



# Käytettyjen korkeajänniteakku- jen uusiokäyttö Sandvikilla

Kim Nieminen

OPINNÄYTETYÖ  
Syyskuu 2023

Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Sähkövoimatekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma  
Sähkövoimatekniikka

NIEMINEN, KIM:  
Käytettyjen korkeajänniteakkujen uusiokäyttö Sandvikilla

Opinnäytetyö 47 sivua  
Syyskuu 2023

---

Korkeajänniteakkujen uusiokäyttö tulee olemaan Sandvikille tulevaisuudessa haaste. Sähköisten kaivoslaitteiden kysyntä kasvaa jatkuvasti. Jossain vaiheessa laitteen akut on pakko vaihtaa, joko laitteen elinkaaren päässä tai jossain sillä välillä. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin eri vaihtoehtoja korkeajänniteakkujen uusiokäyttöä varten. Tämä opinnäytetyö toteutettiin Sandvik Mining and Construction Oy:lle. Tietoa hankittiin Sandvikin sisäisiä kanavia pitkin sekä internetin avulla.

Yleisesti akku mielletään sähköenergian varastointiin tarkoitetuksi välineeksi, mutta tässä työssä esitellään myös mekaaninen akku, lämpöakku ja magneettikenttään perustuva akku. Tarkemmin työssä esitellään kemiallinen akku ja sen eri sovellutuksia ja akkukemioita. Työssä tuli myös ottaa huomioon Sandvikin omat hiilijalanjälkitavoitteet, joiden pohjalta esiteltiin teoriassa kiertotalous ja vastuullisuus, sekä ratkaisut pyrittiin miettimään nämä seikat silmällä pitäen. Akkujen uusiokäyttöön liittyy monia eri vaatimuksia, kuten kansalliset ja kansainväliset standardit ja direktiivit.

Työn lopputuloksena löydettiin muutamia erilaisia ratkaisuja. Osa ratkaisuista ei sovellu suoraan Sandvikille, joten työn lopussa tehtiin yhteenveto Sandvikille helpoimmista ratkaisuista. Työn lopputuloksena ei syntynyt vielä tässä vaiheessa mitään fyysistä, työtä kuitenkin jatketaan vielä Sandvikin sisällä. Työn teoriaosuus tulee myös mahdollisesti toimimaan Sandvikin sisäisenä koulutusmateriaalina.

---

Asiasanat: akku, uusiokäyttö, kierrätys, kiertotalous

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering  
Electrical Power Engineering

NIEMINEN, KIM:  
Secondary use of high voltage batteries at Sandvik

Bachelor's thesis 47 pages  
September 2023

---

High voltage batteries' secondary use poses a future challenge for Sandvik. The demand for electric mining equipment is constantly increasing. At some point, the batteries of the equipment will have to be replaced, either at the end of their lifecycle or somewhere in between. This thesis was commissioned by Sandvik Mining and Construction Oy. This thesis' main focus was to explore various high voltage battery secondary use options, utilizing information from both Sandvik's internal sources and the internet.

Traditionally, batteries are viewed as electric energy storages, but this study introduces mechanical, thermal, and magnet-field-based alternatives alongside chemical batteries and their applications. Sandvik's carbon footprint goals were also considered, with a focus on sustainability and circular economy principles. Battery recycling involves adherence to national and international standards and directives.

The study identified multiple solutions, although not all are directly applicable to Sandvik. A summary of the most viable options was provided. At this stage, no physical implementation was done, but work will continue within Sandvik. The theoretical portion may serve as internal training material.

---

Key words: battery, secondary use, recycling, circular economy

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO JA TUTKIMUKSEN TAVOITE .....	6
1.1	SANDVIK GROUP .....	6
1.2	Sandvik Mining and Rock Solutions .....	7
2	AKKUTYYPIT .....	10
2.1	Kemiallinen akku .....	13
2.1.1	Sulasuola-akku .....	15
2.1.2	LFP-kemia .....	16
2.1.3	LTO-kemia.....	16
2.1.4	NMC-kemia .....	17
2.1.5	NCA-kemia .....	17
2.1.6	Kemioiden keskinäinen vertailu .....	18
2.2	Akun käyttöikä ja kuluminen.....	19
2.3	Akkujen käsittely .....	22
3	MARKKINOIDEN NÄKÖKULMIA.....	24
3.1	Kiertotalous .....	24
3.2	Standardit.....	25
3.3	Uusiokäytön hyödyt.....	27
3.4	Akkujen omistajuus ja hallinnointi.....	27
4	RATKAISUT.....	29
4.1	Kaivosten varavoima ja tehotasapaino.....	29
4.1.1	Maanalainen kaivos.....	29
4.1.2	Maanpäällinen kaivos .....	31
4.2	Kaivoksen sähkön laadun parantaminen .....	32
4.3	Kaivoslaitteiden laturit .....	33
4.4	Sähköverkko .....	34
4.5	Junaliikenne .....	36
4.6	Viestintäverkko.....	37
4.7	Kierrätys.....	38
5	RATKAISUJEN VERTAILU JA YHTEENVETO .....	40
6	POHDINTA .....	42
	LÄHTEET.....	43

**LYHENTEET JA TERMIT**

AC	Vaihtovirta ( <i>Alternating Current</i> )
BMS	Akun hallintajärjestelmä ( <i>Battery Management System</i> )
C-arvo	Akun lataus- ja purkutehon määrittävä kerroin
CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
DC	Tasavirta ( <i>Direct Current</i> )
FeS <sub>2</sub>	Rautadisulfidi
LFP	Litiumrautaafosfaatti
Li-Al	Litium-alumiini
LTO	Litiumtitanaatti
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiini
NMC	Litium-nikkeli-mangaani-koboltti
P&S	Sandvikin Parts & Services -divisioona
SMC	Sandvik Mining and Construction
SMR	Sandvik Mining and Rock Solutions
SoC	Akun lataustaso ( <i>State of Charge</i> )
SoH	Akun kuntoisuus ( <i>State of Health</i> )

## 1 JOHDANTO JA TUTKIMUKSEN TAVOITE

Yhdistyneet kansakunnat hyväksyi vuonna 2015 Agenda 2023:n, joka määrittelee yhteensä 17 kestävän kehityksen tavoitetta. Agenda 2023:n tavoitteena on edistää maapallon suojelua ja yhteiskunnan rauhaa sekä kaventaa eri ihmisryhmien välisiä eroja. Yhdeksi tavoitteeksi on määritelty ilmastonmuutoksen hidastaminen. (UNDP n.d.)

Agendassa 2023:n määriteltyjen tavoitteiden viitoittamana Sandvik on asettanut omia tavoitteitaan. Yksi tavoitteista on puolittaa konsernin oman tuotannon ja logistiikkaketjun hiilidioksidi eli CO<sub>2</sub> -päästöt vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi jokaisen tuotekehitysprojektin päämääränä on pudottaa tuotteiden CO<sub>2</sub> -päästöjä. Tällä tarkoitetaan esimerkiksi dieselkäyttöisen laitteen päästöjen vähentämistä. Nämä ilmastotavoitteet huomioiden myös kaivoslaitteiden mineraalien louhinta tulee toteuttaa tulevaisuudessa ympäristöystävällisesti. Sandvikilla onkin päädytty löytämään ratkaisuja tähän edistämällä laitteiden sähköistystä. (Sandvik n.d.a.)

Sandvikilla on jo valikoimassaan akkukäyttöisiä laitteita maanalaiseen poraus-, kuljetus- ja kuormaustoimintaan. Esimerkki kaupallisille markkinoille lanseerattua laitteesta on DD422iE peränporauslaite (Sandvik n.d.b). Lisäksi Sandvik on toteuttanut maanpäälliseen poraukseen konseptilaitteen, ja konsepti julkaistiin vuonna 2022 (Sandvik 2022).

Jokaisesta Sandvikin akkukäyttöisestä laitteesta puretaan elinkaarensa aikana käytetty korkeajänniteakku uusiokäyttöön ja kierrätykseen. Syitä akun purkamiselle ovat esimerkiksi sen ikääntyminen tai vaurioituminen. Tässä tutkimustyössä on tarkoitus selvittää eri vaihtoehtoja näiden käytettyjen akkujen uusiokäytölle.

### 1.1 SANDVIK GROUP

Sandvik Group on korkean teknologian teollisuuskonserni jonka juuret ulottuvat vuoteen 1862. Sandvik tarjoaa asiakkailleen innovatiivisia ratkaisuja toiminnan

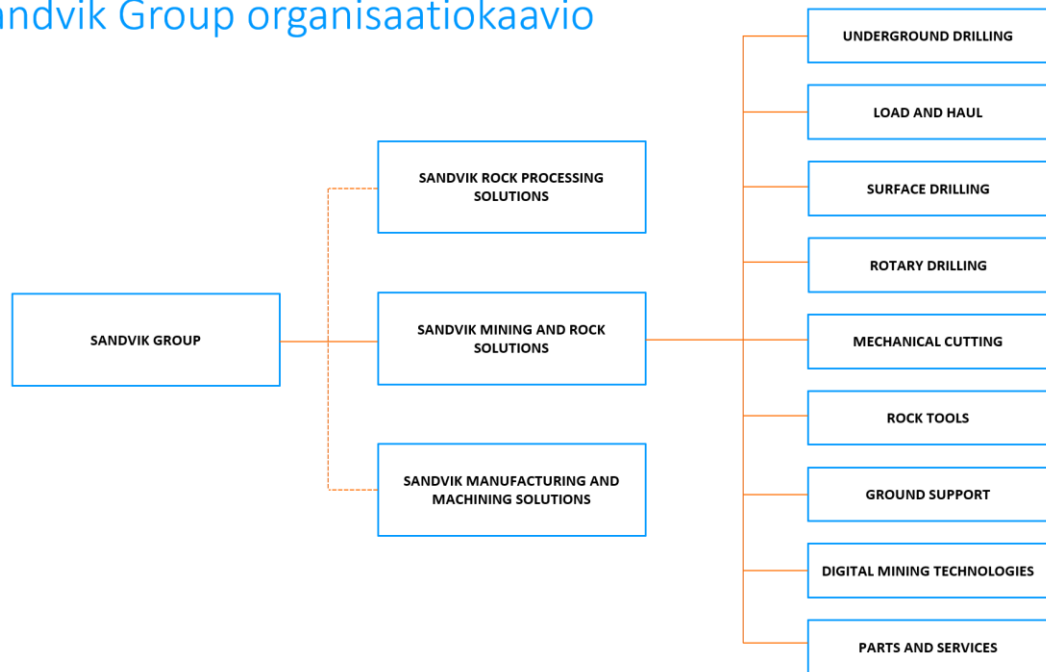
tuottavuuteen, kannattavuuteen ja vastuullisuuteen. Sandvikin tärkeimmät asiakkaat toimivat valmistus-, kaivos- ja infrastruktuuriteollisuudessa. (Sandvik n.d.c.) Sandvikin liiketoiminta jaetaan kolmeen eri liiketoiminta-alueeseen. Jokainen kolmesta liiketoiminta-alueesta vastaa itsenäisesti omien tuotteidensa kehityksestä, valmistuksesta ja myynnistä. Sandvik Mining and Rock Solutions toimittaa kaivos- ja urakointiteollisuuden laitteita ja näihin liittyviä teknisiä palveluita, kuten huoltoa ja varaosamyyntiä. Sandvik Rock Processing Solutions toimittaa kiven ja mineraalien murskaukseen tarkoitettuja laitteistoja ja teknisiä palveluita. Sandvik Manufacturing and Machining Solutions valmistaa työkaluja ja työkalujärjestelmiä lastuavaan teollisuuteen. (Sandvik n.d.d.)

Sandvik työllistää yli 40 000 ihmistä yhteensä yli 150 maassa, mukaan lukien Suomessa. Sandvikin liikevaihto on noin 112 miljardia Ruotsin kruunua eli noin 9,8 miljardia euroa kevään 2023 valuuttakursseilla. (Sandvik n.d.c)

## **1.2 Sandvik Mining and Rock Solutions**

Sandvik Mining and Rock Solutions (SMR) on maailman johtava kaivos- ja urakointiteollisuuden laitteiden ja palveluiden toimittaja. SMR:n liiketoiminta-alue jaetaan useaan eri divisioonaan, jotka vastaavat omien tuotteidensa myynnistä, markkinoinnista, valmistuksesta ja tuotekehityksestä. SMR liiketoiminta-alueen divisioonat on havainnollistettu kuvassa 1.

## Sandvik Group organisaatiokaavio



KUVA 1. Sandvik Groupin ja SMR:n organisaatiorakenne

SMR koostuu yhdeksästä eri divisioonasta. Underground Drilling on vastuussa maanalaisista poralaitteista. Load & Haul on vastuussa maanalaisista kuljetus- ja kuormauslaitteista. Surface Drilling on vastuussa pintaporalaitteista sekä Surface Drilling -divisioonaan kuuluu Sandvikin porakonevalmistus. Porakoneita valmistetaan kaikkien divisioonien tarpeisiin. Rotary Drilling on vastuussa suurikokoisten reikien pintaporalaitteista. Mechanical Cutting on vastuussa mekaanisen louhinnan tuotteista. Rock Tools on vastuussa porakalustojen kehityksestä ja valmistuksesta. Ground Support on vastuussa kalliontuentaan liittyvistä tuotteista. Digital Mining Technologies on vastuussa liiketoiminta-alueen automaatiopalveluista ja niiden kehittämisestä sekä uusien teknologioiden kehittämisestä. Parts & Services (SMC P&S) on vastuussa liiketoiminta-alueen muiden divisioonien tuotteiden varaosa- ja tukipalveluista.

Sandvik toimii Suomessa kahtena eri yhtiönä: Sandvik Mining and Construction (SMC) ja Sandvik Mining and Construction Finland (SMC Finland). SMC vastaa kaivos- ja urakointiteollisuuden laitteiden tuotannosta ja tuotekehityksestä. SMC Finlandille puolestaan kuuluu Suomen myynti-, varaosa- ja huoltotoiminnot. Yhteensä nämä yhtiöt työllistävät noin 2100 ihmistä seitsemällä eri paikkakunnalla.

Opinnäytetyö toteutettiin SMC:n P&S -divisioonalle, joka toimii ympäri maailmaa tukien muita divisioonia. Divisioonalla on toimintaa myös Tampereen Myllypurossa, missä sijaitseekin Sandvikin Suomen suurin toimipiste. Tampereella sijaitsee maailmanlaajuisestikin ainutlaatuinen Sandvikin oma testikaivos, missä laitteita ja tulevaisuuden teknologioita testataan ja kehitetään aidossa toimintaympäristössä. Kuvassa 2 on esitetty ilmakuva Sandvikin Tampereen tehtaasta.



