



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Kari Hiisvirta

# AKKUVARASTOJEN SOVELTUVUUS VEO-eHPG-HYBRIDISÄÄTÄJÄSOVELLUKSIIN

Tekniikka  
2024

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Kari Hiisvirta
Opinnäytetyön nimi	Akkuvarastojen soveltuvuus VEO-eHPG-hybridisäätäjäsovel- lukseen
Vuosi	2024
Kieli	suomi
Sivumäärä	84
Ohjaaja	Mikko Pieskä

---

VEO Oy:n kehittämä VEO-eHPG-hybridisäätäjä yhdistää vesivoimalan turbiinisäätäjän ja sähkövaraston. Tehovasteeltaan nopean sähkövaraston käytöllä pystytään pidentämään vesivoimalaitosten mekaanista käyttöikää taajuussäätökäytössä. Käytännön kokemuksia hybridisäätäjän toiminnasta on vain superkondensaattori-  
varastolla, jonka energiakapasiteetti on rajallinen. Tutkimuksen tehtävänä on selvittää, miten akkuteknologiaan perustuva energiavarasto soveltuisi hybridisäätäjään teknisesti ja taloudellisesti, erityisesti akkujen vanhenemisen näkökulmasta.

Tutkimuksen teoreettinen viitekehys perustuu energianvarastointijärjestelmien ja litiumioniakkuteknologian tutkimukseen, keskittyen erityisesti akkujen vanhenemiseen vaikuttaviin tekijöihin, mutta myös akkujen turvallisuuteen. Keskeisiä käsitteitä ovat syklinen ja kalenterivanheneminen, lataus- ja purkusykli, C-rate sekä lämpökarkaaminen. Tutkimuksessa käytetään hybridisäätäjän testijärjestelmien kuormitusdataa ja julkisia tietolähteitä. Menetelminä ovat hybridisäätäjän eri toimintatilojen analysointi ja akkujen käyttöolosuhteiden tarkastelu.

Tutkimuksessa havaittiin, että litiumioniakkuteknologia tarjoaa mahdollisuuden suurempaan energianvarastointikapasiteettiin verrattuna superkondensaattoreihin. Akkujen vanheneminen riippuu lataus- ja purkunopeudesta, syklien määrästä sekä käyttöolosuhteista. Johtopäätöksenä on, että akkuteknologia on potentiaalinen vaihtoehto VEO-eHPG-hybridisäätäjälle, mutta sen kannattavuus tulee varmistaa akkujen vanhenemista hidastavalla mitoituksella ja käytön optimoinnilla.

---

Avainsanat	energiavarasto, litiumioniakut, vesivoimalat, taajuussäätö, reservit
------------	----------------------------------------------------------------------

## ABSTRACT

Author	Kari Hiisvirta
Title	Suitability of Battery Storage for VEO-eHPG Hybrid Regulator Applications
Year	2024
Language	Finnish
Pages	84
Name of Supervisor	Mikko Pieskä

---

VEO Oy's VEO-eHPG hybrid controller combines a hydropower turbine controller with an energy storage system. By using a fast-response energy storage system, the mechanical lifespan of hydropower plants can be extended in frequency regulation applications. Practical experience with the hybrid controller has so far only involved supercapacitor storage, which has limited energy capacity. The aim of this study is to investigate the technical and economic suitability of a battery-based energy storage system for the hybrid controller, particularly from the perspective of battery aging.

The theoretical framework of the study is based on research into energy storage systems and lithium-ion battery technology, focusing particularly on factors affecting battery aging, as well as battery safety. Key concepts include cyclical and calendar aging, charge and discharge cycles, C-rate, and thermal runaway. The study utilizes load data from hybrid controller test systems and public information sources. Methods include analyzing the different operating modes of the hybrid controller and examining the operating conditions of the batteries.

The study found that lithium-ion battery technology offers a potential for a greater energy storage capacity compared to supercapacitors. Battery aging depends on charge and discharge rates, the number of cycles, and operating conditions. The conclusion is that battery technology is a potential alternative for the VEO-eHPG hybrid controller, but its viability must be ensured through dimensioning and usage optimization that slows down battery aging.

---

Keywords	Energy storage, lithium-ion batteries, hydroelectric power stations, frequency regulation, reserves
----------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

KÄYTETYT LYHENTEET

LIITELUETTELO

1	JOHDANTO .....	12
1.1	Energiamurros.....	12
1.2	Vesivoima.....	13
1.3	VEO Oy.....	14
1.4	VEO-eHPG-hybridisäätäjä.....	14
2	OPINNÄYTETYÖN TAVOITEET JA TUTKIMUSKOhteET .....	16
3	AKKUVARASTOT .....	17
3.1	Erilaiset BESS-sovelluskohteet .....	18
3.2	Järjestelmän osat .....	20
3.2.1	Akusto .....	21
3.2.2	Tehonmuuntojärjestelmä .....	22
3.2.3	Akunhallintajärjestelmä .....	23
3.2.4	Energianhallintajärjestelmä .....	24
3.2.5	Turvajärjestelmät.....	25
3.2.6	Apujärjestelmät .....	26
3.3	Akkutekniikan käsitteet .....	28
3.4	Litiumioniakut .....	31
3.4.1	Rakenne ja toiminta .....	31
3.4.2	Akkukemiat.....	34
3.5	Akun vanheneminen .....	37
3.5.1	Hajoamisvaikutukset ja -tilat.....	37

3.5.2	Hajoamismekanismit.....	38
3.5.3	Vanhenemisen aiheuttajat ja syyt .....	42
3.5.4	Vanhenemistekijöiden vaikutukset akun kuntoon .....	44
3.6	Akkujen turvallisuus .....	49
4	AKKUVARASTO HYBRIDISÄÄTÄJÄSOVELLUKSESSA .....	55
4.1	Asennusympäristö.....	55
4.2	Sähkövaraston kuormitusprofiili.....	58
4.3	Akkugaraston mitoitus .....	65
5	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	68
5.1	Tutkimuksen haasteet ja luotettavuus.....	70
5.2	Jatkotutkimukset.....	71
LÄHTEET	.....	74
LIITTEET	.....	81

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Sähkön tuotannon ennustettu kehitys (Fingrid Oyj, 2024). .....	13
<b>Kuva 2.</b> Erilaisten EES-teknologioiden teho/energiavertailu (Kim ym., 2018, s. 3). .....	18
<b>Kuva 3.</b> FTM ja BTM markkinasegmentit (Saldarini ym., 2023, s. 11). .....	19
<b>Kuva 4.</b> Energiavarastopalvelut eri segmenteissä (Saldarini ym., 2023, s. 13). ....	20
<b>Kuva 5.</b> Akkuenergiavaraston (BESS) arkkitehtuuri (Saldarini ym., 2023, s. 7).....	21
<b>Kuva 6.</b> Akustorakenteen käsitteet (Hesse ym., 2017, s. 3). .....	21
<b>Kuva 7.</b> Topologiat (a) erillis- ja (b) rinnankytketty (Hesse ym., 2017, s. 14). .....	22
<b>Kuva 8.</b> Energiahallinnan yleiskaavio (Byrne ym., 2017, s. 5). .....	25
<b>Kuva 9.</b> Yleiskaavio akkuvaraston toiminnoista (Hesse ym., 2017, s. 11). .....	27
<b>Kuva 10.</b> Akun kokonaiskapasiteetti, SOC ja DOD (Warner, 2015, s. 33). .....	28
<b>Kuva 11.</b> Jännitekäyrä vs. SOC (Yao, 2021). .....	29
<b>Kuva 12.</b> Litiumionikennon rakenne (Yao, 2021). .....	32
<b>Kuva 13.</b> Ionien ja elektronien liike kennossa (Yao, 2021). .....	34
<b>Kuva 14.</b> Litiumionikemioiden ominaisuuksien vertailu (Rey ym., 2023, s. 5). ....	35
<b>Kuva 15.</b> Litiumionien liike kennossa purkuvaiheessa (Farag, 2013, s. 14). .....	36
<b>Kuva 16.</b> Litiumionikennon hajoamismekanismit (Birkel ym., 2017, s. 2). .....	39
<b>Kuva 17.</b> Vanhenemismekanismien syy-, moodi- ja vaikutusyhteydet (Birkel ym., 2017, s. 3). .....	43
<b>Kuva 18.</b> Lämpötilan vaikutus litiumionikennon kalenteri-ikään (Xu ym., 2018, s. 5). .....	44
<b>Kuva 19.</b> Litiumionikemien lämpötila-alueet (Warner, 2015, s. 117). .....	45
<b>Kuva 20.</b> SOC-tason vaikutus litiumionikennon kalenteri-ikään (Xu ym., 2018, s. 5). .....	46
<b>Kuva 21.</b> Käytettävän SOC alueen vaikutus sykliseen ikään (Jiang ym., 2014, s. 3). .....	47
<b>Kuva 22.</b> CC-CV ladatun kennon kapasiteetti eri purkunopeuksilla (Mendoza- Hernandez ym., 2020, s. 2-3). .....	48

<b>Kuva 23.</b> CC ladatun kennon kapasiteetti eri purkunopeuksilla (Mendoza-Hernandez ym., 2020, s. 2-3).....	48
<b>Kuva 24.</b> LFP-kennon syklitesti (a) 1C, (b) 2C ja (c) 5C lataus- ja purkunopeuksilla (Abe ym., 2019, s. 6). .....	49
<b>Kuva 25.</b> Palamisen peruselementit litiumioniakussa (Bisschop ym., 2019, s. 33). .....	51
<b>Kuva 26.</b> Vesivoimalaitoksen päälaitteistot (Corà, 2020, s. 11).....	56
<b>Kuva 27.</b> FCR ja FRR aktivoituminen taajuuden funktiona (Fingrid Oyj, 2022).....	59
<b>Kuva 28.</b> Hybridisäätäjän toimintaa simulointitesteissä (VEO News, 2022). .....	59
<b>Kuva 29.</b> Esimerkkikuvaaja puolijakson energialaskennasta. ....	60
<b>Kuva 30.</b> Esimerkkikuvaaja puolijaksojen energiaspektristä. ....	62
<b>Kuva 31.</b> Vuokaavio SOC-arvoon perustuvasta syklilaskennasta (Gundogdu & Gladwin, 2018, s. 3).....	63
<b>Taulukko 1.</b> C-rate ja lataus- tai purkuaika. ....	30
<b>Taulukko 2.</b> Asennuspaikkavaihtoehtojen vertailu. ....	56
<b>Taulukko 3.</b> Tunnusluvut kuormitusprofiilin näytealueelta. ....	61
<b>Taulukko 4.</b> Syklilaskennan tunnusluvut ja niiden laskenta. ....	64

## KÄYTETYT LYHENTEET

AC	Alternating current
AHI	Ampere hour integration
BESS	Battery energy storage system
BMS	Battery Management System
BTM	Behind the meter
B-TMS	Battery-level thermal management system
C&I	Commercial & Industrial
CAES	Compressed air energy storage
CEI	Cathode electrolyte interphase
DC	Direct current
DOD	Depth of discharge
EES	Electrical energy storage
EFC	Equivalent full cycle
EMS	Energy management system
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EOL	End of life
FCR-D	Frequency containment reserve for disturbances
FCR-N	Frequency containment reserve for normal operations



FES	Flywheel energy storage
FFR	Fast frequency reserve
FTM	Front of the meter
ISC	Internal Short Circuit
LAM	Loss of active material
LFP	Lithium iron phosphate (LiFePO <sub>4</sub> )
LIB	Lithium-ion battery
LIC	Lithium-ion capacitor
LLI	Loss of lithium inventory
MSES	Molten-salt energy storage
NCA	Lithium nickel cobalt aluminium oxide (LiNiCoAlO <sub>2</sub> )
NMC	Lithium nickel manganese cobalt oxide (LiNiMnCoO <sub>2</sub> )
OCV	Open circuit voltage
PCS	Power conversion system
PHS	Pumped hydro storage
PLC	Programmable logic controller
pSEI	Positive solid electrolyte interphase
REDOX	Reduction-oxidation
RFB	Redox flow battery
SC	Supercapacitor

SEI	Solid electrolyte interphase
SMES	Superconducting magnetic energy storage
SOC	State of charge
SOH	State of Health
S-TMS	System-level thermal management system
T&D	Transmission & Distribution
TR	Thermal runaway

## **LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Näyte (500 sek) sähkövaraston teho- ja energiakuormituksesta

**LIITE 2.** Tunnuslukuja kuormitusprofiilin näytealueelta

**LIITE 3.** Energiasyvyysjakaumat

**LIITE 4.** Ekvivalenttisten täyssykliä määrät

## 1 JOHDANTO

Ympäristötietoisuuden ja energiamurroksen tuomien haasteiden kasvaessa on kasvava tarve kehittää innovatiivisia ratkaisuja sähköjärjestelmien hallintaan ja energianvarastointiin. Yksi tällainen ratkaisu on VEO Oy:n kehittämä VEO-eHPG-hybridisäätjä, joka tarjoaa mahdollisuuden merkittäviin säästöihin vesivoimalaitosten käytössä sekä mahdollisuuden tuottaa sähköverkolle tarvittavia reservituotteita.

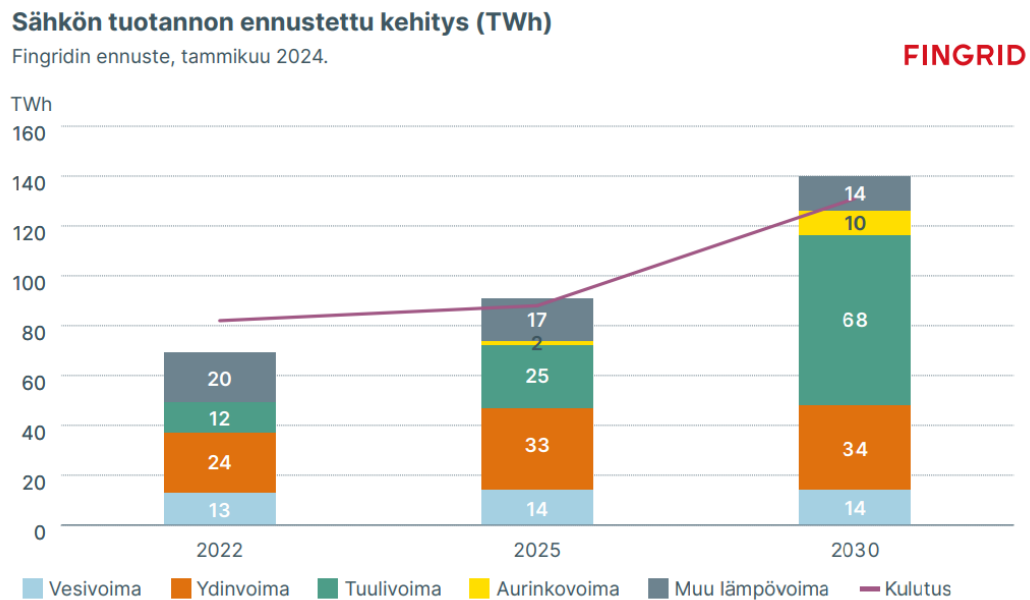
Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia akkuteknologiaan perustuvan energiavaraston soveltuvuutta VEO-eHPG-hybridisäätjäsovellukseen. Akkuteknologian heikkona puolena on rajoitettu elinikä akkukennojen vanhenemisen kautta. Koska investointipäätöksiä ohjaavat usein elinkaarikustannukset, on olennaista saada tietoa siitä, miten akkuvarasto saadaan mahdollisimman pitkäikäiseksi hybridisäätjäsovelluksessa.

Työn lopputuloksena saadaan tietoa, joka voi toimia pohjana investointipäätösten tekemisessä sekä auttaa ymmärtämään paremmin akkujen ja akkuvaraston käyttäytymistä hybridisäätjäsovelluksessa. Tällä tavoin edistetään kestävästi energiantuotannon ja -hallinnan kehitystä kohti yhä tehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä ratkaisuja.

### 1.1 Energiamurros

Energiamurros on nyky-yhteiskunnan merkittävä ilmiö, joka viittaa siirtymiseen perinteisistä fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energialähteisiin. Tämä muutos on välttämätön ympäristön näkökulmasta, kun toimitaan ilmastomuutoksen hidastamiseksi ja energian saatavuuden turvaamiseksi tuleville sukupolville. Uusiutuvista energiamuodoista tuuli- ja aurinkovoima ovat kasvaessaan tuoneet myös haasteita sähköinfrastruktuurille vaihtelevan sähköntuotannon kautta. (Heiska-

nen ym., 2021, s. 124.) Kuvassa 1 on esitetty sähkön tuotannon kehitystä tulevaisuudessa, jossa näkyy kokonaisenergian sekä uusiutuvien tuotantomuotojen osuuksien kasvut.



**Kuva 1.** Sähkön tuotannon ennustettu kehitys (Fingrid Oyj, 2024).

Kantaverkkoyhtiöiden (Suomessa Fingrid) vastuulla on tasapainottaa sähköverkon kulutus ja tuotanto. Epätasapaino sähköverkossa näkyy taajuuspoikkeamana nimelliseen 50 hertsin taajuuteen verrattuna. Sähkömarkkinat varmistavat omalta osaltaan tasapainon, mutta käytönaikainen tasapainotus toteutetaan reservimarkkinoiden kautta hankitulla reservikapasiteetilla. (Mattila, 2023.)

## 1.2 Vesivoima

Vesivoima on ollut kestävä ja uusiutuva energian tuotantomuoto jo vuosisatojen ajan. Aikanaan fossiilisten polttoaineiden käyttö vähensi suhteellisesti vesivoimatuotantoa, mutta nykyisin vesivoima on kuitenkin saanut suurempaa merkitystä

energiaturroksessa, kun maailma pyrkii vähentämään hiilidioksidipäästöjä ja siirtymään kohti puhtaampia energialähteitä.

Vesivoimalla on useita etuja muihin uusiutuviin energialähteisiin verrattuna. Se on luotettava ja ennustettava energianlähde, sillä vesivoimalaitokset voivat tuottaa sähköä jatkuvasti ja tarpeen mukaan säädettävissä olevalla kapasiteetilla. Tämä tarjoaa joustavuutta sähköntuotantoon sääriippuvaisten uusiutuvien energialähteiden, kuten aurinko- ja tuulivoiman, rinnalla. Lisäksi vesivoima voi auttaa tasamaan sähkön kysyntäpiikkejä ja tukemaan sähköverkon vakautta. (Energiateollisuus ry)

### **1.3 VEO Oy**

VEO Oy (ent. Vaasa Engineering Oy) on vaasalainen energia-alan yritys. Tämän vuonna 1989 perustetun yrityksen liiketoiminta keskittyy sähkö- ja automaatioprojekteihin ja -toimituksiin. Muiden liiketoimintasegmenttien lisäksi VEO Oy:llä on vahvat juuret myös vesivoiman saralla. (VEO Oy.)

Yhtiön projektiliiketoiminta alkoi projektilla Savon Voiman Karjalankosken vesivoimalaitokselle (Sippola, 2017, s. 27). Vaikka VEO Oy on syntymänsä alkuajoista laajentunut niin maantieteellisesti kuin liiketoiminnallisesti, on vesivoima edelleen yrityksen yksi tärkeä tukijalka. VEO tekee vuosittain kymmeniä vesivoimaprojekteja asiakkailleen Suomessa, Ruotsissa sekä Norjassa (VEO Oy).

### **1.4 VEO-eHPG-hybridisäätäjä**

VEO-HPG (hydropower governor) on VEO Oy:n kehittämä vesivoimalaitoksen digitaalinen turbiinisäätö- ja ohjausjärjestelmä. Järjestelmä on integroitu laitoksen PLC-pohjaiseen automaatioon muodostaen käytettävyydeltään ja tehokkuudeltaan optimaalisen kokonaisuuden. Laitoskohtaiset ominaisuudet ja asiakastarpeet

huomioidaan järjestelmää suunniteltaessa ja jokainen järjestelmä räätälöidään yksilöllisesti käyttökohteeseensa sopivaksi. Sääötavoista vakioteho-ohjeen lisäksi säädin tukee monipuolisesti sähköverkon taajuustuennan reservituotteita (VEO Oy, 2021.)

VEO Oy:n vuodesta 2018 alkaen kehittämä VEO-eHPG-hybridisäätäjä on uuden sukupolven turbiinisäätöjärjestelmä, mikä tuo perinteiseen turbiinisäätäjään uuden ulottuvuuden sähköenergiavaraston (EES) muodossa. Hybridisäätäjä yhdistää älykkäästi vesivoimalaitoksen turbiinisäätäjän sekä sähköenergiavaraston tavoitteena vähentää taajuussäädön jatkuvien pienten edestakaisten säätöliikkeiden aiheuttamaa mekaanista kulumista vesivoimaturbiinissa ja sen ohjauslaitteissa. Tämän lisäksi hybridisäätäjän ominaisuuksiin kuuluu myös mahdollisuus nopeampien FFR-reservien tuottamiseen. (VEO News, 2023.)

Hybridisäätäjän toimintaa ja ominaisuuksia testattiin kattavasti kehitysvaiheessa simulointimallien avulla. Taajuustuenta ja sen tulevaisuudessa tiukentuvat vaatimukset olivat koko ajan mukana kehitystyötä ohjaavina otsikoina. ENTSO-E:n tulevat vaatimukset testattiin simulaatioilla sähkövaraston koko optimoiden. (VEO News, 2022.)

## 2 OPINNÄYTETYÖN TAVOITEET JA TUTKIMUSKOHEET

VEO Oy:n kehittämä VEO-eHPG-hybridisäätäjällä saadaan merkittäviä säästöjä vesivoimalaitosten mekaanisen käyttöiän kasvun kautta. Tämän lisäksi säätäjän avulla on mahdollista tuottaa sähköverkolle tarpeellisia reservituotteita. Järjestelmään liittyy sähköenergiavarasto ja tällä hetkellä järjestelmästä on paljon simulaatiotutkimuksia, mutta käytännön testikokemusta ja -tietoa löytyy vain superkondensaattoripohjaisella sähkövarastolla toteutettuna.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia akkuteknologiaan perustuvan energiavaraston soveltuvuutta VEO-eHPG-hybridisäätäjäsovellukseen. Työssä käsitellään akkuvaraston kuormitus- ja mitoituskysymyksiä, arvioidaan hybridisäätäjän eri ajotapojen- ja tilanteiden vaikutusta akkuvaraston elinikään. Tutkimuksessa käsitellään myös turvallisuusnäkökulmia arvioimalla akkuvaraston eri asennusympäristöjä laitoskohteissa. Näiden tietojen avulla pyritään saamaan kokonaisvaltainen kuva siitä, miten akkuteknologiaan perustuva energiavarasto soveltuu VEO-eHPG-hybridisäätäjäsovellukseen.

