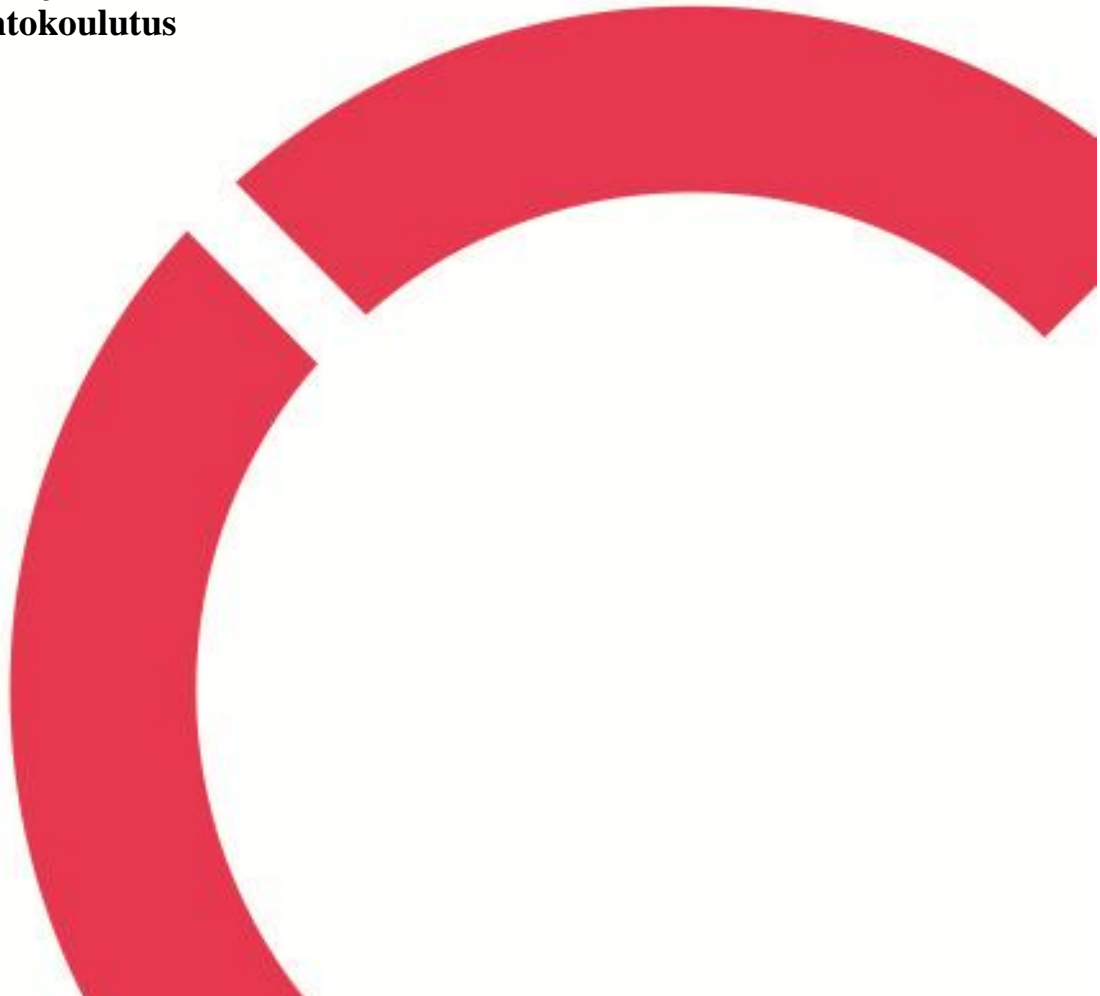


Joni Kontio ja Lauri Koskimaa

LITIUMIONIAKKIJEN ELINKAARIHUOLTO – CASE AUGMENT

Elinkaarimalli teoriassa ja käytännössä

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Insinööri AMK, sähkö- ja automaatiotekniikka
Akkutekniikan muuntokoulutus
Toukokuu 2025**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2025	Tekijä/tekijät Joni Kontio ja Lauri Koskimaa
Koulutus Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka Akkutekniikan muuntokoulutus		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi LITIUMIONIAKKUJEN ELINKAARIHUOLTO – CASE AUGMENT Elinkaarimalli teoriassa ja käytännössä		
Työn ohjaaja Aki Suokko		Sivumäärä 44 + 6
Työelämäohjaaja Miika Tuominen, Augment Mobility Ab		
<p>Sähköpotkulautojen yleistymisen on ollut merkittävä ilmiö kaupunkiliikenteessä ympäri maailman. Ne tarjoavat kätevän ja ympäristöystävällisen vaihtoehdon perinteisille kulkuvälineille. Sähköpotkulautojen suosio on kasvanut nopeasti viime vuosina. Augment Mobility Ab on suomalainen yritys, joka on erikoistunut kuluttajakäyttöön tilattaviin sähköpotkulautoihin. Augment Mobility Ab toimi tämän opinnäytetyön toimeksiantajana. Augmentin sähköpotkulaudat ovat saatavilla useissa Euroopan maissa. Yrityksen liiketoimintamalli perustuu huoltopalveluun, joka mahdollistaa asiakkaiden huoletoman ja laadukkaan sähköpotkulaudan käytön. Kuukausimaksuun perustuva palvelu sisältää kattavan korjaus- ja pikavaihtopalvelun. Yritys huoltaa potkulaudat Seinäjoella ja on halunnut laajentaa elinkaarihuoltotoimintaansa jatkossa koskemaan myös akkuja. Opinnäytetyön tavoitteena oli laatia Augmentille toimintaohje akkujen elinkaarihuoltoa varten.</p> <p>Opinnäytetyö tehtiin parityönä, jotta siihen voitiin yhdistää laaja-alainen kirjallisuuskatsaus sekä empiirinen tutkimusosio. Työn teoriaosa käsittelee laaja-alaisesti akkujen rakennetta ja toimintaperiaatetta yleisellä tasolla. Teoriaosassa selvitettiin erityisesti, kuinka akku tulee suunnitella ja rakentaa, jotta sen elinkaari olisi mahdollisimman pitkä. Työn empiirisessä tutkimusosiossa tutkittiin Augmentin käyttämien akkujen tyypillisiä vikoja, jotka ovat johtaneet akun toimimattomuuteen. Yhdistämällä teoreettinen viitekehys ja tutkimuksellinen työ voitiin Augmentille laatia kattava toimintaohje akkujen elinkaarihuoltoa varten.</p> <p>Tutkimuksellisessa osiossa havaittiin Augmentin käyttämissä akuissa usein toistuva vikaantumisen syy – liitinvika. Työn lopputuloksena Augmentille laadittiin toimintaohje, jonka avulla akkujen elinkaarihuolto voidaan tehdä vaiheittain siten, että useimmin toistuva vika tunnistetaan nopeasti. Tämä nopeuttaa merkittävästi testaus- ja huoltotoimintaa. Huoltamalla akkuja Augment kykenee pidentämään akkujensa elinkaarta merkittävästi. Samalla välttyään turhilta kustannuksilta, sillä rikkoutuneet akut jouduttaisiin muutoin hävittämään. Opinnäytetyön tulokset vahvistavat sitä näkemystä, että huolellisesti suunniteltu akku, jossa on käytetty kestäviä ja laadukkaita komponentteja, on pitkäikäinen.</p>		

Asiasanat akku, elinkaarihalli, huolto, vaatimuksenmukaisuus, vastuullisuus

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2025	Author Joni Kontio and Lauri Koskimaa
Degree programme Bachelor of Engineering, Electrical and Automation Engineering Conversion training for engineers in battery technology		
Name of thesis LIFE CYCLE MAINTENANCE OF LITHIUM-ION BATTERIES – CASE AUGMENT. Life cycle model in theory and practice		
Centria supervisor Aki Suokko	Pages 44 + 6	
Instructor representing commissioning institution or company Miika Tuominen, Augment Mobility Ab		
<p>Micromobility and especially e-scooters have become significant phenomena in cities around the globe. The popularity of the e-scooters has grown rapidly in recent years, and they offer convenient and sustainable choice to traditional modes of transportation. The Finnish company, Augment Mobility Ab, specializes in subscription-based e-scooters for consumer use in several European countries. The business model of the company is based on enabling customers to use high-quality e-scooters effortlessly and without hassle. The subscription includes all-inclusive repairs and quick replacement service. Augment is servicing its scooters in their own workshop in Seinäjoki and has aimed to include battery packs to their life cycle maintenance program in future. The objective of this thesis was to create battery pack lifecycle maintenance guidelines for Augment.</p> <p>The thesis was implemented as a joint project to enable broad literature review with an empirical research section. The theoretical part of the thesis provides an overview of battery pack structure and operating principles at a general level. The literature review concentrated especially to describe how to design and construct a battery pack to maximize the lifespan. The empirical research concentrated on analyzing the most common failure modes of Augment’s battery packs. A comprehensive maintenance guideline for battery packs was developed by combining the theoretical framework and the empirical research findings.</p> <p>In the empirical research phase a recurring failure in Augment’s battery packs was identified – connector failure. As a result, a step-by-step maintenance guideline was created for Augment to ensure that the most common fault is detected as quickly as possible. The guideline speeds up the testing and maintenance operations significantly. By implementing lifecycle maintenance, Augment can extend the lifespan of the battery packs considerably. This approach also reduces costs, because otherwise the faulty battery pack would have to be discarded. The findings of the thesis reinforce the view that long-lasting battery packs need to be well-designed, manufactured with durable components with high quality.</p>		
Key words battery pack, compliance, life cycle, maintenance, responsibility, secondary battery		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

BMS

BMS (Battery Management System) on järjestelmä, joka hallinnoi ladattavaa akkua tai akkukokonaisuutta. Se valvoo akun tilaa, suojaa akkua ylikuormitukselta ja optimoi sen suorituskykyä. BMS-järjestelmä voi myös raportoida akun tilasta ulkoisille laitteille ja hallita akun latausta.

CE-merkintä

CE-merkintä tuotteessa osoittaa, että valmistaja vakuuttaa tuotteen täyttävän sitä koskevien EU:n direktiivien vaatimukset, ja että tuote on läpikäynyt mahdollisesti vaaditut tarkistukset. Merkintä on pakollinen tietyissä tuoteryhmissä, kuten henkilösuojaimissa, leluissa, koneissa ja sähkölaitteissa.

Cutoff-jännite

Cutoff-jännite on alin sallittu akkukennon jännite, jossa akun BMS katkaisee akusta virran purkamisen. Toiminnon avulla BMS suojelee akkukennoja alijännitteeltä.

EMC (Electromagnetic compatibility)

Sähkömagneettisella yhteensopivuudella eli EMC:llä tarkoitetaan elektronisten laitteiden tai järjestelmien kykyä toimia luotettavasti luonnollisessa toimintaympäristössään ilman, että ne häiritsevät muita laitteita tai altistuvat häiriöille itse.

Kapasiteetti

Kapasiteetti kertoo, kuinka paljon sähköä akku pystyy varastoimaan tai vapauttamaan ennen kuin se tyhjenee. Mitä suurempi luku on, sitä kauemmin akku kestää yhdellä latauksella. Tyypillisesti kapasiteetti ilmoitetaan joko watti- tai ampeeritunteina.

Li-ion

Li-ion, eli litiumioniakku, on ladattava akkutyyppi, joka on erittäin suosittu monissa kulutuselektronikkalaitteissa, kuten älypuhelimissa, kannettavissa tietokoneissa ja sähköajoneuvoissa. Litiumionit ovat suosittuja niiden korkean energiatiheuden, kevyen painon ja pitkän käyttöiän ansiosta.

LCO

Litium-kobolttioksidi.

LFP

Litium-rautafosfaatti.

LTO

Litium-titanaattioksidi.

NCA

Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi.

NCM

Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi.

REACH

REACH tarkoittaa Euroopan unionin asetusta kemikaalirekisteröinnistä, kemikaalien arvioinnista, lupamenettelyistä sekä rajoituksista. (registration, evaluation, authorisation and restriction of chemicals)

RoHS-direktiivi

RoHS-direktiivi on Euroopan unionin säädös, jolla rajoitetaan tiettyjen haitallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa.

Sähköpotkulauta

Sähköpotkulauta on kevyt ja kätevä kulkuväline, joka toimii sähkömoottorilla. Se on suunniteltu helpottamaan lyhyitä matkoja kaupunkiympäristössä ja tarjoaa ympäristöystävällisen vaihtoehdon perinteisille kulkuvälineille. Sähköpotkulauta muistuttaa perinteistä potkulautaa, mutta siinä on sähkömoottori, joka auttaa liikkumaan ilman suurta fyysistä ponnistelua.

18650-kenno

18650 on yleinen litiumioniakkukennon koko, jota käytetään laajasti erilaisissa sovelluksissa, kuten kannettavissa sähkötyökaluissa, taskulampuissa ja sähköajoneuvoissa. "18650" viittaa kennon mittoihin. Kennon halkaisija on noin 18 mm ja pituus noin 65 mm.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 AUGMENTIN TOIMINTAYMPÄRISTÖ	3
2.1 Sähköpotkulautojen liiketoimintamalli.....	3
2.2 Sähköpotkulautojen huoltotoiminta.....	5
3 AKKUJEN ELINKAARI, RAKENNE JA TOIMINTA	8
3.1 Akkukäyttöisten laitteiden elinkaarimalli	8
3.2 Litiumioniakkujen rakenne ja toimintaperiaatteet	11
3.2.1 Litiumioniakkujen koostumus ja toiminta	11
3.2.2 Eri akkukemioiden vertailu ja soveltuvuus sähköpotkulaudoissa	18
3.3 Vaatimukset ja suunnittelu	22
3.3.1 Akkuja koskeva EU:n tuotelainsäädäntö ja CE-merkintä.....	24
3.3.2 Akkujen testaus vaatimustenmukaisuuden osoittamiseksi	27
4 VIKAANTUNEIDEN AKKUJEN TUTKIMINEN	29
4.1 Toimintaohjeen tietoperusta ja toiminnallisen prosessin kuvaus.....	29
4.2 Empiirinen tutkimus.....	30
5 YHTEENVETO JA POHDINTA	40
LÄHTEET	42
LIITTEET.....	45
KUVIOT	
KUVIO 1. Sähköpotkulaudan elinkaarimallin systeimirajaus	9
KUVIO 2. Päätekijät sähköpotkulaudan ympäristökuormitukselle.....	10
KUVIO 3. Kennotyypit ja niiden rakenne	13
KUVIO 4. Akkukemien kytkenämerkintä	14
KUVIO 5. BMS-piirin jännitteenvolttakontaktit.....	17
KUVIO 6. Eri NMC-kemioiden ominaisuudet	21
KUVIO 7. Tutkimuksellisen osan prosessi.....	30
KUVIO 8. Akun latausliitäntä (keltainen) ja purkuliitäntä (vihreä)	31
KUVIO 9. Kapasiteettitestauslaitteen visuaalinen raportti, akku 7	34
KUVIO 10. Akun liitinpääty avattuna ja kuvattuna sisältäpäin.....	35
KUVIO 11. Akun liitinvika havainnollistettuna	36
TAULUKOT	
TAULUKKO 1. Litiumioniakkukemiat ja ominaisuudet	19
TAULUKKO 2. ES210-mallin akun keskeisimmät ominaisuudet.....	32
TAULUKKO 3. Vika-analysoitujen akkujen tutkimustulokset.....	34

KUVAT

KUVA 1. Augment ES210-sähköpotkulauta	5
KUVA 2. Augment ES210-sähköpotkulaudan huolto käynnissä Seinäjoella	6
KUVA 3. Augment ES210-mallissa käytetty 48 V li-ion akku	11
KUVA 4. Akun kotelon tiivistekumi	12
KUVA 5. Augmentin käyttämä akkumoduuli lämpömuovattavan kutistemuovin kera ja ilman	14
KUVA 6. Augmentin akun rakenne ja pistehitsaukset	15
KUVA 7. Augmentin akun rakenne	17
KUVA 8. B20H-kapasiteettitestaustaite	33
KUVA 9. Akun liitinvika, jossa on taitoksestaan poikki mennyt kontaktiliuska	37
KUVA 10. Liitinvika, jossa taitoksestaan poikki menneet kontaktiliuskat	37
KUVA 11. Akun balansointi käynnissä	39

1 JOHDANTO

Akkukäyttöisten liikkumiseen tarkoitettujen kulkuvälineiden markkinat ovat mullistuneet viimeisen kymmenen vuoden aikana. Erilaisia akkukäyttöisiä kulkuvälineitä edustavat muun muassa sähköpolkupyörät, sähköpotkulaudat ja istuen ajettavat sähkömopot. Akkukäyttöisten laitteiden yleistyminen yhteiskunnassa on myös merkinnyt ihmisten liikkumistapojen merkittävää muutosta erityisesti kaupunkimaisissa ympäristöissä.

Augment on Euroopan suurin sähköpotkulautapalveluiden tuottaja, jolla on nykyisin noin 45 000 asiakasta. Augment perustettiin Itävallan Pinzgaussa, vuonna 2015. Yrityksen alkuvaiheissa valmistettiin maailmacup-tason laskettelusuksia ja myöhemmin kisapyöriä. Vuonna 2020, vuoden kehitystyön jälkeen, Augment lanseerasi tilattavat sähköpotkulaudat kuluttajamarkkinoille Suomessa, Itävallassa ja Ruotsissa. (Augment 2024.)

Toinen opinnäytetyön tekijöistä on toiminut sivutoimisena yrittäjänä vuodesta 2021 alkaen ja konsultoinut akkuihin liittyvissä asioissa Augmenttia. Augment on tunnistanut pidemmän aikaa sen, että akkujen elinkaarihuoltoon liittyvän toimintaohjeen laatiminen olisi sille tarpeellista sähköpotkulautaliiketoiminnan ja huoltotoiminnan jatkuvasti laajentuessa.

Opinnäytetyön tavoitteena on laatia Augmentille toimintaohje akkujen elinkaarihuolto varten. Huollon tavoitteena on akkujen elinkaaren maksimointi. Huolto suoritetaan Augmentin omana työnä osana sähköpotkulaudan elinkaarihuoltoa.

Opinnäytetyö tehtiin parityönä, koska akkujen elinkaarihuolto nähtiin laajana aiheena. Tutkimustyöhön yhdistettiin laaja-alainen kirjallisuuskatsaus sekä tutkimuksellinen empiirinen osa. Jakamalla opinnäytetyö kahteen erilliseen osaan saatiin luotua konkreettinen liittymäpinta teoreettisen tiedon ja tutkimuksellisen osan välille. Näin kerätyn tiedon avulla voitiin laatia toimintaohje Augmentille akkujen elinkaarihuoltoa varten.

Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on tehdä laaja-alainen aineiston keruu seuraavien teemojen osalta:

- Akun rakenne ja toiminta
- Litiumioniakkujen kemiat
- Akkukäyttöisten sähkölaitteiden elinkaarimalli ja vastuullisuus

- Lainsäädäntö ja vaatimuksenmukaisuuden todentaminen

Kirjallisuuskatsaus perustuu laajaan valikoimaan tieteellisiä artikkeleita, kirjoja ja muita luotettavia lähteitä. Teorian avulla pyritään kattamaan mahdollisimman laajasti litiumioniakkujen elinkaaren vaikuttavia tekijöitä sekä akkuja koskevia lakeja ja standardeja. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on myös syventää ymmärrystä litiumioniakkupakettien rakenteesta ja toiminnasta, kehittää ratkaisuja akkujen elinkaaren maksimoimiseksi, ympäristövaikutusten minimoimiseksi sekä tukea empiirisen tutkimuksen suorittamista.

Tutkimuksellisen empiirisen osan tavoitteena on hankkia lisätietoa Augmentin käyttämien akkujen vi-oista ja niiden syistä. Empiiriseen osaan kuuluu olennaisesti tutkimustyö, jonka avulla selvitetään ja dokumentoidaan akkujen vikaantumiseen johtaneet yleisimmät syyt. Havaintojen avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä, millä tavoin akkujen vianetsintä, testaus, huoltaminen ja korjaaminen kannattaisi tehdä.