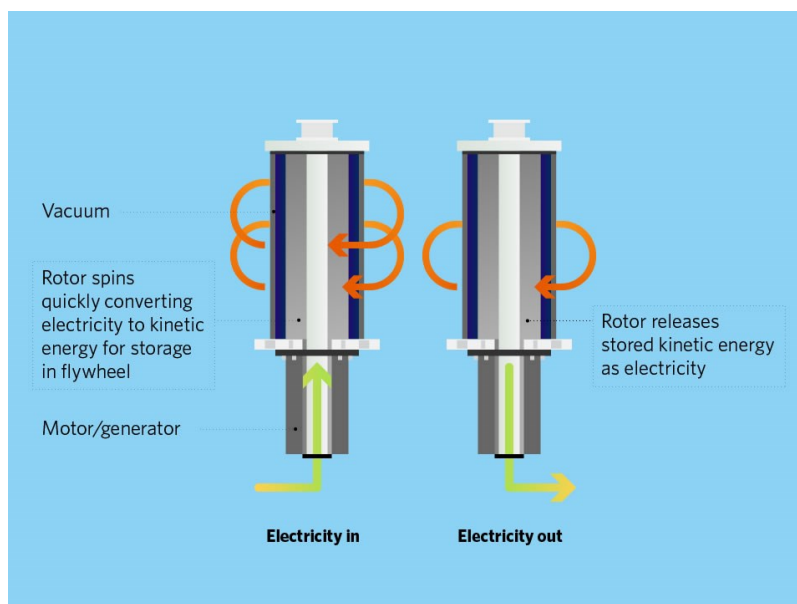
KUVA 2. Sandvikin Tampereen tehdas (Sandvik 2023)

Sandvikin Tampereen Myllypuron tehdas työllistää noin 1800 ihmistä. Tehdasalueella toimii useita eri divisioonia sekä aiemmin mainittu testikaivos. Alueella suunnitellaan, testataan ja valmistetaan esimerkiksi maanpäällisiä ja -alaisia porauslaitteita, hydraulisia kallioporakoneita ja uusia teknologioita.

## 2 AKKUTYYPIT

Yleisesti akku on energian varastointiin tarkoitettu väline. Akuissa energia voidaan varastoida esimerkiksi kemiallisesti, mekaanisesti, magneettikenttään tai lämmön avulla (Drazqa 2012, 13–15). Akkujen energiatiheys ilmaistaan yleensä kapasiteettina suhteessa painoon ( $Wh/kg$ ) tai kapasiteettina suhteessa tilavuuteen ( $Wh/l$ ) (Battery University 2021a).

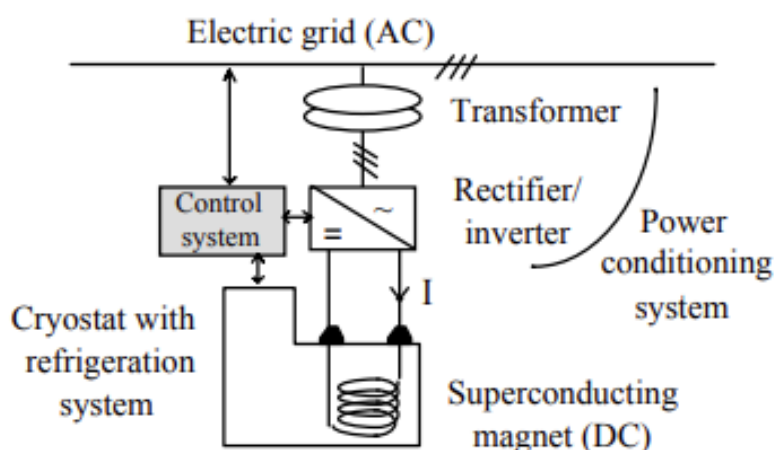
Esimerkki mekaanisesta akusta on vauhtipyörä. Vauhtipyörässä energia varastoidaan vauhtipyörän pyörimisliikkeeseen ja inertiaan kineettisen energian avulla. Vauhtipyörä kiihdytetään kovaan pyörimisnopeuteen esimerkiksi sähköverkon ylimääräisellä energialla ja moottorilla. Vauhtipyörällä saadaan tuotettua energiaa muuttamalla kineettinen energia takaisin sähköksi generaattorin avulla. Vauhtipyörien etuja ovat luotettavuus, kestävyys ja vähäinen huollon tarve. (Drazqa 2012, 74.) Kuvassa 3 on esitetty vauhtipyörään perustuvan akun toimintaperiaate.



KUVA 3. Vauhtipyörään perustuvan energian varastoinnin perusperiaate (IESO 2017)

Energiaa varastoidaan vauhtipyörään kineettisen energian muodossa ja energia vapautetaan muuttamalla kineettinen energia sähköksi. Energian muuttaminen toteutetaan moottorilla, joka toimii myös generaattorina.

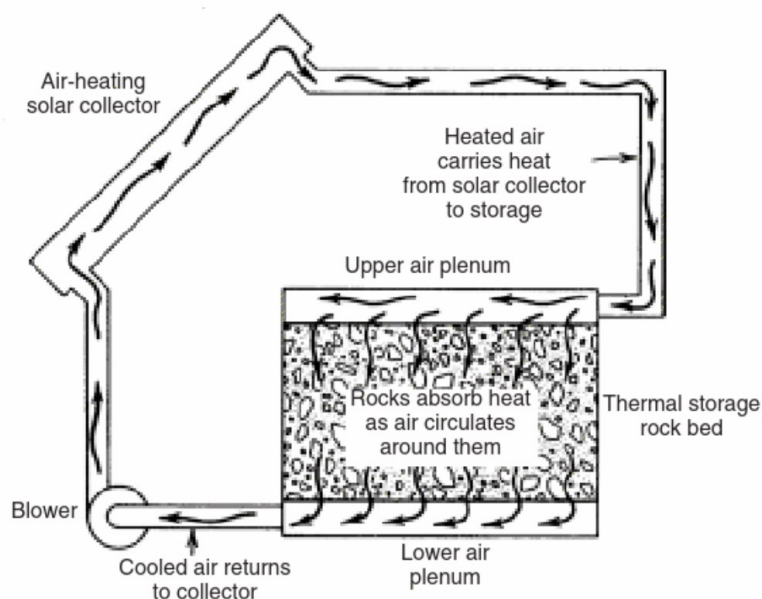
Energiaa voidaan varastoida myös magneettikenttään. Magneettikenttään varastointi perustuu aineen suprajohtavuuteen alhaisessa lämpötilassa. Hyvin kylmään käämiin ajetaan tasavirtaa, joka muodostaa magneettikentän johon energia varastoituu. Suprajohtavuuden takia järjestelmässä ei synny resistiivisiä häviöitä käytännössä lainkaan, jolloin järjestelmän hyötysuhde on hyvä. Käämien jäädyttämisen takia järjestelmät ovat kuitenkin kalliita operoida ja valmistaa. (Nikolakakis & Fthenakis 2012, 205.) Kuvassa 4 on esitetty suprajohteeseen perustuvan energian varastointimenetelmän perusperiaate.



KUVA 4. Suprajohteeseen perustuvan energian varastoinnin perusperiaate (Tixador 2008, 2)

Tehon suunnan ollessa sähköverkosta käämille, johdetaan sähkö muuntajan kautta tasasuuntaajalle, joka muuttaa vaihtosähkön käämille sopivaksi tasasähköksi. Tehon suunnan ollessa käämistä sähköverkkoon, johdetaan tasasähkö vaihtosuuntaajan kautta muuntajalle. Järjestelmä sisältää lisäksi ohjausjärjestelmän, jolla hallitaan akun toimintaa ja tehon suuntaa.

Energiaa voidaan varastoida myös lämmön muodossa. Lämmön muodossa varastointi perustuu yleensä jonkin väliaineen lämmittämiseen esimerkiksi sähkö- tai aurinkoenergialla ja vastaavasti tämän lämmön luovuttamiseen väliaineesta tarpeen vaatiessa. Lämpöenergiaan varastointia voidaan käyttää esimerkiksi aurinkoenergian ylituotannon varastointiin pimeään ajaksi. (Dincer & Rosen 2010, 76–109.) Kuvassa 5 on esitetty energian varastointia lämmön muodossa kivien joukkoon.



KUVA 5. Energian varastointi lämmön muodossa (Dincer & Rosen 2010)

Auringon tuottamalla energialla sidotaan energiaa kivien joukkoon ja lämmin kiviaines toimii akkana. Vastaavaa toimintaperiaatetta voidaan soveltaa myös tapaan, jossa aurinkoenergian sijasta kiviä lämmitetään sähköenergialla. Vastaavaa toimintaperiaatetta käytetään myös suomalaisen Polar Night Energyn teknologiassa, missä hiekka lämmitetään useiden satojen asteiden lämpötilaan (Polar Night Energy 2022).

Eri energian varastointitekniikoiden energiatiheksiä on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1. Eri energian varastointimenetelmien energiatihyysien vertailu (Tixador 2008; IRENA 2013; Battery University 2021b; Karrari 2023)

Energian varastointimenetelmä	Energiatiheys ( $Wh/kg$ )
Kemiallinen	30...250
Vauhtipyörä	5...100
Magneettikenttä	1...10
Lämpö	0,01...0,25

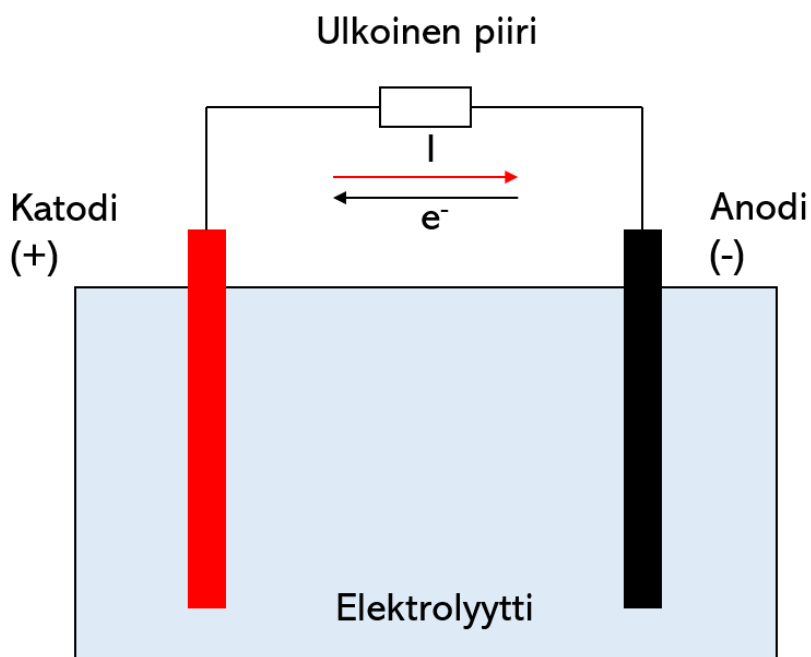
Taulukosta voidaan todeta, että energiaa varastoidessa kemiallisessa muodossa energiatiheys on suurin ja täten varastointi kemiallisessa muodossa on yleensä

teknistaloudellisesti järkevintä. Lämpöenergian varastoinnissa energiatiheys esitetään yleensä energiatiheden ja tonnin suhteena,  $kWh/t$ , mutta yksikkö on muutettu taulukon yksinkertaistamiseksi muotoon  $Wh/kg$ .

Kemialliset akut perustuvat nimensä mukaisesti energian varastointiin kemiallisessa muodossa. Tässä tutkimuksessa keskitytään kemiallisiin akkuihin, joista kerrotaan tarkemmin luvussa 2.1.

## 2.1 Kemiallinen akku

Kemiallisessa akussa energia varastoidaan sähkökemialliseen muotoon. Akku koostuu kennosta, joka muodostuu kahdesta elektrodista erotettuna väliaineella, elektrolyytillä. Sähkö on elektronien liikettä negatiivisesta potentiaalista kohti positiivista. Jotta tätä elektronien liikettä voi tapahtua, tarvitaan elektrodeja. Elektrodit jaetaan kahteen eri tyyppiin, anodiin ja katodiin. Anodi on varaukseltaan negatiivinen ja katodi positiivinen. Anodissa tapahtuu yhdessä elektrolyytin kanssa kemiallinen reaktio, joka synnyttää elektroneja. Vastaavasti katodissa tapahtuu yhdessä elektrolyytin kanssa kemiallinen reaktio, joka mahdollistaa elektronien siirtymisen anodilta katodille. (Australian Academy of Science 2016.) Eli kemiallisessa akussa energia varastoidaan kahden sähköparin varauseron avulla. Kuvassa 6 on esitetty yksinkertaistettu malli akun peruserästä ja toiminnasta ulkoisen piirin kanssa.



KUVA 6. Akun peruseriaate

Sähkötekniikassa elektronien liikesuunta on siis negatiivisesta potentiaalista kohti positiivista potentiaalia, mutta historiallisista syistä sähkötekniikassa virran suunta on määritelty positiivisesta potentiaalista negatiiviseen. Sama peruseriaate pätee kytkettäessä akkuun ulkoinen kuorma: elektronien liike on anodilta katodille ja virran katodilta anodille.

Akuissa on käytössä eri kemioita. Kemiolla tarkoitetaan sitä, mistä materiaalista akun elektrodit on valmistettu ja mitä ainetta käytetään elektrolyytinä. Tällä hetkellä yleisin sähköajoneuvokäytössä oleva akkutyyppe on litiumioniakku (EV Energi n.d.). Litiumioniakussa litiumionia liikutetaan anodin ja katodin välillä akun purkautuessa ja latautuessa. Yleensä litiumioniakun elektrolyytinä käytetään etyleenikarbonaattia. Katodimateriaalia vaihdellaan ja tästä syntyy nimitykset eri kemioille. Anodi on materiaaliltaan yleensä aina grafiittia.

On olemassa myös lyijyakkuja, mutta niitä ei käytetä sähköajoneuvoissa johtuen niiden huonosta energiatihyydestä ja kylmäkestävyydestä. Suuremman kapasiteetin lyijyakkuja on kuitenkin kehitteillä. Tutkijat lupaavat, että näiden tulevaisuuden lyijyakkujen turvallisuus ja luotettavuus ovat paremmalla tasolla kuin aiem-

min. (U.S. Department of Energy n.d.) Myös sähköajoneuvot, kuten muutkin ajoneuvot, tarvitsevat toisen akun 12 tai 24 voltin apujärjestelmille, ja nämä akut ovat yleensä lyijyakkuja.