Tämä opinnäytetyö on laadullinen (kvalitatiivinen) tutkimus, jossa teoreettisena pohjana on litiumakkukennojen vanhenemismekanismeihin ja turvallisuuteen liittyvä tutkimustieto. Tutkimuksessa selvitetään kirjallisuudesta, tieteellisistä artikkeleista ja muista tutkimuksista litiumakkujen vanhenemiseen sekä turvallisuuden vaikuttavat käytännön tekijät ja peilataan niitä hybridisäätäjäsovelluksen sähkövaraston toimintaympäristöön.

Tutkimuksessa hyödynnetään VEO-eHPG-hybridisäätäjän toiminnasta saatua tietoa. Sähkövaraston kuormitusta tutkitaan käyttämällä VEO-eHPG-hybridisäätäjän kehitysvaiheessa tallennettua mittausdataa. Tutkimuksessa käytettävä mittausdatan määrä on rajallinen, mutta se on valittu tarkasti, jotta se edustaa tutkimuksen tavoitteiden kannalta mahdollisimman hyvää otosta.



### 3 AKKUVARASTOT

Sähkövarastointi on noussut keskeiseksi aiheeksi energiasektorilla, kun pyritään vastaamaan kasvaviin haasteisiin, kuten energiatehokkuuden parantamiseen, uusiutuvan energian integrointiin ja sähköverkon stabilointiin. Sähkövarastoteknologiat tarjoavat erilaisia ratkaisuja sähkön varastointiin ja joustavaan käyttöön, ja niitä voidaan soveltaa laajasti eri käyttökohteissa.

Sähkön varastointi on kolmivaiheinen prosessi, jossa 1) sähköä otetaan verkosta, 2) varastoidaan ja 3) syötetään takaisin verkkoon tai kulutukseen. Varastoinnilla on kaksi ulottuvuutta: Lataus- ja purkuvaiheiden tehokapasiteetti eli varastointijärjestelmän kyky ottaa tai syöttää sähköä sekä varastointivaiheen energiakapasiteetti eli varastoitavan energian määrä. Sähkövarastoinnilla on erilaisia käyttötarkoituksia, joissa vaatimukset näiden ominaisuuksien osalta poikkeavat toisistaan. (Decourt ym., 2018, s. 3.)

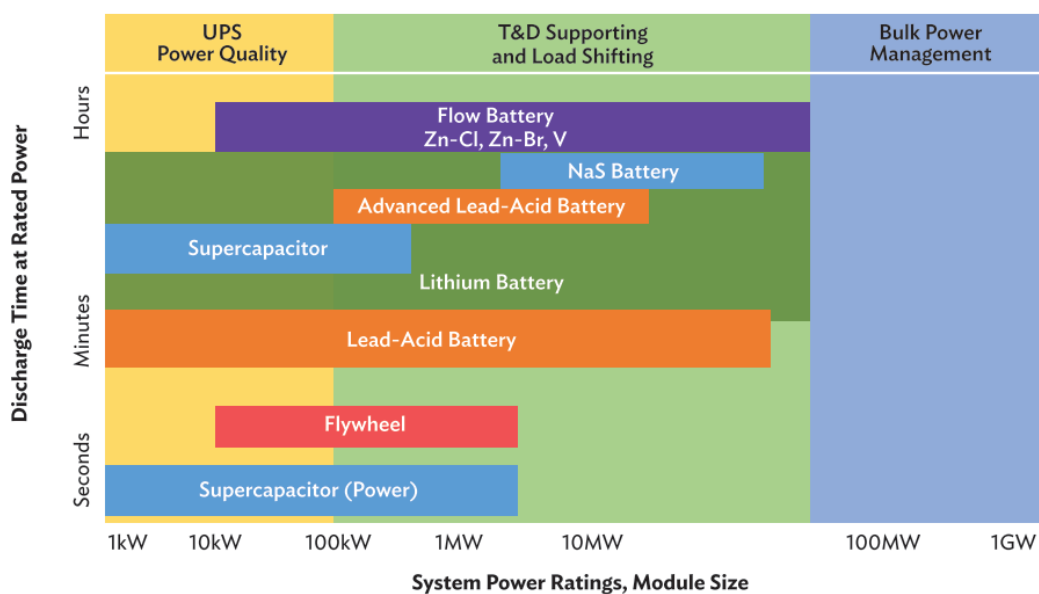
Sähkövarastoteknologioita on paljon erilaisia, mutta niitä voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan seuraavasti (Decourt ym., 2018, s. 21):

1. Mekaaniset
  - a. Pumppuvoimalat (PHS)
  - b. Paineilmavarastot (CAES)
  - c. Vauhtipyörät (FES)
2. Termiset (lämpö)
  - a. Molten-suola-akut (MSES)
3. Sähkömagneettiset
  - a. Superkondensaattorit (SC)
  - b. Suprajohtavat magneetit (SMES)
4. Sähkökemialliset
  - a. Li-ion -akut (LIB)
  - b. Natrium-akut (NaS)
  - c. Virtausakut (flow batteries, RFB)

## 5. Kemiaalliset

### a. Power-to-X (vety, synteettinen maakaasu, ammoniakki, metanoli)

Jokaisella varastointityypillä on omat toimintaperiaatteensa, etunsa ja haasteensa, mikä joko mahdollistaa tai estää niiden käytön erilaisissa sovelluksissa ja ympäristöissä (**Kuva 2**). Esimerkiksi akkuvarastot (BESS) tarjoavat nopeaa ja skaalautuvaa energian varastointia, kun taas pumppuvoimalaitokset (PHS) voivat tarjota suuren kapasiteetin ja pitkäaikaisen varastoinnin mahdollisuuden. (Kim ym., 2018, s. 3.)

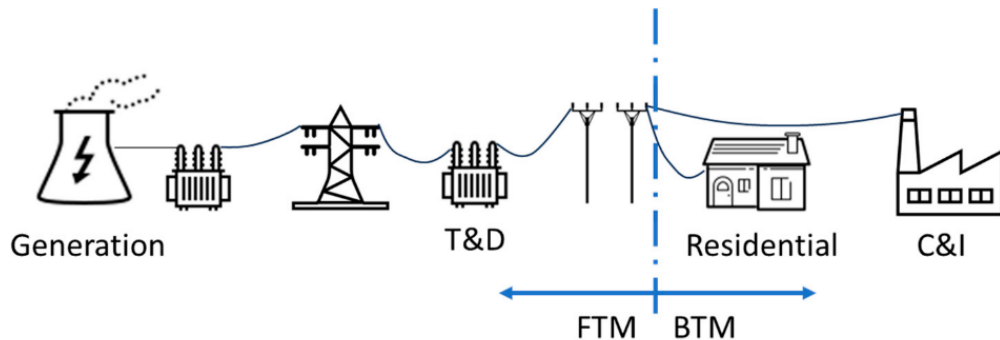


**Kuva 2.** Erilaisten EES-tekniikoiden teho/energiavertailu (Kim ym., 2018, s. 3).

### 3.1 Erilaiset BESS-sovelluskohteet

Monipuolinen ja skaalautuva akkuteknologia energiavarastoratkaisuna mahdollistaa laajan sovelluskohteiden kentän. Sovelluskohteiden kenttä jakaantuu kahteen

markkinasegmenttiin ”Front of the Meter” (FTM) ja ”Behind the Meter” (BTM). Laskutusmittariin viittaavien nimiensä mukaisesti sovelluskohteet voivat olla sähköverkko-operaattorien ja energiatuottajien tai sähkön kuluttajien puolella. (Saldarini ym., 2023, s. 10.) Kuvassa 3 on havainnollistettu näiden eri segmenttien sisältöä ja niiden välistä rajaa.



**Kuva 3.** FTM ja BTM markkinasegmentit (Saldarini ym., 2023, s. 11).

Jakeluverkkojen sekä sähköntuotantoyksiköiden akkuvarastojärjestelmien (FTM BESS) kokonaiskapasiteetti voi vaihdella muutamista megawattitunneista (MWh) jopa satoihin. Järjestelmien osat ovat tyypillisesti rakennettu modulaarisiin rakenteisiin muodostaen skaalautuvan ja joustavan järjestelmän. FTM BESS -järjestelmän ensisijainen tarkoitus on varastoida ylimääräistä sähköä, jota tuotetaan alhaisen kysynnän tai suuren uusiutuvan energian tuotannon aikana. Varastoitua energiaa syötetään sähköverkkoon korkean kysynnän tai uusiutuvan energian tuotannon ollessa matalalla tasolla. Näin FTM BESS auttaa tasapainottamaan sähkön kysyntää ja tarjontaa varmistaen vakaan ja luotettavan sähkönjakelun. (Saldarini ym., 2023, s. 10.)

BTM BESS on akkuvarastojärjestelmä, joka sijaitsee sähkönkuluttajan puolella sähkömittarista katsoen. Se tarjoaa asiakkaalle erilaisia etuja, kuten sähköenergiakustannusten alentaminen, energiaomavaraisuuden lisääminen ja häiriönsietokyvyn

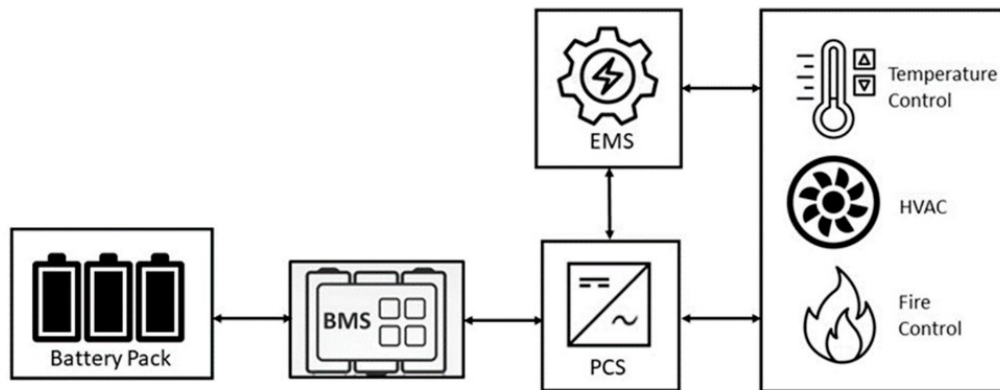
parantaminen. BTM BESS koostuu tyypillisesti litiumioniakkupankista ja sen kapasiteetti voi vaihdella kohteen ja tarpeiden mukaan yhdestä kilowattitunnista (kWh) useisiin megawattitunteihin (MWh). Suuren kapasiteetin BTM BESS -järjestelmät ovat pääasiallisesti kaupallisiin kohteisiin ja teollisuuden laitoksiin, kun taas pienen kapasiteetin varastoja käytetään kotitalouksissa. BTM BESS :n ensisijainen tarkoitus on varastoida sähköä alhaisen kysynnän aikana tai silloin, kun sähkön hinta on alhainen. (Saldarini ym., 2023, s. 11.) Kuvaan 4 on koottu molempien markkinasegmenttien palvelut ja tarkemmat sovellukset.

Segmentti	Palvelut	Käyttötapaus/sovellus
"mittarin edessä" <b>FTM</b> (tuottaja/jakelija)	Energiapalvelut	Sähkön toimituskapasiteetti Sähköenergian ajallinen siirtymä (arbitraasi)
	Oheispalvelut	Taajuuden säätö Jännitetuki Kylmäkäynnistys Keinoinertia
	Verkon tukeminen (siirto ja jakelu)	Siirtopalvelut (lisäinvestointien lykkääminen ja kuormittumisen lieventäminen) Jakelupalvelut (lisäinvestointien lykkääminen ja verkon tukeminen)
	Uusiutuvan energian integrointi	Uusiutuvan kapasiteetin tasaaminen
	Energianhallintapalvelut	Kulutushuippujen tasaaminen Tehonlisäyksen lykkääminen Käyttöajankohtainen energiakustannusten hallinta Omatuotannon maksimointi/optimointi Uusiutuvien energialähteiden integrointi Varavoima Sähkön laatu Loistehon kompensointi Energiaomavaraisuus EV pikalataus
"mittarin takana" <b>BTM</b> (loppukäyttäjä)		

**Kuva 4.** Energiavarastopalvelut eri segmenteissä (Saldarini ym., 2023, s. 13).

### 3.2 Järjestelmän osat

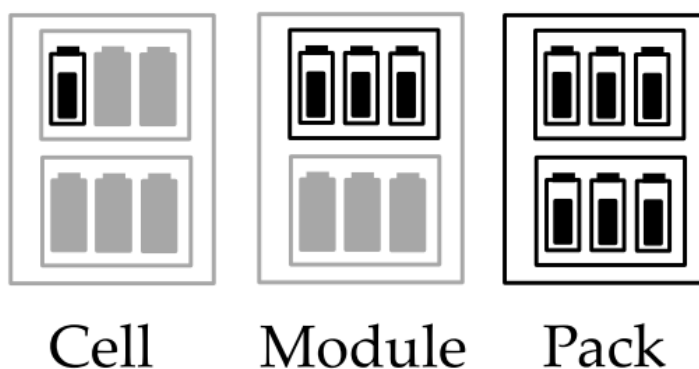
Tässä luvussa kuvataan tyypillisen siirtoverkko- tai sähköntuotantosovelluksessa käytettävän FTM BESS -järjestelmän rakennetta ja sen osajärjestelmiä. Tällaisen energiavaraston arkkitehtuuri on kuvan 5 mukainen.



**Kuva 5.** Akkuenergiavaraston (BESS) arkkitehtuuri (Saldarini ym., 2023, s. 7).

### 3.2.1 Akusto

Akkuvaraston tärkein osakokonaisuus on luonnollisesti akusto (eng. *battery*). Akuston ydinosana on akkumoduulit (eng. *module*), jotka on liitetty toisiinsa ja muodostavat kokonaisuuden suuremmaksi akkupaketiksi (eng. *pack*). Nämä moduulit koostuvat tyypillisesti useista yksittäisistä akkukennoista (eng. *cell*), joiden kytkennöillä sarjaan ja rinnakkain saadaan akkumoduulille haluttu jännite ja kapasiteetti. (Saldarini ym., 2023, s. 5.) Kuvassa 6 on havainnollistettu akustoon liittyvien käsitteet ja niiden erot.

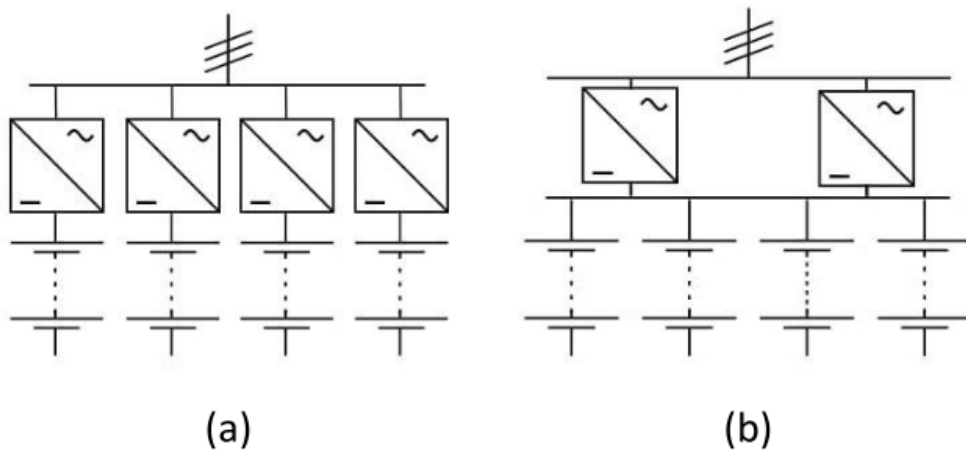


**Kuva 6.** Akustorakenteen käsitteet (Hesse ym., 2017, s. 3).

### 3.2.2 Tehonmuuntojärjestelmä

Tehonmuuntojärjestelmä (PCS) koostuu osajärjestelmistä ja -laitteistoista, mutta järjestelmän ytimenä on vaihtosuuntaajat eli invertterit. Puolijohdeteknologiaan perustuvat invertterit muuntavat akkuihin varastoidun tasasähköenergian (DC) vaihtovirraksi (AC). FTM BESS-järjestelmät liitetään tyypillisesti keskijänniteverkkoon, jolloin tarvitaan muuntaja verkon ja tehomuokkaimien väliin. (Saldarini ym., 2023, s. 6.)

BESS-järjestelmä voi jakaantua useaan akuston, tehomuokkaimen ja muuntajan muodostamaan erilliskytkettyyn alajärjestelmään (power block). Toisaalta järjestelmä voidaan rakentaa rinnankytkettynä niin akuston kuin inverttereiden osalta (common DC-bus). Kuvassa 7 esitetyillä eri topologioilla on etunsa ja heikkoutensa, jotka pitää arvioida suhteessa kyseessä olevaan sovelluskohteeseen. (Hesse ym., 2017, s. 13.)



**Kuva 7.** Topologiat (a) erillis- ja (b) rinnankytketty (Hesse ym., 2017, s. 14).

### 3.2.3 Akunhallintajärjestelmä

Akunhallintajärjestelmä (Battery Management System) vastaa akkumoduulien suorituskyvyn valvonnasta ja ohjauksesta. BMS myös valvoo ja ohjaa kennojen tasapainoa akuston tasaisen suorituskyvyn ja pitkäikäisyyden varmistamiseksi. Lisäksi se varmistaa akkujärjestelmän turvallisen toiminnan. (Saldarini ym., 2023, s. 5.)

Fysikaalisina suureina BMS mittaa akuista virtaa, jännitettä sekä lämpötilaa. Järjestelmä tallentaa historiadataa ja määrittää akkujen lataustilan (SOC) ja kunnan tilan (SOH). (Lawder ym., 2014, s. 4.) Se varmistaa akkujen asianmukaisen lataamisen ja purkamisen, suojaen niitä ylilataukselta, liialliselta purkamiselta ja lämpöongelmilta (Saldarini ym., 2023, s. 5).

Akut ovat luonteeltaan dynaamisia, ja ne ovat jatkuvasti epätasapainotilassa syklien aikana. Interkalaatiopohjaisissa akuissa (esim. litiumioni), jotka toimivat suljettuna järjestelmänä, on hyvin vähän mitattavia tilamuuttujia. Tämä vaikeuttaa akkujen tarkkaa seuranta, tilojen määrittämistä ja turvallisen käytön ylläpitämistä. (Lawder ym., 2014, s. 2.)

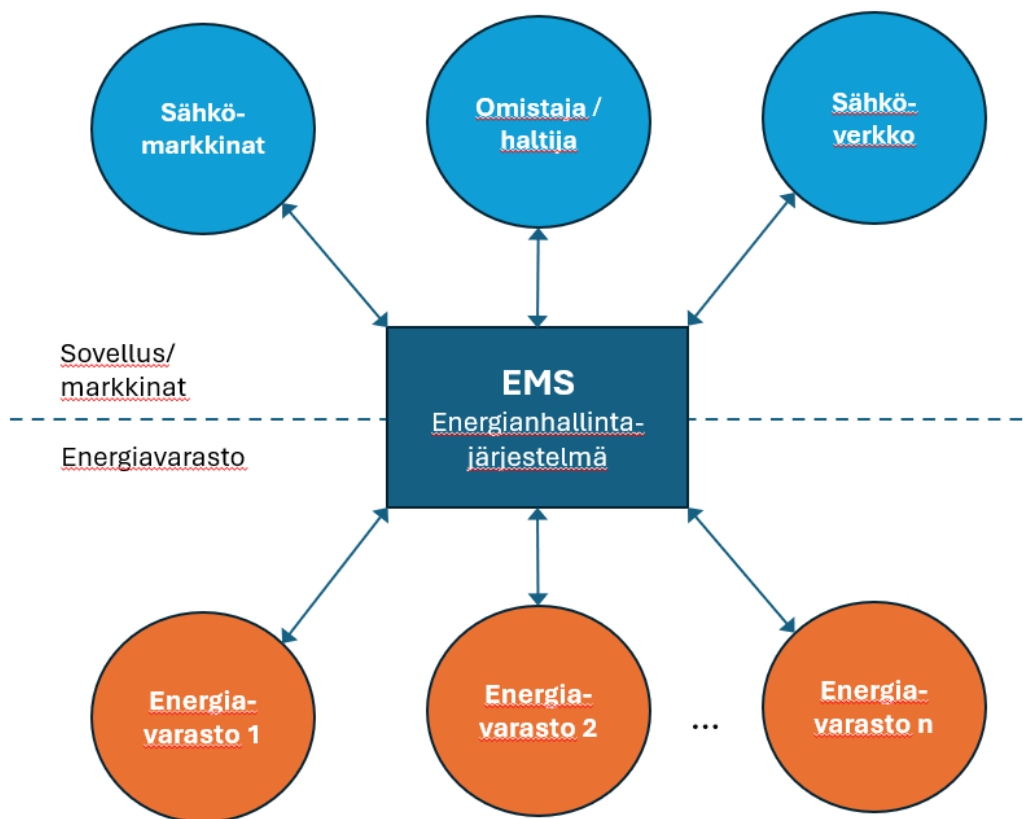
Akkujen vanheneminen tekee niiden SOC- ja SOH-tilojen määrittämisen vaikeaksi. Eri akkutyypeille kehitetyt tarkat matemaattiset mallit vaativat suurta laskentatehoa sekä pitkiä simulointiaikoja, jolloin niiden käyttö reaaliaikaisessa BMS:ssä voi olla epäkäytännöllistä. Yleisesti tilojen määrittelyssä käytetään tyyppikokeellisesti tuotettuja taulukkotuloksia. Sovelluskohteesta ja akun käyttöprofiilista riippuen tämän tavan tuottamat tulokset voivat olla epätarkkoja. (Lawder ym., 2014, s. 13.)

### 3.2.4 Energianhallintajärjestelmä

Energianhallintajärjestelmä (EMS) valvoo ja optimoi energiavaraston toimintaa sovellusympäristössään. Se kerää reaaliaikaisia tietoja BMS- ja tehonmuuntojärjestelmästä, analysoi energian varastointitarpeet ja määrittää eri tilanteissa sopivimmat strategiat akkujen lataamista ja purkamista varten. (Saldarini ym., 2023, s. 6.)

Energiavarastojen energiahallinnan tavoitteena on käyttää energiavarastoa turvallisuus huomioiden mahdollisimman tuottavasti. Sovelluksen mukaan EMS voidaan ohjelmoida asettamaan etusijalle erilaisia tavoitteita, kuten esimerkiksi maksimoimaan uusiutuvan energian omakäyttöä, tukemaan sähköverkkoa tai optimoimaan taloudellista tuottoa. Tapauskohtaisesti EMS arkkitehtuuri voi vaihdella suuressi riippuen energiavarastosovelluksesta, omistajuudesta ja järjestelmävaatimuksista. Markkinoiden ja jakelujärjestelmien muuttuvat tilanteet luovat tarpeen rajapinnoille EMS:n ja ylätason sidosryhmien välille. (Byrne ym., 2017, s. 4-5.) Kuvassa 8 on esitetty EMS:n keskeinen rooli energianhallinnan solmupisteenä energiavarastoyksiköiden ja ylätason sidosryhmien välissä.





