



Roni Kilpeläinen

# Sähköpotkulaudan suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

9.4.2024

# Tiivistelmä

Tekijä: Roni Kilpeläinen  
Otsikko: Sähköpotkulaudan suunnittelu  
Sivumäärä: 46 sivua  
Aika: 9.4.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Ajoneuvotekniikka  
Ammatillinen pääaine: Autosähkötekniikka  
Ohjaaja: Lehtori Pasi Kovanen

---

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin sähköpotkulautaa, joka täyttää lainsäädännön ja viranomaismääräysten vaatimukset, jotta sitä voi käyttää muun liikenteen seassa. Työn sisältö rajattiin suunnitteluun eikä lopullista tuotetta lähdetty valmistamaan.

Työssä selvitettiin lakivaatimukset ja -määräykset, jotka koskevat sähköpotkulautaa. Niiden pohjalta saatiin selville, millaisia komponentteja ja varusteita sähköpotkulaudassa täytyy olla. Sen jälkeen lähdettiin valitsemaan voimalinjaa, jonka ympärille runko suunniteltaisiin. Ensimmäisenä perehdyttiin erilaisiin sähkömoottoreihin ja niiden ominaisuuksiin. Lisäksi perehdyttiin akkukemialtaan erilaisiin akkuihin, joita sähköpotkulaudassa voisi käyttää. Lopuksi valittiin sähkömoottori ja akkupaketti, joiden ympärille potkulaudan runkoa lähdettiin suunnittelemaan. Lisäksi huomioitiin muut komponentit, joita sähköpotkulautaan tarvittiin. Runkoon suunniteltiin kaikki komponentit, jotta potkulaudan voisi valmistaa, sekä mitoitusta varten mallinnettiin myös muita komponentteja. Rungon kantavuus varmistettiin vielä FEA-simulaatiolla.

Työssä saatiin 3D-mallinnettua tarvittavat osat sähköpotkulaudan runkoon ja näistä osista tehtiin kokoonpano SolidWorks-ohjelmalla.

Avainsanat: sähköpotkulautaa, sähköajoneuvo, Li-ion, akku, sähkömoottori, 3D-mallinnus

---

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

## Abstract

Author: Roni Kilpeläinen  
Title: Designing an Electric Scooter  
Number of Pages: 46 Pages  
Date: 9 April 2024

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Automotive Engineering  
Professional Major: Automotive Electronics Engineering  
Supervisor: Pasi Kovanen, Senior Lecturer

---

In this thesis, an electric scooter was designed to meet the requirements of legislation and regulations, allowing its use in traffic. The scope of the work was limited to design, and the final product was not manufactured.

The study investigated the legal requirements concerning electric scooters to determine the components and equipment necessary for compliance. Subsequently, the powertrain was selected around which the frame would be designed. Initially, various electric motors and their characteristics were explored. Additionally, different battery chemistries suitable for electric scooter's battery pack were examined. Finally, an electric motor and battery pack were chosen to form the basis for designing the scooter's frame. Other components necessary for the electric scooter were also considered. All components required to manufacture electric scooter's frame were designed, and other components were modeled for dimensioning purposes. The structural integrity of the frame was further validated through FEA simulation.

The necessary parts for the electric scooter's frame were 3D modeled, and these parts were assembled using SolidWorks software.

Keywords: electric scooter, electric vehicle, Li-ion, battery, electric motor, 3D modeling

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sähköpotkulaudan vaatimukset ja lainsäädäntö	2
2.1	Ajoneuvolaki	2
2.2	Fyysiset vaatimukset ja ominaisuudet	3
3	Sähkömoottorit	3
3.1	Harjalliset DC-moottorit	3
3.2	Induktiomoottorit	7
3.3	Harjattomat PM-moottorit	8
3.4	Reluktanssimoottorit	10
3.5	Projektiin valittu sähkömoottori	13
4	Akut	15
4.1	Lyijyakut	15
4.2	Nikkeli-kadmiumakut	15
4.3	Nikkeli-metallihydridiakut	16
4.4	Litiumioniakun toimintaperiaate	16
4.5	Battery Management System	18
4.6	Litium-kobolttioksidiaakku (LCO)	20
4.7	Litium-mangaanioksidiaakku (LMO)	20
4.8	Nikkeli-mangaani-kobolttioksidiaakku (NMC)	21
4.9	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiaakku (NCA)	21
4.10	Litium-rautafosfaattiakku (LFP)	21
4.11	Litium-titanaattioksidiaakku (LTO)	22
4.12	Li-ion-akkujen vertailu	22
4.13	Projektiin valittu akkupaketti	23
5	Rungon suunnittelu	24
5.1	Ohjaus ja etuakseli	24
5.1.1	Ohjauksen laakerointi	25
5.1.2	Ohjattavuus	28
5.2	Seisoma-alusta ja taka-akseli	30

5.3	Rungon FEA-simulaatio	33
5.4	Taittomekanismi	35
5.5	Ohjaustanko	37
5.6	Valmis runko	39
6	Yhteenveto	41
	Lähteet	42

## Lyhenteet

- BLDC: *Brushless Direct Current*. Harjaton tasavirta.
- BMS: *Battery Management System*. Akunhallintajärjestelmä.
- DC: *Direct Current*. Tasavirta.
- DOD: *Depth of discharge*. Lukema, joka kertoo, kuinka paljon akkua on purettu. Esimekiksi Li-ion-akkujen sykliseksi kestävyudeksi voidaan ilmoittaa 1000 sykliä 80 % DOD, eli akku kestää 1000 sykliä, siten että akun alkuperäisestä varauksesta on purettu 80 % joka syklillä.
- FEA: *Finite Element Analysis*. Analyysi, jossa ohjelma laskennallisesti simuloi tarkasteltavan kappaleen materiaalissa tapahtuvia muutoksia.
- PM: *Permanent Magnet*. Kestomagneetti.
- SRM: *Switched Reluctance Motor*. Molemmin puolin avonapainen reluctanceansimoottori.
- SOC: *State Of Charge*. Lukema, joka kertoo akun varaustilan prosentteina.
- SynRM: *Synchronous Reluctance Motor*. Tahtireluktanssimoottori.

## 1 Johdanto

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella tieliikenteeseen soveltuva sähköpotkulauta. Projekti pidetään suunnitteluna eikä suunniteltua runkoa lähdetä valmistamaan. Tavoitteena on suunnitella potkulauta, jolla pystyy taittamaan muutamien kilometrin matkan suuntaansa yhdellä latauksella.

Sähköpotkulauta on suhteellisen uusi tuote katukuvassa, mutta sitä koskevat lait yhtä lailla kuin muita kulkuneuvoja liikenteessä. Työssä selvitetään, mitä lainsäädäntö edellyttää potkulaudalta, jotta sitä voi tieliikenteessä käyttää.

Sähköpotkulauta ja muut kevyet sähköajoneuvot ovat yleistyneet liikenteessä räjähdysmäisesti viime vuosina. Tätä ilmiötä selittää moni asia. Tuotteita on paljon runsaammin saatavilla, ja niitä löytyy joka lähtöön. Myös näiden kevyiden sähköajoneuvojen hinnat ovat tulleet reilusti alaspäin, jolloin ne tavoittavat suuremman asiakaskunnan. Yhtenä suurena tekijänä on myös polttoaineen hinnan nousu, joka kannustaa entisestään liikkumaan muilla tavoin, jolloin kevyet sähköajoneuvot tarjoavat oivan ratkaisun.

Sähköpotkulauta on erinomainen kulkuneuvo varsinkin kaupunkialueilla. Etuna sähköpotkulaudassa sähköpyörään verrattuna on, että niitä saa huomattavasti edullisemmin ja ne vievät vähemmän tilaa. Sähköpotkulauta on esimerkiksi paljon helpompi ottaa junaan tai bussiin mukaan kuin pyörä sekä sähköpotkulautaa on myös helpompi säilyttää kerrostaloasunnoissa sen pienen koon vuoksi.

## 2 Sähköpotkulaudan vaatimukset ja lainsäädäntö

Tässä luvussa käydään läpi, mitä lainsäädäntö sanoo sähköpotkulaudasta ja mihin se rinnastetaan. Selvitetään potkulaudan vaatimukset tieliikenteeseen sekä sen fyysiset vaatimukset, jotta saadaan suunniteltua tieliikenteeseen soveltuva ja toimiva kokonaisuus.

