



Tytti Pöllänen

Ajoakkujen syttymisriski törmäyksen jälkeisessä uudelleenkäytössä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

25.4.2026

Tiivistelmä

Tekijä:	Tytti Pöllänen
Otsikko:	Ajoakkujen syttymisriski törmäyksen jälkeisessä uudelleenkäytössä
Sivumäärä:	103 sivua
Aika:	25.4.2026
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Operatiivinen johtaja Frans Malmari, Diagno Finland Oy Lehtori Pasi Kovanen

Sähköajoneuvojen yleistyminen on luonut markkinan akkujen kiertotaloudelle ja kolariautojen akkujen uudelleenkäytölle. Työn tavoitteena oli selvittää, millä ehdoilla kolarissa vaurioituneiden ladattavien sähkö- ja hybridiautojen akkuja tai akkumoduuleja voitaisiin uudelleenkäyttää paloturvallisesti.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena ja asiantuntijoita haastattelemalla. Työssä perehdyttiin olennaisiin standardeihin, törmäystestivaatimuksiin ja valmistajien ohjeisiin sekä sattuneisiin sähköautopaloihin ja akkukennojen muodonmuutosta koskevaan tutkimukseen.

Tulokset osoittavat, etteivät sähköajoneuvot ole sen vaarallisempia kuin polttomoottoriautot, eikä pelkkä törmäys lisää akun syttymisriskiä merkittävästi. Ole-massa oleva riski kuitenkin nousee esiin poikkeavissa olosuhteissa, joten mm. käyttöhistoriatietojen tärkeys korostuu akun uudelleenkäytössä.

Työn tuloksena saatiin listaus tarkastuksista, joiden perusteella akkuja voitaisiin luokitella. Selvitys osoittaa, että akkuja voidaan arvioida ja uudelleenkäyttää turvallisesti, mutta palojen syyn selvittämiseksi tarvittaisiin lisää dataa ja tutkimusta.

Avainsanat: sähköajoneuvo, litiumioniakku, paloturvallisuus, lämpöryntäys, sähköautopalot, kiertotalous, uudelleen-käyttö

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Tytti Pöllänen
Title: Traction Battery Ignition Risk in Post-Collision Reuse
Number of Pages: 103 pages
Date: 25 April 2026

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Automotive Engineering
Professional Major: Automotive Electronics Engineering
Supervisors: Frans Malmari, Chief Operating Officer, Diagno Finland Oy
Pasi Kovanen, Senior Lecturer

The increasing number of electric vehicles has created a market for second-life and reuse of batteries from collision vehicles. The objective of this Bachelor's thesis was to determine in what conditions the electric vehicle batteries could be safely reused after a collision.

The study was carried out as a literature review and specialist interviews. Relevant standards, crash test requirements and manufacturer guidelines were examined, and few electric vehicle fires and cell deformation investigations were reviewed.

The results indicate that electric vehicles are not more dangerous than internal combustion engine vehicles, and a collision alone would not significantly increase the risk of a battery catching fire. However, an existing risk stands out under abnormal conditions, so the importance of e.g., cell usage history is emphasized in battery reuse.

As an outcome, the thesis developed a practical checklist that can be used for the classification of batteries. The study showed that batteries could be evaluated and reused safely, but for clarifying causes of fires more data and investigation is required.

Keywords: Electric vehicle, lithium-ion battery, fire safety, thermal runaway, EV fires, circular economy, second-life

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Ajoakun törmäyskestävyyden määrittely	3
2.1	Litiumioniakku ja sen rakenne	4
2.2	Standardit ja törmäystestit	6
2.2.1	Standardit ja määräykset Euroopassa	7
2.2.2	Mekaaninen iskutesti (mechanical shock)	13
2.2.3	Tärinätesti (vibration)	16
2.2.4	Puristustesti (crush/crash)	17
2.2.5	Lämpöpropagaatio (thermal propagation)	18
2.2.6	Standardit ja määräykset maailmalla	20
2.2.7	Törmäysturvallisuustestit Euro NCAP ja IIHS	25
2.3	Autonvalmistajien ohjeet	27
2.3.1	Tesla	28
2.3.2	Mercedes-Benz	31
2.3.3	Volvo	34
2.3.4	Volkswagen	35
2.3.5	Hyundai	35
2.3.6	Renault	36
3	Kennon vaurioitumismekanismit törmäyksessä	37
3.1	Mekaaniset vauriot	38
3.1.1	Ulkoinen muodonmuutos	38
3.1.2	Virrankeräimen liitoksen vaurio	39
3.1.3	Elektrodien halkeilu	40
3.2	Kemialliset muutokset	40
3.2.1	SEI-kerroksen muodostuminen ja hajoaminen	40
3.2.2	Elektrolyytin hajoaminen	41
3.2.3	Litiumin kiteytyminen	41
3.3	Separaattorin vauriot ja oikosulku	42
4	Sähköautopalot	44
4.1	Lämpöryntäys	44

4.2	Tilastot	46
4.3	Sattuneita sähköautopaloja	51
4.3.1	Tesla	52
4.3.2	Mercedes-Benz	52
4.3.3	Volvo	53
4.3.4	Volkswagen & Audi	54
4.3.5	Hyundai	56
4.3.6	Yksittäinen akkumoduuli	57
4.4	Sähköautopalon syttymissyyt	57
4.5	Tutkimukset akkujen vaurioitumisesta	61
4.5.1	Muodonmuutoksen vaikutus kennon ikääntymiseen, turvallisuuteen ja sähköiseen käyttäytymiseen	61
4.5.2	Pussikennon mekaanisen muodonmuutoksen vaikutus tasomaisessa kuormituksessa	63
4.5.3	Pussikennoja sisältävän akun vauriokäyttäytyminen	64
5	Akkujen tilan määrittely ja luokittelu	65
5.1	Vaurioiden tason arviointimenetelmät	66
5.1.1	Ulkoinen muodonmuutos ja aistinvarainen arviointi	66
5.1.2	SRS-turvallitteet	66
5.1.3	Törmäysnopeus	67
5.1.4	Itsediagnostiikka ja kiihtyvyys	68
5.1.5	Turvaluokittelu	69
5.1.6	Lämpötilat ja paine	69
5.1.7	Kapasiteetti ja suorituskyky	70
5.2	Tarkemmat mittaukset ja akun tutkiminen	70
5.2.1	Itsepurkautuminen	71
5.2.2	Jännite, historiatiedot ja datankeräys	71
5.2.3	Syklitys ja resistanssi	72
5.2.4	Kuvantaminen	73
5.3	Uusiokäyttöä koskevat standardit	73
5.3.1	IEC 63330-1 Akkujen uudelleenkäytön yleiset vaatimukset	74
5.3.2	IEC 63338 Ohjeita toissijaisten akkujen ja kennojen uudelleenkäytöstä	76
5.3.3	UL 1974 Akkujen uudelleenkäytön tai -valmistuksen arviointi	78
5.4	Akkujen uusiokäytön nykytila	80
6	Tulokset ja päätelmät	82

6.1	Törmäystesteistä ja valmistajien ohjeista	82
6.2	Kennoille tehdyistä tutkimuksista	83
6.3	Vauriomekanismeista	84
6.4	Sattuneista paloista ja tilastoista	86
6.5	Syttymissyistä	87
6.6	Päätelmä	88
	Lähteet	92

Lyhenteet ja käsitteet

- BMS: *Battery Management System*. Akunhallintajärjestelmä. Ajoakun toiminnan valvontaan ja ohjaamiseen.
- CT *Computer Tomography*. Tietokonetomografia. Röntgensäteilyyn perustuva kuvantamismenetelmä.
- EDR: *Event Data Recorder*. Onnettomuustietue, joka tallennetaan ajoneuvon ohjainlaitteelle onnettomuustutkintaa varten.
- OTA: *Over The Air*. Ohjelmistopäivitys, joka voidaan tehdä verkon välityksellä ilman käyntiä korjaamolla.
- SEI: *Solid Electrolyte Interface*. Elektroodin pinnalle muodostuva kiinteä elektrolyyttikerrostuma.
- SOC *State Of Charge*. Akun varaustila.
- SOH *State Of Health*. Laskennallinen arvo akun kuntosuhteesta suhteessa alkuperäiseen arvoon.
- SRS: *Supplemental Restraint System*. Passiivisen turvallisuuden järjestelmä, joka sisältää SRS-ohjainlaitteen, eli mm. turvatyynyjen ohjainlaitteen.
- UN GTR *United Nations Global Technical Regulation*. Maailmanlaajuinen ajoneuvojen turvallisuutta käsittelevä säännöstö.
- UNECE: *United Nations Economic Commission for Europe*. Yhdistyneiden kansakuntien talouskomissio, joka laatii kansainvälisiä normeja ja standardeja.

1 Johdanto

EU:n kunnianhimoiset ympäristötavoitteet ja kuluttajien vaatimukset ovat johtaneet liikenteen sähköistymiseen. Yhä useammassa henkilöautossa käytetään voimanlähteenä sähköä, joka varastoidaan korkeajänniteakkuun. Ajoneuvoilta odotetaan pitkiä toimintamatkoja ja kestävyyttä kovissa ympäristöolosuhteissa, mikä on johtanut korkean energiatiheuden litiumioniakkukemioiden yleistymiseen. Suuri energiamäärä pakattuna pieneen tilavuuteen aiheuttaa kuitenkin suuren riskin. Vikatilanteessa akku voi syttyä palamaan ja aiheuttaa vaaraa ihmisille ja omaisuudelle. Litiumioniakku voi palaa aggressiivisesti, ja sen sammuttaminen voi olla haastavaa.

Korkeajänniteakku on kokonaisuus, joka koostuu useista akkukennoista ja muista komponenteista akun sisällä. Kennot kuluvat käytössä eri tahtiin, mikä johtaa ajan myötä siihen, että osa kennoista on tullut elinkaarensa päähän, kun osalla olisi vielä käyttöikä jäljellä. Kulunut tai vikaantunut kenno voidaan paikantaa hyvinkin tarkasti, mutta valmistajalla ei välttämättä ole akulle korjausohjeita, tai ohjeistuksena voi olla vaihtaa koko akku uuteen. Vaikka akun korjaus olisi mahdollista, valmistajalta ei välttämättä ole saatavilla varaosia, eli yksittäisiä moduuleja, ainakaan valmiiksi ikäännytettynä. Täysin uuden moduulin asentaminen ikäänntyneiden rinnalle kasvattaa eroja kennojen välillä, mikä voi kaventaa toiminta-aluetta, nopeuttaa kulumista ja johtaa nopeasti uudelleenvikaantumiseen. Pahimmassa tapauksessa kenno romahtaa käyttörajojen ylittyessä ja syttyy tuleen.

Koko akun uusiminen yksittäisen vaurion paikallisen korjauksen sijaan usein nostaa korjauksen hintaa, mikä lisää kuluttajien epävarmuutta ja laskee sähköajoneuvojen suosiota. Suuri osa akun kapasiteetista jää myös käyttämättä, kun vain pieneltä osin vaurioitunut tai vähän kulunut akku vaihdetaan kokonaan uuteen ja vanha kierrätetään murskaamalla. Ajoneuvon ja akun käyttöikää voitaisiin pidentää kustannustehokkaasti vaihtamalla akkuun samantasoisesti ikäännytynyt moduuli viallisen tilalle. Varaosien saatavuus on kuitenkin haaste, sillä

valitettavan usein sopiva luovuttaja löytyisi lunastetusta romuajoneuvosta, kuten kolariajoneuvosta, jossa osien eheydestä ei ole varmuutta.

Tässä työssä keskitytään kolarissa vaurioituneiden ladattavien sähkö- ja hybridiajoneuvojen ajovoima-akkuihin ja niiden hyödyntämiseen varaosana. Työssä tarkastellaan, millaisilla ehdoilla ja riskillä kolariajoneuvosta peräisin olevaa ajoakkaa, tai sen osia kuten yksittäisiä moduuleja, voitaisiin uudelleenkäyttää varaosana paloturvallisesti. Tavoitteena on selvittää, millä perusteilla voitaisiin määritellä ehdot kolaroidun sähköajoneuvon akun turvalliselle uudelleenkäytölle ja etsiä menetelmiä akkujen luokitteluksi riskin mukaan.

Alkuun tarkastellaan, millaisia ehtoja ja rajoja lainsäädäntö ja standardit määrittävät sähköajoneuvoille, ja mitä ohjeita valmistajilla on ajoneuvojen tarkastamiseen. Työssä keskitytään erityisesti litiumioniakkuihin, ja työ on rajattu käsittelemään aihetta teknisesti. Kolmas luku käsittelee akun tai kennon vaurioitumismekanismeja. Neljännessä luvussa syvennyttään sähköautopaloihin tilastollisesti ja tarkastellaan muutamaa palotapausta hieman tarkemmin, jonka jälkeen tarkastellaan vaurioitumista mm. tehdyn tutkimuksen valossa. Viidennessä luvussa pohditaan, millaisia keinoja voisi olla mahdollisten sisäisten vaurioiden havaitsemiseksi ja akun luokitteluksi. Lopuksi peilataan tehtyjä havaintoja toisiinsa ja vedetään yhteen päätelmät ja työn lopputulos.

Vaurioajoneuvot kattavat myös esimerkiksi palaneita ajoneuvoja, joiden ajoakulla voisi olla vielä mahdollista käyttöpotentiaalia. Tässä työssä käsiteltyjä vauriomekanismeja voitaisiin osin soveltaa myös palaneiden ajoneuvojen tapauksissa, mutta ne on rajattu tämän työn ulkopuolelle. Palaneita ajoneuvoja käsitellään tässä työssä keskittyen tapahtumiin ennen palon syttymistä. Sähkö- ja hybridiajoneuvojen paloja tarkastellaan siitä näkökulmasta, mikä on johtanut palon syttymiseen, ja olisiko aiempi kolari mahdollisesti edesauttanut akun syttymistä. Palotapauksissa keskitytään siis tilanteisiin, joissa palo on saanut, tai voinut saada alkunsa ajoakusta. Selkeästi muiden järjestelmien, korkeajännitekomponenttien ja ulkoisten tekijöiden aiheuttamat palot on rajattu työn ulkopuolelle.

Suosituimpia sähköajoneuvomerkkejä Suomessa ovat Volkswagen, Volvo, Polestar, Mercedes-Benz, Tesla ja BMW (Karismus 2025). Tähän työhön on nostettu esille muutamia automerkkejä sattuneiden palojen pohjalta, mutta se ei tarkoita, etteikö palovaaraa olisi muilla merkeillä. Työssä tarkastellaan ja vertailaan valmistajia objektiivisesti saatavilla olevien tietojen perusteella, eikä tarkoituksena ole korostaa yksittäistä mallia tai valmistajaa. Tietopohjan keräämiseksi on hyödynnetty kirjallisia lähteitä sekä haastateltu alan asiantuntijoita. Suoraan autonvalmistajilta ei saatu kommentteja tai vastauksia kysymyksiin.

Työn toimeksiantaja on Diagno Finland Oy, joka on autoalan asiantuntijayritys. Diagno Finland Oy toimii mm. sähköautokorjaamojen kouluttajana ja neuvonantajana. Tämän insinööriyön aihe on ajankohtainen ja paljon puhuttu, mutta erittäin vähän tutkittu. Työ kerää kasaan kirjoitushetkellä saatavilla olevan tiedon ja syventää ymmärrystä käytettyjen akkujen turvallisen jälkimarkkinan edistämiseksi. Työ toimii myös ennaltaehkäisevänä tutkielmana sähköautopalojen syttymissyistä, jotta tulevaisuudessa paloja voitaisiin ennakoida ja ehkäistä. Ajoakujen paloturvallisuus valikoitui työn aiheeksi, koska villi jälkimarkkina sähköajoneuvojen korjauksessa on äärimmäisen riskialtista ilman todenmukaista tietoa ja todellisiin tapauksiin perustuvaa dataa. Tällä insinööriyöllä haluttiin luoda selkeä kuva akkujen uusiokäytön ja paloturvallisuuden nykytilasta ja kerätä yhteen ajankohtainen tieto jälkimarkkinan kehittämiseksi.

2 Ajoakun törmäyskestävyyden määrittely

Tässä osiossa tarkastellaan litiumioniakun rakennetta sekä yleisesti käytössä olevia ohjeistuksia ja testausmenetelmiä sähköajoneuvoille ja litiumioniakuille. Ajoneuvon tulee täyttää tietyt turvallisuuskriteerit myös poikkeustilanteissa, kuten törmäyksessä. Ajoneuvon litiumioniakku voi syttyä palamaan ja aiheuttaa nopeasti vaaraa matkustajille ja pelastushenkilökunnalle. Autonvalmistajat joutuvat täyttämään erilaisia vaatimuksia, jotka johtavat kompromisseihin ajoneuvon tehon, toimintamatkan, painon, kustannusten, ekologisuuden ja turvallisuuden suhteen. Tiedetään, että litiumioniakku voi vaurioitua törmäyksessä, jolloin riski lämpöryntäykselle kasvaa. Lainsäädäntö ja standardit määrittävät, millaisia iskuja ja olosuhteita ajoneuvon ja akun tulee kestää.

2.1 Litiumioniakku ja sen rakenne

Sähköajoneuvon akkujärjestelmä koostuu akkumoduuleista, BMS (Battery Management System) akunhallintajärjestelmästä, kuoresta, suojaus- ja oheisjärjestelmistä sekä muista komponenteista, kuten antureista, liittimistä ja johtimista. Varsinainen energiasäilö, eli akku koostuu yleensä moduuleista, jotka sisältävät useita yksittäisiä keskenään samanlaisia akkukennoja. Ajoneuvon korkeajännitejärjestelmään liittyy myös muita komponentteja, kuten sähkömoottori, laturi ja invertteri.

Sähköenergiaa ladataan ja puretaan akkukennoissa sähkökemiallisen reaktion avulla. Litiumioniakussa litiumionit liikkuvat nestemäisessä tai hyytelömäisessä elektrolyytissä elektrodien, eli anodin ja katodin välillä, vapauttaen tai sitoen energiaa. Litiumioniakuilla on suuri energiatiheys, mikä tarkoittaa, että pieneen kennoon voidaan varata sitä enemmän energiaa, mitä suurempi energiatiheys on. Ajoneuvokäytössä tämä tarkoittaa käytännössä pidempää toimintamatkaa ilman latausta, minkä vuoksi suuren energiatheyden akut ovat suosittuja sähköajoneuvoissa. Litiumioniakuilla on myös matala itsepurkautumisnopeus, eli energia pysyy akussa hyvin, vaikka se seisoisi pitkäänkin käyttämättömänä. Akkukemia, eli se, mitä raaka-aineita akkukennon sisällä käytetään, vaikuttaa akun ominaisuuksiin. Ajoneuvoissa käytetään muutamia litiumakkukemioita, joista yleisin on NMC (nikkeli-mangaani-kobolttioksidi) suuren energiatheyden vuoksi. Sähköajoneuvoissa on käytössä myös LFP (rautafosfaatti), jolla on NMC:tä matalampi energiatiheys mutta se on stabiilimpi, ja NCA (nikkeli-koboltti-alumiinioksidi), jolla taas on korkeampi energiatiheys, mutta se on kalliimpi. Energiatiheys korreloi lähes suoraan turvallisuuden kanssa: mitä enemmän energiaa, sitä vaarallisempi akku (Vuorilehto 2026). Kennotyyppi taas kertoo, minkä muotoiseen kuoreen kemia on pakattu. Kennotyyppejä ovat yleensä metallikuorinen sylinterimäinen kenno, muovi- tai metallikuorinen prismaattinen, eli neliskanttinen kenno, ja nimensä mukaisesti pussimainen pussikenno, jolla ei ole kantavaa rakennetta suojanaan. Teräskuori hidastaa mahdollisen palon etenemistä esimerkiksi alumiinia paremmin, joka sulaa jo 660 °C:ssa, mikä saavutetaan litiumioniakkupalossa helposti (Vuorilehto 2026).

Elektrolyytti on palava neste, jossa myrkyllinen litiumsuola (litiumheksafluorofosfaatti) on liuotettu liuottimiin. Elektrolyytin paloherkkyys riippuu kemiasta, ja se voi olla esimerkiksi dimetyylikarbonaattia tai dietyylikarbonaattia. Negatiivielektrodi, eli anodi on yleensä grafiittia. On myös kehitteillä akkuja, joissa anodi valmistetaan esimerkiksi piistä, joka kymmenkertaistaisi anodin kapasiteetin, mutta on herkkä murenemaan (Anonyymi 3, 2026). Kemian nimi tulee yleensä positiivielektrodin, eli katodimateriaalin mukaan. NMC-kemiassa katodi on siis nikkeä, mangaania ja kobolttia erilaisin suhtein. Koboltti on pääraaka-aine, jota on laimennettu nikkellillä ja mangaanilla, ja samalla kemiasta saadaan hieman turvallisempi. (Vuorilehto 2026.)

Akkukennossa aktiivimateriaalit on pinnoitettu virrankeräinfolion pintaan. Katodilla virrankeräin on yleensä alumiinia, ja anodilla kuparia tai alumiinia. Virrankeräin siis kattaa koko aktiivimateriaalin ja johtaa sähköä kootusti kennon navoille. Sylinterikennossa voi olla vielä erillinen kollektoriosa, joka on laserhitsattu rullan päälle anodin virrankeräinfolion reunaan. Anodi ja katodi paisuvat ja ohenevat jopa 10 % ladattaessa ja purettaessa, ja tätä kutsutaan akkukennon hengittämiseksi. (Vuorilehto 2026.)

Anodin ja katodin välissä on ohut, noin 12 μm paksuinen muovikalvo, separaattori, joka voi olla polypropeenä, tai polyeteeniä ja polypropeenä. Separattori estää anodin ja katodin suoran kontaktin päästäen kuitenkin litiumionit liikkumaan separaattorin läpi. Separattoria voidaan hyödyntää kennon lämpösulakkeena, sillä materiaalien huokoisuus katoaa lämpötilan noustessa estäen litiumionien liikkumisen, mikä yksittäisissä kennoissa voi ehkäistä lämpöryntäyksen. Polyeteeni sulaa jo 135 °C:ssa ja polypropeeni 160 °C:ssa (Saarela ym. 2019). Suurissa akkujärjestelmissä käytetään varotoimena separaattorin pinnalla keraamista pinnoitetta, joka ei sula missään lämpötilassa. Separattorin sulaessa kokonaan pois jää keraaminen aine ”hieäksi” anodin ja katodin väliin estäen anodin ja katodin suoran kontaktin. (Vuorilehto 2026.)

Vuorilehto määrittelee kennon turvallisuudelle viisi tasoa, joissa akun valmistajan tulee tehdä valintoja ja kompromisseja. Ensimmäisenä tulee valita akkukemia ja seostussuhteet, eli millaisia valintoja tehdään mm. syttymisherkkyys ja

energiatiheyden ja muiden ominaisuuksien suhteen. Valitaan, käytetäänkö herkemmin vai vähemmän herkästi syttyvää elektrolyyttiä, ja käytetäänkö anodin virrankeräimenä kuparia, joka johtaa paremmin sähköä, vai edullisempaa alumiinia jne. Toisena valitaan kennotyyppi. Pussikenno vaatii enemmän tukirakenteita, kun taas sylinterikenno on huomattavasti painavampi. Kolmantena vaikuttaa laatu, eli käytännössä valmistaja, mistä kennot ostetaan. Akun valmistajan tulee pohtia, ovatko valmistusmenetelmät ja laitteet laadukkaita, kuinka paljon kennovalmistajalla on varaa toimittaa heikkolaatuisia kennoja eteenpäin, ja kuinka valmistusta valvotaan ja estetään epäpuhtauksien pääsy kennoon. (Vuorilehto 2026.)

Neljäs taso on BMS ja viides varotoimet, eli akun seuranta, valvonta, mahdolliset varoitukset ikääntymisestä, heikkenemisestä ja vikatilanteista, sekä käytön tai latauksen rajoittaminen, jäähdytys, balansointi ja muut akunhallintatoimet. Siltä varalta, että kaikesta huolimatta jokin epäonnistuu, tulee olla varotoimia, joilla minimoidaan vahingot. Akussa voi olla esimerkiksi sulakkeita, joilla yksittäisen kennon toiminta keskeytetään, eli rajoitetaan vikatilanteen kehittymistä poistamalla viallinen kenno käytöstä, jolloin parhaassa tapauksessa akun kapasiteetti vain laskee, tai se ei enää toimi, mutta se ei myöskään syttynyt palamaan. (Vuorilehto 2026.)

2.2 Standardit ja törmäystestit

Ajoneuvoille ja niiden korkeajänniteakustoille on määritetty erilaisia vaatimuksia kolaritilanteessa käyttäytymiselle. Kuten jo mainittu, litium-ioniakut voivat olla vaarallisia niiden normaalien käyttöolosuhteiden ulkopuolella. Ajoneuvojen tulee läpäistä erilaisia turvallisuustestejä ennen kuin tuote voidaan laskea markkinoille. Ympäri maailmaa on käytössä erilaisia määräyksiä ja standardeja vaatimusten täyttämiseksi. Standardit ovat kirjallisia julkaisuja, joissa määritellään tuotteiden ominaisuuksia ja toimintaa. Standardit ovat vapaaehtoisia, joskin viranomaiset voivat suosittaa niiden käyttöä. Määräykset ovat sen sijaan velvoittavia ja niiden taustalla on lain voima. (Mitä standardi tarkoittaa?)

Tässä luvussa käydään läpi vaatimuksia ja muutamia standardeja ja niiden erityispiirteitä keskittyen törmäyksen ja mekaanisen kuormituksen kannalta oleellisiin ajoakkuja koskeviin vaatimuksiin ja suosituksiin. Suomessa ajoneuvoja koskevat EU:n akkuasetus, Euroopan talouskomission (UNECE United Nations Economic Commission for Europe) maailmanlaajuinen TRANS 180, eli UN GTR (United Nations Global Technical Regulation), Eurooppalainen E-100 säännös, UNECE:n Manual of Tests and Criteria sekä kansainväliset ISO- ja IEC-standardit ja eurooppalaiset EN- ja kansalliset SFS-standardit. Euroopassa määrätään direktiivillä pääasiassa vain oleellisimmat vaatimukset, kun tarkemmat tekniset yksityiskohdat esitetään yhdenmukaistetuissa standardeissa (Ruiz ym. 2018).

2.2.1 Standardit ja määräykset Euroopassa

Euroopan parlamentin asetus 2023/1542

Euroopan parlamentin asetuksessa 2023/1542 vahvistetaan vähimmäisvaatimukset akkujen tuomiseksi markkinoille. Akkuja saa tuoda markkinoille ja ottaa käyttöön vain, jos ne täyttävät merkintävaatimusten lisäksi asetuksen 2023/1542 artiklojen 6–10 ja 12 kestävyys ja turvallisuusvaatimukset. Vaadittaviin testeihin kuuluvat mm. lämpöshokki- ja lämmönvaihtelutesti sekä lämpöryntäämisen suojaus ja mekaanisten vaurioiden suojaus. (Asetus akuista ja paristoista ja jätteakuista ja -paristoista, Artikla 5 ja Artikla 12, 2023.)

Lämpöshokki- ja lämmönvaihtelutestissä akku altistetaan korkeille lämpötiloille, jotka voivat aiheuttaa eksotermisiä hajoamisreaktioita ja johtaa kennon lämpöryntäämiseen. Lämmönvaihtelutestin tarkoituksena on arvioida kennojen ”hengittämisestä” johtuvia eheyden muutoksia. Mekaanisten vaurioiden suojaustesteillä simuloidaan tilannetta, jossa akkuun kohdistuu tahattomasti ylimääräistä mekaanista rasitusta. (Asetus akuista ja paristoista ja jätteakuista ja -paristoista, Liite 5, 2023.)

Uusien ajoneuvojen ajovoima-akkujen mukana on oltava elokuusta 2024 alkaen liite, joka sisältää arvot suorituskyvyn ja keston muuttujista, joita ovat:

- nimelliskapasiteetti (Ah) ja kapasiteettihäviö (%)
- teho (W) ja tehohäviö (%)
- sisäinen resistanssi (Ω) ja resistanssin kasvu (%)
- energian kokonaishyötysuhde (round trip -hyötysuhde) ja sen häviö (%)
- odotettu käyttöikä (kalenterivuosi)
- sekä muuttujien taustatiedot, kuten käytetty purku- ja varausaste, nimellistehon ja energian suhde (W/Wh), purkusyvyys (DOD Depth Of Discharge), ja tehovalmius 80 % ja 20 % varaustilassa.

Näihin muuttujiin perustuu akun kunnon, suorituskyvyn ja turvallisuuden arviointi. Vaatimus ei koske uudelleenvalmistettuja akkuja, joiden alkuperäinen valmistuspäivä on ennen 18.8.2024. (Asetus akuista ja paristoista ja jätteakuista ja -paristoista, Liite 4, 2023.)

Asetuksen neljännessä luvussa käsitellään digitaalista akkupassia, joka astuu voimaan helmikuussa 2027. Akkupassin tietoja on saatavilla kolmessa ryhmässä, joita ovat julkisesti saatavilla olevat tiedot, tiedot oikeutetun intressin omaaville henkilöille, ja tiedot ainoastaan markkinaviranomaisen, komission, tai ilmoitettujen laitosten saataville. Kuvassa 1 on esitetty akkupassin sisältämiä tietoja kolmen ryhmän saatavuusosoikeuksien mukaan.



Kuva 1. Akkupassin sisältämät tiedot. (Asetus akuista ja paristoista ja jätekuista ja -paristoista 2023.)

Akun julkiset tiedot ovat kaikkien saatavilla ja ne sisältävät mm. valmistustietoja, tietoja kemiallisesta koostumuksesta, hiilijalanjälkitietoja, kapasiteetti- ja resistanssietietoja, käyttöikäetietoja, hyötysuhdetietoja, sekä merkintä- ja vaatimustenmukaisuustietoja. Tiedot, joiden oikeutettua etua asia koskee, ovat rajattu oikeutetun intressin omaaville henkilöille ja kolmannen, ns. viranomaisryhmän saataville, ja ne sisältävät tarkempia tietoja kemiasta, komponenttien osanumerot ja toimittajien yhteystiedot, purkuohjeet, ja turvallisuustoimenpiteet. Komission on määrä tarkentaa elokuussa 2026 täytäntöönpanosäädöksiä siitä, millä henkilöillä katsotaan olevan oikeutettu intressi akkupassin tarkempiin tietoihin. Ainoastaan oikeutetun intressin saatavilla olevat tiedot sisältävät suorituskyvyn ja keston muuttujien arvot, toimintakuntotietoja, akun luokittelun sekä käytön aikana kerättyjä tietoja. Kolmannen ryhmän tietoihin on pääsy ainoastaan

ilmoitetuilla laitoksilla, markkinaviranomaisella ja komissiolla tai ilmoitetulla laitoksella. Näitä tietoja ovat testausraporttien tulokset. (Asetus akuista ja paristoista ja jäteakuista ja -paristoista, Artikla 77, 2023.)

E-sääntö nro. 100

Euroopan talouskomission (UNECE) sääntö nro. 100 (UN Regulation No. 100), eli E-sääntö nro. 100, määrittää Euroopan markkinoille tulevien sähköajoneuvojen yhdenmukaiset minimivaatimukset koskien sähköiseen voimalaitteeseen sovellettavia erityisvaatimuksia. Euroopassa ajoneuvojen komponentit tyyppihyväksytään E-säännön nro. 100 mukaan. E-sääntö nro. 100 kuvaa tyyppihyväksyntätestimenetelmät ja määrittää hyväksymisperusteet akkujen turvallisuustesteille. (E-sääntö nro. 100, 2021.)

E-säännön testeihin kuuluvat mm. tärinätesti, iskutesti, puristustesti ja lämpöpropagaatio tai lämpöläpilyönti. Valmistaja voi yleensä valita testin joko ajoneuvoon tai komponenttiin perustuvana, jolloin testausmenetelmät poikkeavat hieman toisistaan. Tuote yleensä läpäisee testin, jos elektrolyyttiä ei vuoda, akku ei syty palamaan, ei esiinny räjähdystä, eristysvastus on suurempi kuin 100 Ω/V ja IPXXB-suojaus toteutuu. Testi päättyy yleensä seurantajaksoon ympäristön lämpötilassa. (E-sääntö nro. 100, 2021.)

UN GTR (United Nations Global Technical Regulation)

Sähköajoneuvon turvallisuustestejä käsitellään myös UNECE:n maailmanlaajuisessa UN GTR (United Nations Global Technical Regulation) -säännöstössä, jonka tarkoituksena on luoda maailmanlaajuisesti yhtenäiset menetelmät ja minimivaatimukset ajoneuvojen turvallisuudelle. Tämän työn kannalta tärkein osa UN GTR -kokoelmassa on nro. 20 *Electric Vehicle Safety*, jossa käsitellään sähköajoneuvojen turvallisuutta käytön aikana ja törmäystapahtuman jälkeen. UN GTR nro. 20 kuvaa testit sähköajoneuvojen turvallisuusvaatimuksille. Käytännössä testit vastaavat E-sääntö nro. 100:n testejä, joskaan lämpöpropagaatiotestiä ei toistaiseksi ole hyväksytty vaatimukseksi, vaan työryhmän mukaan lisätutkimuksia tarvitaan. (UN GTR No. 20, 2018.)

Uusi vuonna 2022 hyväksytty UN GTR sisältää sääntöjä ajoneuvojen akkujen kestävydestä. Säännösten vaatimukset perustuvat parhaaseen saatavilla olevaan dataan, tieteelliseen tutkimukseen ja analyysiin. Sääntöjä kehitellään kahdessa vaiheessa. Ensimmäiseen vaiheeseen on kirjattu UN GTR:n ensimmäinen versio 2021, joka sisältää mm. vaatimukset akun kunto- ja käyttötietojen lukemiseen ajoneuvosta. Toinen versio sisältäisi menetelmän kehittämisen normaalikäyttöindeksien (Normal Usage Indices NUI) määrittämiseksi ajoneuvosta luettujen tietojen perusteella sekä tarkennetut suorituskykykriteerivaatimukset ajoneuvon sisäisten akkujen kestävyydelle. Määrittelyssä hyödynnettäisiin mm. lisämallinnusta ja todellisista ajoneuvoista kerättyä dataa sekä normaalikäyttöindeksiä. (UN GTR No. 22, 2022.)

Manual of Tests and Criteria UN 38.3

Lankilan mukaan ensimmäinen testi, joka akuille tuotekehitysvaiheessa tehdään, on UN 38.3, johon pohjautuu akkujen turvallinen kuljettaminen (Lankila 2026). UN 38.3 on kansainvälisesti velvoittava vaarallisten aineiden kuljetusta koskeva turvallisuusstandardi, joka kuuluu UNECE:n Manual of Tests and Criteria -säännöstöön. Litiumioniakkujen materiaalit luetaan fyysikaalista vaaraa aiheuttaviksi kemikaaleiksi, minkä vuoksi akkuihin sovelletaan kyseisen käsikirjan menetelmiä. UN 38.3:ssa tämän työn kannalta olennaiset testit ovat: tärinätesti, mekaaninen iskutesti ja puristustesti. Läpäisykriteerejä ovat yleensä, ettei testeistä aiheudu massahäviötä, vuotoa, kaasunpurkausta, purkautumista, repeytymistä tai tulipaloa, ja ettei jännite laske merkittävästi, eli alle 90 %:iin ennen testiä mitatusta jännitteestä (UN 38.3, 2023).