Nikkeliakkuja käytetään monesti tietokoneissa ja lääketieteellisyydessä, mutta nikkeliakun huono puoli on sen kallis hinta, korkea sisäinen purkautuminen ja lämmön tuotto. Nikkeliakkuja on kuitenkin käytössä joissain sähköajoneuvoissa niiden turvallisuuden ja pitkän käyttöiän ansiosta. (U.S. Department of Energy n.d.) Seuraavissa alaluvuissa esitellään markkinoiden yleisimpiä akkukemioita ja niiden ominaisuuksia.

### **2.1.1 Sulasuola-akku**

Sulasuola-akku on akkutyyppejä, jossa käytetään elektrolyytinä sulaa suolaa. Anodi on valmistettu tyypillisesti Li-Al seoksesta ja katodi  $\text{FeS}_2$  seoksesta. Sulasuola-akku on alun perin kehitetty sähköajoneuvojen ja muiden sähköisten koneiden akuiksi. Akusta saadaan korkeita tehoja ulos ja sen energiatiheys on kohtuullisen hyvä. Lisäksi akku on helppo varastoida pitkäaikaisesti sen stabiilisuuden takia. Akusta saadaan korkeita tehoja ulos johtuen sulan suolan korkeasta sähköjohtavuudesta. (Fujiwara, Inaba & Tasaka 2011.)

Huonona puolena sulasuola-akussa on sen vaatima korkea käyttölämpötila. Akku tulee operoinnin aikana lämmittää  $+400 \dots +600 \text{ °C}$ :n lämpötilaan, jotta elektrolyytinä toimiva suola saadaan sulamaan. Korkean lämpötilan haittapuolia ovat esimerkiksi syövyttävyyden ja mahdollinen elektrolyytin vuotaminen ulkoilmaan. Tehoa, joka vaaditaan suolan sulattamiseen akun käyttöä varten, voitaisiin käyttää johonkin tuottavampaan, kuten kaivoslaitteen operointiin. Tämän takia sulasuola-akkuja ollaan korvaamassa litiumionilla.

Nottinghamin yliopisto on kehittänyt yhteistyössä kiinalaisten tutkimuslaitosten kanssa uuden sukupolven sulasuola-akkuja, jolla voitaisiin korvata litiumioniakkuja sähköajoneuvoissa. Tämä akku olisi täysin kierrätettävissä, ympäristöystävällinen, halvempi ja turvallisempi kuin nykyiset sähköajoneuvojen akut. Lisäksi akun energiatiheys olisi suurempi kuin nykyisissä sähköajoneuvojen akuissa.

Akussa suola on kiinteässä olomuodossa, mutta kuitenkin pehmeämpää kuin huoneenlämpöinen suola. (Lowry 2021.)

### 2.1.2 LFP-kemia

Litiumrautafosfaatti eli LFP tai  $\text{LiFePO}_4$  on litiumionikemia, jossa katodi on valmistettu litiumrautafosfaatista. Anodi on yleensä valmistettu grafiitista kuten muissakin litiumioniakuissa. LFP-kemiaa pidetään yleisesti parhaimpana vaihtoehtona sähköautojen ja muiden sovellusten akkuihin sen hyvän energiatiheuden, kestävyuden ja turvallisuuden takia. Akku kestää tuhansia lataus- ja purkusyklejä. Akku on turvallisempi, koska akusta ei pääse höyrystymään vaarallisia kaasuja kuten perinteisestä lyijyakusta. Lisäksi LFP-kemia ei ole herkkä ylikuumenemaan. (Ecoflow 2023.) LFP-kemia sopii mainiosti sähköajoneuvoihin ja muihin teollisuuden koneisiin ja laitteisiin.

LFP-kemian huonoja puolia ovat korkeampi hankintahinta. Kemia kestää kuitenkin tuhansia syklejä, joten korkea hankintahinta maksaa itsensä takaisin. LFP-kemia toimii myös heikommin äärimmäisissä lämpötiloissa. Kemian normaali operointilämpötila on  $-20 \dots 60$  °C. Lisäksi yhden kennon jännite on alhaisempi kuin muilla kemioilla, joten saman jännitteen aikaansaamiseksi tarvitaan useampia kennoja, joka johtaa akuston suurempaan fyysiseen kokoon halutun jännitetasen saavuttamiseksi. (Ecoflow 2023.)

### 2.1.3 LTO-kemia

Litiumtitanaatti eli LTO on litiumionikemia, jossa puolestaan anodi on valmistettu litiumtitanaatista. LTO-kemia kestää LFP:n tavoin tuhansia lataus- ja purkusyklejä. Akku on myös kaikista yleisimmistä kemioista nopein ladata ja purkaa. Suuritehoisen laturin avulla voidaan saavuttaa jopa 90 %:n lataustaso muutamissa minuuteissa. LTO-kemia sopii nopean latauksen ja purun ansiosta hyvin esimerkiksi sähkötyökaluihin, sähköajoneuvoihin ja mahdollisesti myös sähköjako- verkkoon ja älykkäisiin sähköverkkoihin. (Battery University 2021c.) Akku sopisi nopean lataus- ja purkutehon vuoksi hyvin myös esimerkiksi reservimarkkinoille,

kun akusta saadaan nopeasti tehoa. Tulevaisuudessa tuuli- ja aurinkovoimaloiden lisääminen vähentää sähköverkossa olevaa inertian määrää. Sähköverkkoon tarvitaan nopeasti reagoivia reservimarkkinoita.

LTO:n huonoin puoli on sen huono energiatiheys, joka on vain noin 50–80 Wh/kg (Battery University 2021c). Huonon energiatheyden takia akkujen fyysinen koko on paljon suurempi kuin muilla vastaavan kapasiteetin litiumionikemioilla.

#### **2.1.4 NMC-kemia**

Litium-nikkeli-mangaani-koboltti eli NMC on litiumionikemia, jossa katodi on valmistettu nikkeli-mangaani-kobolttiseoksesta. Nikkelin energiatiheys on hyvä, mutta se on epästabiili, joten yhdistämällä mangaania ja kobolttia on kemia saatu stabiiliksi. Seossuhteita muuttamalla kemiaa saadaan muutettua helposti eri applikaatioihin sopivaksi. Nikkeli, mangaani ja koboltti sekoittuvat hyvin toisiinsa, joten suhteen muokkaaminen on helppoa. NMC on tällä hetkellä suosituin kemia sähköajoneuvojen akuksi. (Battery University 2021c.) NMC on myös suhteellisen edullinen kemia, vaikka se sisältää kallista kobolttia. Edullinen hinta johtuu kemian negatiivisista puolista. (Bhowmick 2023.)

NMC-kemia kykenee vain noin 1000–2000 syklin käyttöön, joten sen elinikä on oletettavasti lyhyempi kuin LTO:lla tai LFP:lla, riippuen tietenkin applikaatiosta mihin akku asennetaan. NMC:tä ei myöskään voida ladata aivan yhtä tehokkaasti kuin LFP:tä tai LTO:ta. Lataus yli 1 C:llä alkaa vaurioittamaan akkua. (Battery University 2021.) C-arvon määritelmä kerrotaan tarkemmin luvussa 2.2.

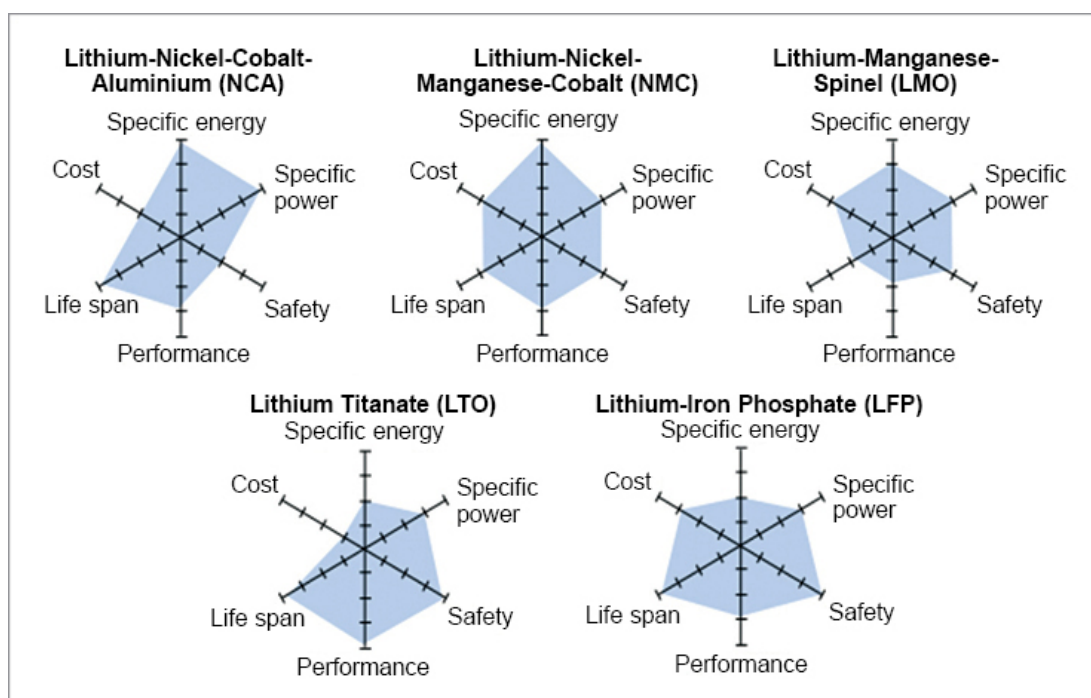
#### **2.1.5 NCA-kemia**

Litium-nikkeli-koboltti-alumiini eli NCA on litiumionikemia, jossa katodi on valmistettu nikkeli-koboltti-alumiiniseoksesta. Kemia muistuttaa suuresti ominaisuuksiltaan NMC:tä. NCA on kuitenkin ylivoimainen energiatheydessään verrattuna muihin litiumionikemioihin. NCA on myös syklien suhteen kestävyydeltään hyvä kemia. (Battery University 2021c.) Koboltin ja nikkelin kalliista hinnasta ja harvinaisuudesta johtuen NCA on kallis kemia muihin esiteltyihin verrattuna (Man

2023). Kobolttin hinta on kuitenkin laskenut huippulukemista johtuen kysynnän vähenemisestä (Economist 2023).

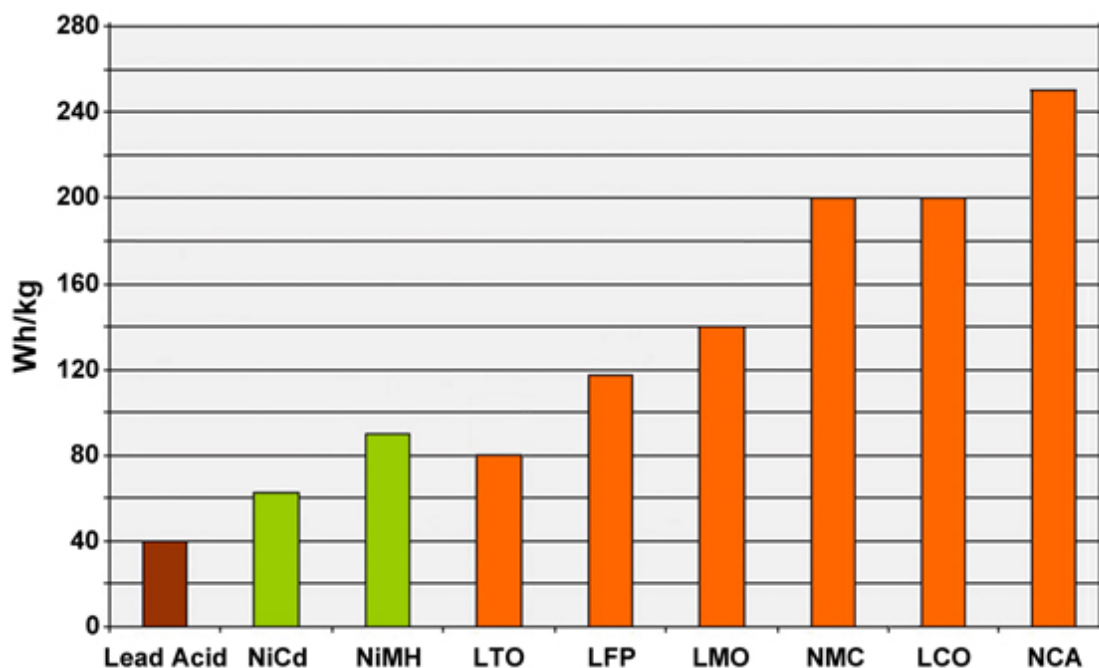
### 2.1.6 Kemioiden keskinäinen vertailu

Aiemmin esiteltiin eri akkukemioista LFP, LTO, NMC ja NCA ja näiden keskinäistä vertailua alla olevassa kuvassa. Sulasuola-akku jätettiin pois vertailusta, koska tällä erää akku on poistumassa Sandvikin käytöstä. Kuvassa 7 on esitetty eri kemioiden ominaisuuksien vertailua.



KUVA 7. Eri kemioiden ominaisuuksien vertailu (Bhowmick 2023)

Kuvasta voidaan todeta, että LTO ja LFP ovat todella kestäviä akkuja ja niiden turvallisuus on korkealla tasolla. NCA ja NMC kemioissa taas tingitään turvallisuudesta, mutta niiden energiatiheys on suurempi kuin aiemmin mainituilla LTO:lla ja LFP:lla. Eri kemioiden energiatihyksiä on esitetty muodossa *Wh/kg* kuviossa 1.



KUVIO 1. Eri kemioiden energiatiheyksiä (Battery University 2021c)

NCA on kaikista esitellyistä kemioista energiatihein. NCA:n energiatiheys on yli kolme kertaa korkeampi kuin LTO:lla. Jokaisessa eri kemiassa on kuitenkin omat hyvät ja huonot puolensa, eikä akkua kannata valita vain energiatiheyden perusteella. Akku tulisi aina valita teknistaloudellisesti parhaalla mahdollisella tavalla.

## 2.2 Akun käyttöikä ja kuluminen

Akun varaustasosta ja eliniästä puhuttaessa käytetään yleensä seuraavia käsitteitä: State of Charge (SoC) ja State of Health (SoH). Näillä kahdella käsitteellä saadaan hyvin paljon tietoa akun sen hetkisestä tilasta, eliniästä, varaustasosta ja kunnosta. Seuraavissa kappaleissa on käsitelty nämä käsitteet ja miten ne vaikuttavat akun käyttöikään.

