tai muita materiaaleja, jotka pystyvät vastaanottamaan Li^+ -ionin tai jotka seostuvat metallisen litiumin kanssa. (Zhang, 2015, s. 2-3) Kuvassa 2.1 on esitetty akkukennon rakenne yksinkertaisimmillaan.



Kuva 2.1 Akkukennon rakenne

Akkukäyttöisissä kaivostyökoneissa käytetään pääsääntöisesti kolmea akkukennon tyyppiä: litium-rauta-fosfaatti (LiFePO_4), litium-titanaatti (LTO) ja litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi (NMC). LiFePO_4 -kennoteknologia on laajimmin käytettyä. Esimerkiksi *RDH Mining Equipment* julkaisi jo vuonna 2013 kyseisellä akkuteknologialla toimivan LHD, load haul dump, -kuormaimen (Tollinsky, 2013).

LiFePO_4 -akun hyviä puolia on sen suuri maksimikapasiteetti, lämpötilatasaisuus käytössä ja latauksen aikana, kevyt paino, pieni koko ja halvat tuotantokustannukset. Haittapuolena LiFePO_4 -akuilla on sen heikko käytettävyys alle $0\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa (Mei, 2016). LTO on uudehko litium-ioniakkutyyppeihin verrattuna ovat sen virrankestokyky, joka mahdollistaa nopean latauksen, ja pitkä käyttöikä. Esimerkiksi LiFePO_4 -akuilla latausajat ovat tunteja akun koosta riippuen, kun LTO-akuilla latausajat ovat minuutteja (Mei, 2016). LTO-akun käyttöikästä kertoo hyvin se, että testissä tuhannen käyttösyklin aikana akussa ei tapahtunut kapasiteetissa tai resistanssissa muutoksia (Burke, 2013). LiFePO_4 -akkujen käyttöikä on maksimissaan 2500 käyttösykliä ilman, että akun varauksessa tai kapasiteetissa näkyisi muutoksia (Xiaosong, 2017). LTO-akku on täysin käyttökelpoinen myös alle $0\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötiloissa. LTO-akkujen huono puoli on niiden kalliit tuotantokustannukset LiFePO_4 -akkuihin verrattuna. LiFePO_4 -akku kustantaa noin 360 dollaria/kWh ja LTO-akku noin 860 dollaria/kWh (Xiaosong, 2017).

MacLean Engineering käyttää omissa EV-sarjan laitteissaan NMC-akkuja. Litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidiakut ovat myös uutta teknologiaa. Nikkeli-mangaani-

kobolttiakkujen ehdoton hyvä puoli on niiden korkea varaustiheys. NMC-akkujen ominaisvaraus on tyypillisesti 160 mAh/g ja sitä voidaan kasvattaa jopa yli 200 mAh/g, mutta korkeampi varaustaso pienentää akun kestoikää (Zhang, 2015, sivut 80–82). NMC-akkujen käyttöikä on keskimäärin noin 2000 käyttösykliä ja NMC-akun valmistuskustannus on noin 360 dollaria/kWh (Xiaosong, 2017).

2.1.1 Akkujen lataus

Akkujen lataukseen on kolme erilaista tapaa: erillinen latausasema, koneeseen integroitu mukana kulkeva latausjärjestelmä ja akun vaihtaminen. Sandvik käyttää omassa LH307B:ssään erillistä latausasemaa, johon sisältyy muuntaja, itse latausasema ja jäähdytyspaketti. Latausasema mahdollistaa laitteen lataamisen pikalatauksella. Jotta varmistutaan, että latauksen aikana ei tapahdu mitään, mikä aiheuttaisi riskejä, lataukseen liittyy erilaisia turvallisuusprotokollia, joiden avulla laite tunnistetaan. Akkua ladattaessa käytetään nestejäähdytystä, jota varten on erillinen jäähdytinmoduuli. Jäähdytystä voidaan tarvita paitsi itse latauksen aiheuttaman lämmön jäähdyttämiseen, niin myös mahdollisen käytön aikaisen lämpenemisen kontrollointiin, jos laitetta käytetään oloissa, joissa ympäristön lämpötila on korkea. Akun lämpeneminen ei ole normaaliolosuhteissa oletettavaa, mutta siihen on varauduttu. Pikalatauksen lisäksi laitteessa on niin sanottu huoltolaturi, jota voidaan käyttää silloin, kun varsinainen latausasema ei ole saatavilla. Huoltolaturilla laitetta voidaan ladata kaapelin välityksellä pienellä teholla kaivoksen sähköjärjestelmästä. (Ulvelin, 2018). Akkujärjestelmät sisältävät myös hyvin kehittyneitä hallintajärjestelmiä, joilla hallinnoidaan ja valvotaan akun tilaa, akun purkamista ja latausta, akun lämpötilaa ja kennojen tasaisuutta. Ne voivat sisältää myös erilaisia suojamekanismeja yllilatautumisen ja oikosulkujen varalle (Xiaosong, 2017).

2.2 Sähkömoottorit

Sähkömoottoreilla on selkeitä etuja kaivosympäristöissä. Sähkömoottori ei tuota yhtään haitallisia pakokaasuja tai tuota niin paljoa lämpöä ympäristöönsä kuin perinteinen dieselmoottori. Lämmön ja pakokaasujen hallinta syvällä maan alla on haasteellista ja kallista. Koska sähkömoottori tarvitsee toimiakseen vain tarpeeksi tehokkaan sähköjärjestelmän (kaivostyökoneiden kohdalla joko akkujärjestelmä ja laturi tai pelkkä kaapeli yhdistetään kaivoksen sähköjärjestelmään), sitä varten ei myöskään tarvitse kuljettaa (erämaahan, jossa kaivokset yleensä sijaitsevat) ja varastoida vaarallisia aineita, kuten dieseliä.