Kuva 8. Energiahallinnan yleiskaavio (Byrne ym., 2017, s. 5).

### 3.2.5 Turvajärjestelmät

Akkuvarastot, kuten energiavarastot yleisesti, sisältävät suuren määrän energiaa, mikä hallitsemattomana voi johtaa merkittäviin vahinkoihin. Tämän takia tärkeänä osa-alueena BESS-sovelluksissa on turvajärjestelmät. Nämä voidaan luokitella aktiivisiin ja passiivisiin, joista aktiiviset järjestelmät pyrkivät estämään järjestelmän ajautumista epäsuotuisaan tilaan, kun taas passiiviset turvajärjestelmät rajaavat ja minimoivat vahinkoja energiavaraston vikaantuessa (Byrne ym., 2017, s. 5).

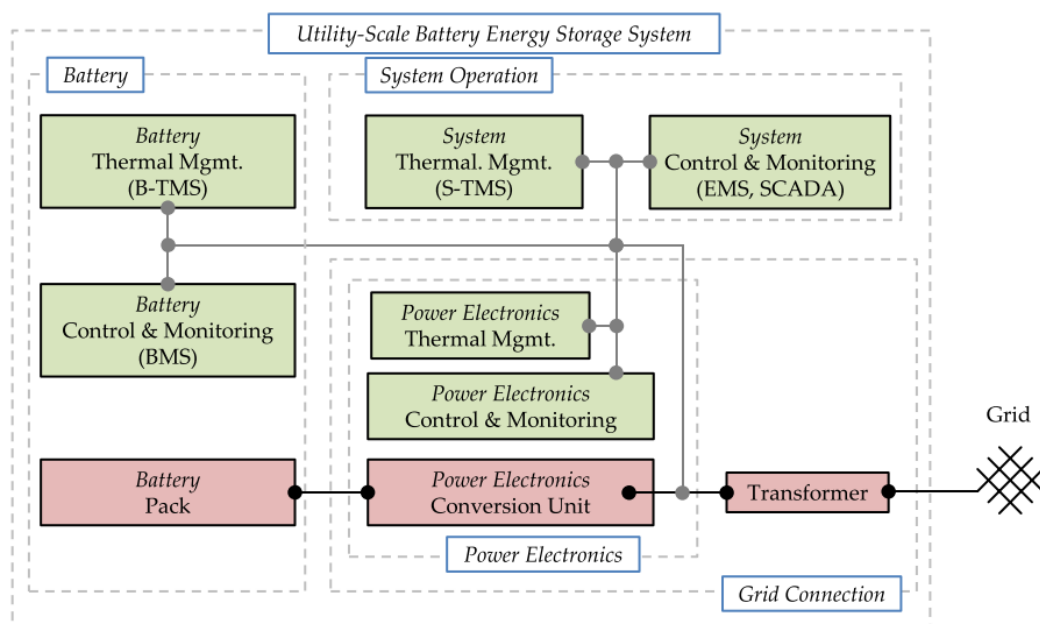
Aktiiviset turvajärjestelmät perustuvat mitattaviin suureisiin ja niille asetettuihin raja-arvoihin, joiden ylittäminen johtaa järjestelmän tai sen osien alasajoon. Akustojen osalta aktiivisiin turvajärjestelmiin lukeutuu suojaukset yllimmämmälle, yllätaukselle sekä syväpurulle. (Byrne ym., 2017, s. 5.)

Passiivisten suojausjärjestelmien erilaiset ratkaisut tehdään suojaamaan akkuvastoa ja sen ympäristöä esimerkiksi oikosulkutilanteissa, akkupalossa tai kemikaalivuodoissa. Sähköisiin oikosulkutilanteisiin varaudutaan sulakkeilla ja katkaisijoilla (Byrne ym., 2017, s. 6). Akkupalojen varalta asennetaan palonsammutusjärjestelmät ja savunilmaisimet, mutta muutoin passiivinen suojaus perustuu pitkälti järjestelmien ja sen osien mekaaniseen kotelointiin (Saldarini ym., 2023, s. 6).

Akkubarasto kokonaisuutena sekä sen osajärjestelmät erikseen voidaan sijoittaa koteloihin, jotka on suunniteltu suojaamaan laitteistoja ympäristötekijöiltä ja varmistamaan turvallisuus vaaran suunnasta riippumatta. Kotelointi tarjoaa tukevan asennusrakenteen, lämpötilanhallintaa sekä suojaa palovammoilta, iskuilta ja muilta vaaroilta. (Saldarini ym., 2023, s. 6.)

### **3.2.6 Apujärjestelmät**

BESS-apujärjestelmät liittyvät pääsääntöisesti lämpötilojen valvontaan ja hallintaan. Lämpötiloja valvotaan eri tasoilla ulkolämpötiloista aina yksittäisten kennojen lämpötiloihin asti. Lämpötilojen hallintajärjestelmät voidaan jakaa tasojen mukaan järjestelmätason (S-TMS) ja akkutason (B-TMS) järjestelmiin (Hesse ym., 2017, s. 2). Kuvassa 9 on esitetty kaaviona akkubaraston toiminnalliset osat.



**Kuva 9.** Yleiskaavio akkuvaraston toiminnoista (Hesse ym., 2017, s. 11).

Järjestelmätasolla (S-TMS) varmistetaan turvalliset ja käytön kannalta optimaaliset olosuhteet tilassa, jossa akkuvaraston laitteistot ovat. Järjestelmien toteutukset voivat olla hyvin erilaisia riippuen mm. akkuvaraston koosta, sijoituspaikasta, ympäristö- sekä sääolosuhteista. Tyypillisesti järjestelmätasolla lämpötilaa ohjataan lämpöpumpppohjaisilla ilmastointilaitteilla, lämmityslaitteilla sekä ilmanvaihtojärjestelmillä. (Hesse ym., 2017, s. 15.)

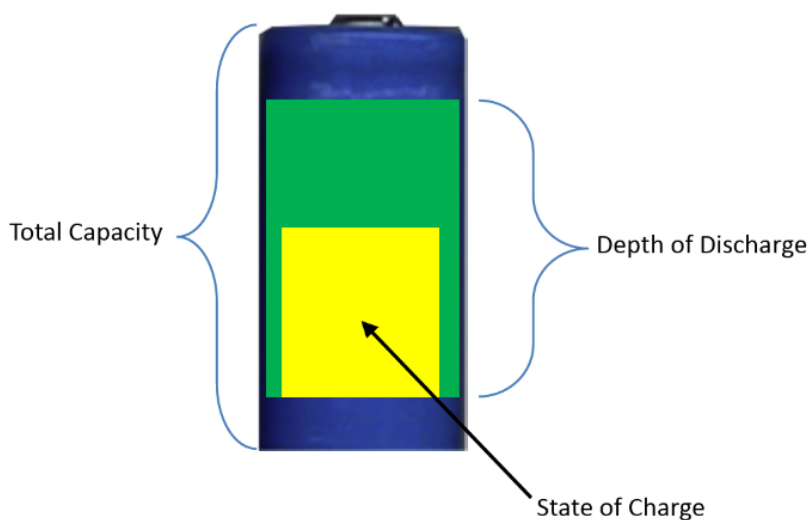
Akkutason (B-TMS) toiminnot keskittyvät akkukennojen, -moduulien sekä -pakettien lämpötilojen hallintaan. Järjestelmä nivoutuu vahvasti yhteen akunhallintajärjestelmän (BMS) kanssa. Lämpötilojen hallinta voi olla akkujen jäähdytystä, mutta myös lämmitystä, mikäli järjestelmässä voi esiintyä hyvin matalia lämpötiloja. Akkujen jäähdytystapoja on erilaisia passiivisesta ilmankierrosta nestejäähdytykseen ja aina faasimuutokseen perustuviin tekniikoihin. (Fayaz ym., 2022, s. 6.)

### 3.3 Akkutekniikan käsitteet

Akkuja ja niiden toimintakykyä esitettäessä ja arvioitaessa käytetään paljon erilaisia lyhenteitä ja erikoistermejä. Tässä luvussa esitellään akkuihin ja akkuvarastoihin liittyvät sekä tämän tutkimuksen kannalta tärkeimmät käsitteet.

#### DOD

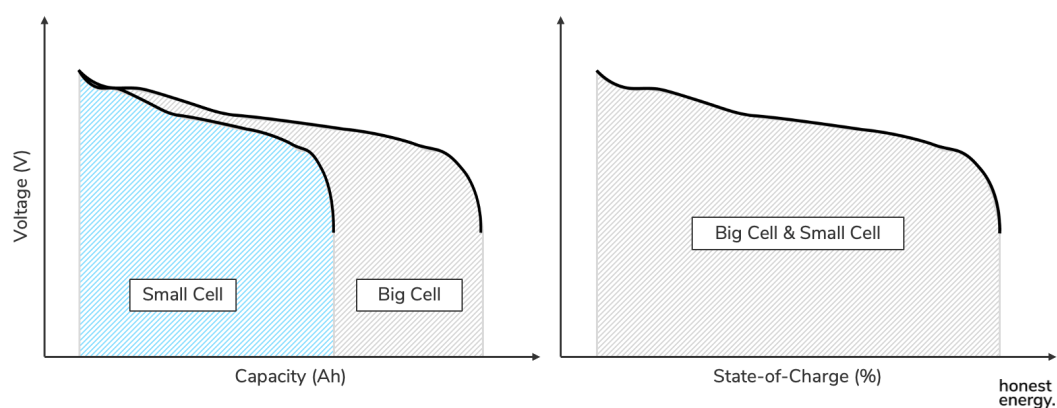
DOD on lyhenne termistä *Depth of Discharge* eli purkusyvyyys. Prosentuaalinen luku (0–100 %) kertoo, kuinka suuri osa akun kokonaiskapasiteetista käytetään. Akusta käytettävä kapasiteetti rajautuu lataukselle määritetyn maksimijännitteen ja purkuvaiheen minimijännitteen väliin. Sovelluksen mukaan DOD voi vaihdella 20–90 % välillä. (Warner, 2015, s. 29.) Kuvassa 10 on havainnollistettu DOD osuus kokonaiskapasiteetista.



**Kuva 10.** Akun kokonaiskapasiteetti, SOC ja DOD (Warner, 2015, s. 33).

## SOC

SOC on lyhenne termistä *State of Charge* eli varauksen tila. Prosentuaalinen luku (0–100 %) kertoo, paljonko akun kapasiteettia on jäljellä. Yksinkertaisimmillaan varaustila saadaan akun tai kennon jännitekäyrän mukaan, jossa 100 % SOC on maksimijännite ja 0 % SOC on minimijännite. Kuvassa 11 on esitetty jännitekäyriä kapasiteetin ja SOC-arvon suhteen. Minimi- ja maksimipisteet ovat akulle määrityn DOD-alueen mukaiset. (Warner, 2015, s. 32.) Kuvassa 10 on havainnollistettu SOC osana DOD-aluetta sekä kokonaiskapasiteettia.



**Kuva 11.** Jännitekäyrä vs. SOC (Yao, 2021).

Akunhallintajärjestelmä (BMS) määrittää tiedon akuston varaustasosta. Johtuen litiumionikemien monimutkaisista sähkökemiallisista mekanismeista ja epälineaarista käyttäytymisestä vaatii tarkan SOC-arvon määrittäminen akustosta saatavien mittaussuureiden lisäksi kehittyneitä mallinnusta ja tehokkaita algoritmeja (Li ym., 2021, s. 1-2). SOC-arvon määrittämiseen on useita eri menetelmiä, joilla on omat etunsa ja heikkoutensa. Perinteisiä menetelmiä ovat mm. OCV (Open Circuit Voltage) sekä AHI (Ampere Hour Integration) (Li ym., 2021, s. 6).

## SOH

SOH on lyhenne termistä *State of Health* eli terveydentila. Prosentuaalinen luku (0–100 %) kertoo akun senhetkisen kunnon verrattuna elinkaaren alkuun. Käytännössä SOH-arvon laskenta toteutetaan algoritmeilla akunhallintajärjestelmässä (BMS) akuston mittausten sekä käyttöhistorian perusteella. (Warner, 2015, s. 33.)

## EOL

EOL on lyhenne termistä *End of Life* eli elinkaaren loppu. Akun elinkaari on lopussa, kun se ei enää toimi sovelluksessa sille määritellyissä toimintarajoissaan tehon tai energian osalta. SOH-arvoon suhteutettuna yleinen EOL raja on 80 %, mutta käyttösovelluksen mukaan raja voi olla matalampi. (Warner, 2015, s. 29.)

## C-rate

Termi C-rate kuvaa nopeutta, jolla akkua ladataan tai puretaan. Termi esitetään kirjaimella "C", jolla on kerroin. C-rate 1C tarkoittaa sitä, että akku puretaan tai ladataan yhden tunnin aikana, kun taas 2C on kaksi kertaa nopeampi, eli lataus tai purku kestää vain 0,5 tuntia. Hitaammat arvot esitetään desimaalilukuna kertoimen arvolla ollessa alle yhden. 0,5C on siis puolet tunnin nopeudesta eli aikaa kuluu silloin kaksi tuntia. (Warner, 2015, s. 28.) Taulukkoon 1 on laskettu ajat eri C-rate-arvoilla.

**Taulukko 1.** C-rate ja lataus- tai purkuaika.

C-rate	Aika
0,1C	10 h
0,2C	5 h
0,5C	2 h
1C	1 h
2C	30 min
5C	12 min
10C	6 min

## Sykli

Sykli (eng. *cycle*) on akun käyttöjakso, jonka aikana akku purkautuu ja sen jälkeen latautuu. Sykli voi olla purku- ja lataussyvyydeltään eri suuruinen. Täydellisestä tai täydestä syklistä (eng. *full cycle*) puhutaan silloin, kun käytössä on 100 % DOD. Toisaalta sykli voi olla osittainen (eng. *partial cycle*), jolloin akkua puretaan vain osittain ja ladataan takaisin lähtöarvoonsa. (Warner, 2015, s. 29.)

Hyvin pienistä sykleistä, joiden syvyys on alle 2 %, voidaan käyttää nimitystä mikrosykli (eng. *micro-cycles*) (Soto ym., 2022, s. 1).

## 3.4 Litiumioniakut

Litiumioniakut (LIB) tai lyhyemmin Li-ion-akut esiteltiin markkinoille 1990-luvun alussa. Korkean energiatiheytensä ansiosta Li-ion-akut valtasivat nopeasti kannettavien sähkölaitteiden markkinat muilta akkuteknologioilta. (Warner, 2015, s. 75-76.)

Nopeasta suosioista, valmistusmäärien kasvusta ja kaupallisesta menestyksestä huolimatta litiumioniteknologialla on tunnistettuja heikkouksia. Yksinkertaisesta rakenteesta huolimatta jokainen litiumionikennon osa sisältää rajoitteita ja ominaisuuksia, jotka yhdessä muodostavat toiminnallisuudeltaan monimutkaisen kokonaisuuden.

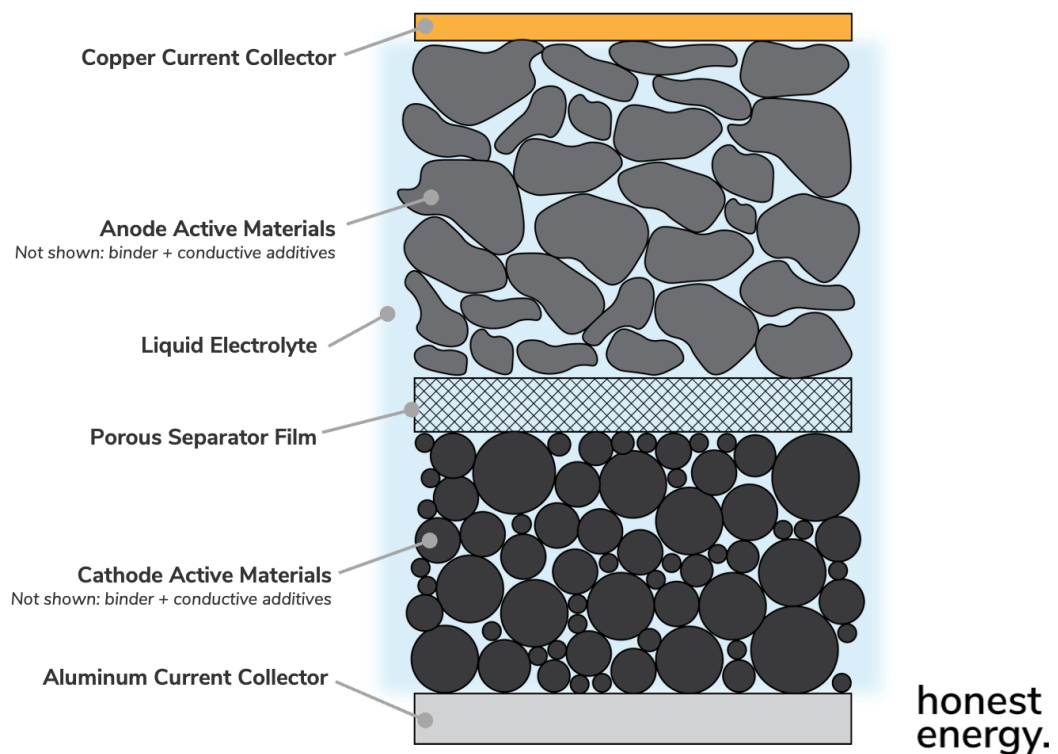
### 3.4.1 Rakenne ja toiminta

Tyypillisen litiumioniakkukennon pääosat ovat seuraavat (Warner, 2015, s. 76):

- Anodi (eng. *anode*)

- Katodi (eng. *cathode*)
- Virrankerääjät (eng. *current collector*)
- Separaattorikalvo (eng. *separator film*)
- Elektrolyytti (eng. *electrolyte*)

Elektrodit eli anodi ja katodi on tehty jauhemaisista aineista. Näiden sitomiseen ja kiinnittämiseen virrankeräimiin käytetään sidosainetta (eng. *binder*), mikä on tärkeä osa kennon rakennetta. (Suzuki, 2022.) Kuvassa 12 on kuvattuna litiumionikennon kerrosmaisesta rakenteesta pääosat.



**Kuva 12.** Litiumionikennon rakenne (Yao, 2021).

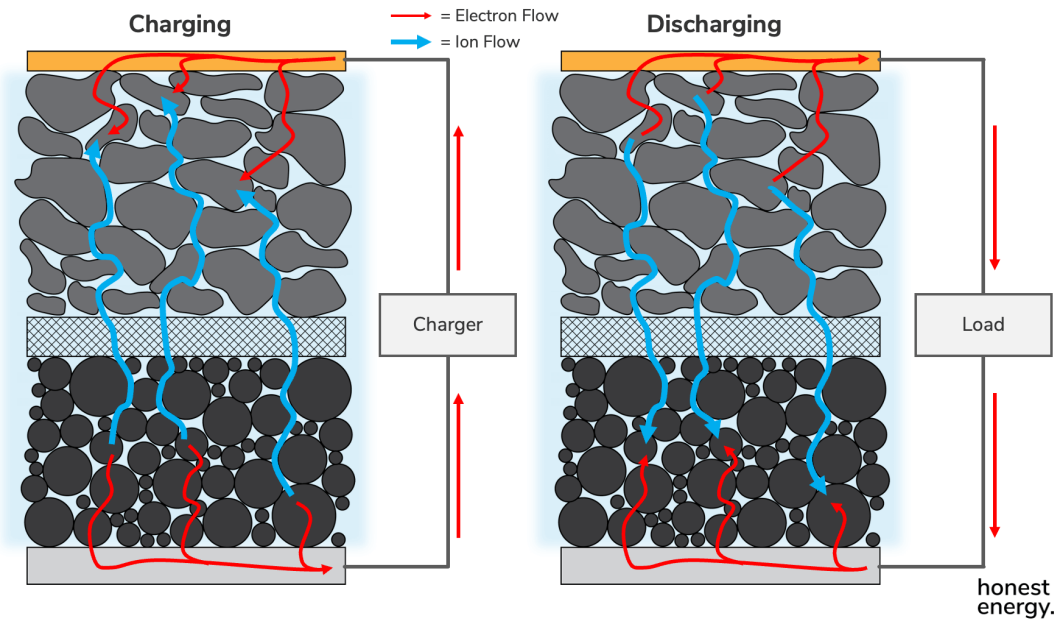
Katodi on akkukennon positiivinen elektrodi ja anodi negatiivinen. Akun toiminta perustuu varautuneiden litiumionien siirtymiseen elektrodien välillä. Elektrodien aktiiviset aineet erottaa toisistaan separaattorikalvo, joka sallii litiumionien kulke-  
misen lävitseen, mutta toimii sähköisenä eristimenä estäen elektronien (eng.



*electron*) siirtymisen elektrodilta toiselle kennon läpi. Kennossa oleva elektrolyytti mahdollistaa litiumionien liikkumisen elektrodien välillä. (Deng, 2015, s. 4; Warner, 2015, s. 76.)

Akkukennoa käytettäessä litiumionit kulkevat elektrolyytissä elektrodilta toiselle elektronien kulkiessa virrankeräimeltä ulkoista virtapiiriä pitkin toiselle virrankeräimelle. Kemiallisesti kennon elektrodeissa tapahtuu tällöin hapettumis/pelkistymis- eli REDOX-reaktio (eng. *reduction-oxidation*). (Deng, 2015, s. 3; Dell & Rand, 2001, s. 147-149.)

Latauksessa (eng. *charging*) kennoon liitetyllä ulkopuolisella sähkölähteellä katomateriaaliin sitoutuneet elektronit vapautetaan ja katodi hapettuu. Elektronit siirtyvät ulkoista virtapiiriä pitkin anodille, joka tällöin pelkistyy. Samassa reaktiossa katodilta vapautui myös litiumionit, jotka siirtyvät elektrolyytissä separaattorikalvon läpi anodille. Ladattua kennoa purettaessa (eng. *discharging*) anodi hapettuu spontaanisti, jolloin litiumionit vapautuvat elektrolyyttiin ja elektronit kulkevat ulkoista virtapiiriä pitkin katodille muodostaen työtä tekevän sähkövirran. (Deng, 2015, s. 3; Dell & Rand, 2001, s. 147-149.) Kuvassa 13 on havainnollistettu elektronien ja ionien liike lataus- ja purkutilanteissa.