SoC on yksinkertaisuudessaan akun varaustaso, joka ilmaistaan yleensä prosentteina välillä 0...100 %. Prosenttiosuus kertoo, kuinka paljon varausta on jäljellä suhteessa akun täyteen varaustasoon. SoC on käyttäjälle yksinkertainen tapa seurata jonkin laitteen jäljellä olevaa varaustasoa ja sitä, milloin akku tulee ladata tai vaihtaa. Esimerkiksi matkapuhelimen käyttöjärjestelmä tai sähköauton vikadiagnostiikka on SoC:tä käytännössä. Battery Universityn (2021d) mukaan akun SoC:n määrittämiseen on neljä yleistä menetelmää. Tässä opinnäytetyössä

niistä esitellään kuitenkin vain kolme, koska yksi tapa liittyy nestetäyttöisiin lyijyakkuihin. Esiteltäviin menetelmiin kuuluvat jännitteen mittaamiseen perustuva menetelmä, Coulombin menetelmä ja impedanssin mittaamiseen perustuva menetelmä.

SoC:n mittaaminen akun jännitteen avulla on helppoa ja yksinkertaista, mutta epäluotettavaa, koska jännitteeseen vaikuttaa akkukemia ja akun lämpötila. Suurin virhe mittauksessa tulee latauksen tai purkamisen aikana, kun akun jännite muuttuu. Jotta saadaan luotettava mittaus, pitäisi akun olla tyhjäkäynnissä noin neljä tuntia ennen mittausta. Tämä tapa on hankala, koska käytön aikana SoC:n määrittäminen on epätarkkaa johtuen akuston suuresta purkamisesta esimerkiksi kaivoslaitteessa. (Battery University 2021d.)

Coulombin menetelmä perustuu sisään ja ulosmenevien virtojen mittaamiseen. Monissa akuissa on oppiva järjestelmä, joka osaa vertailla eri latauskertoja ja tämän perusteella arvioida akun SoC:n. Coulombin tapa toimii erityisen hyvin litium-ion akuilla, joilla on korkea coulombinen tehokkuus. (Battery University 2021d.) Salosen (2021) mukaan coulombinen tehokkuus kuvaa akkumateriaalin tehokkuutta ja tarkemmin elektronien tehokkuutta siirtyä akussa. Coulombinen tehokkuus on korkea pienen itsepurkautumisen akuilla. Tätä tapaa käytetään puhelimissa, tietokoneissa, sähköautoissa ja lähes kaikissa muissa yleisissä laitteissa. Tämän menetelmän kehittäjät lupaavat yleensä korkeaa tarkkuutta, mutta tulokset osoittavat muuta: esimerkiksi puhelimen akun varaustaso voi näyttää 100 % sen ollessa oikeasti vain 90 %. (Battery University 2021d.)

Impedanssin mittaamiseen perustuvassa menetelmässä akun impedanssia mitataan monimutkaisella mallinnuksella. Akkua tarvitsee purkaa ja ladata monien syklien ajan samalla mitaten akun impedanssia. Akun ikääntyessä ja kuluessa impedanssi kasvaa, joka johtaa pienentyneeseen tehon tuottoon ja kapasiteettiin. SoC:n laskenta impedanssiin perustuvalla menetelmällä on hyvin tehokas ja tarkka tapa. (Battery University 2021d.) Zhangin ja Fanin (2020) mukaan yleisimmät sähköajoneuvoissa käytetyt menetelmät ovat kokeisiin perustuvia menetelmiä. Näihin menetelmiin kuuluvat esimerkiksi jännitteen ja impedanssin mittaamiseen perustuvat aiemmin mainitut menetelmät.

SoH kertoo akun kapasiteetin suhteessa alkuperäiseen, eli käytännössä sen paljonko akussa on kapasiteettia jäljellä. Esimerkiksi 100 Ah:n akun SoH:n ollessa 80 %, on kapasiteetti enää 80 Ah. SoH kertoo siis akun iästä ja kuluneisuudesta enemmän kuin SoC.

Akun käyttöikään vaikuttavia tekijöitä on monia ja käyttöikä on myös riippuvainen käytetystä akkukemiasta. Kuten aiemmin mainittiin, akun ikääntyessä sen sisäinen impedanssi kasvaa, kapasitanssi laskee ja akun SoH pienenee. Suurimpia yksittäisiä tekijöitä akun ikääntymiseen ovat lataus- ja purkusyklien määrä, kalenteri-ikä, korkea käyttölämpötila, suuret lataus- ja purkuvirrat, säilytys korkeassa varaustilassa, suuri käyttöikkuna (SoC esimerkiksi 0...100 %) sekä yli- tai alijännite ladattaessa ja purkaessa. Akkuvalmistajat testaavat akkuja ja kennoja niiden valmistusvaiheessa, josta saadaan hyvää tietoa sekä akun SoC:n muuttumisesta ajan ja syklien suhteen, että SoH:sta. Mikäli testausta ei kuitenkaan tehdä loppuun, vaan esimerkiksi vain 80 % SoH asti, on siitä eteenpäin kulumisen ennustaminen vaikeaa, vaikkakin siihen on hyviä reaaliaikaisia menetelmiä ja työkaluja.

C-arvo on oleellinen osa akkuteknologiaa ja akkuvalmistajat määrittelevät akuilleen C-arvot. Sillä kuvataan akun lataus- ja purkunopeutta suhteessa akun kapasiteettiin. Mikäli akun kapasiteetti on 60 Ah ja sen C-arvo lataukselle on 1, voidaan akku ladata 60 ampeerin virralla tunnissa. (Jouppi 2019.) Mikäli akkua käytetään tämän C-arvon ylittävillä virroilla, laskee tämä akun elinikää, koska akkua ei ole suunniteltu purettavaksi ja ladattavaksi ylivirroilla. Myös akun syväpurkaus heikentää akun käyttöikää. Esimerkiksi puhelimille suositellaan akun SoC:n pidettävän välillä 20...80 %. Monet puhelimet osaavat ladata itsensä älykkäästi, eli puhelin oppii käyttäjän rutiinit ja lataa akun täyteen esimerkiksi yön yli latauksessa vasta hieman ennen heräämistä. Sama voidaan kaivoslaitteissa toteuttaa akun hallintajärjestelmän Battery Management Systemsin BMS:n avulla.

SoH:n avulla voidaan määritellä jokin kapasiteetti, milloin akut tulisi purkaa laitteesta ja laittaa uusiokäyttöön. Tällä hetkellä ei kuitenkaan osata varmaksi sanoa mikä olisi sopiva SoH:n taso. Tämä riippuu hyvin pitkälle siitä, miten akkua on purettu ja ladattu, millaisissa olosuhteissa akkua on käytetty ja onko akun käyttöön liittyen noudatettu valmistajan ohjeita. Hyvä valistunut arvaus on kuitenkin

se, että akut olisi hyvä purkaa uusiokäyttöön SoH:n ollessa noin 70...80 %, jotta elinikää uusiokäytölle olisi vielä.

### 2.3 Akkujen käsittely

Akkujen käsittely riippuu hieman akkukemiasta, koska jotkin kemiat ovat epävaakaampia kuin toiset, kuten esitetystä kuvasta 7 voidaan todeta. Korkeajännitekuissa vaara piilee ihmiselle vaarallisessa korkeassa jännitteessä, joka akustojen sovellutuskohteissa on yleensä 200...600 V. Tämä korkea jännite voi luoda hengenvaarallisen virran, mikäli akkuun kosketaan niin, että jännite pääsee kosketuksiin ihmisen kanssa.

Akkujen käsittelyssä tulee ottaa huomioon esimerkiksi akun hellävarainen käsittely ja mahdolliset ulkoiset vauriot. Pienikin osuma kennoon voi aiheuttaa vaurion sisäisesti ja johtaa suureenkin tuhoon. Akkuja tulee säilyttää ja kuljettaa ilmastoidussa ja paloturvallisessa tilassa. Rahdatessa ja säilyttäessä akkuja tulee olla hyvin laaditut suunnitelmat niin normaali- kuin onnettomuustilanteidenkin varalta. Esimerkiksi Sandvikin Tampereen tehtaalla on täysin oma konttinsa kaukana muusta toiminnasta vaurioituneiden litiumioniakkujen säilyttämiseen. (E-Mobility Engineering n.d.)

Sähköajoneuvojen akkupalojen taustaa ei ymmärretä aivan täysin, mutta palaessaan sähköajoneuvo muodostaa suuren uhan niin ihmiselle kuin ympäristölle. Palaessaan akku saattaa tuottaa haitallisia kaasuja. Myös palon nopea laajeneminen aiheuttaa turvallisuusuhan. Akkupaloa voi olla todella vaikea sammuttaa sen luonteesta riippuen. Mikäli akun palaessa akkua ei pystytä jäähdyttämään riittävällä teholla, syntyy mahdollinen lämpöryntääminen. Lämpöryntäämisessä akun tuottama lämpöenergia on suurempi kuin sammuttamisen jäähdytysteho. Mikäli palo etenee lämpöryntäämiseen asti saattaa se aiheuttaa jopa akun räjähtämisen, kun akun sisällä oleva paine nousee. (Held, Tuchschnid, Zennegg, Figi, Schreiner, Mellert, Welte, Kompatscher, Hermann & Nacheff 2022.)

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes ohjeistaa sivuillaan akkujen turvalliseen käyttämiseen. Ohjeistus on tehty lähinnä pienemmille litiumioniakuille, mutta sa-

mat peruseriaatteet pätevät myös isoihin akkuihin. Ohjeessa ohjeistetaan esimerkiksi varomaan tuoteväärennöksiä ja suosimaan tunnettuja ja luotettavia brändejä ja myyjiä. Lisäksi ohjeessa pyydetään noudattamaan akun käyttö- ja turvallisen lataamisen ohjeita. (Tukes n.d.) Nämä ohjeet ovat saatavilla aina myös akkuvalmistajalta. Ohjeet voivat vaihdella eri applikaatioissa ja eri akunhallintajärjestelmien kanssa.

Korkeajänniteakkujen kanssa tulee myös huomioida akkujen lataaminen kuljetuksen ja varastoinnin aikana. Akut tulisi pitää tietyssä varaustasossa, jotta akuille ei aiheuteta ylimääräistä kuormitusta ja mahdollisesti vikaantumista.

### 3 MARKKINOIDEN NÄKÖKULMIA

Markkinoiden näkökulmilla tarkoitetaan tämän opinnäytetyön yhteydessä asioita, jotka liittyvät akkujen ympäristövaikutuksiin. Tällaisia vaikutuksia ovat kiertotalous ja erilaiset standardit ja direktiivit, jotka ohjaavat ja rajoittavat akkujen kanssa toimivia yrityksiä ja yksityishenkilöitä.

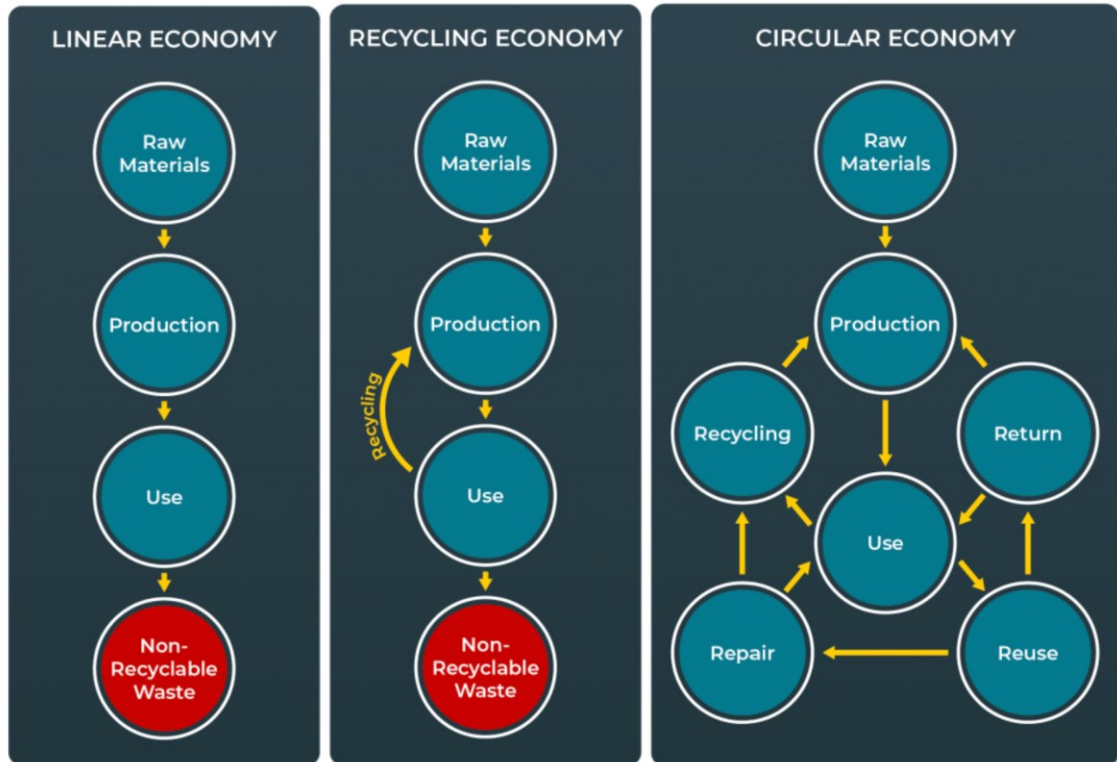
#### 3.1 Kiertotalous

Kiertotalous tarkoittaa sellaista toimintamallia, jossa tuotteiden elinkaari pyritään maksimoimaan. Elinkaaren pidentäminen pyritään toteuttamaan lainaamalla, vuokraamalla, uudelleen käyttämällä, korjaamalla, kunnostamalla ja kierrättämällä. Eli pyritään olemaan käyttämättä perinteistä lineaarista mallia, jossa tuotteet heitetään pois niiden käytön jälkeen. Jossain tuotteissa on käytössä myös niin sanottu ”suunniteltu vanheneminen”. Tässä tuotteen käyttöikä suunnitellaan tarkoituksella rajalliseksi, jolloin kuluttaja tai yritys joutuu väkisin ostamaan uuden tuotteen tilalle. Esimerkki tällaisesta tuotteesta on tulostin. Kiertotaloudella pyritään siis luomaan tuotteille mahdollisimman paljon lisäarvoa niiden normaalin käyttöönsä jälkeen. (Euroopan parlamentti 2023.)

Euroopan parlamentin (2023) mukaan maailman väestöluvun kasvu lisää raaka-aineiden menekkiä. Tiedetään, että raaka-aine resursseja on maailmassa rajallisesti, joten kiertotalouden lisääminen on ehdottoman tärkeää. Esimerkiksi osa akkumateriaaleista on harvinaisia, ja niiden määrä on entistä rajallisempi. Kiertotalouden avulla akusta saadaan täysi potentiaali irti. Kiertotalous ei lopu akun uusiokäyttöön, vaan sen tulee jatkua aina akun täydelliseen kierrätykseen asti. Kiertotalous edesauttaa myös CO<sub>2</sub> -päästöjen vähentämisessä. Kiertotalouden ansiosta käytetyillä akuilla voidaan tukea sähköverkon häiriötilanteita ja kotitalouksien omavaraisuutta. Nämä toimet auttavat esimerkiksi paljon päästöä tuottavien hiilivoimaloiden alas ajamisessa. Mineraaleja ja metalleja tarvitse välttämättä louhia aivan samoja määriä kuin ilman kiertotaloutta ja kierrättämistä.