Sandvik käyttää LH307B:ssä normaaleja oikosulkumoottoreita (Ulvelin, 2018), joka on moottorityyppinä hyvin yleinen. Oikosulkumoottorissa staattorin urakäämitys on jaettu koneeseen tulevan kolmivaihevirran vaiheiden mukaisesti siten, että käämien virrat saavat aikaan pyörivän magneettikentän. Pyörivä magneettikenttä indusoi roottoriin virran, joka taas aiheuttaa voiman, joka saa roottorin pyörimään. Koska oikosulkumoottorin toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään, esimerkiksi kipinäherkkyys on pientä, kun roottori ja staattori eivät osu toisiinsa. Pieni kipinäherkkyys on etuna esimerkiksi kaivoksissa, joissa voi ilmetä esimerkiksi metaania tai muita herkästi syttyviä aineita. Oikosulkukone on myös halpa sähkömoottorityyppi, ja sen säädettävyys taajuudenmuuttajan avulla on hyvä. Oikosulkumoottori toimii myös hyvin vähäisellä huollolla, joka myös osaltaan vähentää sen käyttökustannuksia. Oikosulkumoottorin mekaaninen kestävyys on myös hyvä. (Pyrhönen, 2006, s. 37–40) LH307B on kuitenkin vasta prototyypivaiheessa, eli sen käyttämä moottorityyppi voi vielä vaihtua moneen kertaan.

Artisan Vehicle Systems käyttää omassa 153:saan kestromagneettimoottoreita, joissa roottoriin on asennettu kestromagneetteja. Kestomagnetoitumoottori voi olla umpinapainen tai avonapainen riippuen magneettien asennustavasta roottorilla. Kestomagneetikoneelle saadaan hyvä hyötysuhde, koska roottoria ei tarvitse erikseen magnetoida. Kestomagneetikoneessa magnetointivirta korvataan kestromagneettien synnyttämällä magnetomorisen voiman avulla. Avonapainen kestromagneettimoottori tuottaa myös reluktanssivääntömomenttia (Pyrhönen, 2006, s. 44–46).

3. Käytössä olevia sähköisiä kaivostyökoneita

Kaivosteollisuuden osuus koko maailman energiankulutuksesta on seitsemän prosenttia (Bharathan, 2017), joka on sen verran merkittävä osuus, että ”pienetkin” muutokset kaivosten energiankulutuksessa näkyvät globaalisti. Sähköistyminen on hyvä tapa hallita kulutetun energian aiheuttamia päästöjä, koska sähkökäytön päästöt riippuvat hyvin vahvasti siitä, miten sähkö tuotetaan. Sähköntuotantoon on olemassa paljon hyvin pienipäästöisiä keinoja, kuten vesi-, aurinko- tai tuulivoima.

Perinteisesti kaivoksissa käytetyt dieselyökoneet ovat suurin yksittäinen päästöjen aiheuttaja maan alla. Tämä aiheuttaa osaltaan sen, että kaivoksia on tuuletettava tehokkaasti; esimerkiksi Kanadan Ontariossa vaatimus tuuletukselle on $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ ilmaa per käytetty kilowatti. Jos ilmanvaihtokriteerit eivät täyty, on Kanadan valtiolla valtuudet keskeyttää kaivostoiminta kyseisessä kaivoksessa. (Bharathan, 2017). Sähkökäytöllä tätä ongelmaa voidaan lieventää, koska se ei itsessään tuota vaarallisia päästöjä, joita pitäisi poistaa.

Tällä hetkellä kaivostyökoneissa käytetty energia jakautuu seuraavasti: 19 % sähköä, 3 % uusiutuvia energianlähteitä ja 78 % fossiilisia polttoaineita. Maakaasua on myös sähkön ohella mietitty dieselin korvaajaksi, mutta se on kompastunut esimerkiksi kaasun säilytykseen liittyviin vaaroihin. Kaasukäyttöisyys kasvattaa myös laitteiden painoa ja kokoa, jotka on myös nähty negatiivisina ominaisuuksina. (Bharathan, 2017).

3.1 Miksi sähkökäyttöisiä kaivostyökoneita?

Sähkökäyttöisissä kaivostyökoneissa on monia etuja dieselkäyttöisiin kaivostyökoneisiin verrattuna. Suurin ja tärkein etu on se, että sähkökäyttöiset koneet eivät tuota päästöjä jo muutenkin huonoilmaisissa kaivoksissa, ja niiden hyvien hyötysuhteiden ($\eta \sim > 0.85$) takia ne eivät tuota niin paljon lämpöä kuin dieselkoneet ($\eta \sim < 0.5$). Tämä on toiminut suurimpana vetojuhtana sähkökäyttöisten kaivostyökoneiden kehityksessä, kun päästöttömyyden seurauksena kaivosyriyten ei tarvitse investoida isoja summia kaivostensa ilmanvaihtoon. Esimerkiksi *Medatech Engineering:n* laskujen mukaan akkukäytöt vähentävät hiilidioksidipäästöjä kuudelta kuormajalta yhteensä noin 3,654 tonnin verran vuodessa, joka tarkoittaa noin 400 000 dollarin rahallisia säästöjä jokaista kuormainta kohden. Esimerkkikuormurina Medatech käytti 40 tonnin,

545 hevosvoimaista LHD-kuormainta. Tarvittavana tuuletusmääränä käytettiin Kanadan luonnonvaraministeriön asettamia vaatimuksia esimerkkikuormaimelle ja dieselinkulutukseksi arvioitiin noin 227000 litraa/vuosi (ALTDRIIVE Systems, 2017).

Toinen etu on se, että sähkökäyttöä varten ei tarvitse säilyttää vaarallisia aineita, kuten dieseliä, jo muutenkin ahtaissa tiloissa. Kolmas etu on sähkökäytön huoltovapaa rakenne. Siinä missä dieselmoottori vaatii jatkuvaa huoltoa, sähkökäyttöinen toimii, moottorista riippuen, hyvin pienellä huoltamisella, mikä taas synnyttää rahallisia säästöjä. Kaivostyökoneiden huoltokustannukset ovat suuruusluokkaa 20 % - 35 % kaivoksen kokonaiskustannuksista ja 25 % kaivoksissa tapahtuvista onnettomuuksista tapahtuu huollon aikana (Dhillon, 2008).