ISO-, IEC-, EN- ja SFS-standardit

Säädökset määrittävät siis vähimmäisvaatimukset, mutta valmistajat testaavat tuotteitaan yleensä tiukemmilla testeillä. Esimerkiksi ISO- (The International Organization for Standardization) ja IEC (The International Electrotechnical Commission) -standardeista löytyy akuille ja ajoneuvoille sovellettavia mekaanista kuormitusta käsitteleviä testejä. Standardeista tämän työn kannalta oleellisimpia ovat:

- IEC 60068-2-27-2008 Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock
- IEC 60086-4-2025 Primary Batteries. Part 4: Safety of lithium batteries
- ISO 6469-1-2019 Electrically propelled road vehicles – Safety specifications. Part 1: Rechargeable energy storage system (joka korvaa vanhemman ISO 12405-3:n)
- ISO 16750-3-2023 Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 3: Mechanical loads (joka tullaan korvaamaan kirjoitushetkellä valmistelussa olevalla ISO/WD 16750-3:llä)
- IEC-62660-2-2019 Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 2: Reliability and abuse testing
- IEC-62660-3-2022 Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 3: Safety requirements.

IEC 60068 käsittää laajemman standardisarjan, joka käsittelee komponentteja yleisesti ja melko laajasti. Euroopan standardointikomitea CENELEC on hyväksynyt IEC 60068 standardisarjan pitkälti sellaisenaan Eurooppalaisiksi EN-standardeiksi, jotka ovat vahvistettu myös Suomen kansallisiksi SFS-standardeiksi. IEC 60068:n toinen osa käsittelee sähkö- ja elektroniikkatuotteiden kuljetusta. IEC 60068-2-27 standardissa määritellään iskutestit *Ea*, ja muissa osissa mm. vapaan pudotuksen testit *Ec*, tärinätestit *Fh* ja vasaratestit *Eh*. (SFS-EN 60068-1, 2014.)

Suomen kansalliseksi standardiksi hyväksytty IEC 60086-4 käsittelee litiumioniakkujen turvallisuustestejä. Testit on nimetty isoin kirjaimin A:sta M:ään ja ne vastaavat pääsääntöisesti UN 38.3:n testejä. Standardin mukaan kennon suunnittelulla on estettävä epänormaali lämpötilannousu valmistajan määrittämän rajan yläpuolelle, ja lämpötilannousua on hallittava suunnittelulla, joka rajoittaa virran kulkua. Standardissa on määritetty tarkat minimitoleranssit mittauksille sekä tarkat testikriteerit siitä, milloin havaitaan esimerkiksi oikosulku (jännite 90 % alkuperäisestä), korkea lämpötila (kuori yli 170 °C), vuoto tai räjähdys jne. (SFS-EN IEC 60086-4, 2025.)

Läpäisykriteerit ovat standardeissa hyvin samankaltaisia. Yleensä akku ei saa syttyä palamaan tai vuotaa. ISO 6469:n testeissä akussa ei saa esiintyä

minkäänlaisia jälkiä vuodosta, eikä yli yhden sekunnin kestäviä liekkiä tai räjähdystä eikä repeämää. ISO 6469:ssa testit suoritetaan E-säännön nro. 100 tapaan joko ajoneuvotasolla tai komponentti- eli akkutasolla. (ISO 6469-1, 2019).

Litiumioniakkuja käsittelevä IEC 62660 -standardisarja on niin ikään hyväksytty Suomen kansallisiksi SFS-standardeiksi. Sarjan toinen osa määrittelee luokittelun testituloksille, ja kolmas osa hyväksytty/hylätty-kriteerit. Standardissa annetaan ohjeita olosuhteiden mittaamiseen ja asettamiseen, kuten sen, että kennoa tulee pitää määrättyssä ympäristön lämpötilassa ennen testiä vähintään 12 tuntia lämpötilan tasaamiseksi. Perusoletuksena akku on paikallaan ja normaaleissa käyttöolosuhteissa. Plug-in-hybrideille valmistaja voi valita testausmenetelmän BEV- (Battery Electric Vehicle) ja HEV (Hybrid Electric Vehicle) -menetelmien väliltä. Testattavia kennoja saa huoltaa testien välissä muodonmuutoksen ehkäisemiseksi, mikäli se on tarpeellista. Testeissä käytettävät kennot saavat olla korkeintaan kuusi kuukautta vanhoja, ja jokainen testi päättyy tunnin mittaiseen seurantajaksoon, ellei toisin mainita. (SFS-EN IEC 62660-2, 2019; SFS-EN IEC 62660-3, 2022.)

2.2.2 Mekaaninen iskutesti (mechanical shock)

UN GTR nro. 20:n iskutesti pohjautuu UN säädöksiin 12, 94, 95, sekä E-sääntö nro. 100:aan. E-säännössä nro. 100 viitataan ajoneuvoon perustuvissa törmäystesteissä UN 94 ja 137 etutörmäystesteihin sekä UN 95 sivutörmäystesteihin, jotka kuvataan jäljempänä. Komponenttiin perustuville testeille sen sijaan määritetään testausmenetelmä suoraan E-säännön nro. 100 liitteessä. (UN GTR No. 20, 2018; E-sääntö nro. 100, 2021.)

Komponenttiin perustuvassa E-säännön nro. 100 iskutestissä akkua hidastetaan (tai kiihdytetään) määrätyn kiihtyvyyssäyrän mukaisesti. Akku kiinnitetään testauslaitteeseen sen tavanomaisista alkuperäisistä kiinnityspisteistä, joista se on tarkoitus kiinnittää ajoneuvoon. Kiihtyvyyssrajat komponenttiin perustuville testeille, alle 3500 kg:n ajoneuvoille, ovat pituussuunnassa 20 g (eli n. 196,2 m/s²) ja 28 g (eli n. 274,68 m/s²), ja poikittaissuunnassa 8 g (eli n. 78,48 m/s²) ja 15 g (eli n. 147,15 m/s²). UN GTR nro. 20:n ja E-sääntö nro.

100:n vaatimusten mukaan tunnin kuluessa iskusta ei saa esiintyä elektrolyyttivuotoa, eikä testistä saa aiheutua tulipaloo tai räjähdystä. (UN GTR No. 20, 2018; E-sääntö nro. 100, 2021.)

Ajoneuvoon perustuvissa UN 94, 95 ja 137 säännön testeissä ajoneuvo törmätetään esteeseen määrätyllä nopeudella. UN 94:n etutörmäystestissä ajoneuvo törmätetään esteeseen keula edellä käyttäen ajoneuvon omaa voimanlähdettä. Nopeus törmätessä tulee olla 56 -0/+1 km/h. Testi voidaan hyväksyä myös korkeammalla testausnopeudella, mikäli ajoneuvo täyttää testausvaatimukset. UN 137:n testausjärjestelyt ovat käytännössä samanlaiset, mutta törmäytysnopeus on 50 -0/+1 km/h. (UN Regulation No. 94, 2022; UN Regulation No 137, 2023.)

UN 95:n sivutörmäystestissä ajoneuvo törmätetään esteeseen sivuttain kuljettajan puolelta. Törmäytysnopeus on 50 ± 1 km/h. Samoin kuin UN 94:ssä, testiä pidetään hyväksyttävänä myös vaikka nopeus olisi suurempi. Tunnin kuluessa iskusta akussa ei saa esiintyä merkkejä tulipalosta tai räjähdyksestä. (UN Regulation No. 95, 2023.)

UN 38.3:n iskutesti T.4 simuloi mahdollisia iskuja kuljetuksen aikana. Testausmenetelmä on valittavissa akun koon mukaan. Pieniksi akuiksi luetaan alle 12 kg:n painoiset ja suuriksi yli 12 kg:n painoiset akut. Akku tai kenno asetetaan laitteeseen, joka simuloi kumulatiivista iskua. Iskun puolisinimuotoisen pulssin huippukiihtyvyys on pääsääntöisesti 150 g (eli n. $1471,5 \text{ m/s}^2$) ja pulssin kesto 6 ms. Vaihtoehtoisesti suurille akuille voidaan valita huippukiihtyvyydeksi 50 g (eli n. $490,5 \text{ m/s}^2$), jolloin iskun kestoksi tulee 11 ms. Suurille akuille ja yli 4,5 kg:n painoisille pienille akuille voidaan myös laskea pienempi huippukiihtyvyys standardissa esitetyn kaavan mukaan. Jokainen akku altistetaan kolmelle iskulle positiivisessa ja kolmelle negatiivisessa suunnassa kaikissa kolmessa avaruus suunnassa, mikä tarkoittaa, että yksi akku saa yhteensä 18 iskua. (UN 38.3, 2023.)

IEC 60068-2-27 -standardi on kirjoitettu ennalta määrättyjen pulssimuotojen pohjalta. Pulssimuotoja ovat puolisinini-, sahammas- ja suunnikasmuotoinen pulssi, joista yleisimmin käytetty on puolisinipulssi. Puolisinipulssin raja-arvot

ovat ± 20 % huippukiihtyvyydestä. Standardissa on taulukoitu nopeuden muutokset eri pulssimuodoille eri huippukiihtyvyyksillä. Tähän standardiin viitattavissa muissa standardeissa määritellään käytettävät arvot erikseen, eikä IEC 60068-2-27 siten määritä arvoja suoraan. Komponentit tarkastetaan testin jälkeen visuaalisesti, dimensionaalisesti ja toiminnallisesti, sekä tarvittaessa muilla tavoin erillisen määrittelyn mukaisesti. (SFS-EN IEC 60068-2-27, 2008.)

ISO-standardissa 6469 on erikseen onnettomuutta simuloiva isku, jonka testausmenetelmä vastaa UN GTR:n ja E-säännön nro. 100 testejä, sekä kahdessa vaiheessa suoritettava mekaaninen iskutesti. Mekaaninen iskutesti kattaa tärinätestin, joka kuvataan jäljempänä, ja mekaanisen iskun, joka toteutetaan IEC 60068-2-27 -standardin menetelmän mukaan määrittämällä kiihtyvyyksiksi Z-suunnassa 70 m/s^2 , X-suunnassa 50 m/s^2 ja Y-suunnassa 30 m/s^2 , ja iskun kestoksi 6 ms. (ISO 6469-1, 2019.)

ISO 16750-3 standardissa määritellään kolme iskutestiä, joista yksi on pudotustesti. Pudotustestin tarkoituksena on simuloida tilannetta, jossa komponentti putoaa maahan sitä käsitellessä. Testi ei koske komponentteja, joiden kohdalla on selvää, että se hajoaa pudotettaessa, kuten esimerkiksi ajovaloumpiot. Komponentti pudotetaan maahan metrin korkeudelta, mikä tarkoittaa 1 g:n kiihtyvyyttä. Standardin mukaan komponentti on uusittava, mikäli pudotuksen jälkeen siinä on mekaanisia vaurioita, mukaan lukien laitteen sisäiset mekaaniset vauriot kuten irronnut kondensaattori ohjainlaitteen sisällä. Mikäli vaurioita ei havaita, komponentti voidaan asentaa ajoneuvoon, ja sen tulee toimia oikein. Käytännössä tämä tarkoittaa, että komponenttiin on tullava ulkoisia havaittavia vaurioita pudotuksesta, joka voi vahingoittaa sitä sisäisesti tai vaikuttaa sen toimintaan. (ISO 16750-3, 2012.)

ISO 16750-3 -standardin varsinainen mekaanisen iskun testi on tarkoitettu rungon ja laitteiden jäykissä kohdissa sijaitseville laitteille ja komponenteille. Testillä simuloidaan tilannetta, jossa esimerkiksi ajoneuvon pohja osuu kanttikiveen kovalla nopeudella. Testimenetelmä toteutetaan IEC 60068-2-27:n mukaan puolisinimuotoisella pulssilla, jonka huippukiihtyvyys on 500 m/s^2 ja kesto 6 ms. Iskuja toistetaan 10 jokaisessa suunnassa, jossa se todellisissa olosuhteissakin

vaikuttaisi. Hylkäysperuste testille on mekaaninen vaurio, esimerkiksi sisäinen osien irtoaminen samoilla edellytyksin kuin em. pudotustestissä, eli rikkoutumista ei saa tapahtua ja toiminnallisuus tulee olla luokkaa A (standardin ISO 1670-1 mukaisesti). Tämä tarkoittaa, että komponentin kaikkien toiminnallisuuksien pitää toimia kuten on suunniteltu niin ennen testiä, testin aikana, kuin testin jälkeenkin. (ISO 16750-3, 2012.)

IEC 62660 -standardin iskutesti suoritetaan edellä kuvatun ISO 16750-3 -menetelmän mukaan. Kennon kunto arvioidaan seitsemän kriteerin mukaan, jotka ovat: ei vaikutusta, muodonmuutos (sisältää turpoamisen), paineen purkaus (elektrolyytin vuotaminen venttiilistä tai sumun vapautuminen), vuoto (näkyvää elektrolyyttivuotoa), savu (höyryjen ja nokipartikkelien vapautumista venttiilistä), repeytyminen (ei kuitenkaan materiaalien irtoamista), tulipalo (yli sekunnin kestäviä liekkiä) ja räjähdys. Kenno läpäisee testin, mikäli se ei näytä merkkejä vuodosta, paineen purkautumisesta, repeämisestä, tulipalosta tai räjähdyksestä. (SFS-EN IEC 62660-2, 2019; SFS-EN IEC 62660-3, 2022.)

2.2.3 Tärinätesti (vibration)

Tärinätestissä akku kiinnitetään yleensä tavanomaisista alkuperäisistä kiinnityspisteistään testausalustalle, joka kohdistaa akkuun määrätyn, yleensä sinimuotoisen vibraatiopulssin. Tärinätestin tarkoituksena on simuloida ajoneuvon erilaisia käyttöolosuhteita koko elinkaaren aikana. E-säännön nro. 100 mukaan testin aikana ei saa ilmetä elektrolyyttivuotoa, murtumia, kaasun purkautumista, tulipaloa tai räjähdystä.

UN GTR:n tärinätesti vastaa E-säännön nro. 100 testiä, molemmissa käytetään sinimuotoista tärinää taajuudella 7 Hz:stä 50 Hz:iin ja takaisin 15 minuutin kuluessa. Pulssi toistetaan 12 kertaa, jolloin testin kokonaispituudeksi tulee yhteensä kolme tuntia. Kiihtyvyydet testissä ovat enintään 10 m/s^2 (7–18 Hz taajuudella) ja vähintään 2 m/s^2 (30–50 Hz taajuudella). Korkeampia kiihtyvyyksiä ja taajuuksia voidaan myös käyttää. (UN GTR No. 20, 2018; E-sääntö nro. 100, 2021.)

UN 38.3:n testimenetelmässä hyödynnetään samankaltaista 15 minuutin pyyhkäisyä, joka toistetaan 12 kertaa, mutta taajuus nostetaan 50 Hz:n sijaan vaiheittain 200 Hz:iin. Ensimmäisessä vaiheessa värinäsyklin taajuutta nostetaan 18 Hz:iin pitäen kiihtyvyys 1 g:ssä (eli n. 9,81 m/s²). Tämän jälkeen kokonaisliike vakioidaan 1,6 mm:iin ja taajuutta kasvatetaan, kunnes huippukiihtyvyys saavuttaa pienillä akuilla 8 g (eli n. 78,48 m/s²), mikä toteutuu yleensä noin 50 Hz:n kohdalla ja suurilla akuilla 2 g (eli n. 19,62 m/s²), mikä toteutuu yleensä noin 25 Hz:n kohdalla. Kolmannessa vaiheessa huippukiihtyvyys pidetään vakiona, ja taajuutta kasvatetaan 200 Hz:iin asti. (UN 38.3, 2023.)

ISO 6469 -standardin edellä kuvatun iskutestin toinen osa, värinätesti, suoritetaan kolmessa suunnassa. Standardissa ei suoraan ilmoiteta huippukiihtyvyyksiä, mutta ne voidaan laskea muotokertoimen avulla kaavasta 1,

$$\sigma = \frac{A}{RMS} \quad (1)$$

jossa σ on muotokerroin eli crest factor, A on huippuamplitudi ja RMS -arvo eli Root Mean Square on neliöjuurikeskiarvo (Mikä on huippukerroin värähtelyanalyysissä? 2025). Standardin määrittämän muotokertoimen ja RMS -arvon perusteella kiihtyvyyksiksi saadaan Z-suunnassa 7,92 m/s², X-suunnassa 7,02 m/s² ja Y-suunnassa 7,53 m/s².

IEC 62660 standardissa värinätesti suoritetaan IEC 60068-2-64 satunnaisen värähtelyn testimenetelmän mukaan. IEC 62660 mukaan arvot testiolosuhteille ovat: RMS kiihdytysarvo 27,8 m/s², taajuus max. 2000 Hz ja kesto kahdeksan tuntia. (SFS-EN IEC 62660-2, 2019; SFS-EN IEC 62660-3, 2022.)

2.2.4 Puristustesti (crush/crash)

Puristustestin tarkoituksena on testata akun turvallisuutta poikkeavassa tilanteessa, jossa akkuun kohdistuu ulkoisia voimia. E-sääntö nro. 100:n ajoneuvon perustuvassa testissä käytetään samoja UN 94:n, 95:n ja 137:n törmäysoikentimenetelmiä kuin iskutestissä. Komponenttiin perustuvassa testissä, jota

myös UN GTR nro. 20 noudattaa, akkua puristetaan erityisellä muotoillulla metallipainimella vähintään 100 kN ja enintään 105 kN voimalla, jonka jälkeen puristus pidetään 0,1 sekunnista enintään 10 sekuntiin. (UN GTR No. 20, 2018; E-sääntö nro. 100, 2021.)

UN 38.3:n T.6 mekaanisen vaurion testausmenetelmä riippuu kennotyypistä. Testin tarkoituksena on simuloida ulkoista muodonmuutosta, joka voi aiheuttaa kennossa sisäisen oikosulun. Sylinterikennon, jonka halkaisija on vähintään 18 mm, iskutestissä pudotetaan 9,1 kg:n paino 61 cm:n korkeudelta kennon pisin sivun keskelle asetetun tangon päälle kennon ja tangon leikkauskohdalle. Muille kennoille sovelletaan puristustestiä, jossa kenno puristetaan kahden tasaisen pinnan väliin nopeudella 1,5 cm/s. Kennoa puristetaan, kunnes voima saavuttaa 13 kN, jännite putoaa 100 mV tai kennon muodonmuutos on 50 % sen normaalista paksuudesta. Paine vapautetaan, minkä jälkeen kennoja tarkkaillaan kuusi tuntia. Testin läpäisee, jos kennon ulkolämpötila ei nouse yli 170 °C:n, eikä purkautumista tai tulipaloa esiinny. (UN 38.3, 2023.)

IEC 62660 -standardin testissä kenno asetetaan testilaitteeseen ja siihen kohdistetaan voima sylinterikennoille pyöreällä tangolla ja prismaattisille kennoille puolipallon muotoisella painimella. Murskausvoima tulee kohdistaa positiivisen ja negatiivisen elektrodin pitkälle sivulle, ja nopeuden tulee olla alle 6 mm/min. Voima vapautetaan, kun kennon jännite putoaa kolmannekseen normaalista, muodonmuutos on yli 15 %, tai kun voima on 1000-kertainen kennon painoon nähden. Testin jälkeen kennoa seurataan 24 tuntia, tai kunnes lämpötila on laskenut 80 %:iin huippulämpötilasta. Kenno läpäisee testin, jos merkkejä tulipalosta tai räjähdyksestä ei esiinny. (SFS-EN IEC 62660-2, 2019; SFS-EN IEC 62660-3, 2022.)

2.2.5 Lämpöpropagaatio (thermal propagation)

Lämpöpropagaatiolla tarkoitetaan tapahtumaa, jossa yhdessä kennossa sattunut sisäisen oikosulun tai muun tekijän vuoksi käynnistynyt lämpenemisreaktio, eli lämpöryntäys, jota käsitellään tarkemmin luvussa 4.1, alkaa levitä viereisiin kennoihin aiheuttaen ketjureaktion. Huoli lämpöpropagaatiosta on selvä, sillä

vaikka akku läpäisee nykyiset testistandardit, merkittäviä vahinkoja aiheuttavia akkupaloja silti tapahtuu. UN GTR -työryhmä on tuonut esille, että palamattomien elektrolyyttien, ionisten nesteiden ja lämpöä kestävien puhkeamattomien erotinkalvojen käytöllä sekä anodi- ja katodimateriaalien parantelulla voitaisiin vähentää sisäisen oikosulun mahdollisuutta ja lämpöryntäystapauksia. Työryhmä kuitenkin toteaa, että sisäisen oikosulun mekanismi on monimutkainen, ja vaatii vielä vuosien lisätutkimusta. (UN GTR No. 20, 2018.)

UN GTR nro. 20:ssä on kuvattu Kiinan ja Japanin yhteistyössä kehittelemä testausmenetelmä, jota tullaan arvioimaan ja parantelemaan UN GTR:n vaiheessa kaksi. Valmistaja voi valita reaktion käynnistämismenetelmän kolmesta vaihtoehdosta, joita ovat lämmittämällä, lävistämällä tai ylilataamalla. Lämmittämisessä käytetään rajalämpönä 300 °C, mikä tarkoittaa, että lämpöryntäyksen pitäisi käynnistyä 30 minuutin kuluessa siitä, kun lämmitetty kenno on saavuttanut 300 °C:n lämpötilan. Lämpöryntääminen havaitaan, jos kennon jännite putoaa merkittävästi ja lämpötila ylittää valmistajan määrittelemän suurimman käyttölämpötilan, tai lämpötilan nousu on enemmän kuin 1 °C/s ja se ylittää valmistajan määrittelemän suurimman käyttölämpötilan. Akku läpäisee testin, jos akun ulkopuolista tulta tai räjähdystä ei esiinny viiden minuutin kuluessa siitä, kun reaktio on käynnistynyt. (UN GTR No. 20, 2018.)

E-sääntö nro. 100 mukaan matkustajat eivät saa altistua vaaralliselle ympäristölle akun sisäisen oikosulun aiheuttaman lämpöryntäyksen vuoksi. E-säännössä nro. 100 tämän vaatimuksen täyttämiseksi vaaditaan vain varoitusjärjestelmä, joka antaa matkustajille aikaa poistua ajoneuvosta. Varoitus tulee antaa 5 minuuttia ennen kuin vaarallinen tilanne, eli savu, tulipalo tai räjähdys, etenee matkustamoon. Varoitus annetaan ohjainlaitteiden seuraamien parametrien, kuten lämpötilan, jännitteen ja/tai virran perusteella. (E-sääntö nro. 100, 2021.)

ISO 6469-1 -standardiin on myös lisätty lämpöpropagaatiotesti. Menetelmä vastaa pitkälti UN GTR nro. 20:n testiä. Kennoilla, joiden energiatiheys on enintään 130 Wh/kg, lämpöpropagaatio todetaan kohdekennon viereisissä tai muissa kennoissa, mikäli jokin seuraavista ehtopareista täyttyy:

- kennon lämpötila nousee yli 1 K/s ja se ylittää valmistajan määrittämän lämpöpurkauksen lämpötilan
- lämpötila ylittää valmistajan määrittämän lämpöpurkauksen lämpötilan ja siihen liittyy nopea ja merkittävä jännitteen lasku
- lämpötila ylittää valmistajan määrittämän lämpöpurkauksen lämpötilan ja siihen liittyy vapautuvaa kaasua tai savua
- lämpötila nousee yli 1 K/s ja siihen liittyy vapautuvaa kaasua tai savua, ja tapahtuma kestää yli 3 sekuntia.

Suuremman energiatiheyden akuilla lämmönnousuraja on 15 K/s ja tapahtuman kesto 0,5 sekuntia. Tunnin mittaisen jälkitarkastelujakson aikana tallennetaan mm. BMS-livedataa ja tarkkaillaan merkkejä lämpöpropagaatiosta. Merkkejä reaktiosta voivat olla vuotanut neste, BMS-virhe, signaalivirhe, muodonmuutokset, massan häviö, repeämä, materiaalimuutokset ja reaktiot (esim. sulanut tai uudelleenjäähmettynyt alumiini tai kupari, tai reaktiotuotteet, kuten metallinen nikkeli tai koboltti, tai litiumalumiinioksidi), virrankerääjän vaurio sekä termiset muutokset (esim. separaattorissa tai eristysmateriaalissa). BMS-datasta tallennetaan standardin mukaan esimerkiksi kennojännitteet, lämpötilat, eristysvirheet ja muut varoitukset. Lisäksi tallennetaan mm. kohdekennon lämpötila, yhden viereisen kennon lämpötila ja mahdollisia muita tietoja. Testin raportoinnissa voidaan käyttää standardissa esitettyä kuusitasoista tulostaulukkoa, jossa nolla tarkoittaa ettei kohdekennossa tapahtunut termistä karkaamista, ja viidennessä skenaariossa leviäminen ei pysähtynyt, vaan koko akkupaketti joutui osalliseksi lämpöpropagaatiota. (ISO 6469-1 AMD.1, 2022.)

2.2.6 Standardit ja määräykset maailmalla

FMVSS-standardit

Maailmalla on lukuisia erilaisia standardeja ja määräyksiä. Yhdysvaltalainen säännöstö Code of Federal Regulations (CFR) viittaa osiossa 571 FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standards) -standardeihin. FMVSS-standardeissa määritetään sähkökäyttöisten ajoneuvojen törmäystestejä. Syyskuusta 2027 alkaen velvoittava standardi No. 305a määrittää, ettei enintään 4,536 kg painavan ajoneuvon törmäystesteissä saa esiintyä tulipaloa tai räjähdyksiä tunnin kuluessa törmäyksestä. Törmäytysnopeudet ovat etutörmäyksessä 48 km/h,

takatörmäyksessä 79–81 km/h ja sivutörmäyksessä 52–54 km/h. Lisäksi standardi määrittää, että visuaalisen ja auditiivisen varoitussignaalin, akuston suurimman käyttölämpötilan merkittävästä ylityksestä, tulee aktivoitua kolmen minuutin kuluessa lämmön nousun alkamisesta. (49 CFR 571.305a, 2004.)

SAE-standardit

SAE-standardeja ei ollut saatavilla maksutta verkossa eikä paikallisissa kirjastoissa. Siten SAE-standardien tarkastelu tämän työn puitteissa on varsin rajallinen.

Yhdysvaltalaisia olennaisia SAE-standardeja ovat mm.

- SAE J2929-201302 – Safety Standard for Electric and Hybrid Vehicle Propulsion Battery Systems Utilizing Lithium-based Rechargeable Cells
- SAE J2464-202108 – Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing
- SAE J2380-202112 – Vibration Testing of Electric Vehicle Batteries
- SAE J1766-201401 – Recommended Practice for Electric, Fuel Cell and Hybrid Electric Vehicle Crash Integrity Testing (joka liittyy lähinnä akkupaketin pysymiseen kiinni ajoneuvossa)
- SAE J2288-202011 – Life Cycle Testing of Electric Vehicle Battery Modules.

SAE J2929 määrittelee hyväksytyt/hylätyt kriteerit SAE J2464:n testeille, ja SAE J2464 viittaa vikaantumistasoissa SAND2005-3123-standardin kahdeksanportaiseen asteikkoon. SAE J2929 ja J2464 keskittyvät akkujärjestelmään yksinään, eivätkä siten koske kokonaista ajoneuvoa. Standardeissa määritellään minimivaatimukset, joten on mahdollista, että akut ja kennot täyttävät todellisuudessa vielä tiukemmat ehdot.

Standardin SAE J2464 testit on johdettu aiemmista kokemuksista vikatilasta ja vaikutusten analyyseistä ja aiemmista väärinkäyttötesteistä sekä käyttötiedoista (SAE J2464, 2021). Standardin testejä voidaan käyttää vaaran tason arviointiin, kun aktiiviset suojajärjestelmät eivät ole käytettävissä. Testit päätetään vähintään yhden tunnin tarkkailujaksoon, tai kun tuote todetaan turvalliseksi käsitellä.

Testeissä akusta tarkkaillaan lämpötilaa, jännitettä, resistanssia, muodonmuutosta ja videokuvaa. (SAE J2464, 2009.) Testien läpäisyvaatimuksena useimmiten on, ettei akku saa syttyä palamaan tai räjähtää. Jaguemont & Bardé pitävät SAE J2464:n ja SAE J2929:n mekaanisen iskun testiä merkittävänä ja sanovat standardin asettavan tiukkoja ehtoja kiihtyvyyden suhteen. (Jaguemont & Bardé 2023.)

SAE J2464 -iskutestissä sovelletaan samoja edellä kuvattuja UN 38.3 -testausmenetelmiä 25 g:n kiihtyvyydellä akkukemiasta riippumatta. Samoin puristus-testi jäljittelee jo edellä kuvattuja menetelmiä. Kennoa puristetaan painimella ensin 85 %:iin alkuperäisestä koosta, pidetään viisi minuuttia, ja sitten puristetaan 50 %:iin alkuperäisestä koosta. Voima tulee rajoittaa enintään 1000-kertaiseksi laitteen painoon nähden. Murskausnopeuden tulee olla hidas, akkupaketille enintään 1 cm/min, ja yksittäiselle kennoille 0,5–1 mm/min. Pudotustestissä akku pudotetaan kahden metrin korkeudelta kovalle tasaiselle alustalle. (SAE J2464, 2009.)

Ruiz ym. mukaan SAE J2929 -tärinätesti pohjautuu J2380-standardiin, jossa kumulatiivisen tärinätestin korkein huippukiihtyvyys on 5 g (Ruiz ym. 2018). Lämpöpropagaatiotestissä lämpöryntäminen käynnistetään lämmittämällä kohdekenno 400 °C:een (SAE J2464, 2009).

Kiinnostavana nostona SAE J2464 -standardista voidaan tuoda esille lämmitys-testi (thermal stability limit), jossa kennoa ylilämmitetään 300 °C sen korkeimman käyttölämpötilan yläpuolelle. Lämpö nostetaan portaittain 5 °C:n askelein ja pidetään tasaisena 30 minuuttia. Mikäli itselämpenemistä yli 1 °C minuutissa esiintyy, testuskammion lämpötila pidetään tasaisena, kunnes lämpö tasaantuu, tai muu testikriteeri täyttyy, eli kenno esimerkiksi alkaa vuotaa tai tuhoutuu. Jos lämpöryntäminen tapahtuu, testi tulee toistaa, jotta saadaan selville tarkka maksimilämpötila, jossa kenno on varmasti stabiili. Testi tulee toistaa pienin muutoksin kennoille, joita on yliladattu ja kennoille, joita on vanhennettu (mid-life ja end-of-life). (SAE J2464, 2009.)

Toinen mielenkiintoinen testi koskee kennoja, joissa on sulkeutuva separaattori. SAE J2464 -standardi määrittää testit, joiden tarkoituksena on arvioida separaattorisammutuksen tehokkuutta. Testissä kenno lämmitetään 5 °C separaattorin sulkeutumislämpötilan yläpuolelle ja mitataan kennon jännitettä ja virran kulua. (SAE J2464, 2009.)

UL ja SAND2005

Kanadassa itsenäinen toimija Underwriters Laboratories (UL) on tuottanut mm. litiumakkujen turvallisuutta koskevia standardeja. Kanadan kansalliseksi standardiksi hyväksytyssä UL 2849:ssä määritellään turvallisuustestejä sähköpyörille. Törmäystestin (shock test) kiihtyvyydet ovat alle 12 kg:n akuille 50 g iskun kestolla 11 ms, ja 12–25 kg:n akuille 25 g 15 ms kestolla. Testien jälkeen akkua syklietään yksi lataus ja purkusykli valmistajan määrittämällä maksimiteholla, ja seurataan tunnin verran lämpötilaa valvoen. Testeistä ei saa ilmentyä merkkejä tulipalosta kuten metallien sulamista tms. (ANSI/CAN/UL 2849, 2020.)

UL 2849 -standardissa määritellään myös iskutesti (impact test), jossa pudotetaan 1,29 metrin korkeudelta 535 g:n painoinen teräspallo akun päälle. Testin on tarkoitus simuloida 6,8 joulen iskua. Lisäksi standardissa ohjeistetaan menetelmä maksimitoimintalämpötilan laskemiseksi. Testeissä, joissa akkua kuormitetaan, maksimitoimintalämpötilaa hyödynnetään raja-arvona, johon lisätään 70 °C testauslämpötilan saavuttamiseksi. (ANSI/CAN/UL 2849, 2020)

Sähkö- ja hybridi ajoneuvojen akkuja koskevassa SAND2005-3123 -standardissa ei määritetä hyväksyty/hylätty-kriteereitä, koska ajoneuvot ja rakenteet ovat erilaisia. Sen sijaan standardissa kuvataan EUCAR:n kahdeksanportainen asteikko vikaantumistasoille. Jokaiselle testille on myös ilmoitettu rasiustaso. Esimerkiksi tason yksi testeissä ajoneuvo saattaa vaurioitua, mutta akun odotetaan pysyvän olennaisilta osin ehjänä. Tason kaksi testit ovat kovempia, ja akku voi olla käyttökelpoton testin jälkeen. Testien jälkeen testikappaleita seurataan tunnin ajan, kunnes lämpötila on laskenut alle 50 °C:n, tai se todetaan muuten turvalliseksi käsitellä. (Doughty & Crafts 2005.)

SAND2005-iskutesti on kaksiosainen, ja se sisältää rasiustasojen yksi (low) ja kaksi (mid) testit. SAND2005 määrittää iskuille nopeuden, kokonaiskeston, vähimmäishuippukiihtyvyyden, sekä keston vähimmäishuippukiihtyvyydelle, jotka on esitetty taulukossa 1. (Doughty & Crafts 2005.)

Taulukko 1. SAND2005-3123:n iskutestiparametrit. (Doughty & Crafts 2005.)

Testin taso	Nopeus	Pulssin kesto	Vähimmäishuippukiihtyvyys	Huipun kesto
Low-1	6,7 m/s	55 ms	20 g	11 ms
Mid-1	11,1 m/s	65 ms	30 g	16 ms
Mid-2	13,3 m/s	110 ms	20 g	22 ms

Esimerkiksi Low-1-tason testissä kiihtyvyys tulee olla vähintään 20 g (eli n. $196,2 \text{ m/s}^2$) 11 ms ajan, kun Mid-2-tason testissä sama vähimmäiskiihtyvyys tulee kestää kaksinkertaisen ajan, mikä vaatii käytännössä suuremman huipun. Iskuille on myös määritetty hyväksyttävä pulssimuoto. Akusta mitataan mm. jännite ja resistanssi ennen ja jälkeen testin sekä lämpötila ajan funktiona. (Doughty & Crafts 2005.)

Pudotustesti on kolmannen rasiustason testi. Pudotustestissä akku pudotetaan sylinterin muotoisen kappaleen päälle normaalilta käyttökorkeudelta, joka on enintään 10 metriä. Testissä akusta mitataan mm. kiihtyvyys, lämpötila, jännite ja resistanssi. Rasiustasolle kolme asettava puristustesti suoritetaan samalla menetelmällä kuin SAE J2464:ssa. (Doughty & Crafts 2005.)

Lisäksi Korealla, Intialla ja Kiinalla on omat standardinsa ja asetuksensa. Kiinan uudessa akkustandardissa kestävyysvaatimukset ovat kovia. Akun tulee kestää pudotusta hyvinkin korkealta ilman että se syttyy palamaan (Heiska 2025). Kovat vaatimukset perustuvat todennäköisesti siihen, että kiinalaiset suosivat LFP akkuja, joiden katodimateriaali on paljon stabiilimpi NMC-kemiaan verrattuna (Wennberg 2025). LFP-akuissa on yhtä lailla herkästi syttyvä elektrolyytti, mutta energiatiheys on pienempi, mikä tarkoittaa matalampaa syttymisherkkyttä.