Akkujen kohdalla kiertotalous on suuressa roolissa, koska akut sisältävät yleensä vaarallisia yhdisteitä ja metalleja. Näiden materiaalien heittäminen luontoon lisää

ympäristölle aiheutuvaa kuormitusta. Sen sijaan materiaalit tulisi kierrättää ja uusiokäyttää aina asianmukaisesti. Kuvassa 8 on esitetty aiemmin mainitut kierrättämisen ja kiertotalouden mallit.



KUVA 8. Mallit lineaariselle taloudelle, kierrättävälle taloudelle ja kiertotaloudelle (Ecoveritas n.d.)

Linearisessa mallissa tuote valmistetaan ja käytön jälkeen todetaan käyttökelvottomaksi ja laitetaan jätteeseen, jota ei kierrätetä. Kierrätysmallissa tuote kierrätetään käytön jälkeen takaisin valmistukseen, eli tuotteesta, kuten maitotölkistä, valmistetaan uusi tölkki. Tuote päättyy kuitenkin aina lopulta jätteeseen, jota ei kierrätetä. Kiertotalousmallissa pyritään pääsemään eroon kierrättämättömästä jätteestä korjaamalla, kierrättämällä, palauttamalla ja uusiokäyttämällä tuotetta. Näin tuote pysyy aina vähintään raaka-ainemuodossa tuotannossa ja tuottamassa arvoa uusille tuotteille.

### 3.2 Standardit

Jokaisella valtiolla on omat kansalliset standardinsa, ja tässä työssä käsittely rajataan Suomen ja EU:n tason tarkasteluun. Luvussa esitellään muutamia Suo-

men ja EU:n taseisia standardeja ja direktiivejä, jotka käsittelevät akkujen uusiokäyttöä. Standardit ja direktiivit luovat pohjan lähes kaikelle uusiokäyttöön liittyville asioille. Kaikissa maissa standardien vaatimukset eivät ole lähes niinkään hyvällä mallilla kuin esimerkiksi Suomessa ja Euroopan Unionissa, joten nämä standardien läpikäymiset ja ymmärtämiset vaativat organisaatiolta osaamista ja aikaa. Sandvikin kaivoslaitteita toimitetaan lähestulkoon jokaiseen maahan maailmassa, joten kohdemaiden sääntelyissä voi olla merkittäviäkin keskinäisiä eroavaisuuksia.

Suomessa käytössä on esimerkiksi SFS-EN IEC 62485-1:2018 *Akkujen ja akkuasennusturvallisuusvaatimukset*, jonka sisältö liittyy akkujen ja akkuasennusten perusvaatimukseen. Standardissa määritellään suojautumistoimenpiteet akkujen ominaisuuksien aiheuttamilta vaaroilta, kuten akun asentaminen, purkaminen, varaaminen, palavat kaasuseokset ja akkujen varastointi ja kuljetus (SFS-EN IEC 62485-1:2018 2018.) Lisäksi saman standardisarjan SFS-EN IEC 62485 eri osat määrittävät vielä muitakin vaatimuksia. Esimerkiksi sarjan osa 5 käsittelee Li-ion paikallisakkuja ja osa 2 paikallisakkuja kokonaisuutena.

EU:ssa on luotu 2000-luvun aikana akkudirektiivi 2006/66/EY, jossa määritellään akkujen uusiokäyttöön liittyviä asioita, kuten kiertotaloutta ja akkujen kierrätyksen aiheuttamia ympäristövaikutuksia. Tämä direktiivi tullaan kuitenkin korvaamaan uudella akkuasetuksella 2020/0353(COD) PE-CONS 2/23. Uudella asetuksella pyritään helpottamaan ja tekemään läpinäkyvämmäksi akkujen uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Asetuksessa mainitaan esimerkiksi, että uusiokäytettävän akun on oltava turvallisuudeltaan samalla tasolla kuin ensimmäisen käyttönsä aikana. Kiinteiden akkupohjaisten energiavarastojen loppukäyttäjän pitäisi pystyä milloin tahansa määrittämään akkujen toimintakunnon ja käyttönsä akunhallintajärjestelmän avulla. Näitä tietoja pitäisi pystyä päivittämään tietokantaan vähintään päivittäin. (Asetus 2020/0353(COD).)

Asetukset, direktiivit ja standardit luovat akkujen kanssa toimiville tahoille todella suuren määrän erilaisia vaatimuksia, joista muutamia on mainittu tässä kappaleessa. Esimerkiksi EU:n akkuasetuksessa säädetään jo todella monta asiaa liit-

tyen uusiokäyttöön, jotka uusiokäytössä tulee ottaa huomioon. Asetusten, direktiivien ja standardien ymmärtäminen on Sandvikin toimintojen kannalta elintärkeää.

### **3.3 Uusiokäytön hyödyt**

Suurin uusiokäytön eduista on ehdottomasti taloudellinen hyöty sekä hankkivalle että myyvälle taholle. Mikäli akut sijoitettaisiin esimerkiksi sähköverkon tueksi, akkuenergiavaraston omistajan/rakentajan ei tarvitsisi ostaa uusia akkuja, joten akkujen hankintahinta olisi alhaisempi kuin uusilla vastaavilla. Sekä akkuja uusiokäyttöön myyvä yhtiö saisi tästä pientä taloudellista hyötyä.

Etuna olisi myös ympäristöystävällisyys, kun akut uusiokäytettäisiin järkevästi eikä hävitettäisi. Kun akut kierrätetään lopullisesti ja niistä saatavat materiaalit saadaan uusiokäyttöön, vähentää tämä myös uusien materiaalien louhinnan tarvetta, joka puolestaan näkyy ilmastonmuutoksessa ja sen ehkäisyssä. Ympäristöystävällisyyteen liittyy myös yrityksen tavoitteet. Lähes jokaisella yrityksellä on nykyään jokin kiertotalous-, tai hiilidioksiditavoite ja näitä tavoitteita voidaan edistää uusiokäytettyjen akkujen avulla. Markkinoilla nämä nähdään hyvinä asioina ja täten voidaan saada etua kilpailijaan verrattuna. (Cirba Solutions n.d.)

Cirba Solutionsin (n.d.) mukaan akkujen uusiokäyttäminen lisää myös työpaikkoja akkujen kierrätykseen ja valmistavaan teollisuuteen.

### **3.4 Akkujen omistajuus ja hallinnointi**

Uusiokäytettyjen akkujen omistajuuteen ja hallinnointiin on muutamia erilaisia ratkaisuja. Ensimmäinen ja helpoin on myydä akut suoraan kumppaniyritykselle, joka vastaisi akkujen uusiokäytöstä. Suomessa sähköverkkoyhtiöt eivät saa omistaa tuotantolaitoksia, jollainen akkukin on. Sähköenergiavarastojen toimittajia löytyy Suomen markkinoilta useita, kuten Fortum, Enico ja Merus Power.

Toinen vaihtoehto on rakentaa itse järjestelmiä, joissa akut uusiokäytettäisiin, esimerkiksi kaivoksen akkuvarastoissa. Tämä kuitenkin vaatii organisaatiolta tiettyä

osaamista, jota ei välttämättä löydy ilman organisaatiomuutoksia, kuten asentajarekrytointia, suunnittelua ja mahdollisesti myyntiä sekä liiketoiminnan osaajia. Molemmissa vaihtoehdoissa on omat hyvät ja huonot puolensa. Hyvin pitkälle asian määrittelee se, millaisessa maassa akkuja uusiokäytetään. Kansalliset standardit voivat esimerkiksi määrittellä tietyjä rajoja sille kuka akkuja saa hallinnoida ja omistaa. Aiemmin mainittiin, että esimerkiksi Suomessa sähköverkkoyhtiöt eivät saa omistaa verkossa olevia sähköenergiavarastoja.

Ehdottomasti helpoin ratkaisu olisi myydä akut kumppanitoimijalle, joka vastaisi niiden uusiokäytöstä. Valitun toimijan tulisi kuitenkin olla luotettava, jotta akut varmasti menevät uusiokäyttöön eivätkä esimerkiksi suoraan kierrätykseen. Nämä ovat kuitenkin asioita, jotka voidaan varmistaa sopimuksien ja auditointien avulla.

Kiertotalous ja vastuullisuus huomioon ottaen akut tulisi kierrättää ja uusiokäyttää siinä maassa, missä ne puretaan laitteesta. Mikäli akkuja kuljetetaan ympäri maapalloa johonkin tiettyyn paikkaan, voivat näistä kuljetuksista syntyvät kulut ja päästöt kumota akkujen uusiokäytön tuomat hyödyt.

Akkujen uusiokäytön seuranta voi olla todella hankalaa, mikäli akut myytäisiin jollekin ulkopuoliselle toimijalle. Toimija voi aina vakuutella tekevänsä mitä tahansa toimenpiteitä, vaikka mitään standardeja ja direktiivejä ei esimerkiksi noudatettaisi. Tämä on tietenkin kyseisen toimijan oma huoli, mutta toisaalta myös Sandvikin. Sandvikin oma tavoite on puolittaa toimitusketjun hiilidioksidipäästöt. Se, että luetaanko siihen mukaan nämä uusiokäytettävät akut, ei ole vielä tiedossa.

## 4 RATKAISUT

Akkujen uusiokäyttöön on monia erilaisia ratkaisuja. Tässä luvussa perehdytään teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta muutamaan yleisimpään ja yksinkertaisimpaan vaihtoehtoon. Moni ratkaisu on teknistaloudellinen kompromissi, koska akuista halutaan saada mahdollisimman paljon hyötyä irti ennen niiden täydellistä kierrätystä ja uudelleenrakentamista. Lisäksi halutaan minimoida kustannukset, joten uusiokäytöstä tulee väkisinkin joitakin kompromisseja.

### 4.1 Kaivosten varavoima ja tehotasapaino

Aiemmin mainittiin, että akkujen uusiokäyttöön on monia eri mahdollisuuksia. Näistä mahdollisista ratkaisuista mitä tässä työssä käsitellään, kaivosten varavoimaan ja tehotasapainoon liittyvät ratkaisut olisivat parhaimpia Sandvikin kannalta. Sandvik toimii jo kaivoksissa tarjoten huolto- ja varaosapalveluita, joten näihin mainittuihin ratkaisuihin siirtymisessä olisi pieni kynnyks.

Mikäli akkuja uusiokäytettäisiin kaivoksissa, voisi Sandvik mahdollisesti myydä ja valmistaa itse akkupaketteja. Täten ketjusta jäisi ulos mahdolliset kumppaniyrietykset, joille akkuja myytäisiin. Kumppanissa on aina omat riskinsä, ja omalla valmistuksella kaikki akkupakettiin liittyvät tekniset ja taloudelliset asiat pysyisivät salaisina ja Sandvikin sisäisinä asioina. Akkupakettien valmistaminen itse toisi Sandvikille todennäköisesti myös suuremman taloudellisen hyödyn.

#### 4.1.1 Maanalainen kaivos

Maanalaisten kaivosten sähköverkko koostuu yleensä pääsyötöstä, päämuuntajasta, jakeluverkosta ja jakelumuuntajista (Morley 1990). Jakelumuuntajilta syötetään kaivoksen sähkökäytöt, kuten kaivoslaitteiden lataus, valaistus, tietoliikenneverkko ja ilmanvaihto. Näistä kaksi, valaistus ja tietoliikenneverkot, ovat niin normaali- kuin hätätilanteessakin elintärkeitä maanalaisen kaivoksen toiminnan kannalta.

Kaivoksen jakeluverkossa sähköä siirretään muutamien kilovolttien jännitetasoilla (Lloyd 1990). Jakelumuuntajien määrä riippuu kaivoksen koosta. Kaivoksen verkko voidaan toteuttaa samaan tapaan kuin normaali sähkönjakeluverkko, säteittäisverkkona, rengasverkkona tai silmukkaverkkona. Näissä jokaisessa on omat hyvät ja huonot puolensa, joihin tässä opinnäytetyössä ei keskitytä.

Kaivoksen verkosta tekee yksinkertaisen kuitenkin se, että pääosin kaivoksen sähköverkko liittyy vain yhtä reittiä pitkin valtakunnalliseen jakeluverkkoon. Verkkoihin voidaan myös liittyä varasyöttöä pitkin, kuten Suomessa Pyhäsalmen kaivoksella on tehty. (Manninen 2019).

Varasyöttöä käytetään siinä tilanteessa, kun pääsyötössä tapahtuu jokin ongelma, jonka vuoksi tätä kautta sähköä ei voida siirtää kaivokseen. Tämä ei kuitenkaan ole hätätilanne, koska kaivos saa sähkön vielä varasyötön kautta. Täydellisessä sähkökatkoksessa kaivoksen sähkö on jollain tapaa pyrittävä turvaamaan kriittisille kohteille, kuten valaistukselle ja tietoliikenneverkolle. Valaistus tarvitaan ihmisten evakuoinnin varmistamiseen. Tietoliikenneverkolla varmistetaan esimerkiksi matkapuhelimen kuuluvuus, jonka avulla voidaan viestiä kaivoksen työntekijöille ohjeita hätätilanteen aikana. Ilmanvaihto vaatii yleensä todella paljon tehoa, joten tämän liittäminen akkuvarastoon pitäisi tarkastella jokaisen kohteen kohdalla erikseen.

Akkuja voidaan uusiokäyttää laitteesta poistamisen jälkeen turvaamaan kaivoksen kriittinen infra, kuten yllä mainitut valaistus ja tietoliikenneverkot. Lisäksi on otettava huomioon kohdemaan omat kansalliset ja kansainväliset standardit kaivostoiminnassa. Akkujen käyttö kaivoksen varavoimana on todella hyvä ratkaisu, koska akuilta ei tässä tilanteessa vaadita niin paljon kapasiteettia kuin laitteissa kiinni ollessaan.