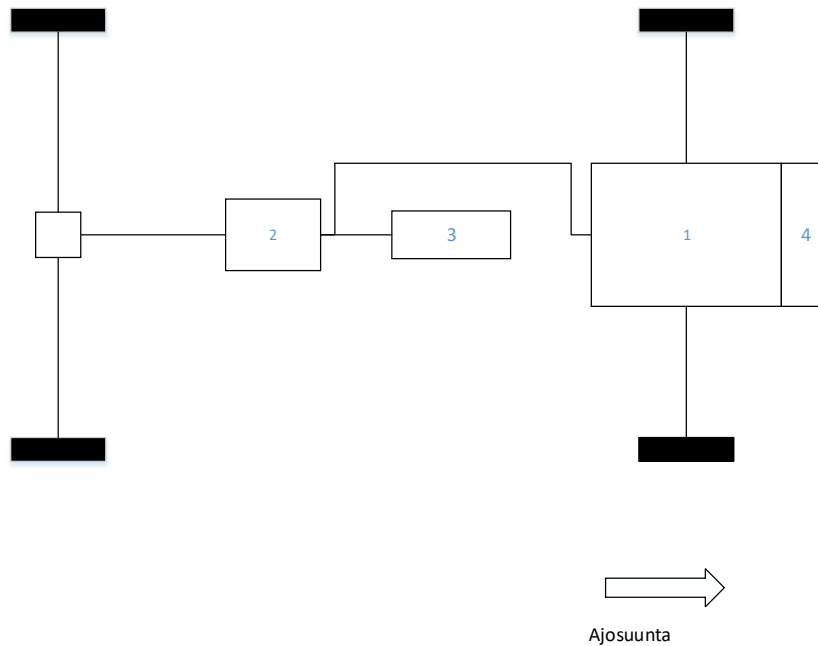
Sandvikin näkemys on se, että erilaiset akku-, hybridi- ja trolley-ratkaisut tulevat jatkossa lisääntymään. Syitä Sandvikin mukaan on useita, mutta päällimmäinen syy on kaivosten syveneminen ja sitä kautta kaivosten sisälämpötilojen nousu, joka vaatii tehokasta tuuletusta, joka taas aiheuttaa kustannuksia. Jos pakokaasua tuottavia laitteita saadaan korvattua, niin niiden tuottamaa pakokaasua ei tarvitse erikseen huomioida tuuletuksessa, joka vähentää jo ennestään korkeita tuuletuksenkustannuksia. Toisena syynä Sandvik pitää työympäristöä. Koska dieselin aiheuttamat päästöt ovat luokiteltu syöpävaarallisiksi, niitä pitäisi välttää työympäristöissä. Yritykset ovat myös ottaneet käyttöön erilaisia käytäntöjä, kuten ”carbon free production” tai muita vastaavia käytäntöjä, jotka luovat tarvetta vähentää tai luopua kokonaan fossiilisista polttoaineista. Koska sähköistyminen on iso trendi myös muussa ajoneuvoihin liittyvässä toiminnassa, kaivosteollisuus näkee siinä omat hyötynsä. Samaan aikaan kaivosteollisuudessa kasvaa automaatiotrendi, esimerkiksi etäohjattu ja/tai autonominen lastaus ja kuljetus, jotka parantavat tuottavuutta, työntekijöiden turvallisuutta ja työoloja. Sandvik haluaa olla eturintamassa yhdistämässä näitä kahta trendiä. (Ulvelin, 2018).

Sandvikin visiona on päästä täyssähköiseen kaivostoimintaan. Sandvik onkin MacLean Engineering:n kanssa mukana Goldcorp:n kaivoshankkeessa Bordenissa Kanadassa, joka pyrkii olemaan ensimmäinen täysin sähköistetty kaivos Kanadassa, ja samalla myös koko maailmassa (Scales, 2016).

3.2 Akkukäyttöisiä kaivostyökoneita

Akkukäyttöisiä kaivostyökoneita löytyy useammalta eri yhtiöltä, esimerkiksi *Atlas Copco:lta* (uudelta nimeltään *Epiroc*), *Artisan Vehicle Systems:lta*, *RDH Mining Equipment:lta* ja *Sandvikilta*. Täysakkukäyttöiset työkoneet rajoittuvat pääsääntöisesti LHD -kuormaimiin. Tähän isona poikkeuksena on *MacLean Engineering:n* EV-sarja, joka sisällyttää vuodesta 2017 alkaen akkukäyttömahdollisuuden kaikkiin heidän maaperän tuentalaitteistoihinsa (esimerkiksi sihdit, ruiskubetonin suihkuttajat ja betoniautot), malmintuotantolinjan osiin (esimerkiksi vesitykit, toissijaishajottajat ja liikuteltavat kivenhajottajat) ja yleishyötylaitteisiin (esimerkiksi saksinostimet, erilaiset kuljetinautot) (*MacLean Engineering*, 2016). *MacLean Engineering* käyttää omissa laitteissaan *Medatech:n* ALTDRIIVE-sähköistä voimansiirtoa, jonka pyrkimyksenä on korvata dieselkäyttöjä akkukäytöllä raskaissa sovelluksissa (*ALTDRIVE Systems Mining and construction*, 2017).

Kuvassa 3.1 on esitetty yksi esimerkki siitä, miten sähkökäyttöisen kaivostyökoneen voimansiirtolinja voidaan rakentaa. Kuva ei ole mittakaavassa ja kuva perustuu karkeasti ALTDRIIVE voimansiirtolinjaan ja siitä olevaan havainnollistavaan kuvaan. (*ALTDRIIVE Systems Electric and Hybrid Technology*, 2017). Kyseinen rakenne on ideaalinen kuorma-autotyyppeihin sovelluksiin, joissa kuorma tai muu laitteisto painottuu koneen peräosaan. Tämän tyyppisiä kaivostyökoneita on esimerkiksi *RDH Mining Equipment:lla* ja *MacLean Engineering:lla*. LDH-kuormaimen rakenne eroaa siten, että sen akku ja muu tekniikka on sijoitettuna perään ja koneen etuosa on vain kauhan nostotapahtumaa varten.