Tutkimuksen teoriaosan muodostavat luvut 2 ja 3. Luvussa 2 kuvataan Augmentin toimintaympäristöä ja liiketoimintamallia. Lisäksi luvussa kerrotaan Augmentin huoltotoiminnasta. Luvussa 3 esitetään tutkimuksen laaja-alaista kirjallisuuskatsausta. Luvun alussa tutustutaan litiumioniakkujen rakenteseen ja toimintaperiaatteeseen. Tämän jälkeen esitetään akkukäyttöisten laitteiden elinkaarimaalia. Luvun lopussa perehdytään akkujen vaatimuksiin ja suunnittelua ohjaaviin viitekehyksiin.

Opinnäytetyön tutkimuksellisen osan muodostaa luku 4. Luvun alussa kerrotaan, kuinka toiminnallinen prosessi toteutetaan ja mitä siihen sisältyy. Luvussa esitetään empiirisen tutkimuksen tulokset. Luvussa 5 on yhteenveto- ja pohdintaosio, jossa käsitellään työn keskeisimpiä tuloksia sekä mahdollisia jatkotutkimusaiheita. Toimintaohje on työn liitteenä. Opinnäytetyö liitteinen on julkinen.

2 AUGMENTIN TOIMINTAYMPÄRISTÖ

Sähköpotkulautojen yleistymisen on ollut merkittävä ilmiö kaupunkiliikenteessä ympäri maailmaa. Ne tarjoavat kätevän ja ympäristöystävällisen vaihtoehdon perinteisille kulkuvälineille, ja niiden suosio on kasvanut nopeasti viime vuosina. Useilla kaupunkialueilla on nykyään tarjolla eri yritysten vuokrattavia sähköpotkulautoja. Käyttäjät voivat helposti löytää ja vuokrata niitä eri yritysten mobiilisovellusten kautta. Tämä on yksinkertaistanut kulkemista ja houkuttellut paljon uusia käyttäjiä. Esimerkiksi vuonna 2023 sähköpotkulaudoilla tehtiin noin 16,2 miljoonaa matkaa Suomessa. (Traficom 2024.)

Sähköpotkulautojen yleistymisen on tärkeä osa modernia kaupunkiliikennettä. Se vaikuttaa käyttäjien arkeen, ympäristöön ja kaupungin infrastruktuurin kehittämiseen. Myös ympäristönäkökohdat vaikuttavat sähköpotkulautojen yleistymiseen. Ne tarjoavat mahdollisuuden vähentää liikenteen päästöjä, koska ne toimivat sähköllä. Tämä on houkuttellut ympäristötietoista väestöä, joka haluaa tehdä ekologisia valintoja. Sähköpotkulautojen käyttö voi vähentää perinteisten polttomoottorikäyttöisten ajoneuvojen tarvetta, mikä puolestaan parantaa ilmanlaatua. Useat kaupungit ovat investoineet viime vuosien aikana pyöräteihin ja turvallisiin parkkeihin potkulaudoille ja polkupyörille, mikä tekee käyttökokeuksesta mukavampaa ja turvallisempaa. (Traficom 2024.)

2.1 Sähköpotkulautojen liiketoimintamalli

Augmentin liiketoimintamalli poikkeaa merkittävästi perinteisistä vuokrafirminoista. Vuokrafirmit tarjoavat sähköpotkulautoja lyhytaikaisiin vuokrauksiin. Vuokraaminen tapahtuu mobiilisovelluksien avulla. Vuokrauksen hinta muodostuu usein kilometri- ja aikaperusteisesti. Pääsääntöisesti niiden vuokra-ajat ovat hyvin lyhyitä ja niillä tehdään lyhyitä matkoja kaupunkialueilla. Vuokrafirmojen sähköpotkulaudat paikannetaan sovelluspohjaisesti ja niitä voi käyttää vain tietyllä maantieteellisellä alueella. Tämä rajoittaa hyvin merkittävästi niiden käyttöä muualla kuin kaupunkialueilla. (Tuominen 2024.)

Augment on suomalainen yritys, joka on erikoistunut sähköpotkulautoihin. Yritys aloitti toimintansa alppilajien suksivalmistajana, mutta laajensi liiketoimintaansa myöhemmin polkupyöriin ja sähköpotkulautoihin. Augment tarjoaa tilattavia potkulautoja, jotka ovat käytössä Suomessa, Itävallassa, Ruot-

sisä, Tanskassa, Italiassa, Espanjassa ja Belgiassa. Yrityksen liiketoimintamalli perustuu huoltopalveluun, joka mahdollistaa asiakkaiden huolettoman ja laadukkaan sähköpotkulaudan käytön. (Augment 2025.)

Augmentin sähköpotkulaudat ovat saatavilla tilauspalveluna, joka sisältää kattavan korjaus- ja pikavaihtopalvelun. Tämä tarkoittaa, että asiakkaat voivat tilata sähkö kotiinsa ja nauttia huolettomasta ajosta ilman huolta korjauskustannuksista. Palvelu kattaa kaikki viat, vauriot ja osien kulumisen, mukaan lukien akun. Lisäksi asiakkailla on mahdollisuus päivittää sähköpotkulaudan vuosittain uuteen malliin edullisesti. Sopimuskaudet ovat 6, 12 tai 24 kk tuotteen mukaan. Sopimuskauden päätyttyä käyttäjällä on mahdollisuus lunastaa tuote itselleen maltillisella hinnalla. (Augment 2025.)

Augmentin sähköpotkulaudat ovat saavuttaneet suuren suosion Euroopassa. Yritys on myös saanut tunnustusta innovatiivisista ratkaisuisistaan ja korkeasta asiakastyytyväisyydestään. Augmentin sähköpotkulaudat ovat olleet erityisen suosittuja työmatkaliikenteessä, jossa ne tarjoavat nopean ja mukavan tavan liikkua ilman hikoilua. Augmentin tarina on inspiroiva esimerkki siitä, miten yritys voi menestyä yhdistämällä innovatiiviset ratkaisut ja kestävä kehityksen periaatteet. Yritys on osoittanut, että sähköpotkulaudat voivat olla merkittävä osa modernia kaupunkiliikennettä ja tarjota käyttäjilleen kätevän ja ympäristöystävällisen tavan liikkua. (Augment 2025.)

Yrityksen liiketoimintamalli on rakennettu kestävä kehityksen periaatteiden ympärille. Augment on sitoutunut tarjoamaan ympäristöystävällisiä liikkumisratkaisuja, jotka vähentävät liikenteen päästöjä ja parantavat kaupunkien ilmanlaatua. Augmentin sähköpotkulaudat on suunniteltu tarjoamaan tehokasta liikkumista erityisesti kaupunkiympäristössä. Ne ovat kevyitä, helposti kannettavia ja tarjoavat nopean ja kätevän tavan liikkua lyhyillä matkoilla. Sähköpotkulaudat toimivat ladattavalla akulla. Tyypillisesti niillä voi täydellä akun latauksella ajaa noin 15–25 kilometrin matkan ja niiden nopeus on maksimissaan 25 km/h. Tämän opinnäytetyön tutkimuksen kohteena on Augmentin ES210-malli, joka on esitetty kuvassa 1. (Augment 2025.)



KUVA 1. Augment ES210-sähköpotkulauta

2.2 Sähköpotkulautojen huoltotoiminta

Augmentin liiketoimintamalli toimii siten, että kuluttajalle taataan toimiva sähköpotkulauta käyttöön. Kuukausimaksu kattaa sopimusaikana niin puhjenneet renkaat, kolarit kuin rikkoutumisetkin. Augment huoltaa itse oman henkilökuntansa voimin sähköpotkulaudat omilla tiloissaan. Suomessa huolto- paikka sijaitsee Seinäjoella. (Pirttinen 2024.)

Elinkaarihuoltoon kuuluvat kaikki sähköpotkulaudan osat. Kun käyttäjä havaitsee jonkin vian, ottaa hän yhteyttä Augmentin asiakaspalveluun. Augment lähettää huolletun sähköpotkulaudan käyttäjälle ja

käyttäjä palauttaa rikkoutuneen Augmentille huoltoon. Asiakas maksaa kuukausimaksua toimivasta potkulaudasta Augmentin kantaessa riskin sen toimimattomuudesta ja vioista. (Pirttinen 2024.)

Huollossa ensimmäisenä potkulauta pestään ja lajitellaan vikakuvauksen perusteella. Huollon yhteydessä kaikki komponentit ja osat tarkistetaan ja rikkoutuneet osat tarvittaessa vaihdetaan. Augmentilla on käytössään kaikki potkulaudan eri komponentit, joten se voidaan tarvittaessa rakentaa lähes alusta asti uutta vastaavaan kuntoon. Esimerkkejä vaihdettavista komponenteista ovat ohjainyksikkö, näyttöpaneeli, jarrukahva sekä ajomoottori. Tyypillisin vaihdettava yksittäinen osa on rengas. Seinäjoen huolto paikalla työskenteli kesällä 2024 kymmenkunta asentajaa, jotka vastaavat potkulautojen huollosta. Viikossa niitä huolletaan parhaimmillaan noin 400 kappaletta. Augmentin potkulauta on suunniteltu siten, että sen huoltaminen on nopeaa. (Pirttinen 2024.) Kuvassa 2 on esitetty Augmentin huoltopaikka Seinäjoella.



KUVA 2. Augment ES210-sähköpotkulaudan huolto käynnissä Seinäjoella

Augmentin huoltotoiminnan kehittyessä on syntynyt tarve huoltaa myös akkuja. On vastuullista ja taloudellisesti järkevää pyrkiä maksimoidaan akkujen elinkaari. Alkuvaiheessa Augmentin huoltopai-
kalla akuille on tehty vain kapasiteettimittaukset ja kapasiteettimittauksessa hylätyt akut on siirretty
sivuun odottamaan niiden korjaamista. (Pirttinen 2024.) Tämän opinnäytetyön tärkein tavoite on laatia
Augmentin käyttämille akuille elinkaarihuolto-ohje. Luvussa 4 on tutkittu tarkemmin empiirisiin tutki-
musmenetelmien Augmentin akkujen tyypillisiä vikoja.

3 AKKUJEN ELINKAARI, RAKENNE JA TOIMINTA

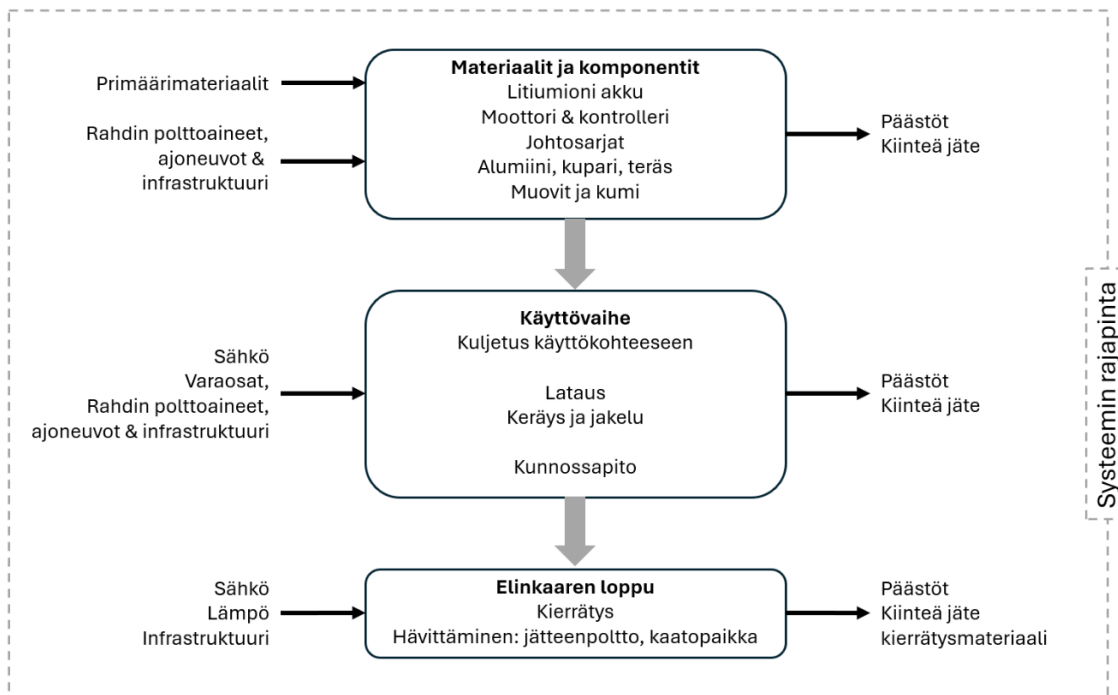
Litiumioniakku voi tuntua yksinkertaiselta. Yhdistelemällä useampia kennoja saadaan aikaan oikeanlainen akkupaketti, jonka avulla voidaan käyttää erilaisia sähkötoimisia laitteita. Valitettavasti todellisuus on huomattavasti monimutkaisempi ja tässä luvussa käsitelläänkin litiumioniakun koko elinkaarta ja syvennytään siihen vaikuttaviin tekijöihin teorian pohjalta. Lisäksi selvitetään mahdollisimman kattavasti Euroopan unionin asettamia vaatimuksia litiumioniakuille. Teoriaa pyritään tarkastelemaan mahdollisimman laaja-alaisesti. Tämä asettaa väistämättä myös rajoitteita, tarkoittaen sitä, että osa-alueella ei pystytä kattamaan aihetta yksityiskohtaisesti.

3.1 Akkukäyttöisten laitteiden elinkaarimalli

Sähköpotkulautojen elinkaarimallia käsitteleviä tutkimuksia on jo melko laajasti, mutta vielä toiseksi pääosa tutkimuksista keskittyy yhteiskäyttö sähköpotkulautoihin. Tietyiltä osin yksityis- ja yhteiskäytössä olevien laitteiden elinkaarimallit ovat samankaltaisia, mutta myös suuria eroavaisuuksia on tutkimuksien pohjalta havaittavissa.

Kuvio 1 tuo esiin hyvin sähköpotkulautojen elinkaarimallin. Kyseisen mallin perusteella Baumgartner ja Helmers (2024, 14–15) ovat todenneet, että Saksassa sähköpotkulaudalla tulisi ajaa vähintään 5 400 km, jotta sen hiilidioksidiekvivalenttipäästöt per matkustajakilometri olisivat henkilöautoa matalammalla tasolla. Samassa tutkimuksessa he toteavat, että nykyisillä yhteiskäyttö sähköpotkulaudoilla vaadittavia kilometrejä voi olla vaikea saavuttaa johtuen niiden kohtaamasta ilkeivallasta ja epäoptimaalisesta akkujen käytöstä (Baumgartner & Helmers 2024, 14–15). Baumgartner ja Helmers (2024, 15) toteavatkin, että yksityisomistuksessa olevilla sähköpostilaudoilla on taloudellisten kannustinten takia hieman todennäköisempää saavuttaa vaaditut kilometrit. Löytyy myös tukevia tutkimuksia, joissa on arvioitu yksityisomisteisen sähköpotkulautojen hiilidioksidipäästöjen olevan pienimmästä päästä vaihtoehtoisia liikennevälineitä, vain 56,54 g/ajettu kilometri (Cãlao, Marques, Completo & Coelho 2022, 525). Holmgrenin, Einarsonin ja Rosellin (2024, 12–13) tutkimuksen mukaan sähköpotkulaudan valmistusvaihe aiheuttaa koko elinkaaren suurimman ympäristövaikutuksen ja pääosin ympäristövaikutukset tulevat alumiinirungon sekä akun valmistuksesta. Tässäkin tapauksessa voidaan todeta, että sähköpotkulaudan elinkaarta pidentämällä voidaan minimoida sen ympäristövaikutukset. Nopeimmat vai-

kutukset elinkaarten pidentämiseksi ovat huollettavien ja vaihdettavien akkujen käyttö sekä koko laitteen rakenteen suunnitteleminen kestävämmäksi. Myös vuonna 2020 julkaistussa tutkimuksessa Severngiz, Schelte ja Bracke (2020, 187) toteavat, että vaihdettavilla akuilla voidaan alentaa sähköpotkulautojen ympäristövaikutuksia huomattavasti, mutta tämän lisäksi he painottavat korvattujen akkujen mahdollista uusiokäyttöä, joka parantaisi tilannetta entisestään. Sähköpotkulaudan ympäristöystävällisyyttä parantaneen monissa maissa tapahtuva sähkön tuotannon irtautuminen fossiilisista polttoaineista, varsinkin verrattuna liikkumiseen polttomoottoriautolla. Myös Călao ym. (2022, 525) tuovat esiin, että sähköpotkulaudan osat vastaavat valtaosasta laitteen elinkaaren hiilidioksidipäästöistä.

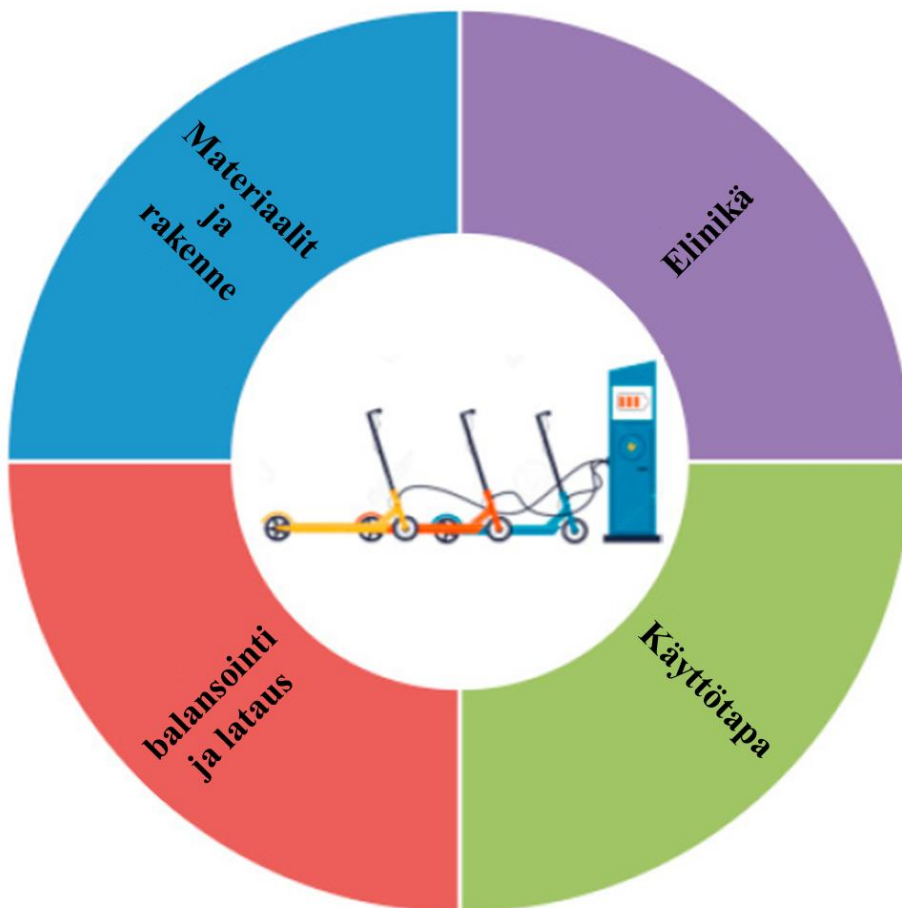


KUVIO 1. Sähköpotkulaudan elinkaarimallin systemirajaus (mukaillen Baumgartner & Helmers 2024, 5)

Baumgartnerin ja Helmersin (2024, 5) elinkaarimallista poiketen yksityiskäytössä olevien sähköpotkulautojen käyttövaiheen päästöt ovat yhteiskäyttöön tarkoitettuja pienemmät, sillä yksityiskäytössä olevia sähköpotkulautoja ei tarvitse erikseen kuljettaa ladattavaksi ja palauttaa sen jälkeen käyttökohteisiin. Tutkimuksen kohteen Augmentinkin tapauksessa sähköpotkulautoja kuljetetaan, mutta vain siinä tapauksessa, jos asiakkaan laite vikaantuu ja sen tilalle lähetetään kunnostettu ja viallinen palautetaan korjattavaksi. (Pirttinen 2024.) Baumgartner ja Helmer (2024, 5) ovat myös jättäneet huomioimatta mahdollisen akkujen uusiokäytön (second life englanniksi). Tämä uusiokäytön pois jättäminen johtuu luultavasti siitä, että yleisesti sähköpotkulautojen akut on suunniteltu ja valmistettu siten, että niiden

uusiokäyttö ei ole kannattavaa. Tämän lisäksi pääosa kevyiden sähköisten liikkumisvälineiden akuista on valmistettu Aasiassa mahdollisimman edullisesti ja tämä osaltaan asettaa epäilyksiä akkujen turvallisuudelle. (Mårtensson & Renmarker 2024, 90–91.)