Mikäli akkuja käytetään kaivoksen varavoimana sähkökatkon aikana, on varmistettava, että sähkölaitteistosta ei aiheudu vaaraa ihmisille. Sähkölaitteisto voi aiheuttaa esimerkiksi tulipalon, joten sähkölaitteiston asennuksessa on huomioitava standardien ja hyvän asennustavan mukaiset asennukset. Laitteiston käytön aikana on otettava huomioon, että ulkopuoliset tekijät, kuten kaivoslaitteet ja autot, voivat aiheuttaa vikoja ja ongelmia osuessaan sähkölaitteisiin, kaapeleihin ja

muuntajiin. Täten on varmistuttava suunnitelluista kuormitustasoista, mitoituksista, suojausluokista, kaapeleihin kohdistuvista vedoista ja vioista asianmukaisesti. Työturvallisuuskeskuksen (2019) julkaiseman kaivosturvallisuusoppaan mukaan toiminnanharjoittajan on pyrittävä estämään kaivoksissa tapahtuvat onnettomuudet kaikin mahdollisin keinoin. Näihin keinoihin lukeutuvat muun muassa sähkönjakeluun ja sähkölaitteisiin liittyvät asiat.

#### **4.1.2 Maanpäällinen kaivos**

Maanpäällisen kaivoksen sähköverkko on hyvin samantyyppinen kuin esimerkiksi kaupungin jakeluverkko. Verkossa voi olla useita eri muuntajia, joilla saadaan aikaiseksi rengas- tai silmukkaverkko. Kaivos kuitenkin liittyy sähköyhtiön verkkoon vain yhdellä liittymällä, jonka takana jakelumuuntajat ovat. Näin mahdollistetaan mahdollisten häiriötilanteiden varalle syöttö toisen muuntajan kautta.

Kaivoksen sähköntarve on suuri johtuen malmin prosessoinnista ja mahdollisista sähkökäyttöisistä laitteista. Kaivoksen sähköverkko ulottuu jopa itse porauskentälle, riippuen siitä, millaisilla laitteilla kaivoksella operoidaan. Suuren kokoluokan kiertoporauslaitteet ovat osittain jo sähkökäyttöisiä. Nämä laitteet vaativat kuitenkin jatkuvan sähkönsyötön, eli laitteet eivät ole hybridejä.

Suurin osa maanpäällisen kaivoksen laitteista ovat vielä polttomoottorikäyttöisiä, suurta murrosta sähköistykseen maanpäällisessä kaivoksessa ei ole vielä tapahtunut. Esimerkiksi isot kaivinkoneet ja dumpperit voivat olla jo osittain sähköistettyjä. Esimerkiksi laitevalmistaja Caterpillar on esitellyt prototyypinsä dumpperista. Näitä suuria dumppereita varten on jo joillekin kaivoksille rakennettu hyvin samantyylinen sähkörata kuin junaradoilla, joissa laitteen yläpuolella kulkee avojohdin, jonka kautta laite saa sähköenergiaa. Yleensä nämä sähköradat sijaitsevat ylämäkeen mentäessä, jolloin laite ottaa suurimman kuorman sähköverkosta. Alamäkeen mennessä laite ottaa jopa sähköenergiaa talteen, kun laitteen suuresta massasta johtuen moottorit toimivat generaattoreina tuottaen sähköä akustoihin. Tarkempia yksityiskohtia Caterpillar ei ole julkaissut laitteesta. (Caterpillar 2022.)

Akkuja voisi mahdollisesti käyttää kaivoksen sähköverkon huipputehojen tasaamiseen. Kaivoksessa liikenne ei ole tasaista, joten sähkön kulutuksessa saattaa esiintyä huomattavia tehovaihteluja, joita pystytään akkujen avulla tasaamaan. Maanpäällisessä kaivoksessa sähkönkulutus ja liikenne on kuitenkin suurta, jolloin akkuja tarvitaan huomattavan suuri määrä. Oman haasteensa tuo myös yhdistetty kaivos, jossa on sekä maanalainen että maanpäällinen kaivos. Akut kuitenkin pystyvät reagoimaan nopeasti muuttuviin sähköverkon tilanteisiin. Kaivoksen tapauksessa myös optimoimalla liikenne tapahtumaan hyvin samoissa aikaikkunoissa saadaan akuilta suurin mahdollinen potentiaali irti. Akkuja pystytään kuormittamaan ja lataamaan hyvin selkeillä sykleillä, joka parantaa akun jäljellä olevaa elinikää, vaikka käytettäisiin uusiokäytettyjä akkuja.

Maanpäällisissä kaivoksissa akkuja voitaisiin ladata päiväsaikaan myös aurinkoenergian avulla ja akkujen energia käytettäisiin yöaikaan. Suurien kaivoksien tuotanto pyörii vuorokauden ympäri, joten sähkön tarve voi olla hyvinkin suurta jopa öisin. Lisäksi kaivokset ovat pinta-alaltaan valtavia, joten aurinkopaneelien sijoittelu ei olisi ongelma. Tämä olisi positiivista myös itse kaivosyhtiölle, kun operaatiot olisivat ekologisempia uusiutuvien energioiden ansiosta.

## **4.2 Kaivoksen sähkön laadun parantaminen**

Sähkön laadulla voidaan tarkoittaa monia asioita, mutta tässä yhteydessä käsitellään sähkön laatua huipputehon ja jännitteen tasaisuuden kannalta. Kaivoksien huipputehot voivat olla hyvinkin suuria, koska kaivoksessa on paljon sähkökuormaa, kuten poralaitteet, joilla poraukseen tarvittava sähkö otetaan suoraan sähköverkosta kaapelilla. Tämä saattaa aiheuttaa sähköverkkoon huomattavia tehopiikkejä, kun työkoneet operoivat työsyklin eri vaiheissa eri aikaisesti. Akkupaketeilla voitaisiin alentaa kaivoksen huipputehoa ja mahdollisesti jopa keskiarvotehoa, kun suurimpien tehopiikkien vaatimat tehot voitaisiin ottaa akkupaketista ja akkupaketti ladattaisiin hiljaisempana aikana täyteen.

Huomattavan suuri teho alentaa aina jännitettä, joka ei ole optimia. Tuottamalla kaivoksen sähköverkkoon tehoa akkuenergiavarastosta, saadaan kaivoksen sähköverkon jännite pidettyä tasaisena, kun teho on tasaisempaa. Mikäli akustot

sijoitetaan hajautetusti kaivoksen sisällä, saadaan teho kompensoitua paikallisesti. Tehon kompensointi paikallisesti voi johtaa jopa pienempiin johtimien poikkipinta-aloihin, kun teho ei siirry liittymispisteeseen asti. Akustot voidaan myös sijoittaa liittymispisteeseen. Etuna tässä on akustojen huolto- ja kunnossapito akustojen sijaitessa maanpäällä hyvien yhteyksien luona. Laitteiden toiminnan kannalta merkittävä jännitteenalenema on harvinaista, mutta riski on olemassa. Akkuenergiavarastoilla tätä suurta jännitteenalenemaa voitaisiin ehkäistä.

### 4.3 Kaivoslaitteiden laturit

Tässä vaihtoehdossa akkuja voitaisiin laittaa kaivoslaitteiden latureihin, eli akku toimisi laturissa energiavarastona, josta laitteen tullessa lataukseen saataisiin nopeasti tehoa laitteen akun lataamiseen. Kun laitteita ei ole latauksessa, voitaisiin energiavarasto ladata takaisin täyteen odottamaan seuraavaa latausta.

Etuna kaivoslaitteiden latureissa olisi se, että kaivoksen sähkönkäyttöä voitaisiin optimoida, kun tiedettäisiin tarkalleen milloin mikäkin laite tulisi lataukseen. Tämä näkyisi suoraan kaivoksen tehotasapainossa, kun verkosta ei otettaisi kerralla suuria määriä tehoa, vaan lataus voitaisiin edes osittain tehdä akkuvaraston avulla. Mikäli kaivoslaitteen akun ja laturissa olevan akkuvaraston kemia olisi esimerkiksi LTO, voisi lataus olla todella nopea. Mikäli kaivoksesta menisi esimerkiksi huipputehomaksua, saataisiin näitä maksuja alemmaksi, kun lataus tapahtuisi aina ennalta suunnitellusti ja arvioidusti.






Mikäli akku olisi vaihdettava, kuten Sandvikin LH518B-lastauskoneessa (Sandvik n.d.e), olisi akunvaihto sujuvaa, kun uusi akku olisi valmiiksi täyteen ladattuna, kun akkua tullaan vaihtamaan. Eli uusiokäytetyllä akulla ladattaisiin uutta akkua. Tässä haasteena on seuraavat häviöt: kaivoslaitteen akun lataus sekä lataus-akun varaaminen ja purkaminen. Tulevaisuudessa tämä tehohäviö voi kuitenkin olla mahdollista jopa unohtaa suprajohteiden avulla, jolloin akkulaturin hyötysuhde paranee. Suprajohtavuus on materiaalin ominaisuus, jossa materiaali johdtaa tasasähköä häviöttä. Häviöttömyys saadaan aikaiseksi laskemalla materiaalin lämpötila materiaalille ominaisen kriittisen pisteen alapuolelle. (Office of Science n.d.)

## 4.4 Sähköverkko

Pohjoismaisessa sähköverkossa on käytössä kantaverkko-yhtiöiden hallinnoima ja ylläpitämä sähkön reservimarkkina. Tuulivoimalan ja aurinkosähkön lisääntyessä lähtee verkosta luontaista inertiaa, kun suuret vauhtipyörät ja pyörivät generaattorit vähenevät ja poistuvat. Tuulivoimalakin on käytännössä inertia vapaa vaikka siinä on suuri pyörivä roottori, koska tuulivoimalan tuottama sähköteho viedään verkkoon suuntaajan kautta, joten inertia ei näy sähköverkossa. Sähköverkossa tulisi kuitenkin aina olla inertiaa, joka auttaa mahdollisissa häiriötilanteissa. (Korpela 2023.)

Tulevaisuudessa inertian korvaajana tulee olemaan esimerkiksi akkuenergiavarastot, joista sähköverkon muutostilanteessa saadaan nopeasti tehoa. Uusiokäytetyt akut sopisivat loistavasti esimerkiksi Pohjoismaiden FCR-N ja FCR-D säätösähkömarkkinoille. FCR on taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi, jonka tehoa hallitaan verkon taajuuden muuttuessa. Esimerkiksi taajuuden noustessa lisätään kuormaa, eli akkuihin varastoidaan energiaa, ja taajuuden laskiessa kuormaa vähennetään ja tuotantoa lisätään, eli akuista otetaan tehoa. (Fingrid n.d.) Moni Suomen sähköenergiavarasto on toteutettu akuilla. Energiavarastojen valmistajilla olisi varmasti halu käyttää uusiokäyttöakkuja energiavarastoissaan. Kuvassa 9 on esitetty eri reservimarkkinatuotteita Suomessa ja Pohjoismaissa.

## Reservituotteet Suomessa

	<b>FFR</b>	<b>ED</b>	<b>FCR-N</b>	<b>aFRR</b>	<b>mFRR</b>
	Nopea taajuusreservi, Suomi 18 %, Pohjoismaissa yht. 0-300 MW (arvio)	Taajuusohjattu häiriöreservi, Suomi ~300 MW, Pohjoismaissa yht. 1 450 MW (ylös) ja 1400 MW (alas)	Taajuusohjattu käyttöreservi, Suomi ~120 MW, Pohjoismaissa yht. 600 MW	Automaattinen taajuuden palautusreservi, Suomi 60-80 MW, Pohjoismaissa yht. 300-400 MW	Säätösähkö- ja säätökapasiteetti-markkinat, Mitoitettava vika + tasevastaavien tasevirhe
<b>Aktivointi</b>	Suurissa taajuuspoikkeamissa, hankitaan pienen inertian tilanteissa	Suuremmissa taajuuspoikkeamissa, erikseen ylös- ja alassäätö	Käytössä jatkuvasti	Käytössä kohdistetuilla tunneilla	Tarvittaessa
<b>Nopeus</b>	Sekunnissa	Sekunneissa	Kolmessa minuutissa	Viidessä minuutissa	Vartissa (12,5 min)
					
5	Reservit				<b>FINGRID</b>

KUVA 9. Reservimarkkinatuotteet Suomessa (Fingrid 2023)

Reservimarkkinatuotteita on muitakin kuin FCR-N ja FCR-D, mutta näille markkinoille on jo tälläkin hetkellä liitetty Suomessa useita akkuenergiavarastoja, kuten esimerkiksi Fortumin Batcave-projekti, joka on vuonna 2017 ollut Pohjoismaiden suurin akku sähköverkossa. (Fortum 2017.) Akut sopisivat käytettäväksi myös esimerkiksi FFR-markkinoilla, mikä on käytössä pienen inertian tilanteissa. FFR:ltä vaadittava reagointinopeus on sekunti. Tällainen nopea reagointi onnistuu akuilta.

FCR-markkinoilla Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid maksaa reservimarkkinoilla toimijoille korvausta. Korvauksen suuruus riippuu siitä, että käytetäänkö korvauksen laskemisessa vuosimarkkinoita vai tuntimarkkinoita. Markkinoille voi liittyä jo hyvinkin pienellä energiavarastolla, joten muutaman kaivoslaitteen akkujen yhteen kerääminen ja näistä varaston rakentaminen olisi mahdollista. Reservimarkkinoille liittyminen vaatii ainakin Suomessa hyväksynnät ja koekäytöt, mutta tämä voi vaihdella eri maiden välillä. Lisäksi energiavaraston valmistamiseen tarvittaisiin mahdollisesti kumppaniyritys. FCR-markkinoille liittyville toimijoille on määritelty eri tyyppiluokkia, jotka on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2. Eri tyyppiluokat FCR-markkinoille liittyville toimijoille (Kuusela 2020)

Mitoitusteho / Liittymis-pisteen jännitetaso	0,8 kW – < 1 MW	1 MW – < 10 MW	10 MW – < 30 MW	30 MW ≤
U < 110 kV	A <sup>1</sup>	B <sup>1</sup>	C	
110 kV ≤ U	(D)	(D)	D	D

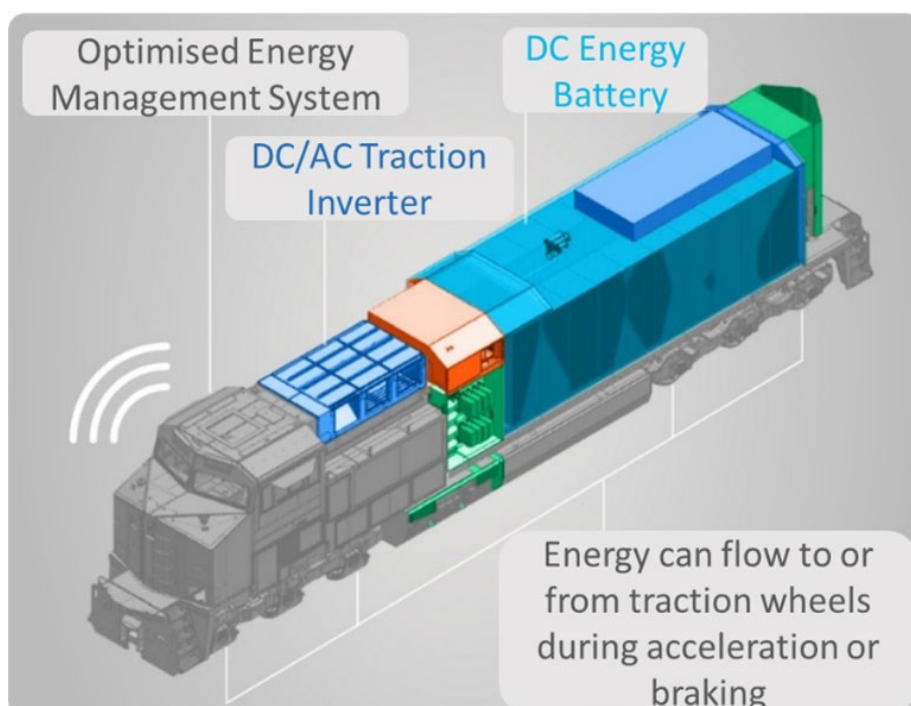
Taulukosta 2 todetaan, että markkinoille voi liittyä jo 800 watin tehoisella tuotantolaitoksella. Eri tyyppiluokille A...D on määritelty erilaisia vaatimuksia. Vaatimukset liittyvät esimerkiksi lähivikoihin, taajuussäätöön ja jännitteen ja loistehon säätöön. (Kuusela 2020.)