### 2.1 Ajoneuvolaki

Ajoneuvolain 29 §:ssä määritellään kevyet sähköajoneuvot, joihin sähköpotkulaudakin lukeutuu. Ne saavat kulkea enintään 25 km/h ja olla maksimissaan 1 kW:n tehoisia. Mikäli sähköpotkulaudan lakivaatimukset täyttyvät, ei sitä tarvitse ajoneuvolain 89 §:n mukaan rekisteröidä, mutta jos potkulauta kulkee moottorin avustuksella yli 25 km/h, ei se silloin ole tieliikennekelpoinen ja rinnastetaan mopoksi [1]. Tällöin laite tulisi ensin tyyppihyväksyttävä mopoksi ja sitten rekisteröidä, jos sitä haluaisi käyttää liikenteessä. Sähköpotkulaudalle tulee myös ottaa liikenevakuutus, mikäli sen nopeus ylittää 25 km/h tai moottorin teho 1 kW:n. Laitteen nopeuden rajoittaminen mekaanisesti ei myöskään poista sen vakuuttamisvelvollisuutta. [2.]

Sähköpotkulauta rinnastetaan polkupyörään, jolloin sitä koskevat polkupyöräilijän liikennesäännöt, eli pyörätie on sähköpotkulaudan paikka liikenteessä. Etuvalo on laitteessa pakollinen, mutta myös takavalon käyttö olisi kuitenkin suotavaa. Henkilöön kiinnitettävä valot, kuten esimerkiksi otsavalot, ovat myös sallittuja, mutta se ei ole käytännöllistä. Leveys potkulaudalla on 80 cm ja istuinkorkeus 44 cm [2]. Ajoneuvolain [1] 13 §:ssä määritellään myös polkupyörälle ja kevyelle sähköajoneuvoille vaatimuksia, mitä ajoneuvossa täytyy vähintään olla Oleellisimmat osat, jotka koskevat myös kevyttä sähköajoneuvoa ovat

- luotettava ja toiminnaltaan varma ohjauslaite
- käyttöjarru
- tarpeelliset valaisimet ja heijastimet
- äänimerkinantolaitte



- nopeusmittari.

## 2.2 Fyysiset vaatimukset ja ominaisuudet

Potkulaudan huippunopeus ja moottorin teho määräytyvät pitkälti jo tieliikennemääräyksistä, mutta muut ominaisuudet potkulautaan voidaan määrittää.

Tuotteen tulee olla kevyt, jotta sitä on helppo liikutella ja nostaa. Potkulaudassa täytyy olla etu ja takavallo, jotta sillä voi ajaa myös pimeässä. Laudassa tulee olla myös mekaaninen jarru ainakin toisessa pyörässä. Ajonopeus ja akun varaus tulee nähdä potkulaudan näytöltä. Potkulaudan seisomatason tulee olla tarpeeksi pitkä ja leveä, jotta siinä pystyy mukavasti ja turvallisesti seisomaan, sekä rungon täytyy kestää normaalissa käytössä. Jousitus tarvitaan ainakin etu-akselille ajomukavuuden parantamiseksi. Lisäksi potkulautaan suunnitellaan seisomatuki laitteen pysäköintiä varten.

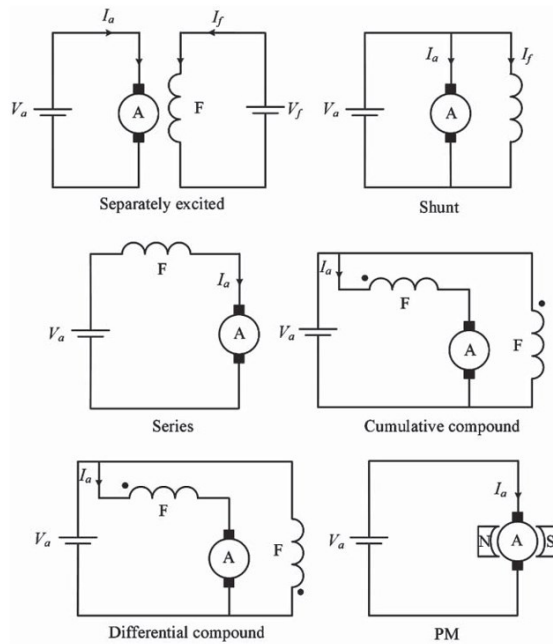
## 3 Sähkömoottorit

Tässä luvussa tarkastellaan eri sähkömoottorityyppejä, joita sähköajoneuvoissa voisi käyttää, sekä perehdytään yleisellä tasolla niiden toimintaperiaatteisiin sekä heikkouksiin ja vahvuuksiin.

### 3.1 Harjalliset DC-moottorit

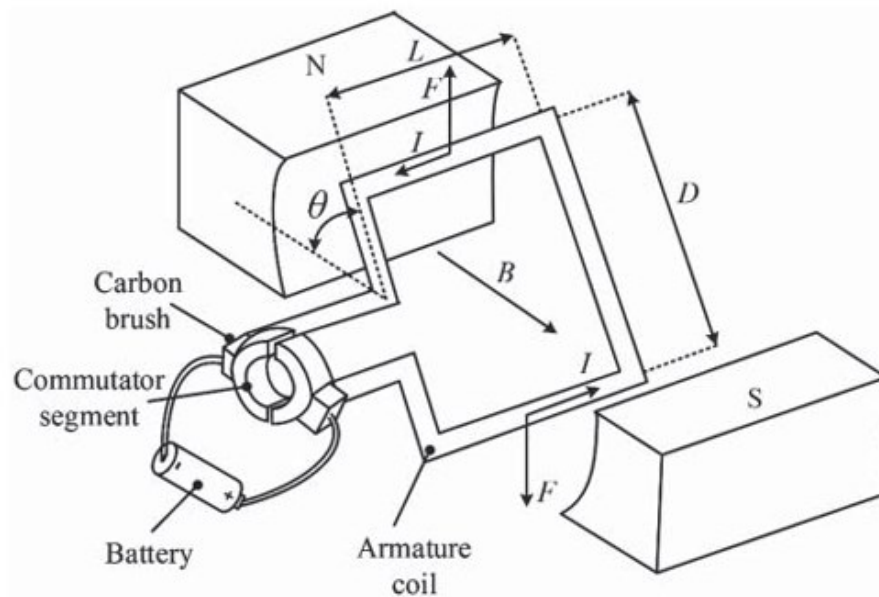
Harjallisen DC-moottorin (Direct Current) erottaa muista sähkömoottoreista fyysinen kontakti harjoilta kommutaattorille, jota pitkin virta kulkee. Harjallinen DC-moottori koostuu staattorista, roottorista, kommutaattorista ja hiiliharjoista. Staattori on moottorissa paikallaan pysyvä osa ja muodostaa magneettikentän järjestelmään joko kestopagneeteilla (PM, Permanent Magnet) tai käämityksillä riippuen moottorin tyypistä. Roottori on moottorin pyörivä osa, josta voima otetaan akselin kautta ulos. Roottori on kytketty kommutaattoriin, mikä mahdollistaa virran kulkusuunnan vaihtumisen roottorin käämityksessä.

Harjallisia DC-moottoreita on erilaisia, ja niillä on erilaisia ominaisuuksia. Harjallisia DC-moottorityyppejä ovat vierasmagnetoitu, sivuvirta-, sarjavirta-, compoundi- ja PM DC -moottori (kuva 1). PM DC -moottoreissa kenttäkäämitys on korvattu kestmagneeteilla, mikä tekee niistä suhteellisen energiatehokkaita hyvällä hyötysuhteella johtuen kestmagneettien vähäisestä tilan tarpeesta ja sähkömagneettisten häviöiden puuttumisesta. [3, s. 20.]



Kuva 1. Erilaiset DC-sähkömoottoritopologiat [3].

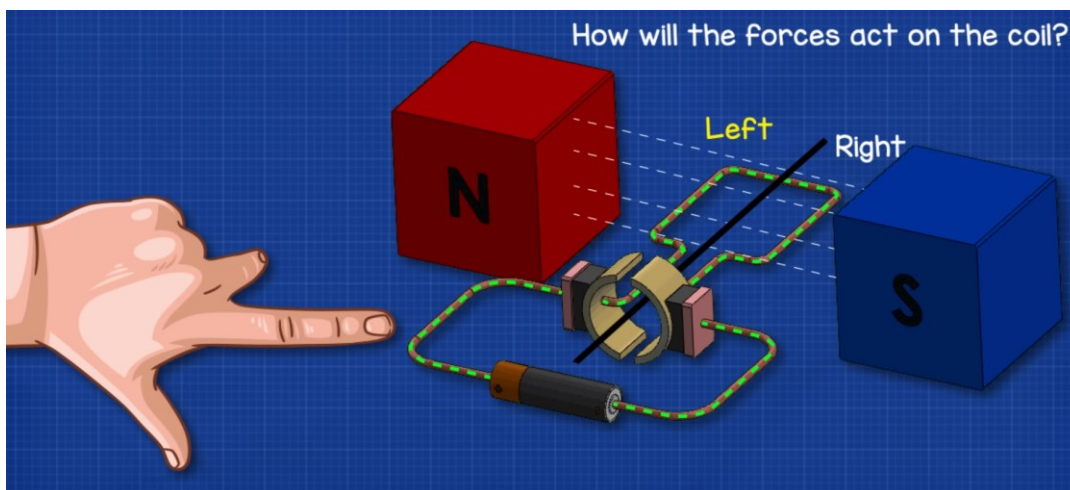
Kuvassa 2 näkyy yksinkertaistettu rakenne harjallisesta PM DC -moottorista. Kuvassa on yksi roottorin käämityslenkeistä kestmagneeteilla luodussa magneettikentässä. Käämitys on kytketty kommutaattoriin, joka on vapaa pyörimään akselinsa ympäri. Virta viedään kommutaattorille akulta hiiliharjoja pitkin. Kommutaattorin tehtävä on vaihtaa virran kulkusuuntaa käämissä, jotta roottori pääsee pyörimään. Hiiliharjat hankaavat kommutaattoria vasten ja mahdollistavat jatkuvan kontaktin, jotta virta pääsee kulkemaan systeemissä. [3, s. 22.]