Nevesin, Ferreitan, Lopesin ja Godinan (2024, 1049) tutkimus vahvistaa tässä luvussa jo aiemmin esitettyjä löydöksiä sähköpotkulautojen elinkaaren ympäristökuormitukseen päätekijöistä, jotka ovat nähtävissä kuviossa 2. Täysin uutena huomiona aikaisemmin esitettyihin tekijöihin Neves ym. (2024, 1410) painottavat, että akkujen balansointi on latauksen ohella yksi merkittävä tekijä sähköpotkulautojen elinkaaren aikaisiin päästöihin.



KUVIO 2. Päätekijät sähköpotkulautojen ympäristökuormitukselle (mukaillen Neves ym. 2024, 1409)

Tässä tutkimuksessa keskitymmekin sähköpotkulautojen litiumioniakkujen elinkaareen ja sen pidentämiseen, koska kuten Holmgren ym. (2024, 12–13) toteavat sähköpotkulaudan alumiinirungon ja akun valmistuksen aiheuttavan suurimmat ympäristövaikutukset. Vielä tarkemmin Holmgren ym. (2024, 10)

arvioivat, että akun osuus sähköpotkulaudan osien valmistuksen ympäristövaikutuksista on lähes puolet, kun taas alumiinirungon vaikutus on vain noin neljäsosa kokonaisuudesta.

3.2 Litiumioniakkujen rakenne ja toimintaperiaatteet

Litiumioniakuista puhuttaessa tarkoitetaan yleensä kokonaista toimintavalmista akkua, joka koostuu useasta eri osasta. Tässä alaluvussa kerrotaan akkupaketeista, sen osista ja edelleen osakomponenteista sekä niiden toimintaperiaatteista. Akun rakennetta ja toimintaa käsitellään työn kontekstin mukaisesti kevyiden sähköajoneuvojen näkökulmasta, joten aihealueen ulkopuolelle on rajattu sähköautoissa ja energiavarastoissa käytetyt korkeajänniteakut sekä kannettavien akkukäyttöisten laitteiden akut. Rajauksesta huolimatta suuri osa esittelystä teoretiedosta pätee osaltaan myös aihealueen ulkopuolelle rajattuihin applikaatioihin.

3.2.1 Litiumioniakkujen koostumus ja toiminta

Litiumioniakut ovat monimutkaisia. Niiden suunnitteleminen ja valmistaminen vaativat laaja-alaista teknistä osaamista kemian, sähköopin, elektroniikan, lämpöopin, ohjelmoinnin ja mekaniikan saralta (Warner 2015, 5). Litiumioniakun koostumuksen esittelyssä käytetään Augment ES210-mallisarjan 48 V akkua. Akku on esitetty kuvassa 3.



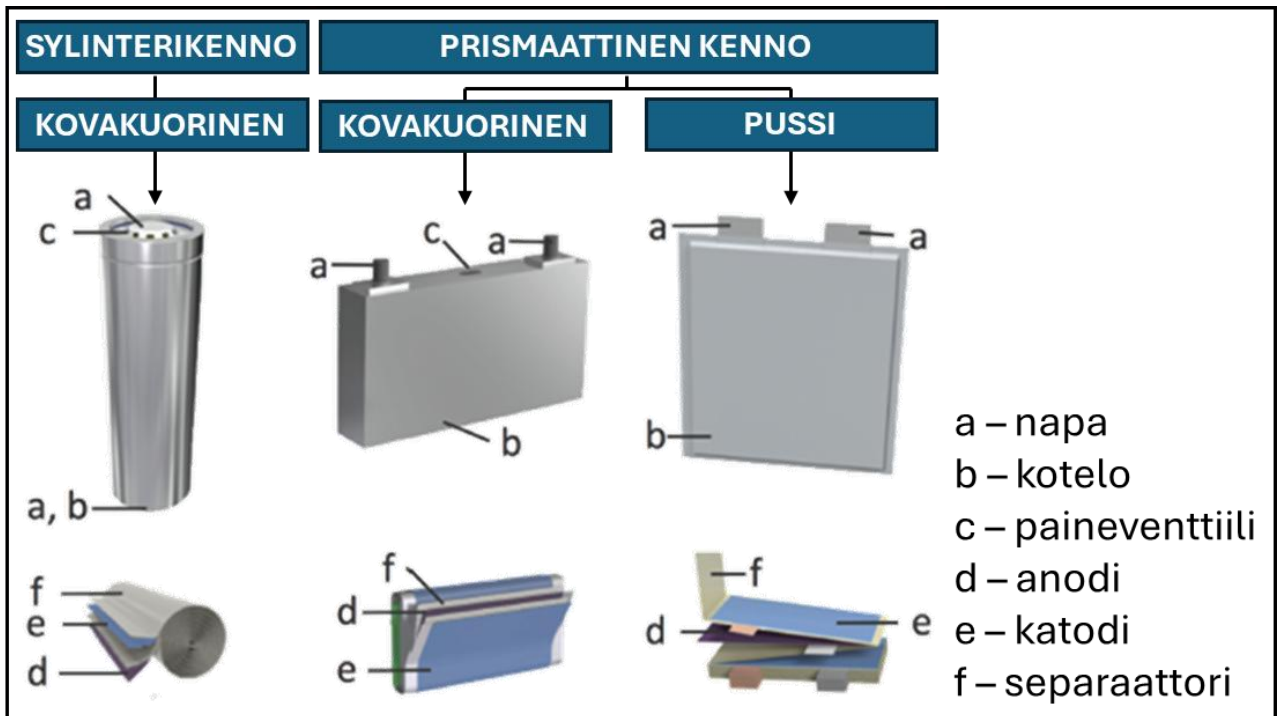
KUVA 3. Augment ES210-mallissa käytetty 48 V li-ion akku

Akkupaketin ulospäin näkyvä osa on mekaaninen kotelointi, jonka tarkoitus on suojata itse akkua ja sen käyttäjää (Andrea 2020a, 417). Augmentin akun kotelomateriaali on alumiini. Akun koteloinnista löytyvät myös lataus- ja purkuliitännät. Nämä liitännät voivat toimia yhden ja saman liittimen kautta tai olla erilliset kuten tässä työssä käytetyssä esimerkkiakussa. Liitin tai liittimet voivat sisältää kahdesta kuuteen kontaktia riippuen akun topologiasta (Andrea 2020b, 19). Kuvassa 4 on esitetty akun toinen pääty avattuna. Koteloon on suunniteltu ja toteutettu hyvin toimiva kosteussuojaus tiivistekumilla, joka asentuu päätypalan ja alumiinirungon väliin tiivistäen sen vesitiiviiksi. Päätypalan hex-ruuvit on lisäksi suojattu pienillä kuminpalasilla, joilla varmistetaan kiinnitysruuvien vesitiiveys.



KUVA 4. Akun kotelon tiivistekumi

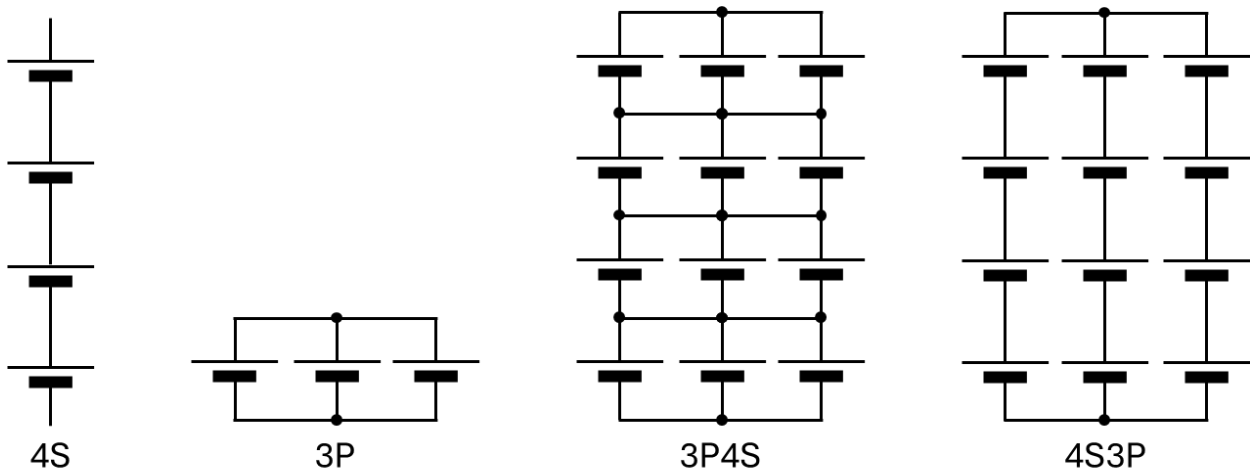
Itse akkupaketin akku voi koostua yhdestä akkukennosta, tai useammasta akkumodulista, jotka sisältävät useita akkukennoja. Akkupaketeissa käytetään tyypillisesti sylinteri-, prismaattisia- tai pussikennoja (Matsumura 2023, 103–104). Kuviossa 3 on esitetty tarkemmin kennotyypit ja niiden rakennetta.



KUVIO 3. Kennotyypit ja niiden rakenne (mukaillen Schröder, Aydemir & Seliger 2017, 105)

Akun jännitteestä ja kapasiteetista riippuen kennot voivat olla kytkettynä sarjaan, rinnan tai näiden yhdistelmään. Yhdistelmäkytkennässä vaihtoehtoja on kaksi, ensin rinnan tai ensin sarjaan. Kennoja sarjaan kytkettäessä kasvatetaan akun jännitettä, kun taas rinnankytkennällä voidaan kasvattaa akun kapasiteettiä. Akun kytkentää kuvataan yleisesti numero- ja kirjainyhdistelmällä, joka kertoo akkukennojen määrän, kytkennän ja kytkentäjärjestyksen. Kuviossa 4 on tästä esimerkki. Käytännössä sarjaan- ja rinnankytkennän järjestystä ei juuri koskaan eritellä, koska kennot kytketään lähes aina ensin rinnan.

Tästä kytkentätavasta huolimatta sarjaankytkentä ilmoitetaan aina ensin. Käytännön ja merkintätavan eroavaisuudet johtuvat siitä, että monikaan ei edes ymmärrä näiden kahden kytkennän eroa. (Andrea 2020a, 144–146.)



KUVIO 4. Akkukennojen kytkentämerkintä (mukaillen Andrea 2020a, 145)

Useamman kuin yhden kennon akkupaketeissa käytetään usein muovisia akkukennotelineitä, joiden avulla kennot pysyvät oikeassa muodostelmassa. Pienempien akkumoduulien tapauksessa voidaan käyttää myös lämpömuovattavaa kutistemuovia. (Andrea 2020a, 317.) Prismaattiset kennot eivät yleisesti vaadi erillistä kennotelinettä, vaan ne voidaan asentaa oikeankokoiseksi suunniteltuun akkukotelon runkoon. Pussikennoja käytettäessä puolestaan käytetään yleisesti akkukennotelineitä, jotka ovat valmistettu muovista tai metallista. (Warner 2015, 133.) Kuvassa 5 vasemmalla on esitetty Augmentin akkumoduuli, jonka päälle on asennettu lämpömuovattava kutistemuovi. Oikealla puolestaan kuva akkumodulista ilman kutistemuovia, jossa nähdään muoviset akkukennotelineet.



KUVA 5. Augmentin käyttämä akkumoduuli lämpömuovattavan kutistemuovin kera ja ilman

Akkupaketissa tai -modulissa yksittäisten pienten sylinterikennojen toisiinsa kytkennät tehdään metalliliuskoilla tai -johteilla, jotka kiinnitetään kennojen napoihin pistehitsaamalla (Arora, Lele, Medora & Sourı 2019, 174). Yleisimmin johdemateriaalina käytetään nikkeliä johtuen sen ominaisuuksista. Puh-

taalla nikkellillä on hyvä sähkönjohtavuus sekä korroosionkesto. Lisäksi nikkelin sähköiset ominaisuudet säilyvät melko stabiilina olosuhteista riippumatta. Näiden ominaisuuksien ohella nikkeli kestää hyvin mekaanista rasitusta ja siitä syystä se soveltuu hyvin pistehitsattavaksi. (Sadeq 2023, 10.) Prismaattisten ja suurien sylinterikennojen kytkennässä ei käytetä pienten sylinterikennojen tapaan pistehitsausta, vaan kennot kytketään toisiinsa kytchentätköiden avulla. Tangot kiinnitetään mekaanisella ruuviliitoksella kennojen napoihin. (Andrea 2020a, 320; Arora 2018, 13.) Pussikennojen liitoksissa käytetään taas useampia liitostapoja, ne voidaan kytkeä pistehitsaamalla, juottamalla tai puristusliitoksella (Arora 2018, 13).

Kuvassa 6 on esitetty Augmentin akun rakennetta tarkemmin. Kuvasta näkee selvästi kolmen akkukennon rinnankytkentä, ja sen millä tavoin sarjaankytkentä on toteutettu pistehitsauksien ja kytchentäliusköiden avulla. Kuvan yläreunassa näkyy punaista eristepahvia, jonka tehtävänä on suojata akkukennoja erityisesti oikosuluilta. Kuvassa näkyy hyvin myös muoviset kennotelineet, joiden avulla kennot pysyvät erillä toisistaan, jotta tärinän aiheuttamia oikosulkuja ei pääse syntymään.

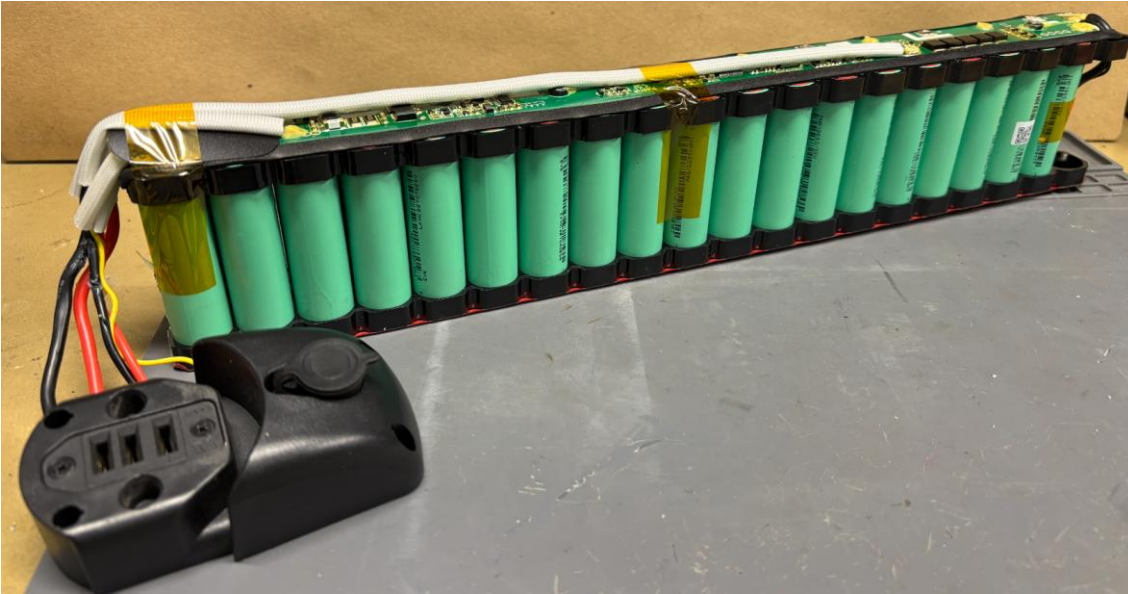


KUVA 6. Augmentin akun rakenne ja pistehitsaukset

Turvallisen ja luotettavan toiminnan takaamiseksi litiumioniakku tarvitsee aina akunhallintajärjestelmän (BMS), jonka tehtävä on mitata ja ohjata akun toimintaa. Kyseinen järjestelmä on yleensä sisäänrakennettu akkupakettiin ja koostuu yhdestä tai useammasta erillisestä piirikortista/yksiköstä. Hallintajärjestelmä suojaa akkua ylilataukselta, syväpurkaukselta, estää akun kuormittamisen ja latauksen oikosulkutilanteissa, tai liian matalissa tai korkeissa lämpötiloissa. (Andrea 2020a, 209; Loznen, Bolintineaanu & Swart 2017, 193–194.) Turvallisuuden ohella BMS optimoi akun toimintaa, joka pidentää akun elinkaarta (Scrosati, Garche, Tillmetz 2015, 266). Akunhallintajärjestelmän teknologia ja tyyppi vaihtelee akun käyttökohteen sekä halutun kustannustason mukaan. Edullisemmissä ja hieman pienemmissä akuissa käytetään usein analogista akunhallintajärjestelmää tai toiselta nimeltään suojapiiriä, joka pystyy mittaamaan kennojen jännitteen, akkupaketin virtaa sekä mahdollisesti lämpötilaa muutamasta eri pisteestä. Analoginen järjestelmä pystyy kommunikoimaan ja ohjaamaan akun toimintaa ainoastaan päälle – pois menetelmällä. Analoginen BMS pystyy myös tasapainottamaan akkupaketin kennojen jännite-eroja ladatessa akkua.

Digitaaliset akunhallintajärjestelmät ovat kustannuksiltaan kalliimpia analogisiin verrattuna ja niiden toiminnot ovat monipuolisemmat. Digitaalinen järjestelmä sisältää laajemman diagnostiikan sekä useampia mittaparametreja, niin yksittäisten akkukennojen kuin koko akun osalta, kuten jännitteet, virrat ja lämpötilamittaukset. Digitaalinen järjestelmä ja kennokohtaiset mittaukset mahdollistavat kennojen aktiivisen tasapainottamisen, joka on passiivista tasapainotusta energiatehokkaampaa. Akun kennojen tasapainotus parantaa akun suorituskykyä ja pidentää käyttöikä. Tämän lisäksi digitaalinen järjestelmä voi mitata akun jännitteen, eristyksen ja syöttöjännitteen. Digitaalinen akunhallintajärjestelmä tukee myös tiedonsiirtoa akun ja sitä käyttävän laitteen välillä. Tämän lisäksi digitaalinen BMS pystyy ylläpitämään tietokantaa akun aikaisemmasta toiminnasta. (Andrea 2020a, 211–239.) Kaikista mahdollisista BMS:n toiminnoista tärkein on pitää huoli siitä, että akun kennoja ei käytetä niiden turvallisten käyttöalueiden ulkopuolella (Warner 2015, 99).

Kuvassa 7 on esitetty Augmentin käyttämä akku, jossa BMS-piiri on asennettu akun päälle levittyen koko akun pituudelle. BMS-piirin liittimelle menevät johtimet on suojattu kotelon sisällä valkoisella suojapunosella oikosulkujen välttämiseksi.