Sähköverkon energiavarastoille on ainakin Euroopassa kova kysyntä ja varastoja asennetaan jatkuvasti uusia. European Association for Storage of Energy EASE (n.d.) arvioi, että Euroopan Unionin vaatimukset energiavarastoista ovat

kapasiteetiltaan 200 GW vuoteen 2030 mennessä ja 600 GW vuoteen 2050 mennessä. Tämänkin tavoitteen täyttämiseen uusiokäytetyillä akuilla olisi markkinarakoa.

#### 4.5 Junaliikenne

Junaliikenteessä suurin osa junan tarvitsemasta sähköstä otetaan raiteen päällä olevasta ajolangasta. Tämä kuitenkin kuormittaa sähköverkkoa, varsinkin liikellelähdoissä, kun junan sähkömoottorien tarvitsema virta on suuri. Junaliikenteessä yli 90 %:ia päästöistä aiheutuu dieselin polttamisesta. Ajolangan rakentaminen ei kuitenkaan ole aina teknistaloudellisesti järkevää, joten akkukäyttöisiä junia kehitetään ja on testattukin jo globaalisti. (The University of Queensland 2022.) Queenslandin yliopistolla on käynnissä suuri tutkimusprojekti liittyen junien sähköistämiseen ja projektissa on mukana myös junayhtiö Aurizon. Kuvassa 10 on esitetty Queenslandin yliopiston projektin junan pääkomponentit.



KUVA 10. Sähköisen junan pääkomponentit (The University of Queensland 2022)

Junan pääkomponentteihin kuuluvat invertterit ja akusto. Lisäksi junassa on energian optimointiin tarkoitettu järjestelmä. Energiaa saadaan talteen ajomoottoreilta

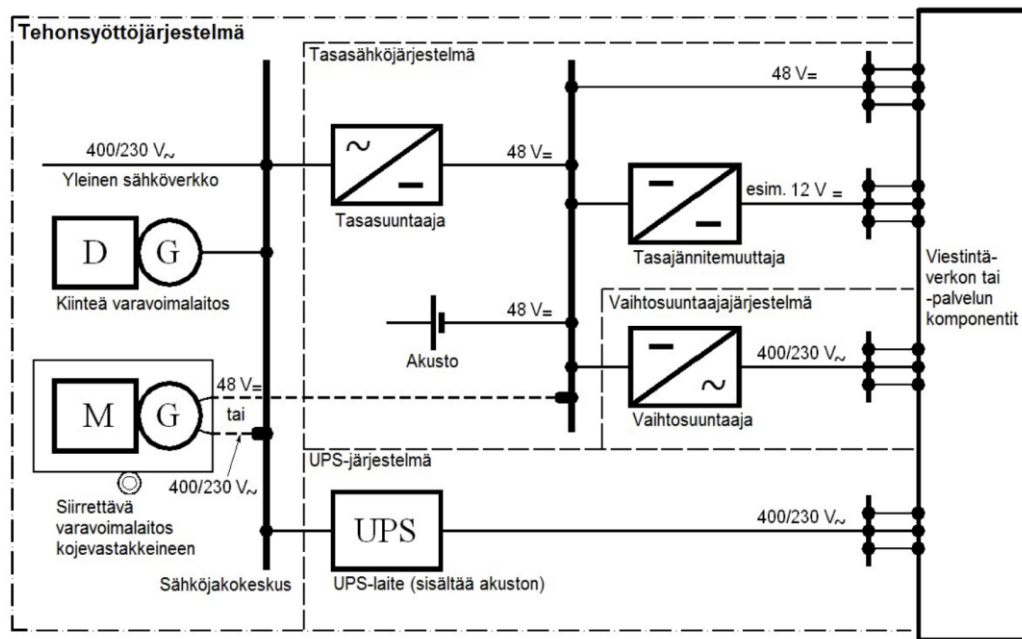
jarrutuksen aikana, koska moottorina toimiva sähkömoottori toimii myös generaattorina.

Akkuja olisi täten mahdollista käyttää esimerkiksi junien akkuina, mikäli tutkimukset näin osoittaisivat. Akuilla on mahdollista päivittää vanhan teknologian junia vastaamaan 2020-lukua. Esimerkiksi vuonna 2015 Isossa-Britanniassa on jälkiasennettu vanhaan junaan akkuja, joiden avulla voidaan ajaa sähköistämättömiä reittejä tai reittejä, joita on liian kallis sähköistää, kuten Queenslandin yliopiston projektissa. (Railway Gazette 2015.) Tämän tyyllisissä sovelluksissa eri maiden ja kulttuurien junia saataisiin kohtuullisen helposti sähköistettyä ja maiden hiilijalanjälkeä pienennettyä.

#### 4.6 Viestintäverkko

Sähkömarkkinalain mukaan Suomessa verkonhaltijan on suunniteltava asianmukaisesti sähköverkkoonsa kohdistuvien häiriöiden varalle varautumissuunnitelma (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Valtioneuvosto on vuonna 2022 luonut asetuksen, jossa asetetaan etusijajärjestys yhteiskunnan kannalta kriittisille kohteille. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom (Määräys TRAFICOM/54045/03.04.05.00/2020) määräyksen mukaan viestintäverkoille on taattava tehonsyöttö yleisen sähköverkon katkosten ajalle. Viestintäverkon komponentit jaetaan tärkeysluokkiin 1...5, joista jokaiselle tärkeysluokalle on omat vaatimuksensa varavoiman kestoajalle (Määräys TRAFICOM/54045/03.04.05.00/2020).

Varateholähteenä voidaan käyttää akustoja ja tämä onkin yleisin tapa varavoimakoneen ohella. Akustojen kanssa varavoiman kestoajat voivat olla lyhyempiä johtuen akkujen suuresta koosta isoissa varauskapasiteeteissa, joka johtaisi kohtuuttomiin kustannuksiin. Esimerkiksi tärkeysluokan 4 varavoiman kestoajaksi on määritelty  $\geq 6$  tuntia, tästä voidaan kuitenkin akkujen kohdalla poiketa aikaan  $\geq 3$  tuntia. Tämä poikkeama kestossa on kuitenkin dokumentoitava hyvin, eikä tämän kyseisen varavoiman perään saa kytkeä merkittävästi lisää kuormaa mitoittamatta akustoa uudestaan (Määräys TRAFICOM/54045/03.04.05.00/2020). Kuvassa 11 on esitetty viestintäverkon tehonsyöttökaavio.



KUVA 11. Esimerkki viestintäverkon tehonsyöttöjärjestelmästä, jossa varavoimana UPS ja akusto (Määräys TRAFICOM/54045/03.04.05.00/2020)

Viestintäverkon tehonsyöttöjärjestelmässä akusto kytkeytyy DC-välipiiriin ja akustolla varmennetaan viestintäverkon komponenttien toiminta häiriötilanteissa. Akustolta teho syötetään laitteistoille vaihtosuuntaajien eli invertterien kautta. Laitteistossa on myös UPS-laite, johon itsessään kuuluu akusto.

Viestintäverkon varateholähteen toiminta on varmistettava vähintään kerran vuodessa ja tulokset on dokumentoiva. Tämä on erityisen tärkeää uusiokäytettyjen akkujen kohdalla, koska akut eivät vastaa enää kapasiteetiltaan uutta sekä niissä voi ilmentyä yllättäviäkin heikkouksia ja pahimmillaan akku voi mennä nopeastikin toimintakelvottomaksi johtuen aiemmasta käytöstä.

#### 4.7 Kierrätys

EU:n uudessa akkuasetuksessa määritetään myös akun kierrätykselle vaatimuksia puhtaamman tulevaisuuden vuoksi. Mikäli akku kierrätetään, tulisi sen materiaaleista uusiokäyttää tietty prosentuaalinen osuus. Lisäksi uusien akkujen tulisi sisältää tietty prosentuaalinen osuus kierrätettyjä materiaaleja. (Asetus 2020/0353(COD).)

Akun täysi kierrätys on äärimmäisin vaihtoehto, jota tulisi käyttää vain siinä tapauksessa, kun akkua ei yksinkertaisesti ole järkevä uusiokäyttää. Näitä syitä voivat olla esimerkiksi valtion huono infrastruktuuri ja mahdollisuudet uusiokäyttää akkuja tai standardit ja vaatimukset akkujen uusiokäytölle. Voi myös tulla järkevämmäksi kierrättää akku, mikäli akkua jouduttaisiin kuljettamaan toiseen maahan sen uusiokäyttöä varten. Tässä tulisi arvioida kuljettamisen vaikutukset ja verrata niitä kierrätykseen. Akku voi myös olla vaurioitunut, jolloin uusiokäyttö olisi liian vaarallista ja ainoaksi vaihtoehdoksi jää kierrätys.

## 5 RATKAISUJEN VERTAILU JA YHTEENVETO

Ratkaisuja akkujen uusiokäytölle esiteltiin muutamia erilaisia. Ratkaisujen vertailussa ja yhteenvedossa keskitytään Sandvikin kannalta oleellisimpiin ja helpoimmin toteutettaviin vaihtoehtoihin. Näitä ratkaisuja ovat kaikki kaivoksiin liittyvät ratkaisut ja sähköverkon reservimarkkinat.

Kaikki kaivoksiin liittyvät ratkaisut olisivat Sandvikille helppoja. Sandvik toimii jo kaivoksissa niin laitetoimittajan kuin tukipalveluiden muodossa. Olisi organisaatiolle luontainen siirtymä alkaa toimittamaan jälkimarkkinoille myös energiavaroja ja akkulateita. Nämä tuotteet ja niiden toiminta on myös osittain sidoksissa Sandvikin laitteisiin. Päätettäväksi jää, että mihin ratkaisuun päädytään vai päädytäänkö usean eri ratkaisun käyttöön. Koska kyseessä on yrityksen liiketoiminta, tulisi käytettyjen ratkaisujen olla liiketoiminnan kannalta tietenkin positiivisia. Ratkaisujen valinnassa tulee myös huomioida ja kuunnella asiakastarpeita.

Kaivosten varavoiman ja tehotasapainon hallinta olisivat varmasti parhaat ratkaisut kaivosta operoivalla yhtiöllä. Monissa kaivoksissa ei välttämättä ole varavoimaa ollenkaan tai se toimii huonosti. Tähän käytetyt akut olisivat edullinen ja helppo ratkaisu lisätä kaivosten turvallisuutta. Kaivokset nähtäisiin myös varmasti parempana työpaikkana, kun perusasiat olisivat kunnossa. Kaivoksia velvoittavat monet standardit ja vaatimukset. Mikäli varavoima voitaisiin hoitaa ilman dieselgeneraattoria, vähentäisi se myös kaivoksen tuottamia päästöjä. Päästöjen vähentyminen on tietenkin hyvä asia, niin ympäristölle kuin kaivoksen maineellekin.

Tehotasapainon hallinnalla ja sähkön laadun parantamisella kaivosyhtiö saa huipputehomaksuja sekä mahdollisia loistehomaksuja alemmas. Kaivoslaitteiden laturien avulla kaivoksen tehokkuutta saataisiin nostettua. Laitteiden lataus olisi nopeampaa, joten koko kaivoksen operointi nopeutuisi. Tähän vaihtoehtoon voidaan vielä yhdistää hyvä kaivossuunnittelu. Kaivoksen sähkölaitteiden kuormituksen suunnittelu kuormittaa akkuja tasaisesti, jolloin myös lataamisen suunnittelu on helpompaa.

Monesti isot maanpäälliset kaivokset nähdään tavallisen kansan silmissä saastuttavina ja tätä ne ovatkin. Mikäli akkuja sijoitettaisiin maanpäällisen kaivoksen sähköverkon tueksi, voisi kaivos nostattaa imagoaan. Akuilla tuettaisiin siirtymää kohti hiilineutraalia tulevaisuutta.

Sähköverkon energiavarastot olisivat Sandvikille helppo ratkaisu ainakin Pohjoismaissa ja Euroopassa. Näiden markkina-alueiden kysyntä energiavarastoille on suurta nyt ja tulevaisuudessa. Alalla on jo monta toimijaa, jolle akut voisi helposti myydä. Mikäli Sandvik haluaisi itse toteuttaa akkuenergiavarastoja, löytyy alalta monia kumppaneita ja tietoa näiden järjestelmien toiminnasta, suunnittelusta ja toteutuksesta.

Paras ratkaisu akkujen uusiokäytölle olisi esitellä mahdolliset eri vaihtoehdot asiakkaille ja kuunnella myös heidän toiveitaan asian suhteen. Ratkaisut tulisi myös käsitellä Sandvikin sisäisesti ja valmistella asiakasta varten. Näiden keskusteluiden pohjalta tulisi sitten mahdolliset tuotteistettavat vaihtoehdot. On myös mietittävä, että käytetäänkö ratkaisujen toteuttamisessa omaa organisaatiota vai partneria.

## 6 POHDINTA

Jo ennen akkujen uusiokäyttöä on tärkeää, että kennon ja akkujen testaus tehdään laadukkaasti. Kennoja testatessa saadaan tärkeää tietoa siitä, miten akku käyttäytyy elinikänsä aikana. Mitä paremmin tämä käytös on ennustettavissa, sitä helpompi akkuja on laittaa uusiokäyttöön. Akuille voi myös olla useita eri vaihtoehtoja uusiokäyttöpaikoiksi riippuen siitä, missä kunnossa akku on.