Kuva 2. Yksinkertaistettu rakennekuva PM DC -moottorista [3].

Harjallisen DC-moottorin toiminta perustuu siihen, kun magneettikentässä olevan johtimen läpi kulkee virta, aiheuttaa se johtimeen sitä liikuttava voima Flemingin vasemman käden säännön mukaan, kuten kuvasta 3 nähdään. Flemingin vasemman käden säännön mukaan peukalo osoittaa voiman suunnan, etusormi magneettikentän suunnan pohjoisesta etelään ja keskisormi virran kulkusuunnan. Voima muodostuu aina kohtisuoraan magneettikentän ja virran vektoreiden muodostamaa pinta-alaa vastaan, joten magneettikentän ja virran välisellä kulmalla ei ole vaikutusta voiman suuntaan. [3, s. 22.]

Johtimeen kohdistuva voima lasketaan kaavan  $F = BIL$  mukaan, jossa  $F$  on voima,  $I$  virta,  $L$  johtimen pituus ja  $B$  magneettivuon tiheys. Täten roottorin muodostama vääntö voidaan laskea kaavalla  $T = FD \cos \theta$ , missä  $D$  on roottorin/käämin halkaisija ja  $\theta$  on käämin tason ja magneettikentän välinen kulma. Kaavasta nähdään, että suurin vääntö saadaan hetkellä, kun  $\theta$  on  $0^\circ$ . [3, s. 22.]



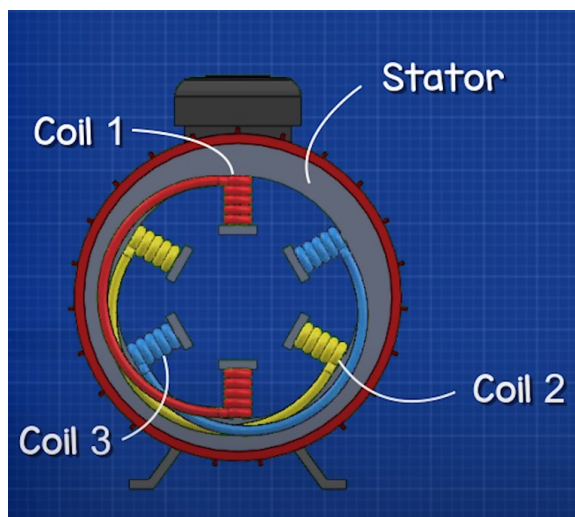
Kuva 3. Voimien suunta PM DC -moottorin käämissä [4].

Harjallisten DC-moottoreiden hyvä ominaisuus on niiden helppo nopeuden kontrollointi. Se tapahtuu joko virran tai magneettikentän säätämällä riippuen moottorin tyypistä. PM DC-moottorissa jännitteen alentaminen aiheuttaa virran laskun käämityksessä, mikä aiheuttaa väännön heikentymisen ja täten myös nopeuden vähentymisen. Kun taas jännitettä nostetaan, aiheuttaa se suuremman väännön moottorissa, mikä taas nostaa sen nopeutta. Huonona puolena esimerkiksi PM DC-moottoreiden nopeutta ei pysty manipuloimaan kuin virran avulla, jolloin nopeusvoimasuhteen kontrollointi jää heikoksi. [3, s. 29.]

Kaikki harjalliset DC-moottorit kärsivät kuitenkin samasta ongelmasta kommutaattorin ja hiiliharjojen takia. Kommutaattori aiheuttaa vääntömomentin aaltoilua ja rajoittaa käyttönopeutta, kun taas hiiliharjat aiheuttavat kitkaa ja radiotaajuushäiriöitä. Lisäksi hiiliharjat kuluvat ajan myötä ja vaativat säännöllistä huoltoa. [3, s. 22.] Näiden seikkojen takia harjalliset DC-moottorit eivät ole niin luotettava ja huoltovapaa vaihtoehto. Kuitenkin niiden saatavuus markkinoilla on todella hyvä, ja ne ovat lähtökohtaisesti halvempia kuin harjattomat moottorit, mikä tekee niistä varteenotettavan vaihtoehdon sähköpotkulaudan moottoriksi.

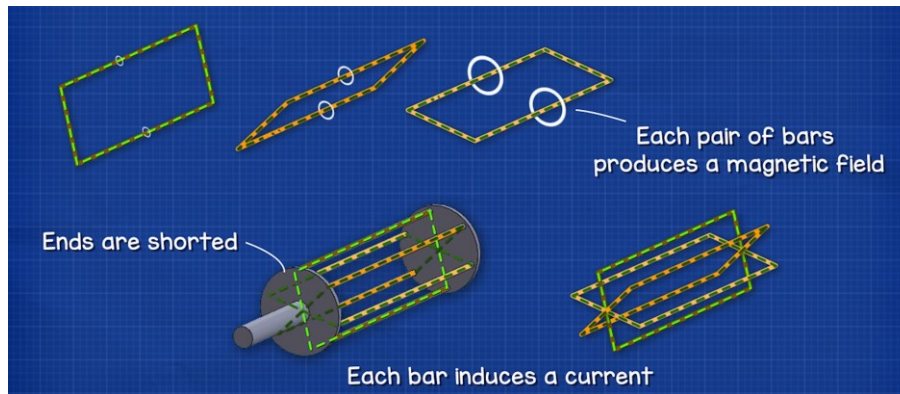
### 3.2 Induktiomoottorit

Induktiomoottorit tai epätahtimoottorit ovat yksi vaihtovirtamoottorityypeistä (AC-moottori). Induktiomoottorit toimivat tyypillisesti kolmivaiheisella virralla. Induktiomoottorin staattorina on laminoitu ydin, jossa on 3-vaihekäämitys, jonka käämparit ovat  $120^\circ$ :n kulmassa toisiinsa nähden (kuva 4). Kun sinimuotoinen vaihtojännite ohjataan käämitykseen, se aiheuttaa roottorin ja staattorin väliseen ilmatilaan pyörivän magneettivuon. Induktiomoottorit jaetaan tyypillisesti kahteen kategoriaan: oikosulkumoottori ja liukurengasmoottori. [3, s. 39.] Liukurengasmoottorin korkean hinnan ja huollettavuuden vuoksi tässä keskitytään luovassa oikosulkumoottoriin.



Kuva 4. Yksinkertaistettu rakennekuva käämityksestä induktiomoottorissa [5].

Oikosulkumoottorin roottori muodostuu sauvoista ja oikosulkurenkaista. Kuvasta 5 nähdään, kuinka roottorin rakenne on oravanpyörämäinen, jolloin siihen muodostuu monta silmukkaa. Näihin silmukoihin indusoituu staattorin käämien aiheuttamasta magneettikentästä jännite, joka taas aiheuttaa silmukoissa magneettikentän. Roottoriin muodostuneet magneettikentät pyrkivät asettumaan linjaa käämien luoman magneettivuon kanssa, mutta käämien vaiheistuksen takia magneettivuo muuttaa jatkuvasti asemaa, minkä takia roottorin magneettikenttä ei pääse asettumaan linjaan käämien luoman kentän kanssa, jolloin roottori pyörii. [3, s. 45.]



Kuva 5. Oikosulkumoottorin roottori [5].

Induktiomootorin käyttäminen tasavirralla vaatii DC/AC-invertterin, joka muuntaa akulta tulevan tasavirran vaihtovirraksi. Huono puoli on se, että invertteri vie tilaa ja lisää kustannuksia. Muita ongelmia voisi tulla vastaan moottorin nopeuden säädössä, sillä vaihtovirta on sinimuotoista, jolloin moottorin nopeuden muuttaminen tapahtuu vaihtovirran taajuuden muuttamisella, mikä on hieman hankalampaa kuin muiden moottorivaihtoehtojen nopeuden kontrollointi. Induktiomootoreissa on myös pienempi energiatiheys kuin esimerkiksi harjattomissa PM-mootoreissa [6].