KUVA 7. Augmentin akun rakenne

Kuviossa 5 siniset nuolet osoittavat akun BMS-piirin sarjaan kytkettyjen kennojen valvontakontaktit, joiden avulla mitataan jokaisen yksittäisen kennoryhmän jännitettä. Augmentin käyttämän BMS-piirin cutoff (katkaisu) jännite akun tyhjentäessä on noin 2,70 V ja latauksessa noin 4,23 V (Pirttinen, 2024). Eli kun cutoff saavutetaan, niin BMS-piiri katkaisee akun latausliittimelle ja purkuliittimelle menevät miinuskontaktit. Punaisella nuolella on merkitty toinen lämpötilavalvontaan tarkoitettu lämpötila-anturi. Lämpötilatiedon perusteella akunhallintajärjestelmä suojelee akkua sekä pakkaselta että ylikuumenemiselta.



KUVIO 5. BMS-piirin jännitteenvälvontakontaktit

Edellä mainittujen komponenttien lisäksi akkupakettiin sisältyy erinäinen määrä kaapeleita (Arora, et al 2019, 173) sekä eristemateriaaleja estämään oikosulkujen muodostuminen. Eristemateriaalina voidaan käyttää lähes kaikkia markkinoilla olevia eristemateriaaleja, mutta mikäli eristepaksuuden tulee olla ohut ja lämpöä kestävä, niin tällöin käytetään yleisesti polyimidiä tai teflonia (PTFE) (Bloch, Martinet, Priem & Ngô 2022, 23).

3.2.2 Eri akkukemioiden vertailu ja soveltuvuus sähköpotkulaudoissa

Akkuteknologian kehittyminen viimeisen vuosikymmenen aikana on siivittänyt erilaisten akkukäyttöisten laitteiden yleistymistä. Varsinkin akkujen energiatiheyden parantuminen ja laskeneet kustannukset ovat tuoneet sähköiset kevyet liikkumisvälineet kaikkien kuluttajien saataville. Akkuteknologian kehittyminen tulee jatkumaan kiivaana tulevina vuosina. Tästä huolen pitää muun muassa liikenteen sähköistyminen sekä uusiutuvien energiatuotantomuotojen yleistyminen ja sitä kautta kasvava sähköenergian varastointitarve. Nykyisellään liikkumisvälineissä käytetään pääasiassa litiumioniakkuja johtuen niiden ylivoimaisista ominaisuuksista, kuten korkeasta energia- ja tehottiheydestä. Litiumioniakku on kuitenkin yleisnimitys useille eri akkukemioille, joissa litiumionit toimivat varaustenkuljettajina akun kuormituksen tai latauksen aikana. Litiumioniakkujen kemiat nimetään lähes aina katodimateriaalin kemiallisen koostumuksen mukaan, koska ne määrittelevät akun jännitteen, kapasiteetin sekä syklikeston. Toki akun ominaisuuksiin vaikuttavat myös anodin materiaali ja käytettävä elektrolyytti, mutta tässä alaluvussa keskitytään pääasiassa katodimateriaaleihin ja niiden erityisominaisuuksiin. Lisäksi tarkastellaan eri kennotyyppejä ja niiden soveltuvuutta sähköpotkulautoihin. Valittava akkukemia määräytyy käyttökohteen vaatimusten mukaan, mutta kuten kaikessa suunnittelussa paraskin vaihtoehto on vain kompromissi eri vaatimusten ja ominaisuuksien osalta. Uusia akkukemioita tutkitaan jatkuvasti ja niiden avulla pyritään parantamaan akkujen tehoa, energiatiheyttä, elinikää (syklinkestoa), turvallisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. (Monika, Mishra & Patial 2025, 8.)

Taulukossa 1 on nähtävissä Battery University:n (2024) koostama listaus pääasiallisista litiumionikemioista ja vertailua niiden ominaisuuksista. Kaikki listatut kemiat ovat positiivisella katodilla käytettäviä pois lukien litiumtitanaatti, joka on negatiivisella anodilla käytettävä kemia.

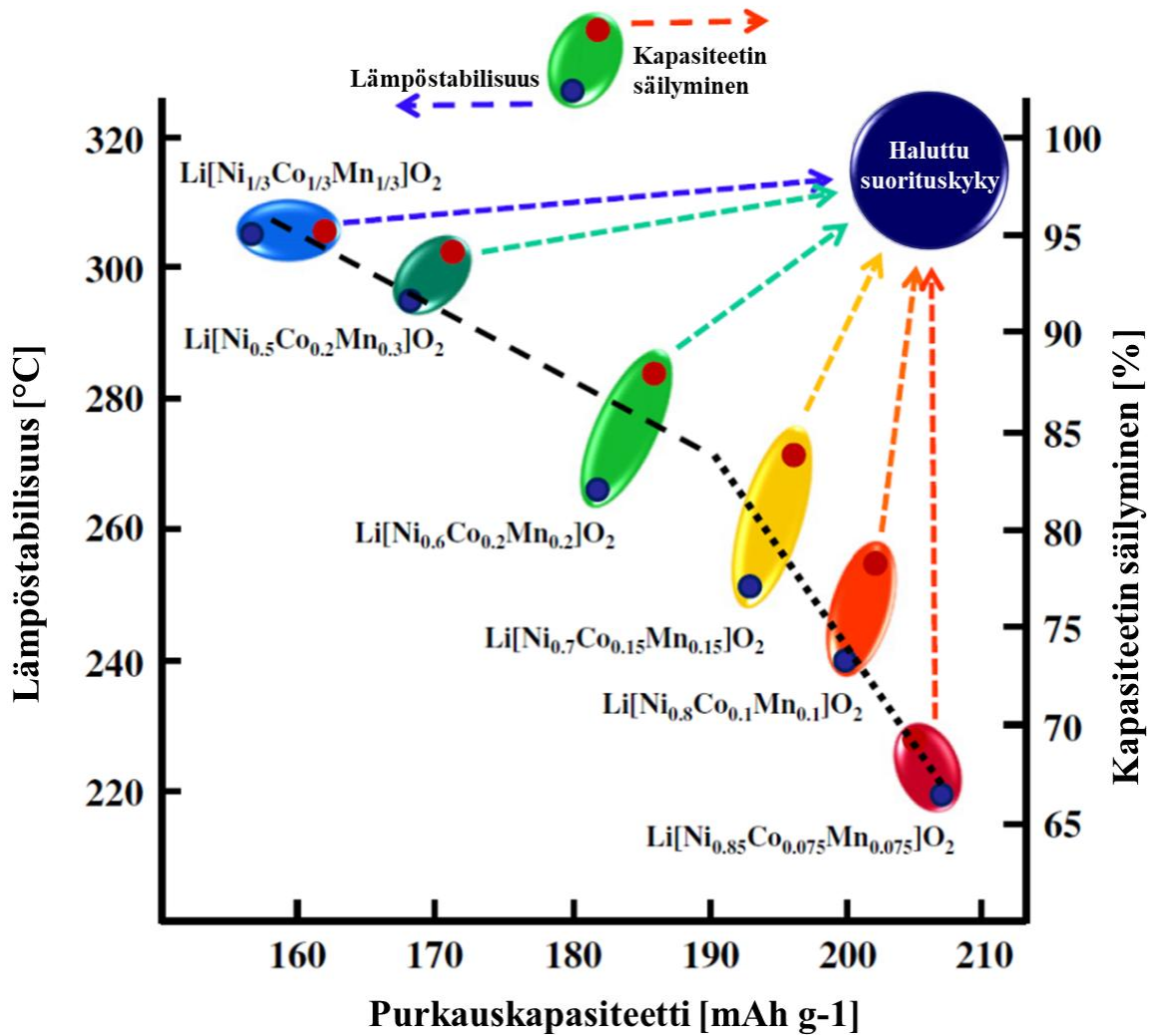
TAULUKKO 1. Litiumioniakkukemiat ja ominaisuudet (mukaillen Battery University 2024)

Kemia	Litiumkoboltti-oksidi	Litium-mangaani-oksidi	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi	Litiumrauta-fosfaatti	Litium-nikkeli-koboltti-alumiini-oksidi	Litiumtitanaatti-oksidi
Lyhyt nimi	Li-koboltti	Li-mangaani	NMC	Li-fosfaatti	Li-alumiini	Li-titanaatti
Lyhenne	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	Li ₂ TiO ₃ (yleinen) (LTO)
Nimellisjännite	3.60V	3.70V (3.80V)	3.60V (3.70V)	3.20, 3.30V	3.60V	2.40V
Täysi lataus	4.20V	4.20V	4.20V (tai korkeampi)	3.65V	4.20V	2.85V
Täysi purkaus	3.00V	3.00V	3.00V	2.50V	3.00V	1.80V
Minimijännite	2.50V	2.50V	2.50V	2.00V	2.50V	1.50V (arvio)
Energiatiheys	150–200Wh/kg	100–150Wh/kg	150–220Wh/kg	90–120Wh/kg	200–260Wh/kg	70–80Wh/kg
Latausnopeus	0.7–1C (3h)	0.7–1C (3h)	0.7–1C (3h)	1C (3h)	1C	1C (5C max)
Purkausnopeus	1C (1h)	1C, 10C mahdollinen	1–2C	1C (25C pulssi)	1C	10C mahdollinen
Syklien määrä (ideaali)	500–1000	300–700	1000–2000	1000–2000	500	3,000–7,000
Lämpökarkaus	150°C (tyhjänä korkeampi)	250°C (tyhjänä korkeampi)	210°C (tyhjänä korkeampi)	270°C (turvallinen täydessä latauksessa)	150°C (tyhjänä korkeampi)	Yksi turvallisimmista Li-ion akuista
Huolto	Pidä viileänä; säilytä osittain ladattuna; vältä täysiä latausjaksoja, käytä kohtuullisia lataus- ja purkuvirtoja					
Kennotyyppi (tyypillinen)	18650, prismaattinen ja pussikenno	prismaattinen	18650, prismaattinen ja pussikenno	26650, prismaattinen	18650	prismaattinen
Historia	1991 (Sony)	1996	2008	1996	1999	2008
Sovellukset	- matkapuhelimet - tabletit, - kannettavat tietokoneet - kamerat	- sähkötyökalut - lääkkinnälliset laitteet, - voimansiirrot	- sähköpyörät - lääkkinnälliset laitteet - sähköajoneuvot - teollisuus	- kiinteät sovellukset, joissa korkeat virrat ja kestävyys	- lääkkinnälliset laitteet - teolliset laitteet - sähköajoneuvot (Tesla)	- UPS - sähköajoneuvot, - aurinkokatuvalaus
Kommentit	- korkea energia - rajoitettu teho - Markkinaosuus on vakiintunut	- korkea teho - vähemmän kapasiteettia; turvallisempi kuin Li-koboltti; usein sekoitettu NMC:n kanssa suorituskyvyn parantamiseksi	- korkea kapasiteetti - korkea teho - markkinaosuus kasvaa - myös NCM, CMN, MNC, MCN	- tasainen purkausjännite - korkea teho - matala kapasiteetti - erittäin turvallinen; kohonnut itsepurkaus	- korkein kapasiteetti - kohtalainen teho - samankaltainen kuin Li-koboltti	- pitkä käyttöikä - nopea lataus - laaja lämpötila-alue - turvallinen - matala kapasiteetti - kallis

LCO eli litiumkobolttioksidi-kemia on tuotu markkinoille jo 90-luvun alkupuolella. LCO:n teoreettinen kapasiteetti on korkea, jopa 274 mAh/g, ja energiatiheys on hyvällä tasolla (Monika, Mishra & Patial 2025, 10). Litiumkobolttioksidi-kemian huonoja puolia ovat huono lämmönkesto ja kapasiteetin heikkeneminen korkeilla virroilla kuormitettaessa tai ladattaessa. (Monika, Mishra & Patial 2025, 10.) Litiumkobolttioksidi-kemiaa ei juurikaan käytetä suurissa akuissa johtuen sen epästabiilisuudesta korkeissa lämpötiloissa, vaan sitä hyödynnetään kannettavien laitteiden pienissä akuissa. LCO-kemian hinta on korkeampi kuin muiden kemioiden, koska se sisältää suhteellisen paljon kallista kobolttia (Warner 2015, 80). Myös Ma (2022, 4) mainitsee kirjassaan Battery Technologies, että litiumkobolttioksidin käyttöä suuremmissa akuissa rajoittaa koboltin korkea hinta sekä sen myrkyllisyys. Tyypillisimmin LCO-kennojen anodina käytetään graffitia (Battery University 2023).

Litiummangaanioksidi-kemian kaupallistaminen tapahtui 1996 ja oli toinen litiumioniakkukemia heti litiumkobolttioksidin jälkeen. LMO:lla on monia etuja litiumkobolttioksiidiin verrattuna. Sen kustannus on huomattavasti pienempi. LMO-kemia on myös huomattavasti ympäristöystävällisempi ja myrkytön. (Arote 2022, 64.) Litiummangaanioksidi-kemia kykenee antamaan korkean tehon lyhytaikaisesti ja tästä syystä sitä onkin käytetty pienemmissä kannettavissa käyttökohteissa. Se ei kuitenkaan sovellu yksinään ajoneuvoakkukäyttöön, sillä sen ominaiskapasiteetti on matala ja syklinen kestävyys heikko (Warner 2015, 80).

Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidi, eli NMC-kemia on yksi yleisimmin käytössä olevista katodikemioista. NMC-kemialla pyritään yhdistelemään eri kemioiden vahvuudet yhteen: kobolttioksidin ja nikkelioksidin korkea energiatiheys, mangaanioksidin korkea teho ja hyvä lämpöstabiilisuus (Hoff 2022, 177). Esimerkkinä NMC111-kemialla saavutetaan 274 mAh/g teoreettinen kapasiteetti, joskin todellinen jää 160 mAh/g tasolle (Korthauer 2018, 36). NMC-kemiasta on useita kaupallisia versioita, joissa nikkelin, koboltin ja mangaanin suhteelliset määrät vaihtelevat. Nykyinen trendi on suuntautunut nikkeliikkaaseen kemiaan, jossa nikkelin määrää kasvatetaan ja koboltin määrä pyritään minimoimaan. Koboltin pieni määrä alentaa akun kustannuksia ja korkea nikkelin määrä puolestaan parantaa akun energiatiheyttä. Toki nikkelin osuuden kasvattamisella on ongelmansa, sillä se alentaa akun syklinkestoa ja lämmönkestoa. (Bloch et al 2022, 25–26.) Kuviossa 6 vertaillaan eri NMC-kemioiden ominaisuuksia lämpöstabiilisuuden, purkauskapasiteetin ja kapasiteetin säilyvyyden osalta. Kuvassa vasemmassa yläkulmassa NMC111 sisältää vähiten nikkeliä ja sen terminen stabiliteetti on korkea, mutta purkauskapasiteetti taas matala. Oikeassa alakulmassa on taas eniten nikkeliä sisältävä NMC851005, jonka energiatiheys on korkea, mutta lämpöstabiilisuus toisaalta huomattavasti matalampi.



KUVIO 6. Eri NMC-kemioiden ominaisuudet (mukaillen Noh, Young, Yoon & Sun 2013, 130)

Litiumrautafoosfaatti (LFP) on ollut markkinoilla jo 1990-luvun loppupuolelta (Korthauer 2018, 39). Sen potentiaali sekä volumetrinen kapasiteetti ovat matalampia verrattuna LCO-, NMC- ja NCA-kemioihin, mutta syklinkesto ja lämpöstabiliteetti puolestaan ovat korkeampia. (Matsumura 2023, 90.) LFP-kennolle on tyypillistä myös tasainen purku- ja latausjännite. Litiumrautafoosfaatti on turvallinen ja suhteellisen edullinen akkukemia, koska se ei sisällä terveydelle tai ympäristölle haitallisia aineita, kuten kobolttia. LFP-kemian hintaetua muihin kemioihin verrattuna kaventaa kuitenkin sen alhainen energiatiheys. (Korthauer 2018, 39–41.)

NCA eli litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi on yksi uusimmista kaupallistetuista aktiivimateriaaleista. Koboltin lisääminen katodimateriaaliin parantaa lataus- ja purkusyklien tehokkuutta. Alumiinin lisääminen puolestaan parantaa aktiivimateriaalin rakenteen kestävyyttä, joka mahdollistaa korkeamman käyttöjännitteen. (Arote 2022, 19.) NCA-kemialla saavutetaan jopa 200 mAh/g kapasiteetti

(Blosch, ym. 2022, 28). NCA-kemiaa käytetään kannettavien sähkölaitteiden ja -työkalujen virtalähteenä (Bloch ym. 2022, 27), mutta myös sähköautoissa, jossa akulta vaaditaan hyvää hinta – energiatiheys -suhdetta (Matsumura 2023, 90). Litium-alumiinikemian heikkoja puolia ovat sen vähäisempi turvallisuus eli lämmönkesto sekä korkea hinta (Battery University 2023).

Litiumtitanaatti (LTO) poikkeaa muista tässä aluvussa käsitellyistä akkukemioista, sillä sitä käytetään ainoastaan anodilla. LTO-akulla on monia etuja normaaliin graffitianodiin verrattuna. LTO-akun syklinkesto on korkeampi ja sillä on erinomainen lataus- ja purkauskyky myös kylmissä olosuhteissa. Huonoina puolina litiumtitanaatilla on sen korkea kustannus, joka on noin kaksinkertainen grafiitipohjaisiin akkuihin verrattuna sekä pienempi energiatiheys. (Nemeth, Schröer, Kuipers & Sauer 2020, 13.) Käytännössä LTO:n ominaiskapasiteetti on parhaimmillaankin noin 140 mAh/g (Bloch ym. 2022, 23).

3.3 Vaatimukset ja suunnittelu

Kuten edellä todettiin, sähköpotkulaudan valmistus aiheuttaa suurimman ympäristövaikutuksen akun elinkaareissa ja pääosin ympäristövaikutukset ovat peräisin alumiinirungon ja akun valmistuksesta (Baumgartner & Helmers 2024, 15). Tästä syystä jo suunnittelussa olisi tärkeä kiinnittää huomiota akkujen elinkaaren pidentämiseen ja huoltotarpeen minimoimiseen.

Akun suunnittelun vaatimukset luodaan käyttökohteen mukaan. Akun käyttökohde asettaa tavoitteet akun eliniän, jännitteen, tyypillisen purkaus- ja lataussyklin, tarvittavan energiamäärän sekä akun kustannusten suhteen. Näiden tietojen pohjalta voidaan alkaa tarkentamaan itse akun ominaisuuksia. (Andrea 2020a, 306.) Esimerkiksi moottorikäytössä akun jännite tulisi määritellä suurimman tarvittavan tehon mukaan. Yleisenä nyrkkisääntönä on, että jännite tulisi olla sellainen, että täydellä kuormalla akku kokee 2Ω kuorman. Yksinkertainen kaava moottorikäyttöön tarkoitettujen akun jännitteen laskemiseen (Andrea 2020b, 165.):

$$U = \sqrt{R * P}, \tag{1}$$

jossa U on jännite [V], R on resistanssi [Ω], P on teho [W].

Kuten aikaisemmin on todettu, akunhallintajärjestelmän tärkein toiminto on huolehtia siitä, että akun kennoja ei käytetä niiden turvallisten käyttöalueiden ulkopuolella (Warner 2015, 99). Tästä syystä akunhallintajärjestelmä tulee suunnitella aina käytetyn akkukemian, käyttökohteen ja akkukapasiteetin

mukaan. Yleisin kennokohtaisten vikojen ilmeneminen johtuu siitä, että akun kennoja on kuormitettu niille soveltumattomalla tavalla joko mekaanisesti, sähköisesti tai lämpötilan osalta. Akunhallintajärjestelmä eli BMS täytyy suunnitella siten, että se pystyy estämään akun ylilatauksen ja ylipurkauksen. Myös purkaus- ja latausvirta tulee pystyä rajoittamaan. Tämän lisäksi käyttölämpötila täytyy ottaa huomioon ja BMS:n on pystyttävä estämään akun kuormittaminen tai lataus liian matalissa ja korkeissa lämpötiloissa. (Arora 2019, 28, 192–193.) Akunhallintajärjestelmällä voidaan vaikuttaa huomattavasti akun elinkaareen. Sisällyttämällä kennojen tasapinottamisominaisuuden BMS-piiriin pystytään minimoimaan akun elinkaarikustannuksia ja optimoida akun elinikää. (Bloch ym. 2022, 291.)