2.2.7 Törmäysturvallisuustestit Euro NCAP ja IIHS

Euro NCAP

Vuonna 1997 perustettu Euro NCAP suorittaa eurooppalaisille ajoneuvoille törmäysturvallisuustestejä sekä antaa puolueettomia ja riippumattomia näkemyksiä ajoneuvon turvallisuudesta. Euro NCAP -ohjelma on Euroopan hallitusten ja erilaisten autoilu-, kuluttaja- ja vakuutusjärjestöjen tukema. Testitulosten perusteella ajoneuvon turvallisuus pisteytetään ja luokitellaan Euro NCAP -luokituksella yhdestä viiteen tähteen. Vuonna 2026 Euro NCAP aikoo nostaa turvallisuusluokitteluaan neljässä turvallisuuskategoriassa, joita ovat turvallinen ajaminen, onnettomuuden välttäminen, suojaus onnettomuudessa ja onnettomuuden jälkeinen turvallisuus. Onnettomuuden jälkeinen turvallisuus on ollut mukana luokittelussa ensimmäistä kertaa vuonna 2020, jolloin pisteytys on liittynyt pelastustoimiin ja irrottautumiseen onnettomuuden jälkeen. Vuonna 2023 onnettomuuden jälkeisten teknologioiden arviointia on laajennettu. (Press releases 2026.)

Euro NCAP -etutörmäystestissä ajoneuvo törmäytetään esteeseen keula edellä. Testivalmistelut ovat tarkkaan määritetty *dummys* eli testinuken mitoista ja ominaisuuksista aurinkolipan asentoon. Etutörmäystestejä on kolme variaatiota, MPDB (Mobile Progressive Deformable Barrier), FWDB (Full Width Deformable Barrier Face) ja virtuaali- ja kelkkatestit. MPDB eli liikkuvan testivaunun testi simuloi törmäystä vastaantulevaan ajoneuvoon. Testivaunu törmää testattavan ajoneuvon vasempaan etukulmaan kummankin ajoneuvon nopeuden ollessa 50 ± 1 km/h. FWDB:ssä eli täysleveässä testissä ajoneuvo törmäytetään kohtisuoraan keskelle seinäestettä nopeudella $35 \pm$ km/h. Virtuaali- ja kelkkatestit arvioidaan valmistajan toimittaman datan perusteella. Virtuaali- ja kelkkatesteissä matalan vakavuustason törmäyspulssi on 35 km/h ja se perustuu MPDB-testiin. Keskitason pulssi on 50 km/h, joka tulee UN R137 -säännöstä, ja korkean vakavuustason pulssi on 56 km/h, jonka on tarkoitus kuvata huonointa mahdollista tilannetta. Euro NCAP -testikriteereissä arvioidaan lähinnä matkustajien turvallisuutta, eikä etutörmäystestissä oteta kantaa esimerkiksi akun syttymiseen. (Crash Protection Frontal Impact 2025.)

Kolarin jälkeisessä protokollassa arvioidaan mm. edistynyttä monitörmäysjarrutusta (Advanced Multi-Collision Braking). Valmistajilla voi olla erilaisia ratkaisuja uusien vahinkojen ehkäisemiseksi, joten arviointia varten valmistajan on toimitettava vaaditut tiedot järjestelmän toiminnasta, eikä erityistä testimenetelmää voida siksi määrittää. Lisäksi kolarin jälkeisessä arvioinnissa pisteytetään mm. lämpöpropagaatioon liittyviä toimintoja pohjautuen E-sääntöön nro. 100. (Rescue & Extrication 2025.)

Sivutörmäystestissä AE-MDB (Advanced European Mobile Deformable Barrier face) vaunu törmäytetään kohtisuorassa ajoneuvon kylkeen nopeudella 60 ± 1 km/h. Pylväsvariaatiossa ajoneuvo törmäytetään alustalla 75° kulmassa UN nro. 135 säännön mukaiseen pylvääseen $32 \pm 0,5$ km/h nopeudella. (Crash Protection Side Impact 2025.)

Takatörmäystestissä kelkkaa, johon istuin ja nukke on kiinnitetty, kiihdytetään nopeasti simuloiden peräänajotilannetta. Keskitason vakavuuden testissä törmäysnopeus on n. 16 km/h ja korkean vakavuustason testissä n. 24 km/h. Keskitason testissä nopeuden muutos on 15,65 km/h keskimääräisen kiihtyvyyden ollessa $47,85 \text{ m/s}^2$ ja korkean tason testissä 24,45 km/h keskimääräisellä kiihtyvyydellä $63,15 \text{ m/s}^2$. Maksimikiihtyvyys on 7,5 g, joka vastaa noin $73,57 \text{ m/s}^2$. Takatörmäystestissä tutkitaan ensisijaisesti pään heilahdusta ja siitä aiheutuvan piiskansivallusvamman riskiä. Tämän työn kannalta pään heilahdusnopeuksia voitaisiin tarkastella arvioidessa akun sisäisiä liikkeitä, joskin akkukennojen rakenteet ovat huomattavasti tiiviimmin pakattu ja tukevammin kiinnitetty. (Crash Protection Rear Impact 2025.)

Mercedes-Benz Group teki Euro NCAP MPDB -tyyppisen etutörmäystestin oikeilla ajoneuvoilla, EQA:lla ja EQS SUV:lla. Ajoneuvot olivat Euro NCAP -testikärryä painavampia ja nopeus oli 56 km/h, mikä on korkeampi kuin Euro NCAP -testeissä. Tämä tarkoittaa, että törmäysenergia oli suurempi kuin lain mukaan on vaadittu. Koe osoitti, että ajoneuvot pystyvät absorboimaan törmäysenergiaa muodonmuutokseen, mikä lisäsi matkustajaturvallisuutta. Kyseisissä malleissa korkeajännitejärjestelmä katkaistaan automaattisesti. Korkeajänniteakkujen todettiin pysyneen kokeessa ehjinä. (Real-life crash test 2023.)

IIHS

IIHS (Insurance Institute for Highway Safety) on itsenäinen yhdysvaltalainen voittoa tavoittelematon järjestö, jonka tavoitteena on Euro NCAP:n tapaan vähentää moottoriajoneuvojen aiheuttamia kuolemia, vammoja ja vaurioita. Törmäystestit keskittyvät ajoneuvon kolarin kestävyYTEEN. (Who we are? 2026.)

IIHS:n etutörmäystestit vastaavat pitkälti Euro NCAP -testejä. IIHS-etutörmäystestien Moderate Overlap jäljittelee Euro NCAP:n MPDB-testiä, jossa testivaunu törmää ajoneuvon vasempaan etukulmaan, joskin nopeus IIHS:n Overlap-testissä on $64,4 \pm 1$ km/h (Moderate Overlap Frontal Crashworthiness Evaluation 2.0, 2025). Kolarin jälkeisessä tarkastelussa akun lämpötilaa seurataan vähintään neljä tuntia testin jälkeen lämpöryntäämisen havaitsemiseksi, mitataan mahdollisesti vuotaneen elektrolyytin määrä, sekä arvioidaan akun paikallaanpysymistä. Testeissä sovelletaan standardin FMVSS 305 vaatimuksia. Huonoon kokonaisarvosanaan johtavat mm. lämmönnousu yli $25,5$ °C, tulipalo tai savun esiintyminen. (Moderate Overlap Crashworthiness Evaluation 2.0, 2025.)

Sivutörmäystesti on IIHS:ssä samanlainen kuin Euro NCAP MDB -testi, eli 1900 kg:n painoinen testikärry törmäytetään ajoneuvon kylkeen 60 ± 1 km/h nopeudella (Side Impact Crashworthiness Evaluation 2.0, 2025). Samoin takatörmäys- eli piiskansivallustesti vastaa pääpiirteittäin Euro NCAP -testiä 16 km/h ja 24 km/h nopeudenmuutospulsseilla. Huippukiihtyvyys, joka on keskimmäisen vakavuustason testissä 9,5–10,5 g, saavutetaan 27 ms:n kohdalla. 24 km/h testissä taas maksimi huippukiihtyvyys tulee olla välillä 6,75–8,25 g keskikiihtyvyyden ollessa 6,44 g. (Whiplash Prevention Evaluation 2025.)

2.3 Autonvalmistajien ohjeet

Sähköajoneuvojen akkujen kuntoa pyritään valvomaan niin katsastuksessa, kuin huollossa. Vuonna 2022 voimaan tulleiden uusien katsastuksen arvosteluperusteiden mukaan ajoneuvo tulee asettaa ajokieltoon esimerkiksi silloin, kun akun suojat eivät ole paikallaan, akulla on välitön putoamis-, kiilautumis-, palotai oikosulkuvaara, tai komponenteissa on muita merkittäviä vaurioita, kuten

vuoto tai puutteellinen eristys, joka aiheuttaa välitöntä vaaraa. Ajoneuvon hylkäämiseen katsastuksessa sen sijaan johtavat vahingoittuneet suojat ja vaurioituneet komponentit, jos ne eivät aiheuta välitöntä vaaraa. Käytännössä katsastushenkilö tekee päätöksen vaurion tasosta, minkä vuoksi valmistajien ohjeet vaurion tarkastamiseksi ovat tärkeitä. (Ajoneuvojen määräaikaikatsastuksen arvosteluperusteet 2022; Peltonen 2024.)

Esimerkiksi pohjavaurioissa voi olla vaikea arvioida, onko vaurio kosmeettinen, vai voiko se olla vahingoittanut akkukennoja, moduuleita tai muita järjestelmiä kotelon sisäpuolella. Akkukotelot ovat pääasiassa metallia, joka voi palautua muodonmuutoksesta jopa kokonaan. Ulkopuolelta ei näe, kuinka syvällä isku on käynyt, mutta valmistajien oletetaan tehneen asiasta tutkimuksia, minkä perusteella voidaan määritellä, millainen vaurio on korjattavissa. (Autio 2025.) Tässä luvussa tarkastellaan valmistajien ohjeita mm. vaurioajoneuvojen akkujen tarkastamisesta ja käsittelystä.

2.3.1 Tesla

Tesla Model 3:n SRS (Supplemental Restraint System), eli turvalaitejärjestelmän tarkastusmenetelmän mukaan RCM (Restraint Control Module) -ohjainlaite tulee vaihtaa aina, jos turvavyön kiristin on lauennut, ja akun pyrosulake aina, jos mikä tahansa turvatyyny on lauennut. Mikäli vain turvavyönkiristin on lauennut, pyrosulake tulee vaihtaa silloin, jos se on palanut. Teslan ohjeen mukaan akun pyrosulaketta ei myöskään tule vaihtaa, jos ei ole varmaa, että ajoneuvo korjataan. Akun tarkastuksesta ei ole mainintaa SRS tarkastusmenetelmässä. (SRS Inspection and Component Replacement 2025.)

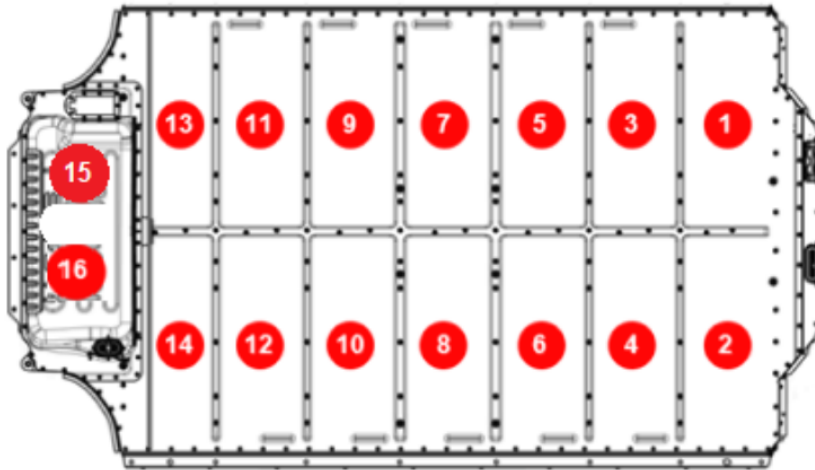
Ajoneuvon yleinen kuntotarkastus sisältää pohjan tarkastuksen painaumien, jälkien ja muiden vaurioiden varalta. Teslan ohjeen mukaan pohja tulee tarkastaa aina, kun ajoneuvo nostetaan, tai asiakas pyytää. Jokaiselle mallille on oma tarkka ohjeistus akun pohjavaurioiden tarkastukseen. Korikorjaamo ei saa yrittää korjata akkukotelon vauriota, vaan akku tulee korjauttaa Tesla Service Centerillä. Jos akussa on reikä, halkeama tai repeämä, ei tarkastusta tarvitse tehdä,

vaan akku on suoraan vaihdettava, eikä Tesla suosittele ajoa ennen korjausta. (TN-14-16-004, 2025; CD-23-16-001, 2023.)

Esimerkiksi Model S- ja X -mallien ohjeessa mainitaan muutamia komponentteja, jotka pystytään korjaamaan tai vaihtamaan. Tarkastuksesta tehdään Toolbox-istunto, johon kirjataan havainnot, joita varsinaiset tarkastusinsinöörit arvioivat. Kolhun sijainti ilmoitetaan koordinaatiston avulla. Akun vaihtoa suositellaan, mikäli pohjalevyssä on painauma, jonka syvin kohta ylittää määritetyt raja-arvot. Model S- ja X -malleissa painauman syvin kohta saa olla enintään 6 mm. Uudemmissa 2021 jälkeen valmistetuissa Model S:ssä ja X:ssä saa olla 7 mm:n painauma. Non Structural, eli perinteisessä ei-rakenteellisessa Model 3:n ja Model Y:n akussa sallitaan suurin, enintään 8 mm syvä painauma, kun taas Model Y:n rakenteelliselle akulle (Structural Pack) raja on tiukin, sallien enintään 5 mm:n painauman akkukotelossa. (TN-14-16-004, 2025; CD-23-16-001, 2023.)

Teslalla on myös ohje akun kuljetusturvallisuuden arvioimiseksi. Mikäli akku hylätään kuljetusturvallisuustarkastelussa, se tulee kuljettaa tarkoituksenmukaisessa vaarallisten aineiden kuljetuslaatikossa. Tällaisia ovat esimerkiksi tapaukset, joissa akkukotelossa on suuria jälkiä ja kotelon pinta on rikkoutunut, kuten n. 1,5 cm:n nirhauma tai n. 7 cm pitkä halkeama. Akkua ei myöskään ole turvallista kuljettaa, jos kotelon painauma ylittää annetun maksimisyvyyden, jotka ovat samat kuin edellä kuvatussa tarkastuksessa. Akussa ei saa myöskään olla minkäänlaista taipumaa eikä kiertymää, jonka voi havaita esimerkiksi kannen aaltoilusta. Värimuutokset akun kuoressa voivat viitata lämpenemiseen, mikä johtaa niin ikään kuljetusturvallisuustarkastuksen hylkäämiseen. Teslan mukaan akun palokaasujen lämpötila voi ylittää jopa 600 °C. (CD-23-16-001, 2023.)

Kuljetusturvallisuustarkastuksessa mitataan lisäksi akun lämpötila 16:sta eri kohdasta. Minkään kohdan lämpötila ei saa ylittää 40 °C, eikä lämpötilaeroa saa olla yli 5 °C. Esimerkiksi Model S:n ja X:n akku mitataan jokaisen moduulin sekä keskusyksikön kohdalta (kuva 2). (CD-23-16-001, 2023.)



Kuva 2. Tesla Model S:n ja X:n akun lämpötilan mittauspisteet. (CD-23-16-001, 2023.)

Kuvasta nähdään, että lämpötilan mittauspisteet ovat varsin suurpiirteisiä, vaikka pisteitä on useampia. Kolmantena vaiheena kuljetusturvallisuustarkastuksessa tarkastetaan akun SOC-arvo ja eristysvastus. SOC ei saa olla yli 50 %, eikä eristysvastus alle 200 k Ω . (CD-23-16-001, 2023.)

Tesla ei salli käytettyjen, kierrätettyjen tai jälkimarkkinoilta hankittavien varaosien käyttöä korjauksessa. Teslan mukaan kolmannella osapuolella ei ole olemassa testausmenetelmiä, joilla voitaisiin varmistaa, ettei osan eheys ole vaarantunut. (Structural Repair Guidelines 2025.)

Tesla rajoitti "salvaged"-ajoneuvojen pikalatausta mahdollisten akkuvikojen takia vuonna 2020. Myöhemmin pikalatausmahdollisuus kuitenkin palautettiin sillä ehdolla, että ajoneuvo läpäisee korkeajännitejärjestelmän ja pikalatausjärjestelmän turvallisuustarkastuksen. Salvaged tai Unsupported Vehicle tarkoittaa valmistajan tuen ulkopuolelle jäävää ajoneuvoa. Tesla määrittelee tukemattomaksi ajoneuvoksi valmistamansa ajoneuvon, jota pidetään vaarallisena normaalikäytössä tai tietyissä tilanteissa, esimerkiksi onnettomuuden, tulvan, tulipalon tai vastaavan vaaran aiheuttamien laajojen vahinkojen vuoksi, tai jos ajoneuvo on kirjattu romuajoneuvoksi (salvaged-titled) tai se on uudelleenrakennettu. Tukemattomille ajoneuvoille voidaan edellyttää turvallisuustarkastuksia, kuten

vuoden 2020 rajoitustapauksessa, ja rajoittaa esimerkiksi varaosasaatavuutta. (Agatie 2022; TN-18-00-001, 2025.)

Korkeajännite- eli HV-järjestelmän turvallisuustarkistuksessa selvitetään, onko ajoneuvon HV-järjestelmän parissa työskentely turvallista. Tarkastuksella halutaan varmistaa, ettei HV-järjestelmä aiheuta vaaraa käyttäjille, korjaamohenkilökunnalle eikä laitteistolle. HV-järjestelmän turvallisuustarkastuksessa akku ja korkeajännitekomponentit tarkastetaan lähinnä visuaalisesti. Pikalatauksen turvallisuustarkastuksessa, joka on saatavilla muualla paitsi Kiinassa, sen sijaan selvitetään, onko akun pikalataaminen turvallista. Tarkastus ei liity ajoneuvon ajettavuuteen tai toiminnallisuuteen. Pikalatauksen tarkastuksen läpäissyt auto säilyttää tukemattoman ajoneuvon tittelin, mutta pikalataus sallitaan, joskin ajoneuvon omistajan omalla vastuulla. Julkisesti ei kuitenkaan ole tiedossa, mitä tai millaisia toimenpiteitä tarkastus sisältää. (TN-18-00-001, 2025.)

2.3.2 Mercedes-Benz

Mercedes-Benzillä on ohjeistus akun tarkastamiseen ja kuljetusturvallisuuden arvioimiseen. Akkujen uudelleenkäyttöä ei sallita, vaan kolarin jälkeen akku on aina uusittava, jos turvatyynyjä tai akun pyrosulake on lauennut, tai muodonmuutos pohjarakenteessa on liian suuri. Nykyisin testerillä on kuitenkin erikoistoiminto uudempiin malleihin, kuten EQE, EQS ja uusi CLA, minkä avulla akun kuntoa voidaan turvalaitteiden laukeamisen jälkeenkin vielä arvioida. Testerin tuloksen mukaan akku joko uusitaan, tai sitten sitä voidaan vielä käyttää, mutta vain siinä samassa ajoneuvossa, johon se alun perin oli asennettu, ja enintään yhden pyrosulakkeen aktivoinnin verran. Se, millä perusteella testerit tekee luokittelun, tai mitä parametreja toiminto lukee, ei ole tiedossa. (Lahti 2025.)

Mercedes-Benz ei salli akkujen korjaamista tai moduulien vaihtamista, vaan käytännössä koko akku on aina vaihdettava uuteen. Eniten huolta aiheuttaa Lahden mukaan jäähdytysjärjestelmän vaurioituminen. Käytetty akku Teslan tapaan kuljetusturvallisuusluokitellaan. Jos akku todetaan kuljetusturvalliseksi, se lähetetään Saksaan tehtaalle tutkittavaksi. On mahdollista, että tehtaalta tulee tilalle kunnostettu akku. Tehtaalla tunnetaan akun rakenne ja tiedetään, missä

kohtaa jäähtytysputket menevät, jolloin osataan arvioida riskejä, jos esimerkiksi akun pohjassa on painauma. Mikäli akku todetaan ei-kuljetusturvalliseksi, se kierrätetään paikallisesti, eli murskaamalla kotimaassa. (Lahti 2025.) Akut vaurioajoneuvoista, jossa pyrosulake tai turvatyyny on lauennut, tulee mm. lisämerkitä "Litiumioniakku onnettomuusautosta"-huomautuksella (SI47.70-P-0014A, 2025).

Huolto-ohje "Korkeajänniteakkujen käsittely onnettomuuden jälkeen" ohjeistaa vaurioajoneuvon pysäköintiin ja vastaanottoon. Ajoneuvo tulee mm. tarkastaa paljaiden johtojen ja oikosulkuvaaran varalta sekä diagnosoida testerillä. Mikäli turvalaitteita ei ole lauennut tai testerin toiminto sallii akun jäämisen autoon, pitää kuitenkin akunhallintajärjestelmän vikamuisti tarkistaa, korkeajänniteakku ladata, tarkastaa lataustilan toiminta ja tehdä koeajo. Mikäli toimenpiteiden yhteydessä ilmenee turvallisuuden kannalta oleellisia vikakoodeja, akku tulee vaihtaa. Turvallisuuteen vaikuttavat mm. eristysvastus, interlockpiirin ja kontaktorien toiminta sekä maksimi- ja minimikennojännitteet ja korkeajänniteakun sulakkeet. (SI47.70-P-0014A, 2025.)

Kaikkia malleja koskee sama litiumioniakun akkukotelon kuoren tarkastus, jossa murtunut tai kiinnitysprofiileista auennut kuori voi viitata akuuttiin vaaraan, jolloin Mercedes-Benz ohjeistaa soittamaan paikalliseen hätänumeroon ja pitämään turvaetäisyyttä akkuun. Jos akkukotelossa on painaumia, tulee painauman syvyys mitata ja verrata suoraan referenssilinjaan. Joillekin malleille, kuten EQA, EQB, EQE ja EQS, joissa on EB330-, EB42x- tai EB40x-korkeajänniteakku, tulee tehdä testerillä erityistoiminto, joka kertoo jatkotoimenpiteet. Onnettomuudessa osallisena olleelle ajoneuvolle tehdään toiminto "Arvioi korkeajänniteakun käytön jatkaminen autossa onnettomuuden jälkeen", ja jos pohja on muuten vain vaurioitunut "Arvioi korkeajänniteakun käytön jatkaminen autossa pohjavaurion jälkeen". Mikäli painauman syvyys ylittää maksimirajan, akku tulee vaihtaa. (AR47.70-P-0017-02A, 2025; Lahti 2025.)

Mercedes-Benzin ohjeistuksessa akun kuljetusturvallisuuden arvioimiseksi tarkastetaan ensin, onko akussa akuuttia vaaraa, kuten savua, tulipaloa, lämmönkehitystä tai elektrolyyttivuotoa. Lisäksi tarkastetaan mekaaniset suojaukset ja

kotelot naarmujen, murtumien, ilmoitettujen mittausarvojen ylittävien painaumien, korroosion ja muiden vaurioiden varalta, kuten kuulostaako sisällä olevan irrallisia osia. Akun kommunikaatioyhteys testataan, ja mikäli BMS ei reagoi, akku luokitellaan ei-kuljetusturvalliseksi. Irrallisesta akusta mitataan korkeajännitenapojen jännite, jonka tulee olla alle 20 V napojen välillä, ja navan ja kotelon välillä alle 60 V. Mikäli jompikumpi ylittyy, on olemassa sähköiskun vaara, ja akku tulee eristää. Jos mikä tahansa mainituista kohdista toteutuu, akku luokitellaan ei-kuljetusturvalliseksi, ja se tulee varastoida erillisen ohjeen mukaisesti ja kierrättää kotimaassa. (OF54.10-P-3000-01E, 2025.)

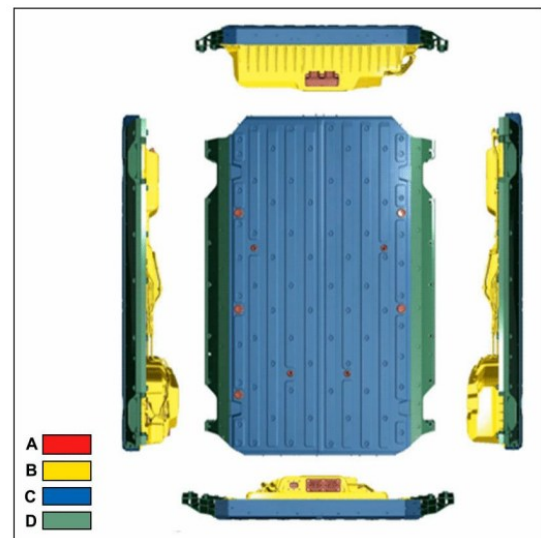
Ohjeessa on määritelty sallitut vauriosyvyydet värikoodatuin aluein. Kuva 3 esittää alueita EQC:n EB300 tai EB301 akussa.

Permissible dent depths (d) for vehicles with EB300 or EB301 high-voltage battery

- A: Evaluation according to B1, B3 and B4
- B: ≤ 2 mm
- C: ≤ 5 mm
- D: ≤ 10 mm



If the permissible dent depth (d) in one area (A, B, C, D) is exceeded, no transport approval is granted.



P47.70-A163-82

Kuva 3. Vauriokartta EQC:n akulle EB300 ja EB301. (AR47.70-P-0017-02A, 2023.)

Kuten kuvasta havaitaan, suurin pohjapinta-ala koostuu pääasiassa sinisestä C-alueesta, jossa painauma saa olla korkeintaan 5 mm syvä. Lisäksi on muutamia punaisia A-alueita, kuten tietyt pohjan muotoprofiilien väliköt ja liitinrungot, joissa vauriot tulee arvioida erillisten ohjeiden mukaisesti. Punaisten alueiden erityisyyttä ei ole eritelty muuten kuin että vaurioista tulee dokumentoida pituudet, leveydet ja syvyydet, ja kirjata sijainti piirustukseen analyysilomakkeelle.

Pienet jäljet on sallittu, mutta selkeitä muodonmuutoksia ei, joskaan ohjeessa ei tarkenneta A-alueiden raja-arvoja. (AR47.70-P-0017-02A, 2025.)

Ohjeissa on vaihtelevuutta, sillä vanhemmassa ohjeessa EB311-, EB312- ja EB330-akuille on sallittu yli 3 mm:n painauma vain keltaisella C-alueella, joka kattaa lähinnä akun suoria pystyseinäalueita. Pohja sen sijaan on violettia E-alueella, jossa sallitaan vain korkeintaan 3 mm:n syvyinen painauma, kun uudemmassa ohjeessa pohja-alueella sallitaan korkeintaan 5 mm:n painauma. (AR47.70-P-0017-02A, 2022.)

G-class-maasturimallin akkua EB482 koskevat raja-arvot poikkeavat muista ollen esimerkiksi C- eli pohja-alueella enintään 0,5 mm ja kannakkeet kattavalla D-alueella enintään 0 mm. Myös akun rakenne poikkeaa muista ollen selvästi kapeampi. Lisäksi jäähdytysputkia ja paineventtiilejä koskee violetti E-alue, joka tarkastetaan erillisen ohjeen mukaan. Kaikkia malleja koskevat kuitenkin painaumien dokumentointi sekä sovellettavat liittimien, venttiilien ja elektrolyyttivuotojen tarkastus. (AR47.70-P-0017-02A, 2025.)

2.3.3 Volvo

Volvo sallii yleisesti enintään 8 mm syvyisen ja 500 mm pituisen painauman akussa. Kotelo voidaan vaihtaa uuteen, mikäli siinä havaitaan mekaanisia vaurioita. Volvon turvaetäisyys vaurioajoneuvolle on 15 metriä, ja korjaamohallissa vaurioajoneuvon paikka on uloskäynnin läheisyydessä. Onnettomuuden jälkeen akku tulee tarkastaa vaurioiden ja vuotojen varalta. Akkuja voidaan yleensä korjata paikallisesti jälleenmyyjillä, tai keskitetysti Göteborgissa. Jäähdytysjärjestelmän ja akkukotelon tiiveystarkastus tehdään aina onnettomuuden ja sellaisen työn jälkeen, missä akku on avattu. Mikäli jäähdytysjärjestelmässä havaitaan vuotoja tai paine laskee, akku tulee vaihtaa. Mikäli moduuleissa havaitaan muodonmuutosta, tai ne ovat altistuneet jäähdytysnestevuodolle tai kovalle lämmölle, tulee ne varastoida ulkona ja kierrättää murskaamalla. (Anonyymi 5, 2026; VCC-464307-8.)

2.3.4 Volkswagen

Volkswagenin vaurioituneen ajoneuvon tarkastusohjeessa suositellut toimenpiteet perustuvat vaurioiden sijaintiin ja laajuuteen kolmessa kategoriassa, joita ovat maalivaurion korjaus, akkukotelon kuoren uusiminen ja korkeajänniteakun osien uusiminen. Akkukotelon suoruus ja tiivistys tulee tarkastaa, eikä niissä saa olla vaurioita eikä korroosiota, mutta ohjetta akkukotelon painaumien tarkastukseen ei kuitenkaan löydetty. Vaurioituneen ajoneuvon tarkastukseen Volkswagenilta sen sijaan löytyy tarkka ohjeistus. Ajoneuvo tulee ensin merkitä ja tarkastaa visuaalisesti. Mikäli havaitaan viitteitä palosta, savusta, poikkeuksellisista äänistä, hajusta, nestevuodoista, mekaanisesti vaurioituneita tai paljastuneita kontakteja, tai akun pintalämpötila on yli 80 °C, tulee varautua varaan, ja seurata tilannetta. (General information on assessment of accident vehicles; Quarantine arrangements.)

ID.4:n pelastuskortilla varoitetaan, että ajoneuvo, joka on ollut onnettomuudessa, ja jonka korkeajänniteakku on vaurioitunut, tulee tehdä jännitteettömäksi ja pysäköidä karanteenialueelle, eli vähintään viiden metrin etäisyydelle rakennuksista ja muista ajoneuvoista. Pelastuskortin ohjeen mukaan akun mekaaninen muodonmuutos on riski lämpöryntäämislle, jolloin korkeajänniteakun lämpötilaa tulee seurata. Pelastuskortilla myös varoitetaan itsestään- tai uudelleen-syttymismahdollisuudesta. (rds_vw_316_615_en 2025.)

2.3.5 Hyundai

Hyundailta löytyy ohjeet vaurioituneen ajoneuvon käsittelyyn. IONIQ 5:n ohjeen mukaan kolarissa ollut ajoneuvo tarkastetaan ensin ulkoisesti. Sen jälkeen auto tehdään jännitteettömäksi ja tarkastetaan pääsulake ja kontaktoreiden tila sekä mitataan eristysvastus. Muut osat tarkastetaan vikaantumisen varalta, ja vikakoodit luetaan BMS-ohjainlaitteelta. Mikäli vikakoodeja esiintyy, jatketaan vianmäärittystä vikakoodin perusteella. Akku luokitellaan vaurioiden laajuuden mukaan, ja ennen kuljetusta mitataan jännite ja lämpötilat. Lämpötila ei saa ylittää 35 °C, eikä lämpötilan vaihtelu saa olla yli 3 °C 30 minuutin seurannan aikana. Mikäli lämpötilan vaihtelu on suurempaa, akun varaus tulee purkaa. Akku

tarkastetaan myös elektrolyyttivuotojen varalta. Akkukotelon vaurioiden tai painaumien tarkastukseen ei kuitenkaan löytynyt tarkempaa ohjetta, joka määritteli, milloin akku on vielä käyttökelpoinen. (Battery Control System High Voltage Battery Handling Guide.)

2.3.6 Renault

Renaultin ohjeiden mukaan onnettomuudessa vaurioituneelle ajoneuvolle tulisi tehdä eristysvastuksien seuraamiseksi turvamittaus 30 minuutin välein ennen kuin se päättyy merkkikorjaamolle. Korjaamolle saapuessa ajoneuvo pysäköidään valmistajan ohjeen mukaan ja tehdään sähköturvalliseksi. Ensimmäisenä mitataan eristysvastus, minkä jälkeen odotetaan 15 minuuttia ja mitataan uudelleen. Tulokset kirjataan turvamittauspöytäkirjaan. Ajoneuvon kunto arvioidaan visuaalisesti ja tarkastetaan, koskeeko vauriot korkeajänniteosia. Jos akussa on pintajännitteitä, se puretaan moduulitasolle alle 60 V:n osiin. Mikäli purkaminen ei ole mahdollista, akku on kierrätettävä. Samoin, jos moduulissa on minkäänlaisia silminnähtäviä vaurioita, se on kierrätettävä, eikä sitä saa käyttää uudelleen. (Piitulainen 2025.)

Akku on kierrätettävä myös, jos turvatyynyjä tai pyrosulake on lauennut törmäyksen johdosta, mikä voisi Piitulaisen mukaan viitata sellaisiin hidastuvuuksiin, ettei akkua pidetä enää turvallisena. Akun sisällä on myös paineantureita, jotka muutoksen havaitessaan laukaisevat pyrosulakkeen. Ei kuitenkaan ole tiedossa, mikä on se raja-arvo, jonka yli paine ei saa nousta. Jos vain turvavyönkierritimet ovat lauenneet, tulee ajoneuvolle tehdä lisämittauksia. Renault ohjeistaa tarkastamaan ja mittaamaan tietyt korin runkoaisat ja poikkiaiset, määrättyjä pistehitsejä, sekä akun kiinnityspultit vaurioiden varalta. Peräänajokolarissa turvalaitteet eivät välttämättä laukea, jolloin menetellään erillisen ohjeen mukaan. (Piitulainen 2025.)

Valmistaja ohjeistaa tarkasti, millaiset kuvat vaurioista tulee olla. Pöytäkirjan liitteenä tulee olla vähintään kokonaiskuva ajoneuvosta, sekä tarkennetut, selkeät lähikuvat vaurioista. Vaurioiden syvyys tulee mitata ja niiden sijainti merkitä. Pääasiassa alle 10 mm:n painaumat akussa on sallittu. Kuitenkin jos akussa on

esimerkiksi 9 mm:n painauma, tulee se toimittaa tarkastettavaksi, koska isku on voinut käydä esimerkiksi 11 mm:n syvyydessä. Jos akussa ei ole ulkoisia vaurioita ja se reagoi normaalisti latauksiin, purkusykleihin ja täyskaasukiihdytyksiin akunhallintajärjestelmän mittaamien parametrien mukaan, eikä havaita ongelmia, oletetaan että se on kunnossa. (Piitulainen 2025.)

Renaultilla on keskitetty akkukorjaamo Ruotsissa ja Ranskassa. Käytännössä Suomesta akut lähetetään Ruotsiin, ja tilalle saadaan kunnostettu akku. Akkukorjaamolla kaikki moduulit käyvät tasapainotusasemassa. Renaultin akussa voi olla kolmen eri valmistajan kennoja, ja kemia on yleensä NMC (Piitulainen 2025; Renault Zoe). Tasapainotusasemassa valitaan akun valmistajan määrittämät tarkat kennokohtaiset rajat purku- ja lataussykleille. Moduuli asetetaan laitteeseen, joka mittaa myös painetta, ja lopettaa latauksen tarvittaessa paineen noustessa. Mikäli jossain kennossa esiintyy syklityksen aikana liikaa häiriöitä, laite ilmoittaa, ettei se vastaa valmistajan määrittämiä, jolloin moduuli hylätään ja kierrätetään. Muutoin laite ilmoittaa tasapainotuksen päätteeksi, jos moduulia voidaan edelleen käyttää. (Piitulainen 2025.)