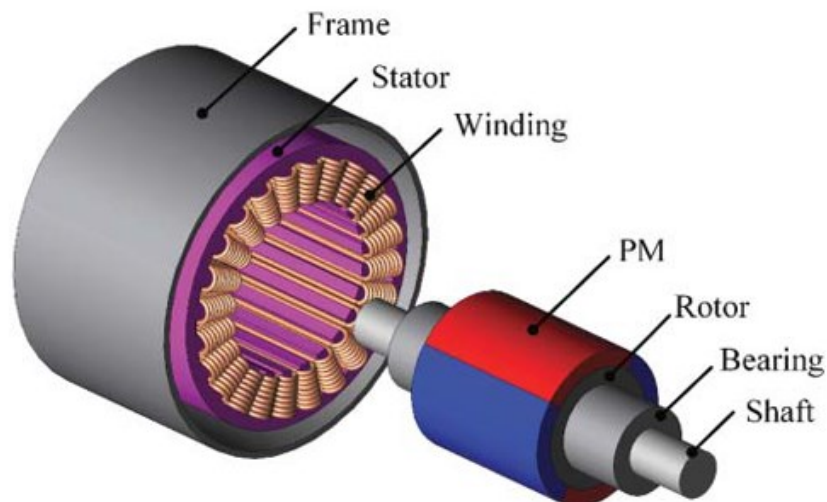
Induktiomootorin hyvät puolet kuitenkin kompensoivat niiden huonoja puolia. Ne ovat erittäin kestäviä ja jämääkärakenteisia. Ne ovat myös huoltovapaita hiiharjojen ja kommutaattorin puuttumisen takia. Myös niiden hinta on suhteellisen alhainen verrattuna esimerkiksi harjattomiin PM-synkronimootoreihin johtuen kalliiden kestopagneettien puuttumisesta.

### 3.3 Harjattomat PM-moottorit

Tässä luvussa keskitytään kahteen harjattomaan PM-moottoriin (Permanent Magnet): PM-synkronimootoriin ja PM BLDC -moottoriin (Brushless Direct Current). Harjattomat PM-moottorit ovat suuresti yleistyneet sähköajoneuvojen moottoreina niiden tuomien vahvuuksien takia. Kestomagneeteilla luodun magneettikentän avulla vältetään sähkömagneettisesti tuotettujen magneettikenttien häviöistä sekä säästetään tilaa ja painoa, jolloin niillä on hyvä teho-painosuhte.

Myös kommutaattorin ja hiiliharjojen puuttuminen poistaa haitat, joita esimerkiksi PM DC -moottoreissa on. [3, s. 71.]

PM-synkronimoottoreiden ja PM BLDC -moottoreiden toimintaperiaate on osittain samankaltainen kuin induktimoottoreilla. Staattorin muodostaa 3-vaihekäämitys, joka luo staattorin ja roottorin väliseen ilmatilaan pyörivän magneettivuon. PM-moottoreiden roottori muodostuu kestromagneeteista, jotka asettuvat linjaan pyörivän magneettikentän kanssa (kuva 6). Molemmat moottorit ovat synkronimoottoreita, jolloin niiden roottori käytännössä lukittuu staattorin luoman pyörivän magneettikentän kanssa, jolloin magneettikenttä ja roottori pyörivät samaa vauhtia. [3, s. 74.]



Kuva 6. Harjattoman PM-moottorin rakenne [3].

PM-synkronimoottorin ja PM BLDC -moottorin ero on niiden tuottamassa vastasähkömotorisessa voimassa (Back EMF) ja täten niiden kontrolloinnissa. PM BLDC -moottorin vastasähkömotorinen voima on kantiaaltomaista, ja usein niissä käytetään Hall-antureita selvittämään roottorin asento [3, s. 71]. Hall-anturi antaa kontrollerille tiedon, missä asennossa roottori on, jotta kontrolleri osaa ohjata oikealle käämille virran, jotta saadaan luotua oikeassa vaiheessa pyörivä

magneettikenttä. Hyvä puoli PM BLDC -moottorin kontrolloinnissa on, että se on paljon yksinkertaisempaa kuin PM-synkronimoottorin [3, s. 75]. PM-synkronimoottorin vastasähkömotorinen on sinimuotoista ja toimii sinimuotoisella vaihtojännitteellä kuten induktimoottori. Sinimuotoisen vaihtojännitteen kontrollointi on vaikeampaa kuin kanttiaallon, mikä tekee PM-synkronimoottorin kontrolle-rista lähtökohtaisesti kalliimpia ja monimutkaisempia [3, s. 71].

Korkean teho- ja vääntötiheydensä ansiosta harjattomat PM-moottorit sopivat hyvin napamoottoreiksi [3, s. 96]. Napamoottoreissa sähkömoottori on integroitu pyörän napaan. Napamoottorit ovat loistava vaihtoehto ajoneuvoihin, joissa saatavilla oleva tila on rajallinen. Napamoottoreista yleisimmät ovat korkeanopeuksinen moottori sisäänrakennetulla alennusvaihteella ja matalanopeuksinen ulkokehämoottori. Näistä yleisempi malli kevyissä sähköajoneuvoissa on ulkokehä moottori johtuen vaihteiston puuttumisesta ja korkeasta vääntömomen- tista matalissa pyörintänopeuksissa.

Molemmat moottorit ovat energiatiheyksiltään ja -tehokkuuksiltaan todella hyviä moottoreita. Näistä kahdesta PM BLDC -moottori on helpompi ja halvempi kont- rolloida sekä niitä on helposti saatavilla.

### 3.4 Reluktanssimoottorit

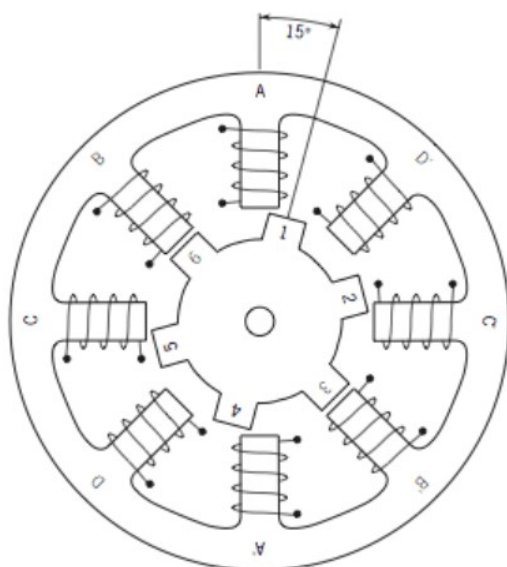
Reluktanssimoottorit ovat rakenteeltaan yksinkertaisia ja vahvoja sekä kestävät suuria pyörimisnopeuksia yksinkertaisen roottorin rakenteen ansiosta [3, s. 108]. Reluktanssimoottoreista yleisimmät ajoneuvokäyttöön soveltuvat ovat mo- lemmin puolin avonapainen reluktanssimoottori SRM (Switched Reluctance Mo- tor) ja tahtireluktanssimoottori SynRM (Synchronous Reluctance Motor). Vaikka molemmat ovat reluktanssimoottoreita, ne eroavat huomattavasti toisistaan var- sinkin moottorin ohjauksen osalta.

SRM:n staattorin koostuu sauvoista, joiden ympärillä on käämitys, joilla luodaan moottoriin pohjois- ja eteläkohtiot. Roottori puolestaan on rautaa, eikä se sisällä kestopagneetteja tai käämityksiä. Käämityksen ja kestopagneettien puute



tekee tästä moottorityypistä vahvan rakenteeltaan ja edullisemman valmistaa. Roottorissa ja staattorissa on tyypillisesti eri määrä napoja, mikä estää roottorin jumittumisen [7]. Tästä moottorityypistä löytyy useita eri topologioita riippuen moottorin vaiheistuksesta ja napojen määrästä [3, s.109].

Moottorin toiminta perustuu reluktanssivoimiin. Kun staattorin vaiheeseen laiteetaan kulkemaan virta, se saa aikaan pohjois- ja eteläkohtiot, jotka vetävät ferromagneettisen roottorin lähimpiä napoja puoleensa. Nämä roottorin kohtiot pyrkivät asettumaan kohtaan, jossa on pienin reluktanssi, eli roottorin navat asettuvat linjaan, missä vuo pääsee helpoiten kulkemaan (kuva 7). [7.]



Kuva 7. SRM:n rakenne [7].

SRM:ien suurimpia ongelmia on niiden tuottama melu ja momentin aaltoilu. Lisäksi moottorin magneettikenttä pyörii askelmittain ja tarvitsee oman kontrollorin sen nopeuden säätämiseksi, eikä se ole aivan yksinkertainen tai edullinen.