Useista kennotyypeistä sylinterimäinen kenno ja varsinkin 18650 koko on varmasti paras vaihtoehto sähköpotkulaudan akkuun. Kennokoko 18650 on markkinoiden yleisin kennokoko ja ne ovat kestäviä sekä kustannustehokkain vaihtoehto. (Andrea 2020b, 36.) Mikäli asiaa katsotaan eliniän ja huollettavuuden kannalta, voi kyseisten kennojen käyttö olla myös ongelmallista. Tällaisissa akkupaketeissa kennot ovat liitetty toisiinsa pistehitsatuilla nikkeli-liuskoilla, jolloin kennovikojen etsiminen ja yksittäisten kennojen vaihtaminen akkupakettiin on kannattamatonta. (Saw, Ye & Tay 2014, 1043.)

Suojakotelon tulee olla tukeva ja sen on kestävä akun massa. Kotelon tehtävä on suojata akkua ympäristön olosuhteilta, kuten ulkoisilta iskuilta, lisäämättä kuitenkaan liiaksi akkupaketin kokonaispainoa. Akun mekaanisen kotelon on hyvä olla valmistettu palamattomasta materiaalista ja sen täytyy olla sähköisesti eristetty itse akusta. (Andrea 2020a, 417.) Akkukotelon täytyy olla tiivis ja estää veden sekä pölyn pääsemisen kosketuksiin itse akun kanssa. Koteloinnin IP-luokitus on suunniteltava käyttökohteen mukaan. Lisäksi kotelon on estettävä käyttäjää pääsemästä koskettamaan akun jänniteisiä osia. Akun kotelointi voidaan valmistaa teräksestä, alumiinista, muovista tai komposiittimateriaaleista. Metallia käytettäessä on huomioitava akun ja kotelon sähköinen eristäminen sekä kotelon pintakäsittely korroosion ehkäisemiseksi. Muovia käytettäessä on puolestaan huomioitava palonkesto, käyttämällä esimerkiksi raaka-ainetta, johon on lisätty palonsuoja-ainetta. (Warner 2015, 135–137.) Akkupaketin kotelon valmistaminen pelkästään muovista ei kuitenkaan ole suositeltavaa. Muovinen kotelo voi aiheuttaa ongelmia sähkömagneettisen yhteensopivuuden kanssa (EMC) sekä paloturvallisuuden osalta, koska muovimateriaalin sulamispiste on huomattavan alhainen. Tiiviin akkupaketin kohdalla on otettava huomioon koteloinnin sisäiset painevaihtelut sekä mahdollinen kondenssiveden muodostuminen. Ladattaessa ja purettaessa akun lämpötila nousee ja levossa akun lämpötila laskee. Näiden lämpötilavaihteluiden takia kotelon sisällä oleva ilma laajenee tai tiivistyy aiheuttaen kotelon sisäisen painevaihtelun. Yleisesti paine-erojen tasaamiseksi akkukoteloon voidaan lisätä niin sanottu hengitysreikä. Hengitysreikä sisältää ilmaa läpäisevän kalvon, joka estää nestemäisen veden sisään pääsyn. Varsinkin

pienissä akkupaketeissa samainen hengitysreikä voi toimia akun toimintahäiriön sattuessa myös varoventtiilin tavoin vapauttaen ylipaineen haluttuun suuntaan. (Scrosati, Garche & Tillmetz 2015, 257.)

Suuri osa akkujen vikaantumisista johtuu käyttökohteeseen sopimattomista lataus- ja purkuliittimistä. Akut altistuvat elinikänsä ajan tärinälle sekä korrodoiville kaasuille, jotka vaikuttavat liittimiin ja niihin liittyviin osiin kuten terminaaleihin, kaapeleihin sekä kaapelin ja terminaalin liitoskohtaan. Liikkuvaan käyttökohteeseen käytettäviä akkuja suunniteltaessa on myös liittimiin hyvä kiinnittää erityistä huomiota. Liittimeksi tulisi valita lukituksella varustettu malli, mikäli on riski, että liitin voi aueta tärinän vaikutuksesta. Liittimien kontaktien tulisi olla pinnoitettuja kitkakulumisen ehkäisemiseksi. Kaapelin ja liittimen kontaktin puristusliitos tulee olla sellainen, niin että kontaktin puristusliuskat kiinnittyvät sekä itse kaapelin johtimeen että eristeeseen. (Andrea 2020a, 313.) Purkausliittimen oikosulkuvaaran pienentämiseksi tulisi akkupaketin liittimen kontaktien olla naaraspuolisia (Andrea 2020b, 16).

Akkupaketin kennot on yleensä liitetty yhteen pistehitsatuilla nikkeliliuskoilla ja tämän lisäksi kennoihin voidaan juottaa kiinni akkuhallintajärjestelmän jännitemittauskaapelit. Varsinkin juotosliitokset voivat kasvattaa oikosulkuriskiä, koska juotosten terävät reunat voivat rikkoa jännitteisten osien eristekerroksia. Riskin pienentämiseksi juotosliitosten kohdalle voidaan lisätä useampia eristekerroksia. Oikosulkuriskiä voidaan edelleen pienentää sijoittamalla eri potentiaalissa olevat osat ja komponentit mahdollisimman etäälle toisistaan. (Arora ym. 2019, 174.) Omasta kokemuksesta voidaan nostaa esiin myös kaapelien juotosliitosten melko alhainen väsymislujuus. Liitoksen hajoamisen estämiseksi ja oikosulkuriskin pienentämiseksi juotettu johdin tulisi tukea hyvin siten, että tärinä ei pääse aiheuttamaan räsitusta itse liitokseen.

3.3.1 Akkuja koskeva EU:n tuotelainsäädäntö ja CE-merkintä

Euroopan unionin alueella myytävien akkujen tulee täyttää tiettyjen EU:n direktiivien ja asetusten vaatimukset. Tässä alaluvussa esitellään vähimmäisvaatimuksia sähköpotkulaudan akulle EU:n asettamien vaatimuksien mukaan. On kuitenkin hyvä tiedostaa, että akkujen vähimmäisvaatimukset voivat vaihdella riippuen määrittelystä käyttötarkoituksesta ja kohdemarkkinan maakohtaisista lainsäädännöistä. Tämän lisäksi myös Euroopan unionin direktiivejä ja asetuksia voidaan tulkita eri tavalla, jolloin vähimmäisvaatimusten listaus voi erota alla esitetystä.

Elokuussa 2023 voimaan astunut EU:n uusi akkuasetus (2023) tuo huomattavia muutoksia akkujen vaatimuksille Euroopan unionin alueella. Akkuasetus tukee osaltaan Euroopan vihreän kehityksen ohjelmaa, jonka tavoitteena on hiilineutraali Eurooppa 2050 mennessä. Hiilineutraliuden saavuttaminen edellyttää liikenteen sähköistymistä ja fossiilisista polttoaineista eroon pääsyä. EU:n hiilidioksidipäästöjen vähennystavoitteiden vaikutus halutaan ulottaa maailman laajuiseksi, asettamalla samat kestävä hankintaa ja valmistusta koskevat vaatimukset kaikille unionin alueella myytävälle tuotteille. Akut tulevat olemaan merkittävä vihreän liikenteen ja puhtaan energian mahdollistaja. Tämän hetken teknologisella kehityksellä liikenteen hiilineutralius voidaan saavuttaa ainoastaan sähköistymisen myötä ja tästä syystä ajovoima-akkujen kysyntä tulee kasvamaan tulevana vuosina. Akkujen tärkeyden huomioon ottaen, EU on asettanut yhtenäiset säännöt, joiden tarkoituksena on luoda oikeudenmukainen ja tasapuolinen kohtelu akku- ja paristotoimijoille. Akkuasetuksen säännöt koskevat akkujen ja paristojen koko elinkaarta ja asettaa vaatimuksia niiden kestävyydelle, suorituskyvylle, turvallisuudelle, keräykselle, kierrätykselle ja uusiokäytölle. Säännökset koskevat myös erinäisiä tiedonantovelvoitteita loppukäyttäjille ja talouden toimijoille. (Akkuasetus 2023, johdanto, artikkelit 1–3, artikkelit 6–14.)

Akkuasetuksessa (2023, artikla 3) akut ja paristot jaetaan seuraaviin ryhmiin:

- Yleiskäyttöiset kannettavat akut ja paristot
- Kevyiden liikkumisvälineiden akut
- Sähköajoneuvojen ajovoima-akut
- Teollisuusakut
- Ajoneuvoakut

Akkuasetuksen mukaan sähköpotkulautojen akut kuuluvat kevyiden liikkumisvälineiden akkuihin ja kyseistä luokkaa koskevat useat eri akkuasetuksen vaatimukset, joista osa on astunut voimaan jo elokuussa 2023 ja osa aikaisintaan vuonna 2028.

- Akkujen elohopea-, kadmium- ja lyijypitoisuuksille on asetettu painoprosenttirajoitukset (Akkuasetus 2023, liite 1).
- Keveiden liikkumisvälineiden akuille tullaan asettamaan sähkökemiallisen suorituskyvyn ja kestävyuden vähimmäisvaatimukset viimeistään 18.2.2027. Uusien akkujen tulee täyttää asetetut rajat joko 18.8.2028 tai 18 kuukautta vähimmäisvaatimusten julkaisupäivästä, sen mukaan kumpi ajankohta on myöhäisempi. (Akkuasetus 2023, artikla 10.)
- Keveiden liikkumisvälineiden akkujen tulee olla helposti irrotettavia ja vaihdettavia koko laitteen elinkaaren ajan. Akun irrotuksen ja vaihdon täytyy pystyä suorittamaan riippumaton ammattilainen. (Akkuasetus 2023, artikla 11.)

- Keveiden liikkumisvälineiden akuilla tulee olla laadittuna hiilijalanjälki-ilmoitus 18.8.2028 jälkeen. Ilmoituksen tulee sisältää tiedot akun valmistuksen ja käytön aikaisista hiilidioksidipäästöistä. Vuonna 2030 astuu voimaan akkujen elinaikaista hiilijalanjälkeä koskevat hiilijalanjälki-luokat ja niiden luokittelujärjestelmä. Lisäksi vuonna 2031 tulee voimaan elinkaariaikainen enimmäishiilijalanjälki. (Akkusetus 2023, artikla 7.)
- Keveiden liikkumisvälineiden akkujen aktiivimateriaalien tulee sisältää kierrätettyjä materiaaleja asetettujen vähimmäisprosenttiosuuksien mukaisesti. Rajat koskevat kobolttia, lyijyä, litiumia ja nikkeliä. Ensimmäiset vähimmäisvaatimukset tulevat voimaan vuonna 2033, jonka jälkeen vähimmäisvaatimuksia nostetaan vuonna 2036. (Akkusetus 2023, artikla 8.)
- Keveiden liikkumisvälineiden akkujen valmistajien ja valmistajayhteisöjen tulee varmistaa jäteakkujen keräys ja kierrätys. Akkujen keräys- ja kierrätysaste tulee olla vähintään 51 % markkinoille saatetuista akuista viimeistään 2028 vuoden loppuun mennessä ja 61 % vuoden 2031 loppuun mennessä. (Akkusetus 2023, artikla 59.)
- Jokaisella EU:n markkinoille saatetulla kevyen liikkumisvälineen akulla tulee olla akkupassi, eli sähköinen tietue 18.02.2027 alkaen. Akkupassin tulee sisältää kaikille avoimet perustiedot sekä rajoitetulle yleisölle tarkoitetut tiedot akun teknisistä dokumenteista, testausraporteista ja elinkaaren aikaisista käyttötiedoista. Jokaiseen akkuun tulee olla merkitty QR-koodi, jonka kautta akkupassin tietoja pääsee tarkastelemaan. (Akkusetus 2023, artikla 13 ja 77.)

Akkusetuksen 2023/1542 (2023, artikla 20 ja 38) mukaan kaikkien akkujen, myös keveiden liikkumisvälineiden akkujen, tulee olla CE-merkittyjä ennen markkinoille saattamista. Akkusetuksen lisäksi CE-merkin edellytyksenä akkujen tulee minimissään täyttää seuraavien direktiivien ja asetusten vaatimukset: RoHS-direktiivi 2011/65/EU, EMC-direktiivi 2014/30/EU sekä REACH-asetus 1907/2006. (RoHS-direktiivi 2011; artikla 7; EMC-direktiivi 2014, artikla 7; Akkusetus 2023, artikla 6.)

RoHS- ja EMC-direktiivit koskevat kaikkia Euroopan unionin alueen sähkö- ja elektroniikkalaitteita. RoHS-direktiivin rajoittaa tiettyjen vaarallisten aineiden käyttöä ja EMC-direktiivin tarkoituksena on varmistaa, että laite ei aiheuta häiriöitä ympäristön muille laitteille. Sen tulee kestää myös itse ympäristöstä tulevia sähkömagneettisia häiriöitä riittävällä tasolla. (RoHS-direktiivi 2011; artikla 1; EMC-direktiivi 2014, artikla 1.) REACH-asetus taas koskee kaikkia EU:n alueella käytettäviä, valmistettuja tai tuotuja kemikaaleja. Asetuksen tavoitteena on kehittää ihmisten terveyden suojelua ja haitallisten kemikaalien ympäristövaikutusten pienentäminen. (REACH-asetus 2006, 1.)

Akut kuuluvat myös WEEE-direktiivin 2012/19/EU piiriin, joskin direktiivi ei ole osa CE-merkin vaatimuksia. WEEE-direktiivin tavoitteena on vähentää sähkö- ja elektroniikkalaiteromun syntyä sekä edistää romun uudelleenkäyttöä ja kierrätystä. Direktiivi asettaa vaatimukset laitteiden kierrätysmerkinnöille ja määrittelee valmistajan tai maahantuojan tuottajavastuut. (TUKES 2025.)

3.3.2 Akkujen testaus vaatimustenmukaisuuden osoittamiseksi

Akun vaatimuksenmukaisuutta tulee arvioida läpi koko valmistusprosessin eli suunnittelusta itse valmistukseen asti. Yksiselitteisin tapa todentaa vaatimuksenmukaisuus on suorittaa arviointi yhdenmukaistettujen standardien mukaisesti. Valmistajan on mahdollista käyttää myös kansallisia tai kansainvälisiä standardeja. Lisäksi valmistaja voi hyödyntää omia ei-standardoituja menetelmiä, mutta tässä tapauksessa tuotteen teknisen dokumentaation tulee osoittaa lain vaatimusten täyttyminen. (Vaatimustenmukaisuuden arviointi 2024.)

Sähköpotkulaudan akun tapauksessa joudutaan hyödyntämään yleisiä harmonisoituja EMC-standardeja, koska kevyille liikkumisvälineille ei ole määritelty spesifisiä harmonisoituja standardeja. Sähkömagneettinen yhteensopivuuden testaus tulee suorittaa niin immuniteetin kuin päästöjen mukaan (EMC-directive 2025). Yleiset harmonisoidut EMC-standardit löytyvät Euroopan komission nettisivuilta (Directive 2014/30/EU on electromagnetic compatibility 2022, 6).

- EN 61000-6-1:2007 – Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC) - Osa 6–1: Yleiset standardit - Häiriönsieto kotitalous-, toimisto- ja kevyen teollisuuden ympäristöissä.
- EN 61000-6-3:2007/A1:2011/AC:2012 – Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC) - Osa 6–3: Yleiset standardit - Häiriöpäästöt kotitalous-, toimisto- ja kevyen teollisuuden ympäristöissä.

Tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikaan yllä listatut EMC-standardit olivat jo poistuneet käytöstä ja uudemmat versiot EN 61000-6-1:2019 ja EN 61000-6-3:2021 olivat saatavilla. Uusia standardiversioita ei kuitenkaan ollut vielä julkaistu Euroopan unionin virallisessa lehdessä, eikä niitä ollut lisätty yhdenmukaistettujen standardien luetteloon, joten tuotteen vaatimuksenmukaisuus voidaan edelleen osoittaa yllä listattujen standardien mukaisesti. (Standardointi Euroopassa 2023). Lisäksi vaatimuksia sähköpotkulaudan sähkömagneettisen yhteensopivuuden osalta löytyy standardista EN17128:2020

Henkilökohtaiset kevyet sähköajoneuvot (PLEV) – Vaatimukset ja testausmenetelmät, mutta pelkäämään tämän standardin mukaan ei vaatimuksenmukaisuutta voida todistaa, koska kyseessä ei ole harmonisoitu standardi.

RoHS-direktiivin vaatimuksenmukaisuus voidaan osoittaa myös harmonisoidun standardin mukaan.

- EN50581:2012 - Tekninen dokumentaatio sähkö- ja elektroniikkatuotteiden arvioimiseksi vaarallisten aineiden rajoitusten osalta. (Directive 2011/65/EU on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment 2020.)

EU:n akkuasetuksen turvallisuusvaatimusten vaatimuksenmukaisuuden todentamiseen ei löydy harmonisoituja standardeja, joten valmistajan täytyy tukeutua muihin standardeihin tai valmistajan omiin testeihin. Alla on listattuna kaksi standardia, joiden avulla vaatimuksenmukaisuus turvallisuuden osalta voitaisiin todentaa. (Vaatimustenmukaisuuden arviointi 2024.)

- EN 62133-2:2017 + A1:2021 – ladattavat kennot ja akut, jotka sisältävät emäksisiä tai muita hapottomia elektrolyyttejä – Turvallisuusvaatimukset kannettaville suljetuille ladattaville litiumkennoille ja niistä valmistetuille akuille kannettaviin sovelluksiin – Osa 2: Litiumjärjestelmät.
- EN 17128:2020 Henkilökohtaiset kevyet sähköajoneuvot (PLEV) – Vaatimukset ja testausmenetelmät.
- CE-merkin lisäksi valmistajan on hyvä huomioida, että akut määritellään vaarallisiksi aineiksi ja niiden kuljettaminen on tarkoin säädeltyä. Lähes kaikki litiumioniakut ja kennot on täytettävä UN 38.3 vaatimukset, jotta niitä voidaan kuljettaa maalla, merellä tai ilmassa. (Litiumkennojen ja paristojen YK-lähetystesti 2025.)

Itse testauksen lisäksi vaatimuksenmukaisuus edellyttää laitteen teknisen dokumentaation, riskiarvioinnin ja laitteen oikeat merkinnät (Tekniset asiakirjat ja EU-vaatimustenmukaisuusvakuutus 2023). Euroopan unionin akkuasetus asettaa myös lisävaatimuksia teknisen dokumentaation, riskiarvioinnin, akun merkintöjen ja huolellisuustavoitteiden osalta (Akkuasetus 2023, liite VIII ja 49 artikla).

4 VIKAANTUNEIDEN AKKUJEN TUTKIMINEN

Opinnäytetyön tavoitteena oli laatia Augmentille toimintaohje sähköpotkulautojen akkujen elinkaarihuoltoa varten. Tämän tavoitteen saavuttamiseksi tarvittiin myös tietoa Augmentin käyttämien akkujen vioista ja niiden syistä. Näin ollen työhön päädyttiin yhdistämään tutkimuksellinen, empiirinen osa.

Tutkimuksellinen empiirinen osa koostui kolmesta vaiheesta:

1. Ensimmäisessä vaiheessa määritettiin tutkimukselliselle osalle prosessi.
2. Toisessa vaiheessa suoritettiin empiirinen tutkimus Augmentin akkuihin liittyen.
3. Kolmannessa vaiheessa laadittiin toimintaohje, jonka laadintaan hyödynnettiin sekä kirjallisuuskatsauksen että opinnäytetyön tutkimuksellisen osan johtopäätöksiä.