3 Kennon vaurioitumismekanismit törmäyksessä

Ajoneuvokäytössä akut altistuvat vaihteleville olosuhteille ja erilaisille nopeuksille ja kiihtyvyyksille. Äärimmäisissä tapauksissa akku voi vaurioitua sisäisesti, ja aiheuttaa kennon sisäisen oikosulun. Sahraei ym. mukaan tämä voi tapahtua myös ilman, että kennon ulkokuori pettää ja repeää. Jo pieni 1 mm:n muodonmuutos kennossa voi johtaa pehmeään oikosulkuun, mikä voi johtaa myöhemmin lämpöryntäykseen, ilman että kennossa havaitaan vikaantumista heti vaurion synnyttyä. Lämpöryntäystä käsitellään tarkemmin luvussa 4.1. (Sahraei ym. 2014.)

Litiumioniakku kuluu normaalisti käytössä, minkä lisäksi se voi vaurioitua erilaisin tavoin väärinkäyttötilanteissa tai ulkoisen tekijän vaikutuksesta. Kulumisen ja vaurioitumisen välille on vaikea vetää selkeää rajaa. Kolarissa akku voi vaurioitua ja syttyä tuleen välittömästi, tai törmäys voi aiheuttaa akustoon sisäisiä vaurioita, jotka ilmenevät vasta myöhemmin käytön jatkuessa (Markkanen 2016).

Keinänen diplomityössään kuvaa vaurioitumismekanismeja tarkemmin, joten tähän on nostettu vain tämän työn kannalta olennaisimmat, joita ovat mekaaniset vauriot (ulkoisen muodonmuutos, virrankeräimen liitoksen vaurio, elektrodien halkeilu) ja kemialliset muutokset (SEI eli Solid Electrolyte Interface -kerroksen muodostuminen, elektrolyytin hajoaminen, litiumin kiteytyminen). Mekaaninen vaurio johtaa useammin suoraan oikosulkuun, kun taas kemialliset muutokset näkyvät pääsääntöisesti ensin kapasiteetin tai suorituskyvyn alenemisena. (Keinänen 2023.)

3.1 Mekaaniset vauriot

3.1.1 Ulkoinen muodonmuutos

Valmistajien välillä on suuria eroja akun rakenteessa. Akkupaketin sisällä voi olla enemmän tai vähemmän tyhjää tilaa, kennot ja moduulit voi olla järjestetty erilaisiin asentoihin akkupaketin sisällä, ja tukirakenteista tai akkupaketin kotelosta voi olla erilaisia variaatioita. Akkupaketin käyttäytyminen erilaisissa tilanteissa voi myös olla suunniteltu eri tavalla erilaisissa konstruktioissa. Esimerkiksi Teslalla on rakenteita, joissa akkupaketin kuori on suunniteltu sulamaan pohjasta lämpötilan noustessa korkeaksi, jolloin moduulit putoavat maahan (Wennberg 2025). Akkukotelon rakenne voi olla jämäkkä tai painua kasaan helpommin, mikä vaikuttaa ulkoisien voimien absorboimiseen. Piitulainen pitää vaarallisempina vanhempia akkuja, joissa on paljon kiinnitysrakenteita, koska rakenteet akun sisällä pääsisivät liikkumaan törmäyksessä herkemmin kuin tiiviisti pakatut suuret moduuliyksiköt (Piitulainen 2025).

Akkukotelon ulkoinen muodonmuutos voi olla merkki sisäisistä vaurioista. Suuriakin sisäisiä vaurioita voi kuitenkin tulla myös ilman akkupaketin ulkoista muodonmuutosta, kuten Markkanen diplomityössään esittää. Vakavaan sivukolariin joutuneen Nissan Leafin akkupaketti oli päällisin puolin kunnossa, eikä ensimmäisillä lataussykleillääkään havaittu ongelmia. Myöhemmässä tarkastelussa akun avaamisen jälkeen kuitenkin havaittiin, että kennojen sisäinen inertia oli aiheuttanut törmäyksessä rakenteiden pettämisen ja useita kennoja oli taittunut

V:n malliseksi. (Markkanen 2016.) Nissan Leafissa on yleensä pussikennot LMO-kemialla (2011 Nissan Leaf SV).

Akkukennot sen sijaan on pakattu tiiviisti, eikä kuoren sisällä ole ylimääräistä tilaa. On siis selvää, että kennon ulkoinen muodonmuutos aiheuttaa muutoksia myös kennon sisäisiin rakenteisiin. Kennon muodonmuutos voi johtua törmäyksessä kappaleiden tai rakenteiden osumisesta kennoon suurella voimalla, ulkoisen kappaleen tunkeutumisesta kennon sisälle, tai suuresta hidastuvuudesta johtuvasta sisäisien massojen liikkeestä. Mikäli kennon sisäinen rakenne vaurioituu ja muuttaa muotoaan niin, että anodi ja katodi joutuvat oikosulkuun esimerkiksi separaattorivaurion seurauksena, on vaarana kennon lämpöryntäys ja syttyminen tuleen. Muodonmuutoksen vaikutuksia ja niihin liittyviä tutkimuksia tarkastellaan tarkemmin luvussa 4.5.

3.1.2 Virrankeräimen liitoksen vaurio

Aktiivimateriaalit on pinnoitettu virrankeräinfoliolla, joka on liitetty kennon napoihin yleensä hitsaamalla. Kennotyypistä ja rakenteesta riippuen navan ja virrankeräimen välinen liitos voi altistua suhteellisen suurillekin kuormituksille. Vuorilehdon mukaan tämä liitos on jopa kennon heikoin kohta. Törmäyksessä tai mekaanisessa kuormituksessa liitokseen voi vaikuttaa suuria voimia, mikä voi johtaa liitoksen murtumiseen, tai jopa irtoamiseen kokonaan. Liitoksen vaurioituminen ei suoraan aiheuta vaaratilannetta, vaan laskee lähinnä akun suorituskykyä ja lisää resistanssia. Resistanssin kasvaessa on kuitenkin vaarana ”antioikosulku”, jossa suuri virta joutuu kulkemaan entistä kapeampaa reittiä aiheuttaen suuren lämpökuorman ja vaaran lämpöryntäykselle. Valmistuksesta tai suunnittelusta johtuvat heikkoudet kuitenkin tulevat esille jo esimerkiksi kovissa tärinätesteissä. (Vuorilehto 2026.)

Kuparinen virrankeräinmateriaali voi myös alkaa liueta elektrolyyttiin, mikäli kennon jännite laskee alijännitteen puolelle. Ladatessa liuennut kupari voi kertyä anodin pinnalle ja muodostaa dendriittejä, eli ikään kuin piikkejä, jotka kasvaessaan lopulta puhkaisevat separaattorin ja aiheuttavat kennon sisäisen oikosulun. (Heiska 2025.)

3.1.3 Elektrodien halkeilu

Elektrodit anodi ja katodi ovat kiinteää materiaalia, joihin voi tulla mekaanisia vaurioita, kuten halkeamia ja mikromurtumia. Vaurioiden havaitsemiseksi kennon pitäisi tarkistaa esimerkiksi röntgenkuvauksella. (Penttinen 2025; Keinänen 2023.) Elektrodien mekaaniset vauriot, kuten halkeamat, eivät suoraan aiheuta vaaraa, vaan vaikuttavat lähinnä kennon kapasiteettiin ja suorituskykyyn (Vuorilehto 2026).

Vanhemmissa kennoissa on aiemmin ollut ongelmana aktiivimateriaalin irtoaminen virrankeräimestä, mutta nykyisin ongelma on vähentynyt. Puhuttiin ”exfoliation”-kulumistavasta, jossa aktiivinen materiaali repeytyi irti virrankeräimestä ja jäi epäaktiiviseksi materiaaliksi. Tärinä tai törmäys voisi mahdollisesti lisätä tällaista kulumista, mutta se ei suoraan vaikuta turvallisuuteen tai lisää paloris-kiä, vaan lähinnä kasvattaa resistanssia, jolloin kennon kapasiteetti laskee. (Heiska 2025.)

Myös separaattori on usein pinnoitettu keraamisella aineella, johon voi mekaanisen kuormituksen vaikutuksesta tulla vaurioita. Separattorin keraaminen pinnoitus on kuitenkin vain varotoimi, jonka on tarkoitus estää anodin ja katodin suora kontakti siinä tilanteessa, että varsinainen separaattorikalvo sulaa pois. Keraamisen pinnoituksen mekaaninen vaurio ei siis suoraan lisää akun paloris-kiä. (Vuorilehto 2026.)

3.2 Kemiaalliset muutokset

3.2.1 SEI-kerroksen muodostuminen ja hajoaminen

Anodin pinnalle muodostuu normaalisti akun elinkaaren alussa SEI-kerros. SEI-kerros paksuntuu käytön aikana, erityisesti korkeissa lämpötiloissa ja maksimijännitteen vaikutuksesta. Akun ikääntyminen ja kapasiteetin alenema johtuu yleensä mm. SEI-kerroksen paksuuntumisesta, koska se sitoo litiumioneja, jolloin niitä on käytettävissä energian varastointiin vähemmän. (Pan 2025.)

SEI-kerros itsessään ei aiheuta vaaraa, päinvastoin se suojaa anodia. Lämpötilan kohotessa yli käyttörajojen SEI-kerros alkaa kuitenkin hajota, mikä tuottaa lämpöä ja kaasuja, joka johtaa paineen nousuun ja voi pahimmassa tapauksessa aiheuttaa lämpöryntäyksen. (Heiska 2025.)

3.2.2 Elektrolyytin hajoaminen

Akun altistuessa vielä korkeammille lämpötiloille elektrolyytti voi alkaa hajota, eli kaasuuntua. Kaasu jää kennon sisään ja aiheuttaa kennoon painetta ja lämpöä (Heiska 2025). Elektrolyytti hajoaa mm. vetyfluoridiksi, joka veden kanssa reagoiessaan syttyy palamaan. Paineen kasvaessa riittävän korkeaksi kennon kuori voi repeytyä, jolloin syttymisherkkä kaasu purkaantuu hallitsemattomasti räjähtäen ja voi aiheuttaa tulipalon. Tätä varten kennoihin on usein rakennettu varojärjestelmä, esimerkiksi venttiili, jonka kautta paine ja kaasu voidaan vapauttaa hallitusti. Venttiilin laukeamisen jälkeen kennoa ei voi enää käyttää. Törmäyksen aiheuttamat voimat akkupaketin sisällä voivat puristaa kennoa kaasaan, jolloin kertynyt paine voi myös purkautua hallitsemattomasti. (Yan ym. 2025.)

Korkealla käynyt lämpötila voi pitkässä juoksussa vaikuttaa kennon elinikään, vaikka lämpötila pysyisikin turvallisella alueella, tai kennon lämpötila palautuisi nousun jälkeen normaaliksi (Heiska 2025). Haapala arvioi, että merkittävää ongelmaa aiheuttavia vaurioita voisi tapahtua jo kennon altistuessa 100–200 °C:n lämpötilalle (Haapala 2025). Anonyymi haastateltava arvioi kennon sisäisten vaurioiden voivan alkaa kehittyä lämpötilan ylittäessä 100 °C, kun vaikutusaika kasvaa esimerkiksi 15 minuuttiin, ja elektrolyytin alkavan reagoimaan 150–200 °C:n lämpötilassa (Anonyymi 2, 2025).

3.2.3 Litiumin kiteytyminen

Akkukonsultti Vuorilehto pitää litiumin kiteytymistä vaarallisimpana mekanismina, eikä olisi juuri huolissaan separaattori- tai elektrodimateriaalien mekaanisesta kestävyydestä. Grafiitissa anodimateriaalina on se ongelma, että litium voi saostua eli kiteytyä grafiitin pintaan. Anonyymi haastateltava ei ollut törmännyt

tähän ongelmaan piin tai grafiitin kanssa (Anonyymi 3, 2026). Normaalkäytössä litiumionit pääsevät siirtymään huokoisen elektrodimateriaalin sisään. Yliladatessa tai kylmissä olosuhteissa ladatessa litium voi jäädä elektrodin pinnalle ja alkaa muodostaa kerrostumaa, joka riittävän suureksi kasvaessaan puhkaisee separaattorin ja aiheuttaa oikosulun. Tilanteilla on vain 80 mV:n potentiaaliero, milloin litium menee grafiitin sisään ja milloin se jää metalliksi grafiitin pinnalle. Prosessi on peruuttamaton, mutta hidas, ja etenee tyypillisesti ladatessa akkua kylmissä olosuhteissa. Paksuuntuva eristävyyskerros voi edesauttaa litiumin kiteytymistä. (Vuorilehto 2026; Heiska 2025.)

Kiteytyminen näkyy akun kapasiteetissa, sillä käytettävissä olevia litiumioneja on vähemmän. Ikääntyneessä kennossa, joka kuivataan ja avataan, voi havaita grafiitin pinnalla valkoisia litiumkiteytyksiä jo 85 % SOH-iässä. Vuorilehto pitää 80 %:n rajaa erittäin hyvänä turvarajana. Alle 80 %:n SOH-arvolla kiteytyneitä litiumia on jo käytännössä aina, ja tulipaloriski kuivatussakin kennossa on huomattavasti suurempi. Vuorilehto tietää, että alle 80 % SOH-arvon kennoja avatessa pieniä tulipaloja joutuu sammutella paljon, koska metallinen litium syttyy palamaan todella herkästi reagoidessaan ilmankosteuden kanssa. (Vuorilehto 2026.)

3.3 Separattorin vauriot ja oikosulku

Vaurio, joka aiheuttaisi tuhoisan tulipalon törmäyksessä, on lähes varmasti oikosulku akkukennossa. Mikään muu törmäyksessä ei synnytä tarpeeksi lämpöä, että kenno voisi syttyä palamaan. (Heiska 2025.) Lähes kaikki haastateltavista olivat sitä mieltä, että separattorin vaurio on suurin riski, onhan se akkukennon tärkein turvakomponentti. Vauriot separattorissa voivat aiheuttaa pitkällä aikavälillä oikosulun, ja mikä tahansa mekaaninen mittojen muutos voi vaurioittaa sitä (Penttinen 2025; Anonyymi 2, 2025).

Separattorivaurion syynä voisi olla edellisessä luvussa mainittujen lisäksi esimerkiksi valmistusvaiheessa kennon sisälle jäänyt epäpuhtaus, kuten koneiden kulumisesta aiheutunut metallihiukkanen elektrodin pinnalla. Törmäyksessä epäpuhtaus painautuisi separattoriin ja puhkaisisi separattorikalvon kokonaan

tai osittain, aiheuttaen suoran tai pehmeän oikosulun. Kennon eliniän aikana paksunevat eristävyyskerrokset ja materiaalien hengittäminen ladattaessa ja purettaessa muodostavat kennoon painetta ja fyysistä liikettä, joka voi lisätä riskiä separaattorin puhkeamiselle. Pelkkä tärähdys ei kuitenkaan yksistään vaikuta separaattorin kestävyYTEEN tai rakenteeseen. (Vuorilehto 2026; Heiska 2025.)

Kennon syttymisherkkyys riippuu siitä, kuinka hyvin materiaalit johtavat sähköä. Katodilla alumiini virrankeräimenä johtaa erittäin hyvin. Aktiivimateriaalina NMC:ssä käytetty kobolttioksidi johtaa, mutta ei erityisen hyvin. Vertailun vuoksi LFP:ssä käytetty rautafosfaatti johtaa huonosti. Anodilla taas kupari virrankeräinmateriaalina johtaa erittäin hyvin ja aktiivimateriaalina grafiitti johtaa varsin hyvin. Jos ajatellaan, että LFP-akussa elektrodit, eli anodin rautafosfaatti ja katodin grafiitti, osuvat toisiinsa, oikosulku kyllä tulee ja virta kulkee, mutta koska materiaalit johtavat sähköä niin huonosti, kenno ei välttämättä edes syty palamaan. Jos taas esimerkiksi katodin alumiininen virrankeräin osuu anodin grafiittiin tai kupariseen virrankeräimeen, se johtaa niin hyvin, että sähkö purkautuu nopeasti kehittäen paljon lämpöä, mikä johtaa siihen, että mm. elektrolyytti syttyy palamaan. (Vuorilehto 2026.)

Oikosulku voisi muodostua myös anodin ja katodin kontaktista separaattorin ulkopuolella. Anonyymi haastateltava esittää lisäksi ajatuksen, että pussikenno voisi vaakasuuntaisesta törmäyksestä fysiikan lakien vaikutuksesta rypytyä sisäisesti ja separaattori murtua taitoskohdasta (Anonyymi 1, 2025). Heiskan mukaan kenno voisi kokea vaurion ja esimerkiksi hetkellisesti muuttaa muotoaan, mutta palautua siitä, jolloin vaurio ei näkyisi ulospäin (Heiska 2025). Vuorilehto kuitenkin arvioi, että kennot on pakattu niin tiiviisti, ettei edes kaasun kehittyessä kennon sisään pääsisi muodostumaan sellaista tyhjää tilaa, joka mahdollistaisi muodonmuutoksen. Muodostunut kaasu pakkautuisi Vuorilehdon mukaan kennon nurkkiin ja reunoihin, eikä siten kennon sisäisillä rakenteilla olisi tilaa liikahtaa. (Vuorilehto 2026.)

4 Sähköautopalot

Litiumioniakkujen viat voivat johtua useista tekijöistä, kuten valmistusvirheistä, huonosta suunnittelusta, ulkoisesta rasituksesta, epäonnistuneesta suojauksesta tai soveltumattomasta latausjärjestelmästä (Mikolajczak ym. 2011).

Yleensä ajoneuvon itsediagnostiikka havaitsee akun vikatilän ajoissa ja estää käytön, kunnes vika on korjattu. Joskus kuitenkin vikatilanne kehittyy ja etenee niin nopeasti tai huomaamatta, että yksi tai useampi kenno alkaa lämmetä ja lopulta syttyy palamaan. Akkupalo kehittyy nopeasti ja on yleensä vaikea sammuttaa. Turvallisuus ja luotettavuus muodostuvat siis monen tekijän summana. Tässä luvussa käsitellään sähköautokannan kehitystä Suomessa, ja ladattavien sähkö- ja hybridautojen osuutta palotilastoissa. Lisäksi tarkastellaan muutamia sattuneita sähköautopaloja ja niiden mahdollisia syttymissyitä keskittyen akkupaloihin.

4.1 Lämpöryntäys

Lämpöryntäyksellä tarkoitetaan eksotermistä tapahtumaa, jossa kenno lämpee hallitsemattomasti ja syttyy palamaan. Pahimmassa tapauksessa lämpeneminen aiheuttaa ketjureaktion, jossa lämpö siirtyy viereisiin kennoihin, johtaan myös niiden ylikuumentumiseen.

Lämpöryntäys voi johtua monesta syystä, esimerkiksi kennon ulkopuolisesta oikosulusta, jonka vuoksi kennon sisällä kulkee suuri virta, mikä tuottaa lämpöä. Normaalien elektrokemiallisten reaktioiden sijasta kennon sisällä alkaa tapahtua kemiallisia reaktioita, jotka tuottavat lisää lämpöä ja kaasuja, mikä lisää painetta kennon sisällä ja kiihdyttää kemiallisia reaktioita entisestään. Lämpö vapauttaa kennoon varastoitua energiaa, mikä vapauttaa lisää lämpöä. Lämpöä syntyy enemmän kuin sitä ehtii poistua, ja reaktio saavuttaa pisteen, jossa se ruokkii itse itseään. Kenno ajautuu kemiallisesti epästabiliin eksotermiseen tilaan, eli lämpöryntäämiseen, jota on vaikea hallita. (Heiska 2025; What is thermal runaway? 2021.)

Litiumioniakun käyttölämpötila kemiasta riippuen on purettaessa noin -20 – 60 °C ja ladattaessa 0 – 45 °C. Grafiittianodin itsestään lämpeneminen voi käynnistyä jo 70 – 90 °C:n lämpötilassa. Esimerkiksi yleisesti käytössä olevassa 18650-kennossa, joka on täyteen ladattu ja hyvin eristetty, lämpöryntäminen käynnistyy noin kahden päivän kuluessa itselämpenemislämpötilan saavuttamisesta. Mitä korkeampi lämpötila, sitä nopeammin lämpöryntäys käynnistyy. NMC-kemialla tyypillinen lämpöryntäyslämpötila on 210 °C. Vertailun vuoksi LFP-kemialla raja on 270 °C ja NCA:lla 150 °C. (BU-205: Types of Lithium-ion 2023; Mikolajczak ym. 2011.)

Reaktion edetessä jossain vaiheessa separaattori sulaa, mikä voi johtaa elektrodien suoraan kontaktiin aiheuttaen suuren sisäisen oikosulun, joka tuottaa jälleen suuren määrän lämpöä, ja kenno voi räjähtää kennon kuorirakenteen petäessä. Hallitummassa tapauksessa paineen kasvaessa kaasu vapautuu kennon venttiilin kautta tai kuorirakenteen heikoimmasta kohdasta. Kennosta purkautuu vaaleaa kaasua ja tummia raskasmetallipartikkeleita. Kyseessä on akkupalo, vaikka kenno ei palaisi liekillä. Muodostuneet kaasut, kuten vetyfluoridi, ovat erittäin myrkyllisiä ja paloherkkiä. Kaasujen kertyessä suljettuun tilaan voi muodostua ”pommi”, kuten tapahtui Lahden ID.Buzz:n tapauksessa, josta kerrotaan tarkemmin luvussa 4.3. (Heiska 2025; Wennberg 2025; What is thermal runaway? 2021.)

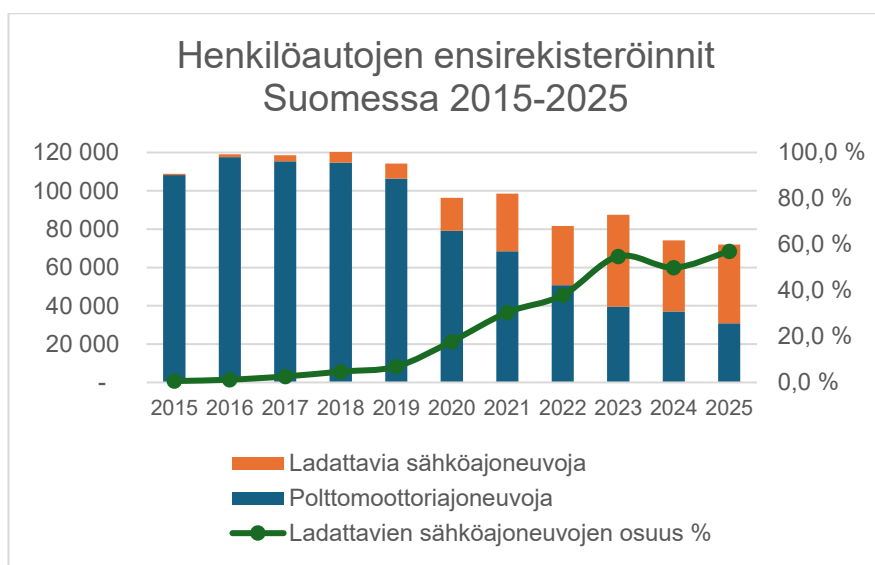
Joissain tapauksissa kaasu syttyy palamaan. Kaasu ei ole itsestään syttyvää, vaan se tarvitsee syttymisenergian lähteen ja riittävästi happea. Esimerkiksi NMC-kennon kuuma ulkokuori voi sytyttää kaasun. Joidenkin katodimateriaalien kemialliset reaktiot muodostavat itsessään pienen määrän happea, mutta se ei Mikolajczakin ym. mukaan ole litiumioniakun voimakkaan palamisen syy (Mikolajczak ym. 2011). Yksittäistä kennoa on syttymisen jälkeen enää vaikea, ellei mahdoton sammuttaa, mutta jäähdyttämällä voidaan ehkäistä palon etenemistä viereisiin kennoihin. Muut kennot akkupaketin sisällä kuitenkin aina vaurioituvat vapautuneesta kaasusta ja lämmöstä, mikä on syy siihen, että akku voi syttyä uudelleen. Lisäksi vesi akun sisällä voi aiheuttaa oikosulkuja ja uudelleensyttymisen. (Wennberg 2025.)

Lämpöryntäys voi johtua myös esimerkiksi mekaanisen vaurion aiheuttamasta akun sisäisestä oikosulusta, kuten luvussa 3 kuvattiin. Useimmiten akkupalot johtuvat kuitenkin väärinkäyttötilanteista tai valmistusvirheestä, tai näiden yhdistelmistä, joissa akkuun kohdistuu mekaaninen, sähköinen ja/tai lämpörasitus. Valmistajat määrittävät kennoille tietyn käyttöiikkunan, eli raja-arvot, joiden puitteissa kennoa on turvallista käyttää. Väärinkäyttötilanteissa kenno altistetaan näiden raja-arvojen ulkopuolelle, sellaisille olosuhteille, joihin sitä ei ole tarkoitettu. Rajan ylitys ei suoraan välttämättä aiheuta vaaraa, mutta kennon sisällä materiaalit voivat alkaa reagoida ja hajota, mikä tuottaa hajoamistuotteita, kaasuja ja samalla myös lämpöä, ja voi siten johtaa eri vaiheiden kautta lämpöryntäämiseen. (Heiska 2025.)

Ylilataaminen on yksi esimerkki väärinkäyttötilanteesta. Yliladattaessa katodi menettää liikaa litiumioneja ja systeemi romahtaa, mikä aiheuttaa lämpöryntäämistä. Tästä syystä erityisesti NMC-kemialla katodin tulee aina olla anodia suurempi. Samaa ongelmaa ei ole LFP-kemialla, jossa kaikki litiumionit pystytään ottamaan käyttöön ilman romahdusvaaraa. (Wennberg 2025; Vuorilehto 2025.)

4.2 Tilastot

Maailmassa oli vuoden 2024 alussa yksi auto 5–6 henkilöä kohden, eli yhteensä noin 1,475 biljoonaa henkilöautoa, joista noin 58 000 000 oli sähköautoja (Bonnici & Stevens 2024). Sähköautojen osuus koko autokannasta on kasvanut viime vuosina hurjasti. Suomessa ladattavia sähköajoneuvoja oli vuonna 2025 yli 350 000, mikä on noin 13 % kaikista henkilöautoista. Uusien autojen myynti on hiipunut viime vuosina, mutta sähkö- ja hybridautojen osuus uusista autoista on kasvanut 10 vuodessa merkittävästi, kuten nähdään kuvasta 4, jossa on esitetty henkilöautojen ensirekisteröintitilastoja Suomessa vuosina 2015–2025.



Kuva 4. Henkilöautojen ensirekisteröintijaottelu ladattavien sähköajoneuvojen ja polttomootoriautojen välillä Suomessa.

Kuvan 4 vihreä viivagraafi esittää ladattavien sähköajoneuvojen prosentuaalista osuutta ensirekisteröidyistä henkilöautoista Suomessa. Vielä vuonna 2015 sähköautojen osuus ensirekisteröidyistä henkilöautoista oli alle 1 %, kun vuonna 2025 osuus oli jo yli puolet. (Global Electric Vehicle Outlook 2025.)

Liikennevälinepalojen määrä Suomessa on pysynyt melko tasaisena ja on edelleen reilu 2000 vuosittain. Liikennevälinepaloihin luetaan kaikki tehtävät tielikenteestä ilmailuvälineisiin. Henkilöautopaloja kirjataan keskimäärin noin 1300 vuosittain. Lukema sisältää kaikki pelastuslaitokselle tulleet tehtävät, myös sellaiset, joissa varsinaista tulipaloa ei ole ollut, tai se on jo sammunut, kuten tapaukset, jossa lisälämmitin on savuttanut ja henkilö on soittanut hätänumeroon (Anonyymi 1, 2025). Palojen osuus koko Suomen henkilöautokannasta on hieman laskenut vuodesta 2015, jolloin se on ollut 0,052 %, vuoteen 2023, jolloin osuus oli 0,043 %, minkä jälkeen taas hieman nousut.

Taulukossa 2 on esitetty ladattavien sähkö- ja hybridi ajoneuvojen määrä ja palotilastoja Suomessa vuosina 2015–2025. Pelastuslaitoksen Pronto-rekisterin tietojen perusteella voitaisiin arvioida sähköajoneuvojen palojen määrää, mutta kirjaukset ovat osin hyvinkin puutteellisia. Liikennevälinepalojen kirjaustapa on muuttunut vuoden 2023 jälkeen, minkä vuoksi viime vuosien

henkilöautopaloista ei pystytä tutkijatunnuksilla erottelemaan kaikkia sähköauto-paloja eikä arvioimaan tarkkaa akkupalojen osuutta sähköautopaloista (Linja-aho 2023). Lisäksi ajoneuvoluokat on kirjattu epätarkasti, ja arvioksi palon aiheuttajasta on voitu kirjata ”Auton ajoakku tai sen laturi” vaikka kyseessä olisi tavanomainen polttomoottoriauto, jossa ei ole lainkaan ajoakkuja. Ajoneuvon käyttövoima on usein kirjaamatta, tai kirjattu epätarkasti, kuten hybridiajoneu-ville ainoastaan ”benssiini”. Ajoneuvon merkki ja malli on kirjattu vain harvoin, ja tarkemmat tiedot, kuten tarkempi syttymissyyn kuvaus, kuvaus onnettomuusti-lanteen kehittymisestä, jälkivartiointi ja selvitys pelastuslaitoksen toiminnasta ovat salattuja tietoja, kuten myös rekisteritunnus ja alkuperäisen ilmoituksen si-sältö. Näin ollen luvut vuosien 2024–2025 sähköautopaloista ovat epätarkkoja arvioita saatavilla olevien tietojen pohjalta.

Taulukko 2. Tilastot ladattavien sähkö- ja hybridiajoneuvojen paloista 2015–2025.

	Ladattavien sähkö- ja hybridi-autojen määrä Suomessa (kpl)	Ladattavien sähköajo-neuvojen pa-lot (kpl)	Osuus kai-kista henkilö-autopaloista (%)	Akkupalot, tai mahdolli-set akkupa-lot (kpl)
2015	1631	1	0,074 %	1
2016	3281	2	0,15 %	1
2017	7168	0	0,00 %	0
2018	15499	3	0,22 %	2
2019	29364	3	0,23 %	2
2020	55318	4	0,31 %	3
2021	99911	6	0,47 %	2
2022	148928	5	0,41 %	3
2023	218867	17	1,45 %	10
2024	285145	12*	0,93 %*	7*
2025	351743	13*	1,04 %*	11*

*Luvut epätarkkoja, kirjaustapa muuttunut.

Linja-ahon selvityksen mukaan vuosina 2015–2022 todellisia sähköautopaloja on sattunut vain muutamia vuosittain. Kuten taulukosta 2 havaitaan, vuonna 2023 todellisia sähkökäyttöisten henkilöajoneuvojen paloja kirjattiin ennätysmäärä, jopa 17 kappaletta, mikä on 1,45 % kaikista henkilöautopaloista. Viime vuosien ladattavien sähköautojen osuuden kasvu kaikista henkilöautopaloista kulkee hyvin linjassa sähköajoneuvokannan kasvun kanssa. Ladattavien sähköajoneuvojen palojen osuus kaikista henkilöautopaloista on kirjoitushetkellä noin prosentoin luokkaa. (Liukkonen & Lopenen 2025; Liukkonen & Lopenen 2023; Ketola & Kokki 2019; Linja-aho 2023.)

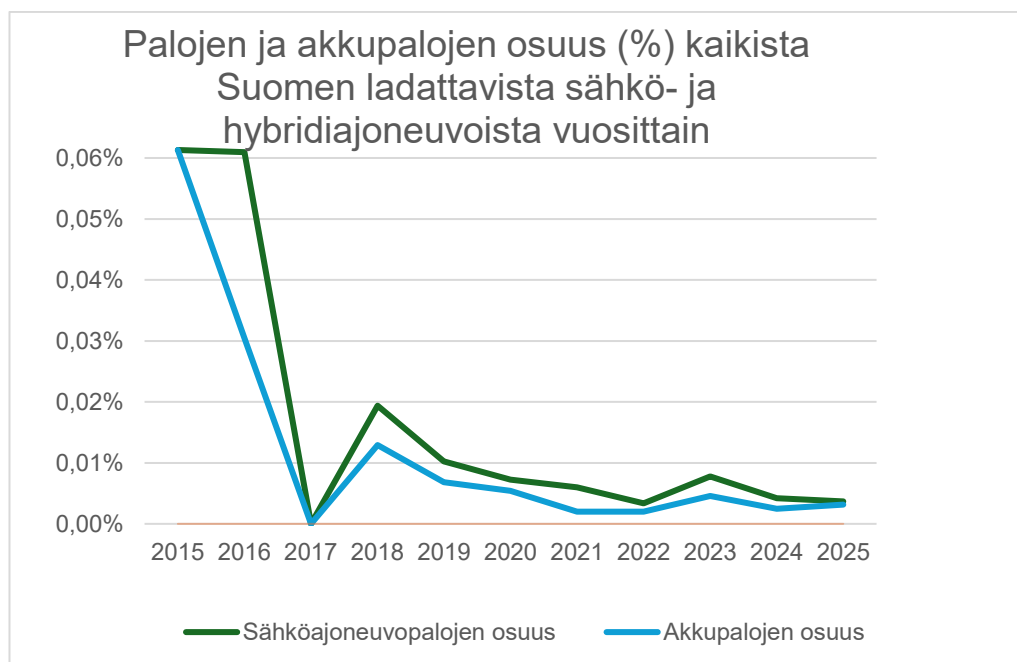
Pronto-rekisterin tiedoista selviää, että sähköajoneuvopaloja on sattunut hieman enemmän kuin mediaan on nostettu. Keski-Korpelan mukaan vuonna 2025 ennen suurta Tampereen parkkihallipaloa olisi sattunut neljä sähköauton ja viisi hybridiauton tulipaloa, mikä on yhtenevä Pronto-rekisteristä saatujen tietojen kanssa (Keski-Korpela 2025). Loppuvuonna sattui vielä muutama tapaus lisää, ja kokonaismääräksi arvioidaan 13 todellista ladattavan sähköajoneuvon paloa vuonna 2025, joista akkupalon mahdollisuus oli 11 tapauksessa, tai ainakaan merkittävästi suurempaa määrää ei ole saatujen tietojen perusteella syytä epäillä. Hybridiautopalojen määrä voi edelleen olla todellisuudessa suurempi. (Pelastustehtävät onnettomuusselosteen mukaan 2026.)

Ensimmäiset sähköajoneuvot alkavat vasta saavuttaa 10 vuoden ikää ja saapuvat elinkaarensa loppuvaiheeseen jopa vasta tulevina vuosina. Vuoden 2025 tason suuret sähköajoneuvomäärät ikääntyvät vasta 2030–2040 luvulla, joten todellista historiallista tilastoa ikääntyneiden ajoneuvojen osuudesta sähköautoiloissa ei ole vielä saatavilla.