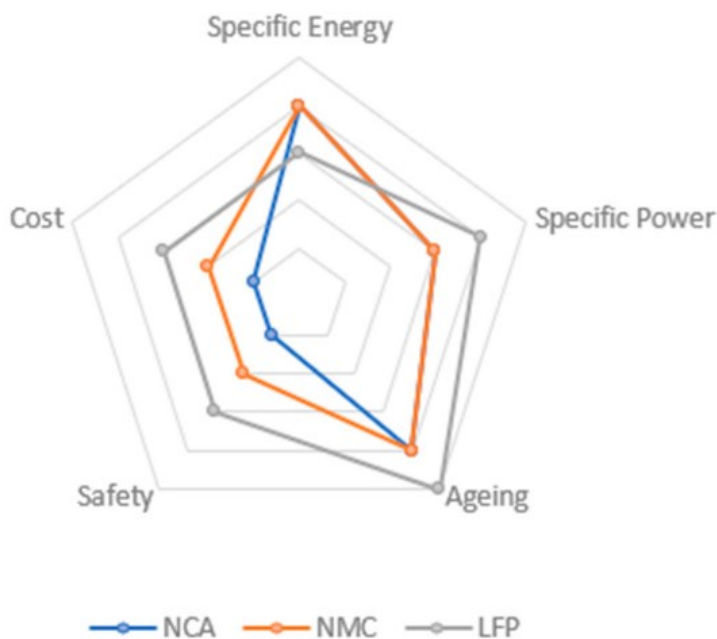
**Kuva 13.** Ionien ja elektronien liike kennossa (Yao, 2021).

### 3.4.2 Akkukemiat

Litiumioniakkuja on erilaisia, mutta niiden toimintaperiaate ja rakenne ovat yhteisiä. Eri litiumioniakkutyyppit eroavat toisistaan niissä käytettävän katodimateriaalien osalta, jolloin puhutaan eri akkukemioista (eng. *battery chemistry*) (Warner, 2015, s. 77). Akkuvarastosovellusten osalta yleisimpiä kemioita on litiumrautaoksidiksi ( $\text{LiFePO}_4$ ), litiumnikkeli-mangaanikobolttioksidiksi ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) sekä litiumnikkeli-koboltti-alumiinioksidiksi ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ ). Yhdisteiden pitkien nimien tai kemiallisten kaavojen sijasta akkukemioista käytetään kolmikirjaimisia lyhenteitä LFP, NMC ja NCA. (Hesse ym., 2017, s. 4.)

Anodimateriaalina lähes kaikissa litiumioniakkutyypeissä on hiili (grafiitti). Poikkeuksena on akkutyyppi LTO eli litiumtitaanioksidiksi ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ). Näissä kennoissa anodi on hiilen sijasta titaanioksidiksi ( $\text{TiO}_2$ ). (Deng, 2015, s. 11-14.)

Eri akkukemioilla on erilaiset ominaisuudet ja sitä kautta hyvät ja huonot puolensa. Akkutyyppin ja -kemian valinta tiettyyn sovellukseen on haasteellista ja käytännössä tarkkaan harkittu kompromissi vahvuuksien ja heikkouksien välillä. (Rey ym., 2023.) Kuvassa 14 on graafinen vertailu eri akkukemioiden ominaisuuksista. Mitä ulompänä piste on, sitä parempi on akun ominaisuudet osa-alueella.

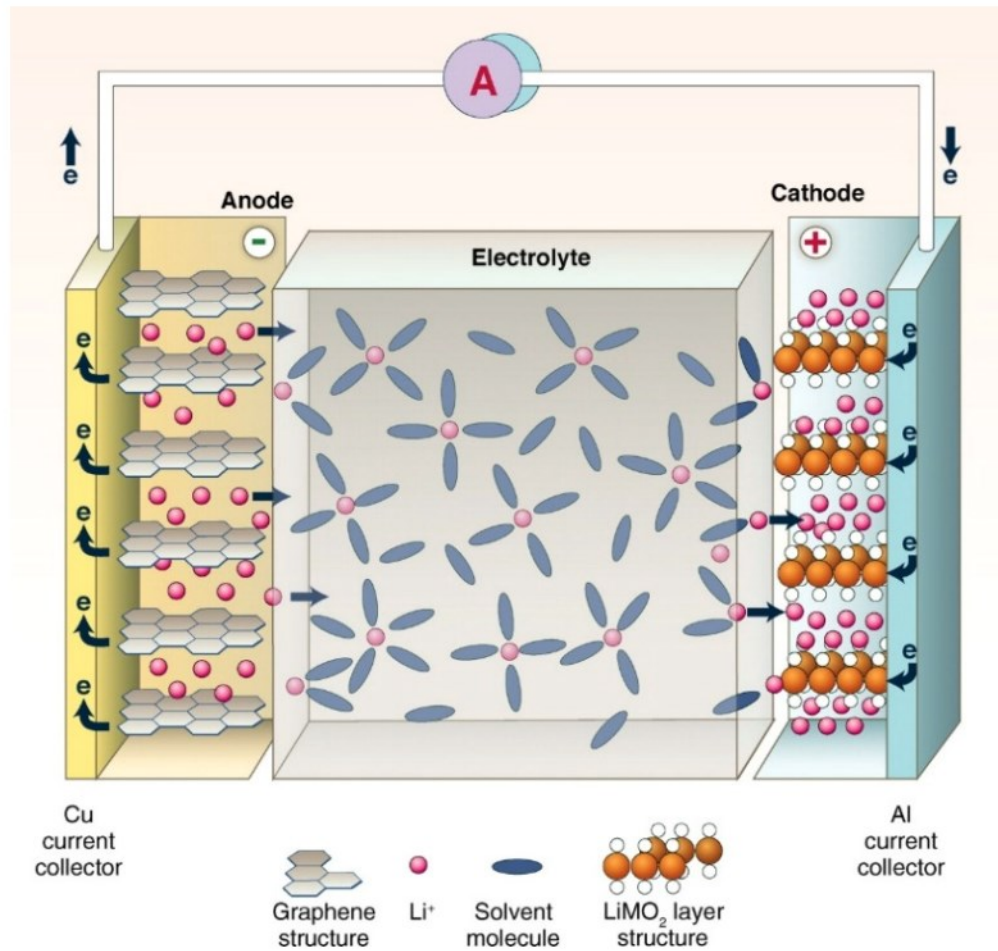


**Kuva 14.** Litiumionikemioiden ominaisuuksien vertailu (Rey ym., 2023, s. 5).

Anodilla olevan grafiitin hiiliatomit muodostavat kuusikulmaisista (heksagonisista) verkoista koostuvan kerrosmaisesta rakenteesta. Litiumionikennon ollessa ladattuna ovat litiumionit interkalatoituneet grafiittilevyjen väliin. Yhtä litiumionia kohden on aina kuusi hiiliatomia ( $\text{Li-C}_6$ ). (Deng, 2015, s. 5,13.)

Kennoa purettaessa litiumionit siirtyvät anodimateriaalista SEI-kerroksen (solid-electrolyte interphase) läpi elektrolyyttiin luovuttaen elektrodinsa, mikä kulkeutuu anodin virrankerääjälle. Anodilta vapautunut litium liukenee elektrolyyttiin ja kulkeutuu potentiaalieron vuoksi separaattorikalvon läpi katodille. (Deng, 2015, s. 4,13.)

Nestemäiset elektrolyytit ovat orgaanisia liuottimia, joille litiumakkukkenno fyysisenä ja kemiallisena ympäristönä asettaa erilaisia vaatimuksia. Nesteellä tulee olla alhainen viskositeetti ja lisäksi korkea stabiilisuus asetetuissa käyttölämpötiloissa. Erilaisia elektrolyyttiliuottimia on paljon ja niitä tutkitaan laajasti parhaiten soveltuvien löytämiseksi. Nestemäisten elektrolyyttien lisäksi on litiumionikenoille kehitetty myös polymeeri-, geeli- ja keraamisia elektrolyyttejä. (Deng, 2015, s. 5-6.) Kuvassa 15 on havainnollistettu litiumionien liikettä anodilta elektrolyyttiin ja edelleen katodille kennoa purettaessa.



**Kuva 15.** Litiumionien liike kennoissa purkuvaiheessa (Frag, 2013, s. 14).

Katodilla litiumioni läpäisee positiivisen SEI-kerroksen (pSEI) ja interkalatoituu aktiivisen materiaalin metallioksiditasojen väliin. Katodi ottaa vastaan ulkoista virtapiiriä pitkin tulevan elektronin ja pelkistyy. (Edge ym., 2021, s. 2-3.)

### 3.5 Akun vanheneminen

Akkujen vanheneminen (eng. *ageing*) on ilmiö, joka vaikuttaa kaikkiin ladattaviin akkuihin. Vanhenemisprosessi johtaa akun kapasiteetin vähenemiseen ja suorituskyvyn heikkenemiseen. Litiumioniakkujen kasvava suosio erilaisissa käyttökoh-teissa on kasvattanut tarpeita tutkia niiden hajoamismekanismeja (eng. *degradation mechanisms*) ja niihin vaikuttavia tekijöitä. (J. Guo ym., 2021, s. 1.)

Akkujen vanheneminen on yksi huomioitava tekijä akkupohjaisten sovellusten käytössä ja suunnittelussa. Akuston vanheneminen ja lopulta uusiminen on merkittävä tekijä akkuvarastojen elinkaarikustannuksia ja kannattavuutta arvioitaessa (Lawder ym., 2014, s. 6.)

#### 3.5.1 Hajoamisvaikutukset ja -tilat

Kun tarkastellaan akun ikääntymistä käytössä havaittavien oireiden kautta, voidaan tunnistaa kaksi akun hajoamisvaikutusta (eng. *degradation effect*) (Birkl ym., 2017, s. 12):

1. **Kapasiteetin häviäminen** (eng. *capacity fade*)
2. **Tehon häviäminen** (eng. *power fade*)

Litiumionikennossa näitä aiheuttaa tyypillisesti seuraavat kolme hajoamistilaa (eng. *degradation mode*) (Birkel ym., 2017, s. 12):

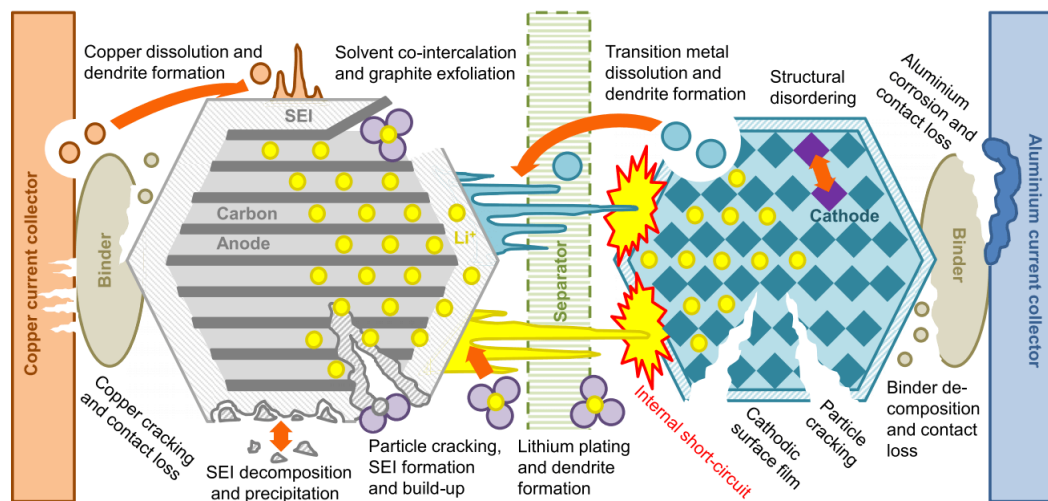
1. **Litiumvaraston häviäminen (LLI)**
  - Kennossa olevien vapaasti kiertävien litiumionien määrä vähenee
2. **Aktiivisen anodimateriaalin häviäminen (LAM-anode)**
  - Anodilla oleva aktiivinen materiaali pystyy ottamaan vastaan yhä vähemmän litiumioneja
3. **Aktiivisen katodimateriaalin häviäminen (LAM-cathode)**
  - Katodilla oleva aktiivinen materiaali pystyy ottamaan vastaan yhä vähemmän litiumioneja

Näiden kolmen lisäksi on tutkimuksissa nimetty kaksi muuta hajoamistilaa (Edge ym., 2021, s. 3):

4. **Stoikiometrinen siirtymä (eng. *stoichiometric drift*)**
  - Litiumioneita jää anodille, eikä siirry positiiviselle katodille, jolloin elektrodien reaktiotasapaino (stoikiometria) vääristyy
5. **Impedanssin muutos (eng. *impedance change*)**
  - Kennon sähköiset ominaisuudet muuttuvat, kun impedanssi kasvaa kennon eri osien hajoamismekanismien vaikutuksesta

### 3.5.2 Hajoamismekanismit

Litiumionikentöjen hajoaminen aiheutuu useista fysikaalisista ja kemiallisista mekanismeista. Hajoamismekanismit vaikuttavat kennon elektrodihin (anodi ja katodi), elektrolyyttiin, separaattoriin ja virrankerääjiin. Mekanismit ovat akkukentöjen vanhenemista valvottaessa tarkastelutasoista tarkin, mutta samalla myös vaikein toteuttaa käytössä olevan akkukentön osalta. (Edge ym., 2021, s. 2-3.) Kuvassa 16 on esitetty litiumionikentön eri osiin liittyvät hajoamismekanismit.



**Kuva 16.** Litiumionikennon hajoamismekanismit (Birkel ym., 2017, s. 2).

Hajoamismekanismeja ovat:

**1. SEI kerroksen kasvu (eng. SEI growth)**

- Negatiivisen elektrodin (anodin) pintaan muodostuvan SEI kerroksen paksuuntuminen. Sitoo kiertävää litiumia ja rajoittaa elektrolyytin virtausta aktiiviseen materiaaliin. (Edge ym., 2021, s. 4).
- SEI kerrosta syntyy jopa kennon lepotilassa, mutta korkeat lämpötilat kiihdyttävät kerroksen kasvua (Edge ym., 2021, s. 4).

**2. SEI kerroksen hajoaminen (eng. SEI decomposition)**

- SEI kerros hajoaa ja irtoaa elektrodin pinnalta avaten pinnan uudelleen SEI muodostumiselle. Tämä sitoo lisää kennon litiumia ja elektrolyyttiä. (Edge ym., 2021, s. 4.)
- Aiheutuu kennon korkeista syklimääristä (Edge ym., 2021, s. 4).

**3. Elektrolyytin hajoaminen (eng. Electrolyte decomposition)**

- Elektrolyytin epästabiilit yhdisteet hajoavat useammaksi molekyyleiksi, jotka reagoivat kennossa epäedullisesti sivureaktioiden muodossa. (J. Guo ym., 2021, s. 16).

- Korkein riski korkeissa lämpötiloissa tai kennon ollessa ladattuna (J. Guo ym., 2021, s. 16).

#### 4. Sidosaineen hajoaminen (eng. *Binder decomposition*)

- Elektrodimateriaalien sidosaineiden hajoaminen rikkoo elektrodin rakennetta ja haittaa sen kykyä ottaa vastaan litiumioneja. Lisäksi sidosaineen pettäessä voi elektrodin kontakti virrankeräimeen heikentyä, mikä nostaa kennon sisäistä impedanssia. (J. Guo ym., 2021, s. 16.)
- Korkeat lämpötilat johtavat sidosaineen hajoamiseen (J. Guo ym., 2021, s. 16).

#### 5. Grafiitin kuoriutuminen (eng. *Graphite exfoliation*)

- Anodin grafiittikerroksen rakenteellinen vaurio, mikä aiheutuu liuotinmolekyylien interkalatoituessa grafiittikerrokseen litiumionin mukana (Ming ym., 2019, s. 2). Vaurioitunut kerrosrakenne estää litiumionien interkalatoitumisen anodille latausvaiheessa.
- Syynä ilmiöön on elektrolyytin epäideaalinen liuotusrakenne (Zhang ym., 2023, s. 2).

#### 6. Rakenteellinen epäjärjestys (eng. *Structural disordering*)

- Positiivisen elektrodin (katodin) metallioksidin kerrosmaisesta rakenteesta hajoaminen, mikä estää litiumionien interkalatoitumisen materiaaliin (Edge ym., 2021, s. 5).
- Kemialliset sivureaktiot ja korkeat lämpötilat edistävät katodin aktiivisen materiaalin hajoamista (Edge ym., 2021, s. 6).

#### 7. Litiumpinnoitteen/dendriitin muodostuminen (eng. *Lithium plating/dendrite formation*)

- Anodille siirtyvät litiumionit eivät interkalatoidu materiaaliin vaan muodostavat elektrodin pinnalle metallipinnoitteen kiihdyttäen SEI kerroksen kasvua. Tämä sitoo kiertävää litiumia ja rajoittaa vapaan litiumin siirtymistä aktiiviseen materiaaliin. (Edge ym., 2021, s. 4-5.)



- Dendriitit ovat haarautuvia litiumkiteitä, joita voi muodostua anodille litiumpinnoitteen tavoin. Tämä myös sitoo vapaata litiumia, mutta dendriitit voivat kasvaessaan aiheuttaa separaattorikalvon puhkeamisen ja samalla kennon sisäisen oikosulun (J. Guo ym., 2021, s. 17).

#### 8. Sähköisen kontaktin menetys (eng. *Loss of electrical contact*)

- Elektrodien (anodi ja katodi) sähköinen yhteys virrankeräimiin tai elektrodipartikkeleiden välillä häiriintyy. Tämä nostaa kennon sisäistä impedanssia. (Birkl ym., 2017, s. 3.)
- Sähköinen kontakti voi häiriintyä mekaanisesta rasituksesta tai muiden hajoamismekanismien vaikutuksesta (Edge ym., 2021, s. 7).

#### 9. Elektrodipartikkeleiden halkeilu (eng. *Electrode particle cracking*)

- Elektrodien (anodi ja katodi) aktiiviseen materiaaliin muodostuu halkeamia ja jopa kokonaan irronneita palasia. Nämä heikentävät sähköistä kontaktia elektrodilla sekä paljastavat uutta elektrodipintaa kiihdyttäen SEI kerroksen kasvua. Myös elektrodin pulverisoituminen on mahdollista. (Edge ym., 2021, s. 6-7.)
- Akkusykliit suurella virralla ja jännitteellä altistavat elektrodit halkeamille (J. Guo ym., 2021, s. 15). Kohonneet lämpötilat nostavat riskiä halkeamille ja lisäksi matalissa lämpötiloissa anodin grafiitti tulee hauraammaksi ja alttiimmaksi murtumille (Edge ym., 2021, s. 7).

#### 10. Siirtymämetallien liukeneminen (eng. *Transition metal dissolution*)

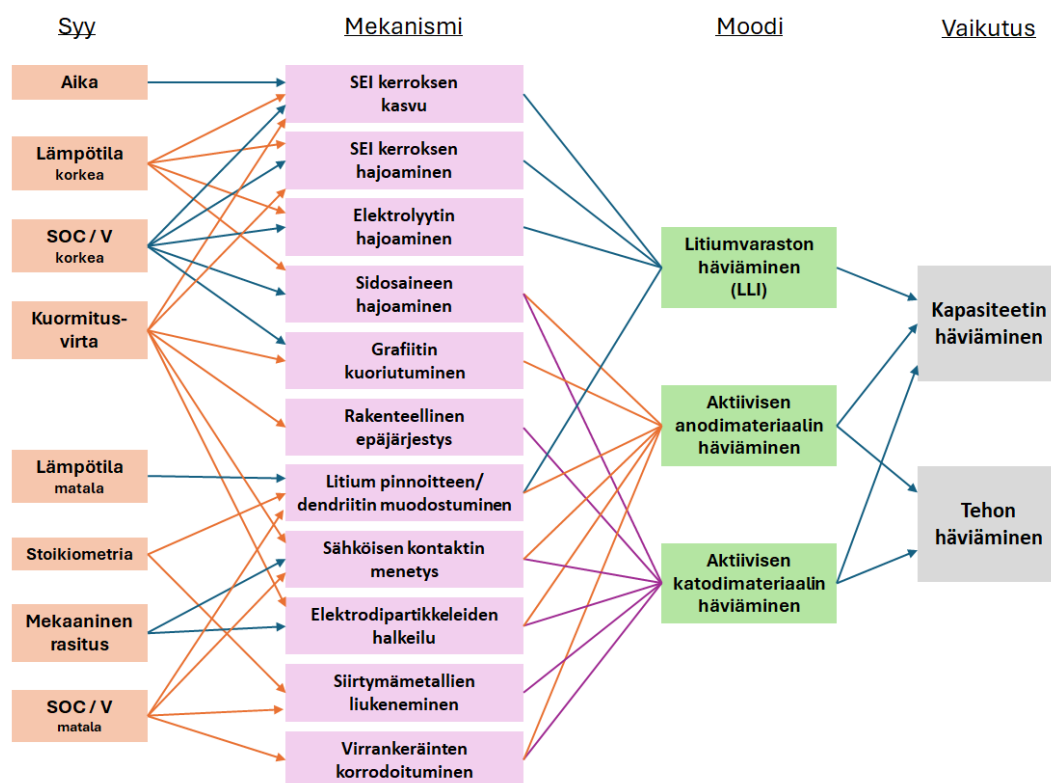
- Katodimateriaalista liukenee ulos metalli-ioneja, jotka voivat muodostaa elektrolyytin kanssa yhdisteitä ja dendriittejä sekä kiihdyttää SEI kerroksen muodostumista molemmilla elektrodeilla (Edge ym., 2021, s. 5-6).
- Akun ylipurkaminen tai ylilataus sekä korkea lämpötila kiihdyttää katodimetallien liukenemista (J. Guo ym., 2021, s. 13,15).

#### 11. Virrankeräinten korrodoituminen (eng. *Corrosion of current collectors*)

- Katodilla oleva alumiininen ja anodilla oleva kuparinen virrankeräin syöpyy galvaanisen tai kemiallisen korroosion vuoksi aiheuttaen sähköisen kontaktin heikkenemistä ja sisäisen impedanssin kasvua (L. Guo ym., 2021, s. 6-16).
- Virrankeräinten korroosiota kiihdyttävät korkea lämpötila sekä kennon ylilataus ja -purku (J. Guo ym., 2021, s. 17; L. Guo ym., 2021, s. 6-16).

### **3.5.3 Vanhenemisen aiheuttajat ja syyt**

Kun vanhenemismekanismeja tarkastellaan niiden aiheuttajien ja niitä edesauttavien tekijöiden kautta, voidaan huomata niiden olevan yhteisiä usealle vanhentumismekanismille. Kuten kuvan 17 kaavioesityksestä voi nähdä, on korkeat lämpötilat, suuri virtakuormitus sekä akun käyttö sen jännitealueiden ääripäissä ovat syistä yleisimmät vanhenemismekanismien aiheuttajina.