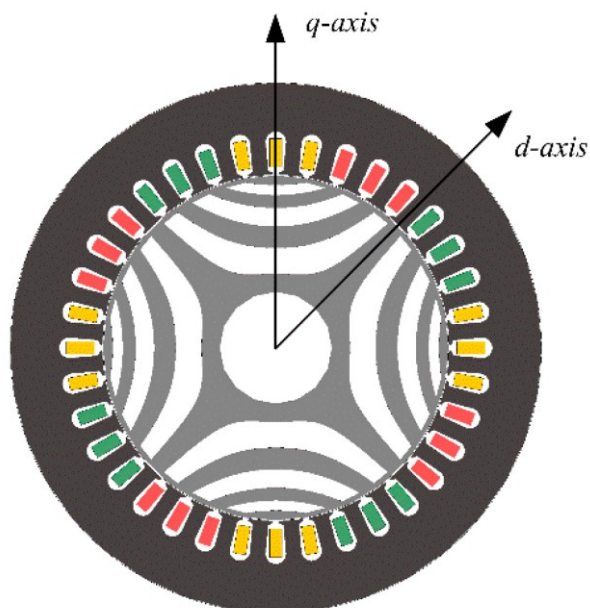
SynRM:n rakenne on hieman erilainen kuin SRM:n. SynRM on kolmivaiheinen ja sen staattori on induktiomoottorin kaltainen. Roottori on tehty ohuista rautalevyistä, joihin on muotoiltu magneettivuolle reitit (kuva 8). Myöskään SynRM:n

roottorissa ei ole käämityksiä, eikä kestopagneetteja, mutta tästä moottorista löytyy versioita, jossa roottoria on vahvistettu kestopagneeteilla. [8.]



Kuva 8. SynRM-moottori [9].

Tahtireluktanssimoottorin staattori luo induktiomootorin tavoin pyörivän magneettikentän, jonka mukaan roottori alkaa pyörimään. Täten myös moottorin kontrollointi on samankaltainen kuin induktiomootorilla ja toimii sinimuotoisella vaihtovirralla. Roottori pyrkii asettuman SRM:n tavoin asemaan, jossa on pienin reluktanssi. Roottorin laminoitujen ja uritettujen rautalevyjen ansiosta, pienin reluktanssi saavutetaan d-akselin suuntaan ja suurin q-akselin suuntaan (kuva 9) [8; 10]



Kuva 9. q- ja d-akseli SynRM-moottorissa [10].

Koska roottorissa ei ole käämitystä, ei siinä synny sähköisiä häviöitä, mikä tekee tahtireluktanssimoottorin hyötysuhteesta ja energiatiheydestä korkean [8]. Tahtireluktanssimoottorissa ei ole myöskään samanlaista ongelmaa vääntömomentin värähtelyn kanssa kuin SRM:llä.

### 3.5 Projektiin valittu sähkömoottori

Tähän projektiin valikoitunut sähkömoottori on PM BLDC -napamoottori (kuva 10). Valintaan vaikutti eniten potkulaudassa oleva tila, jolloin napamoottori osoittautui järkevämmäksi ratkaisuksi. Moottori toimii 36 V:n järjestelmällä, ja se on 300 W:n tehoinen (huipputeho 600 W). Tehon tarve ei ole suuri, sillä maksiminopeus tällä laitteella on pieni sekä tehokkaammat moottorit ovat kalliimpia.



Kuva 10. Projektiin valikoitunut napamoottori.

Moottorin toimittaja ei anna tarkempia tietoja moottorin pyörintänopeudesta, mutta tämä moottori on Xiaomi-merkkisestä potkulaudasta, jonka huippunopeus on noin 25 km/h. Renkaan halkaisija on 8,5 tuumaa eli 0,2159 m. Näillä saadaan laskettua pyörintänopeus seuraavasti:  $r = \frac{60v}{3,6\pi d}$ , jossa  $v$  on nopeus km/h ja  $d$  renkaan halkaisija metreissä. Vastaukseksi saadaan 614,3... r/min, jolloin voidaan olettaa, että moottorin pyörintänopeus on 600 rpm:n luokkaa, ellei pyörimisnopeutta muuten ole rajoitettu.

BLDC-moottorit ovat yleisesti käytössä sähköpotkulaudoissa sekä niiden vaatima kontrolleri on suhteellisen pienikokoinen, mikä helpottaa sen maahduttamista potkulaudan runkoon. Kontrollerin kautta kulkevat kaikki muutkin sähkötkuten näytön ja valojen ohjaus, joten se tarvitaan joka tapauksessa.

## 4 Akut

Tässä luvussa tarkastellaan eri akkukemioita, joita sähköpotkulaudan akuissa voisi käyttää sekä puntaroidaan niiden heikkouksia ja vahvuuksia.

### 4.1 Lyijyakut

Lyijyakut ovat ensimmäisiä akkuja, joita on kehitetty ja niitä käytetään vielä nykypäivinä [11]. Tyypillisesti lyijyakut ovat jännitteeltään 12 V ja niissä on kuusi kennoa, mikä tekee yhden kennon nimellisjännitteeksi 2 V. Yleisimmin autoissa käynnistysakkuna käytetyt lyijyakut pystyvät antamaan suuria virtoja hetkellisesti sekä toimimaan kylmissä olosuhteissa, mikä tekee niistä oivan ratkaisun käynnistysakuksi. Eräs lyijyakkujen eduista on se, että ne ovat yksi halvimmista ja yksinkertaisimmista valmistaa.

Täytyy muistaa, että autoissa käynnistysakkuina käytettävät akut eivät sovellu esimerkiksi sähköpotkulaudan akuiksi, koska niitä ei ole valmistettu sitä varten eivätkä ne kestä useita syklejä. Tätä varten on Deep Cycle -akkuja, jotka on tarkoitettu sykliseen käyttöön.

Vaikka lyijyakut ovat kehittyneet ja niistä on erilaisia versioita, kuten nestetäytteen lyijyaku, VRLA ja AGM, on lyijyakkujen energiatiheys kuitenkin erittäin heikko vain 30–50 Wh/kg [12, s. 166], mikä rajaa ne pois monesta mobiilista ratkaisusta. Lyijyakuissa on myös huomattavasti heikompi syklinen kestävyys verrattuna Li-ion-akkuihin, ja syklinen kestävyys on todella paljon riippuvainen DOD:sta (Depth of discharge). Lisäksi niiden lataaminen on huomattavasti hitaampaa kuin muiden akkutyyppeiden [13].

### 4.2 Nikkeli-kadmiumakut

Nikkeli-kadmiumakkuja (NiCd) on käytetty yleisesti esimerkiksi työkaluissa ja kannettavissa laitteissa. Ne ovat hyvä kilpailija lyijyakuille, sillä niillä on samoja ominaisuuksia, mutta parempi syklinen kestävyys ja energiatiheys (n. 45–80

Wh/kg) [14] sekä ovat luotettavia. Ne kestävät suuria purku- ja varausnopeuksia sekä kestävät suhteellisen hyvin ylivarausta. Koska akut kestävät suuria varausnopeuksia, on niiden lataaminen huomattavasti nopeampaa. NiCd-akut eivät ole myöskään kovin alttiita lämpötilavaihteluille ja kestävät sitä todella hyvin. [15.]

NiCd-akkujen huonoja puolia ovat valmistus- ja materiaalikustannukset, kadmiumin myrkyllisyys sekä muistiefekti [12, s. 34; 15]. Muistiefekti tarkoittaa sitä, että jos akkua puretaan toistuvasti vain osittain, akun kapasiteetti pienenee. Siksi NiCd-akkuja tulisi säännöllisesti ladata täyteen ja purkaa tyhjäksi. Akun täyden kapasiteetin pystyy palauttamaan, jos akkua puretaan perättäin tyhjäksi, mutta tämä ei ole käyttäjäystävällistä [16]. Myös niiden kennojännite on alhainen (vain 1,2 V), mikä tarkoittaa, että tarvitaan useampi kenno saavuttamaan korkeampi jännitetaso.

#### 4.3 Nikkeli-metallihydridiakut

NiMH:lla on samankaltaiset ominaisuudet kuin NiCd:lla. NiMH-akuilla on kuitenkin hieman suurempi energiatiheys kuin NiCd-akuilla (n. 60–120 Wh/kg) [14], ne ovat myrkyttömiä sekä kestävät hyvin alivarausta. NiMH-akuilla ei myöskään ole samanlaista ongelmaa muistiefektin kanssa kuin NiCd-akuilla. Huonoja puolia akuissa on niiden itsepurkautuminen, eli ne menettävät käyttämättömänä varausta nopeammin kuin muut akkutyypit. Myös niiden täyteen lataaminen on hankalampaa, sillä niillä ei ole tarkkaa jänniterajaa, milloin kenno olisi täynnä, eivätkä ne kestä ylilatausta. [17].

#### 4.4 Litiumioniakun toimintaperiaate

Li-ion-akut ovat vallanneet sähköajoneuvojen akkumarkkinat hyvien ominaisuuksiensa takia. Litiumakuilla on todella hyvät vahvuudet verrattuna NiMH-, NiCd- ja lyijyakkuihin, kuten muistivaikutuksen puuttuminen, korkea kennojännite (yleensä n. 3,6–3,7 V) ja energiatiheys [12, s. 34].