Kuva 3.1 esimerkkikuva sähkökäyttöisen kaivostyökoneen voimansiirtolinjasta. Akku on sijoitettu koneen etuosaan (kuvassa nro. 1), ja se on kooltaan ja massaltaan suurin komponentti voimansiirtolinjassa. Koneen moottori on sijoitettu keskelle (kuvassa nro. 2). Vaihteisto on sijoitettu moottorin eteen (kuvassa nro. 3). Tehoelektronikka (kuvassa nro. 4), kuten esimerkiksi taajuudenmuuttaja, on kiinnitetty akun eteen. Näiden lisäksi voimalinjassa voi olla esimerkiksi akun vaatimia lämmönsäätöelementtejä. Kakki nämä ovat yhteydessä koneen säätöjärjestelmään.

Energianlähteenä Atlas Copco:n, Artisanin ja RDH:n koneissa toimii LiFePO_4 -akku, ja Sandvik käyttää LTO-akkua. RDH lupaa akuilleen neljän tunnin käyttöikä ja 1,5-2 tunnin latausaikaa (RDH Mining Equipment), ja Sandvikin akuille luvataan jopa 15 minuutin latausaikojä (Sandvik, 2016), joka on mahdollista valitun akkuteknologian kautta.

Alla on esitelty erilaisia akkukäyttöisiä kaivostyökoneita. Koneiden ominaisuuksista on koottu taulukko, joka löytyy työn liitteenä. Käytetyt arvot ovat suoraan valmistajien tarjoamista datalehdistä, minkä takia ne eroavat esitystavoiltaan.

Artisan Vehicle Systems:n 153, tai uudelta nimeltään A4 LHD -kuormain, käyttää voimanlähteenään 85 kW:n kolmivaihekestmagneettimoottoria, ja akkuna toimii 88 kWh:n, 600 V DC:n LiFePO_4 -kennoinen akku. Kuormain käyttää ajamiseen ja hydraulikkajärjestelmiin erillisiä moottoreita. Hydraulikkajärjestelmä käyttää voimanlähteenään 46 kW kolmivaihekestmagneettimoottoria. 153:n kuljetuskapasiteetiksi ilmoitetaan 3 tonnia ja siinä on 1.2 m^3 :n kauha. Moottori ja akkupakka ovat Artisanin omavalmisteita. (Artisan Vehicle Systems).

Atlas Copco käyttää omassa Scooptram ST7 Battery LHD -kuormaimessaan Artisanin 165 kWh:n ja 630 V DC:n LiFePO₄ -akkuja virtalähteenä, ja ajamiseen Artisanin 1200 -sarjan 108kW, 630VAC -moottoria. Scooptram ST7 Battery käyttää lataukseen Artisanin 65kW Master Service -laturia, jonka syöttöjännite on 575 V AC. (Atlas Copco Scooptram ST7 Battery, 2016) Scooptramin käyttöaika akulla on noin neljä tuntia. Akun lataaminen kestää kaksi tuntia ja se on joko kiinnitettävä laturiin tai akun voi irrottaa ja vaihtaa ladattuun, minkä saa tehtyä kymmenessä minuutissa (Jensen, 2016).

GE Fairchild Battery Powered AC LHD:ssä on 214.8 kWh:n, 240 V:n akku. Ajomoottorina toimii 36.77 kW:n sähkömoottori, ja hydraulikkakäytössä toimii 18.39 kW:n moottori. Käräyskapasiteettia GE Fairchild:llä on 4989.5 kg. (GE Fairchild)

Komatsu yhdessä sveitsiläisistä yrityksistä koostuvan yhtymän kanssa, kehittää niin sanottua maailman suurinta sähköajoneuvoa *e-Dumper:ia*. e-Dumper on kapasiteetiltaan 65-tonninen ja siinä on 700 kWh:n NMC-akku. e-Dumper hyödyntää avolouhoksen pitkiä mäkiä siten, että se tuottaisi suunnitelmien mukaan täytenä mäkeä alas tullessa enemmän energiaa, kuin se tarvitsisi mennäkseen tyhjänä mäen takaisin ylös. (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, 2017)

RDH Mining Equipment:n Mucmaster 300 EB on yksi ensimmäisistä akkukäyttöisistä kaivostyökoneista. Sen kehitys alkoi jo vuonna 2011 (Tollinsky, 2016). Siinä on akkuna 470 V DC:n, 260 Ah, LiFePO₄ - akku, jonka käyttöajaksi on ilmoitettu keskiarvolla neljä tuntia, 1.5-2 tunnin latausajalla. Moottorina Mucmasterissa toimii 74.6–223.8 kW:n, täysin koteloitu, nestejäähdytteinen, huoltovapaa ja harjaton moottori. Kauhan kapasiteetti on 1.5 – 2.3 m³. (RDH Mining Equipment). RDH Mining Equipment valmistaa useampia akkukäyttöisiä kaivostyökoneita, kuten esimerkiksi Mucmaster 600EB, Muckmaster 3TEB ja Haulmaster 800-20EB.

Sandvik LH307B on Sandvikin kehitteillä oleva akkukäyttöinen kaivostyökone, jossa akkuteknologiana vesijäähdytteistä litium-titanaattioksidiaakkua. Valitulla akkuteknologialla Sandvik pyrkii LH307B:ssä siihen, että akku kestäisi noin 15–16 000 tuntia tai jopa kaivostyökoneen lasketun elinkaaren eli yli 20 000 tuntia. Käyttölämpötila haarukaksi LTO-akulle ilmoitetaan -20 °C – 45 °C. Latausajaksi Sandvik ilmoittaa akulle noin 15 – 20 minuuttia kahden tunnin työskentelyajalla. 2 h/ 15 min on sykli, joka on helposti sisällytettävissä kaivoksen muuhun

työrytmiin. Nopea lataus Sandvikin mukaan eliminoi jatkuvan akkujen vaihtamisen, joka akkujen sisältämän suuren energian takia vaatii erityistä varovaisuutta. Akkujen jatkuva vaihtaminen aiheuttaa logistisia ongelmia ja nähdään turvallisuutta heikentävänä asiana. Akut ovat myös suhteellisen kookkaita ja raskaita, ja ne vaativat huomattavasti nostotyötä, johon liittyy omat riskinsä. (Ulvelin, 2018). Kuvissa 3.2 ja 3.3 on kuvattu miltä LH307B mahdollisesti näyttäisi valmistukseen siirtyessään.