Akkujen uusiokäytössä tulee ottaa huomioon kansalliset ja kansainväliset standardit ja kiertotalous. Koska kyseessä on yrityksen liiketoiminta, tulee myös ottaa huomioon mahdolliset tähän liiketoimintaan vaikuttavat seikat.

Moni opinnäytetyön ratkaisusta oli Sandvikilla tiedossa jo ennen tutkimuksen tekemistä, mutta organisaatio oppi myös uusia asioita. Opinnäytetyö toimi hyvänä asioiden yhteen nitojana, kun aiemmin nämä asiat eivät ole olleet saatavilla yhdessä paikassa. Opinnäytetyön teoriaosuus toimii myös mahdollisesti sisäisenä koulutusmateriaalina. Valmiita ratkaisuja työssä ei pystytty antamaan, koska se on oma iso prosessinsa. Työ toimi esiselvityksenä tulevaisuuden projekteille liittyen akkujen uusiokäyttöön. Jatkotoimenpiteinä opinnäytetyön jälkeen on selvitettävä uusiokäytettävien akkujen volyyymi. Lisäksi tulisi aloittaa keskustelut asiakkaiden kanssa heidän tarpeistaan. Volyymien ja asiakastarpeiden perusteella on mahdollista aloittaa toimenpiteet lopullisen uusiokäyttöprosessin kanssa. Myös mahdollisen kumppaniyrityksen tai -yrityksien etsiminen tulisi aloittaa, mikäli Sandvikilla päädytään käyttämään kumppania uusiokäytössä.

Opinnäytetyön tekeminen opetti akkuteknologioista, kiertotaloudesta ja monista eri mahdollisuuksista mitä akuille voidaan uusiokäytössä tehdä. Opinnäytetyössä käsitelty akkujen uusiokäyttö on kokonaisuudeltaan iso asia ja on kannattavaa, että jatkotoimenpiteisiin panostetaan.

## LÄHTEET

Australian Academy of Science. 2016. How a Battery Works. Verkkosivu. Viitattu 2.4.2023. <https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>

Battery University. 2021a. BU-105: Battery Definitions and What They Mean. Verkkosivu. Viitattu 1.4.2023. <https://batteryuniversity.com/article/bu-105-battery-definitions-and-what-they-mean>

Battery University. 2021b. Comparison Table of Secondary Batteries. Verkkosivu. Viitattu 2.4.2023. <https://batteryuniversity.com/article/bu-107-comparison-table-of-secondary-batteries>

Battery University. 2021c. BU-205: Types of Lithium-ion. Verkkosivu. Viitattu 12.4.2023. <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>

Battery University. 2021d. BU-903: How to Measure State-of-charge. Verkkosivu. Viitattu 25.4.2023. <https://batteryuniversity.com/article/bu-903-how-to-measure-state-of-charge>

Bhowmick, S. 2023. Six Most Important Lithium-ion Battery Chemistries. Electronicsforu 25.1.2023. Viitattu 25.4.2023. <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/six-most-important-lithium-ion-battery-chemistries>

Caterpillar. 2022. Caterpillar Successfully Demonstrates First Battery Electric Large Mining Truck and Invests in Sustainable Proving Ground. Viitattu 20.7.2023. <https://www.caterpillar.com/en/news/corporate-press-releases/h/caterpillar-succesfully-demonstrates-first-battery-electric-large-mining-truck.html>

Cirba Solutions. n.d. Recycling Benefits. Verkkosivu. Viitattu 20.7.2023. <https://www.cirbasolutions.com/learning-center/recycling-benefits/>

Dincer, I. & Rosen, M.A. 2010. Thermal Energy Storage Systems and Applications. E-kirja. 2. painos. Hoboken: Wiley. Viitattu 1.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden. [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9910683938305973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9910683938305973)

Direktiivi 2020/0353(COD). Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus akuista ja paristoista ja jäteakuista ja -paristoista, direktiivin 2008/98/EY ja asetuksen (EU) 2019/1020 muuttamisesta sekä direktiivin 2006/66/EY kumoamisesta. Viitattu 20.7.2023. <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/PE-2-2023-INIT/FI/pdf>

Drazga, B. 2012. Utility Energy Storage Profiles Batteries, Compressed Air Storage, Flywheels, Hydrogen, Superconducting Magnetic Energy Storage, Thermal Energy Storage, Ultracapacitors, and Vehicle - to - Grid. E-kirja. Phoenix: Red Mountain Insights. Viitattu 26.3.2023. Vaatii käyttöoikeuden. [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9910652799105973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9910652799105973)

E-Mobility Engineering. n.d. Battery Safety. Verkkosivu. Viitattu 19.9.2023. <https://www.emobility-engineering.com/battery-safety/>

EASE. n.d. Etusivu. Verkkosivu. Viitattu 22.7.2023. <https://ease-storage.eu/>  
Ecoflow. 2023. Things You Should Know About LFP Batteries. Verkkosivu. Viitattu 12.4.2023. <https://blog.ecoflow.com/us/things-you-should-know-lfp-batteries/>

Economist. 2023. Cobalt, a Crucial Battery Material, is Suddenly Superabundant. Verkkosivu. Viitattu 18.9.2023. Vaatii käyttöoikeuden.  
[https://www.economist.com/finance-and-economics/2023/02/16/cobalt-a-crucial-battery-material-is-suddenly-superabundant?utm\\_medium=cpc.ad-word.pd&utm\\_source=google&ppccampaignID=18151738051&ppcadID=&utm\\_campaign=a.22brand\\_pmax&utm\\_content=conversion.direct-response.anonymous&gclid=CjwKCAjw6p-oBhAYEiwAgg2Pgn7Gy-xlyS3qKHFzMvoFEabk5DhYJGxQBoDn9sMwUdEdoP2fOirnnsBoCd-AQAvD\\_BwE&gclidsrc=aw.ds](https://www.economist.com/finance-and-economics/2023/02/16/cobalt-a-crucial-battery-material-is-suddenly-superabundant?utm_medium=cpc.ad-word.pd&utm_source=google&ppccampaignID=18151738051&ppcadID=&utm_campaign=a.22brand_pmax&utm_content=conversion.direct-response.anonymous&gclid=CjwKCAjw6p-oBhAYEiwAgg2Pgn7Gy-xlyS3qKHFzMvoFEabk5DhYJGxQBoDn9sMwUdEdoP2fOirnnsBoCd-AQAvD_BwE&gclidsrc=aw.ds)

Euroopan parlamentti. 2023. Mitä on kiertotalous ja miksi sillä on merkitystä. Verkkosivu. Viitattu 5.7.2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/economy/20151201STO05603/mita-kiertotalous-on-ja-miksi-silla-on-merkitysta>

EV Energi. n.d. EV Basics – EV Batteries. Verkkosivu. Viitattu 10.9.2023. <https://www.evenergi.com/ev-basics-ev-batteries/>

Fingrid. 2023. Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. Viitattu 22.7.2023. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>

Fingrid. n.d. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). Verkkosivu. Viitattu 20.7.2023. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saato-sahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/>

Fortum. 2017. Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä 1.3.2017. Viitattu 22.7.2023. <https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>

Fujiwara, S., Inaba, M., & Tasaka, A. 2011. New Molten Salt Systems for High Temperature Molten Salt Batteries: Ternary and Quaternary Molten Salt Systems Based on LiF-LiCl, LiF-LiBr, and LiCl-LiBr. Teoksessa Journal of Power Sources (47), 4012–4018. Viitattu 10.4.2023.  
doi:10.1016/j.jpowsour.2010.12.009

Held, M., Tuchschnid, M., Zennegg, M., Figi, R., Schreiner, C., Mellert, L. D., Welte, U., Kompatscher, M., Hermann, M., & Nachev, L. 2022. Thermal Runaway and Fire of Electric Vehicle Lithium-ion Battery and Contamination of Infrastructure Facility. Renewable & Sustainable Energy Reviews (165).  
doi:10.1016/j.rser.2022.112474

IESO. 2017. High Performance Flywheel Energy Storage Systems: Temporal Power. Viitattu 1.4.2023. <https://ieso.ca/en/Powering-Tomorrow/2017/High-Performance-Flywheel-Energy-Storage-Systems-Temporal-Power>

IRENA. 2013. Thermal Energy Storage. Teoksessa IEA-ETSAP & IRENA Technology Policy Brief E17. Viitattu 2.4.2023. <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2013/IRENA-ETSAP-Tech-Brief-E17-Thermal-Energy-Storage.pdf>

Jouppi, E. 2019. Akkujärjestelmien turvallisuus. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 9.9.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019121226282>

Karrari, S. 2023. Integration of Flywheel Energy Storage Systems in Low voltage Distribution Grids. E-kirja. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing. Viitattu 2.4.2023. doi:10.5445/KSP/1000139457

Korpela, A. 2023. 5S00DZ06-3001 Hajautettu sähköenergian tuotanto -opintojakson oppimateriaali. Tampereen ammattikorkeakoulu.

Kuusela, A. 2020. Sähkövarastojen järjestelmätekniset vaatimukset SJV2019. Luento 21.2.2023, Rami Kaunola. Fingrid. Tampere.

Lowry, E. 2021. Salt Battery Design Overcomes 'Bump' in the Road to Help Electric Cars Go the Extra Mile. University of Nottingham 1.2.2021. Viitattu 10.4.2023. <https://www.nottingham.ac.uk/news/salt-battery-that-helps-electric-cars-go-the-extra-mile>

Man, H. 2023. What are LFP, NMC, NCA Batteries in Electric Cars? Verkkosivu. Viitattu 18.9.2023. <https://zecar.com/resources/what-are-lfp-nmc-nca-batteries-in-electric-cars>

Manninen, M. 2019. Oikosulkuvirran laskenta kaivoksen sähköverkossa. Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus. Centria-ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 5.7.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019053113616>

Morley, L. 1990. Mine Power Systems. United States Bureau of Mines julkaisuja sarja 9258. Washington. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/9790>

Määräys TRAFICOM/54045/03.04.05.00/2020. Viestintä: Määräys viestintäverkkojen ja -palvelujen varmistamisesta sekä viestintäverkkojen synkronoinnista. Viitattu 22.7.2023. <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/480001/47143>

Nikolakakis, T. & Fthenakis, V. 2012. Storage Options for Photovoltaics. Teoksessa Sayigh, A (toim.) Comprehensive Renewable Energy. E-kirja. Amsterdam: Elsevier, 199–212. Viitattu 1.4.2023. Vaatii käyttöoikeuden. [https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN\\_TAMPO/1j3mh4m/alma9910619074505973](https://andor.tuni.fi/permalink/358FIN_TAMPO/1j3mh4m/alma9910619074505973)

Office of Science. n.d. DOE Explains...Superconductivity. Verkkosivu. Viitattu 19.9.2023. <https://www.energy.gov/science/doe-explains-superconductivity>

Polar Night Energy. 2022. Sand Battery. Verkkosivu. Viitattu 2.4.2023. <https://polarnightenergy.fi/sand-battery>

Railway Gazette. 2015. Battery Train Enter Passenger Service 13.1.2015. Viitattu 1.8.2023. <https://www.railwaygazette.com/traction-and-rolling-stock/battery-train-enters-passenger-service/40400.article>

Salonen, L. 2021. Akkujärjestelmät aurinkosähkön energiavarastoina. Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 18.9.2023. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021113022565>

Sandvik. 2023. Sandvikin intranet. Verkkosivu. Käytetty luvalla.

Sandvik. 2022. Sandvik esittelee sähkökäyttöisen konseptilaitteen maanpäälliseen poraukseen. Sandvik 1.7.2022. Viitattu 25.3.2023. <https://www.rocktechnology.sandvik.fi/uutiset-media/uutisarkisto/2022/05/sandvik-esittelee-s%C3%A4hk%C3%B6k%C3%A4ytt%C3%B6isen-konseptilaitteen-maanp%C3%A4%C3%A4lliseen-poraukseen/>

Sandvik. n.d.a. Sustainability Goals. Verkkosivu. Viitattu 12.3.2023. <https://www.home.sandvik/en/about-us/sustainable-business/goals-2030/>

Sandvik. n.d.b. DD422iE Peränporauslaite. Verkkosivu. Viitattu 18.9.2023. <https://www.rocktechnology.sandvik.fi/laitteet/maalaiset-poraus-ja-pultituslaitteet/per%C3%A4nporauslaitteet-kaivostoimintaan/dd422ie-porauslaite-per%C3%A4najaan/>

Sandvik. n.d.c. Sandvik pähkinänkuoressa. Verkkosivu. Viitattu 12.3.2023 <https://www.home.sandvik.fi/tietoja-meist%C3%A4/yritys/>

Sandvik. n.d.d. Business Areas. Verkkosivu. Viitattu 18.9.2023. <https://www.home.sandvik/en/about-us/business-areas/>

Sandvik. n.d.e. Sandvik LH518B. Verkkosivu. Viitattu 20.7.2023. <https://www.rocktechnology.sandvik.fi/laitteet/maalaiset-lastauskoneet-ja-dumpperit/akkuk%C3%A4ytt%C3%B6iset-lastauskoneet-ja-dumpperit/akkuk%C3%A4ytt%C3%B6inen-lh518b-lastauskone/>

SFS-EN IEC 62485-1:2018. 2018. Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Viitattu 20.7.2023. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. Viitattu 22.7.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588>

The University of Queensland. 2022. Decarbonising Australian Railway Fleets with Batteries 10.2.2022. Viitattu 10.9.2023. <https://mechmining.uq.edu.au/article/2022/02/decarbonising-australian-railway-fleets-batteries>

Tixador, P. 2008. Superconducting Magnetic Energy Storage: Status and Perspective. Teoksessa IEEE/CSC & ESAS European Superconductivity News Forum, 3. Viitattu 1.4.2023. [https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/CR5\\_Final3\\_012008.pdf](https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/CR5_Final3_012008.pdf)

Tukes. n.d. Litiumioniakkujen elinkaari hankinnasta hävittämiseen. Verkkosivu. Viitattu 1.6.2023. <https://tukes.fi/litiumioniakkujen-turvallinen-kayttaminen>

Työturvallisuuskeskus. 2019. Kaivosturvallisuusopas. Viitattu 10.7.2023. <https://ttk.fi/wp-content/uploads/2022/03/Kaivosturvallisuusopas.pdf>

U.S. Department of Energy. n.d. Batteries for Electric Vehicles. Verkkosivu. Viitattu 10.4.2023. [https://afdc.energy.gov/vehicles/electric\\_batteries.html](https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_batteries.html)

UNDP. n.d. Sustainable Development Goals. Verkkosivu. Viitattu 25.3.2023. <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>

Zhang, M. & Fan, X. 2020. Review on the State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicle Battery. World Electric Vehicle Journal, 11(1). Viitattu 19.9.2023. doi:10.3390/wevj11010023