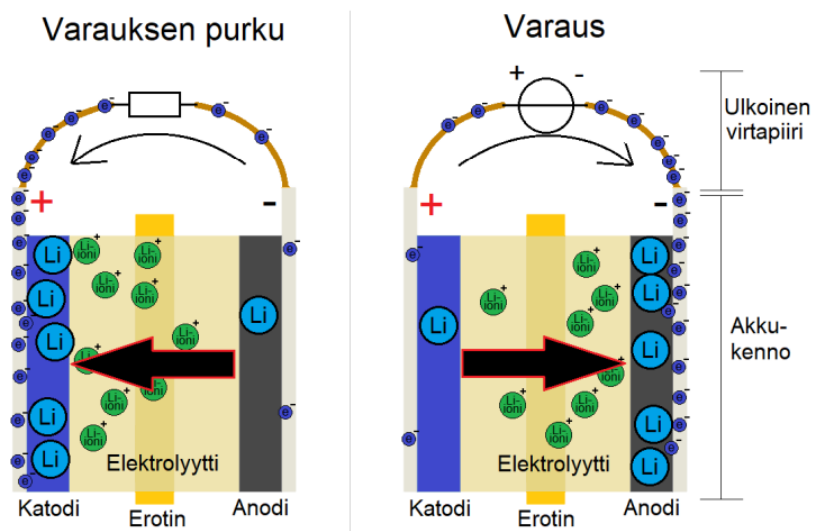
Li-ionakkujen pääkomponentit ovat anodi, katodi separaattori, elektrolyytti ja virrankeräimet. Li-ionakuissa katodi on positiivinen elektrodi, joka koostuu jostakin Li-yhdisteestä. Anodi on negatiivinen elektrodi, jossa yleisimmin käytetään hiiltä sisältäviä yhdisteitä. Toisaalta hiilen kehitys anodimateriaalina ajatellaan olevan jo kypsä, joten muita materiaaleja tutkitaan jatkuvasti. [12, s. 19.]

Li-ion-kennoissa litiumpolymeerikennot käyttävät polymeeri- tai geelielektrolyyttiä, kun taas muut käyttävät vedetöntä nestemäistä elektrolyyttiä [18, s. 3].

Elektrolyytti anodin ja katodin välillä mahdollistaa positiivisesti varautuneiden litiumionien ( $\text{Li}^+$ ) siirtymisen elektrodien välillä [12, s. 27].

Separaattori eristää anodin ja katodin toisistaan sekä estää negatiivisesti varautuneiden elektronien ( $e^-$ ) kulkeutumisen niiden välillä, mutta mahdollistaa litiumionien siirtymisen elektrodista toiseen. Separaattorit on suunniteltu sammustustoiminnolla, joka parantaa akkujen turvallisuutta. Tietyissä lämpötilassa (riippuen separaattorista tai akusta) separaattori sulaa ja sulkee siinä olevat mikrohuokokset, mikä estää ionien kulkeutumisen elektrodien välillä ja myös akun ylikuumenemisen [12, s. 29].

Täysin purkautuneessa tilassa Li-ionit ovat osa katodia. Latauksessa elektrodit ovat kytkettynä laturin napoihin. Li-ionit lähtevät irti katodiasta ja liikkuvat elektrolyyttiä pitkin separaattorin läpi anodille, mikä aiheuttaa elektronien siirtymisen anodille laturin välityksellä. Purkautuessa tämä reaktio on päinvastainen. Li-ionit siirtyvät kennon sisällä anodilta katodille, mikä aiheuttaa elektronivirran anodilta katodille elektrodieihin kytkettyä kuormaa pitkin (kuva 10).



Kuva 11. Li-ion-akun varautuminen ja purkautuminen [19, s. 8].

#### 4.5 Battery Management System

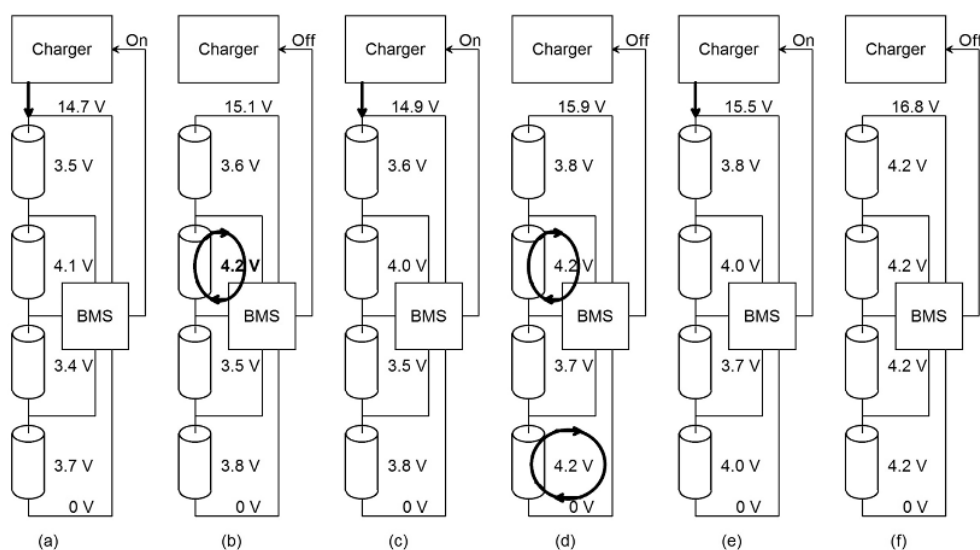
Li-ion-kennot eivät kaikki ole identtisiä, vaan niissä on aina eroavaisuuksia. Tämän takia akkujen kennot eivät lataudu ja purkaudu samaa tahtia, mikä on ongelma, sillä kennot eivät kestä yllilatausta tai -purkausta. Tämän takia Li-ion-akut täytyy varustaa BMS:llä (Battery Management System). BMS:n tehtävänä on turvata kennojen toiminta ja mahdollistaa akun optimaalinen kapasiteetin käyttö. BMS vahtii kennojen varaus- ja purkutiloja sekä akun lämpötilaa. BMS:n tärkeimmät tehtävät ovat

- estää kennojen jännitteen nousu sallitun yläpuolelle
- estää kennojen jännitteen lasku sallitun alapuolelle
- estää kennojen lämpötilan rajapisteen ylittyminen
- estää liian korkeat lataus ja purkuvirrat. [18, s. 16.]

Toinen erittäin oleellinen BMS:n tehtävä kennojen suojaamisen lisäksi on balansointi, koska kennot latautuvat ja purkautuvat eri tahtia. Esimerkiksi latauksessa

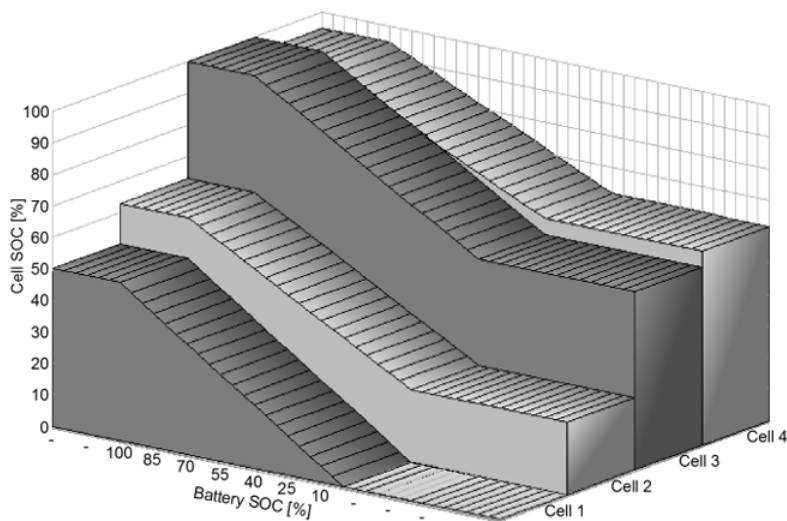


jokin kennoista saavuttaa täyden SOC:n (State Of Charge) ennen muita kennoja, minkä jälkeen akkua ei voi enempää ladata, ettei jo täyteen varattu kenno vaurioidu. Balansoinnin tarkoituksena on saada kaikkien kennojen SOC samaan prosenttiin, jolloin saadaan suurempi kapasiteetti akusta. Yksi tapa balansoida akku on katkaista lataus, kun jokin kennoista saavuttaa täyden varaustilan. Kun lataus on pysäytetty, puretaan hieman varausta täydestä kennosta, minkä jälkeen voidaan jatkaa akun latausta. Tämä sykli toistuu niin kauan, kunnes kaikki kennot saavuttavat täyden varaustilan. Tämä on havainnollistettu kuvassa 11. [18, s. 17.]