Taulukossa 2 esitettiin sähköajoneuvopalot ja akkupalat kappalemäärinä kaiken kaikkiaan. Kuva 5 esittää ladattavien sähköajoneuvojen palojen ja akkupalojen prosentuaalista osuutta sinä vuonna liikenteessä olleista kaikista ladattavista sähköajoneuvoista.

Vuonna 2015 ladattavia sähköajoneuvoja oli Suomessa vasta 1631 kappaletta (Taulukko 2), joista 0,06 % eli yksi syttyi palamaan (kuva 5). Mitattaessa paloja

kokonaislukuna harvinaisetkin tapaukset aiheuttavat pienissä määrissä huomattavaa hajontaa graafille, joka kuitenkin tasaantuu autokannan kasvun myötä, kuten kuvasta 5 nähdään.



Kuva 5. Palojen osuus sähkö- ja hybridi ajoneuvokannasta Suomessa 2015–2025.

Akkupaloja, tai sellaisia sähköajoneuvopaloja, joissa palo on voinut lähteä ajoakusta, tai sen osallisuutta palossa ei ole voitu poissulkea, oli 10 kappaletta vuonna 2023. Vaikka määrä tuntuu suurelta verrattuna aiempiin vuosiin, se on kuitenkin vain 0,0046 % kaikista sinä vuonna liikenteessä olleista ladattavista sähköajoneuvoista. Tämän työn kannalta on tärkeää huomioida, että lukuihin sisältyvät myös tapaukset, joissa palon syynä on voinut olla valmistusvirhe tai ulkoisen esineen tunkeutuminen akkuun. (Liukkonen & Loponen 2025; Liukkonen & Loponen 2023; Ketola & Kokki 2019; Linja-aho 2023.)

Sähköajoneuvojen palot ovat siis erittäin harvinaisia. Vaikka kirjaukset ovat epä-tarkkoja ja luvut arvioita, suhteutus sähköajoneuvojen kasvavaan määrään käy kuitenkin ilmi, eikä ole viitteitä siitä, että palojen määrä olisi merkittävästi kasvussa. Päinvastoin sähköajoneuvojen osuus paloista näyttäisi olevan laskusuunnassa, ja pysynyt viime vuosina reilusti alle 0,01 %:ssa (kuva 5). Lisäksi on

huomattava, että akkupalojen osuus on arvioitu yläkanttiin lukien mukaan tapaukset, joissa palon syytä ei ole voitu määrittää. Kaikissa näistä tapauksista akku ei välttämättä ole ollut lainkaan osallisena paloon.

Anonyymin haastateltavan tiedossa olleista akkulähtöisistä paloista kaikki olivat sattuneet uudehkolle, alle kolmevuotiaalle ajoneuvolle, jonka historiassa ei tietävästi ollut kolarikorjauksia (Anonyymi 2, 2025). Tilastollisesti ei pystytty selvittämään kemian tai kennotyyppin merkitystä paloissa. Haastateltavat olivat kuitenkin yhtä mieltä siitä, että teoreettisesti NMC-kemia on herkempi ja vaarallisempi kuin LFP-kemia, ja että pussikenno on kennotyypeistä alttiimpi vaurioille, kun taas sylinterikenno on kaikista kestävin.

Anonyymi haastateltava esittää törmäyksen aiheuttaman mahdollisen paloriskin kasvun vaikutusta tilastollisesti. On huomattava, että todennäköisyyttä on mahdoton arvioida tarkasti puutteellisten tietojen vuoksi, mutta jos ajatellaan, että kirjoitushetkellä akkupalon todennäköisyys on arviolta noin 1:100 000 vuodessa. Eli yksi akku sadastatuhannesta sähköajoneuvosta syttyisi palamaan vuositasolla. Jos paloriski kaksinkertaistuisi, se tarkoittaisi kokonaisuudessaan noin seitsemää autoa vuoden 2025 tasolla. Eli kysymys on siitä, onko esimerkiksi riskin tuplaantuminen merkittävä riskin lisäys, jos verrataan siihen, kuinka paljon käyttökelpoisia akkuja päätyy murskattavaksi vain varmuuden vuoksi. Todennäköisesti on kalliimpaa heittää pois kaikki lievästi kolaroidut akut kuin sallia yksi mahdollinen tulipalo, kun ei edes tiedetä, mitä riskille todellisuudessa tapahtuu. Yhtä lailla terveysalalla sallitaan haitallisten aineiden käyttöä, kun kyse on harvinaisista haittavaikutuksista. Silloin, kun dataa ei ole saatavilla, on pakko arvata, kunnes todellista dataa on saatavilla. Jopa ydinvoimateollisuudessa joudutaan joskus arvaamaan, kun todellinen tieto puuttuu. Olennaista on kirjoittaa auki, mihin arvio perustuu. (Anonyymi 1, 2025.)

4.3 Sattuneita sähköautopaloja

Media on nostanut sähköajoneuvopaloja herkästi esille. Hybridiautoissa palo kuitenkin syttyy useimmiten polttomoottoripuolella, ja täyssähköautoja palaa erittäin harvoin. Silloinkin, kun palo lähtee korkeajännitepuolelta, syynä on

harvoin akku. Tässä työssä käsitellään törmäyksen akkuun aiheuttamia mahdollisia vaurioita, joten kiinnostavimpia ovat tapaukset, joissa palo on lähtenyt akusta. Tässä luvussa on nostettu tarkasteltavaksi niitä tapauksia, joissa akku on voinut olla osallisena paloon, vieläpä ilman, että palo olisi syttynyt välittömästi kolarin seurauksena.

4.3.1 Tesla

Selvityksessä tuli esille Suomesta yksi tapaus, jossa Tesla oli palanut. Palo sattui Model 3:lle Loimaalla vuonna 2024. Akun lämpötilaa seurattiin lämpökameralla, mutta akku ei syttynyt palamaan tilanteessa, eikä jälkiseurannan aikana. (Pelastustehtävät onnettomuusselosteen mukaan 2026.)

Maailmalla tunnetaan joitakin tapauksia, joissa Tesla on syttynyt palamaan. Esimerkiksi Texasissa vuoden 2015 Tesla Model S syttyi palamaan kesken ajon. Kuljettaja oli kuullut kovia paukahduksia ja pysäyttänyt tien sivuun. Kuvien perusteella auto oli palanut oikean eturenkaan takaa ja vaurioittanut myös tien reunakivetystä. Syttymissy ei selvinnyt, mutta vaikuttaisi akkupalolta, sillä liekit näkyivät auton alla. Teslan long range malleissa käytetään NCA- tai NMC-kemialla sylinterikennoilla, mutta perusversiossa on LFP-kemia, yleensä CATL:n prismaattisilla kennoilla (Vuorilehto 2026; CD-24-16-001, 2024). Vanhemmassa Model S:ssä on Panasonicin 18650 sylinterikennot NCA-kemialla (Tesla Model S). Vuonna 2022 toinen Tesla Model S syttyi palamaan Kaliforniassa kolme viikkoa kolarin jälkeen. Tapauksesta on vain vähän tietoa julkisesti saatavilla. (Ruffo 2020; Lowery 2022.)

4.3.2 Mercedes-Benz

Lahden mukaan Veho Oy on ollut mukana tutkinnassa kolmessa sähkö- tai hybridiajoneuvon palotapauksessa, joista yhdessäkään ei pystytty osoittamaan, että palo olisi lähtenyt korkeajännitekomponentista. Kahdessa tapauksista palon syyksi epäiltiin muuta komponenttia tai järjestelmää, ja yhdessä syy jäi tuntemattomaksi. Tuntemattomaksi jääneessä tapauksessa ajoneuvo oli kiinni

laturissa, mutta lataus oli jo päättynyt. Mercedes-Benzissä yleisin akkukemia on NMC. (Lahti 2025.)

Linja-ahon selvityksen mukaan vuonna 2023 sattui viisi tapausta, joissa Mercedes-Benz syttyi palamaan. Yksi tapauksista sattui Kouvolassa 2023. Palossa tuhoutui navettarakennus, kaksi autoa ja suuri määrä muuta omaisuutta. Selkeää kohtaa, mistä palo oli alkanut, ei pystytty määrittämään, mutta ensimmäisenä paloi se pääty rakennuksesta, jossa sähköauto oli ollut latauksessa. Savukaasut kerääntyivät nopeasti vintille ja ”räjähtivät”, minkä jälkeen koko navetta oli ilmiliekeissä. Kyseessä oli Teslan tekniikkaa hyödyntävä Mercedes-Benz B-sarjan 250e-täyssähköauto vuosimallia 2015 tai 2016. Auto oli tuotu Saksasta noin 1,5 vuotta aiemmin n. 22 tkm ajettuna. Ensimmäiset huollot ja katsastukset Suomessa olivat vasta edessä, sillä ajokilometrejä oli kertynyt kokonaisuudessaan vasta noin 44 tuhatta. Tietojen mukaan autolla ei ollut korjaamokäyntejä, pohjakosketuksia tai muuta kolarihistoriaa. Auto oli syttymishetkellä latauksessa, muttei pystytty osoittamaan, oliko lataus keskeytynyt palon seurauksena, vai ennen sitä. Palon syyksi epäiltiin oikosulkua, joka oli voinut lähteä laturista, latausasemasta, tai sähkökaapista, mutta akkuakaan ei voitu poissulkea, sillä autosta ei jäänyt mitään jäljelle. (Linja-aho 2023; Anonyymi 4, 2026.)

4.3.3 Volvo

Lappeenrannassa paloi kesäkuussa 2025 vuosimallin 2019 Volvo XC60 T8 -hybridiauto. Auto oli syttynyt palamaan kesken ajon vetäessään peräkärriä, muttei ole tiedossa, lähtikö palo moottoritilasta vai korkeajännitejärjestelmästä. Palo eteni nopeasti, ja pelastuslaitos upotti auton sammutuskonttiin. Artikkelikuvan mukaan renkaat olivat palaneet, mikä viittaa akkupaloon, sillä akkupalossa liekit tulevat yleensä auton alta. (Grekula 2025; Pelastustehtävät onnettomuusselosteen mukaan 2026; Wennberg 2025.) Volvon akuissa käytetään NMC-kemialla pidemmän käyttömatkan (long range) ja korkeamman suorituskyvyn mallissa, mutta LFP-kemialla perusmallissa (Volvo - sähköauton akut).

Helmikuussa 2025 Volvo XC90 -hybridiauto syttyi palamaan kesken ajon Helsingissä, mutta palo vaikuttaisi lähteneen moottoritilasta, eikä akun osallisuutta

paloon ole syytä epäillä (Takala 2025). Marraskuussa Loimaalla sen sijaan Volvo XC90 hybridauto syttyi palamaan parkissa ollessaan. Auto oli vain kolmen metrin päässä suuresta hallirakennuksesta, mutta ei ole tiedossa, oliko auto latauksessa tai kaapeli kytkettynä. Pelastuslaitoksen kirjausten mukaan palon syttymiskohta oli hybridauton akustopalo, mutta tarkempia tietoja alkupe- räisestä syttymissyystä ei ole tiedossa. XC90- ja XC60-hybridautossa ka- peahko korkeajänniteakku on sijoitettu auton keskelle kardaanitunneliin. (Heik- kilä 2024; Pelastustehtävät onnettomuusselosteen mukaan 2026.)

Volvo V60 plug-in-hybridi syttyi palamaan Jyväskylässä maaliskuussa 2024. Auto oli syttynyt kesken ajon. Ensimmäiset liekit havaittiin Perämäen mukaan auton pohjassa, mutta muita olosuhdetietoja ei ole tiedossa. Artikkelikuvassa näyttäisi kuitenkin olevan vanhempi 2012–2018 vuosimallin V60, jossa akku on auton takaosassa, joten saatujen tietojen valossa ei varmuudella voida sanoa, lähtikö palo ajoakusta (Anonyymi 5, 2026). Palo saatiin sammutettua, mutta pe- lastuslaitos nosti auton tyhjään sammutuskonttiin tarkkailtavaksi uudelleensyty- misen varalta. Tapauksessa havaittiin, että auton akut olivat sulaneet täysin ja valuneet osittain palopaikalle. Auton lämpötilaa seurattiin paloaseman pihalla pari päivää, jonka jälkeen se luovutettiin omistajan huolehdittavaksi. Lisäksi Hel- singissä syttyi yllättäen parkissa olleen Volvo S60:n akku toukokuussa 2023, mutta tapauksesta ei ole tarkempia tietoja. (Perämäki 2024; Pelastustehtävät onnettomuusselosteen mukaan 2026; Linja-aho 2023.)

4.3.4 Volkswagen & Audi

Vuonna 2025 sattui Keravalla mittavat vahingot aiheuttanut palovahinko. Kera- van Prisman parkkihallissa paloi latauksessa ollut kaksi vuotta vanha Volkswa- gen ID.7 -täyssähköauto. Kuljettaja oli jättänyt auton lataukseen kaupassa käynnin ajaksi. Noin 20 minuutin kuluttua kuljettaja oli palannut autolle ja jäänyt sisälle istumaan ja odottamaan, että auto lataisi vielä hetken. Hetken kuluttua auto oli alkanut täristä kovaa ja sitten savuttaa. Kuljettaja nousi autosta, jonka jälkeen se oli ”räjähtänyt”. Liekit tulivat auton alta ja osuivat parkkihallin kattoon asti. Tiedetään, että palo lähti akusta, mutta syy on epävarma. Ennen paloa auto oli käyttäytynyt normaalisti. (Okko 2025; Anonyymi 1, 2025.)

Pari päivää aiemmin Tampereella oli sattunut samankaltainen tapaus, kun ladatava Audi Q7 -hybridiauto oli syttynyt palamaan ohjelmistotalon parkkihallissa. Auto oli savuttanut ilman liekkiä parkkihallissa jonkin aikaa, eikä kukaan ymmärtänyt kyseessä olevan sähköajoneuvon akkupalo. Auto oli noin kaksi vuotta vanha leasingauto, ja sillä oli tiettävästi puhdas historia ilman kolareita. Lataus oli käynnissä ja akku oli lähes täysi syttymishetkellä. Syttymissyö oli akun sisäinen tekninen vika. (Rajaharju 2025; Wennberg 2025.)

Samana vuonna syttyi Oulussa Audi e-Tron -täyssähköauto ja Helsingissä Volkswagen ID.4, joka oli MEB-alustainen täyssähköauto. Audi e-Tron oli tiettävästi latauksessa tai ainakin latauskaapeli kytkettynä. Tapauksesta tai syttymissyöystä ei ole tarkempia tietoja. ID.4 syttyi räjähdysmäisesti ollessaan itseksien pysäköitynä rivitalon päädyssä. Sekä asukas että sivulliset olivat kuulleet kovan pamahduksen ennen näkyviä liekkejä. Palo ehti levitä rakennukseen ja aiheuttaa savuvahinkoja huoneistoon. Palo sattui aamulla, eikä ole tiedossa, että auto olisi ollut latauksessa. Syttymissyö ID.4:n tapauksessa ei ole tiedossa, mutta todennäköisesti palo lähti akusta. (Jussila 2025; Pelastustehtävät onnettomuus-selosteen mukaan 2026.)

MEB-alustaisissa sähköautoissa on käytössä useampia erilaisia versioita akku-moduuleista. Moduulissa voi olla esimerkiksi CATL:n valmistamia prismaattisia kennoja tai LG Chemin valmistamia pussikennoja. Moduulin sisällä on kaksi lämpöanturia ja akkukemia on yleensä NMC. (Ylikoski 2025.)

Vuonna 2024 paloi Kauhajoella Volkswagen Touareg -hybridiauto. Palo syttyi marraskuisena aamuna ajoneuvon ollessa parkissa katoksessa. Palo lähti auton takaosasta ja tiedetään, että kyseessä oli akkupalo. Akustoa jäähdytettiin ja ajoneuvo nostettiin metallikonttiin siltä varalta, että se syttyy uudelleen. Tarkempi syttymissyö, tai auton historia ei ole tiedossa. (Niemistö 2024; Pelastustehtävät onnettomuus-selosteen mukaan 2026.) Volkswagen on valmistanut Touareg-hybridimallia vuodesta 2010. Touaregissa korkeajänniteakku on auton takaosassa varapyöräkotelon paikalla. Vasta vuosimallista 2020 eteenpäin Touaregissa on käytetty litiumioniakkua. Vanhemmissa malleissa oli nikkeli-metallihydridiakku. (Braun 2010; rds_vwv_536_002_de 2020.)

Kesäkuussa 2023 Lahdessa pysäköintihallissa ”räjähti” Volkswagen ID.Buzz tila-auto. Yhteiskäyttöautona ollut melko uusi, arviolta alle 50 tkm ajettu ID.Buzz oli ollut pysäköitynä hallissa, latauskaapeli kytkettynä ja akku täyteen ladattuna. Akun kansi oli teknisen vian seurauksena sulanut yhden akkumoduulin alueelta. Akkupalon savukaasut olivat päässeet rikkoutuneen muovitulpan kautta matkustamoon, mihin kerryttyään ne syttyivät mahdollisesti releen aktivoitumisesta muodostuneesta kipinästä. Kaasun syttyminen suljetussa tilassa aiheutti räjähdysmäisen paineaallon, joka pullautti mm. auton ovirakenteita ulospäin. Kaasuseoksen palaminen aiheutti sprinklerijärjestelmän aktivoitumisen, mutta auto ei muuten syttynyt palamaan. Pelastuslaitos toimitti auton muutamaa päivää myöhemmin merkkiliikkeen pihaan, jossa se syttyi palamaan kesken tutkinnan. Palokunta sammutti palon ja nosti auton useammaksi päiväksi sammutuskonttiin akun varauksen purkamiseksi. Valmistajan mukaan viitteitä suunnittelu- tai valmistusvirheestä ei löydetty, joten tuotteen todettiin olleen tyyppihyväksynnän mukainen. Palo oli aiheutunut todennäköisesti kennoviasta. Anonyymi haastateltava epäilee kennossa olleen reaktion käynnissä parkkihallista lähtien. Virallisen tiedotteen mukaan myöhempi syttyminen liikkeen pihalla johtui akun sisälle päässeestä sprinklerijärjestelmän vedestä. (Anonyymi 1, 2025; Anonyymi 2, 2025; Wennberg 2025; Linja-aho 2023.)

4.3.5 Hyundai

Kuopiossa maaliskuussa 2025 Hyundai IONIQ -sähköauto syttyi palamaan kesken ajon. Kuljettajan mukaan takapenkki oli käytännössä räjähtänyt. Ajoakku sijaitsee autossa takapenkin alla. Paloa oli yritetty sammuttaa lumella ennen palokunnan saapumista, mutta se ei ollut auttanut. Auto oli palanut kokonaan. Pelastuslaitoksen kirjausten mukaan vettä oli käytetty vain noin 1 m³, mikä viittaa siihen, että auto oli joko käytännössä jo palanut pelastuslaitoksen saapuessa, tai sen oli annettu palaa hallitusti loppuun. Auto oli vuosimallia 2019, sen takuu oli juuri päättynyt, ja mittarilukema oli tapahtumahetkellä noin 75 tkm. (Erämaa 2025; Pelastustehtävät onnettomuusselosteen mukaan 2026.) Vanhemmissa Hyundai IONIQ-malleissa on käytetty LG Chemin pussikenoja. (SK On won Best of Innovation at CES 2023 Innovation Awards 2022.)

Hyundai Kona -täyssähköauto syttyi tuleen maaliskuussa 2019. Auto oli ollut autoliikkeen pihassa latauksessa, kun puoli kuuden aikaan aamulla vartija oli havainnut auton alta nousevan savua, ja sen jälkeen liekkejä. Palokunta oli sammuttanut palon ja jäähdytellyt autoa jonkin aikaa. Auto oli siirretty aukealle asfalttialueelle, jossa mahdollinen uudelleensyttyminen ei aiheuttaisi vaaraa muulle omaisuudelle. Palokunnan poistuttua auto oli syttynyt uudelleen räjähdysmäisesti. Tapauksessa palon oli arvioitu johtuneen akun lämpöryntäyksestä, mihin viittaa myös se, että palo oli syttynyt useasti uudelleen sammutusyrityksistä huolimatta. (Ala-Lipasti 2021; Uotila 2019.) Konassa on NMC622-akkukemialia LG Chemin pussikennoilla (LG Chem E63B, 2022; Wennberg 2025).

4.3.6 Yksittäinen akkumoduuli

Tiedetään yksi tapaus, jossa vikaantuneesta ajoneuvosta eristysvirheen vuoksi purettu akkumoduuli on alkanut lämpenemään turvallisuusluokittelun jälkeen itseksensä. Akku oli luokiteltu todennäköisesti vaarattomaksi, jonka jälkeen siitä purettiin akkumoduuli vaihdettavaksi. Jälkiseurannassa akkumoduulin oli havaittu olevan lämmin, minkä jälkeen se oli kuitenkin jäähtynyt takaisin normaali- lämpötilaan. Moduuli oli päällisin puolin täysin virheettömän näköinen, eikä sille ollut tehty latausta tai muita toimenpiteitä. (Anonyymi 2, 2025.)

Ensimmäisestä luokittelusta lämpenemisen havaitsemiseen oli arviolta kulunut ainakin päivä. Reaktio oli mahdollisesti ollut käynnissä niin mitättömänä, ettei sitä ollut havaittu ensimmäisessä luokittelussa, tai sitten se oli käynnistynyt vasta luokittelun jälkeen. Lämpenemisen syystä ei kuitenkaan ole sen tarkempia tietoja. Moduuli jäähtyi itseksensä jonkin huipun saavutettuaan, eikä siten aiheuttanut tulipaloa tai vaaratilannetta. (Anonyymi 2, 2025.)

4.4 Sähköautopalon syttymissyöt

Haastatteluissa oltiin lähes yksimielisiä siitä, että ajoakku on harvemmin sähköautopalon syynä. Heiska arvioi tehoelektroniikan olevan yleisin syy sähköajoneuvopaloissa, jos poissuljetaan polttomoottorilähtöiset palot (Heiska 2025).

Tässä työssä keskitytään kuitenkin ajoakkuihin ja tarkastellaan niiden muutamia syttymissyitä.

Akkukennojen syttyminen on niin harvinainen vika, ettei sitä ole mahdollista tutkia olemassa olevan datan perusteella. Valitettavan usein akut myös palavat sellaiseen kuntoon, että on mahdotonta selvittää palon syttymissyitä. Yksi ongelma on siinä, että kun kotelo on alumiinia, se sulaa palossa nopeasti, jolloin ei voida sanoa, oliko siinä kohtaa esimerkiksi jokin kolhu, joka olisi voinut aiheuttaa palon (Wennberg 2025). Tarvittaisiin siis tarkempia taustatietoja, auton käyttö- ja historiatietoja, kuten esimerkiksi kuvat ja tiedot aiemmista osumista. Syttymissyyn selvittäminen yleensäkin on kallista. On käytännössä mahdoton tietää, onko jokin kuumenemis- tai oikosulkujälki tullut palon seurauksena vai onko palo lähtenyt siitä, eikä syytä yleensä ole edes tarvetta selvittää sen tarkemmin. (Anonyymi 1, 2025; Rajaharju 2025.)

Lataus- ja väärinkäyttötilanteet

Sähköauto sytty yleensä latauksessa, mutta on huomioitava, että latauksella ei välttämättä ole osuutta palon syttymiseen. Sähköauto viettää suurimman osan elinajastaan latauksessa, mikä voi selittää sen, että palo sytty todennäköisimmin auton ollessa latauksessa. Lataus voi olla jo päättynyt, kun palo alkaa. Ei ole tiedossa kuinka paljon lataaminen mahdollisesti lisää syttymisriskiä. (Anonyymi 1, 2025.)

Ajossa palo lähtee harvemmin, koska purkuvirrat eivät ole yhtä voimakkaita kuin lataustilanteessa. Lataustilanteessa akkuun varataan pitkäjaksoisesti suuria virtoja, eli suuria energiamääriä, jolloin jäähdytys on Lahden mukaan kriittisessä roolissa. Jos jäähdytysjärjestelmä vaurioituu törmäystilanteessa, riski lämpötilan nousulle ja lämpöryntäykselle kasvaa. (Lahti 2025.) Latauksessa syttyminen voisi liittyä myös akkukennon hengittämiseen. Akkukenno paisuu ladattaessa, mikä voi aiheuttaa sen, että kennon sisällä oleva epäpuhtaus puhkaisee erotinkalvon, jolloin kenno menee oikosulkuun ja syttyy. (Anonyymi 1, 2025.)

Penttinen arvioi, että myös korjaustöiden yhteydessä esimerkiksi liitoksiin päässeet epäpuhtaudet, kuten sormista jäänyt rasva, voisivat aiheuttaa palon akun sisällä. Epäpuhtaus liitoksissa lisää resistanssia, mikä tuottaa ylimääräistä lämpöä, joka siirtyessään kennoihin aiheuttaisi pahimmillaan lämpöryntäyksen. (Penttinen 2025.)

Yleensä akkujen vikaantuminen liittyy pääasiassa valmistusvirheisiin tai hienovaraisiin väärinkäytöksiin, jonka seurauksena kennojen piilevät viat kehittyvät ja johtavat lopulta lämpöryntäämiseen (Mikolajczak ym. 2011). Akunhallintajärjestelmä eli BMS on kehitetty suojaamaan akkua väärinkäyttötilanteilta ja käynnistämään toimenpiteitä, kun akun toiminnassa havaitaan poikkeamia. BMS voi esimerkiksi rajoittaa latausta tai aloittaa kennojen tasapainottamisen jänniteerojen kasvaessa liian suureksi. BMS myös ohjaa akun jäähdytystä ja lämmitystä pitääkseen kennojen käyttöolosuhteet mahdollisimman optimaalisina. Jos BMS ei pysty seuraamaan ja ohjaamaan akun tilaa riittävän tarkasti, tai sen suorittamat toimenpiteet syystä tai toisesta epäonnistuvat, on vaarana yksittäisen tai useamman kennon käyttörajojen ylittyminen ja pahimmassa tapauksessa lämpöryntäys. Tällainen väärinkäyttötilanne voisi olla esimerkiksi lataustilanne, jossa akunhallinnan kennojännitevalvonnan pettäessä yksittäistä kennoa varattaisi liikaa, jolloin litiumionikkeno voisi lähteä lämpöryntäämään helpostikin (Penttinen 2025).

Kolaritilanteet

Jaakkola mainitsee latauksen lisäksi kolaritilanteet, mutta painottaa, että akun täytyy olla fyysisesti vaurioitunut, esimerkiksi tilanteessa, jossa metallia on tunkeutunut kennojen läpi (Jaakkola 2025). Maailmalta tunnetaan kuitenkin myös tapauksia, jossa kolarissa olleen auton akku on ollut näennäisesti kunnossa, mutta syttynyt jälkeinpäin evakuointipaikalla. Wennberg pitää muodonmuutoksen kärsineitä akkuja vaarallisina ja varautuu sellaisissa tilanteissa aina uudelleensyttymismahdollisuuteen. (Wennberg 2025.)

Valmistusvirheet

Audi julkaisi syksyllä takaisinkutsukampanjan, jossa ajoneuvoon asennetaan ohjelmisto jatkuvaa diagnoosia varten yksittäisissä akkumoduuleissa havaittujen teknisten parametrien poikkeamien vuoksi. Vian kerrotaan voivan aiheuttaa tulipalovaaran, eikä akkua saa ladata ulkoisesta lähteestä ennen korjausta 24.10.2025 alkaen. Kampanja koskee yhteensä n. 975 ajoneuvoa. Joulukuussa 2024 julkaistiin jo vastaavanlainen kampanja, jossa viallisia moduuleita vaihdettiin uusiin. (Takaisinkutsu: Audi A6, A7, Q5, 2025.) Lisäksi Audilla on vuonna 2024 julkaistu takaisinkutsukampanja, joka koskee n. 190 e-Tron-mallin ajoneuvoa. Akkumoduuleja tulee tarkistaa ja tarvittaessa vaihtaa uusiin tietyissä olosuhteissa esiintyvien mahdollisten lataus- ja purkautumistavan teknisten poikkeamien vuoksi, jonka vuoksi akku saattaa ylikuumentua. (Takaisinkutsu: Audi e-Tron 2024.)

Myös Volvolla on useita hybridimalleja, kuten 2020–2022 vuosimallin V60, S60, XC60 ja XC90, koskeva kampanja, jossa korkeajänniteakku tarkastetaan epäilyl palovaaraa aiheuttavan valmistusvirheen vuoksi. (Takaisinkutsu: Volvo V60, 2025). Samoin Mercedes-Benz kutsui vuonna 2025 EQA- ja EQB-malleja ohjelmistopäivitykseen mahdollisen korkeajänniteakun ongelman vuoksi (Mikkonen 2025).

Anonyymin haastateltavan mukaan korjaamalla vaihdetaan erään valmistajan toimesta akkuun moduuleja, joita ei voida korjaamon laitteistolla havaita viallisiksi. Kyseiset ajoneuvot ovat noin nelivuotiaita. Vaihdeettavat moduulit havaitaan itsediagnostiikan toiminnolla, joka ilmoittaa mitkä moduulit tulee vaihtaa. Toisessa tapauksessa mitta-arvoja pyöritetään Excelissä virheen löytämiseksi. Ei ole tiedossa tarkempaa syytä, miksi moduulit vaihdetaan tai mistä virhe johtuu, mutta luvun 4.3.6 lämmennyt akkumoduulitapaus oli vastaavasta akusta, johon valmistaja haluaa moduuleja vaihdettavan. (Anonyymi 2, 2025.)

Antioikosulku

Vuorilehto esittää teoreettisen esimerkin tilanteesta, jossa antioikosulku voisi käynnistää lämpöryntäyksen ja sytyttää akkupalon. Esimerkkitalanteessa 800 V:n järjestelmässä yhdestä 3 V:n kennosta olisi esimerkiksi irronnut virran-keräimen liitos. Liitoksen irtoaminen ei johda siihen, ettei akku enää toimisi, koska järjestelmässä on vielä lukuisia ehjiä kennoja jäljellä. Sen sijaan suuri 800 V jännite kohdistuu siihen yhteen millimetriin, missä on korkea resistanssi. Sama tilanne on esimerkiksi silloin, kun separaattorikalvo on sulanut umpeen. Etäisyys johtavien osien välillä on niin lyhyt, että jännitteen ollessa riittävän suuri sähkö menee eristeestä läpi, jolloin syntyy valokaari, joka helposti sytyttää elektrolyytin. Tilanne johtaa äkkiä lämpöryntäämiseen ja räjähdykseen. Eli sähköauton akkujärjestelmän syttyminen ei välttämättä olekaan oikosulku, vaan se voi olla myös antioikosulku. (Vuorilehto 2026.)

4.5 Tutkimukset akkujen vaurioitumisesta

Aiheesta on hyvin vähän tutkimusta, ja tehdyt tutkimukset koskevat vain tiettyjä olosuhteita, tai kennon välitöntä vaurioitumista. Kuten Zhu ym. tutkimuksessaan toteaa, mekaanisista syistä johtuvien turvallisuusongelmien tutkimisen suurin haaste on onnettomuusskenaarioiden suuri ulottuvuus (Zhu ym. 2020). Sama kävi ilmi haastatteluissa, että jo akkupakettivariaatioita on niin paljon, ettei yhdelle akulle tehtyä tutkimusta voida soveltaa yleispätevästi. Tässä luvussa tarkastellaan muutamaa tutkimusta kennon mekaanisen muodonmuutoksen vaikutuksesta.

4.5.1 Muodonmuutoksen vaikutus kennon ikääntymiseen, turvallisuuteen ja sähköiseen käyttäytymiseen

Spielbauerin ym. kokeellisessa tutkimuksessa *Experimental investigation of the impact of mechanical deformation on aging, safety and electrical behavior of 18650 lithium-ion battery cells* tutkittiin muodonmuutoksen vaikutusta kennon ikääntymiseen, turvallisuuteen ja sähköiseen käyttäytymiseen. Kokeessa testattiin kahden eri valmistajan 18650-sylinterikennon (1. Samsung INR18650-25R

M ja 2. Sony/Murata US18650 VTC5) toimintaa mekaanisen vaurion jälkeen. Kennojen kylkeen painettiin muodonmuutos kahden, neljän ja kuuden millimetrin syvyyteen. Tutkimuksen tarkoituksena oli tutkia muodonmuutoksen aiheuttaman vaurion vaikutusta kennon ikääntymiseen, joten kennoja ikäännytetettiin syklittämällä muodonmuutoksen jälkeen. (Spielbauer ym. 2022.)

Testit toistettiin viidellä kennolla per muodonmuutossyvyys. Varsinainen muodonmuutos tehtiin turhan lämpenemisen estämiseksi varaustason (SOC State Of Charge) ollessa 0 % ja kennoja vanhennettiin 10 syklillä ennen muodonmuutosta. Kennojen kapasiteetti ikäännyttämistestien alussa oli n. 2,55 Ah. Kennot CT-kuvattiin ennen ja jälkeen muodonmuutoksen sekä ikäännyttämisen jälkeen. Ikäännyttäminen suoritettiin lataamalla ja purkamalla kennoja 600 sykliin asti, tai kunnes SOH oli laskenut 70 %:iin. Syklitykset suoritettiin 25 °C:n lämpötilassa kammiossa, joka oli varustettu kaasun tunnistimilla ja savunpoistolla. (Spielbauer ym. 2022.)

Tutkimuksessa havaittiin, että ikäännyttämisen jälkeen ensimmäisessä testissä, eli Samsungin kennoilla, 2 mm:n muodonmuutoksen kärsineen kennon käyttäytyminen ei juuri poikennut ehjästä (n. 550 sykliä). Kun taas 4 mm:n muodonmuutoksen kokenut kenno kesti noin 500, ja 6 mm:n noin 450 sykliä, joskin 6 mm:n syvyyteen ulottuneen muodonmuutoksen kennossa havaittiin hieman kiihtynyttä ikääntymistä 300 syklin jälkeen. (Spielbauer ym. 2022.)

Toisessa testissä, eli Sony/Murata-kennoilla, 2 mm:n ja 4 mm:n muodonmuutoksen kärsineiden kennojen käyttäytyminen ei juuri poikennut ehjästä. Kummallakin muodonmuutoksella kennot kestivät 600 sykliin asti kapasiteetin jäädessä jopa n. 2,05 Ah:n. Vertailun vuoksi mainittakoon, että Samsung-kennot saavuttivat ensin 70 % SOH-arvon, jolloin niiden kapasiteetiksi mitattiin n. 1,85 Ah. Sony/Murata-testissä 6 mm:n muodonmuutoksen kärsinyt kenno poikesi kahdesta muusta ja kesti hieman alle 600 sykliä kapasiteetin jäädessä n. 1,95 Ah. Tutkimuksen perusteella sähköisen käyttäytymisen osalta vain 6 mm:n muodonmuutoksen kokeneessa kennossa esiintyi merkittävää purkukapasiteetin alenemaa (3,2 %), mikä todellisessa käytössä voisi aiheuttaa moduulitasolla kiihtyvää ikääntymistä. (Spielbauer ym. 2022.)

Ikäännyttämisen jälkeisessä CT-kuvauksessa havaittiin aktiivisen materiaalin ja erottimen puristumista, nurjahdusta, delaminaatiota ja muodonmuutosta, mutta suurestakaan tunkeutumisesta huolimatta elektrodivirrankerääjissä ei tapahtunut murtumia. Tutkimuksessa ei havaittu muodonmuutoksella olevan turvallisuuskriittisiä vaikutuksia ikäännyttämistesteissä. Myöskään oletettuja skenarioita erottimen asteittaisesta väsymisestä lisääntyneiden turpoamisvoimien, hengityksen tai dendriittien kasvun vuoksi ei havaittu. On kuitenkin huomioitava, että otanta oli pieni, vain viisi kennoa per variaatio, ja koski vain kahta tyyppiä 18650-kennosta. (Spielbauer ym. 2022.)