Sähköpotkulaudan toimivuuden näkökulmasta siihen kytketyn akun toimintakunto on ensiarvoisen tärkeässä roolissa. Augment on päätenyt ottamaan sähköpotkulautojen akut elinkaarihuollon piiriin. Elinkaarimallin näkökulmasta on tärkeää pyrkiä maksimoimaan akkujen toimintakyky alkuperäisessä käyttötarkoituksessaan. Akkujen huolto on järkevää tehdä myös kustannuksien näkökulmasta. Akku on yksi sähköpotkulaudan kalleimmista yksittäisistä osista, joten on perusteltua tuoda se elinkaarihuollon piiriin. Jos vikaantunut akku vaihdettaisiin aina uuteen akkuun, merkitsisi tämä Augmentille merkittäviä lisäkustannuksia ja kasvanutta akkujätteen määrää.

4.1 Toimintaohjeen tietoperusta ja toiminnallisen prosessin kuvaus

Toimintaohjeen keskeisimpänä tietoperustana on käytetty opinnäytetyön tekijöiden omakohtaisia empiirisiä kokemuksia akkutekniikasta ja pienelektroniikasta. Valtaosa omakohtaisista kokemuksista on syntynyt sivutoimisen yrittäjyyden ansiosta akkutekniikan parissa. Keskeisessä roolissa toimintaohjeen laatimisen suhteen oli empiirinen tutkimusosa, jossa vika-analysoitiin 12 rikkinäistä ES210-mallin akkua. Tietoperustana on hyödynnetty myös laajaa kirjallisuuskatsausta akkutekniikan vaatimuksenmukaisuuteen ja elinkaarimalliin liittyen. Kirjallisuuskatsaus on esitetty luvussa 3. Tietoja yhdistelemällä on saatu riittävä tietopohja laadukkaan toimintaohjeen laatimiseksi.

Tutkimusprosessin aikana tavattiin Augmentin henkilökuntaa kolme kertaa. Ensimmäisen tapaaminen toteutui Seinäjoella, jossa haastateltiin asiantuntijoita ja tutustuttiin Augmentin toimintaan yhden työpäivän ajan. Toisen kerran tavattiin Teamsin välityksellä. Tapaamisen tavoitteena oli pyytää kommentteja ensimmäisestä toimintaohjeluonnoksesta. Tapaaminen oli tunnin mittainen. Toimintaohjeen toisen luonnosversion lähettämisen jälkeen Augment testasi toimintaohjetta muutaman viikon ajan, minkä jälkeen pidettiin kolmas tapaaminen Teamsin välityksellä. Tässä vaiheessa toimintaohjeeseen tehtiin viimeiset pienet muutokset ja sen jälkeen voitiin todeta sen olevan valmis. Opinnäytetyön tutkimuksellisen osan prosessi on esitetty tiivistetysti kuviossa 7.



KUVIO 7. Tutkimuksellisen osan prosessi

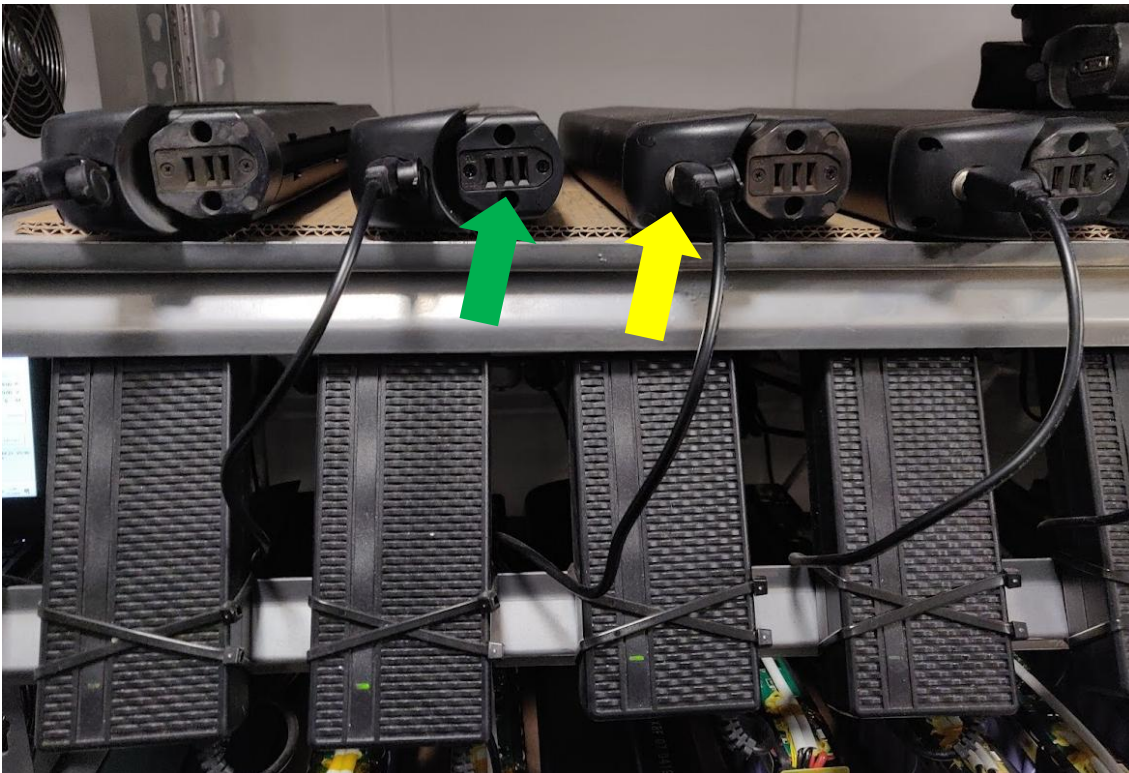
4.2 Empiirinen tutkimus

ES210-mallin akkuja on kapasiteetiltaan kahdenlaisia: 7,5 Ah ja 9,6 Ah. Akkutyypit eroavat toisistaan vain akussa käytettävien kennotyyppien osalta. Akun rakenne on tyyppiä 13S3P eli 13 akkukennoryhmää on kytkettyä sarjaan ja 3 akkua rinnakkain. Akussa käytettävien litiumioniakkukkennojen nimel-

lisjännite on 3,7 V. Tällöin, kun kytketään 13 akkua sarjaan, saadaan koko akkupaketin nimellisjännitteeksi $13 \cdot 3,7 \text{ V} = 48,1 \text{ V}$ eli noin 48 V. Yhdessä akussa on $13 \cdot 3 = 39$ akkukennoa. Kennojen valmistaja on kiinalainen EVE.

Pienemmässä 7,5 Ah akussa käytetään 2,5 Ah ja isommassa 9,6 Ah akussa 3,2 Ah nimelliskapasiteetin 18650-tyypin li-ion kennoja. Sähköenergiaa voidaan nimellisesti varastoida 7,5 Ah akkuun 360 Wh ja 9,6 Ah akkuun puolestaan 460 Wh. Akut ovat rakenteeltaan identtisiä ja ne poikkeavat vain kennojen kapasiteettien osalta. Akku on hyvin iskusuojattu ja tiivistetty vettä vastaan sekä tiivisteiden että liimamassan avulla.

Akku ladataan laturilla, jonka maksimijännite on 54,6 V ja maksimilatausvirta 2 A. Kuviossa 8 on esitetty akun lataus- ja purkuliitännät. Latausliitin on merkitty kuvaan keltaisella nuolella ja purkuliitin vihreällä. Akun ollessa irti potkulaudasta katkeaa purkuliittimen miinuskontaktiyhteys. Kytkettäessä akku potkulautaan, aktivoituu purkuliitin jännitteiseksi. Tällöin potkulauta on mahdollista käynnistää tangon käynnistysnapista. Tämä on yksi turvallisuustekijä. Taulukkoon 2 on kerätty Augmentin ES210-mallin akkujen keskeisimmät ominaisuudet.



KUVIO 8. Akun latausliitännä (keltainen) ja purkuliitännä (vihreä)

TAULUKKO 2. ES210-mallin akun keskeisimmät ominaisuudet

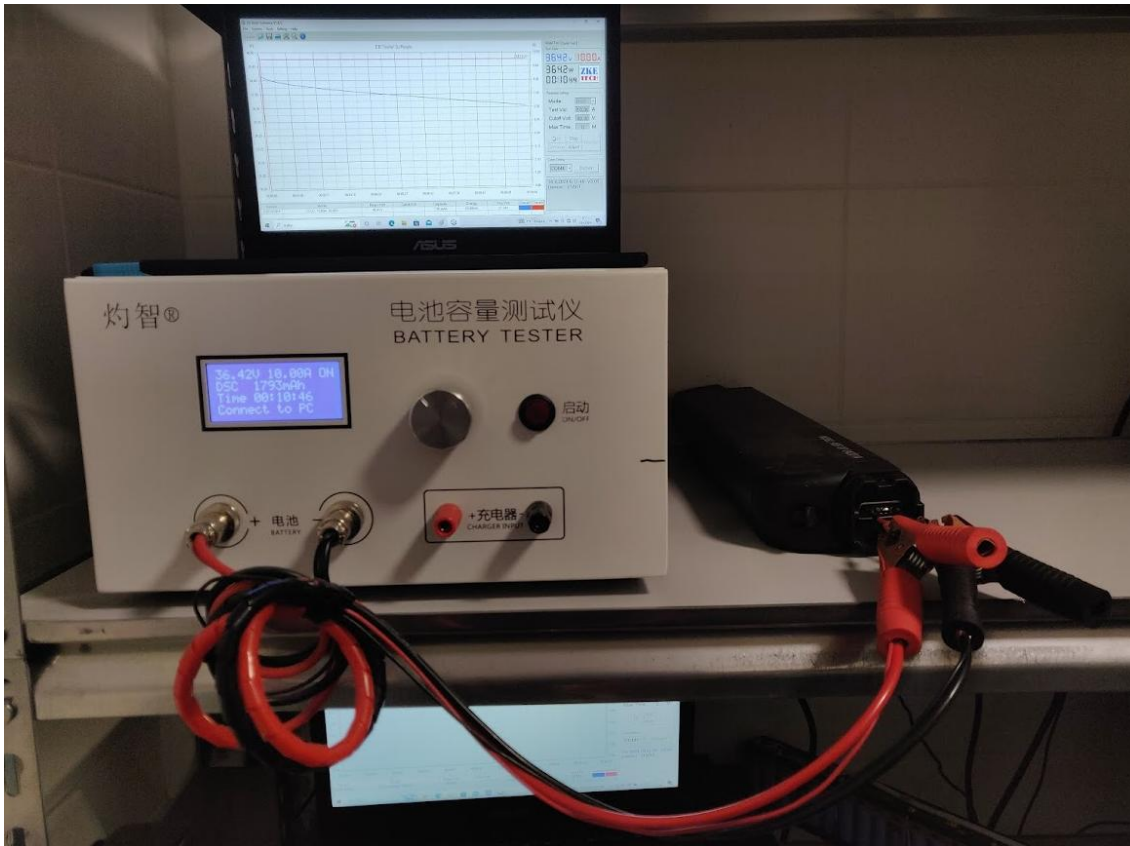
Rungon materiaali	Nimellisjännite	Latausjännite	Cutoff-jännite	Sulake-suojaus	Ilmoitettu kapasiteetti	Energiasisältö	Lämpötila- valvonta
Alumiini	48 V	54,6 V	n. 35 V	30 A	7,5 Ah / 9,6 Ah	360 Wh / 460 Wh	2 anturia

Augmentin huoltotoiminnassa akkujen testaus on tehty ennen tämän opinnäytetyön valmistumista seuraavalla tavalla:

1. Ladataan akku täyteen alkuperäislaturilla (esitetty kuvio 7).
2. Asetetaan akku kapasiteettitestaustilanteeseen (kuva 9) ja kuormitetaan akkua 10 A jatkuvalla kuormalla, kunnes akun BMS-piiri katkaisee akun virran.
3. Luetaan testitulokset ja tehdään päätös, mitä akulle tehdään
 - a. Kapasiteettitestausta keskeytyy tai kapasiteetti on heikko -> akku korjattavien akkujen säilytyspaikkaan
 - b. Akun kapasiteetti on hyvä -> akku voidaan asentaa takaisin potkulautaan

Jos kapasiteettitestauksessa akun virta katkeaa heti, siirretään akku korjattavien akkujen hyllyyn. Suuremmissa 9,6 Ah akkujen kohdalla kapasiteetti, jonka sen mittauksessa tulee saavuttaa, on 400 Wh. Tämä vastaa noin 87 % kapasiteettia suhteessa alkuperäiseen ilmoitettuun kapasiteettiin. Pienemmässä 7,5 Ah akussa tavoitekapasiteetti on 320 Wh eli noin 89 % alkuperäisestä. Jos akku testauslaitteessa ei ylitä tätä raja-arvoa, siirretään akku korjattavien akkujen hyllyyn.

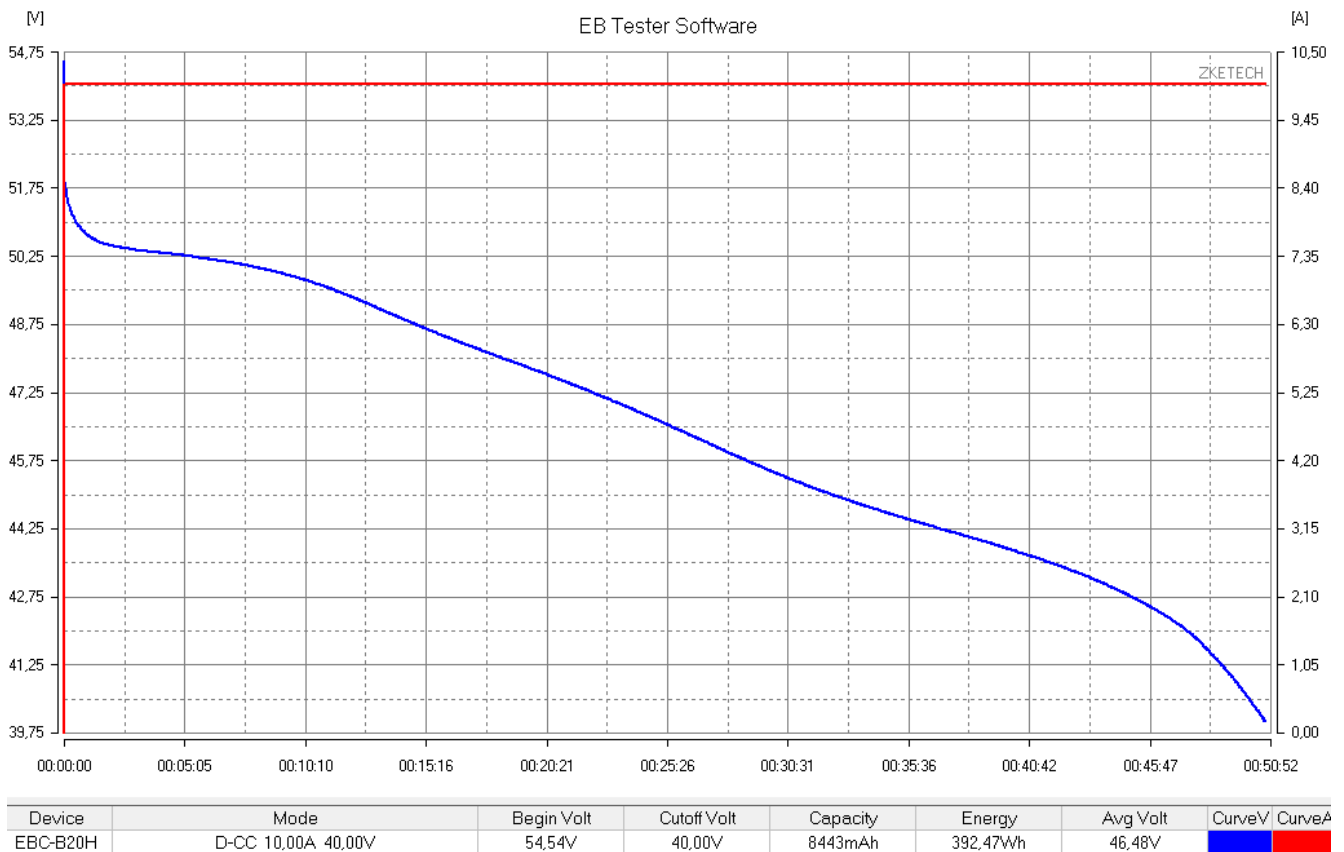
Tutkimukseen saatiin Augmentilta analysoitavaksi 12 akkua, jotka eivät olleet suoriutuneet kapasiteettitestistä läpäisten sitä. Ensimmäisessä vaiheessa akku tarkistettiin visuaalisesti mahdollisten vaurioiden varalta. Yhdessäkään akussa ei ollut havaintoja mekaanisesta vauriosta. Visuaalisen tarkastuksen jälkeen akku kytkettiin lataukseen latausportin kautta. Akkua ladattiin niin pitkään, kunnes lataus lopui, eli laturiin syttyi vihreä valo. Tämän jälkeen akku asetettiin purkutestiin ZKETECH EBC-B20H-kapasiteettitestaustilanteella, joka on esitetty kuvassa 8. Laitteeseen on kytkettävissä PC-tietokone ja kapasiteettitestin voi suorittaa siten, että PC-sovellus piirtää kuormituskäyrän testauslaitteessa. Akkuun kytketään liitinadapteri, johon kytketään testauslaitteen + ja – hauenleukaliittimet. Testissä käytetty jatkuva kuorma asetettiin 10 A, joka vastaa keskimäärin 480 W kuormaa. Yksittäistä akkukennoa kohden kuormitus on tällöin luokkaa 3,33 A, kun kennot on kytketty rinnan siten, että kolme kennoa jakaa kuorman (3P).



KUVA 8. B20H-kapasiteettitestauslaite

Heti kuormitustestin aluksi akkuun kytkettyä liitintä heilautettiin toisella kädellä samalla akusta kiinni pitäen. Tämä paljasti välittömästi, jos akuissa oli liitinvikoja. Heilautuksen avulla saatiin virran syöttö akusta katkeamaan välittömästi, jos akussa oli liitinvika. Liitinvika esiintyi 7 akussa. Liitinviat dokumentoitiin, analysoitiin ja korjattiin. Korjauksen jälkeen akku asetettiin uudelleen kapasiteettitestaukseen. Jokainen akku saatiin lopulta kapasiteettitestattua onnistuneesti ilman akkupaketin täydellistä purkamista.

Kapasiteettitestauslaite tuottaa visuaalisen raportin akun toimivuudesta. Kuviossa 9 on esimerkki kuvaajasta, jonka laite tuottaa. Vaaka-akselilla on esitetty aika (h:min:s), joka testin aloittamisesta on kulunut. Pystyakselilla on esitetty akun jännite (V). Punainen käyrä kuvaa testauksessa käytettyä virtaa (A). Sininen viiva kuvaa testiakun jännitettä hetkellä X. Kuvaajan alareunaan tulostuu testausvirta, testin alkujännite, cutoff-jännite, akun kapasiteetti yksiköissä mAh ja Wh. Aloitusjännite esimerkkiakun (akku 7) testissä on ollut 54,54 V, joten voidaan päätellä sen olleen latautuneena lähes täyteen, koska laturin antama maksimijännite on 54,6 V. Akku 7:n mitattu kapasiteetti oli 392 Wh. Testin purkukäyrä vastaa hyväkuntoisen akun purkukäyrää. Taulukossa 3 on esitetty tiivistetysti tutkimuksen keskeiset havainnot ja kapasiteettitestauksen mittaustulokset.