Kuva 3.2 Sandvik LH307B *copyright Sandvik*



Kuvat 3.3 Sandvik LH307B *copyright Sandvik*

Voimansiirrossa LH307B:ssä toimii normaali oikosulkumoottori, kuten myös hydraulikan tehoyksikössä. Sandvik on harkinnut käyttävänsä LH307B:ssä muitakin moottorityyppejä, mutta tällä hetkellä käytössä on ilmoitettu tyyppi. Sandvikin mukaan voimansiirrossa on käytössä tehollisesti ja rakenteellisesti selkeästi muista normaaleista LHD-koneista eroavia ratkaisuja. Hydraulikassa LH307B käyttää niin sanottua ”on demand” -periaatetta, eli hydraulikkatehoa tuotetaan vain järjestelmän sitä vaatiessa, jolla on pyritty eliminoimaan tyhjäkäyntiä, ja näin ollen parantamaan järjestelmän hyötysuhdetta. Hyötykuormaa LH307B:ssä on 6.7 tonnia. (Ulvelin, 2018).

Sandvik LZ101LE on pienikokoinen kauko-ohjattava puskuetraktori, joka on suunniteltu ahtaisiin ja ihmiselle vaarallisia aineita sisältäviin tiloihin. LZ101LE työntökapasiteetti on 4 tonnia. Minimi työskentelykorkeus LZ101LE:lle on 1.1 metriä. Akkuna siinä toimii 371 V sulasuola (natrium-nikkeli kloridi) -akku ja voimanlähteenä toimii kolme sähkömoottoria yhteensä 60 kW:n teholla. Akkujen käyttöajaksi luvataan viisi tuntia raivausta. (Sandvik LZ101LE, 2017)

3.3 Kaapelikäyttöisiä kaivostyökoneita

Kaapelikäyttöisiä kaivostyökoneita on ollut markkinoilla paljon pidempään kuin akkukäyttöisiä, koska raskaaseen käyttöön soveltuvia akkuja on tullut vasta 2010-luvulla markkinoille, kun taas esimerkiksi sähkömoottorit ovat olleet jo pidempään tarpeeksi tehokkaita kaivostyökonekäyttöön. Yksi ensimmäisistä kaapelikäyttöisistä kaivostyökoneista on *Bucyrus-Erie 120-B*, joka julkaistiin jo vuonna 1925. 120-B:tä käytettiin maa-aineksen lastauksessa autoihin, ja se käytti voimanlähteenään tasavirtamoottoreita, joita syötettiin erillisellä generaattorilla (Haddock, 2008). Kuvassa 3.4 esitetty 120-B on vuodelta 1945. Käyttövoimageneraattori on kuvassa vasemmalla.



Kuva 3.4 Bucyrus-Erie 120B *copyright Petersen, Max S.; Arthur Lakes Library; Russell L. and Lyn Wood Mining History Archive; United States. Bureau of Mines*

Kaapelikäyttöisissä kaivostyökoneissa kone on kaapelilla kiinni kaivoksen sähköjärjestelmässä ja saa sieltä käyttövirtansa. Kaapelikäyttö mahdollistaa hyvinkin suurien kaivostyökoneiden käytön, esimerkiksi avolouhoksilla on jo pitkään käytetty kaapelikäyttöisiä ”köysilapioita” (eng. *rope shovel*), joita käytetään isojen maa-aineksmäärien kaivamiseen, esimerkiksi CAT:in 7395:n hyötykuorma on 64 tonnia ja kauhan kapasiteetti on 20.6–55.8 m³:ä (CAT).

Kaapelikäyttöisiä kaivostyökoneita käytetään myös jossain määrin maan allakin. Siellä kaapelikäyttö on rajoittunut kuormaimiin. Esimerkkinä tästä on kuvassa 3.5 näkyvä Scooptram EST1030. EST1030 moottorina toimii kolmivaiheinen 132 kW:n moottori ja sen hyötykuorma on

10 tonnia. (Atlas Copco EST1030, 2013) Kaapelikäytön ehkä suurin ongelma on pitkän kaapelin aiheuttama kömpelyys, eli kaapelikäyttö ei sovellu työhön, missä pitäisi liikkua pitkiä ja monimutkaisia matkoja.



Kuva 3.5 Scooptram EST1030 *copyright Atlas Copco*

3.4 Akku + kaapelikäyttöisiä kaivostyökoneita

Akkukäytön ehkä suurin ongelma on materiaaliteknisistä syistä johtuva heikko kapasiteetti. Vaikka parannusta akkujen kapasiteeteissa on viime vuosina nähty huomasti, niin niiden kapasiteetit eivät ole yksinään riittäviä esimerkiksi kaivoksien porauslaitteita varten. Kaivostyökonevalmistajat kehittävätkin erilaisia akkuhybridejä kaivostyökoneita, niissä käyttövoima tulee akusta ja kiinteästä kaapeliyhteydestä sähköverkkoon tai sitten akusta ja polttomoottorista.

Uutuutena kaivostyökone markkinoille ovat tulleet täyssähköiset kaivosjumbot, joissa liikkuminen suoritetaan akkukäyttöisesti, ja porausta varten ne kytketään kaapelilla kaivoksen sähköjärjestelmään. Täyssähköisiä kaivosjumboja löytyy esimerkiksi Sandvikilta ja Atlas Copco:lta. Nämä laitteet ovat toki vasta julkaistuja, Sandvikin *DD422iE* vuoden 2016 alussa ja Atlas Copco:n *Boomer M2C Battery* vuoden 2017 syksyllä, eivätkä ne ole vielä laajasti markkinoilla, mikä koskee isoa osaa akkukäyttöisistä kaivostyökoneista.