Tutkimuksen Post-Mortem-osiossa kenno purettiin ja rullattiin auki. Tutkimuksessa havaittiin, että ikäännyttämisen (600 syklin tai 70 % SOH-arvon) jälkeen aktiivinen materiaali mureni ja irtoili aukirullauksessa. Murenemista tapahtui niin muodonmuutoksen kärsineissä kennoissa kuin ehjässä vertailukennossa, joskin mureneminen oli suurempaa mitä suuremman mekaanisen muodonmuutoksen kenno oli kärsinyt. (Spielbauer ym. 2022.)

4.5.2 Pussikennon mekaanisen muodonmuutoksen vaikutus tasomaisessa kuormituksessa

Zhun ym. tutkimuksessa *Mechanical Deformation of Lithium-Ion Pouch Cells under In-Plane Loads-Part I: Experimental Investigation* testattiin LG Chemin valmistamien pussikentöjen muodonmuutoksen vaikutusta tasomaisessa kuormituksessa puristamalla kennoa kasaan kolmella eri tavalla. Kennot olivat turvallisuussyistä matalassa noin 10 %:n varauksessa, mikä vähentää vertailukelpoisuutta todelliseen akkuun ajoneuvossa. Kuitenkaan kennoja ei testattu varsinaisesti mikromurtumien ja uudelleenikäytön näkökulmasta. (Zhu ym. 2020.)

Pussikentö asetettiin tukevien sivuseinien väliin ja siihen kohdistettiin puristuskuormitusta pisimmän sivun leveyssuunnassa. Testin aikana kentönn muodonmuutosta seurattiin digitaalikameroin. Kentönn jännitettä valvottiin oikosulun havaitsemiseksi. Testejä suoritettiin kolmea tyyppiä: tasossa tapahtuva puristus ilman vaahtomuovipehmustetta, vaahtomuovipehmusteen kanssa sekä ilman vaahtomuovipehmustetta pyöreällä pistemäisellä puristimella. (Zhu ym. 2020.)

Lommahdusilmiö, eli kennon poimuttuminen havaittiin kaikissa tapauksissa, mutta oikosulkua ei havaittu ensimmäisen ja toisen tyyppin testeissä, vaan jännite pysyi alkuperäisessä arvossaan koko testausmenettelyn ajan. Vain kolmannessa, pistemäisessä testissä havaittiin oikosulku, jonka seurauksena kenno syttyi palamaan. (Zhu ym. 2020.)

Toinen erityinen havainto Zhun ym. tutkimuksessa oli, ettei testien jälkeisissä tarkastuksissa havaittu murtumia tai vaurioita kennon sisäisissä kerroksissa. Zhu ym. esittää, että kennon komponenttikerrokset ovat kokoonpuristuvia materiaalien huokoisuuden ansiosta. Lisäksi tasaisen taivutusmuodonmuutoksen vuoksi taivutussäde on suhteellisen suuri verrattuna yksittäisen kerroksen paksuuteen. Niinpä murtumia tai halkeamia ei havaittu edes 30 %:n muodonmuutoksen aikana. Sen sijaan toisessa, vaahtomuovilla pehmustettuna tehdyssä testissä kenno poimuttui ja taittui epätasaisemmin, mikä tarkoitti paikoittain terävämpiä taitoksia. Siitä huolimatta oikosulkua tai murtumia ei kuitenkaan havaittu. (Zhu ym. 2020.)

Zhun ym. testeistä voidaan havaita, että mikäli kennoon pääsee vaikuttamaan suuriakin, mutta tason suuntaisia ja tasaisia voimia, kenno poimuttuu tasaisesti, muttei aiheuta murtumia tai halkeamia sisäisiin rakenteisiin. Zhun ym. mukaan nykyinen tutkimus osoittaa, että erotinkalvon venyvyyden tulisi olla riittävän suuri, jotta vältetään oikosulkuriski. Pussikennot siis kestävät tasonsuuntaista puristusta hyvin, erityisesti pakattuna tiiviisti tukevien rakenteiden väliin. Tason suuntainen pistemäinen kuormitus sen sijaan aiheuttaa tutkimusten mukaan riskin oikosululle. (Zhu ym. 2020.)

4.5.3 Pussikennoja sisältävän akun vauriokäyttäytyminen

Tsinghuan yliopistossa tutkittiin täyteen ladatun akun käyttäytymistä vauriotilanteissa. Xian ym. tutkimuksessa *Failure behaviors of 100 % SOC lithium-ion battery modules under different impact loading conditions* NMC-pussikennoja sisältävään akkumoduuliin kohdistettiin iskuja erilaisin massa-, nopeus-, asema- ja muotovariaatioin. Käytetyt massat olivat 40 kg ja 81,6 kg. Nopeudet olivat 7 m/s ja 10 m/s. (Xia ym. 2017.)

Kaikissa kolmessa tapauksessa, jossa isku kohdistettiin moduuliin X- eli pituus-suunnassa, havaittiin kennojen jännitteen pysyvän vakiona, vaikka muodonmuutos oli jopa 65 % moduulin alkuperäisistä mitoista. Sen sijaan Z-suunnassa eli paksuussuunnassa kohdistetussa iskussa havaittiin savua ja tulta. Tutkimusryhmä havaitsi voima-aika-kuvaajista, että Z-suuntaisissa iskuissa voima oli huomattavasti suurempi, mikä tarkoittaa, että kyseisen moduulin iskunkestävyysmekanismi oli heikompi Z-suunnassa. Z-suuntainen isku oli myös ainoa, missä havaittiin jännitteen pudotusta. (Xia ym. 2017.)

Riski lämpöryntäykselle todettiin suurimmaksi Z-suunnassa, jolloin isku osui kennoihin päällekkäin ladottujen materiaalikerrosten kohtisuorassa suunnassa. Tutkimuksessa havaittiin iskun aiheuttaneen kennon sisällä hyytelömäisen kerroksen ja separaattorikalvojen repeytymistä, mikä johti kennon anodin ja katodin kontaktiin ja sisäiseen oikosulkuun, joka aiheutti kennon syttymisen tuleen. (Xia ym. 2017.)

Tutkimuksessa testejä tehtiin sekä pyöreä- että teräväpäisellä iskulaitteella. Peltonen arvioi insinööriytössään, että terävät testipäät simuloisivat jopa paremmin todellista tilannetta, koska repeytyvät alumiini ja metallikappaleet muodostavat teräviä kulmia (Peltonen 2025).

5 Akkujen tilan määrittely ja luokittelu

Sähköautojen yleistyminen ja akkumateriaalien rajallinen saatavuus on luonut markkinan akkujen uudelleenkäytölle. Kuten luvussa 4 jo esitettiin, litiumioniakkuihin liittyy merkittäviä turvallisuusriskejä. Suomessa jätelaki ja asetus akuista ja paristoista luo pohjan akkujen uudelleenkäytölle, mukaan lukien turvallisuusvaatimukset, kierrätysvaatimukset ja tuottajavastuun. Tässä luvussa käydään läpi menetelmiä akun tilan ja kunnan arvioimiseksi uudelleenkäytön kannalta kolarin jälkeen sekä tehdään katsaus nykyiseen uusiokäyttöön.

5.1 Vaurioiden tason arviointimenetelmät

Keinänen diplomityössään esittää akun kunnan arvioimista viisiaskelisella prosessilla, johon sisältyisi akun tietojen, historian ja kierrätysyyden kirjaus, akun purkaminen, mekaaniset ja sähkökemialliset testaukset, kennojen lajittelu, ja kennojen toiminnan seuranta uusiokäytössä (Keinänen 2023). Haastatteluissa nousi esille, että visuaalinen ja aistinvarainen tarkastus on käytettävistä keinoista ensisijaisesti tärkein, kun arvioidaan akun kuntoa ja mahdollista jatkokäyttöä, lisäksi korjaamotasolla voidaan tehdä joitakin mittauksia ja hyödyntää testeritietoja.

5.1.1 Ulkoinen muodonmuutos ja aistinvarainen arviointi

Haastatteluissa oltiin yhtä mieltä siitä, ettei ulkoisia muodonmuutoksia kokenutta akkua olisi turvallista käyttää uudelleen. Haastatteluissa ei kuitenkaan osattu arvioida, millainen olisi riittävän kova törmäys, että se voisi aiheuttaa akkukennoihin paloturvallisuuden vaarantavia vaurioita. Moni totesi, että iskun on joka tapauksessa oltava kova. Haapalan mukaan raja menee siinä, jos akku ei pysy mitoissaan, eli kokee minkäänlaisia muodonmuutoksia (Haapala 2025).

Akku tulisi ensisijaisesti arvioida aistinvaraisesti, eli visuaaliset havainnot, värät, äänet, hajut yms. Muita perusparametrejä voisivat olla mm. eristysvastus, SOC-arvo ja SOC-erot kennojen ja/tai moduulien välillä, kontaktorien tila sekä koko järjestelmän jännite. (Anonyymi 2, 2025; Penttinen 2025.)

5.1.2 SRS-turvallitteet

Joidenkin haastateltavien mukaan turvatyynyjen laukeaminen voisi olla viite siitä, että akkuunkin on voinut tulla vaurioita. Penttinen kuitenkin huomauttaa, ettei tutkittua tietoa ole vielä olemassa (Penttinen 2025). SRS-järjestelmä laukaisee turvalaitteita kahdessa vaiheessa. Ensimmäisellä tasolla laukaistaan turvavyönkiristimet ja toisella turvatyyny (Piitulainen 2025). Lahti nostaa esille esimerkin peräänajotilanteesta, jossa isku osuu runkoaisaan, joka välittää voiman suoraan kiihtyvyyssantureille, jolloin turvatyyny voi laukaista hyvinkin

kohtuullisesta iskusta (Lahti 2025). Samoin Jaakkolan mukaan esimerkiksi Tesla Model 3:ssa runkoaisan etuosaan tullut isku johtuu paljon pidemmälle koriin kuin vaikkapa Model S:ssä, jolloin akkuun voi tulla muodonmuutoksia, kuten lommoja tai ryppyjä pääliskanteen (Jaakkola 2025). Hidastuvuus turvalaitteiden laukaisemiseksi vaihtelee valmistajakohtaisesti, mutta yleisesti törmäysnopeus tulee olla yli 15 km/h (Rajaharju 2025).

Vaatimuksena on, että korkeajännitejärjestelmä irtikytetään automaattisesti, mikäli turvatyyny ovat laenneet törmäyksessä (Wennberg 2025). Jaakkolan mukaan äkillinen suuri oikosulkuvirta voi aiheuttaa muutoksia, kun kennon läpi menee hetkellisesti paljon virtaa (Jaakkola 2025). Pyrosulakkeen laukeamisen jälkeen olisi ainakin syytä tarkastaa, mitä tietoja BMS-järjestelmä on rekisteröinyt, tai onko esimerkiksi kennojen käyttörajoja ylitetty. Esimerkiksi Mercedes-Benzillä on ollut rajana, että jos järjestelmä irtikytetään riittävän monta kertaa väärin, kyseistä akkupakettia ei saa enää käyttää, koska irtikytkennästä muodostuu akkua vahingoittavaa kipinöintiä. (Wennberg 2025.)

5.1.3 Törmäysnopeus

Lähtökohtaisesti ajoneuvot suunnitellaan kestävänsä kaupunkinopeuksissa tapahtuva kolari, kuten standarditesteissäkin vaaditaan. Ei ole olemassa mitään tutkimusta siitä, miten akku voi vaurioitua kolarivahingossa, tai millainen hidastuvuus vaurioittaa akkua sisäisesti (Rajaharju 2025). Karkeasti laskettuna tyyptysvaatimusten mukaan akun tulee kestää pysähtyminen noin 50 km/h nopeudesta (Anonyymi 2, 2025).

Keinänen vertaa diplomityössään kolaritestien hidastuvuuksia todellisiin, onnettomuuksissa mitattuihin hidastuvuuksiin, ja toteaa kolaritesteissä mitattujen kiihtyvyyksien olleen suurempia kuin todellisissa onnettomuuksissa. Keinänen toteaa, että standardisoitujen iskutestien hidastuvuudet ovat pienempiä kuin Euro NCAP -testeissä mitatut hidastuvuudet, mutta lähempänä todellisissa onnettomuuksissa mitattuja arvoja. (Keinänen 2023.) Chombon ym. selvityksen mukaan todelliset tulipalot kolaritilanteissa syttyvät korkeissa n. 70–190 km/h nopeuksissa (Chombo ym. 2021).

Törmäysnopeus voisi siis olla joitakin kymmeniä kilometrejä tunnissa, minkä jälkeen vauriot voisivat olla mahdollisia. Kuitenkin tiedetään, että akkuja ja ajoneuvoja on testattu ja kolhittu ilman, että olisi syttynyt esimerkiksi tulipaloo. Tiedetään myös, että on paljon jopa mekaanisesti vaurioituneita moduuleja, jotka ovat kuitenkin stabiileja, joten on vaikea arvioida, milloin akkukenno tai moduuli muuttuu vaaralliseksi. (Anonyymi 2, 2025.)

Lieneekin täysin toinen kysymys, voiko ajoneuvo syttyä käytössä kolarin takia jälkeinpäin, esimerkiksi viikon tai kahden vuoden päästä törmäyksestä (Anonyymi 1, 2025). Edes akkuasiantuntijalla ei ollut vastausta siihen, voiko törmäys nostaa akun paloriskiä silloin, kun akun käyttöä jatkettaisiin törmäyksen jälkeen (Vuorilehto 2026).

5.1.4 Itsediagnostiikka ja kiihtyvyys

Mekaaniset vauriot eivät yleensä aiheuta mitään vikakoodeja (Haapala 2025). Itsediagnostiikka yleensä kertoo paljon ajoneuvon tilasta, mutta mikäli vikakoodien perusteella ei saada riittävää tietoa, muista parametreista voisi olla mahdollista arvioida akun kuntoa ja törmäyksen laatua. Tällaisia voisivat olla akusta luettava kiihtyvyys tai hidastuvuus, esimerkiksi kolarissa havaittu suuri kiihtyvyyssiikki tai akkukennojen lämpötilaerot (Markkanen 2025).

Kolaridataan, eli EDR (Event Data Recorder) -tietoihin tallentuu mm. kiihtyvyydet ja kaasupolkimen tms. komponenttien tilannetiedot sekä data hetkellisestä hidastuvuudesta (Lahti 2025). Kolaridatassa tärkein tieto olisi kiihtyvyyssäyrä, eli g-voimat ajan suhteen parhaimmillaan kolmessa ulottuvuudessa. Akulla voi myös olla oma kiihtyvyystunnistin, jonka data voitaisiin lukea BMS-ohjainlaitteelta. Lisäksi tarvittaisiin tieto valmistajan asettamista rajoista tietyille akulle, jotta voitaisiin arvioida kiihtyvyyksien perusteella, ylittyvätkö raja-arvot ja voiko akkua uudelleenkäyttää vai ei. Toisaalta valmistajien raja-arvot on yleensä asetettu varman päälle, eli todellisuudessa akkua voisi mahdollisesti käyttää vielä pienen ylityksen jälkeenkin. (Anonyymi 1, 2025.)

5.1.5 Turvaluokittelu

Turvallista kuljetusta varten korjaamoilla käytetään usein kolmiportaista liikennevalomallia akun tai moduulin turvaluokittelussa. Luokittelun pääsääntöinen kriteeri on lämpötila, jota mitataan staattisesti joko anturilla tai pintalämpömittarilla. Valmistajien ohjeita turvaluokitteluun käsiteltiin luvussa 2.3.

Joissakin yrityksissä käytetään myös neliportaista mallia, jossa vihreä on ehjä ja keltainen tarkoittaa viallista, mutta ei ole syytä epäillä, että akku muuttuisi epästabiiliksi. Nämä voidaan kuljettaa normaalissa varaosapakkauksessa. Oranssi tarkoittaa, että on mahdollista, että reaktio käynnistyy, eli lämpötila on normaalilämpöinen, mutta kennossa voi olla esimerkiksi eristysvirhe, hallitsematon jännite tai kosteusvaurio. Oranssit kennot kuljetetaan erityisessä vaarallisten aineiden kuljetuslaatikossa. Punainen on merkki vaarasta, esimerkiksi jonkin kennon lämpötilan ollessa yli 60 °C, mikä antaa viitteitä siitä, että reaktio on käynnissä. Punaiseksi luokitellut akut tai moduulit viedään karanteenipaikalle, kunnes tila tasaantuu ja luokitusväri vaihtuu. (Anonyymi 2, 2025.)

5.1.6 Lämpötilat ja paine

Vaikka ulkoisia tai akuutteja vaurioita ei havaittaisi, voi kennoon tulla sisäisiä vaurioita, jos lämpötila, virta tai jännite ylittää valmistajan määrittelemän käyttöikkunan. Jokaiselle kennolle on omat valmistajan määrittelemät raja-arvot. Jos kennon toiminta on käynyt rajojen ulkopuolella, riippuen siitä, kuinka paha ylitys on, valmistajan mukaan kennoa ei saa enää käyttää. Valmistajilla on kennoille erillisiä ”check-up”-taulukkoita ylityksen arvioimiseksi. (Heiska 2025.) Kennojen datalehdissä kerrotaan esimerkiksi käyttölämpötilat, mutta tähän työhön ei löydetty taulukkoa, joka osoittaisi millaisen ylityksen tai olosuhteiden muutoksen jälkeen kennoa ei saa enää käyttää.

Silloin, kun lämpötilan historiatietoja ei ole saatavilla, akun sisällä vaikuttanutta lämpötilaa voisi arvioida esimerkiksi materiaalien värimuutoksista tai akun tarra-merkinnöistä, joiden sulamis- tai kuplimislämpötila on joissakin kymmenissä asteissa (Rajaharju 2025; Anonyymi 2, 2025). Myös paineen nousu voisi viitata

akun sisäiseen vaurioitumiseen, mitä voitaisiin arvioida, kun tunnetaan ero tyhjän ja täyteen ladatun kennon välillä. Esimerkiksi LFP-akulla ero on n. 10 %. Johtopäätösten vetämiseksi vaadittaisiin kuitenkin optimointia, koska myös valitseva lämpötila ja normaali ikääntyminen vaikuttavat kennon sisäiseen paineeseen. (Heiska 2025.)

5.1.7 Kapasiteetti ja suorituskyky

Kapasiteetin alenema näkyy käyttäjälle usein suoraan toimintamatkan lyhene-
misenä, eli rangen pienenemisenä. Jotkin vauriot, kuten litiumin kiteytyminen, voisivat näkyä suoritusarvoissa, mutta muutoin vauriot tulevat esille todennäköisesti vasta toimintahäiriönä. Akun ikääntyessä kapasiteetti ja suorituskyky hiipuvat pikkuhiljaa, mutta muutos voisi olla nopeampi, jos kolari aiheuttaisi akkuun lisävaurioita. (Markkanen 2025.)

Akunhallinnan latausvirtojen rajoittaminen voisi viitata siihen, että kennotasolla on jotain häiriötä. Käyttäjä voi jopa huomata tehottomuutta, jos BMS rajoittaa akusta ulos otettavaa virtaa esimerkiksi yhden sarjaan kytketyn kennon jäädessä jälkeen, tai jännitteen pudotessa merkittävästi suhteessa muihin. Päiväkohtaisista kennojännitteistä voisi analysoida jännitetason pudotuksia edellyttäen, että BMS-ohjainlaite tallentaa tarkkoja tietoja ajan suhteen. (Piitulainen 2025.)

Siitä, mitä akun sisällä oikeasti tapahtuu törmäyksessä, on hyvin vähän tietoa. Pääsääntöisesti arjen kolarikorjauksissa akkua ei lähdetä vaihtamaan, jos akku on ulkoisesti ja mitattavilta osin ehjä, eikä ole havaittavissa mitään, mikä viittaisi korjaustarpeeseen (Autio 2025).

5.2 Tarkemmat mittaukset ja akun tutkiminen

Peltonen insinööriyössään arvioi yhden vakuutusyhtiön sähköajoneuvojen korvaustilastoja vuosilta 2020–2023. Vain noin 30 %:ssa tapauksista oli pidetty tarpeellisena tarkastaa akun sisäinen kunto, koska sisäisistä vaurioista ei voitu olla täysin varmoja. Rajaharjun mukaan akkutarkastus kuitenkin tarkoittaisi lähinnä

akun fyysistä tarkastusta ja jännitteettömäksi tekemistä. Mikäli ajoneuvo on sellaisessa kunnossa, ettei sitä tarvitse tehdä jännitteettömäksi, eli jos ei epäillä mitään kriittistä, ei akkuakaan ole tarvetta tarkastaa. (Peltonen 2024; Rajaharju 2025.) Tässä tarkastellaan tarkempia keinoja vaurioiden selvittämiseksi.

5.2.1 Itsepurkautuminen

Itsepurkautuminen voisi olla yksi merkki vauriosta. Esimerkiksi, jos tiedetään, että jossain kohtaa akkua on ollut poikkeuksellisen lämmin, ja siellä alkaa tapahtumaan kennojen itsepurkautumista, mikä useimmiten näkyy kennojen epätasapainona, voisi se viitata kasvaneeseen riskiin (Heiska 2025). Renaultissa jokainen korkeajänniteyksikkö mittaa aktiivisesti vuotovirtaa, joiden laskettu keskiarvo pystytään lukemaan suoraan testeriltä (Piitulainen 2025).

Mikrovauriot voivat pitkällä aikavälillä alkaa kasvaa suurissa rasituksissa, mikä voi johtaa oikosulkuihin ja itsepurkautumiseen, joka näkyisi kasvavina kennojännite-eroina. Törmäyksen aiheuttama vaurio voisi koskea ennemminkin kennorypystä, kun taas valmistusvirhe näkyy yleensä yksittäisessä kennossa (Penttinen 2025). Samaa teoriaa tukee Markkasen esimerkki Nissan Leafin akusta luvussa 3.1.1.

5.2.2 Jännite, historiatiedot ja datankeräys

BMS-ohjainlaitteen olisi mahdollista kerätä dataa, josta voisi nähdä, miten jänniteprofiili on muuttunut akun eliniän aikana. Haasteena kuitenkin olisi, ettei nopean kehityksen takia ehdittäisi keräämään riittävästi dataa vertailtavaksi, jotta voitaisiin vetää johtopäätöksiä akun turvallisuuden suhteen. (Heiska 2025.) Esimerkiksi valmistajien olisi mahdollista kerätä dataa käytössä olevien akkujen käyttäytymisestä mm. OTA (Over The Air) -päivitysten yhteydessä (Anonyymi 1, 2025). Lahden mukaan Mercedes-Benzin testerillä tehtävä arviointi akun jatkokäytöstä perustuisi juurikin kokemukseen ja dataan siitä, minkä tasoinen törmäys ei vielä aiheuta akkuun sisäisiä vaurioita. Datankeräys tulee pakolliseksi 2027, joten laitteet ovat varmasti jo kykeneväisiä, mutta jälkimarkkinoilla ei ole pääsyä historiatietoihin. (Lahti 2025.)

Kennon kunnan määrittämiseen olennaisimmat parametrit ovat jännite ja lämpötila, eli kennon käyttöikkuna sekä paine ja ylilataaminen. Esimerkiksi NCA- ja NMC-kemioille ideaali lämpötila, jossa ne tulisi aina pitää, on 40–60 °C. (Heiska 2025.) Näiden parametrien elinkaarihistoriatiedoilla saataisiin jo selkeä kuva kennon kunnosta. Muita tärkeitä historiatietoja olisivat latauskerrat, pikalatauskerrat, säilytysajat, -tilat ja -lämpötilat (Markkanen 2025).

Teknisesti olisi mahdollista toteuttaa järjestelmä, joka esimerkiksi epänormaalien lämmön nousun havaitessaan tallentaisi tarkkaan kaikki kennojännitteet ja lähettäisi niitä pilveen sekunnin välein. Siten päästäisiin jälkikäteen kiinni akun sisäiseen vikaan, mistä esimerkiksi palo on lähtenyt, eli saataisiin kiinni se kenno, jonka jännite on notkahtanut ensimmäisenä. (Anonyymi 1, 2025.)

Tiedetään, että BMS seuraa akun käyttäytymistä, kuten jännitteiden ja virtojen muutoksia, etenkin latauksen aikana (Anonyymi 1, 2025). Vaikuttaisi siltä, että ohjelmistoon on määritetty tietty haluttu käyttäytymiskaava, johon itsediagnostiikka vertaa akun toimintaa. Mikäli toiminta poikkeaa kaavasta, BMS merkitsee akun tai moduulin vialliseksi ja se tulee korjata. Poikkeamasta voi tulla esimerkiksi vikakoodi, häiriövalo tai toiminnallisia rajoitteita. Korjaamomaailmassa ei kuitenkaan käytännössä tiedetä sen tarkemmin vian syntymekanismia, vaan nähdään vain vikakoodi tai oire, ja toimitaan sen mukaisesti, esimerkiksi vaihtamalla tietty moduuli tai päivittämällä ohjelmisto. (Anonyymi 2, 2025.)

5.2.3 Syklitys ja resistanssi

Irrallisesta kennosta tai moduulista voidaan saada lataus- ja purkukäyrä syklittämällä, eli lataamalla akku määrätyssä ajassa ja purkamalla samassa ajassa. Syklityksen jännite- ja virtakäyrä on hyvä keino kennon tai moduulin kunnan määrittämiseen. Vertaamalla käyrää samalla tavoin ikääntyneisiin kennoihin voitaisiin vaurioitunut kenno erottaa. Syklityksistä voidaan laskea myös kennon kapasiteetti, mutta jos esimerkiksi separaattorikalvo on ohentunut jostain kohdasta, ei sellaista oikein ole mahdollista selvittää millään mittarilla. (Anonyymi 1, 2025). Ongelma on juuri siinä, että esimerkiksi SOH-arvo antaa tiedon senhetkisestä tilanteesta, muttei kerro mitään tulevasta (Markkanen 2025).

Kennon kunnan määrittämiseksi voidaan mitata sisäinen resistanssi, tai impedanssispektroskopiolla sisäinen resistanssi eri taajuuksilla. Impedanssispektroskopiolla voisi olla mahdollista havaita kennon sisäisiä vaurioita, kuten virranke-
räimen liitoksen vaurio. Kennon sisäinen resistanssi, eli sisäinen vastus sisältää kontaktivastuksen ja kokonaisvastuksen. Yleensä käyttäjän kannalta vain kokonaisvastus on tarpeellinen, mutta kontaktivastus voi olla tarpeellinen mm. kennon valmistajalle. Kontaktivastuksessa näkyy, jos jokin kontakti, kuten hitsisauma on heikko. Impedanssispektroskopian tulokset eivät kuitenkaan aina ole kovin luotettavia johtuen mm. huoneen lämpötilan vaihteluista. Käyrälle voitaisiin kuitenkin määrittää raja-arvot, millaisella tuloksella kenno hylätään, ja milloin sen todetaan olevan kunnossa. (Vuorilehto 2026.)

5.2.4 Kuvantaminen

Kennoja voidaan kuvata myös CT-kuvauksella, eli tietokonetomografialla, joka perustuu röntgensäteiden käyttöön. CT-kuvausta hyödynnettiin Spielbauerin ym. (2022) tutkimuksessa akkukennojen sisäisten rakenteiden kuvantamiseen ilman kennon rakenteen avaamista. CT-kuvauksella voidaan havaita poikkeamia ja vaurioita elektrodimateriaaleissa jopa nanometrien tarkkuudella (Keinänen 2023). CT-kuvaus on hyvä myös esimerkiksi separaattorivaurioiden havaitsemiseen, ja sitä käytetään paljon kennotason tutkimuksessa, koska mikrovaurioita ei voida havaita mistään parametreista (Heiska 2025). Kaupallisesta näkökulmasta kuvantamismenetelmät ovat kuitenkin kalliita ja vaativat erilliset laboratorio-olosuhteet (Rajaharju 2025).

5.3 Uusiokäyttöä koskevat standardit

Uudelleenkäytettävien akkujen turvallisuusarviointi poikkeaa uusien akkujen testauksesta, koska niiden laatu on epätasaista, eikä vaihtelevuuden ja vähäisen saatavuuden vuoksi voida tehdä luvussa 2 kuvatun kaltaisia tuhoavia testejä (IEC 63338, 2024). Maailmalla on jo kehitetty menetelmiä akkujen luokitteliseksi turvallisuuden ja suorituskyvyn varmistamiseksi. Olennaisia standardeja ovat IEC 63330-1 ja IEC 63338. Kanadassa akkujen uusiokäyttöä käsittelee UL 1974. Tässä luvussa esitellään näiden standardien kuvaamat

menetelmät akkujen luokittelemiseksi ja turvallisuusriskin arvioimiseksi. Uudelleenvalmistajalla tarkoitetaan toimijaa, joka tuo tuotteen uudelleen käyttöön alkuperäisen valmistajan määrittämän eliniän jälkeen.

5.3.1 IEC 63330-1 Akkujen uudelleenkäytön yleiset vaatimukset

IEC 63330-1 *Repurposing of secondary batteries – Part 1: General requirements* koskee akkujen uusiokäyttöä. Se määrittää perustan käytettyjen akkujen turvallisuuden ja suorituskyvyn arvioimiseksi, *second-life* liiketoiminnan edistämiseksi ja energialähteiden turvallisen ja tehokkaan käytön nopeuttamiseksi, sillä jo kertaalleen käytössä olleilla akkujärjestelmillä on erilaiset historiat, mikä voi aiheuttaa vaaraa yhteensopimattomissa kokoonpanoissa. Standardissa mainitaan sähköajoneuvot yhtenä esimerkkinä alkuperäisestä käyttötarkoituksesta, ja vaikka uusiokäytöllä tarkoitetaan pääasiassa akun käyttöä kokonaan uuteen sovellutukseen, toimii standardi pohjana myös samaan käyttötarkoitukseen tulevalle uudelleenkäytettävälle akulle. IEC 63330 -standardi sisältää tuotteen uudelleenkäyttöön liittyvät perusvaatimukset ja keskittyy toissijaisesti litiumioniakku-tuotteisiin, joilla on jäljitettävä data. (IEC 63330-1, 2024.)

Standardin mukaan ennen akun irrottamista tulee varmistaa, ettei akussa ole vuotoja. Tarkistus voidaan tehdä visuaalisesti tai hajutunnistimella. Mikäli vuoto havaitaan, akku kirjataan vaurioituneeksi, ellei havaittu vuoto liity jäähdytysnesteseen tai veteen. Ulkoisesti vaurioituneita akkuja ei tule käyttää uudelleen, eli jos akussa on esimerkiksi useita muodonmuutoksia, halkeamia tai epäpuhtauksia ulkokuoressa. (IEC 63330-1, 2024.)

Uudelleenkäytön arvioinnin tulee perustua dataan alkuperäisestä käytöstä, joten mikäli ulkoisia vaurioita ei ole, tulee akku diagnosoida. IEC 63330 -standardin mukaan olennainen jäljitettävä data, joka vaaditaan uudelleenkäyttösovelluksen yhteensopivuuden tarkasteluun, sisältää:

- perustiedot (alkuperäinen valmistaja, kemia, valmistusvuosi ja -kuukausi, sarjanumero, akkupaketin purkuohjeet)
- datan alkuperäisestä käytöstä (mm. välttämättömät tiedot ja kriittiset virheet)

- tietoja suunnittelua varten (toiminta-alue, käyttöaika uudelleenkäyttöä varten, suorituskyky suunnittelu ja turvallisuussuunnittelu). (IEC 63330-1, 2024.)

Data alkuperäisestä käytöstä ja kriittisistä virheistä suositellaan keräämään esimerkiksi diagnostiikkalaitteella, ja mikäli akkua käytetään uudelleen useita kertoja, tulee tiedot kerätä ja tallentaa uudelleen jokaisesta uudelleenkäytöstä. Mikäli dataa ei ole saatavilla, akkua ei tule uudelleenkäyttää. Välttämättömiä tietoja ovat tiedot käyttöalueesta, käyttölämpötilan ylä- ja alaraja, latausjännitteen yläraja, purkujännitteen alaraja, suurin latausvirta ja suurin purkuvirta. Lisäksi tarvitaan historia kriittisistä virheistä, eikä akkua saa uudelleenkäyttää, jos yksikin seuraavista tapahtumista on kirjattu: ylilataus, ylipurkaus, ylivirta, yllämpötila, eristysvika (paitsi jos voidaan todentaa, ettei ole merkkejä vedelle altistumisesta ja vastus on suurempi kuin määritetty minimiarvo) tai onnettomuus (paitsi jos voidaan todentaa, ettei ole merkkejä akun vauriosta). (IEC 63330-1, 2024.)

Uudelleenkäyttöä varten tarvitaan myös tiedot jäännösuorituskyvystä, varastoinnista, sekä jos korjaushistoria on saatavilla, kirjataan akkuun vaihdetut osat ja tehdyt korjaukset sekä päivämäärät korjauksista. Mahdollisesti muita tietoja, kuten eristysresistanssi, EMC ja kennon toiminta-alue, voidaan arvioida, jos ne ovat tarpeellisia tietyn uudelleenkäyttösovelluksen kannalta. (IEC 63330-1, 2024.)

Akun suunnittelutiedot tarvitaan arvioidessa sopivuutta ja suunnittelua uuteen käyttötarkoitukseen. Standardissa mainitaan myös, että turvallisuussuunnittelu säilyy, jos akku uudelleenkäytetään samaan tarkoitukseen kuin alkuperäinen valmistaja on tarkoittanut, eivätkä ympäristöolosuhteet muutu merkittävästi tai ylitä alkuperäisen laitteen kuormitusta. Standardin liitteenä on malli tietojen dokumentointiin, mutta ei varsinaisia luokitteluperusteita tai ohjetta siitä, millä tavoin kerätyistä tiedoista voidaan arvioida akun turvallisuutta. Suorituskykyä varten standardissa on kuitenkin mallitaulukko, jossa jäännöskapasiteettisuhteen ja sisäisen vastuksen suhdearvon perusteella voidaan luokitella akku suorituskykyluokkaan A, B, C tai kierrätys. (IEC 63330-1, 2024.)

5.3.2 IEC 63338 Ohjeita toissijaisten akkujen ja kennojen uudelleenkäytöstä

IEC 63338 *General guidance on reuse and repurposing of secondary cells and batteries* käsittelee sekundääristen litiumioniakkujen uudelleenkäyttöä ja uusiokäyttöä sen jälkeen, kun ne on irrotettu alkuperäisestä käyttötarkoituksesta. Se koskee litiumioniakkuja sekä nikkelimetallihydridiakkuja. Standardi sisältää tarkistuslistan, jonka mukaan akkuja voidaan arvioida uudelleenkäyttöä varten. IEC 63338 edellä mainitun IEC 63330:n tapaan ei salli akkujen uudelleenkäyttöä, mikäli tarvittavia tietoja ei ole saatavilla, ja alleviivaa, että alkuperäinen valmistaja vastaa alkuperäisestä käytöstä, eikä ole vastuussa uudelleenkäytöstä (reuse) tai käytöstä uuteen tarkoitukseen (repurpose). IEC 63338 -standardi lupaa, että standardia noudattamalla tulipalon, räjähdyksen, kennoelektrolyyttivuodon, ilmavuotojen, repeämisten, sähköturvallisuuden ja toiminnan turvallisuuden heikentymisen riskit pienenevät. (IEC 63338, 2024.)