KUVIO 9. Kapasiteettitestauslaitteen visuaalinen raportti, akku 7

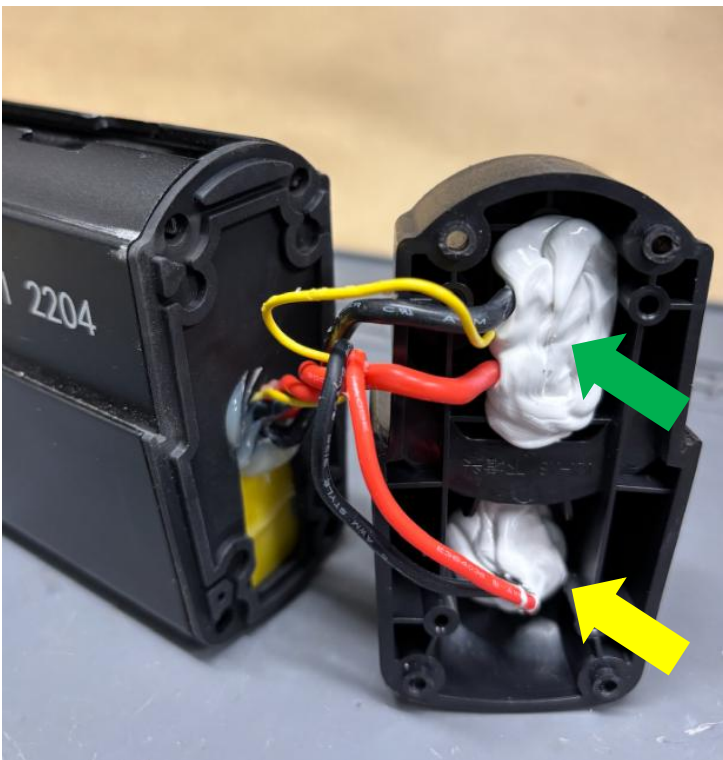
TAULUKKO 3. Vika-analysoitujen akkujen tutkimustulokset

Akku	Nimelliskapasiteetti (Wh)	Mitattu kapasiteetti (Wh) / 10A jatkuva kuorma	Vikakuvaus / Johtopäätös
Akku 1	460 Wh	441 Wh	Liitinrikko, korjattu. Mittaustulos OK.
Akku 2	460 Wh	441 Wh	Liitinrikko, korjattu. Mittaustulos OK.
Akku 3	460 Wh	437 Wh	Liitinrikko, korjattu. Mittaustulos OK.
Akku 4	460 Wh	422 Wh	Kennoissa pientä balanssieroaa, noin 100 mV. Mittaustulos OK.
Akku 5	460 Wh	437 Wh	Liitinrikko, korjattu. Mittaustulos OK.
Akku 6	460 Wh	422 Wh	Kennoissa pientä balanssieroaa, noin 100 mV. Mittaustulos OK.
Akku 7	360 Wh	392 Wh	Ei havaittua vikaa. Mittaustulos OK.
Akku 8	360 Wh	389 Wh	Liitinrikko, korjattu. Mittaustulos OK.
Akku 9	360 Wh	384 Wh	Liitinrikko, korjattu. Mittaustulos OK.
Akku 10	360 Wh	384 Wh	Liitinrikko, korjattu. Mittaustulos OK.
Akku 11	360 Wh	350 Wh	Kennoissa pientä balanssieroaa, noin 100 mV. Mittaustulos OK.
Akku 12	360 Wh	375 Wh	Ei havaittua vikaa. Mittaustulos OK.

Testaustuloksista voitiin tehdä seuraavia johtopäätöksiä:

- Liitinvika aiheutti 7 akun toimimattomuuden 12 testatun akun joukossa. Tämä aiheutti ensimmäisen kapasiteettitestauksen katkeamisen lähes välittömästi testauksen aloittamisen jälkeen. Liitinvikojen korjaamisen jälkeen kaikki akut saatiin testattua ja kaikki akut antoivat hyvän kapasiteettituloksen.
- Kolmessa akussa, eli neljänneksessä testatuista akuista, oli hieman laskenut kapasiteetti. Nämä akut purettiin ja kaikkien kennoryhmien jännitteet mitattiin erikseen. Akkukennojen väliset jännite-erot olivat luokkaa 100 mV. Tämä aiheuttaa pientä kapasiteetin heikkenemistä, mutta ero ei kuitenkaan ollut niin merkittävä, että akku olisi joutunut hylkäämään kapasiteettitestauksessa.
- Kahdessa akussa, eli joka kuudennessa, ei havaittu mitään vikaa. Molempien akkujen kapasiteettitulokset olivat hyviä. On epäselvää, miksi kyseiset akut olivat joutuneet korjattavien akkujen joukkoon Augmentin huoltopaikalla.

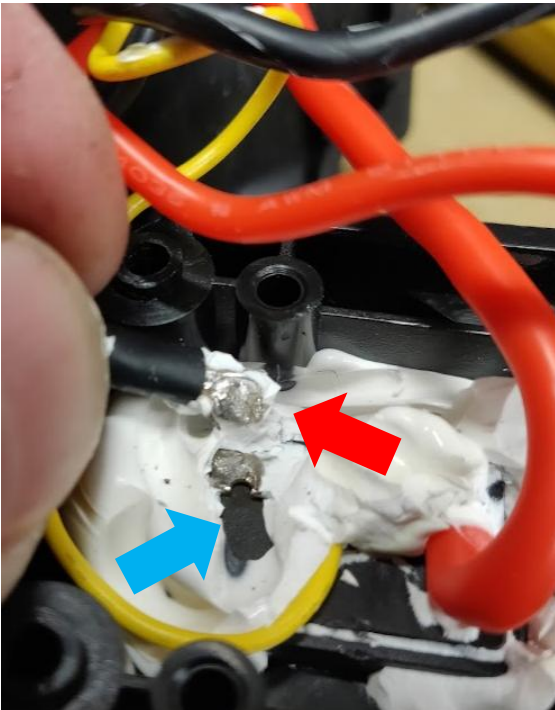
Liitinvika esiintyi suurimmassa osassa viallisista akuista. Jopa seitsemässä viallisessa akussa oli liitinvika, jotka saatiin korjattua. Liittimen yleiskuva akun sisäpuolelta katsottuna on nähtävillä kuviossa 10. Vihreällä nuolella on merkitty akun purkuportti, johon menee kolme johdinta (+, I/O ja -). Keltaisella nuolella on merkitty latausportti, johon menee kaksi johdinta (+ ja -).



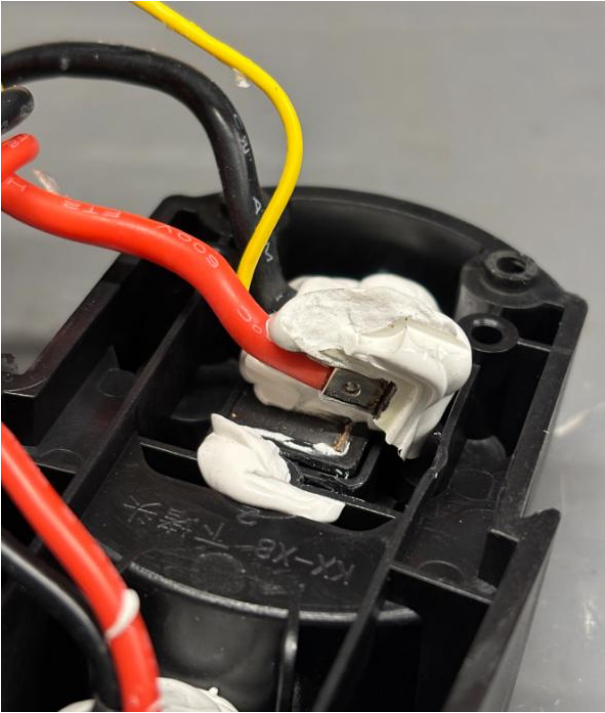
KUVIO 10. Akun liittinpääty avattuna ja kuvattuna sisältäpäin

Liitinastian aiheuttaa sähköpotkulautaan huolimattomasti suunniteltu ja valittu liittintyyppi sekä vedentii-
vistysmenetelmä. Akku asennetaan kiinni pystyputkeen liittinpäätty alaspäin, jolloin akku on jatkuvan
tärinän kohteena. Tämä kohdistaa tärinää liitinrunkoon, jossa eristeenä ja tiivisteliimana käytetty val-
koinen massa tukee liittimen kontaktirunkoja ja siihen juotettua kuparijohtoa siten, että johto katkeaa
juotoksen juuresta. Juotos irtoaa tai kontaktikieli rikkoutuu. Käytetyn massan takia kontaktiliuskaan
liitetty johto ei pääse liikkumaan tärinän tahdissa. Osassa akuissa irronneena oli plusnapa, osassa mi-
nusnapa ja osassa virran kytkemistä varten käytettävä ohuempi keltainen signaali-johto. Kaikissa
akuissa korjaus tehtiin ensin poistamalla vedeneristeenä käytetty massa ja sen jälkeen juottamalla johto
takaisin paikoilleen. Osassa korjauksissa vaihdettiin koko liittinelementti, minkä jälkeen johdot juotet-
tiin takaisin paikalleen.

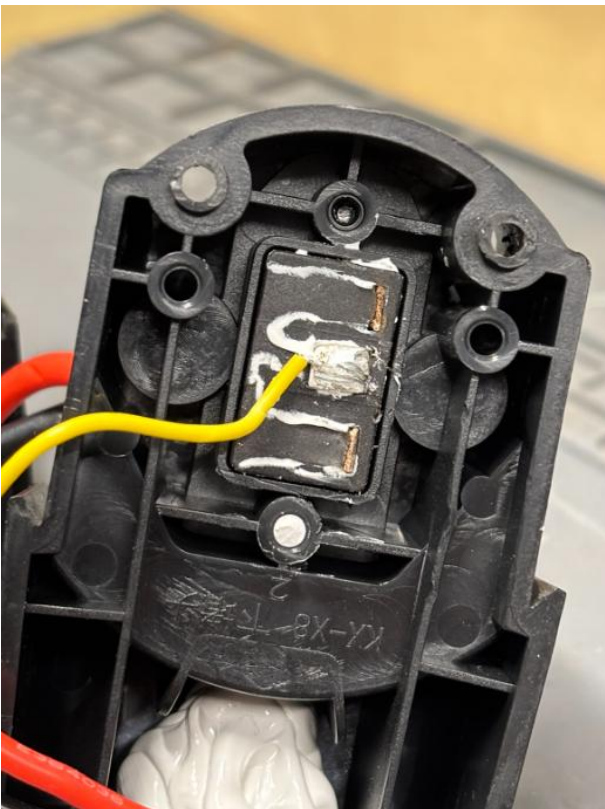
Kuviossa 11 on esitetty tarkemmin tyypillisin liitinviika. Sinisellä nuolella on merkitty kontaktipinta,
jossa punaisella nuolella merkitty miinusjohto on ollut juotettuna kiinni. Johto on irronnut kontaktilius-
kasta tärinän takia. Kuvassa 9 on esitetty toiseksi yleisin liitinviika. Tässä tapauksessa sekä + ja – kon-
taktiliuskat ovat menneet poikki 90 asteen taitoksen kohdalla. Kuvassa 10 on esitetty vielä tämän sa-
man akun liittimen takaosa kokonaan massasta puhdistettuna. Kuvasta voidaan päätellä se, että vika on
ollut molemmissa virtajohtimissa. Keltainen I/O johto on säilynyt tässä tapauksessa ehjänä. Akun kor-
jaaminen vaati koko liitinrungon vaihtamista uuteen.



KUVIO 11. Akun liitinviika havainnollistettuna



KUVA 9. Akun liitinviika, jossa on taitoksestaan poikki mennyt kontaktiliuska

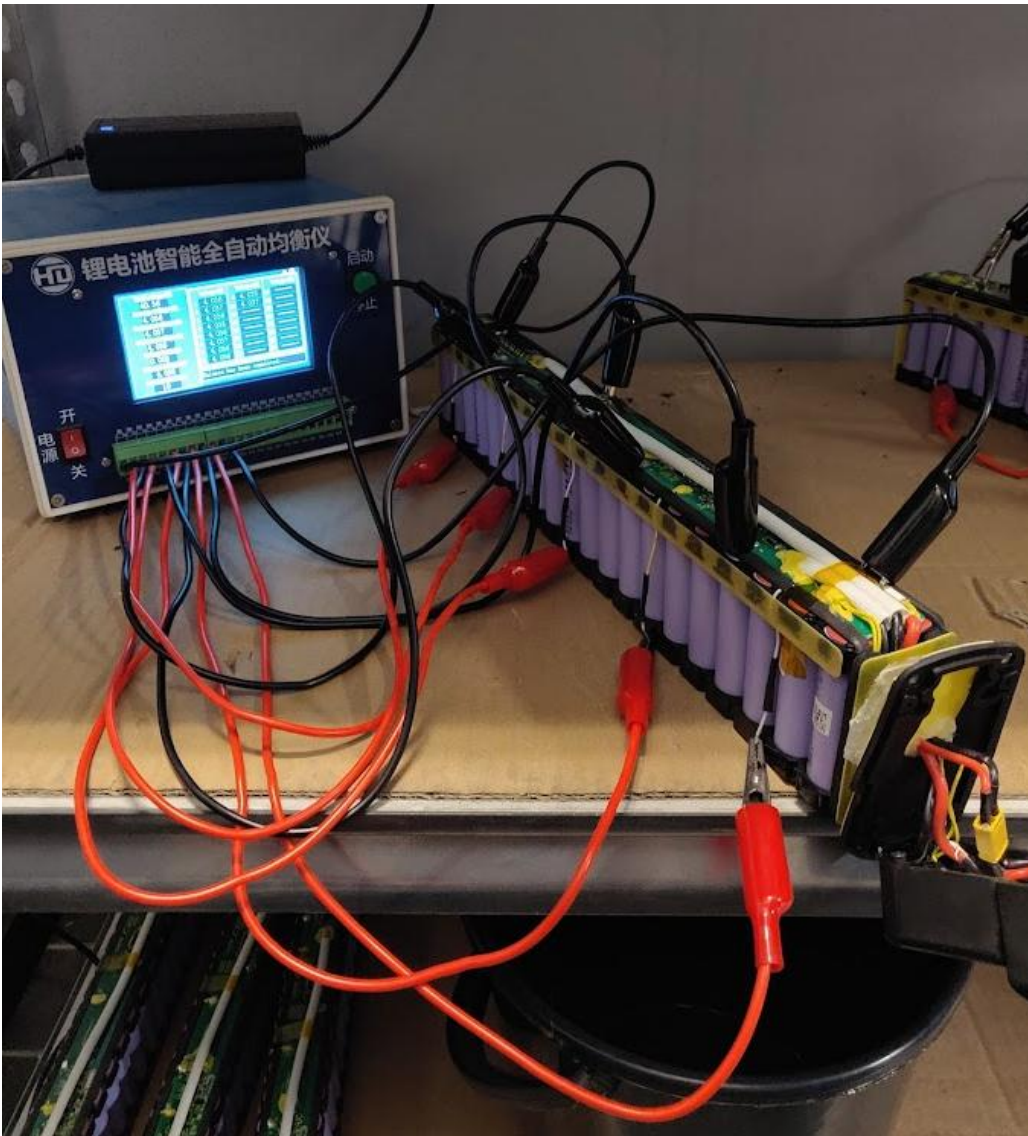


KUVA 10. Liitinviika, jossa taitoksestaan poikki menneet kontaktiliuskat

Kolme akkua päätettiin purkaa perusteellisemmin kapasiteettitestauksen jälkeen. Samalla voitiin tehdä tarkempi tutkimus käytetyn akun rakenteeseen, akkukennoihin ja BMS-piiriin. Akun tiivistys on tehty erinomaisesti. Yhdessäkään akussa ei havaittu kosteuden merkkejä. Koko akkupaketti oli lisäksi kak-sinkertaisen muovikalvon sisällä. Muovinen kehys, johon akkukennot asennetaan ennen pistehitsausta, oli tehty laadukkaasti siten, että akkukennot eivät ole toisiaan vasten. Kennojen pistehitsaukset oli tehty taidolla. BMS-piiri oli akun päällä koko akkupaketin matkalla, mikä on sen jäähtymisen kannalta hyvä asia.

Akussa on kaksi lämpötila-anturia. Lämpötila-anturin tehtävänä on katkaista akun miinuskontakti, joko lataus- tai purkutilanteessa, jos akku kuumenee liikaa. Lisäksi lämpötilavalvonnan tehtävänä on varmistaa, että akkua ei voi ladata turvallisuussyistä pakkasella. BMS-piiri ei ole erityisen kehittynyt, sillä siitä puuttuu automaattibalansointiominaisuus. Automaattibalansointi pyrkii akun latauksen yhteydessä balansoimaan akkua aina siten, että kennoryhmien jännitteet olisivat mahdollisimman lähellä toisiaan. On hyvin tyypillistä, että kennoryhmien välille syntyy ajan saatossa ja useiden purkusykliden aikana pieniä jännite-eroja. Balanssiero aiheuttaa erityisesti akkukennojen laatueroja. Tyypillisesti laadukkaissa merkkikennoissa ilmiö on huomattavasti vähäisempi kuin edullisemmissä markkinoilta saatavissa kennoissa, joissa laadunvalvonta ei ole niin luotettavalla tasolla.

Yksi puretuista akuista päätettiin balansoida. Testaukseen otettiin akku nro 4, joka antoi 422 Wh tuloksen ensimmäisessä mittauksessa. Balansointilaite on esitetty kuvassa 11. Balansoinnin avulla voidaan kaikkien akkukennoryhmien jännite tasoittaa siten, että kennoryhmien välinen jännite-ero on 1 millivoltin tarkkuudella toisistaan. Balansointilaite toimii siten, että jokaisen kennoryhmän päähän asetetaan hauenleukaliitin, jonka avulla jokaisen kennoryhmän jännitettä voidaan mitata. Kytken jälkeen balansointi laitetaan päälle. Tällöin balansointilaite asettaa tavoitejännitteeksi alimman kennoryhmän jännitteen ja purkaa vaiheittain muita kennoryhmiä siten, että asetettu tavoitejännite saavutetaan. Balansoinnin loppuvaiheessa kaikkien akkukennojen jännite on sama millivoltin tarkkuudella. Balansointilaite purkaa sähköenergian lämmöksi siihen sisäänrakennetun vastuksen avulla.



KUVA 11. Akun balansointi käynnissä

Akun balansoinnin jälkeen akku 4 ladattiin takaisin täyteen ja sille suoritettiin uusi kapasiteettitestausta. Uuden kapasiteettitestausta tulokseksi saatiin 441 Wh, eli parannusta tuli noin 4,5 % alkuperäiseen testiin verrattuna. Kokeella voitiin osoittaa se, että akkukennojen balansoinnilla voidaan parantaa akkupaketin kokonaiskapasiteettia, vaikka kennojen välinen balansiero olisi verrattain pieni. Balansoinnista on sitä suurempi etu, mitä suurempi kennojen väliset balansierot ovat. On huomattava kuitenkin se, että balansointi ei välttämättä poista juurisyytä, mikä epäbalanssia on aiheuttanut. Akkupakettia tehtaalla valmistettaessa on tärkeää, että kaikissa akkukennoissa on täsmälleen sama lähtöjännite. Akkupaketeille olisikin hyvä suorittaa kapasiteettitestausta ensin ensimmäistä asennuskertaa sähköpotkulautaan. Tällöin varmistutaan siltä, että kaikissa akuissa on nimellinen kapasiteetti käytettävissä akun ollessa uusi. Balansointi ei kuitenkaan kykene poistamaan akkukennojen välisiä laatueroja, mikä aiheuttaa jännite-erojen syntymistä sekä lataus- että purkusykliden aikana.

5 YHTEENVETO JA POHDINTA

Opinnäytetyön tekeminen oli todella mielenkiintoista. Mielenkiintoiseksi asian teki erityisesti se, että opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa konkreettinen toimintaohje, joka otettaisiin käyttöön Augment Mobilityssä. Toimintaohjeen tarkoituksena oli mahdollistaa akkujen testaaminen, vianetsintä ja korjaaminen. Toimintaohjeen avulla akkujen elinkaaren pituus saadaan maksimoitua. Toimintaohje myös nopeutti akkujen testausta ja mahdollisti uusien akkuhuoltajien perehdyttämisen aiheeseen.