**Kuva 17.** Vanhenemismekanismien syy-, moodi- ja vaikutusyhteydet (Birkl ym., 2017, s. 3).

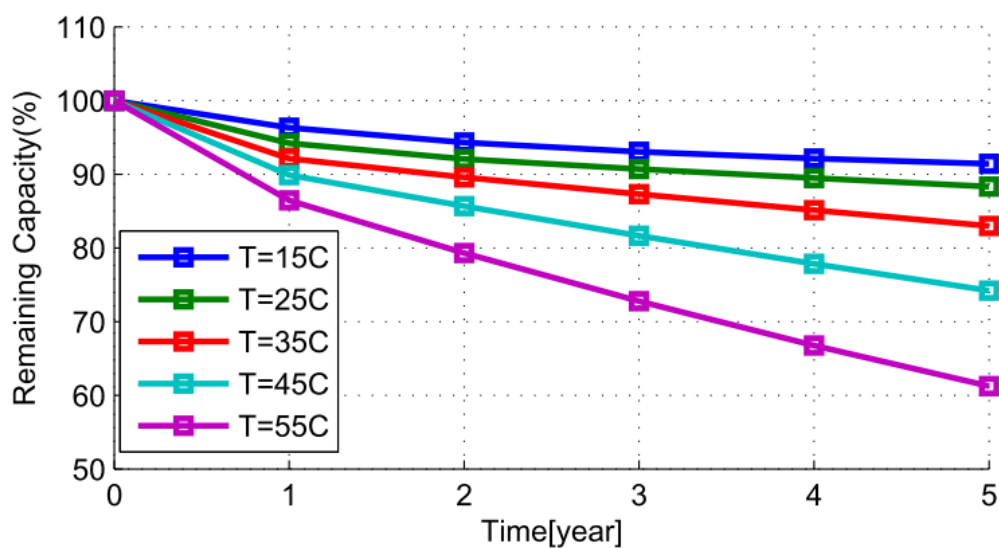
Litiumioniakkujen vanhenemismekanismien ja niiden aiheuttajien välillä on paljon yhteyksiä. Tutkimuksissa on pystytty näitä tunnistamaan, mutta samalla on myös tunnistettu lisätutkimusten tarpeellisuus näiden monimutkaisten vaikutusrakenteiden selvittämiseksi. (Birkl ym., 2017, s. 1; L. Guo ym., 2021, s. 21.)

Akkujen vanhenemisesta puhuttaessa tulee yleisesti vastaan käsitteet kalenteri- ja syklinen vanheneminen (eng. *calendar ageing, cycle ageing*). Kalenterivanheneminen tarkoittaa akun ominaisuuksien heikkenemistä ajan myötä ilman sen käyttämisestä aiheutuvia tekijöitä. Syklinen vanheneminen taas käsittää akun käytöstä eli käytännössä lataus- ja purkusykleistä aiheutuvan heikkenemisen. Nämä käsitteet eivät ole omia hajoamismodeja tai -mekanismeja, vaan ne edustavat eri polkuja akkujen hajoamismekanismien muodostaman verkon läpi. (Edge ym., 2021, s. 16.)

### 3.5.4 Vanhenemistekijöiden vaikutukset akun kuntoon

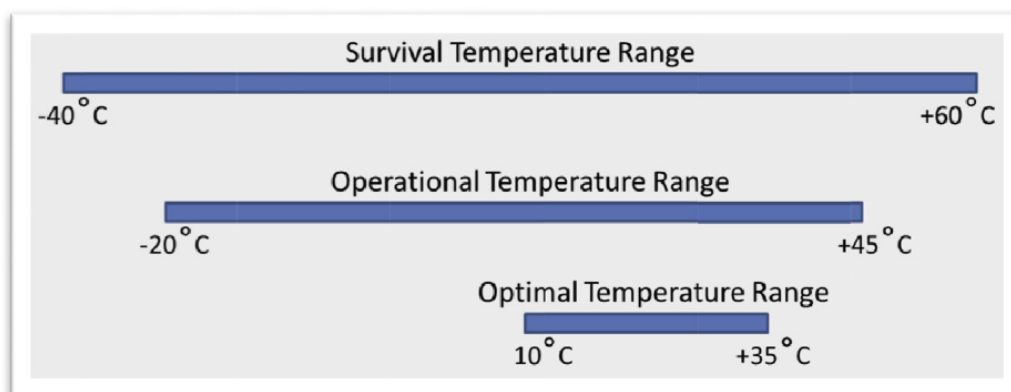
Akustojen pitkäaikaisen käytön ja järjestelmän elinkaarikustannusten kannalta on tärkeää tunnistaa käytännön tasolla akkujen vanhenemiseen merkittävimmin vaikuttavat tekijät. Tekijät määräytyvät akustojen ympäristöolosuhteista sekä käytötavoista. Olennaista on tunnistaa tekijöiden vaikutuksen määrä eri tilanteissa, jotta voidaan löytää optimaalinen akustojärjestelmä ja -mitoitus. (J. Guo ym., 2021, s. 1.)

Lämpötila on merkittävä tekijä usean hajoamismekanismien aiheuttajana. Tarkastellessa litiumionikennon kalenterivanhenemista on lämpötilalla vaikutus vanhenemisnopeuteen (**Kuva 18**). Tämä ajan myötä ilman akun käyttöä tapahtuva vanheneminen on luonteeltaan hidaskäyttöprosessi, mikä kuitenkin kiihtyy lämpötilan noustessa. (J. Guo ym., 2021, s. 8.)



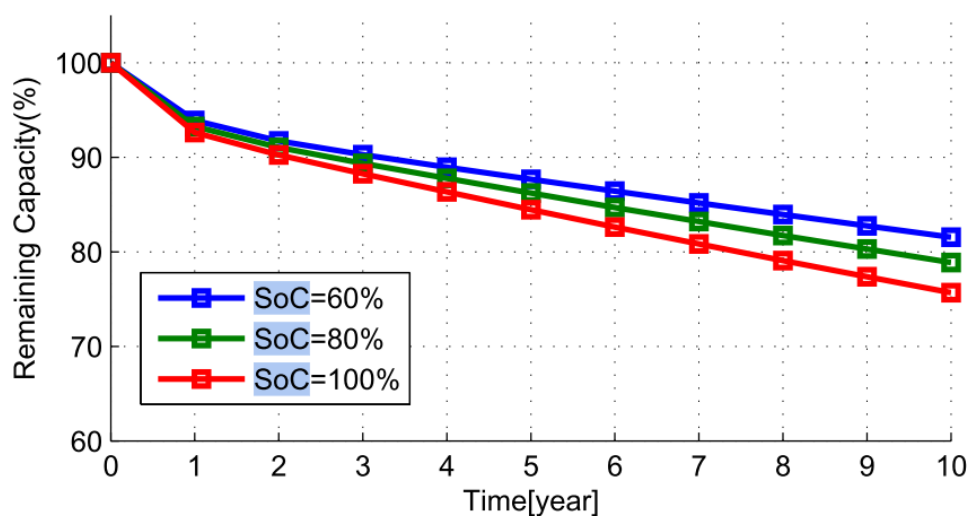
**Kuva 18.** Lämpötilan vaikutus litiumionikennon kalenteri-ikäen (Xu ym., 2018, s. 5).

Lämpötilan laskeminen vähentää akun vanhenemista, mutta lämpötilan laskiessa alle 15°C alkaa myös akun suorituskyky sekä tehon että kapasiteetin osalta laskea. Lämpötilan laskiessa heikkenee tietyt hajoamismekanismit, mutta edelleen lämpötilan pudotessa käynnistyy uudet hajoamismekanismit ja kennon vanheneminen kiihtyy. (Xu ym., 2018, s. 5.) Litiumionikemien toimintalämpötila-alueita on havainnollistettu kuvassa 19.



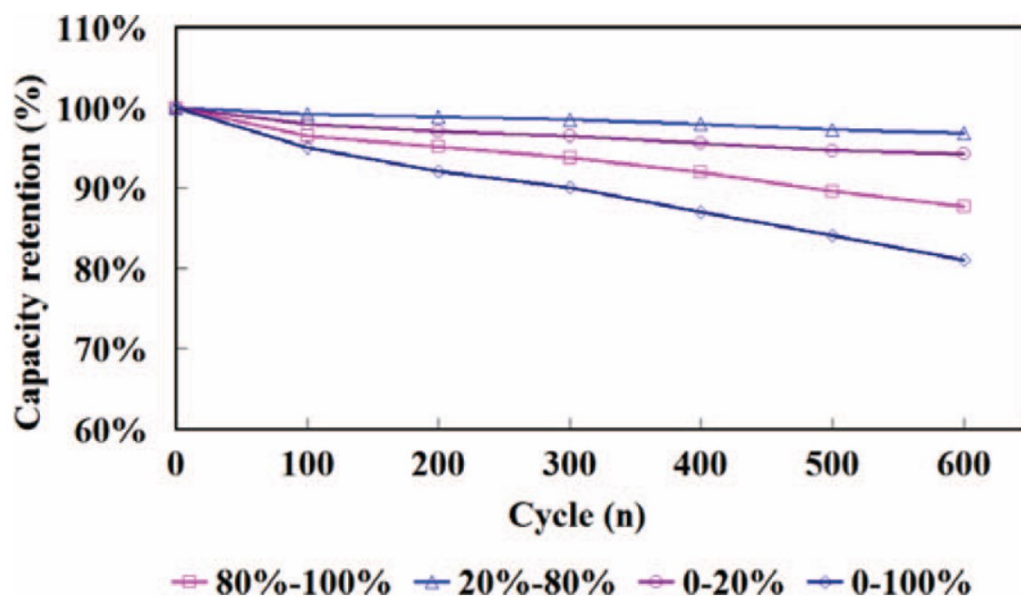
**Kuva 19.** Litiumionikemien lämpötila-alueet (Warner, 2015, s. 117).

Käytettävä akun lataustaso (SOC) vaikuttaa vanhenemiseen useiden hajoamismekanismien kautta. Korkeiden SOC-tasojen käyttäminen kiihdyttävät akun vanhenemista pääasiassa kennon kapasiteetin pienenemisen muodossa (**Kuva 20**). Hyvin matalien SOC-tasojen käyttäminen taas kasvattaa kennon sisäistä impedanssia ja pienentää tehoa. (Xu ym., 2018, s. 5.)



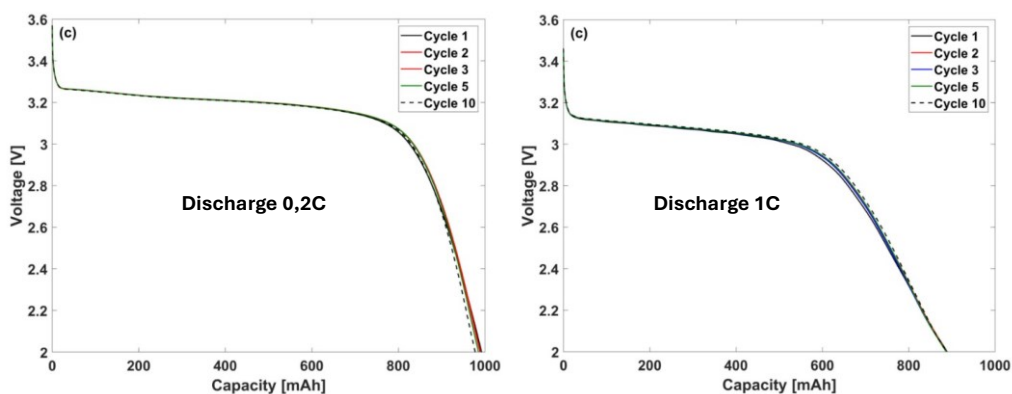
**Kuva 20.** SOC-tason vaikutus litiumionikennon kalenteri-ikään (Xu ym., 2018, s. 5).

Akun käytön aiheuttamaan sykliseen vanhenemiseen vaikuttaa kennossa käytettävät jännitealueet eli SOC-tasot. Tutkimuksessaan Jiang ym. (2014) testasivat eri SOC-alueiden käytön vaikutusta LFP-kennojen sykliseen suorituskykyyn. Yksi tutkimuksen testeistä sisälsi käyttöalueet molempien ääripäiden (SOC 0-20 % ja SOC 80-100 %) osalta sekä keskialueen SOC 20-80 %. Vertailukohtana testissä oli koko SOC-alueen käyttäminen eli 0-100 %. Tutkimustulokset osoittivat kennon syklisen kestävyys- ja kestävyyden olevan heikoimmillaan käytettäessä täyttä SOC-aluetta ääripäistä toiseen. Syklinen osakäyttö SOC-alueen ääripäissä parantaa kennon syklistä kestävyttä, mutta näistä SOC 80-100 % on selvästi huonompi vaihtoehto. Syklisen kestävyys- ja kestävyyden kannalta parhaaksi vaihtoehdoksi tutkimuksen perusteella osoittautui kennon syklinen kuormittaminen jännitealueen keskellä SOC 20-80 % ääripäitä välttäen (**Kuva 21**).



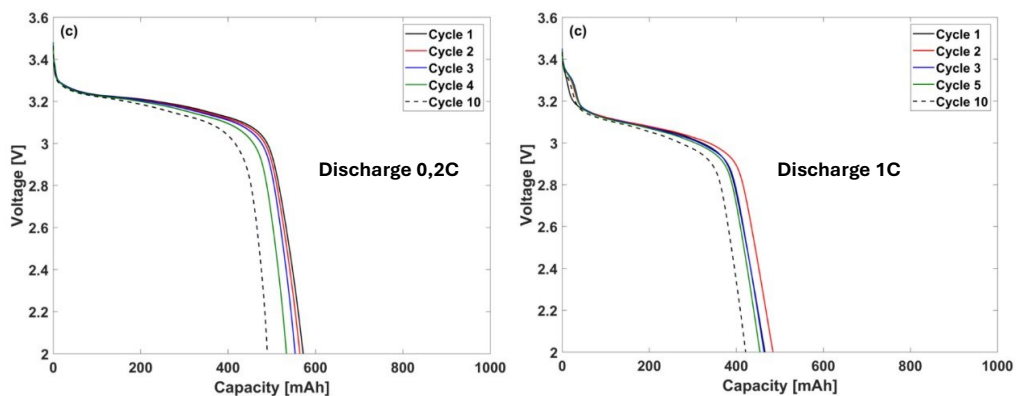
**Kuva 21.** Käytettävän SOC alueen vaikutus sykliseen ikään (Jiang ym., 2014, s. 3).

Syklisen vanhenemisen tekijänä on myös kennon kuormitusvirta, jota kuvataan purku- ja latausnopeuden kertovalla C-rate-arvolla. Tutkimuksessaan Mendoza-Hernandez ym. (2020) vertailivat LFP-kennojen kapasiteetin muutosta kahden eri purkunopeuden (1C ja 0,2C) välillä. Lisäksi heidän tutkimuksessansa käsiteltiin kahden eri lataustyyppin eli vakiovirran ja vakiovirta/jännite (CC ja CC-CV) vaikutusta. CC-CV -latauksella purkunopeuksien välillä on iso kapasiteettiero, mutta syklisen vaikutus kapasiteettiin on vähäinen (**Kuva 22**).



**Kuva 22.** CC-CV ladatun kennon kapasiteetti eri purkunopeuksilla (Mendoza-Hernandez ym., 2020, s. 2-3).

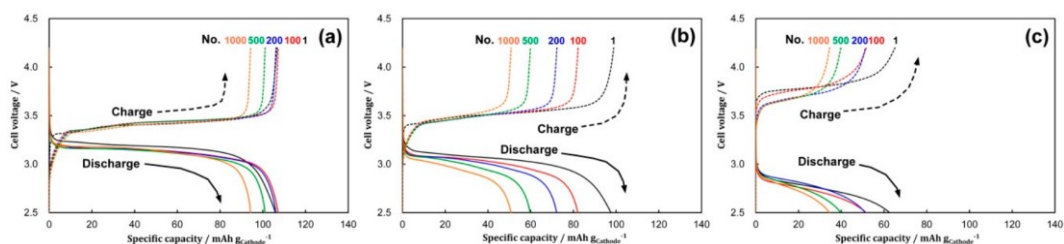
Mendoza-Hernandez ym. (2020) tutkimuksessa tehtiin vastaava koe CC-latausta käyttäen, jolloin 1C ja 0,2C purkunopeuksien välillä oli kapasiteettiero 0,2C nopeuden eduksi, mutta myös syklien välillä näkyi eroja kapasiteetin pienentyessä sykli-määrien mukaan (**Kuva 23**). Tämä on kuitenkin lataustavan vaikutusta eikä purku C-rate-arvon.



**Kuva 23.** CC ladatun kennon kapasiteetti eri purkunopeuksilla (Mendoza-Hernandez ym., 2020, s. 2-3).



Suurempien C-rate-arvojen vaikutusta käsittelevät Abe ym. (2019) tutkimuksessaan, jonka testitulokset LFP-kennojen osalta osoittavat hitaamman lataus- ja purkunopeuden olevan edullisempi kapasiteetin säilymisen ja kennojen vanhenemisen kannalta. 2C ja 5C latausten ja purkujen yhteydessä kennon sisäisen impedanssin kasvu näkyy kapasiteetin pienentymisenä (**Kuva 24**). Abe ym. (2019) toteavat tutkimuksessaan, että korkeammilla C-rate-arvoilla kennon kapasiteetin käyttöaste jää alhaisemmaksi, mikä voi jopa hidastaa vanhenemisprosessia.



**Kuva 24.** LFP-kennon syklitesti (a) 1C, (b) 2C ja (c) 5C lataus- ja purkunopeuksilla (Abe ym., 2019, s. 6).

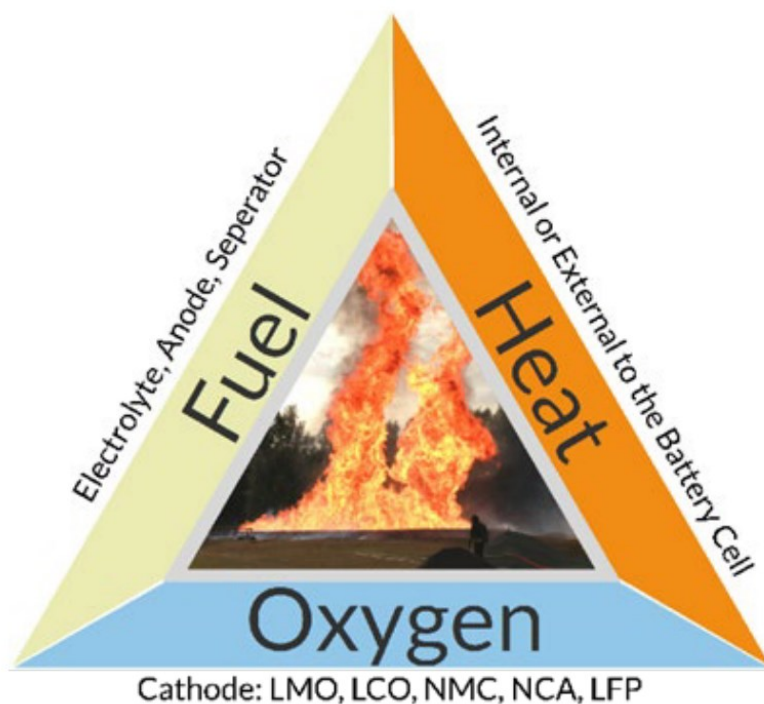
### 3.6 Akkujen turvallisuus

Litiumioniakkujen jatkuva kehitys energiatihedysten parantamiseksi sekä kenno-kapasiteetin suurentamiseksi on samalla kasvattanut turvallisuusriskin määrää. Kehitys on tehnyt litiumionikennoista herkempiä ja kasvaneen sisäisen energiamäärän myötä myös seurauksiltaan vaarallisempia vikatilanteen sattuessa. Litiumioniakkukennon tapauksessa merkittävä vaara on akkupalo ja sen yhteydessä tapahtuva lämpökarkaaminen (terminen karkaaminen, lämpöryntäys, eng. *thermal runaway, TR*). (Lai ym., 2022, s. 1-2.)

Lämpökarkaamisilmiö voi tapahtua litiumionikennossa sen väärinkäytön seurauksena. Tämä voi olla mekaanista, sähköistä tai termistä. Myös kennon sisäinen vika voi käynnistää lämpökarkaamiseen johtavan reaktion (Feng ym., 2020, s. 2). Epäsuotuisten olosuhteiden takia kennossa alkaa tapahtua eksotermisiä kemiallisia reaktioita, jotka tuottavat enemmän lämpöä kuin kenno pystyy luovuttamaan

ulospäin. Nouseva lämpötila kiihdyttää reaktioita ja käynnistää uusia, jotka lisäävät entisestään lämpötilaa. (Bisschop ym., 2019, s. 30-32.)

Prosessin kiihtymisvaiheessa (eng. *acceleration stage*) reaktiot tapahtuvat kennon negatiivisella elektrodilla eli anodilla muodostaen lämmön lisäksi palavia hiilivetykaasuja. Lämpötilan noustessa alkaa elektrodien välinen separaattorikalvo sulaa aiheuttaen kennon sisäisen oikosulun, joka tuottaa lisää lämpöä kennoon. Lämpötilan noustessa edelleen, alkaa positiivisen elektrodin eli katodin aktiivinen materiaali reagoida tuottamalla suuren määrän lämpöä ja vapauttaen samalla hapetta. Tässä vaiheessa kenno on siirtynyt ryntäysvaiheeseen (eng. *runaway stage*). Lämpötilan noustessa yli syttymispisteen tai sähköisen kipinän aiheuttamana alkavat elektrolyytin liuotinaineet palamaan voimakkaasti katodireaktioiden tuottaman hapen vaikutuksesta. Tällöin kuvassa 25 esitetyt palamisen edellytykset ovat täyttyneet. Tämän palamisvaiheen (eng. *combustion*) jatkuessa palaa myös kennon muut kiinteät materiaalit ja osat. (Bisschop ym., 2019, s. 31-32)



**Kuva 25.** Palamisen peruselementit litiumioniakussa (Bisschop ym., 2019, s. 33).

Akkukennon vikaantuminen voi johtaa merkittäviin materiaalsiin vahinkoihin sekä henkilövahinkoihin. Tästä syystä on tärkeää tunnistaa akkujen vikaantumissyitä ja keinot niiden välttämiseen. Litiumionikennon vikaantumissyitä ovat seuraavat (Bisschop ym., 2019, s. 32-40):

1. **Kennon sisäinen oikosulku** (eng. *Internal short circuit, ISC*)
  - Akkukennon vaarallisin vikaantumissyitä, jossa akkukennon elektrodit (anodi ja katodi) sähköisesti yhdistyvät kennon sisällä purkaen kennoon sitoutuneen energian sähkövirtana tuottaen samalla voimakkaasti lämpöä kennoon. Sisäinen oikosulku voi johtua kennon materiaali- tai valmistusvirheestä, dendriitin kasvusta tai mekaanisesta muodonmuutoksesta. (Bisschop ym., 2019, s. 33.)