Kuva 12. Li-ion-akun balansointiprosessi [18, s. 17].

Mikäli kennoja ei balansoida, rajoittaa yleensä akun pienimmässä SOC:ssa oleva kenno koko akun kapasiteettia. Kuvasta 13 nähdään, kuinka akun kapasiteetti pienenee huomattavasti, kun kennoja ei ole balansoitu. BMS katkaisee virran syötön akulta, jolloin se estää 0 % SOC:ssa olevaa kennoa syväpurkautumasta ja vaurioitumasta. Tällöin pienimmässä varauksessa oleva kenno käytännössä määrittelee koko akun kapasiteetin. [18, s. 29.]



Kuva 13. Balansoimaton Li-ion-akku [18, s. 31].

#### 4.6 Litium-kobolttioksidiakku (LCO)

Litium-kobolttioksidiakku ( $\text{LiCoO}_2$ ) on ensimmäinen kaupallistettu Li-ion-akku. Sonyn kehittämät LCO-akut tulivat myyntiin vuonna 1991. Niitä on käytetty mo-  
 niin kannettaviin elektroniikkalaitteisiin, kuten kannettaviin tietokoneisiin, kame-  
 roihin ja puhelimiin. Niillä on erittäin korkea energiatiheys ja korkea toimintajän-  
 nite, ja ne ovat helppoja valmistaa. Ne ovat kuitenkin lämpötilan suhteen  
 epästabiileita (thermal stability), mikä tekee niistä vaarallisia paloriskin vuoksi,  
 mikäli lämpötilaa ei ole kunnolla monitoroitu. LCO-akut ovat myös suhteellisen  
 lyhytikäisiä, eivätkä ne pysty suuriin purku- ja latausvirtoihin. LCO-akut ovat  
 myös hintavia johtuen koboltista. [14; 20; 21, s. 5; 22, s. 32.]

#### 4.7 Litium-mangaanioksidiakku (LMO)

Litium-mangaanioksidiakuilla ( $\text{LiMnO}_2$ ) on pieni sisäinen resistanssi, minkä takia  
 akkua pystyy lataamaan ja purkamaan korkeilla virroilla. LMO:lla on parempi  
 lämmönkestävyys, ja se on muutenkin stabiilimpi kuin LCO [20, s. 5]. LMO:n ko-  
 boltin puute tekee akun materiaaleista ympäristöystävällisempiä, ja niitä on pa-  
 remmin saatavilla kuin LCO:n, mikä tekee niistä hieman halvempia kuin LCO-  
 akut [23, s. 5]. LMO-akkujen syklinen kestävyys on samaa luokkaa kuin LCO:n,

mutta se on silti suhteellisen heikkoa, varsinkin korkeilla purkuvirroilla. Energiatiheys on hieman huonompi kuin LCO:n. [22, s. 32.]

#### 4.8 Nikkeli-mangaani-kobolttioksidiaakku (NMC)

Nikkeli-mangaani-kobolttioksidiaakku ( $\text{LiNiMnCoO}_2$ ) on ominaisuuksiensa takia sähköautoissa yleisesti käytetty akkutyyppi [21]. NMC-akuilla on korkea energiatiheys (noin 150–250 Wh/kg) ja hyvä lämmönkestävyys. NMC:n energia- ja tehotehiheyttä pystyy räätälöimään materiaalien osuuksilla käyttötarkoituksen mukaan, mitä ominaisuuksia akulta halutaan. [20; 21, s. 6.] Akuilla on myös hyvä syklinen kestävyys, mutta ne ovat kuitenkin hintavia johtuen materiaaleista ja niiden saatavuudesta.

#### 4.9 Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiaakku (NCA)

Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiaakun ( $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_z)\text{O}_2$ ) energiatiheys on korkea (tyypillisesti 200–260 Wh/kg). Se kestää korkeita lataus ja purkuvirtoja, sekä sillä on pitkä käyttöikä. Myös sen syklinen kestävyys on hyvä. Kuitenkaan tämä akkukemia ei ole turvallisimmasta päästä ja on myös kallis [21, s. 6; 22, s. 32].

#### 4.10 Litium-rautafosfaattiakku (LFP)

Litium-rautafosfaattiakku ( $\text{LiFePO}_4$ ) ei koostumuksensa ansiosta ole niin paloherkkä kuin muut Li-ion-akut ja on akkutyypeistä turvallisimpia. Sitä pystytään purkamaan suurilla virroilla, ja sillä on todella hyvä syklinen kestävyys sekä se toimii laajalla lämpötila-alueella. Sen toimintajännite on muita alhaisempi noin 3,3 V, mutta jännite pysyy lähes vakiona varauksen purkautuessa. [22, s. 35.] Energiatiheys LFP-akuilla on heikompi kuin muilla Li-ion-akuilla (n. 120 Wh/kg). Niillä on suuri itsepurkautuvuus verrattuna muihin Li-ion-akkuihin, jolloin kennojen väliset erot voivat kasvaa. [20; 21, s. 6.]

#### 4.11 Litium-titanaattioksidiaakku (LTO)

Litium-titanaattioksidiaakun ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ) nimitys tulee sen anodimateriaalina käytetystä titanaattioksidista, joka on muista Li-ion-akuista poiketen korvannut yleisesti käytetyn grafiitin [21, s. 7]. LTO:lla on huonompi energiatiheys kuin muilla Li-ion-akuilla (n. 80 Wh/kg) [14]. Niillä on myös pienempi nimellisjännite (vain 2,4 V), ja anodimateriaalin takia ne ovat kalliita. Muut ominaisuudet tällä akkutyypillä onkin huippuluokkaa. Ne ovat erittäin stabiileita ja turvallisia [22, s. 33]. LTO-akut kestävät myös korkeita lataus- ja purkuvirtoja. Ne ovat pitkäikäisiä ja omaavat todella hyvän syklisen kestävyuden [24; 25.]

#### 4.12 Li-ion-akkujen vertailu

Li-ion-akuilla on hyvät ominaisuudet jo lähtökohtaisesti. Alle koostettuun taulukoon 1 on koottu mainitut Li-ion-akut, joiden ominaisuuksia vertaillaan keskenään. Taulukoon ei ole laitettu tarkkoja arvoja vaan vertailtu yleisellä tasolla akkukemioita, sillä monista kennoista on energiatiheydeltään, tehokkuudeltaan ja sykliseltä kestävyydeltään erilaisia versioita.

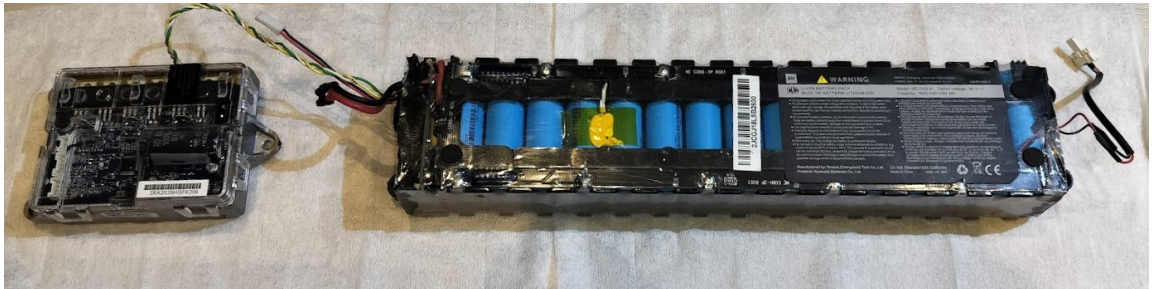
Taulukko 1. Li-Ion-kemioiden vertailu.

Akkukemia	Energiatiheys	Hinta	Syklinen kestävyys	Turvallisuus
LCO	++	+	--	-
LMO	++	+	--	+
NMC	++	+	-	+
NCA	++	-	-	-
LFP	-	+	+	++
LTO	--	--	++	++

#### 4.13 Projektiin valittu akkupaketti

Projektiin valittiin 36 V:n 7800 mAh:n Li-ion-akkupaketti (kuva 14). Li-ion-akku valittiin sen tuomien etujen ja saatavuuden vuoksi. Akkupaketissa on sisäänrakennettu BMS, joka varmistaa akun optimaalisen toiminnan. 36 V:n järjestelmä valikoitui moottorin mukaan ja ampeeritunnit halutun ajomatkan mukaan.