Merkittävässä roolissa toimintaohjeen laatimisen näkökulmasta oli rikkinäisten akkujen tutkiminen. Tässä vaiheessa opittiin paljon Augmentin tuotteesta ja onnistuttiin löytämään keskeisimmät asiat, jotka tuli ottaa huomioon toimintaohjeen laadinnassa. Suurin yksittäinen onnistuminen oli hyvin yleiseksi osoittautuneen liitinviian löytäminen akuista. Pelkästään liitinviian nopea tunnistaminen ja sen korjaaminen nopeutti akkujen elinkaarihuoltoa todella paljon ja vähensi merkittävästi muutoin hylättäväksi tuomittavien akkujen määrää. Akkujen elinkaarihuoltoon liittyvä kirjallisuuskatsaus oli hyvin linjassa käytännössä tehtyjen havaintojen kanssa.

Opimme opinnäytetyöprosessin aikana mielestämme paljon uutta. Hyödyllisintä oli erilaisten tutkimusmenetelmien yhdistäminen, joiden avulla toimintaohje voitiin laatia. Onnistuimme mielestämme hyvin yhdistämään oman aikaisemman osaamisemme, uuden teoriatiedon, asiantuntijoiden haastatteluiden ja empiirisen tutkimuksen tuloksena saadut tiedot. Saimme myös tilaajalta hyvää palautetta työstämme. Tilaaja koki, että he pääsivät vaikuttamaan lopputulokseen siten, että se vastasi juuri heidän tarvettaan ja tavoitelaansa.

Työvaiheiden aikana emme törmänneet erityisiin haasteisiin. On kuitenkin todettava, että jos aikaisempi kokemuksemme akkutekniikasta olisi ollut vähäisempi, on hyvin mahdollista, että toimintaohjeen laadinta olisi ollut hyvin paljon työläämpi prosessi tai lopputulos ei olisi ollut niin onnistunut.

Työn etenemisen näkökulmasta oli erinomaisen hyvä asia, että opinnäytetyö tehtiin parityönä. Tämä mahdollisti toistemme sparraamisen ja oppimisen koko prosessin aikana.

Tämä opinnäytetyö keskittyi täysin Augmentin tämänhetkisten tuotteiden akkuihin. Tässä työssä esitettyjen tulosten ja havaintojen perusteella Augmentilla on halutessaan mahdollista kehittää tuotteita-

tensa akkuja ja sitä kautta tuoda vielä ympäristöystävällisempiä ja vastuullisempia tuotteita asiakkaidensa saataville. Sähköpotkulautaliiketoiminnassa uusia malleja suunnitellaan koko ajan, joten kokemukset aikaisempien mallien kanssa toimivat tuotekehityksen lähtötietoina.

Opinnäytetyömme tuloksena tunnistamme useita eri jatkotutkimusaiheita, jotka auttaisivat parantamaan akkujen elinkaarta ja edelleen pienentäisivät sähköpotkulautojen akkujen ympäristökuormitusta. Tällä hetkellä sähköpotkulautojen akut käyttävät pääasiassa NMC-kemiaa. Yhtenä tutkimuskohteena voisi olla, että voidaanko akkua optimoida tehokkaammin ja ottaa käyttöön LFP-kemiaa huolimattansa alhaisemmasta energiatiheudestä. Tällä tavalla päästäisiin mahdollisesti eroon kalliista ja ongelmallisista siirtymämetalleista. Lisäksi akkujen turvallisuus ottaisi suuren harppauksen eteenpäin vielä vakaammin käyttäytyvän akkukemian myötä. Toisena tunnistettuna tutkimuskohteena voisi olla akkupaketin tuotekehittämisprosessi. Tässä tutkimuksessa olisi hyvä ottaa riskianalyttinen näkökulma tärkeäksi lähtökohdaksi akun suunnittelussa. Viimeisenä havaittuna tutkimuskohteena on akun uusiokäyttö, mahdolliset liiketoimintamallit sekä itse akun suunnittelu uusiokäytön näkökulmasta.

LÄHTEET

Akkusetus. 12.7.2023/2023/1542. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32023R1542>. Viitattu 5.1.2025.

Andrea, D. 2020a. *Lithium-Ion Batteries and Applications. A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns. Volume I. Batteries*. Norwood: Artech House.

Andrea, D. 2020b. *Lithium-Ion Batteries and Applications – A Practical and Comprehensive Guide to Lithium-Ion Batteries and Arrays, from Toys to Towns. Volume II. Applications*. Norwood: Artech House.

Arora, A., Lele, S.A., Medora, N. & Souri, S. 2019. *Lithium-Ion Battery Failures in Consumer Electronics*. Norwood: Artech House.

Arora, S. 2018. *Mechanical Design and Packaging of Battery Packs for Electric vehicles*. Teoksessa Pistoia, G., Liaw, B. (Toim.) *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. Green Energy and Technology*. Saatavissa: https://doi.org/10.1007/978-3-319-69950-9_8. Viitattu 23.12.2024.

Arote, S.A. 2022. *Lithium-ion and Lithium-Sulfur Batteries – Fundamentals to performance*. Bristol, UK: IOP Publishing.

Augment. 2025. *Miksi Augment?* Saatavissa: <https://augment.eco/fi-fi/miksi-augment/>. Viitattu 18.1.2025.

Augment. 2024. *Augmentin tarina*. Saatavissa: <https://augment.eco/fi-fi/tietoa-meista/>. Viitattu 15.9.2024.

Battery University. 2024. *BU-216: Summary Table of Lithium-based Batteries*. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-216-summary-table-of-lithium-based-batteries>. Viitattu 30.12.2024.

Battery University. 2023. *BU-205: Types of Lithium-ion*. Saatavissa: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>. Viitattu 30.12.2024.

Baumgartner, C., Helmers, E. 2024. Life cycle assessment of electric kick scooters: consolidating environmental impact quantification and concluding climate-friendly use options. *Environmental Sciences Europe*, 36, artikkeli numero 96. Saatavissa: <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00920-x>. Viitattu 2.1.2025.

Bloch, D., Martinet, S., Priem, T. & Ngô C. 2022. *Li-ion Batteries – Development and Perspectives*. Science Press, EDP Sciences.

Cãlao, J., Marques, D.L., Completo, A.G. & Coelho, M.C. 2022. Life Cycle Thinking Approach Applied to a Novel Micromobility Vehicle. *Transportation Research Record*, Volume 2676, Issue 8, 514–529. Saatavissa: <https://DOI.org/10.1177/03611981221084692>. Viitattu 23.2.2025.

Directive 2011/65/EU on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. European Commission. 2020. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/41284>. Päivitetty 17.5.2020. Viitattu 5.1.2025.

- Directive 2014/30/EU on electromagnetic compatibility*. European Commission. 2022. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/51314>. Päivitetty 19.9.2022. Viitattu 5.1.2025.
- EMC-directive*. European Commission. Saatavissa: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/electrical-and-electronic-engineering-industries-eei/electromagnetic-compatibility-emc-directive_en?prefLang=fi. Viitattu 6.1.2025.
- EMC-direktiivi*. 26.2.2014/2014/30/EU. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dir/2014/30/oj>. Viitattu 5.1.2025.
- Hoff, M.C. 2022. *Energy Storage Technologies and Applications*. Norwood: Artech House.
- Holmgren, M., Einarson, E. & Rosell, J. 2024. Life Cycle Assessment of Shared Dockless Stand-up E-scooters in Sweden. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Volume 12, Issue 2, 1120508. Saatavissa: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0508>. Viitattu 5.1.2025.
- Korthauer, R. 2018. *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*. Berlin: Springer-Verlag GmbH. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9>. Viitattu 25.11.2024
- Litiumkennojen ja paristojen YK-lähetystesti (UN / DOT 38.3)*. 2025. Saatavissa: <https://www.euro-lab.net/fi/testler/batarya-testleri/lityum-hucreler-ve-pillar-icin-bm-nakliye-testi-un-dot-383/>. Viitattu 6.1.2025.
- Loznen, S., Bolintineanu, C. & Swart, J. 2017. *Electrical Product Compliance and Safety Engineering*. Norwood: Artech House.
- Ma, J. 2022. *Battery Technologies – Materials and Components*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Matsumura, N. 2023. *Practical Battery Design and Control*. Norwood: Artech House.
- Monika, Mishra, A.K., Patial, B.S. 2025. Recent advances in cathode materials for sustainability in lithium-ion batteries. *Sustainable Chemistry One Word*, Volume 5, 100042. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.scowo.2024.100042>. Viitattu 10.3.2025.
- Mårtensson, F. & Renmarker, R. 2024. *Investigating Possible Applications and Business Models of Second-Life Batteries from Electric Scooters*. Lund: Lund University. Master Thesis. Saatavissa: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/9156911>. Viitattu 2.3.2025.
- Nemeth, T., Schröer, P., Kuipers, M. & Sauer, D.U. 2020. Lithium titanate oxide battery cells for high-power automotive applications – Electro-thermal properties, aging behavior and cost considerations. *Journal of Energy Storage*, Volume 3, 101656. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101656>. Viitattu 12.1.2025.
- Neves, A., Ferreira, H., Lopes, F.J. & Godina, R. 2024. Environmental Assessment of Electric Scooters: Unveiling Research Gaps, Analyzing Factors, and Charting Pathways for Sustainable Micromobility. *Procedia Computer Science*, Volume 232, 1400–1411. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.138>. Viitattu 2.3.2025.

- Noh, H.-J., Young, S., Yoon, C.S. & Sun, Y.-K. 2013. Comparison of the structural and electrochemical properties of layered $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$ ($x = 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ and 0.85) cathode material for lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, Volume 233, 121–130. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.063>. Viitattu 31.12.2024.
- Pirttinen, J. 2024. *Huoltopäällikön haastattelu*. 14.6.2024. Augment Mobility Ab. Seinäjoki.
- REACH-asetus. 2006/1907/2006. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/reg/2006/1907/oj>. Viitattu 6.1.2025.
- RoHS-direktiivi. 2011/65/EU. Saatavissa: <http://data.europa.eu/eli/dir/2011/65/oj>. Viitattu 6.1.2025.
- Sadeq, A.M. 2023. *Mechanical Design of Battery Pack*. Qatar Naval Academy. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.18172.92808>. Viitattu 22.12.2024.
- Saw, J.H., Ye, Y. & Tay A.A.O. 2014. *Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack*. *Journal of Cleaner Production*, Volume 113, 1032–1045. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-cleaner-production/vol/113/suppl/C>. Viitattu 6.1.2025.
- Schröder, R., Aydemir, M. & Seliger, G. 2017. Comparatively assessing different shapes of lithium-ion battery cells. *Procedia Manufacturing*, Volume 8, 104–111. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.013>. Viitattu 20.12.2024.
- Scrosati, B., Garche, J. & Tillmetz, W. 2015. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Cambridge: Elsevier Ltd. Saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cop-ebooks/detail.action?docID=2058669>. Viitattu 22.12.2024.
- Severengiz, S., Schelte, N. & Bracke, S. 2021. Analysis of the environmental impact of e-scooter sharing services considering product reliability characteristics and durability. *Procedia CIRP*, Volume 96, 181–188. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.072>. Viitattu 2.3.2025.
- Standardointi Euroopassa. 2023. https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/standards/standards-in-europe/index_fi.htm. Päivitetty 15.11.2023. Viitattu 5.1.2025.
- Traficom. 2024. *Yhteiskäyttöisten sähköpotkulautapalveluiden tarjonta, kysyntä ja markkinatilanne*. Saatavissa: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/yhteiskayttoisten-sahkopotkulautapalveluiden-tarjonta-kysynta-ja-markkinatilanne>. Viitattu 30.11.2024.
- TUKES. *Sähkö- ja elektroniikkalaiteromu – SER, WEEE*. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkolaitteiden-vaatimuksia/sahko-ja-elektroniikkalaiteromu-ser-weee>. Viitattu 5.1.2025.
- Tuominen, M. 2024. *Hankintapäällikön haastattelu*. 14.6.2024. Augment Mobility Ab. Seinäjoki.
- Vaatimustenmukaisuuden arviointi. 2024. Saatavissa: https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/compliance/conformity-assessment/index_fi.htm. Päivitetty 23.2.2024. Viitattu 5.1.2025.
- Warner, J. 2015. *The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design – Chemistry, Components, Types and Terminology*. Oxford: Elsevier Inc.

LIITTEET

LIITE 1. Akkujen elinkaarihuollon toimintaohje - Augment

Akkujen elinkaarihuollon toimintaohje – Augment

Akun elinkaarihuolto on jaettu neljään eri vaiheeseen:

- Vaihe 1: akun testaaminen / kapasiteettitestaus
- Vaihe 2: akun vianetsintä / liitinkorjaus
- Vaihe 3: akun vianetsintä / balansointi
- Vaihe 4: laadunvarmistus

Vaiheen 1 tavoitteena on testata akku osana elinkaarihuoltoa. Akun testaaminen pitää sisällään erityisesti mahdollisen liitinvian tunnistamisen ja akun kapasiteettitestauksen. Kapasiteettitestauksen läpäissyt akku on valmis asennettavaksi takaisin potkulautakäyttöön.

Vaiheen 2 tavoitteena on tunnistaa akun yleiseksi osoittautunut liitinvika ja korjata se.

Vaiheen 3 tavoitteena on korjata heikkoa kapasiteettia aiheuttavien kennoryhmien balanssierot. Työvaiheessa voidaan havaita myös muita vikoja, jotka voivat aiheuttaa akun toimintahäiriöitä.

Vaiheen 4 tavoitteena on varmistaa, että akun korjaus on tehty laadukkaasti ja että akku on valmis potkulautakäyttöön.

Vaihe 1. Akun testaaminen / kapasiteettitestausta

Nro	Työvaiheen kuvaus	Ohje 1	Ohje 2
1.1	Lataa akku täyteen alkuperäislaturilla latausliittimen kautta.	Kun laturiin syttyy vihreä valo Siirry 1.2	-
1.2	Aseta akku kapasiteettitestaustilaan. Aseta liitinapadteri paikoilleen ja mittaa jännite yleismittarilla. Merkitse alkujännite akkuun.	Siirry 1.3	-
1.3	Aseta laitteeseen 10 A jatkuva kuorma ja cutoff-jännite 30 V. Kytke kuorma päälle PC-ohjelman avulla.	Siirry 1.4	-
1.4	Heiluta akun liitinapadteria voimakkaasti kädellä, kun testaus on alkanut.	Testi EI katkea Siirry 1.5	Testi katkeaa Siirry 2.1
1.5	Anna testin jatkua niin pitkään, että akun BMS-piiri katkaisee virran ja kuormitus-testi päättyy.	Siirry 1.6	-
1.6	Lue tulos (Wh) ja merkitse tulos akkuun. 7,5 Ah akun tulos tulee olla >320 Wh 9,6 Ah akun tulos tulee olla >400 Wh	Täyttyy Akku täyttää minimaatimuksen Siirry 1.7	EI täyty Lataa akku täyteen ja Siirry vaiheeseen 3 (vianetsintä)
1.7	Lataa akku täyteen.	Siirry 1.8	-
1.8	Uudelleenlatauksen jälkeen mittaa akun jännite ja varmista, että se on sama kuin ennen kapasiteettitestausta aloittamista.	Sama jännite Siirry 1.9	Jännite laskenut Siirry vaiheeseen 3 (vianetsintä)
1.9	Tarkista lopuksi akun kunto: <ul style="list-style-type: none"> • Ruuvit on kiinni • Tiivisteet on paikoillaan ja ehjät • Alumiinikotelo on ehjä • Päätyosat ovat ehjät 	Akku on valmis asennettavaksi potkulautaan	Balansoitu akku Siirry vaiheeseen 4 (laadunvarmistus)

Vaihe 2. Akun vianetsintä - liitinkorjaus

Nro	Työvaiheen kuvaus	Ohje 1	Ohje 2
2.1	Avaa akun liitinpää (neljä ristipääruuvia)	Siirry 2.2	-
2.2	Poista purkuliittimen sisällä oleva vesieristemassa talttapäämeisselin avulla.	Siirry 2.3	-
2.3	Havaitsetko yhdenkään kontaktijohdon tai kontaktilevyn olevan irti?	EI Siirry 2.4	KYLLÄ Siirry 2.5
2.4	Nykäise liittimen piuhoja. Lähteekö jokin niistä irti?	EI Siirry 2.6	KYLLÄ Siirry 2.5
2.5	<p>Irrota vanha liitin ja korvaa se uudella.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Laita piuhoihin kutistesukat. • Juota kolme kontaktijohto liittimeen. • Kutista kutistesukat paikoilleen kuumailemapuhaltimella. • Asenna liitinpää takaisin paikoilleen ja varmista liittimen tiivisteiden kunto. <p>Merkitse akkuun tehty liittimen korjaus.</p>	Siirry vaiheeseen 1 (testaus)	-
2.6	<p>Jos vaikuttaa, että liitin piuhoineen on kunnossa.</p> <p>Merkitse akkuun tehty liittimen tarkastus.</p>	Siirry vaiheeseen 3 (vianetsintä)	-

Vaihe 3. Akun vianetsintä - balansointi

Nro	Työvaiheen kuvaus	Ohje 1	Ohje 2
3.1	Irrota akun molemmissa päissä olevat liittipäät.	Siirry 3.2	-
3.2	Irrota akkupaketti alumiinikotelon sisältä.	Siirry 3.3	-
3.3	Poista akun muovikuori ja kutistemuovit siten, että akkukennot ja BMS-piiri on kokonaisuudessaan nähtävillä.	Siirry 3.4	-
3.4	<p>Onko akkupaketissa merkkejä:</p> <ul style="list-style-type: none"> • oikosulusta, • palovauriosta, • kosteusvahingosta, • kennojen elektrolyyttivuodoista • potkulaudan käyttäjän tekemistä omista muutoksista ja virityksistä? 	<p>EI</p> <p>Siirry 3.5</p>	<p>KYLLÄ</p> <p>Hävitä akku</p>
3.5	Mittaa jokaisen kennoryhmän jännite (13S) ja merkitse jännite jokaisen akkukennoryhmän kylkeen.	<p>Jännite-ero matalimman ja korkeimman jännitteen välillä on >0,4 V</p> <p>Siirry 3.6</p>	<p>Jännite-ero matalimman ja korkeimman jännitteen välillä on <0,4 V</p> <p>Siirry 3.7</p>
3.6	Lataa alimpien kennoryhmien jänniteitä yksitellen käyttämällä RC-laturia. Lataa kyseiset kennoryhmät korkeimman jännitteen tasolle.	<p>Jännite-ero matalimman ja korkeimman jännitteen välillä on <0,4 V</p> <p>Siirry 3.7</p>	<p>Yksittäisen kennoryhmän jännite on alle 2,0 V</p> <p>Hävitä akku</p>
3.7	<p>Kytke balansointilaite akkukennoihin hauenleukapiuhojen avulla. Varmista ennen balansoinnin aloittamista, että kaikkien kennoryhmien jännite näkyy laitteessa.</p> <p>Kytke balansointi käyntiin.</p>	<p>Balansoinnin jälkeen</p> <p>Vaiheeseen 1 ja sen jälkeen</p> <p>Vaiheeseen 4</p>	-

Vaihe 4. Laadunvarmistus

Nro	Työvaiheen kuvaus	Ohje 1	Ohje 2
4.1	Balansoidut akut	KYLLÄ Siirry 4.2	-
4.2	Jos akku on täyttänyt kohdan 1.6 kapasiteettivaatimuksen ja se on ladattu täyteen kohdan 1.7 mukaisesti odota 1 h. Kytke sen jälkeen purkuliitinadapteri paikoilleen. Mittaa jännite ja merkitse se akkuun.	Siirry 4.3	-
4.3	7 vrk päästä toista jännitemittaus.	Jännite on laskenut <0,5 V Siirry 4.4	Jännite on laskenut >0,5 V Hävitä akku
4.4	Kokoa akku takaisin toimintakuntoiseksi. Asenna uudet kutistemuovit ja asenna liittintivisteet asianmukaisesti. Asenna liittinpäädyt paikoilleen ja tiivistä ruuvien asennusreiät.	Akku on korjattu Akku täyttää vaatimuksen ja sen voi asentaa potkulautaan.	