Sandvik DD422iE

Kuvassa 4.1 esitetty Sandvikin DD422iE käyttää akkunaan sulasuola-akkua. Sulasuola-akku mielletään hyvin turvalliseksi akkutyyppiä, varsinkin paloturvallisuuden näkökulmasta (Sandvik DD422iE). Siirtymäajoon käytettävää akkua ladataan pääsääntöisesti DD422iE:n ollessa kytkettynä kaivoksen sähköverkkoon, jolloin akkua voi ladata porauksen aikana. Koneessa on myös ominaisuus, joka lataa akkuja koneen kulkiessa alamäkeen ja muuntaa jarrutusenergiaa sähköksi (Sandvik DD422iE). DD422iE:n sähköjärjestelmä on myös luotu siten, että se soveltuu erilaisiin sähköverkkoihin ympäri maailman. DD422iE toimii 380 V- 1000 V:n jännitealueella ja sekä 50, että 60 hertsin verkossa (Sandvik DD422iE).



Kuva 3.6 Sandvik DD422IE *copyright Sandvik*

Boomer M2C Battery

Boomer M2C Battery:n porauksen kokonaissähköteho on yhteensä 188 kW, josta päämoottorit ovat 2 x 90kW, eli molemmissa porauspuomeissa on oma moottori porausta varten. Akkuna M2C:ssä toimii 88.5 kWh:n, 630 VDC, LiFePO₄ – akku, ja laturina toimii Artisanin 65 kW Master Service, jonka syöttöjännite on 575 VAC. Laturi on siis sama, kuin Scooptram ST7 Batteryssa. Ajomoottorina M2C:ssä toimii 127 kW/403 Nm:n sähkömoottori. Boomer M2C Battery on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 3.7 Atlas Copco Boomer M2C Battery *copyright Atlas Copco*

3.5 Hybridikäyttöisiä kaivostyökoneita

Hybridikäyttö ei ole saavuttanut samanlaista suosiota kaivostyökonevalmistajien keskuudessa kuin akkukäyttö. Hybridikäytön vähyyttä osaltaan selittää akkuteknologioiden kehittyminen sellaiselle tasolle, missä ne eivät keskeytä kaivosten työsykliä liiaksi. Akkujen parantuessa hybridikäytön edut, isompi hyötykuorma, nopeammat liikkeet, ynnä muut sellaiset, heikentyvät, kun ottaa huomioon täyssähkökäytön tuomat säästöt päästöttömyydestä ja suhteellisen pienen pudotuksen tuottavuudessa.

Joy 18HD ja Joy 22HD

Joy 18HD ja Joy 22HD:lla ajettaessa dieselmootorilla tuotetaan sähköenergiaa, jota syötetään renkaissa sijaitseviin moottoreihin. Jarrutettaessa dieselmoottori pysähtyy ja moottoreiden jäljelle jäänyt kineettinen energia säilötään KESS:iin (Kinetic Energy Storage System). Seuraavan kerran, kun kuljettaja lähtee liikkeelle liikkumiseen, tarvittava energia otetaan aluksi KESS:stä ja vasta sitten dieselmoottorista. Hybridijärjestelmästä saadaan tehoa irti 280 kW – 360 kW ja kiihdytystä varten siitä voidaan saada irti jopa 410 kW. Joy 18HD:n hyötykuorma on 18 tonnia ja 22HD:n 22 tonnia. Tehokkaamman kiihdytyksen johdosta 18HD ja 22HD pystyvät liikuttamaan pitkällä aikavälillä jopa 20 % enemmän kuormaa. Merkittävä tuottavuuden kasvu saadaan aikaiseksi 18HD ja 22HD:ssa pienemmällä polttoaineen kulutuksella, joka voi olla jopa 33 %:n luokkaa. Pienempi polttoaineen kulutus tuottaa sähkökäyttöisten kaivostyökoneiden tavoin säästöjä esimerkiksi ilmanvaihdossa.(JoyGlobal, 2017).

5. Tulevaisuudennäkymiä

Tulevaisuuden ennustaminen on aina arvausleikkiä ja epävarmaa. Kaivostyökoneissa tulevaisuus näyttää tällä hetkellä vahvasti siltä, että tulevaisuus on sähkökäyttöissä ja automaatiassa. Sähkökäyttöisten kaivostyökoneiden yleistymisen ja tuleva kehitys on riippuvainen siitä, mihin akkuteknologiat kehittyvät varsinkin kapasiteetin osalta. Myös mitä enemmän esimerkiksi kaivosten kaivuusyvytydet kasvavat kannattavien malmiesiintymien osalta ja kaivosten lämpötilojen noustessa samalla, niin sitä kannattavammaksi sähkökäyttöiset kaivostyökoneet tulevat. Kannattavuus kasvaa koska sähkökäyttöiset kaivostyökoneet aiheuttavat itsessään vähemmän ylimääräistä lämpöä.

Kaivosteollisuudessa on nähtävissä, että sähkökäyttö on yleistymässä samalla tavalla kuin esimerkiksi autoteollisuudessa. Lähes jokainen merkittävä kaivostyökoneiden valmistaja on kehittelemässä omia sähkökäyttöisiä kaivostyökoneitaan. LTO-kennolliset akut tulevat tulevaisuudessa valtaamaan alaa korkeaa virtaa vaativissa sovellutuksissa, ja tieteellinen tutkimus puoltaa tätä kehitystä (Mei, 2016).

Sandvikin kehitystyö keskittyy nyt ja tulevaisuudessa vahvasti akku- ja hybriditeknologiaan sekä akku-trolley -yhdistelmiin. Näiden tarkoitus on yhdistää sähkökäyttöisyys ja kaivostyökoneiden niin sanotusti vapaa liikkuvuus, jolloin soveltuvuus mahdollisimman erilaisiin applikaatioihin olisi parempaa. (Ulvelin, 2018).