- Dendriitin kasvun estäminen akun oikeaoppisella käytöllä ja akkukennojen suojaaminen ulkoisilta mekaanisilta voimilta poistavat riskiä sisäisille oikosuluille (Bisschop ym., 2019, s. 36).
- Äkillisen ja ennalta arvaamattoman kennon valmistusviasta johtuvan sisäisen oikosulun riskiä on vaikea pienentää. Tämän takia on tarpeellista suunnitella ja rakentaa akustojärjestelmät siten, että yksittäisen kennon vikaantuessa saadaan vahingot rajattua mahdollisimman hyvin. Tämä saavutetaan käyttämällä tehokkaita kotelointi- sekä sammutusratkaisuja. (Lai ym., 2022, s. 21.)

## 2. Mekaaninen muodonmuutos ja iskut

- Akkukenno voi vikaantua mekaanisesti ulkoisen voiman vaikutuksesta. Ulkoinen isku tai kennon putoaminen maahan rikkoo kennon rakenteita muuttaen sen osien ominaisuuksia ja toimintaa. Sisäisten oikosulkujen lisäksi kennon sisällä olevat palavat ja sähköä johtavat nesteet voivat vuotaa ulos. (Bisschop ym., 2019, s. 34.)
- Kennojen mekaanisia vaurioita voidaan ehkäistä niiden huolellisella varastoinnilla, käsittelyllä sekä akustorakenteen suojakoteloinnilla kaikilla sen tasoilla (akkukennot, -moduulit ja -paketit)

## 3. Ylilataaminen

- Ylilataamista voi tapahtua energiamäärän sekä latausnopeuden (tehon) suhteen. Kennon lataamisessa yli sen jännitteen käyttöalueen kiihdytetään anodilla itselämpeämisreaktioita sekä dendriitin muodostumista. Suurien lataustehojen isot sähkövirrat tuottavat kennoon ylimääräistä lämpöä ja toisaalta matalissa lämpötiloissa (alle 0°C) ne lisäävät dendriittien kasvua. (Bisschop ym., 2019, s. 36-37.)
- Akunhallintajärjestelmän (BMS) tehtävänä on estää akuston ylilataaminen. Järjestelmän oikeat asetukset ja toimintakyvyn varmistavat testit pienentävät ylilataamisen riskiä. (Bisschop ym., 2019, s. 61).

#### 4. Ylipurkaminen

- Kennon ylipurkaminen tapahtuu, kun sen jännite laskee alle käyttöalueen. Sarjaan kytkettyjen kennojen mahdollinen epätasapaino voi aiheuttaa yksittäisten kennojen ylipurkautumisen. Ylipurkutilanteessa anodin kuparinen virrankeräin alkaa hajota sähköä johtaviksi partikkeleiksi aiheuttaen riskin sisäiselle oikosululle. Lisäksi elektrolyytissä katodille kulkeutuva kupari voi alkaa reagoida aktiivisen materiaalin kanssa. Huomioitavaa on, että akkukennojen itsepurkautuminen (eng. *self-discharge*) ei voi aiheuttaa ylipurkautumista. (Bisschop ym., 2019, s. 37-38)
- Akunhallintajärjestelmä (BMS) valvoo akustoa ja estää sen ylipurkamisen. Akkukennojen vikaantumisriskiä ylipurkamisen takia pienentää oikein aseteltu ja toimintakykyinen BMS (Bisschop ym., 2019, s. 61).

#### 5. Ulkoinen oikosulku

- Akkukennon ulkoinen oikosulku voi tapahtua mekaanisen muodonmuutoksen, veteen upottamisen, korroosion tai huoltotoimenpiteiden aikana tapahtuneen virheen takia. Oikosulussa kennoista purkautuu aluksi suuri sähkövirta. Tätä vaihetta seuraa virran lasku, kennon lämpötilan nousu, elektrolyytin höyrystyminen sekä kennon sisäisen paineen nousu. Kennotyypin mukaan tämä voi aiheuttaa kennon kuoren pullistumisen tai pahimmillaan kennon räjähtämisen. (Bisschop ym., 2019, s. 38.)
- Ulkoisen oikosulun riskiä vähennetään ensisijaisesti aiheuttajien vaikutusta pienentämällä. Vikaantumisen aiheuttamia vaikutuksia voidaan pienentää käyttämällä ylipainesuojattuja kennoja sekä oikosulkuvirtaa rajoittavia tai katkaisevia ratkaisuja. (Bisschop ym., 2019, s. 38.)

#### 6. Korkea lämpötila

- Korkea kennon ulkoinen lämpötila estää kennon jäähtymisen, jolloin kennon sisäinen lämpötila alkaa nousta. Lämpötilan noustessa käynnistyy kennon hajoamisreaktiot johtaen kennon vanhenemiseen ja äärimmillään vikaantumiseen. (Bisschop ym., 2019, s. 39.)
- Riskiä pienentävät tehokkaat jäähdytysratkaisut sekä jatkuva lämpötilan valvonta niin ympäristön osalta kuin akustorakenteen eri tasoilla (Lai ym., 2022, s. 21).

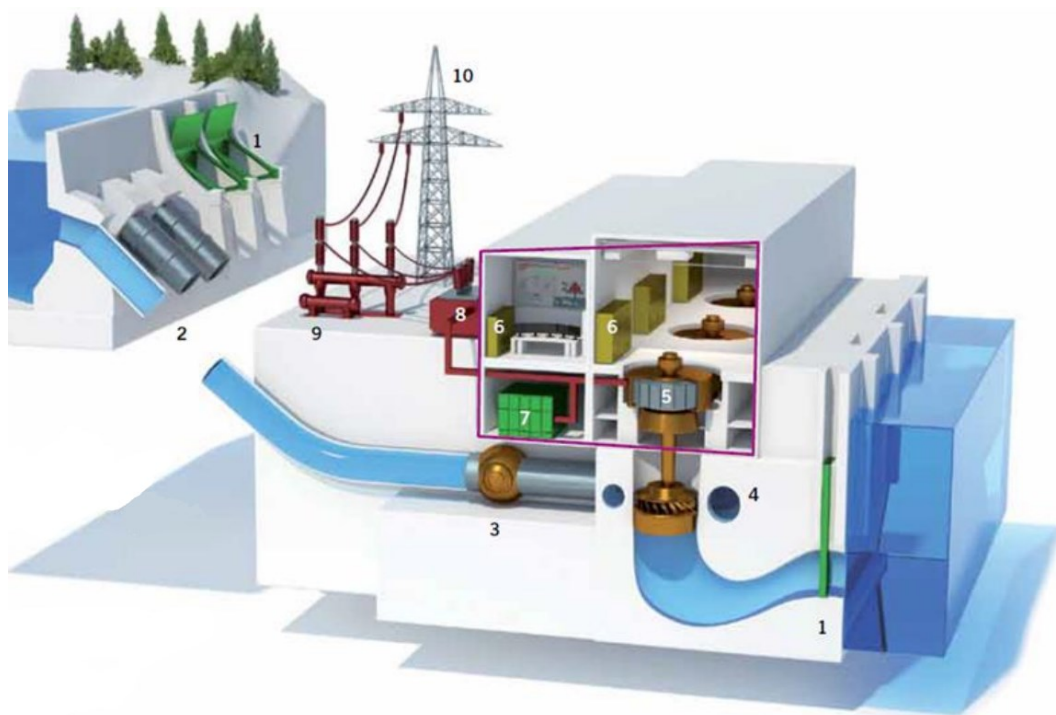
## 4 AKKUVARASTO HYBRIDISÄÄTÄJÄSOVELLUKSESSA

Tässä luvussa tutkitaan ja arvioidaan akkuvaraston soveltuvuutta hybridisäätäjäsovelluksissa. Koska energiavarastot ovat isoja investointeja, joita aina arvioidaan takaisinmaksuaikojen ja elinkaarikustannusten kautta, tarkastellaan soveltuvuuskykyä litiumioniakkujen ja -akkuvarastojen käyttöikänsä peilaten. Tavoitteena on löytää akkujen käyttöikänsä kannalta edullisia tapoja käyttää ja mitoittaa akkuvarastoja hybridisäätäjän energiavarastona. Akkujen vanhenemisen tuoman näkökulman lisäksi tarkastellaan akkaturvallisuuteen liittyviä kysymyksiä.

### 4.1 Asennusympäristö

Asennusympäristöä ja siihen liittyviä etuja sekä rajoitteita arvioitaessa tulee huomioida erilaisten muuttujien suuri määrä. Akkuvarasto itsessään koostuu useasta fyysisestä laitteistosta, joiden määrä, koko, paino ja vaatimukset asennuspaikalle vaihtelevat järjestelmän tehon, kapasiteetin sekä muiden teknisten ominaisuuksien mukaan. Toisaalta vesivoimalaitokset asennusympäristönä akkuvarastolle voivat olla hyvinkin erilaisia riippuen laitoksen tyyppistä, sijainnista ja koosta. Näistä lähtökohdista asiaa tarkastellessa on selvää, että yleispätevän ohjeen tai suosituksen tekeminen akkuvaraston asennuspaikalle ei ole mielekästä.

Akkubaraston sijoituspaikkana voi olla voimalaitoksen sisätilat tai laitoksen ulkopuoliset rakenteet ja alueet. Pääsääntöisesti vesivoimalaitoksen sähköjärjestelmät sijoitetaan laitoksen sisälle omiin sähkötiloihin lähelle generaattoriyksiköitä. Sisällä sijoitus voi olla omaan tai yhteiseen tilaan muiden laitteistojen kanssa (**Kuva 26**). Laitoksen ulkopuolella laitteistot pitää sijoittaa rakenteeseen, mikä suojaa niitä vaihtelevilta sääolosuhteilta. Laitoksen ulkopuolella akkuvaraston sijoitus voidaan ajatella olevan joko laitoksen välittömässä läheisyydessä tai etäämmällä irti voimalaitosrakennelmasta.



**Kuva 26.** Vesivoimalaitoksen päälaitteistot (Corà, 2020, s. 11)

Taulukossa 2 on arvioitu asennuspaikkavaihtoehtojen hyviä puolia ja heikkouksia eri näkökulmista. Hyvät puolet on kuvattu taulukkoon plusmerkeillä, kun taas heikkoudet miinusmerkein.

**Taulukko 2.** Asennuspaikkavaihtoehtojen vertailu.

	SISÄLLÄ - yhteiset tilat	SISÄLLÄ - oma tila	ULKOPUOLELLA - lähellä	ULKOPUOLELLA - etäällä
Ympäristöolosuhteiden hallinta	+	++	-	-
Akkupalotilanne	--	-	+	++
Asennukset (kaapelointi)	+	+	-	--
Asennukset (laitteistot)	-	-	+	++
Järjestelmän laajennettavuus	--	-	+	++

Ympäristöolosuhteiden hallinnalla tarkoitetaan pääasiassa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden säätöä. Sähköisten laitteiden ja niiden toiminnan kannalta molemmat asiat ovat tärkeitä. Akkujen vanhenemisen kannalta lämpötila oli yksi merkit-



tävä tekijä. Akustojärjestelmän ympäristölämpötilan pitäminen tasaisena ja kohtuullisen matalalla tasolla on hyvä lähtökohta akkumoduulien ja -kennojen lämpötilan hallintaan. Tämä onnistuu hyvin laitoksen sisätiloissa ja etenkin tilan ollessa pieni, kun taas suuret yhteiset tilat voivat olla haasteellisia. Laitoksen ulkopuolelle sijoitettavissa ratkaisuissa taas ympäristöolosuhteet muuttuvat vuoden- ja vuorokaudenaikojen sekä säätilan mukaan. Tällöin akuston ympäristöolosuhteiden optimaalisena pitäminen on haasteellisempaa ja vaatii enemmän panostuksia.

Turvallisuusnäkökulmasta akkupalo on tunnistettava merkittäväksi vaaraksi akkuvarastojärjestelmien osalta. Pahimmillaan hallitsematon lämpökarkaamisilmiö voi johtaa merkittäviin materiaalsiin lisävahinkoihin ja jopa vaarantaa käyttöhenkilöstön turvallisuuden. Tästä näkökulmasta voimalaitoksen sisätilat asennuspaikkana eivät ole optimaaliset. Yhteisissä tiloissa voi vahinkojen määrä kasvaa merkittävästi, mutta toisaalta omassa tilassa akuston tuhoutuessa lisävahingot rajautuvat pienemmäksi. Turvallisimmat asennuspaikat ovat laitoksen ulkopuolella, turvallisuuden parantuessa voimalaitoksen kannalta suoraan etäisyyden suhteessa. Luonnollisesti turvaetäisyydet mahdollisiin muihin rakenteisiin ja kohteisiin tulee huomioida.

Asennuskustannusten kannalta sijoituspaikka tuo erilaisia vaikutuksia. Akkuvaraston vieminen kauas voimalaitoksen laitteistoista kasvattaa kaapelointikustannuksia, ja laitoksen sisälle sijoitettuna kaapelointietäisyydet minimoituvat. Laitteistoasennusten suhteen taas sisätiloihin asennettavat akkujärjestelmät teettävät työtä ja aiheuttavat kustannuksia, kun taas ulkopuolelle sijoitettavat akkuvarastojärjestelmät ovat pääsääntöisesti tehdasvalmisteisia kokonaisuuksia, jotka vain nostetaan asennuspaikalleen, minkä voisi olettaa olevan helpointa etäämmällä voimalaitoksesta.

Akkubaraston laajennettavuus tarkoittaa käytännössä mahdollisuutta laitteistosisien lisäämiselle. Tällöin puhutaan lisätilarpeesta uusien laitteistojen asennusta varten. Vapaan tilan määrä on vahvasti laitospohjainen kysymys, mutta voi-

daan kuitenkin olettaa sitä olevan todennäköisemmin laitoksen ulkopuolella verrattuna sisätiloihin. Voimalaitoksen sisätilat ovat suunniteltu vesivoimatuotannon laitteistoille, jolloin ylimääräistä tilaa ei välttämättä ole.

#### 4.2 Sähkövaraston kuormitusprofiili

Vesivoima on merkittävä tuotantotapa Pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Etenkin Fingridin reservimarkkinoilla sillä on hallitseva asema. Fingrid tasapainottaa sähköverkon tehotasapainon hankkimalla ja aktivoimalla markkinoilta saatavia tehoreservejä. (Uusitalo, 2024.)

VEO-eHPG-hybridisäätäjä tukee sähkövaraston (ES) avulla vesivoimalaitoksen taajuussäätöä sen tuottaessa Fingridille taajuusohjattua reservitehoa. Näitä reservituotteita ovat (Fingrid Oyj, 2022):

1. **Taajuusohjattu käyttöreservi**

(FCR-N, eng. *Frequency containment reserve for normal operation*)

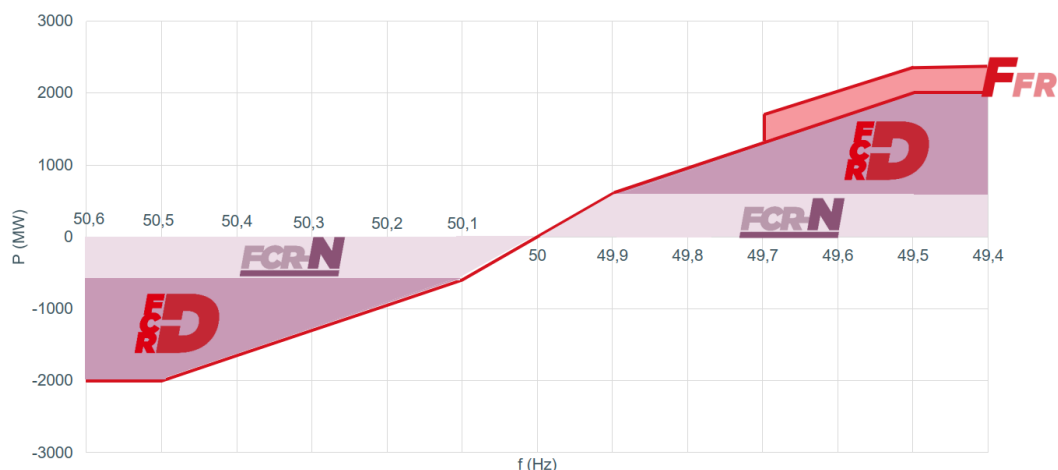
2. **Taajuusohjattu häiriöreservi**

(FCR-D, eng. *Frequency containment reserve for disturbances*)

3. **Nopea taajuusreservi**

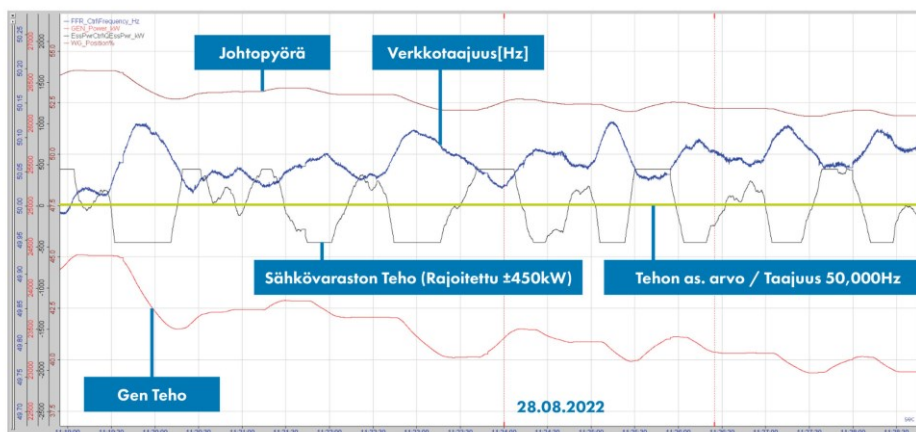
(FFR, eng. *Fast frequency reserve*)

FCR-N eli taajuusohjatun käyttöreservin tarkoituksena on pitää verkon taajuus normaalilla käyttöalueella välillä 49,9–50,1 Hz. Taajuuden ylittäessä normaalin taajuusalueen rajat, aktivoituu taajuusohjatut häiriöreservit (FCR-D), joiden tarkoituksena on pitää taajuus enintään 50,5 ja vähintään 49,5 Hertzissä. Nopeat taajuusreservit aktivoituvat alitaajuushäiriöissä 49,7 Hz taajuudesta alkaen. (Fingrid Oyj, 2022.) Kuvassa 27 on esitetty reservituotteiden aktivoituminen tehokuvana taajuuden funktiona.



**Kuva 27.** FCR ja FRR aktivoituminen taajuuden funktiona (Fingrid Oyj, 2022).

Verkon taajuus muuttuu jatkuvasti tehotasapainon muuttuessa. Tämän jatkuvasti muuttuvan tehotarpeen VEO-eHPG-hybridisäätäjä kompensoi FCR-N taajuussäädöllä sähkövarastoa säätämällä voimalaitoksen vesiturbiinin sijaan (**Kuva 28**).

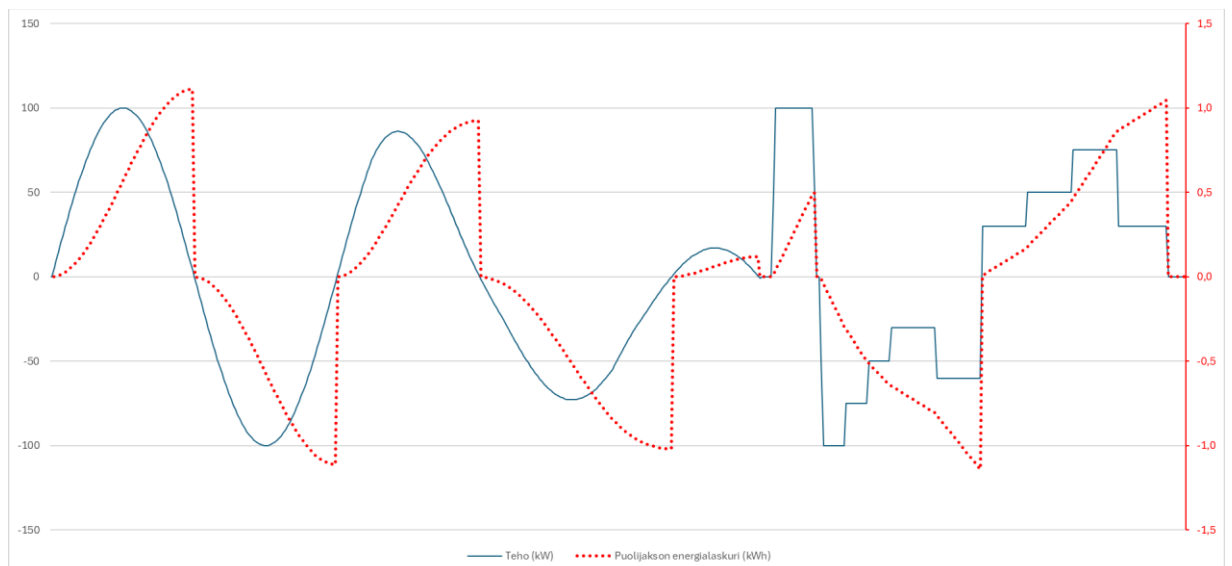


**Kuva 28.** Hybridisäätäjän toimintaa simulointitesteissä (VEO News, 2022).

Nopeisiin tehomuutoksiin kykenevän sähkövaraston käytöllä säästetään vesiturbiinin säätölaitteiston liikkeitä ja sitä kautta sen mekaanista kulumista. Casarin ym.

(2023) totesivat tutkimuksessaan hybridisaation pienentävän vesiturbiinin säätömekanismin ajomatkaa vähintään noin 25 % ja jopa 58 %. Mekaniikkaa rasittavien säätöliikkeiden määrän todettiin vähenevän vähintään 44 % ja enintään 85 %.

Sähkövaraston kuormitusprofiilin tutkimista varten käytettävissä oli noin 400 minuuttia pitkä datatallenne testijärjestelmän sähkövaraston pätötehosta hybridisäätäjän ohjaamana. Raakadata oli tallennettu Excel-taulukkomuotoon 100 millisekunnin näytteenottotaajuudella, mutta analysoinnin helpottamiseksi datasarja muunnettiin 1,0 sekunnin keskiarvoiksi, jolloin datapisteiden määrä putosi kymmenesosaan alkuperäisestä ollen 24 101 kappaletta. Sähkövaraston pätötehodontan yksikkö oli kilowatti (kW) ja siitä laskettiin jokaiselle sekunnille energiamäärä (kWh), jolla sähkövarastoa kuormitettiin. Pätötehon etumerkki kertoi, onko kyseessä sähkövaraston kannalta purku- vai lataustilanne. Sekuntikohtaisten energiamäärien avulla laskettiin jokaiselle purku- ja latauspuolijaksolle (eng. *half-cycle*) kokonaisenergiamäärä kumulatiivisen, tehon etumerkin vaihtuessa nollaantuvan energialaskurin avulla. Asiaa on havainnollistettu alla olevassa trendikuvaajassa (**Kuva 29**) ja vastaava kuvaaja testijärjestelmän osalta on liitteenä (**Liite 1**).