Standardin kirjoitushetkellä ei ole ollut vahvistettuja menetelmiä uudelleen käytettävien akkujen turvallisuuden tarkastamiseen ja testaamiseen. Hyväksytyt/hylätyt määrittelyt tulee siten perustua samoihin käyttöiän jäljitettävyyssparametreihin kuin IEC 63330:ssa, eli historiatietoihin siitä, ettei alkuperäisen käytön aikana ole ylitetty käyttö- ja käsittelyrajoja. Uudelleenvalmistajan tulee vahvistaa tiedot turvallisuudesta, tuotteen laadusta, standarditestaushistoriasta, kierrätyksestä ja käsittelystä käyttöiän päättyessä. Alkuperäiseltä valmistajalta tulee myös pyytää tieto turvallisen käytön minimikapasiteetista. Standardi esittää harkittavaksi akulle tehtävää kuntotarkastusta, joka sisältäisi mm. kapasiteetin ja sisäisen resistanssin mittauksen eri ominaistuuksilla. (IEC 63338, 2024.)

Standardissa huomautetaan, että käyttöparametrialuetta voidaan rajoittaa tiettyjen parametrien osalta riskien arvioinnissa, mikä tarkoittaa, että uudelleenkäytettävän akun tai kennon käyttöaluetta tai kapasiteettia voidaan rajoittaa turvallisuuden varmistamiseksi. Valmistaja voi myös tehdä akkuun merkinnän akun uudelleenkäytöstä ohjaamaan uudelleenkäyttövalmistajaa, esimerkiksi lausunnolla ”*Ennen tuotteen uudelleenkäyttöä on saatava alkuperäisen valmistajan kirjallinen hyväksyntä*”. Mikäli tuotetta ei ole tarkoitettu uudelleenkäytettä-

väksi, kyseiset kennot voidaan merkitä lausunnolla ”*Tätä tuotetta ei ole suunniteltu uudelleenkäytettäväksi. Sitä ei tule käyttää muulla tavalla kuin alkuperäisen valmistajan alun perin tarkoittamalla tavalla*”. Jos alkuperäinen valmistaja ei ole päättänyt uudelleenkäytöstä, tulee uudelleenvalmistajan ottaa yhteyttä alkuperäiseen valmistajaan ja varmistaa, onko uudelleenkäyttö mahdollista. (IEC 63338, 2024.)

IEC 63330 -standardissa on viitattu standardiin IEC 62933-4-4, jonka mukaan uudelleenkäyttö on toivottavaa, mutta se ei saa aiheuttaa kohonnutta riskiä ympäristölle. IEC 62933:ssa on listattuna riskejä, joita voi esiintyä akkujärjestelmien uudelleenkäytöstä:

- Vaurioitunut tai yli-ikääntynyt separaattori, joka voi aiheuttaa sisäisiä oikosulkuja ja lämpöryntäämisen.
- Hajonnut elektrolyytti ja kertyneet kaasumaiset hajoamistuotteet, jotka voivat aiheuttaa myrkyllisten, syövyttävien ja syttyvien yhdisteiden vapautumista.
- Heikentynyt kennon kuori.
- Epätasapainoiset kennojen kapasiteetit, jotka voivat aiheutua liiallisen suuren virrankulutuksen jaksoista ensimmäisen käyttöiän aikana, ja joita akun BMS ei pysty kunnolla palauttamaan.
- Menetetty ensikäyttöikä tieto ja muut käyttöikä tiedot viallisen tai puuttuvan akunhallintajärjestelmän vuoksi, mikä haittaa akkujärjestelmässä uudelleenkäyttöön tarkoitettujen akkujen kunnan asianmukaista arviointia.
- Akkupaketin kennojen jäljitettävyyden valmistajaan asti, tai mikäli akkuun on asennettu eri kennoversioita, mikä voi johtaa aiheuttamaan epätasapainoa suorituskyvyssä.
- Muiden osien kuten virtakiskojen yms. heikkeneminen.

Riskien vähentämiseksi pitäisi tuntea tuotteen historiaa, jossa keskeisiä tietoja ovat alkuperäisen käytön käyttöhistoria, käyttötiedot/olosuhdetiedot sekä todellinen kunto (SOH). Standardissa kuitenkin todetaan, että on mahdollista, ettei tällaisiin tietoihin välttämättä ole pääsyä immateriaalioikeuksien tai liike- ja kauppalaisuuksien vuoksi. (IEC 62933-4-4, 2023.)

5.3.3 UL 1974 Akkujen uudelleenkäytön tai -valmistuksen arviointi

Kanadalainen UL 1974 *Evaluation for Repurposing or Remanufacturing Batteries* -standardi kattaa lajittelu- ja luokitteluprosessin akuille, jotka ovat uudelleenvalmistettu, kunnostettu tai uudelleenrakennettu, ja joita ei ole aiemmin arvioitu turvallisuusstandardin mukaisesti. Esimerkiksi alkuperäisen valmistajan uudelleenvalmistamat akut samaan tai samankaltaiseen sovellutukseen sähköajoneuvossa. Standardi ei kata jälkimarkkinakorjauksia tai vaihtoja, joita suorittaa muu kuin alkuperäisen valmistajan nimeämä edustaja. Uudelleenkäyttövalmistajalla tai OEM-uudelleenvalmistajalla tulee olla menetelmä tai järjestelmä akkujen, moduulien ja kennojen lajitteluun uudelleenkäyttöä varten.

(ANSI/CAN/UL 1974, 2023.)

Standardin UL 1974 mukaan akkuja ei tulisi uudelleenkäyttää valmistajan määrittämän kalenterin jälkeen. Silloin, kun valmistajan määrittämä kalenteri-ikä on tiedossa, tulee uudelleenkäyttövalmistajan vahvistaa käytettyjen komponenttien päivämäärä, paitsi silloin, kun soveltavuus ja turvallisuus on todennettu ja vahvistettu uudelleenkäyttövalmistajan toimesta. BMS-järjestelmän toiminnan tarkastus tulee olla osa testausta aina, kun BMS on mukana uudelleenkäytössä. Jäähdytysjärjestelmä ja muut kriittiset järjestelmät tulee myös tarkastaa, ja komponenttien tulee täyttää kohdesovellutuksen standardit, kuten tässä työssä käsitelty IEC 62660-3. (ANSI/CAN/UL 1974, 2023.)

Lisäksi UL 1974 linjaa, että samaan kokoonpanoon tulevat uudelleenkäytettävät akut tulee olla samaa mallia samalta valmistajalta. Kokonaiskuvan saamiseksi akut tulee tarkastaa visuaalisesti, dokumentoida ja tallentaa historia edellisestä käytöstä sisältäen tallennetun elektronisen datan ja osallisuuden tapahtumiin, jotka voivat aiheuttaa turvallisuusriskejä. Dokumentaation tulee sisältää mm. akun alkuperäiset merkinnät, kytkentäkaaviot, tekniset tiedot, kokoonpanotiedot, tiedot järjestelmän komponenteista ja oheisjärjestelmistä, syy ja päivämäärä miksi ja milloin akku on poistettu käytöstä sekä säilytys ja käsittelyhistoria. Lisäksi kerätään ja tallennetaan BMS-järjestelmän tiedot (BMS-spesifikaatio, algoritmit lataukselle ja purulle, BMS-järjestelmän valmistaja, osanumero,

valmistuspäivä jne.) ja data kuten standardissa IEC 63330, sekä tiedot standardeista, joita komponentit alun perin noudattivat. (ANSI/CAN/UL 1974, 2023.)

Akkumoduuleista tallennetaan merkinnät, spesifikaatiot, ohjeet ja muu kirjallisuus sisältäen mm. lataus- ja purkuparametrit sekä konfiguraatio ja kokoonpano. Samoin kennoista tallennetaan valmistuspäivä, kemia, paino, mitat, design, valmistaja, osanumero, merkinnät ja spesifikaatiotaulukko, josta käy ilmi nimellisjännite, kapasiteetti, lataus, purku, säilytys jne., sekä turvallisuustesti-data ja viimeinen käyttöpäivä. Mikäli valmistajan piirustuksia kennosta ei ole saatavilla, kennon rakenne tulee selvittää purkamalla kenno. Kennon rakennetietoja tarvitaan kennon analysoimiseksi. (ANSI/CAN/UL 1974, 2023.)

UL 1974 määrittää tilanteita, jossa akun uudelleenkäyttö tulee hylätä olosuhdetietojen perusteella. Tällaisia ovat mm. vakavat ympäristöaltistumiset ja väärinkäytökset, kuten onnettomuus, joka on todennäköisesti vaikuttanut akkuun, tulva tai altistuminen tulelle. Valmistajan on tunnistettava ja kehitettävä menetelmä sellaisten olosuhteiden arvioimiseksi, joiden vuoksi akkua ei voisi uudelleenkäyttää turvallisesti. (ANSI/CAN/UL 1974, 2023.)

Visuaalisessa tarkastuksessa merkitään näkyvät vauriot kuten halkeamat, turpoaminen, huomattava haju, värjäytyminen ja palojäljet. Vauriot johtavat hylkäykseen, ellei ole näytettävissä, ettei vaurio vaikuta akun turvallisuuteen. Hylkäysperusteita ovat myös lämpö-, virta- tai jännitepoikkeama ja itsepurkautuminen, kun se ylittää valmistajan määrittelemät rajat. BMS-ohjainlaitteelta tallennetaan lisäksi SOC-keskiarvo ja ääriarvot, latausten ja purkujen kokonaismäärä akun elinaikana, virheviestien määrä tai tyyppi ja kontaktorilaskurin lukema. Raja-arvot ja maksimi altistumisaika saadaan tarvittaessa BMS-ohjainlaitteelta, ja akku on hylättävä, jos tietoja ei ole saatavilla, samoin mikäli vikailmoitusten määrä tai kontaktorilaskuri ylittää spesifioitujen rajat. (ANSI/CAN/UL 1974, 2023.)

Standardin liitteessä C mainitaan IEC 63338:n tapaan, että ikääntyneille kennoille voidaan määrittää uudet turvarajat. Rajojen määrittämiseen voidaan hyödyntää kennoturvallisuustestejä, joissa haetaan arvot mm. kennon ylilatauksen,

ylikuormitusjaksojen, ylipurkauksen, lämpökuormituksen ja sisäisen ja ulkoisen oikosulun sietokyvyille. (ANSI/CAN/UL 1974, 2023.)

5.4 Akkujen uusiokäytön nykytila

Ajoneuvojen ajoakkuja on uusiokäytetty jonkin verran erilaisissa energian varastointijärjestelmäratkaisuissa vuosien varrella. Kuitenkin moni toimijoista on siirtynyt käyttämään ihan uusia akkukennoja todennäköisesti siksi, koska niitä saa nykyisin huomattavan edullisesti. Yrityksistä huolimatta ketään entisistä ajoakkujen uusiokäyttäjäorganisaatioista ei saatu haastateltavaksi, jotta olisi voitu selvittää, onko ajoakkujen uusiokäyttöön liittynyt palovahinkoja tai kohonnutta turvallisuusriskiä. Vuorilehto pitää litiumioniakkujen uusiokäyttöä, tai ylipäänsä käyttöä ensimmäisen käyttöiän jälkeen, järjettömänä ajatuksena niiden vaarallisuuden takia (Vuorilehto 2026).

Romutettavaksi myydyn ajoneuvon akku tulee kierrättää, eikä sitä saa enää käyttää. Eli jos tavallisen peltikolarin kärsinyt sähköauto myydään purettavaksi, akku tulee hävittää kierrättämällä, vaikka se olisi täysin kunnossa. (Rajaharju 2025.) Vuonna 2026 kierrätykseen saapuvan litiumakun massasta tulee kerätä ja kierrättää materiaaleja vähintään 65 % koko massasta, mikä tarkoittaa, että loppuosan voi hävittää polttamalla. Vuonna 2027 tulee lisäksi vaatimus, että esimerkiksi litiumista puolet täytyy kerätä talteen. Litiumkennojen kuivaaminen, murskaaminen ja materiaalien erottelu on kallista ja hankalaa, mikä johtaa siihen, että arvokkaita materiaaleja joutuu helposti poltettavaksi. (Litiumioniakkujen harvinaiset metallit halutaan kiertoon, mutta osa akuista on vailla kierrätysratkaisuja – miten EU:n tiukentuvien kierrätysvaatimusten käy? 2023.)

CeLLife Solutionsin Messon ja Luhtalan mukaan ainakin vuonna 2023 oli tilanne, että yli puolet kierrätykseen päätyvistä akkukennoista olisi vielä voinut hyödyntää uudelleen energiavarastona. Messon ja Luhtalan kehittämän Elektroninen sormenjälki -menetelmän avulla voitaisiin tunnistaa huonot ja vaaralliset kennot tai moduulit, ja jopa valikoida keskenään yhteensopivat kennot uuteen konstruktion. (Uudelleenvalmistus pidentää akkujen käyttöikä 2023.) CeLLife Lite -laite arvioi tekoälymalleihin pohjautuen mm. kennon ikääntymistä,

moduulien kennojen epätasapainoa ja vaarallisia rikkoutuneita piirejä. CeLLife Liten kerrotaan keräävän 2000 datapistettä viidessä sekunnissa mittaamalla mm. jännitettä, sisäistä resistanssia ESR (Equivalent Series Resistance) ja sisäisen resistanssin taajuutta sekä laskemalla SOH- ja SOC-arvon. (Evaluate health with CeLLife Lite 2025.)

Akkuauto Finland Oy kunnostaa käytettyjen autojen akkuja keskittyen pääasiassa Tesloihin. Yritys hyödyntää käytöstä poistettujen, kuten kolaroitujen ajoneuvojen akkuja varaosana, ja hankkii varaosia myös Norjasta. Yleisin syy, miksi Teslan akkuja joudutaan korjaamaan, on akun sisälle pääsevä kosteus. Lähtökohtaisesti kosteusvaurio korjataan, mutta akku tai moduuli vaihdetaan silloin, jos moduuli on jo ehtinyt kärsiä kosteudesta, esimerkiksi ruostunut tai hapettunut, tai sen kapasiteetti on laskenut. (Kiiski 2023.)

Akkuauton teknologiajohtaja Jaakkola kertoo, että jos akku puretaan varaosiksi, kennoille tehdään tietynlaisia syklityksiä kunnan tarkistamiseksi. Lähtökohtaisesti Akkuautossa kuitenkin luotetaan ajoneuvon omaan diagnostiikkaan. On luotettava, että ajoneuvon oma turvallisuusmekanismi ja diagnostiikka on suunniteltu katkaisemaan toiminta ja tallentamaan vikakoodit, jos akussa esiintyy turvallisuuden vaarantavia vikoja. (Jaakkola 2025.)

Akkuautossa kennoja voidaan testata mm. resistanssimittauksilla ja syklittämällä. Lisäksi akusta kerätään vikakoodit ja erilaisia kennojännitteisiin ja kapasiteettiin liittyviä tietoja. Akkuautossa hyödynnetään myös tilastollista tietoa, eli vertaillaan miten eri kennot käyttäytyvät toisiinsa nähden. (Jaakkola 2025.)

Markkanen toteaa diplomityössään, että akuston uusiokäyttöön liittyy paljon vastuukysymyksiä, koska akuston kestävydestä, aiemmista vaurioista ja muista riskeistä ei välttämättä saada riittävästi tietoa. Osaltaan uusi akkuasetus sekä IEC-standardit vastaavat siihen haasteeseen rajaamalla ja selkeyttämällä vastuuta alkuperäisvalmistajan ja uudelleenvalmistajan välillä. Markkasen mukaan akusto olisi hyvä tarkastaa ja huoltaa kuntoa epäiltäessä, mutta moni akustoista on sinetöity valmistusvaiheessa, eikä ole tarkoitettu avattavaksi, mikä hankaloittaa kunnan määrittämistä ja uudelleenkäyttöä. Akuston avaaminen ja

huoltotoimenpiteiden tekeminen, kuten moduulin vaihtaminen, johtavat herkästi siihen, että toimijasta tulee uudelleenvalmistaja ja siten myös vastuu siirtyy toimijalle. (Markkanen 2016.)

6 Tulokset ja päätelmät

6.1 Törmäystesteistä ja valmistajien ohjeista

Standardeja on valtava määrä, mutta loppupeleissä testit pohjautuvat muutama standardiin ja yhtenäisiin menetelmiin. Standarditesteissä huippukiihtyvyyksissä kovimmissa iskutesteissä ajoakkukokoluokassa on 50 g tai jopa 500 m/s². Testeissä usein arvioidaan sisäisen oikosulun vaaraa määrittämällä kriteeriksi, ettei akku saa syttyä palamaan. Voidaan olettaa, että akun tulee kestää turvallisena vähintään kolaritestien kaltaisia törmäyksiä. Kolaritesteissä käytetään kuitenkin pääsääntöisesti uusia ajoneuvoja ja akkuja, jolloin suoraviivaisia johtopäätöksiä tämän työn aiheeseen ei voida vetää, koska ikääntymisen tuomaa haurastumista tai riskialttiutta ei ole huomioitu.

Kansainvälisissä turvallisuustesteissä kuten E-sääntö nro. 100:n testeissä keskitytään pääasiassa matkustajien turvallisuuteen. Mikäli ajoneuvo läpäisee testit, mikä tarkoittaa akun kannalta käytännössä sitä, ettei se syty palamaan tai vuoda elektrolyyttiä, voidaan akku tyyppihyväksyä ja laskea liikenteeseen. Testit eivät siis juurikaan huomioi sitä, että reaktio voi käynnistyä ja akku syttyä palamaan myöhemmin. Testikriteerit eivät ota kantaa siihen, onko akku turvallinen vielä testi-iskuista vastaavan törmäyksen jälkeen, mutta eivät myöskään kiellä, etteikö ajoneuvoa saisi korjata ja palauttaa käyttöön vastaavan törmäyksen jälkeen.

Valmistajien ohjeet koskevat pääasiassa akun kuljetusturvallisuutta. Tämän työn puitteissa ei löydetty ohjeita siitä, millä perusteella tai millaisen törmäyksen jälkeen akun käytön jatkaminen sallitaan. Esimerkiksi Mercedes-Benzillä testeillä joihinkin malleihin tehtävän erityistoiminnon lisäksi, ainut erottelu näyttäisi liittyvän näkyviin vaurioihin. Joiltain valmistajilta löytyy ohje pohjavaurioiden tarkastamiseen, ja niitä on jaettu myös Traficomille. Voitaisiin siis olettaa, että

katsastajat käyttävät samoja ohjeita arvioidessaan pohjavaurioiden hyväksyttävyyttä. Valmistajien ohjeissa on kuitenkin vaihtelevuutta, ja jokaiselle mallille voi olla oma ohjeensa, joten tarkastelu tulee tehdä tapauskohtaisesti.

6.2 Kennoille tehdyistä tutkimuksista

Useissa tutkimuksissa on havaittu muodonmuutoksen aiheuttavan kennoon sisäisiä vaurioita. On selvää, että elektrodit lävistämällä saadaan aikaan oikosulku, ja että kennon raju ulkoinen muodonmuutos vahingoittaa myös kennon sisäisiä rakenteita. Sahraei ym. (2014) tutkimuksessaan havaitsivat, että pieni vaurio kennossa voi aiheuttaa pehmeän oikosulun ilman, että kennon kuori pettää. Mikään tutkimuksista ei kuitenkaan ole osoittanut, että tärähdys, isku tai voima, olisi aiheuttanut kennon sisäisiin rakenteisiin sellaisia vaurioita, jotka voisivat johtaa kennon sisäiseen oikosulkuun, ilman ulkoista muodonmuutosta.

Päinvastoin Spielbauerin ym. (2022) tutkimuksessa havaittiin, ettei suhteellisen suurikaan painauma kennon kyljessä juurikaan vaikuta kennon käyttäytymiseen syklitetäessä. Edes vaurioituneen kennon ikäännyttäminen 600 syklillä ei aiheuttanut kennon syttymistä. Kuitenkin kennon rakenne, valmistaja, akkukemia yms. tekijät vaikuttavat kennon turvallisuuteen, kuten Vuorilehdon viisitasoisessa mallissa esitettiin.

Eräs haastateltava esittää, että pussikkenno voisi rypytyä vaakasuuntaisista voimista. Vuorilehdon (2026) mukaan tämä olisi kuitenkin epätodennäköistä tiiviin pakkauksen vuoksi. Zhun ym. (2020) tutkimuksessa pussikkenno rytistettiin vaakasuunnassa ja todettiin, että suurestakaan mekaanisesta muodonmuutoksesta huolimatta kenno ei mennyt oikosulkuun. Muodonmuutoksen jälkeen kennoa ei kuitenkaan syklitetty, joten ei voida osoittaa, etteikö poimuttuminen aiheuttaisi ennen aikaista kapasiteetinlaskua tai suurempaa oikosulkuriskiä akun käytön jatkuessa. Voidaan kuitenkin varovaisesti arvioida, että pussikennon sisäinen rakenne on suhteellisen kestävä, eikä pienestä rypytymisestä aiheutuisi sen suurempaa vahinkoa, kuin pienestä painaumasta kennon kylkeenkään.

Markkasen (2016) esimerkissä Nissan Leafin akku oli vaurioitunut törmäyksessä, mutta taittuneet kennot eivät aiheuttaneet ongelmia edes ensimmäisillä latausyhteillä. Kennojen vaurioituminen ei aiheuttanut suoraa palovaaraa, joskin kyseessä oli LMO-kemia, joka on nykykäytössä harvinainen, eikä siten ole juurikaan vertailukelpoinen tämän työn näkökulmasta. Havainto kuitenkin osoittaa, että akkuun voi tulla törmäyksessä sisäisiä vaurioita, vaikka akkupaketin ulkokuori olisi kunnossa. Akku tulisi siis aina avata kunnan todentamiseksi.

Spielbauerin ym. (2022) tutkimuksen Post-Mortem-osiossa havaittiin, että aktiivinen materiaali mureni syklityksen jälkeen aukirullauksessa niin deformoiduissa kennoissa kuin ehjässä vertailukennossakin. Jatkotutkimuksen aiheena olisi mielenkiintoista selvittää, muodostuuko kennoon sisäisiä murtumia, halkeamia tai muita vaurioita herkemmin, jos jo valmiiksi ikääntynyt kenno kokee iskuja tai muodonmuutoksia.

6.3 Vauriomekanismeista

Mahdollisten kennon sisäisten vaurioiden selvittäminen voi olla vaikeaa purkamatta akkua kennotasolle asti. Ulkoisesti ehjän näköisen kennon tarkempaan tutkimiseen tarvittaisiin yleensä kalliita laitteistoja. Yksi mahdollinen keino saada esiin törmäyksestä johtuva vaurio olisi esimerkiksi analysoida akun elinkaaren käyrää. Kennon normaali ikääntyminen näkyy kapasiteetin alenemisena hiljalleen, mutta kolarin jälkeen tapahtunut muutos voisi viitata kennon vaurioon. Lisäksi kennon lämpötila- ja jännitehistoriaa analysoimalla voitaisiin tehdä päätelmiä kennon kunnosta ja riskiprofiilista.

Vuorilehdon (2026) mukaan anodin ja virrankeräimen liitos on kennon heikoimpia kohtia, ja liitoksen vaurioituessa tai irrotessa suuri virta joutuu kulkemaan kapeampaa reittiä, ja voi johtaa ylikuumenemiseen tai jopa valokaareen kennon sisällä. Tällainen kontaktivaurio voi näkyä rakenteesta riippuen silmämääräisesti, kuvantamalla tai kennon sisäisen resistanssin mittauksessa. Vuorilehdon (2026) mukaan impedanssispektroskopiaa voitaisiin hyödyntää mittauksissa kontaktivaurion määrittämiseksi. Samoin akkujen uudelleenkäyttöä käsittelevässä IEC 63338 -standardissa esitetään harkittavaksi akun kuntotarkastusta,

jossa mitattaisiin mm. sisäinen resistanssi eri ominaistuuksilla, eli käytännössä impedanssispektroskopiaa hyödyntäen.

Havaintojen mukaan tärähdyksen tai edes pienen muodonmuutoksen aiheuttamat elektrodimateriaalien mikrovauriot eivät lisää kennon paloriskiä. Herää kuitenkin kysymys, edistäisivätkö elektrodimateriaalien halkeamat esimerkiksi metallisen litiumin kerrostumista, mikä johtaisi myöhemmin separaattorin puhkeamiseen ja oikosulkuun. Tämän työn puitteissa ei saatu vastausta tähän kysymykseen, joka olisikin siten erinomainen jatkotutkimuksen aihe. Olisi kuitenkin tarpeen pohtia, mihin vedetään raja törmäyksen aiheuttaman vaurion ja ikääntymisen välillä.

Lämpötilan muutokset aiheuttavat kennon sisällä kemiallisia muutoksia, mikä liittyy osaksi kennon lämpöryntäämistä. Pelkkä törmäys ei kuitenkaan nosta akun lämpötilaa, vaan jossain täytyisi tapahtua esimerkiksi oikosulku, jotta kenno voisi vaurioitua lämmön seurauksena. Akun virran äkillinen katkaisu, esimerkiksi pyrosulakkeen laukaiseminen, olisi omiaan aiheuttamaan suuren virtapiikin tai jopa kipinäintiä akun sisällä, joka voisi käynnistää kennon sisäisiä kemiallisia reaktioita. Osa autonvalmistajista ei myöskään suosittele akun uudelleenkäyttöä, mikäli akun pyrosulake on lauennut törmäyksessä.

Akun jäähdytysjärjestelmä on kriittisessä roolissa erityisesti pikalataustilanteissa ja silloin, kun akku on jo ikäännytynyt tai vaurioitunut. Kennon lämpötilan noustessa itselämpeneminen voidaan pysäyttää ja lämpöryntääminen estää jäähdyttämällä akkua tehokkaasti. Eli jos lämpöä saadaan poistettua enemmän kuin sitä syntyy, kenno voi stabiloitua. Tätä tapahtuukin esimerkiksi pikalataustilanteissa, mikä yleensä lyhentää akun käyttöikä. Se, kuinka korkealle lämpötila paikallisesti voi nousta eri tilanteissa, onkin toinen kysymys.

Varotoimena separaattori voi toimia lämpösulakkeena yksittäisissä kennoissa, mutta suuremmissa järjestelmissä suoja on tehoton, sillä akkua voidaan edelleen purkaa tai ladata muista kennoista. Separattorin sulaminen ja huokoisuuden katoaminen voitaisiin mahdollisesti havaita vikatilana BMS-järjestelmän

tarkkailussa kennon resistanssin kasvaessa, jolloin voitaisiin katkaista koko akun purku/lataus, ja näin ehkäistä lämpöryntäminen.

6.4 Sattuneista paloista ja tilastoista

Sähköauto syttyy yleensä latauksessa, mutta latauksella ei välttämättä ole osuutta asiaan, vaan lataus voi olla jo päättynyt palon alkaessa. Kuitenkin Mikolajczakin ym. (2011) mukaan itselämpenemisen alkamisesta voi kulua jopa kaksi päivää, että lämpöryntäys käynnistyy. Latauksella siis voi olla osuutensa akkupalon syttymiseen, vaikka lataus olisi jo päättynyt. Lataustapahtuma voi nostaa kennon lämpötilaa itselämpenemisrajan yläpuolelle, mikä voi johtaa myöhemmin lämpöryntäämiseen ja kennojen syttymiseen. Toisaalta saman teorian mukaan myös eilisen tapahtumat voivat johtaa syttymiseen huomenna. Eri-tyisen riskialttiita ovat suurien virtojen ja korkeiden lämpötilojen pikalataustapahtumat, mihin Teslakin varautuu rajoittaessaan pikalatausta vahingoittuneiden ajoneuvojen kohdalla. Lataustapahtumassa sekä latauslaitteen että BMS-ohjainlaitteen tulisi valvoa tarkasti virtoja ja lämpötiloja, sekä hallinnoida jäähdytystä.

Lahden (2025) mukaan Mercedes-Benzin tiukka määrittely akun uudelleenkäytöstä perustuisi kokemukseen ja dataan. Sähköautojen tullessa markkinoille Mercedes-Benzillä on ollut tiukka linja, ettei akkuja saa uudelleenkäyttää, vaan pienestäkin vauriosta akku on vaihdettava uuteen. Herää ajatus, onko Mercedes-Benzin toimintatapa ollut tietoinen strateginen valinta datan keräämiseksi vaurioituneista akuista, vai ainoastaan ylivarovaisuutta epävarmuuden vallitessa ja tiedon puuttuessa. Tämän insinööriyöprosessin yhteydessä ei selvinnyt, onko alkuaikojen akut kerätty talteen ja tutkittavaksi tehtaalle, vai hävitetty suoraan esimerkiksi murskaamalla.

Selvityksessä ei tullut esille yhtäkään paloa, jossa Renault olisi ollut osallisena, mikä voi selittyä liikenteessä olevien ajoneuvojen vähäisellä määrällä. Renault käyttää kuitenkin NMC-kemiaa ja kunnostaa akkuja kuten muutkin valmistajat. Selvityksessä ei myöskään havaittu Suomesta yhtäkään Teslan akkupalotausta, vaikka ajoneuvoja on liikenteessä suuri määrä. Toisaalta Tesla on ainoa

sähköautoihin keskittynyt autonvalmistaja ja tuli aikanaan markkinoille rytinällä ja pidemmälle kehitellyillä akkuratkaisuilla pakottaen muut valmistajat kehittämään ratkaisuja nopeasti. Tämän työn puitteissa ei saatu vastauksia siihen, olisiko kennotyypeillä, kemioilla tai jollakin tietyllä ratkaisulla vaikutusta akun syttymiseen.

Hybridiauto on yhä useammin palossa mukana, mikä voi selittyä sillä, että yhä useammassa autossa on jonkinlainen sähkövoimajärjestelmä. Kuitenkin edelleen polttomoottoriautot syttyvät useammin kuin sähköajoneuvot, ja useimmin hybridiajoneuvossa palo on lähtenyt muusta kuin korkeajännitekomponentista. Ladattavien sähköajoneuvojen spektri on siis laajentunut, eivätkä palotilastot oikeastaan ole enää suoraan vertailukelpoisia. Vertailuun tulisi tarkentaa, onko palon syynä korkeajännitejärjestelmä vai jokin muu järjestelmä. Muun sähköjärjestelmän palotapauksia pitäisi käsitellä kolmantena kategoriana, koska järjestelmät ovat pitkälti samanlaisia kaikissa ajoneuvoissa käyttövoimasta riippumatta. Eli ei enää riitä erotella paloja ajoneuvon käyttövoiman mukaan, vaan tarkasteluun tarvitaan tarkempia tietoja.

Sähköautokanta on vielä varsin tuoretta, ja suurin osa tieliikenteessä olevista ladattavista sähköajoneuvoista on edelleen alle 5-vuotiaita. Siten sähköajoneuvojen kolaritilastoja tai sähköajoneuvon ikääntymisen vaikutusta akkupaloihin ei ole mahdollista arvioida. Vertailukelpoista historiallista dataa ei siis ole vielä saatavilla, eikä sellaista dataa todennäköisesti ole tarkoitus edes yleisesti kerätä.

6.5 Syttymissyistä

Ladattavien sähköautojen paloista ei yleensä selviä syttymissyistä. Pelastuslaitoksen Pronto-rekisterin tiedoista ei tutkijan tunnuksilla saa selville myöskään olosuhteita, kuten sitä onko palo syttynyt kolarin seurauksena, tai minkä tyyppinen palo on ollut kyseessä, vai onko se jo sammunut pelastushenkilökunnan saapessa paikalle. Lisäksi kirjaukset voivat olla epätarkkoja, puutteellisia ja virheellisiä. Arviot sähköautopaloista ovat siis varsin epätarkkoja, mutta suunta ja

suuruusluokka on selkeä. Akkupaloja sattuu niin harvoin, ettei tilastojen perusteella voida tehdä johtopäätöksiä siitä, että kolari lisäisi akkupalon riskiä.

Akkupalo voi johtua monista syistä. Useimmissa sattuneista tapauksista historia ei ollut tiedossa, mutta pääasiassa onnettomuusajoneuvot olivat vain muutamia vuosia vanhoja, mikä vähentää epäilyistä siitä, että ajoneuvolla olisi ollut kolari- tai korjaushistoriaa. Samat valmistusvirheet ja epäpuhtaudet ovat kennossa siitä huolimatta, onko se ollut aiemmin kolarissa vai ei. Yhtä lailla kennon hengittäminen voi lisätä paloriskiä, kuin myös ohjelmiston virhe, joka mahdollistaa ylilatauksen.

Jatkotutkimuksen aiheena voisi olla tutkia akkupalojen syttymissyitä, koska tähän työhön kerätyistä tiedoista ei voida muodostaa edes kunnollista taulukkoa, saati matriisia siitä, mikä on johtunut kulumisesta, mikä valmistusvirheestä, mikä väärinkäytöstä ja mikä ulkoisesta tekijästä. Kennojen systemaattisen vaurioitumisen tutkimiseksi sen sijaan pitäisi tehdä kokeellisia törmäytyksiä ja koe-polttoja, ja tutkia kennoja tietokonetomografialla, koska olemassa olevan datan perusteella ei voida tutkia kennojen todellista syttymistä.

6.6 Päätelmä

Onko moduuli ehjä, jos autolla pystyy ajamaan, onkin hyvä kysymys. Millä tavoin määritellään ehjä, kun akkukenno ikääntyy luonnostaankin?

Alun perin tähän työhön oli tarkoitus kerätä todellista dataa, todellisista onnettomuuteen joutuneista sähkö- ja hybridiajoneuvoista, mutta kumppanin vetäytyessä yhteistyöstä jouduttiin jättämään kyseinen osio pois. Mikäli törmäysdata saataisiin kerättyä ajoneuvoista, olennaisia analysoitavia ja verrattavia tietoja olisivat mm. kiihtyvyyssäikäykäykä, jota voitaisiin verrata tyyppitestiin huippukiihtyvyyksiin. Mikäli huippukiihtyvyys törmäyksessä ylittäisi 50 g 11 ms:ssa, joka on UN nro. 38.3:n iskutestin mukainen vähimmäiskestävyysraja yli 12 kg painaville akuille, akku hylättäisiin.

Akun käyttöhistoriaparametreja analysoimalla voitaisiin tehdä johtopäätöksiä kennon riskiprofiilista. Kuten uusiokäyttöä koskevissa standardeissakin painotetaan, akkujen uudelleenkäytön tulisi perustua tietoon siitä, ettei kennon käyttörajoja ole ylitetty. Merkittävimmät vauriomekanismit liittyvät tämän työn selvityksen mukaan kemiallisiin muutoksiin kennon sisällä. Akun uudelleenkäytettävyyden arvioimiseksi voitaisiin hyödyntää tämän työn tuloksena luotua prosessia, joka lähtee ajoneuvon visuaalisista tarkastuksista ja etenee syvemmälle kennon mittauksiin ja analysointiin.

Karkea prosessi sisältäisi seuraavat tarkastukset:

- visuaalinen tarkastus ulkoisten muodonmuutosten varalta
- airbagien laukaisun tila
- turvavyönkirstimien ja pyrosulakkeen laukaisun tila
- aistinvarainen tarkastus vuotojen ja äänien varalta
- karanteeniaika (esim. 1 vk) ja akun lämpötilan mittaus ja seuranta
- ajoneuvon itsediagnostiikka (myös ladatessa)
- akunhallinnan diagnostiikkadatasta laskettu SOH
- kennojännite-erot ja eristysvastus
- huippukiihtyvyys törmäyksessä (jos tieto saatavilla)
- akun eliniän aikaiset lämpötilarajojen ylitykset
- eliniän aikainen käyttöhistoria ja käyttöprofiili, kuten lataukset, säilytys ja ajotyylit.