Akkuteknologioiden puolelta tulevaisuus näyttää, miten esimerkiksi litium-ilma-akkuteknologia, joka on vasta tutkimusvaiheessa, kehittyä. Litium-ilma-akun kapasiteetti voi olla esimerkiksi jopa 15000 mAh/g, mutta kapasiteetti riippuu todella paljon elektrodimateriaalista, ja se asettuu tyypillisesti 380–450 mAh/g välille (Peng, 2013). Korkea kapasiteetti mahdollistaa akkujen laajamittaisemman käytön kaivostyökoneissa, kun akun koko voidaan pitää samana, tai sitä voidaan pienentää, ja silti siitä saadaan enemmän hyötyä irti esimerkiksi käyttöajan muodossa.

6. Yhteenveto

Kaivosteollisuudessa on selkeästi nähtävissä, että kaivostyökoneiden sähköistyminen on yleistymässä kovaa vauhtia. Kaivostyökoneiden sähköistämisestä saatava säästö esimerkiksi ilmanvaihdossa on sen verran suuri rahallisesti, että sitä on hankala ohittaa. Vielä, kun fossiilisista polttoaineista syntyviä päästöjä pyritään jatkuvasti rajoittamaan erilaisilla päästömaksuilla tai muilla vastaavilla virikkeillä, niin se saa yritykset etsimään keinoja päästöjen vähentämiseksi. Akkuteknologioiden kehittyminen on ollut yksi suurimmista kaivostyökoneiden sähköistymistä vauhdittaneista tekijöistä. Lähes kaikki merkittävät kaivostyökoneiden valmistajat ovat kehittäneet omia akkukäyttöisiä kaivostyökoneitaan, mikä osaltaan kertoo kaivosalan halusta siirtyä sähkökäyttöihin.

Tehdyn tutkimuksen suurimpia haasteita oli akkukäyttöisistä kaivostyökoneista löytyvän tiedon vajavaisuus ja pintapuolisuus, koska suurin osa niistä on vasta kehitysvaiheessa. Tämä ongelma koskee varsinkin esimerkiksi kaivostyökoneissa käytettyjä sähkömoottoreita ja käytettyjen akkujen latauskeinoja. Tutkimusta varten haastateltiin Sandvikin edustajaa yleisesti aiheeseen liittyen ja heidän tuotteeseensa LH307B:n liittyen. Haastattelussa saatiinkin kattavia vastauksia aiheeseen liittyen, vaikka heidän laitteensa toimii vasta teknologian kehitysympäristönä. Yllätyksenä tutkimuksessa tuli, kuinka vähäistä hybridien käyttö on kaivostyökoneissa. Hybridien vähyyttä toki selittää akkukäyttöjen teknologian kehittyminen tasolle jossa niiden aktiivinen käyttöaika on hyvin lähellä sataa prosenttia. Tutkimuksessa saatiin tuloksena loppujen lopuksi kuitenkin tilanteeseen nähden kattava koonti markkinoilla olevista tai vasta julkaistuista akkukäyttöisistä kaivostyökoneista.

Lähteet

ALTDRIIVE Systems. 2017. Mining and construction [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 4.1.2018].

Saatavissa:

<http://altdrivesystems.com/mining-and-construction/#1510598613502-d4f5f5e2-940d>

ALTDRIIVE Systems. 2017. Electric and Hybrid Technology. [Esimerkkikuva]. [Viitattu 17.4.2018]. Saatavissa:

<http://altdrivesystems.com/battery-electric-hybrid-technology/>

Artisan Vehicle Systems. 153 datalehti [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.11.2017]. Saatavissa:

<http://www.artisanvehicles.com/wp-content/uploads/2017/11/Artisan-A4-Unit-Spec-Sheet-2.pdf>

<http://www.artisanvehicles.com/wp-content/uploads/2017/10/Artisan-153-spec-sheet-v1-3.pdf>

Atlas Copco EST1030. 2013. EST1030 tekniset tiedot. [Verkkodokumentti]. Viitattu [26.2.2018].

Saatavissa:

<https://mining.tcgcr.ru/assets/files/PDM/EST1030.pdf>

Atlas Copco Scooptram ST7 Battery. 2016. Scooptram ST7 Battery datalehti [Verkkodokumentti].

Viitattu [8.11.2017]. Saatavissa:

https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/mining-and-rock-excavation-technique/underground-rock-excavation/documents/scooptram-st7-battery/9851356601_L.pdf

Bharathan, B., Sasmito, A., Ghoreishi-Madiseh, S. 2017. Analysis of energy consumption and carbon footprint from underground haulage with different power sources in typical Canadian mines.

Journal of Cleaner Production. [Verkossa]. **166**. Sivut 21-31. [Viitattu 21.3.2018]. Saatavissa:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261731689X>

Burke, A., Miller, M. 2013. Life cycle Testing of Lithium Batteries for Fast charging and Second-use Applications. Conf. Rec. IEEE EVS27, Barcelona, Spain, November 17-20.

Caiping, Z., Changfu, Z., Xiaosong, H., Yang, L. 2017. Technological Developments in Batteries: A Survey of Principal Roles, Types, and Management Needs. IEEE Power & Energy Magazine. [Verkossa]. **15** (5), sivut 20–31. [Viitattu 30.1.2018]. Saatavissa:

<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?reload=true&punumber=8014>

CAT. 7395. [Verkkosivu]. [Viitattu 7.12.2017].

Saatavissa:

https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/electric-rope-shovels/electric-rope-shovels/18295903.html

Dhillon, B., S. 2008. Mining Equipment Maintenance. Kirjassa: Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety. Springer, London. [Verkossa]. [Viitattu 2.2.2018]. Saatavissa:

<http://www.springer.com/gp/book/9781848002876>

GE Fairchild. Battery powered AC LHD datalehti [Verkkodokumentti]. Viitattu [18.11.2017].