**Kuva 29.** Esimerkkikuvaaja puolijakson energialaskennasta.

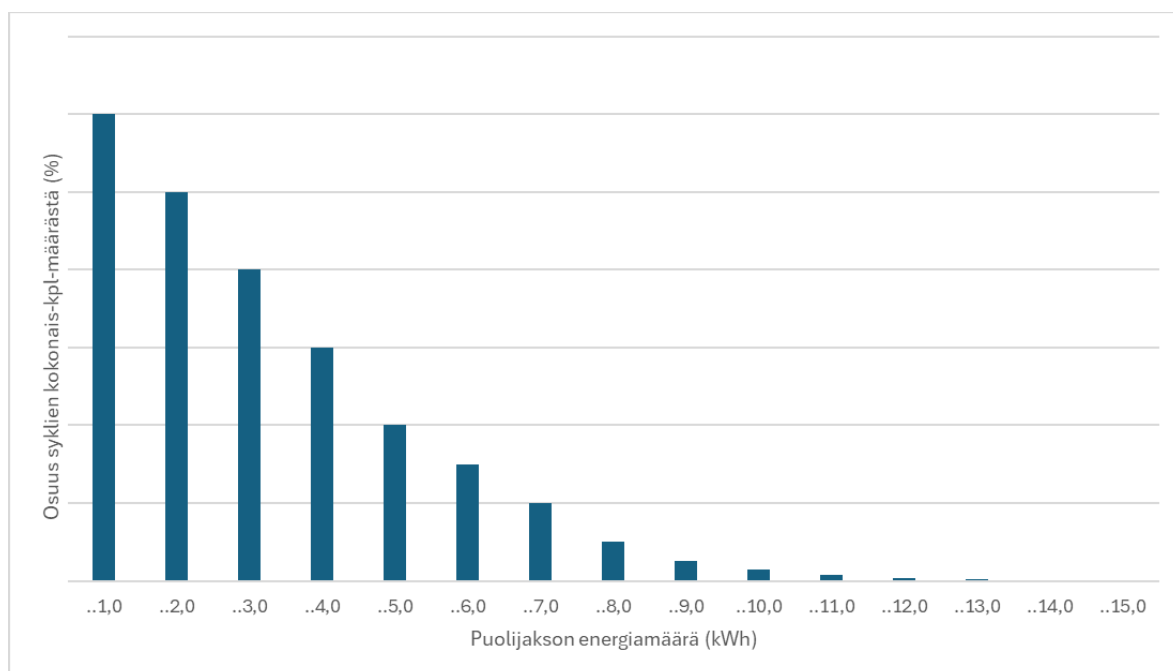
Akuston kannalta kuormitus taajuussäädöllä on syklimäistä. Purku- ja lataussyklit vaihtuvat verkkotaajuuden muutoksista ja teho vaihtelee puolisykliin sisällä. Kuormitusprofiilin analysointia varten koko näytealueesta määritettiin ja laskettiin taulukon 3 mukaiset tunnusluvut. Testijärjestelmän osalta määritetyt tunnusluvut on esitetty liitteenä olevassa taulukossa (**Liite 2**).

**Taulukko 3.** Tunnusluvut kuormitusprofiilin näytealueelta.

Tunnusluku	Yksikkö
Purkupuolijaksoja	kpl
Latauspuolijaksoja	kpl
Sykli aika (keskim.)	s
Purkupuolijakson energia (keskim.)	kWh
Latauspuolijakson energia (keskim.)	kWh
Purkupuolijakson energia (maks.)	kWh
Latauspuolijakson energia (maks.)	kWh

Purku- ja latauspuolijaksojen lukumäärien pitäisi periaatteessa olla samat, mutta erot tunnusluvuissa johtuvat näytealueen katkeamiskohdasta sekä näytealueella olevista syklijaksoista, jossa esimerkiksi latausjakso päättyy nolletehoon ja jatkuu uudestaan latauksella purkupuolijakson sijasta.

Puolijaksojen energioiden keskiarvot olivat melko matalalla tasolla verrattuna maksimiarvoihin. Tämän takia analysoitiin mikä oli syklistyvyksien spektri näytealueella. Tulokset esitettiin pylväskuvaajana alla olevan esimerkin (**Kuva 30**) mukaisesti. Kuvaaja esittää eri syvyisten puolisykliin osuuden kaikista puolisykleistä.



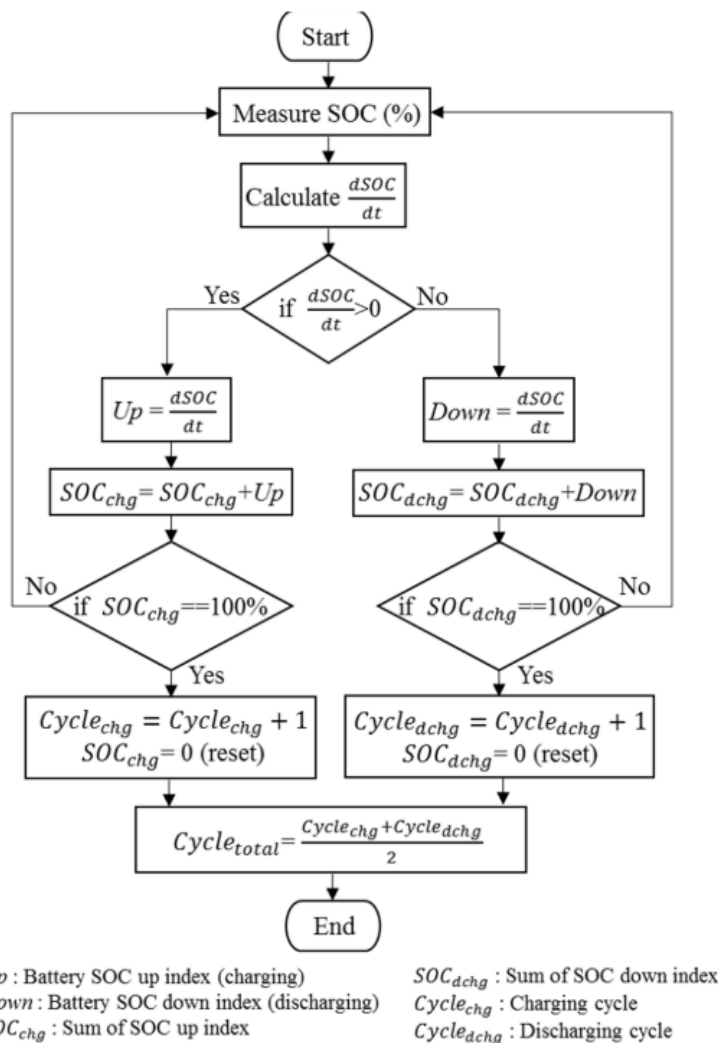
**Kuva 30.** Esimerkkikuvaaja puolijaksojen energiaspektristä.

Testijärjestelmän datasta lasketut spektrikaaviot on esitetty liitteessä (**Liite 3**). Jakaumista voitiin todeta, että purkupuolisykleistä 86 % on syvydeltään alle 5,0 kWh ja syvydeltään suurimmat syklit (yli 10,0 kWh) ovat yksittäisiä koko näytealueella. Latauspuolisykleistä alle 5,0 kWh syvyyttä edusti 78 % ja suurimmat yli 10,0 kWh syvyyden syklit olivat myös yksittäisiä joidenkin jakauma-alueiden puuttuessa kokonaan.

Testijärjestelmän sähkövaraston energiakapasiteetti oli 44 kWh. Tähän verrattuna 5,0 kWh puolisyklin DOD-arvo on 11,4 % ja 1,0 kWh puolisyklin 2,3 %. Näytealueen suurin puolisyklin syvyys oli 18,0 kWh, joka vastaa DOD-arvoa 43,2 %.

Gundogdu ja Gladwin (2018) käsittelevät tutkimuksessaan sykli-laskennan haasteita taajuussäätösovelluksissa, joissa purku- ja lataussyklit ovat pieniä ja epäsäännöllisiä. Tyypillisesti litiumioniakkujen valmistajat ilmoittavat akkujen syklikestävyyden täysien lataus- ja purkussyklien määrällä käyttäen rajana 20 prosentin ka-

pasiteetin vähenemistä alkuperäisestä. Kuormitusprofiilissaan mikrosyklejä sisältävissä sovelluksissa on syklimäärien seuraamista ja sitä kautta akkujen vanhene-  
misen arviointia varten tarpeellista käyttää laskentamenetelmiä, jotka muuntavat  
mikrosyklit ekvivalenttisiksi täyssykleiksi (EFC, eng. *Equivalent full cycle*).  
Gundogdu ja Gladwin (2018) esittelevät tutkimuksessaan laskentametodin, jolla  
saadaan SOC-arvoon perustuen laskettua täyssykliden määrä (Kuva 31).



**Kuva 31.** Vuokaavio SOC-arvoon perustuvasta syklilaskennasta (Gundogdu & Gladwin, 2018, s. 3).

Gundogdu ja Gladwin (2018) esittelemää menetelmää käyttäen testijärjestelmän kuormitusprofiilin näytealueelta laskettiin täydet lataus- ja purkusyklien määrät. Näiden puolisyklien määrästä voidaan laskea täyssyklien määrä ja lisäksi ennusteet täyssyklien määrälle eri aikaikkunoissa. Laskentakaavat on esitetty taulukossa 4 ja testijärjestelmästä lasketut tulokset on esitetty liitteessä 4.

**Taulukko 4.** Syklilaskennan tunnusluvut ja niiden laskenta.

Tunnusluku	Arvo	Yksikkö
Näytejakso	t	min
Täysien latauspuolijaksojen määrä	n	kpl
Täysien purkupuolijaksojen määrä	m	kpl
Ekvivalenttisiä täyssyklejä	$c = (n+m)/2$	kpl
Täyssyklejä tunnissa	$c / (t / 60)$	kpl
Täyssyklejä päivässä	$(c \times 24) / (t / 60)$	kpl
Täyssyklejä vuodessa	$(c \times 8760) / (t / 60)$	kpl

Syklimäärät laskettiin käyttäen testijärjestelmän sähkövaraston 44 kWh energiakapasiteettiä täyden puolijakson arvona. Syklimäärät ovat kääntäen verrannolliset varaston kapasiteettiin, eli suuremmalla energiakapasiteetilla syklimäärät pienevät.

Sähkövaraston mitoitusarvoista purkunopeutta kuvaava C-rate voidaan laskea jakamalla purkuteho (W) varaston kapasiteetilla (Wh). Testijärjestelmän osalta energiavaraston tehoa on rajoitettu maksimi purku- ja lataustehon ollessa 450 kW (**Kuva 28**). Tällöin C-rate arvon voidaan laskea olevan  $10,2C$ .

Näytedataa nopean taajuusreservin (FFR) käyttötilanteesta ei ole tarjolla, mutta reservituotteen minimivaatimuksien kautta voidaan arvioida sen kuormitusta sähkövarastolle. Tehovasteen aikavaatimus on taajuuspoikkeamaan sidottu alkaen 1,3 sekunnista tiukentuen aina 0,7 sekuntiin. Aktivoitumistilanteessa vähimmäiskesto on määritelty 5,0 sekunnin mittaiseksi ja reserviä tuottavan kohteen tulee olla uudelleenaktivoitavissa enintään 15 minuutin kuluttua edellisestä aktivoitumisesta. (Fingrid Oyj, 2023.)



Minimitarjouskoko FFR-markkinoille on 1,0 MW, joka oletetaan tässä yhteydessä laskettavan testijärjestelmän sähkövaraston FCR-N taajuustuennan lisäksi. Teholtaan sähkövarasto olisi siis 1,45 MW energiakapasiteetin ollessa edelleen sama 44 kWh. Yhden FFR-aktivoitumisen energiamäärä on karkeasti laskien 1,0MW teho viiden sekunnin ajan (0,00139 h) ja lisäksi aktivoitumis- sekä deaktivoitumisaikojen energiamäärät. Aktivoitumisrampin aika on maksimissaan 1,3 sekuntia (0,000361 h) ja deaktivoituminen laskevalla rampilla maksimissaan 5 sekuntia (0,00139 h). Kilowattitunneiksi laskettuna näistä saadaan 1,39 kWh + 0,1805 kWh + 0,695 kWh mikä on yhteensä noin 2,27 kWh. Nopea taajuusreservi on siis teholtaan suuri, mutta energiamäärältään varsin pieni, jolloin se ei tuota erityistä syklistä kuormaa sähkövarastolle.

Sähkövaraston kuormitus C-rate-näkökulmasta kasvaa merkittävästi FFR-reservin myötä. 1,0 MW teho suhteessa 44 kWh sähkövarastoon tarkoittaa 22,75C purkunopeutta. Mikäli samanaikaisesti varasto kuormittuu FCR-reservien kautta, olisi pahimmillaan 1,45 MW tehon myötä varaston purkunopeus jo 32,9C.

### **4.3 Akkuvaraston mitoitus**

Kuten minkä tahansa sähkövaraston, myös akkupohjaisen varaston mitoitus tulee tehdä käyttösovelluksen mukaan. Erilaiset käyttösovellukset asettavat erilaisia vaatimuksia sähkövaraston ominaisuuksille. Ominaisuuksien pääjako voidaan tehdä energia- ja tehosovellusten välille (Warner, 2015, s. 36).

Energiasovellukset sisältävät tyypillisesti ajallisesti pitkiä purku- ja lataussyklejä. Sähköenergian käytön ajallinen siirtäminen (esim. arbitraasi) on vahvasti energiapainotteinen sovellus, jossa tarvitaan suurta varastokapasiteettia lataus- ja purkutehon ollessa maltillinen. Tehosovelluksissa päinvastaisesti tarvitaan suurta tehoa lyhytaikaisesti, jolloin energiamäärä ja sitä kautta tarve varastokapasiteetille jää

pieneksi. Tehosovelluksia ovat muun muassa verkon stabiilisuutta tukevat sovellukset, kuten taajuustuenta ja keino inertia. (Byrne ym., 2017, s. 8, 12.)

Akkuvaraston pääkomponenteista tehon perusteella mitoitetaan tehonmuuntojärjestelmän tehomuokkain sekä mahdollinen muuntaja. Mitoitusperusteena teho pitää määrittää myös energiasovelluksissa halutun purku- ja latausnopeuden kautta. Akuston koko eli kapasiteetti mitoitetaan myös sovelluksen energiatarpeiden kautta, mutta samalla mitoitusta tulee tarkastella akuston vanhenemiseen liittyvien seikkojen kautta. Seuraavaksi tarkastellaan akuston mitoitusta testijärjestelmän superkondensaattoreihin perustuvan sähkövaraston korvaamisella litiumioniakkuvarastolla optimoiden akuston käyttöikä.

Aloitetaan tarkastelu C-rate-arvosta, jonka tulisi olla akuston vanhenemisen kannalta mahdollisimman pieni, tarkemmin 1C tai alle. Testijärjestelmän tapauksessa tämä tarkoittaisi vähintään 450 kWh akustoa. Akuston kapasiteetin kaksinkertais- tamalla saa C-rate-arvon puolitettua, mutta koska akuston elinikä ei kasva samassa suhteessa investoinnin kanssa, ei kapasiteetin kasvattaminen ole kannattavaa pelkästään C-rate-arvon pienentämisen takia.

Akuston käyttö optimaalisella varaustasolla on tärkeä huomioida akuston mitoituksessa. Akun syklisen kestävyys kannalta edullinen SOC-alue on 20–80 %. Tämä alue määrittää sovellukselle myös maksimi DOD-arvon. Testijärjestelmän hybridisäätiäsovelluksessa akkuvaraston 450 kWh kapasiteetillä akun purku- tai latauksen maksimisyvyys olisi 270 kWh, mikä ei luonnollisestikaan tuota rajoitetta sovellukselle.

Käytetään tarkastelussa hyväksi samaa testijärjestelmän 400 minuutin kuormitusprofiilidataa ja siitä määritettyjä purku- ja latauspuolisykliä syvyyksiä ja määriä. Sykliä laskennalliset määrät ja syvyydet kWh-yksikössä ovat samat, mutta kun lasketaan ekvivalenttiset täyssykliä vaikuttaa varastokapasiteetti suoraan sykli- määrään. Liitteenä olevaan taulukkoon (**Liite 4**) on laskettu ekvivalenttiset täys-

syklit 450 kW kapasiteetille. Johtuen puolijaksojen pienestä määrästä näytejak-solla, luvut on laskettu ja esitetty desimaalilukuina pyöristysvirheiden välttä-miseksi.

Lukuja vertaamalla 44 kWh varastokapasiteetilla laskettuihin (**Liite 4**) voidaan to-deta täyssyklimäärien suoran suhteen kapasiteettiin. 44 kWh varastokapasiteetin syklimäärät verrattuna noin kymmenkertaisen kapasiteetin akkuvarastoon on myös noin kymmenkertaiset.

Ekvivalenttisten täyssykljen laskennassa on käytetty koko varastokapasiteettia eli 100 % DOD-arvoa. Tällä saadaan syklimäärät pidettyä vertailukelpoisina, koska ak-kukenno ja -moduulivalmistajat ilmoittavat tuotteidensa syklkestävyyden usein 100 % DOD-arvolla. Käyttämällä kennoa pienemmällä DOD-arvolla saadaan akusta valmistajan ilmoitusta suurempia syklimääriä.

Tässä tutkimuksessa esille tuoduilla keinoilla voidaan akun vanhenemista hidas-taa, mutta ei täysin estää. Akuston mitoituksessa tulee siis huomioida tulevien käyttövuosien syklisen ja kalenterivanhenemisen aiheuttama akustokapasiteetin heikentyminen. Myös kapasiteetin varaaminen tiettyyn käyttöön rajoittaa varas-ton käyttöä toisessa sovelluksessa. Esimerkiksi varatessa kapasiteettia FCR-N markkinoille, ei samaa kapasiteettia voida hyödyntää muuhun tarkoitukseen. Täl-laiset tilanteet tulee myös tunnistaa ja huomioida akuston mitoituksessa.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Sähköistyvä maailma tarvitsee akkuja jatkuvasti kiihtyvällä tahdilla. Teknologiat energiavarastoinnin ja sen alalajina olevan sähkövarastoinnin osalta kehittyvät koko ajan tehokkaampaan ja kustannuksiltaan optimaalisempaan suuntaan. Litiumioniakut toivat ominaisuuksillaan akkuteknologioiden pelikentälle vaihtoehdon, joka valtasi nopeasti markkinat. Markkinoiden suuri imu on käynnistänyt akkuteknologian ”gigafactory”-projekteja ympäri maailmaa. Samalla myös tiedemaailma on panostanut litiumioniteknologioiden tutkimiseen. Tutkimuskohteista litiumionikemien vanhenemiseen liittyvät aiheet ovat laajalti tutkimusryhmien työlistoilla ympäri maailmaa.

Litiumionikemot, kuten muutkin akkutyypit, joiden toiminta perustuu kemiallisiin reaktioihin, vanhenevat ajan sekä käytön myötä. Tämä johtuu sivureaktioista, joita akkukemossa tapahtuu siinä olevien eri aineiden reagoitessa toistensa kanssa erilaisissa olosuhteissa. Kompleksinen kemiallinen kokonaisuus yhdistettynä erilaisiin ympäristöolosuhteisiin ja käyttötilanteisiin on tarjonnut tutkijoille paljon työtä vanhenemismekanismien sekä niiden syiden ja seurausten tutkimisessa.

Vaikka onkin selvää, että litiumioniakut vanhenevat, on myös selvää, että vanhenemista pystytään hidastamaan niiden oikeaoppisella käytöllä. Kääntäen voidaan todeta mahdolliseksi akun hajottaminen ennenaikaisesti väärällä käytöllä. Ylilataaminen ja syväpurkaminen ovat tuttuja syntejä jo perinteisistä lyijyakuista, eikä ne ole hävinneet litiumioniakkujen myötä. Akustojen hyvistä olosuhteista, sopivasta kuormittamisesta ja oikeasta mitoituksella rakentuu elinkaareltaan optimaalinen akkuvarasto.

Vesivoimalaitoksen VEO-eHPG-hybridisäätäjäsovellus toimii verkon taajuustuen kanssa, mikä on kuormitusprofiililtaan tehosovellus vaatien pieniä energiamääriä, mutta isoja tehoja. Suuret purku- tai lataustehot yhdistettynä pieneen energiakapasiteettiin ei ole toimiva yhdistelmä litiumioniakustojen osalta. Tämän takia akustokapasiteetti olisi mitoitettava akuston eliniän kannalta, ei itse sovelluksen

tarpeeseen. Tehosovelluksissa tämä johtaa selvästi tarvetta suurempaan energiakapasiteettiin. Toisaalta suurempi energiakapasiteetti parantaa tilannetta syklisen eliniän osalta, kun sovelluksessa sähkövarastoa kuormittavat syklit jäävät energiamäärältään pieneksi suhteessa varastokapasiteettiin ja täten ekvivalenttiset syklimäärät jäävät pieneksi. Akkuja käytettäessä kapasiteetin ylimitoitustarve tulee vastaan myös varaustason (SOC) optimaalista käyttöaluetta tavoiteltaessa. Tätä lisäksi entisestään kalenterivanhenemisen huomioiminen tulevien käyttövuosien osalta.

Akkujen vanhenemiseen liittyy niille määritelty EOL-raja. Koska akku tai akusto on vaihtokunnossa? Elinkaaren loppu on yleisesti määritelty 80 % SOH-arvoon, mutta akunhallintajärjestelmän laskeman lukuarvon sijasta asiaa pitäisi arvioida akuston toimintakyvyn kautta. Tietyissä sovelluksissa oleva akku on elinkaarensa päässä, kun se ei enää toimi sille määritettyjen toimintarajojen puitteissa. Esimerkkinä arkielämästä on kännykän akku, joka ei enää kestä koko työpäivää, vaan pitää ladata välillä, tai auton käynnistysakku, joka ei starttaa ollenkaan tai kun ulkolämpötila laskee. Litiumioniakkujen epälineaarinen vanheneminen tekee EOL rajan määrittämisestä vaikeaa (Arrinda ym., 2021, s. 2). Kehittynyt BMS on avainasemassa akun kunnonvalvonnassa ja elinkaaren vaiheen arvioinnissa.