Mikäli akku purettaisiin kenno- tai moduulitasolle, voitaisiin kuntoa tutkia tarkemmin seuraavin menetelmin:

- visuaalinen ja aistinvarainen tarkastus
- lämpötilan seuranta uudelleen
- syklittäminen yhden tai useamman lataus- ja purkusyklin verran korkeilla virroilla
- toiminnan vertailu dataan tai tunnettuun samantasoiseen kennoon/moduuliin
- SOH-arvon ja kapasiteetin laskeminen kuormittamalla
- itsepurkautumisen analysointi
- impedanssispektroskopia kontaktivastusten määrittämiseksi

- CT-kuvaus murtumien havaitsemiseksi.

Prosessissa voidaan edetä niin syvälle akun tutkintaan kuin on tarpeen ja taloudellisesti järkevää, ja katkaista prosessi akun hylkäämiseen, mikäli tarvittavia tietoja ei ole saatavilla tai tarkastelussa tehdään kriittisiä havaintoja. Prosessi on kaivattu edistysaskel käytettyjen akkujen luokitteluksi, mutta raja-arvot ja ehdot vaativat vielä tarkentamista.

Tärkeänä havaintona oli, että pelkkä tavanomainen törmäys ei aiheuttaisi kennoihin sellaisia merkittäviä vaurioita, jotka voisivat lisätä akkupalon riskiä. Vauriot ovat kuitenkin mahdollisia, mutta suoran palovaaran sijaan ne lähinnä kiihdyttäisivät akun normaalia ikääntymistä ja kapasiteetin laskua. Samankaltaisia vaurioita syntyy myös normaalikäytössä, joten on lähinnä huonoa tuuria, tai seuraus akunhallinnan, valvonnan ja jäähdytyksen epäonnistumisesta, jos akku syttyy palamaan.

Ei liene taloudellisesti järkevää lähteä tekemään tutkimusta ja ennusteita siitä, mitä kennon sisällä voisi mahdollisesti tapahtua, koska todellista dataa ja tarkempia tietoja ei ole saatavilla. Ollaan siis tilanteessa, jossa mahdollista dataa täytyy alkaa systemaattisesti keräämään, jotta myöhemmin voitaisiin tehdä joihinkin päätöksiä törmäyksen mahdollisesta vaikutuksesta paloriskiin.

Suurempi huoli nousee siitä, mitä tapahtuu ihmisen operoidessa akun sisällä. Epäammattimainen korjaus tai työvirhe voivat johtaa tuhoisiin seurauksiin. Akkukotelossa voi vallita myös tarkoin määritetty ilmasto, joka avatessa muuttuu ja kotelon sisään pääsee normaalista huoneilmasta epäpuhtauksia ja kosteutta. Puhtaat, ammattimaiset ja akkukorjauksiin suunnitellut korjausolosuhteet ja tilat, sekä pätevä ja kokenut henkilökunta, ovat välttämättömiä turvallisen akkukorjauksen tekemiseen niin työn tekijän kuin ajoneuvon käyttäjän näkökulmasta. Korjaus olisi syytä aina dokumentoida tarkasti ja kirjata mitä on tehty, kuka on tehnyt, miten ja milloin on tehty, ja miksi korjausta lähdettiin tekemään.

Riskiakkujen valvontaa ja seurantaan pitäisi siis pystyä kehittämään ja tarkentamaan, jotta tarpeellista dataa pystyttäisiin keräämään ja akun toimintaa seuraamaan. Uusi akkuasetus ja akkupassi osaltaan vastaavat tähän tarpeeseen

vaatimalla yksityiskohtaisempia tietoja kerättäväksi ja tallennettavaksi. Tämä insinöörityö toimii kattavana selvityksenä alan standardeihin sekä tarjoaa ajan-kohtaisen katsauksen ladattavien sähköajoneuvojen akkupaloihin. Työ toimii pohjana akkujen uudelleenkäyttöprosessin kehittämiseksi.

Kunnostetuille akuille pitäisi mahdollisesti laatia erillinen seurantaohjelma, jolla dataa kerättäisiin, jotta riski pystyttäisiin tunnistamaan ajoissa ja poistamaan vikaantunut akku käytöstä ennen kuin suurempaa vahinkoa pääsee tapahtumaan. Akkuun voitaisiin esimerkiksi asentaa lisäantureita tilan seurantaan, ja vahinkojen minimoimiseksi esimerkiksi akkuun asennettava kaasunilmaisim, mihin uudemmissa autoissa E-sääntö nro. 100:n mukainen vaatimus varoituksesta jo suuntaa. Erityisolosuhteet, kuten pikalataus ja käyttö kylmissä olosuhteissa, vaurioittavat akkukennoja joka tapauksessa, joten ikääntyneen akun eliniän pidentämiseksi olisi syytä välttää tällaisia olosuhteita muutenkin, oli akulla kolarihistoriaa tai ei.

Lähteet

2011 Nissan Leaf SV. Verkkoaineisto. EVSpecifications. <<https://www.evspecifications.com/en/model/fe9f1>>. Luettu 24.3.2026.

2017-2023 Model 3 Service Manual. Verkkoaineisto. Tesla. <<https://service.tesla.com/docs/Model3/ServiceManual/en-us/GUID-8CBDB47F-0D3A-4827-AB98-982A92234D79.html>>. Luettu 10.3.2026.

49 CFR 571.305a. 2004. Electric-powered vehicles: Electric powertrain integrity; mandatory applicability begins on September 1, 2027. National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Department of Transportation. <<https://www.ecfr.gov/current/title-49/subtitle-B/chapter-V/part-571/subpart-B/section-571.305a>>.

Agatie, Cristian. 2022. Salvaged Teslas Will Be Allowed Back on the Supercharger Network, but There's a Fine Print. Verkkoaineisto. Autoevolution. <<https://www.autoevolution.com/news/salvaged-teslas-will-be-allowed-back-on-the-supercharger-network-but-there-s-a-fine-print-203562.html>>. Luettu 17.2.2026.

Ajoneuvojen määräaikaiskatsastuksen arvosteluperusteet. 2022. TRAFICOM/423528/03.04.03.00/2020.

Ala-Lipasti, Joonas. 2021. Sähköauton latauspisteen sekä akkupalon huomiointi sähkösuunnittelussa. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Anonyymi 1. 2025. Keskustelu 5.12.2025.

Anonyymi 2. 2025. Keskustelu 12.12.2025.

Anonyymi 3. 2026. Keskustelu 9.1.2026.

Anonyymi 4. 2026. Keskustelu 1.3.2026.

Anonyymi 5. 2026. Sähköpostikeskustelu 16.3.2026.

ANSI/CAN/UL 1974. 2023. Evaluation for Repurposing or Remanufacturing Batteries. National Standard of Canada (NSC).

ANSI/CAN/UL 2849. 2022. Electrical Systems for eBikes. National Standard of Canada (NSC).

AR47.70-P-0017-02A. 2022. Check housing of lithium-ion battery. Mercedes-Benz AG. Yrityksen sisäinen aineisto. Diagno Finland Oy.

AR47.70-P-0017-02A. 2025. Check housing of lithium-ion battery. Yrityksen sisäinen aineisto. Mercedes-Benz AG.

AR47.70-P-0017-02A. 2023. Check housing of lithium-ion battery. Mercedes-Benz AG. Verkkoaineisto. Traficom. <<https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/file/Mercedes-Benz%20Litiumioniakkujen%20tar-kastus%20ar4770p001702a.pdf>>. Luettu 28.2.2026.

Asetus akuista ja paristoista ja jäteakuista ja -paristoista. 2023. 1542/12.7.2023.

Audi e-Tron. Verkkoaineisto. Autotalli.com. <<https://www.autotalli.com/sahkoautovertailu/sahkoauto/1209/audi/e-tron/50-quattro>>. Luettu 20.3.2026.

Autio, Heikki. 2025. Head of Technical and Field Support, Hedin Automotive Oy, Helsinki. Keskustelu 16.12.2025.

Battery Control System High Voltage Battery Handling Guide. Yrityksen sisäinen aineisto. Alldata. <https://app.alldata.com/alldata/vehicle/home#/vehicle/Vehicle_139239_AE_2021_E/engine/HYUNEngine_110350/model/Model_HYUNDAI_IONIQ_AE_electric/manufacture/Manufacturer_183/itypes/ALLDATA_Classic_InfoType_377/components/ALLDATA_Classic_Component_9318/articles/eu-hyionev_aeev-hb-10-1700-none-104-none-2021_e2-2021-ae22-shop_html/type/text/html>. Luettu 11.3.2026.

Bonnici, David & Stevens, Mike. 2024. It's 2024, how many cars are there in the world? Verkkoaineisto. Whichcar. <[https://www.whichcar.com.au/news/how-many-cars-are-there-in-the-world#:~:text=In%202024%2C%20the%20number%20of%20cars%20in,replacing%20destroyed%20\(shredded%2C%20crushed%20and/or%20recycled\)%20cars.>](https://www.whichcar.com.au/news/how-many-cars-are-there-in-the-world#:~:text=In%202024%2C%20the%20number%20of%20cars%20in,replacing%20destroyed%20(shredded%2C%20crushed%20and/or%20recycled)%20cars.>)>. Luettu 25.2.2026.

Braun, Martin. 2010. VW Touareg V6 TSI Hybrid: Test. Verkkoaineisto. Autobild. <<https://www.autobild.de/artikel/vw-touareg-v6-tsi-hybrid-test-1247402.html>>. Luettu 20.3.2026.

BU-205: Types of Lithium-ion. 2023. Verkkoaineisto. Battery University. 8.12.2023 <<https://www.batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion/>>. Luettu 13.2.2026.

CD-23-16-001. 2023. Tesla High Voltage Battery Shipping Evaluation Model S, Model X, Model 3, Model Y. Verkkoaineisto. Tesla. <https://service.tesla.com/docs/ServiceBulletins/External/CD/CD-23-16-001_HV_Battery_Shipping_Evaluation_SX3Y.pdf>. Luettu 20.3.2026.

CD-24-16-001. 2024. Instructions for Packing Critically Damaged HV Battery Packs in UN Containers. Verkkoaineisto. Tesla. <https://service.tesla.com/docs/ServiceBulletins/External/CD/CD-24-16-001_Instructions_for_Packing_Critically_Damaged_HV_Battery_Packs_in_UN_Containers.pdf>. Luettu 20.3.2026.

Chombo, Pius Victor; Laonual, Yossapong; Wongwises, Somchai. 2021. Lessons from the Electric Vehicle Crashworthiness Leading to Battery Fire. Energies 14, no. 16:4802. <<https://doi.org/10.3390/en14164802>>.

Crash Protection Frontal Impact. 2025. Verkkoaineisto. Euro NCAP. <<https://www.euroncap.com/media/91700/euro-ncap-protocol-crash-protection-frontal-impact-v11.pdf>>. Luettu 6.2.2026.

Crash Protection Rear Impact. 2025. Verkkoaineisto. Euro NCAP. <<https://www.euroncap.com/media/91701/euro-ncap-protocol-crash-protection-rear-impact-v11.pdf>>. Luettu 6.2.2026.

Crash Protection Side Impact. 2025. Verkkoaineisto. Euro NCAP. <<https://www.euroncap.com/media/91702/euro-ncap-protocol-crash-protection-side-impact-v11.pdf>>. Luettu 6.2.2026.

Doughty, Daniel & Crafts, Chris. 2006. FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications. SANDIA REPORT. SAND2005-3123. Sandia National Laboratories. <<https://www.osti.gov/servlets/purl/889934/>>.

E-sääntö nro. 100. 2021. Yhdenmukaiset vaatimukset, jotka koskevat ajoneuvojen hyväksyntää sähköiseen voimalaitteeseen sovellettavien erityisvaatimusten osalta 2021/2190. Euroopan unionin virallinen lehti 15.12.2021.

Erämaa, Ida. 2025. Laurin sähköauton takapenkki ”käytännössä räjähti” – Jos lapset olisivat istuneet turvaistuimissa, mitään ei olisi ollut tehtävissä. Verkkoaineisto. Iltalehti. <<https://www.iltalehti.fi/autouutiset/a/5a936eb9-9125-470d-9cb8-3b7e5c95c40e>>. Luettu 10.3.2026.

Evaluate health with CeLLife Lite. 2025. Verkkoaineisto. CeLLife. <<https://www.cellife.fi/cellife-lite-diagnostics-solution-for-ev-module-recycling>>. Luettu 18.2.2026.

General information on assessment of accident vehicles. Yrityksen sisäinen aineisto. Volkswagen AG. Alldata. <https://app.alldata.com/alldata/vehicle/home#/vehicle/Vehicle_142253_E21_2023/engine/VWEngine_EBJA/model/Model_VW_ID4/manufacturer/Manufacturer_121/itypes/ALLDATA_Classic_InfoType_15/components/ALLDATA_Classic_Component_3748/articles/eu-vwid4e21-en-GB-V-K0059261320_original-20251210093459239_html/type/text/html>. Luettu 10.3.2026.

Global Electric Vehicle Outlook. 2025. Verkkoaineisto. IEA.
<<https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>>. Luettu 25.2.2026.

Grekula, Vesa. 2025. Henkilöauto paloi kuutostiellä Lappeenrannassa – pelastuslaitos upotti hybridi-auton sammutuskonttiin. Verkkoaineisto. Yle.
<<https://yle.fi/a/74-20165126>>. Luettu 28.3.2026.

Haapala, Jesse. 2025. Yrittäjä, Kokkolan autohuolto, Kokkola. Keskustelu 11.12.2025.

Heikkilä, Jari. 2024. Hybridi-auto roihahti liekkeihin Loimaalla: Henkilö alkoi sammuttaa painepesurilla. Verkkoaineisto. MTV Uutiset. <<https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/hybridi-auto-roihahti-liekkeihin-loimaalla-henkilo-alkoi-sammuttaa-painepesurilla/9044724>>. Luettu 7.3.2026.

Heiska, Juho. 2025. Tutkimus ja kehittämispäällikkö, Seinäjoen Ammattikorkeakoulu, Seinäjoki. Keskustelu 4.12.2025.

IEC 62933-4-4. 2023. Electrical energy storage (EES) systems – Part 4-4: Environmental requirements for battery-based energy storage systems (BESS) with reused batteries. The International Electrotechnical Commission.

IEC 63330-1. 2024. Repurposing of secondary batteries – Part 1: General requirements. The International Electrotechnical Commission.

IEC 63338. 2024. General guidance on reuse and repurposing of secondary cells and batteries. The International Electrotechnical Commission.

ISO 6469-1. 2019. Electrically propelled road vehicles – Safety specifications. Part 1: Rechargeable energy storage system. The International Organization for Standardization.

ISO 6469-1 AMD.1. 2022. Electrically propelled road vehicles – Safety specifications – Part 1: Rechargeable energy storage system (RESS) AMENDMENT 1: Safety management of thermal propagation. The International Organization for Standardization.

ISO 16750-3. 2012. Road vehicles – Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment – Part 3: Mechanical loads. The International Organization for Standardization.

Jaakkola, Heikki. 2025. Teknologijaohdaja, Akkuauto Finland Oy, Pirkkala. Keskustelu 9.12.2025.

Jaguemont, Joris & Bardé, Fanny. 2023. A critical review of lithium-ion battery safety testing and standards. Applied thermal engineering. Vol.231, p.121014, Article 121014.

Jussila, Janne. 2025. Sähköautosta syttynyt tulipalo levisi rivitaloon. Verkkoaineisto. Helsingin Sanomat. <<https://www.hs.fi/suomi/art-2000011326651.html>>. Luettu 8.3.2026

Karismus, Heikki. 2025. Sähköisen liikenteen tilannekatsaus – Q2/2025. Sähköinen liikenne ry. <<https://teknologiateollisuus.fi/emobility/wp-content/uploads/sites/9/2025/08/2025-Q2-SahkoinenLiikenne-tilannekatsaus-2025-08-27-jaettava.pdf>>. Luettu 6.1.2026.

Keinänen, Jarmo. 2023. Katsaus kolariautojen akkujen turvallisuuteen uusioikätyössä. Yrityksen sisäinen aineisto. Diagno Finland Oy.

Keski-Korpela, Nina. 2025. Tampereella parkkihallipalossa syttyi ensimmäisenä Audin hybridi, mutta tarkka syy on epäselvä. Yle. <<https://yle.fi/a/74-20187403>>. Luettu 30.12.2025.

Ketola, Johannes & Kokki, Esa. 2019. Pelastustoimen taskutilasto 2014–2018. Verkkoaineisto. Pelastusopisto. <https://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D1_2019.pdf>. Luettu 12.1.2026

Kiiski, Timo. 2023. Teslan akun korjaus – Akkuauto Finland korjaa akkutakuun loppuessa. Kaasujalka. <<https://kaasujalka.fi/2023/05/05/teslan-akun-korjaus-akkuauto-finland-korjaa-akkutakuun-loppuessa/>>. Luettu 22.2.2026

Lahti, Petri. 2025. Tekninen päällikkö, Veho Oy, Vantaa. Keskustelu 5.12.2025.

Lai, Xin; Yao, Jian; Jin, Changyong; Feng, Xuning; Wang, Huaibin; Xu, Chengshan & Zheng, Yueiju. 2022. A Review of Lithium-Ion Battery Failure Hazards: Test Standards, Accident Analysis, and Safety Suggestions. Batteries. Vol. 8.

Lankila, Touko. 2026. Project Engineer, Research and Advanced Engineering, Valtra Oy Ab. Keskustelu. 29.1.2026.

LG Chem E63B. 2022. Verkkoaineisto. Batemo. <<https://www.evspecifications.com/en/model/0d3a376>>. Luettu 11.3.2026.

Linja-aho, Vesa. 2023. Perceived and actual fire safety – case of hybrid and electric vehicle fires in Finland 2015–2023. WSEAS TRANSACTIONS ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Vol 9, s. 1313–1328.

Litiumioniakkujen harvinaiset metallit halutaan kiertoon, mutta osa akuista on vailla kierrätysratkaisuja – miten EU:n tiukentuvien kierrätysvaatimusten käy? 2023. Akkukierrätys Pb. Verkkoaineisto. <<https://akkukierratyspb.fi/litiumioniakkujen-harvinaiset-metallit-halutaan-kiertoon-mutta-osa-akuista-on-vailla-kierrätysratkaisuja-miten-eun-tiukentuvien-kierrätysvaatimusten-kay/>>. Luettu 18.2.2026.

Liukkonen, Heidi & Loponen, Timo. 2023. Pelastustoimen taskutilasto 2018–2022. Verkkoaineisto. Pelastusopisto. <https://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D3_2023.pdf>. Luettu 12.1.2026.

Liukkonen, Heidi & Loponen, Timo. 2025. Pelastustoimen taskutilasto 2020–2024. Verkkoaineisto. Pelastusopisto. <https://info.smedu.fi/kirjasto/Sarja_D/D2_2025.pdf>. Luettu 12.2.2026.

Lowery, Lurah. 2022. Tesla S catches fire 3 weeks after collision caused major damage. Verkkoaineisto. Repairer Driven News. <<https://www.repairerdrivennews.com/2022/06/27/tesla-s-catches-fire-3-weeks-after-collision-caused-major-damage/>>. Luettu 7.3.2026.

Markkanen, Markus. 2016. Sähköautojen akkujen kiertotalous. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Aaltodoc-tietokanta.

Markkanen, Markus. 2025. Tekninen asiantuntija, Autotuoajat ja -teollisuus ry, Helsinki. Keskustelu 18.12.2025.

Mikkonen, Mikael. 2025. Mercedes-Benzillä maailmanlaajuinen takaisinkutsu – koskee myös Suomea. Verkkoaineisto. MTV Uutiset. <<https://www.mtvuutiset.fi/artikkeli/mercedes-benzilla-maailmanlaajuinen-takaisinkutsu-koskee-myos-suomea/9200728>>. Luettu 7.3.2026.

Mikolajczak, Celina; Kahn, Michael; White, Kevin; Long, Richard Thomas. 2011. Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment. New York: Springer.

Mikä on huippukerroin värähtelyanalyysissä? 2025. Verkkoaineisto. Vibromera. <<https://vibromera.eu/fi/glossary/crest-factor/>>. Luettu 6.2.2026.

Mitä standardi tarkoittaa? SFS Suomen Standardit ry. Verkkoaineisto. <<https://sfs.fi/standardeista/mika-on-standardi/>>. Luettu 13.1.2026.

Model S Service Manual. Verkkoaineisto. Tesla. <<https://service.tesla.com/docs/ModelS/ServiceManual/en-us/GUID-994D92CC-0C6D-4528-A63E-70FACCD1E185.html>>. Luettu 10.3.2026.

Moderate Overlap Crashworthiness Evaluation 2.0. 2025. Rating Guidelines. Version 2. Verkkoaineisto. IIHS. <https://www.iihs.org/media/c82c7d8d-86ea-416a-91c3-74bb9d179086/NjhMnw/Ratings/Protocols/current/Moderate_2.0_rating_guidelines.pdf>. Luettu 6.2.2026.

Moderate Overlap Frontal Crashworthiness Evaluation 2.0. 2025. Crash Test Protocol. Version 2. Verkkoaineisto. IIHS. <https://www.iihs.org/media/0e3c2eb2-f3ef-4340-9f1f-e8b041526d8b/9U5siw/Ratings/Protocols/current/Moderate_overlap_2.0_test_protocol.pdf>. Luettu 6.2.2026.

Niemistö, Elina. 2024. Omakotitalo oli vaarassa, kun hybridi-auto syttyi palaamaan autokatoksessa Kauhajoella. Verkkoaineisto. Yle. <<https://yle.fi/a/74-20128102#:~:text=Talon%20omistaja%20ja%20naapuri%20hoitivat%20alkusammutuksen%20ja,loput%2C%20kun%20latauksessa%20oleva%20hybridi-auto%20paloi%20autokatoksessa>>. Luettu 28.3.2025.

OF54.10-P-3000-01E. 2025. Korkeajänniteakkujen kuljetuskelpoisuuden analyysilehti, lomake. Yrityksen sisäinen aineisto. Mercedes-Benz AG.

Okko, Laura. 2025. K-U tavoitti Keravalla palaneen sähköauton omistajan – "hengenvaarallinen tilanne". Keski-Uusimaa. Verkkolehti. <<https://www.keskiuusimaa.fi/paikalliset/8900530>>. Luettu 30.12.2025.

Pan, Lee. 2025. What causes capacity loss of lithium battery explained. Verkkoaineisto. Large Battery. <<https://www.large-battery.com/fi/blog/what-causes-capacity-loss-of-lithium-battery-explained/>>. Luettu 2.2.2026.

Panasonic Tesla Model 3. 2020. Verkkoaineisto. Batemo. <https://www.batemo.com/products/batemo-cell-explorer/panasonic-tesla-model-3/#cell_data>. Luettu 10.3.2026.

Pelastustehtävät onnettomuusselosteen mukaan. Muuttujina vuosi, onnettomuustyyppi, arvio tulipalon syystä. 2026. Verkkoaineisto. Pelastusopisto. <<https://prontonet.fi/Pronto3/pronto3.htm>>. Luettu 3.3.2026.

Peltonen, Meri. 2024. Sähköautojen akkujen pohjavauriot. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus tietokanta.

Penttinen, Miska. 2025. Tekninen asiantuntija, Diagno Finland Oy, Espoo. Keskustelu 28.11.2025.

Perämäki, Pertti. 2024. Hybridi-Volvon matka päättyi upotuslavalle – "Peittäminen ei sammuta litiumakkupaloa, mutta sillä kyetään hallitsemaan savua". Verkkoaineisto. Karjalainen. <<https://www.karjalainen.fi/paikalliset/7722008>>. Luettu 7.3.2026.

Piitulainen, Tommi. 2025. Tekninen kouluttaja, Nordic Automotive Services Oy, Vantaa. Keskustelu 11.12.2025.

Press releases. 2026. InReview 2025: Euro NCAP celebrates landmark year with record-setting safety performance. Verkkoaineisto. EuroNCAP. <<https://www.euroncap.com/en/press-media/press-releases/inreview-2025-euro-ncap-celebrates-landmark-year-with-record-setting-safety-performance/>>. Luettu 7.2.2026.

Quarantine arrangements. Yrityksen sisäinen aineisto. Volkswagen AG. <https://app.alldata.com/alldata/vehicle/home#/vehicle/Vehicle_142253_E21_2023/engine/VWEngine_EBJA/model/Model_VW_ID4/manufacture/Manufacturer_121/itypes/ALLDATA_Classic_InfoType_15/components/ALLDATA_Classic_Component_3748/articles/eu-vwid4e21-en-GB-V-K0059261320_original-20251210093459551_html/type/text/html>. Luettu 10.3.2026.

Rajaharju, Joni. 2025. Kehityspäällikkö korvauskumppanuudet, LähiTapiola, Pirkanmaa. Keskustelu 19.12.2025.

rds_vw_316_615_en. 2025. Volkswagen ID.4. Version 05. Verkkoaineisto. Volkswagen. <<https://rescue.euroncap.com/#/carDetails>>. Luettu 10.3.2026.

rds_vwv_536_002_de. 2020. Volkswagen Touareg R eHYBRID. Version 03. Volkswagen AG. Verkkoaineisto. <<https://rescue.euroncap.com/#/carDetails>>. Luettu 11.3.2026.

Real-life crash test. 2023. Mercedes-Benz electric vehicles are every bit as safe as all other models from the brand with the star. Verkkoaineisto. Mercedes-Benz Group. <<https://group.mercedes-benz.com/technology/innovation/development/real-life-crashtest.html>>. Luettu 13.2.2026.

Renault Zoe. Verkkoaineisto. Autotalli.com. <<https://www.autotalli.com/sahko-autovertailu/sahkoauto/1205/renault/zoe/ze50-r135>>. Luettu 24.3.2026.

Rescue & Extrication. 2025. Test and Assessment Protocol. Verkkoaineisto. Euro NCAP. <https://cdn.euroncap.com/cars/assets/euro_ncap_protocol_post_crash_v11_83a7d345b4.pdf>. Luettu 6.2.2026.

Ruffo, Gustavo. 2020. Another Tesla Model S Self-Ignites, Now In Texas: Owners Want Answers. Verkkoaineisto. InsideEVs <<https://insideevs.com/news/460502/another-tesla-model-s-fire-texas/>>. Luettu 7.3.2026.

Ruiz, V.; Pfrang, A.; Kriston, A.; Omar, N.; Van den Bossche, P.; Boon-Brett, L. 2018. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 81, s. 1427–1452.

Saarela, Olli; Airasmaa, Ilkka; Kokko, Juha; Skrifvars, Mikael; Komppa, Veikko. 2019. Komposiittirakenteet. Kevra Oy.

SAE J2464. 2009 Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing. Revision of SAE Std J2464-1999. SAE International.

SAE J2464. 2021. Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing. Revision of SAE Std J2464-1999. SAE International.

Sahraei, Elham; Meier, Joseph; Wierzbicki, Tomasz. 2014. Characterizing and modeling mechanical properties and onset of short circuit for three types of lithium-ion pouch cells. *Journal of Power Sources*. Vol. 247, s. 503–516.

SFS-EN 60068-1. 2014. Environmental testing – Part 1: General and guidance (IEC 60068-1:2013). GENELEC.

SFS-EN IEC 60068-2-27. 2008. Environmental testing – Part 2-27: Tests – Test Ea and guidance: Shock. The International Electrotechnical Commission.

SFS-EN IEC 60086-4. 2025. Primary Batteries. Part 4: Safety of lithium batteries. Suomen Standardoimisliitto. The International Electrotechnical Commission.

SFS-EN IEC 62660-2. 2019. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles –Part 2: Reliability and abuse testing. The International Electrotechnical Commission.

SFS-EN IEC 62660-3. 2022. Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles – Part 3: Safety requirements. The International Electrotechnical Commission.

SI47.70-P-0014A. 2025. Huolto-ohje: Korkeajänniteakkujen käsittely onnettomuuden jälkeen. Yrityksen sisäinen aineisto. Mercedes-Benz AG.

Side Impact Crashworthiness Evaluation 2.0. 2025. Crash Test Protocol. Version 3. Verkkoaineisto. IIHS. <https://www.iihs.org/media/43dd2426-9644-494b-a06a-691796dc342c/ZJFIBQ/Ratings/Protocols/current/test_protocol_side-2.0.pdf>. Luettu 6.2.2026.

SK On won Best of Innovation at CES 2023 Innovation Awards. 2022. Verkkoaineisto. EVSpecifications. <<https://www.evspecifications.com/en/news/18dd6d7>>. Luettu 11.3.2026.

Spielbauer, Markus; Soellner, Jonas; Berg, Philipp; Koch, Korbinian; Keil, Peter; Rosenmüller, Christian; Bohlen, Oliver; Jossen, Andreas. 2022. Experimental investigation of the impact of mechanical deformation on aging, safety and electrical behavior of 18650 lithium-ion battery cells. *Journal of Energy Storage*. Vol 55.

SRS Inspection and Component Replacement. 2025. Verkkoaineisto. Tesla. <<https://service.tesla.com/docs/Model3/ServiceManual/en-us/GUID-45F75A2C-4B2C-439C-88BC-EB28D0D16B1B.html>>. Luettu 17.2.2026.

Structural Repair Guidelines. 2025. Verkkoaineisto. Tesla. <https://service.tesla.com/docs/BodyRepair/Body_Repair_Procedures/Model_3/HTML/en-us/GUID-C73E4B36-F7F0-4CA0-87F4-705A45D7D788.html>. Luettu 10.3.2026.

Takaisinkutsu: Audi A6, A7, Q5. 2025. Verkkoaineisto. Traficom. <<https://takaisinkutsut.traficom.fi/recall/18079>> Luettu 19.2.2026.

Takaisinkutsu: Audi e-Tron. 2024. Verkkoaineisto. Traficom. <<https://takaisinkutsut.traficom.fi/recall/17115>> Luettu 19.2.2026.

Takaisinkutsu: Volvo V60. 2025. Verkkoaineisto. Traficom. <<https://takaisinkutsut.traficom.fi/recall/17679>> Luettu 29.3.2026.

Takala, Sami. 2025. Duudsonien Jukka Hildénin auto syttyi palamaan kesken ajon Lauttasaarella. Verkkoaineisto. Helsingin Sanomat. <<https://www.hs.fi/helsinki/art-2000011011466.html>>. Luettu 7.3.2026.

Tesla Model S. Verkkoaineisto. Autotalli.com. <<https://www.autotalli.com/sahko-autovertailu/sahkoauto/1207/tesla/model-s/performance>>. Luettu 20.3.2026.

TN-14-16-004. 2025. Inspect the Model S and Model X (Pre-2021) HV Battery for Underside Damage. R8. Verkkoaineisto. Tesla. <https://service.tesla.com/docs/ServiceBulletins/External/TN/TN-14-16-004_Inspect_MS_and_MX_HV_Battery_for_Underside_Damage_R8.pdf>. Luettu 10.3.2026.

TN-18-00-001. 2025. Unsupported Vehicle Policy. R5. Verkkoaineisto. Tesla. <https://service.tesla.com/docs/ServiceBulletins/External/TN/TN-18-00-001_Unsupported_Vehicle_Policy_R5.pdf>. Luettu 17.2.2026.

UN 38.3. 2023. Manual of Tests and Criteria, ST/SG/AC.10/11/Rev.8. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).

UN GTR No. 20. 2018. Electric Vehicle Safety (EVS). ECE/TRANS/180/Add.20 United Nations.

UN GTR No. 22. 2022. In-vehicle Battery Durability for Electrified Vehicles. ECE/TRANS/180/Add.22. United Nations.

UN Regulation No. 94. 2022. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a frontal collision. E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.93/Rev.4. United Nations.

UN Regulation No. 95. 2023. Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the protection of the occupants in the event of a lateral collision. E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.94/Rev.4. United Nations.

UN Regulation No. 137. 2023. Uniform provisions concerning the approval of passenger cars in the event of a frontal collision with focus on the restraint system. E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.136/Rev.2. United Nations.

Uotila, Millamari. 2019. Latauksessa ollut sähköauto syttyi palamaan Lahdessa. Verkkoaineisto. Etelä-Suomen Sanomat. <<https://www.ess.fi/paikalliset/24720>>. Luettu 10.3.2026.

Uudelleenvalmistus pidentää akkujen käyttöikää. 2023. Verkkoaineisto. Akkukierrätys Pb. <<https://akkukierratyspb.fi/uudelleenvalmistus-pidentaa-akkujen-kayttoikaa/>>. Luettu 18.2.2026.

VCC-464307-8. Checking High Voltage Battery after vehicle collision - (B4204T34 / B4204T35). Yrityksen sisäinen aineisto. Alldata. <http://app.alldata.com/alldata/vehicle/home#/vehicle/Vehicle_130588_V246_2019/engine/VOLVOEngine_93833/model/Model_VOLVO_XC60_V246/manufacturer/Manufacturer_125/itypes/ALLDATA_Classic_InfoType_376/components/ALLDATA_Classic_Component_6978/articles/eu-vv19xc6018u-2019-0900c8af89b0a6a8_html/type/text/html>.

Volvo - sähköauton akut. Verkkoaineisto. Volvo Cars. <<https://www.volvocars.com/en-th/cars/electrification/battery/>>. Luettu 7.3.2026.

Vuorilehto, Kai. 2026 Tiedejohtaja, Skeleton Technologies Oy, Helsinki. Keskustelu 2.1.2026.

Wennberg, Iiro. 2025. Paloiesimies, Pirkanmaan pelastuslaitos, Tampere. Keskustelu 8.12.2025.

What is thermal runaway? 2021. Verkkoaineisto. EV FireSafe. <<https://www.evfiresafe.com/ev-fire-what-is-thermal-runaway/>>. Luettu 10.2.2026.

Whiplash Prevention Evaluation. 2025. Test Protocol. Version 1. Verkkoaineisto. IIHS. <https://www.iihs.org/media/f3cb3842-ddcb-4c1f-ae70-012c06945607/Mve8-w/Ratings/Protocols/current/Whiplash_prevention_evaluation_test_protocol_Dec2025.pdf>. Luettu 6.2.2026.

Who we are? 2026. Verkkoaineisto. IIHS. <<https://www.iihs.org/about>>. Luettu 8.2.2026.

Xia, Yong; Chen, Guanhua; Zhou, Qing; Shi, Xiangnan; Shi, Fangyan. 2017. Failure behaviors of 100 % SOC lithium-ion battery modules under different impact loading conditions. Engineering Failure Analysis. Vol. 82, s. 149-160.

Yan, Yi; Jaeger, Nicolas S.B, Spearrin, Mitchel R. 2025. Hydrogen fluoride emissions from lithium-ion batteries during induced thermal runaway via in situ laser spectroscopy. *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 42.

Ylikoski, Heikki. 2025. Tutkimus VAG-konsernin MEB-alustan akuista. Opinnäytetyö. Centria-ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.

Zhu, Juner; Koch, Marco Miguel; Lian, Junhe; Li, Wei; Wierzbicki, Tomasz. 2020. Mechanical Deformation of Lithium-Ion Pouch Cells under In-Plane Loads-Part I: Experimental Investigation. *Journal of the Electrochemical Society*. Vol. 167.