Saatavissa:

<http://www.gefairchild.com/PDF/full-brochure.pdf>

Haddoc, K. 2008. Construction Equipment. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 7.12.2017].

Saatavissa:

<https://www.constructionequipment.com/bucyrus-120-b-mining-shovel>

Jensen, S. 2016. OEMOffhighway. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 10.4.2017]. Saatavissa:

<https://www.oemoffhighway.com/electronics/article/12246203/battery-powered-underground-mining-equipment>

JoyGlobal. 2017. Hybrid Diesel LHD. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 15.4.2018]. Saatavissa:

https://mining.komatsu/docs/default-source/product-documents/underground/hard-rock-equipment/en-hdlhd01-0816-v1.pdf?sfvrsn=65eaf06b_22

MacLean Engineering. 2016. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 25.11.2017].

Saatavissa:

<http://www.macleanengineering.com/media-en/news/270-maclean-ev-series-to-support-development-of-world-s-first-100-diesel-free-hard-rock-mine>

Mei, J., Cheng, Eric K. W., Fong, Y.C. 2016. Lithium-titanate battery (LTO): A better choice for high current equipment. Conf. Rec. IEEE ISEE, Hong Kong, China, December 14-14.

Peng Tan, Zhaohuan Wei, W. Shyy, T.S. Zhao. 2013. Prediction of the theoretical capacity of non-aqueous lithium-air batteries. Applied Energy. [Verkossa]. **109**. Sivut 275–282. [Viitattu 2.2.2018].

Saatavissa:

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.031>

Pyrhönen, J. 2006. Sähkökäyttötekniikan perusteet kurssin luentomateriaali. [Verkkodokumentti]. Sivut 37–40. [Viitattu 26.2.2018].

Pyrhönen, J. 2006. Sähkökäyttötekniikan perusteet kurssin luentomateriaali. [Verkkodokumentti]. Sivut 44–46. [Viitattu 30.3.2018].

RDH Mining Equipment. MUCKMASTER 300EB datalehti [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.10.2017]. Saatavissa:

<http://www.rdhminingequipment.com/wp-content/uploads/sites/560/2015/03/128.MUCKMASTER-300EB-EVOLUTION-LHD-BROCHURE-R.23.04.13.pdf>

Scales, M. 2016. Canadian Mining Journal. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 11.10.2017]. Saatavissa:

<http://www.canadianminingjournal.com/features/goldcorps-borden-project-first-electric-mine/>

Sandvik. 2016. Sandvik introducing battery powered loader. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 5.10.2017].

Saatavissa:

<https://mining.sandvik.com/en/news-media/sandvik-introducing-battery-powered-loader>

Sandvik DD422iE. DD422iE development drill rig. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 15.4.2018].

Saatavissa:

<https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/underground-drill-rigs-and-bolters/mining-jumbos/dd422ie-development-drill-rig/>

Sandvik LZ101LE, 2017. LZ101LE datalehti. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 26.1.2018].

Saatavissa:

<https://www.rocktechnology.sandvik/globalassets/products/underground-drill-rigs-and-bolters/pdf/lz101le-specification-sheet-english.pdf>

Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology. 2017. Meet the E-dumper, the world's largest electric vehicle. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 27.2.2018]. Saatavissa:

<https://phys.org/news/2017-09-e-dumper-world-largest-electric-vehicle.html>

Tollinsky, N. 2013. Sudbury Mining Solutions Journal. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 15.10.2017]. Saatavissa:

<http://www.sudburyminingsolutions.com/rdh-unveils-battery-powered-machines.html>

Ulvelin, K. 2018. *Haastattelu T. Nurmisen kanssa sähköpostitse*. 22. helmikuuta.

Zhang, S.,S., Zhang, Z. 2015. Rechargeable Batteries: Materials, Technologies and New Trends. [Verkossa]. Sivut 2 - 3. Springer International Publishing. [Viitattu 30.3.2018]. Saatavissa:

<http://www.springer.com/gp/book/9783319154572>

Zhang, S.,S., Zhang, Z. 2015. Rechargeable Batteries: Materials, Technologies and New Trends. [Verkossa]. Sivut 80 - 82. Springer International Publishing. [Viitattu 16.1.2018]. Saatavissa:

<http://www.springer.com/gp/book/9783319154572>

Liitteet

Liite 1 Akkukäyttöisten kaivostyökoneiden teknisiä tietoja

Taulukko 1. Akkukäyttöisten kaivostyökoneiden teknisiä tietoja. Taulukossa esitetyt arvot ovat suoraan valmistajien tarjoamista datalehdistä minkä takia ne eroavat esitystavoiltaan.

| Nimi | Artisan Vehicle Systems 153 | Scooptram ST7 Battery | RDH Mining Equipment Mucmaster 300EB | GE Fairchild Battery powered AC LHD | Sandvik LZ101LE |
|---------------------|-------------------------------------|---|--|-------------------------------------|--|
| Akku | 88 kWh, 600 VDC, LiFePO4 | 165 kWh, 630 VDC, LiFePO4, Artisan | 470 VDC, LiFePO4, 260 A/h, Latausaika 1.5-2 tuntia (keskiarvo), toiminta-aika 4 tuntia (keskiarvo) | 214 kWh, 240 VDC | 371 V sulasuola - akku |
| Ajomoottori | 85 kW kestomagneettimoottori | 108 kW, Artisan, 1200 sarja | 74.6–223.8 kW, täysin koteloitu, nestejäähdytteinen, huoltovapaa, harjaton | 36.77 kW | Kolme sähkömoottoria yhteensä 60 kW:n teholla |
| Hydrauliikka | 46 kW kestomagneettimoottori | 76 kW, Artisan, 200 sarja | | 18.39 kW | |
| Kapasiteetti | 3000 kg | 6800 kg | 1.5 m ³ -2.3m ³ | 4989.5 kg | 4000 kg (Työntö) |
| Laturi | | 65 kW, syöttöjännite 575 VAC, Artisan, Master Service | | | |