BMS on tärkeässä roolissa litiumioniakkujen vanhenemisen hidastamisessa. Lämpötilan valvonnalla ja hallinnalla pystytään pitämään kennojen lämpötilat pois epäedulliselta alueelta. Kuormituksen tasainen jakaantuminen kennojen välillä on myös tärkeä BMS:n tehtävä, jolla saadaan pidettyä akusto toimintakykyisenä kaikilla rakennetasoilla.

Litiumioniakkujen turvallisuus on tärkeä huomioida järjestelmää suunniteltaessa. Vakavan akkupalon riski on vähäinen laadukkaita laitteita turvallisten rajojen sisällä käytettäessä, mutta riskin toteutuessa vahingot voivat olla suuret. Tämän takia asiaa ei voi sivuuttaa. Toisaalta akkujen hyvä energiatiheys pitää järjestelmän fyysisesti kohtuullisen pienikokoisena, joten mahdolliset erikoisjärjestelyt esimerkiksi sijoituspaikan osalta ovat mahdollista toteuttaa kohtuullisin panostuksin.

Vastaus kysymykseen akkuvarastojen soveltuvuudesta VEO-eHPG-hybridisäätäjäsovelluksiin on moniulotteinen, mutta teknisestä näkökulmasta ei ole nähtävissä mitään perustetta, mikä sulkisi akut pois sähkövarastovaihtoehdoista. Tämän tutkimuksen tuloksena on kuitenkin vahvistettava ennakkokäsitys akkujen vanhene-  
misen aiheuttamasta haasteesta investoinnin kannattavuudelle. Väärin mitoitettu, huonosti valvottu ja ohjattu akkuvarasto hybridisäätäjän jatkuvassa taajuus-  
tuentasäädössä ei ole käyttöikänsä pitkä. Tutkimus kuitenkin osoittaa, että akku-  
kapasiteetin ylityksellä sovelluksen tarpeeseen verrattuna saadaan akuston  
käyttöalue ja syklimäärät tuotua paremmalle tasolle. Syklikestoisuudeltaan hyvien  
kennovaihtoehtojen käyttö niin akkukemian kuin valmistajakohtaisten ominai-  
suuksien osalta on akuston elinikää edistävä toimi.

Litiumioniakkujen nopea kehitys ja kennovalmistajien markkinoille tuomat uudet  
tuotteet muuttavat samalla akkusovellusten kenttää. Muutaman vuoden ikäinen  
tutkimus voi kuvata haasteita tai esittää lukuja, jotka on tänään ratkaistu uusien  
tuotteiden muodossa. Litiumioniakkujen hintakehitys on ollut laskevaa tähän asti,  
mikä jatkuessaan lupaisi varsin positiivisia näkymiä akkuvarastojen käytölle mah-  
dollisista ylityspaineista huolimatta. Toisaalta liikenteen voimakas sähköisty-  
minen repii akkumarkkinoita ja voi jopa kääntää kennohinnat nousuun.

### **5.1 Tutkimuksen haasteet ja luotettavuus**

Arvioitaessa tämän tutkimuksen haasteita tulee ensimmäisenä listalle käytettä-  
vissä olleen sähkövaraston kuormitusdatan rajallisuus. Käytetty mittausdatan tal-  
lenne on ajallisesti todella lyhyt ottaen huomioon järjestelmän ympärivuorokauti-  
sen ja -vuotisen käytön. On myös mahdollista, että lyhyen tarkastelujakson takia  
jäi myös analysoimatta sellaisia ajojaksoja, joita säännöllisesti esiintyy ja jotka  
kuormittavat sähkövarastoa poikkeavalla tavalla.

Toisena tunnistettuna haasteena tutkimuksessa oli litiumionikennojen sykli-  
vanhenemistutkimusten puute hybridisäätäjälle tyypillisellä jatkuvalla matala-amplitudi-  
sella syklikuormituksella. Tutkimukseen saatiin pohjaksi muutamia mikrosyklejä

käsitteleviä tutkimuksia, mutta käyttöprofiilien erojen takia niiden tuloksia ei pystynyt soveltamaan suoraan hybridisäätäjäsovelluksen tapaukseen.

Tutkimuksen luotettavuutta heikentää hiukan häviöiden huomiotta jättäminen kuormitusprofiilia määritettäessä ja syklimääriä laskettaessa. Käytössä ollut mittausdata sisälsi tiedon sähkövaraston (ES) pätötehosta ja kun tarkastellaan tehoa akuston kannalta, pitäisi purkutilanteessa lisätä mitattuun tehoon lisätä kaikki häviöt kennoston navoista tehon mittauspisteeseen asti. Toisaalta lataussyklissä mittausdatan tehosta vähennetään häviöt, jotka jäävät matkalle ennen akustoa. Ilman häviöitä tehdyssä tarkastelussa purkupuolisyklit jäivät todellista pienemmiksi, kun taas lataussyklit olivat saman verran liian syviä.

Mainittujen akuston ulkopuolisten häviöiden lisäksi tutkimuksen analyysia rasittaa akkujen coulombisen hyötysuhteen (eng. *coulombic efficiency*) poisjättäminen laskelmista. Termi kuvaa akkuun ladatun ja siitä ulos saatavan energiamäärän suhdetta (Madani ym., 2019, s. 4), koska osa energiasta kuluu akussa erilaisiin sisäisiin häviöihin. Kun kaikki akkuun ladattu energia ei ole hyötysuhteen takia otettavissa ulos, on latausenergia suurempi ja sitä kautta myös ekvivalenttisten syklien määrä.

## 5.2 Jatkotutkimukset

Tämän tutkimustyön aikana heräsi useita uusia kysymyksiä ja näkökulmia liittyen akkuvarastoihin ja niiden soveltamiseen VEO-eHPG-hybridisäätäjän sähkövarastona. Tutkimuksessa esiintuodut seikat liittyen litiumioniakkujen vanhenemiseen ja sen tuomiin mitoituskysymyksiin eivät tee asiasta täysin ongelmattonta. Jatkotutkimusten tarve ja aiheet liittyvät tutkimuksessa tunnistettujen heikkouksien poistamiseen tai ainakin vähentämiseen.

Hybridisäätäjäsovelluksessa tarvittava syklikestävyys on sähkövaraston tärkeimpiä ominaisuuksia. Mitoituksella pystytään tuomaan perinteiset litiumioniakustot käytännön vaatimalle tasolle, mutta nopeasti kehittyvät akkumarkkinat ovat tuoneet uusia mielenkiintoisia vaihtoehtoja perinteisten akkuteknologioiden rinnalle.

Lähimpänä perinteisiä litiumionikenoja löytyy vaihtoehdoksi litiumtitaanioksidi eli LTO (eng. *lithium-titanium-oxide*). LTO-kenno mainittiin tämän työn akkukemioita käsittelevässä luvussa 3.4.2. ja samalla kerrottiin anodimateriaalin olevan sen suurin eroavaisuus verrattuna muihin litiumakkukemioihin. LTO-kennon poikkeavat ominaisuudet tekevät siitä mielenkiintoisen tutkimuskohteen. Syklikestävyys kuten myös purku- ja latausnopeus ovat moninkertaiset verrattuna muihin (Saldarini ym., 2023, s. 9). Erilaisen anodimateriaalin takia LTO-kennon vanhenemismekanismit ovat erilaisia grafiittianodia käyttäviin kennoihin verrattuna. Tämän takia jatkotutkimuksia tarvitaan, mutta tähän kannustaa LTO-akkujen sopivat ominaisuudet hybridisäättäjäsovelluksen kannalta.

Superkondensaattoriratkaisut tarjoavat erittäin hyvän syklisen kestävyuden, mutta toisaalta huono energiatiheys heikentää soveltuvuutta. Markkinoille on kuitenkin tullut litiumionikondensaattoreita (LIC, eng. *lithium-ion capacitor*), jotka ovat litiumionikenojen ja superkondensaattoreiden yhdistelmiä. Sähköenergia varastoituu sekä kemiallisesti että staattisesti tuoden litiumionikennoihin verrattuna moninkertaisen syklikestävyuden ja superkondensaattoreihin verrattuna moninkertaisen energiatiheyden (Shepard, 2021).

Todettuun syklikestävyys haasteeseen voisi olla ratkaisuna myös vauhtipyöräpohjainen sähkövarastointi (FES). Superkondensaattoreiden kanssa vastaavilla ominaisuuksilla oleva vauhtipyörä täydennettynä akkuvaraston tuomalla energiatiheydellä on tutkimisen arvoisen yhdistelmä. Tätä FESS- ja BESS-järjestelmien yhdistelmäkäyttöä vesivoimasovelluksessa onkin jo tutkittu Casarin ym.(2023) toimesta.

Syklisen vanhenemisen osalta on tarve analysoida tarkemmin hybridisäättäjäsovelluksen akkuvarastolle aiheuttamaa kuormitusprofiilia. Syklimäärien laskenta ekvivalenttisten syklien kautta on vain yksi lähestymistapa. Epäsäännöllistä voimakkaasti vaihtelevaa ja mikrosyklejä sisältävää kuormitusprofiilia olisi tarpeen analysoida Rainflow-menetelmää käyttäen, jolloin saadaan todellinen kuva eri syvyisten



sykliä määrää. Tämän seikan ovat tuoneet esiin Soto ym. (2022) tutkimuksessaan mikrosykliä vaikutuksesta litiumionien vanhenemiseen.

Jatkotutkimuksista viimeisenä on nostettava esiin investointikannattavuus taloudellisten näkökulmien kautta. Erilaisten mitoitus- ja teknologiavaihtoehtojen vaikutukset CAPEX- ja OPEX-näkökulmiin. Erilaisten muuttujien määrä asiassa tekee tutkimuksesta monimutkaisen, mutta lopputulosten merkityksellisyys kannustaa tarttumaan haasteeseen.

## LÄHTEET

- Abe, Y., Hori, N., & Kumagai, S. (2019). Electrochemical impedance spectroscopy on the performance degradation of LiFePO<sub>4</sub>/graphite lithium-ion battery due to charge-discharge cycling under different c-rates. *Energies*, 12(23). <https://doi.org/10.3390/en12234507>
- Arrinda, M., Oyarbide, M., Macicior, H., Muxika, E., Popp, H., Jahn, M., Ganey, B., & Cendoya, I. (2021). Application dependent end-of-life threshold definition methodology for batteries in electric vehicles. *Batteries*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/batteries7010012>
- Birkl, C. R., Roberts, M. R., McTurk, E., Bruce, P. G., & Howey, D. A. (2017). Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.011>
- Bisschop, R., Willstrand, O., Amon, F., & Rosengren, M. (2019). Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles. Teoksessa *RISE report 2019* (Vsk. 50, Numero October).
- Byrne, R. H., Nguyen, T. A., Copp, D. A., Chalamala, B. R., & Gyuk, I. (2017). Energy Management and Optimization Methods for Grid Energy Storage Systems. *IEEE Access*, 6. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2741578>
- Casarin, S., Cavazzini, G., & Pérez-Díaz, J. I. (2023). Battery and Flywheel hybridization of a reversible Pumped-Storage Hydro Power Plant for wear and tear reduction. *Journal of Energy Storage*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108059>
- Corà, E. (2020). *Hydropower Technologies: the state-of-the-art*. <https://hydropower-europe.eu/uploads/news/media/The%20state%20of%20the%20art%20of%20hydropower%20industry-1600164483.pdf>

- Decourt, B., Debarre, R., Alias, S., & Gahlot, P. (2018). *Electricity Storage Gaining Momentum - FactBook*. <https://www.energy-transition-institute.com/electricity-storage-factbook/>
- Dell, R. M., & Rand, D. A. J. (2001). *Understanding Batteries*. Royal Society of Chemistry.
- Deng, D. (2015). Li-ion batteries: Basics, progress, and challenges. *Teoksessa Energy Science and Engineering* (Vsk. 3, Numero 5). <https://doi.org/10.1002/ese3.95>
- Edge, J. S., O’Kane, S., Prosser, R., Kirkaldy, N. D., Patel, A. N., Hales, A., Ghosh, A., Ai, W., Chen, J., Yang, J., Li, S., Pang, M. C., Bravo Diaz, L., Tomaszewska, A., Marzook, M. W., Radhakrishnan, K. N., Wang, H., Patel, Y., Wu, B., & Offer, G. J. (2021). Lithium ion battery degradation: what you need to know. *Teoksessa Physical Chemistry Chemical Physics* (Vsk. 23, Numero 14). <https://doi.org/10.1039/d1cp00359c>
- Energiatollisuus ry. (ei pvm.). *Vesivoima*. energia.fi. Noudettu 1. huhtikuuta 2024, osoitteesta <https://energia.fi/energiatietoa/energiantuotanto/sahkontuotanto/vesivoima/>
- Farag, M. (2013). *Lithium-Ion Batteries: Modelling and State of Charge Estimation* [Master Thesis]. McMaster University.
- Fayaz, H., Afzal, A., Samee, A. D. M., Soudagar, M. E. M., Akram, N., Mujtaba, M. A., Jilte, R. D., Islam, M. T., Ağbulut, Ü., & Saleel, C. A. (2022). Optimization of Thermal and Structural Design in Lithium-Ion Batteries to Obtain Energy Efficient Battery Thermal Management System (BTMS): A Critical Review. *Teoksessa Archives of Computational Methods in Engineering* (Vsk. 29, Numero 1). <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09571-0>

- Feng, X., Ren, D., He, X., & Ouyang, M. (2020). Mitigating Thermal Runaway of Lithium-Ion Batteries. Teoksessa *Joule* (Vsk. 4, Numero 4). <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.02.010>
- Fingrid Oyj. (2022). *Reservituotteet ja reservien markkinapaikat*. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat-28112022.pdf>
- Fingrid Oyj. (2023). *Nopean taajuusreservin (FFR) teknisten vaatimusten todentaminen ja hyväksyttämiproessi*. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/nopean-taajuusreservin-ffr-teknisten-vaatimusten-todentaminen-ja-hyvaksyttamisproessi.pdf>
- Fingrid Oyj. (2024). *Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät Q1/2024*. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q1-2024-fingrid.pdf>
- Gundogdu, B., & Gladwin, D. T. (2018). A Fast Battery Cycle Counting Method for Grid-Tied Battery Energy Storage System Subjected to Microcycles. *IEEECON 2018 - 6th International Electrical Engineering Congress*. <https://doi.org/10.1109/IEEECON.2018.8712263>
- Guo, J., Li, Y., Pedersen, K., & Stroe, D. I. (2021). Lithium-ion battery operation, degradation, and aging mechanism in electric vehicles: An overview. Teoksessa *Energies* (Vsk. 14, Numero 17). <https://doi.org/10.3390/en14175220>
- Guo, L., Thornton, D. B., Koronfel, M. A., Stephens, I. E. L., & Ryan, M. P. (2021). Degradation in lithium ion battery current collectors. Teoksessa *JPhys Energy* (Vsk. 3, Numero 3). <https://doi.org/10.1088/2515-7655/ac0c04>

- Heiskanen, E., Matschoss, K., Laakso, S., Rinkinen, J., & Apajalahti, E.-L. (2021). Energiamurroksen jännitteet kansalaisten arjessa. *Alue ja Ympäristö*, 50(1). <https://doi.org/10.30663/ay.102992>
- Hesse, H. C., Schimpe, M., Kucevic, D., & Jossen, A. (2017). Lithium-ion battery storage for the grid - A review of stationary battery storage system design tailored for applications in modern power grids. Teoksessa *Energies* (Vsk. 10, Numero 12). <https://doi.org/10.3390/en10122107>
- Jiang, J., Shi, W., Zheng, J., Zuo, P., Xiao, J., Chen, X., Xu, W., & Zhang, J.-G. (2014). Optimized Operating Range for Large-Format LiFePO<sub>4</sub>/Graphite Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(3). <https://doi.org/10.1149/2.052403jes>
- Kim, D. K., Yoneoka, S., Banatwala, A. Z., Kim, Y.-T., & Nam, K.-Y. (2018). Handbook on Battery Energy Storage System. Teoksessa *Asian Development Bank* (Numero December).
- Lai, X., Yao, J., Jin, C., Feng, X., Wang, H., Xu, C., & Zheng, Y. (2022). A Review of Lithium-Ion Battery Failure Hazards: Test Standards, Accident Analysis, and Safety Suggestions. Teoksessa *Batteries* (Vsk. 8, Numero 11). <https://doi.org/10.3390/batteries8110248>
- Lawder, M. T., Suthar, B., Northrop, P. W. C., De, S., Hoff, C. M., Leitermann, O., Crow, M. L., Santhanagopalan, S., & Subramanian, V. R. (2014). Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications. *Proceedings of the IEEE*, 102(6). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2317451>
- Li, N., Zhang, Y., He, F., Zhu, L., Zhang, X., Ma, Y., & Wang, S. (2021). Review of lithium-ion battery state of charge estimation. *Global Energy Interconnection*, 4(6). <https://doi.org/10.1016/j.gloi.2022.01.003>

- Madani, S. S., Schaltz, E., & Kær, S. K. (2019). Effect of current rate and prior cycling on the coulombic efficiency of a lithium-ion battery. *Batteries*, 5(3). <https://doi.org/10.3390/batteries5030057>
- Mattila, T. (2023). *Energiamurros edellyttää lisää joustoa reservimarkkinoille*. Fingrid-lehti.fi. <https://www.fingridlehti.fi/energiamurros-edellyttaa-lisaa-joustoa-reservimarkkinoille/>
- Mendoza-Hernandez, O. S., Hosono, E., Asakura, D., Matsuda, H., Umeda, M., & Sone, Y. (2020). Effect of the charge process and discharge rate on the lithium stripping process visibility in LiFePO<sub>4</sub>-graphite li-ion cells during charge-discharge cycling at 0°C. *Electrochemistry*, 88(4). <https://doi.org/10.5796/electrochemistry.20-00052>
- Ming, J., Cao, Z., Wu, Y., Wahyudi, W., Wang, W., Guo, X., Cavallo, L., Hwang, J. Y., Shamim, A., Li, L. J., Sun, Y. K., & Alshareef, H. N. (2019). New Insight on the Role of Electrolyte Additives in Rechargeable Lithium Ion Batteries. *ACS Energy Letters*, 4(11). <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.9b01441>
- Rey, S. O., Romero, J. A., Romero, L. T., Martínez, À. F., Roger, X. S., Qamar, M. A., Domínguez-García, J. L., & Gevorkov, L. (2023). Powering the Future: A Comprehensive Review of Battery Energy Storage Systems. Teoksessa *Energies* (Vsk. 16, Numero 17). <https://doi.org/10.3390/en16176344>
- Saldarini, A., Longo, M., Brenna, M., & Zaninelli, D. (2023). Battery Electric Storage Systems: Advances, Challenges, and Market Trends. *Energies*, 16(22), 7566. <https://doi.org/10.3390/en16227566>
- Shepard, J. (2021, kesäkuuta 29). *The difference between a lithium-ion battery and a lithium-ion capacitor*. batterypowertips.com. <https://www.batterypowertips.com/difference-between-lithium-ion-battery-lithium-ion-capacitor-faq/>

- Sippola, H. (2017). *Energiakeskittymän ytimessä - VEO:n tarina*. VEO Oy.
- Soto, A., Berrueta, A., Mateos, M., Sanchis, P., & Ursúa, A. (2022). Impact of micro-cycles on the lifetime of lithium-ion batteries: An experimental study. *Journal of Energy Storage*, 55. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105343>
- Suzuki, T. (2022, lokakuuta). *Binder for lithium-ion batteries*. <https://www.daikin-chemicals.com/magazine/column-lithium-ion-battery-02.html>.  
<https://www.daikinchemicals.com/magazine/column-lithium-ion-battery-02.html>
- Uusitalo, J. (2024). *Vesivoima sähköjärjestelmässä ja reservimarkkinoilla*. [https://energiavirasto.fi/documents/11120570/199257651/Uusitalo\\_Vesivoima+s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4+ja+reservit+EV+Uusiutuva+energia+180124.pdf/b0d00719-14e0-5c83-a60b-cee2fb786f73/Uusitalo\\_Vesivoima+s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4+ja+reservit+EV+Uusiutuva+energia+180124.pdf?t=1705652783905](https://energiavirasto.fi/documents/11120570/199257651/Uusitalo_Vesivoima+s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4+ja+reservit+EV+Uusiutuva+energia+180124.pdf/b0d00719-14e0-5c83-a60b-cee2fb786f73/Uusitalo_Vesivoima+s%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4+ja+reservit+EV+Uusiutuva+energia+180124.pdf?t=1705652783905)
- VEO News. (2022, syyskuuta 1). *VEON HYBRIDIJÄRJESTELMÄ MULLISTAA VESIVOIMALAITOSTEN ELINKAARILASKELMAT*. [veo.fi/news/](https://veo.fi/news/).  
<https://veo.fi/news/veon-hybridijarjestelma-mullistaa-vesivoimalaitosten-elinkaarilaskelmat/>
- VEO News. (2023, marraskuuta 8). *VEO-EHPG – BORN OUT OF NECESSITY, DEVELOPED FOR A BETTER TOMORROW*. [veo.fi/news/](https://veo.fi/news/). <https://veo.fi/news/ehpg/>
- VEO Oy. (ei pvm.). *VEOn kotisivut*. Noudettu 1. huhtikuuta 2024, osoitteesta <https://veo.fi/>
- VEO Oy. (2021). *VEO Hydropower Governor - Brochure*. [https://veo.fi/wp-content/uploads/2022/06/VEO\\_Turbine\\_governor\\_2021\\_EN\\_260321.pdf](https://veo.fi/wp-content/uploads/2022/06/VEO_Turbine_governor_2021_EN_260321.pdf)
- Warner, J. (2015). The handbook of lithium-ion battery pack design: Chemistry, components, types and terminology. Teoksessa *The Handbook of Lithium-Ion*

*Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology.*

<https://doi.org/10.1016/C2013-0-23144-5>

Xu, B., Oudalov, A., Ulbig, A., Andersson, G., & Kirschen, D. S. (2018). Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(2). <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2578950>

Yao, A. (2021, toukokuuta 25). *The Li(ttle) ion that could*. Honest Energy. <https://honestenergy.substack.com/p/the-little-ion-that-could>

Zhang, N., Eldesoky, A., Dressler, R. A., & Dahn, J. R. (2023). Surprising Dependence of the Exfoliation of Graphite During Formation on Electrolyte Composition. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(7). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ace65c>



**LIITTEET****LIITE 1****Näyte (500 sek) sähkövaraston teho- ja energiakuormituksesta****SALATTU LIITE**

LIITE 2  
Tunnuslukuja kuormitusprofiilin näytealueelta

**SALATTU LIITE**

LIITE 3  
Energiasyvyysjakaumat

**SALATTU LIITE**

LIITE 4  
Ekvivalenttisten täyssyklien määrät

**SALATTU LIITE**