Jatkamalla hieman kaavaa  $P = UI$  voidaan potkulaudan suuntaa antava toimintasäde laskea kaavalla  $s = \frac{I_A U v}{P}$ , jossa  $s$  on matka (km),  $I_A$  on akun kapasiteetti (Ah) ja  $v$  nopeus (km/h). Laskettaessa moottorin 300 W:n nimellisteholla ja huippunopeudella 25 km/h saadaan toimintasäteeksi 23,4 km, mutta todellisuudessa se on paljon pienempi. Toimintasäteeseen vaikuttavat maastonmuodot, lämpötila sekä esimerkiksi se, ettei moottori toimi koko ajan nimellisteholla. Toimintasädettä pystyisi kasvattamaan lisäämällä akun kapasiteettia, mutta se nostaa akun hintaa. Potkulauta suunnitellaan muutaman kilometrin edestakaisiin matkoihin, joihin akun kapasiteetti riittää.



Kuva 14. Kontrolleri ja akkupaketti.

Suurimmassa osassa netissä myytävissä Li-ion-akuista ei ole mainittu, mistä kennoista paketti on koottu. Monilla nettisivuilla, joilla myydään akkuja ja kennoja, ei kerrota edes kennojen akkukemioita vaan puhutaan vain Li-ion-kennoista. Valmistajat käyttävätkin tuotteiden nimeämisessä lyhenteitä, jotka viittaavat akkukemiaan, mutta näitä alla mainittuja tietojakaan ei ole aina saatavilla, puhumattakaan kennojen datalehdistä Li-ion-kennoista käytettyjä lyhenteitä ovat

- INR = NMC
- ICR = LCO
- IMR = LMO
- IFR = LFP.

Valittu akkupaketti on 10S3P (10 kennoa sarjassa, 3 rinnan), mikä kertoo yhden kennon olevan 3,6 V 2600 mAh. Akkupaketista löytyy myös merkintä INR, joka tarkoittaisi NMC-kennoja.

## 5 Rungon suunnittelu

Potkulaudan runko suunniteltiin valitun voimalinjan ja muiden komponenttien ympärille sekä potkulaudasta tehtiin 3D-malli SolidWorks-ohjelmalla.

### 5.1 Ohjaus ja etuakseli

Ensimmäisenä päätettiin, kummalle akselille vetävä pyörä laitetaan. Sähkömoottorin asettaminen etu- tai taka-akselille ei eroa kiinnitykseltään, joten molemmat vaihtoehdot ovat mahdollisia. Lopulta tehtiin ratkaisu, että moottori laitetaan etuakselille. Suurimpana tekijänä tähän vaikutti se, että potkulautaan tulee levyjarru eikä sitä pysty kiinnittämään vetävään renkaaseen. Koska potkulauta on niin kevytrakenteinen, mekaanisella jarrulla saa helposti renkaan lukkoon, varsinkin hätäjarrutuksessa. Kaksipyöräisillä eturenkaan lukkiutuminen johtaa todennäköisemmin kaatumiseen, joten tästä syystä vetävä pyörä sijoitettiin etuakselille, jolloin levyjarru saadaan taakse.

Sähköpotkulaudan massakeskipiste on kuljettajan kyydissä ollessa suhteellisen korkealla, mikä vaikuttaa siihen, että jarrustilanteessa painopiste siirtyy momenttina etuakselille, jolloin suurin osa painosta on etuakselilla. Tämä tarkoittaa sitä, että etujarrun vaikutus hidastuvuuteen on suurempi kuin takajarrun.

Sähkömoottorissa on sähköinen jarru, mikä suurimmilta osin tekee jarruttamisen normaaliajossa. Mekaaninen jarru taka-akselilla vahvistaa jarrutusta ja toimii varmistuksena, mikäli sähköinen jarru pettäisi.

Potkulautaan haluttiin suunnitella jousitus etuakselille, mikä mukavoittaa ajamista. Tähän löydettiin sopiva iskunvaimennin etuhaarukkaan (kuva 15), joka on kylläkin tarkoitettu 10 tuuman renkaalle, mutta 8,5 tuuman rengas sopii siihen myös. Tämä iskunvaimennin mallinnettiin alla olevan kuvan perusteella, jotta muut osat saatiin mitoitettua oikein.

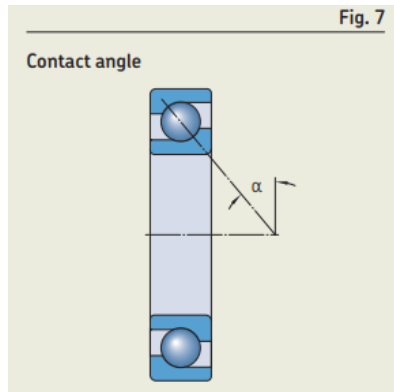


Kuva 15. Etuhaarukan iskunvaimennin [26].

### 5.1.1 Ohjauksen laakerointi

Kun iskunvaimennin saatiin valittua, alettiin suunnittelemaan ohjauksen laakerointia. Suurin osa voimasta laakereille kohdistuu akselin suuntaisesti, joten laakerin täytyy kantaa pystysuuntaisia voimia. Tähän soveltuvat ohjainlaakerit, joita käytetään esimerkiksi potkulautojen ja polkupyörien ohjainlaakereina. Ne pystyvät ottamaan vastaan säteen ja akselin suuntaista kuormaa. Yksinkertaistetusti laakereissa kontaktikulma  $\alpha$  määrittelee, missä suunnassa laakeri kantaa

voimia. Mitä suurempi  $\alpha$ -kulma, sitä enemmän se kestää akselin suuntaista kuormaa ja mitä pienempi, sitä enemmän säteen suuntaista kuormaa (kuva 16). [27.]



Kuva 16. Kontaktikulma laakereissa [27].

Iskunvaimentimen alaosa on muotoiltu siten, että siihen menee suoraan ohjainlaakerin kuulakehä, joten se oli yhtenä isona tekijänä laakerivalinnassa. Laakeriksi olisi voitu valita myös muun tyyppisiä laakereita, jotka pystyvät kantamaan säteis- ja aksiaalikuormia, kuten viistokuulalaakeri tai kartiorullalaakeri. Mutta ohjainlaakerit soveltuvat tähän oikein hyvin ja ovat huomattavasti edullisempia. Alla olevassa kuvassa 17 näkyy projektiin valikoitunut laakerisetti. Monesti esimerkiksi SKF:n sivuilta löytyy laakereille valmiit CAD-mallit, mutta kyseisestä laakerista sitä ei löytynyt, joten se mallinnettiin suurin piirtein mittojen perusteella kokoonpanoa varten.

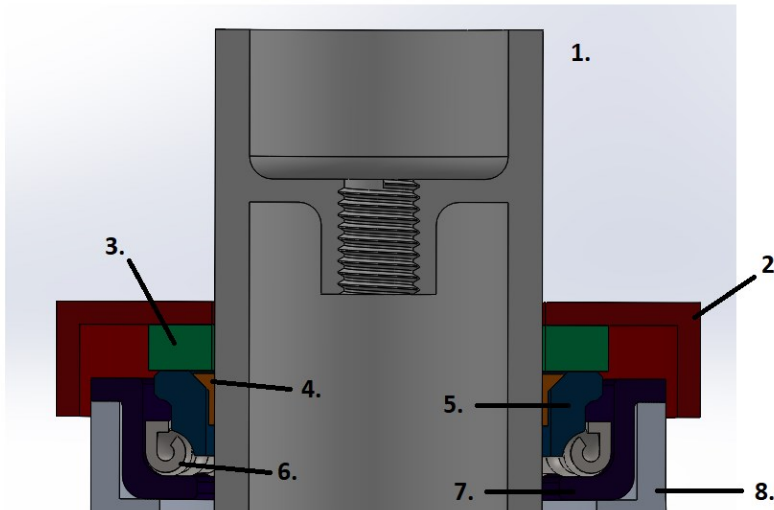




Kuva 17. Ohjainlaakerisetti [28].

Runko suunnitellaan valmistettavaksi alumiinista, jotta potkulaudan paino pysyi pienempänä. Koska alumiini on paljon pehmeämpää metallia, ei laakeria voi asettaa suoraan sitä vasten, sillä laakerin kuulat tarvitsevat kovan kosketuspinnan toimiakseen. Tämän takia tarvitaan teräsholkki, joka menee alumiiniputken ja laakerin väliin. Yleisesti käytetty teräs laakereiden sisä- ja ulkorenkaissa on hiilikromiteräs, joka sisältää noin 1 % hiiltä ja 1,5 % kromia [27, s. 24].

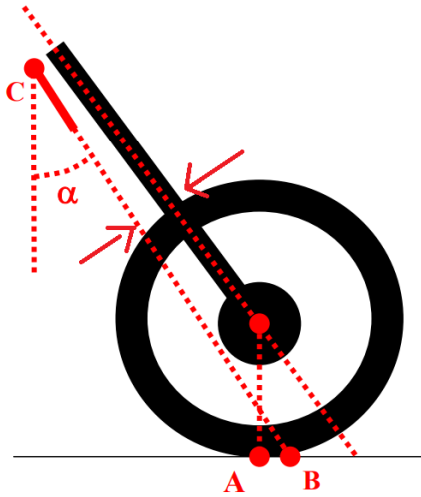
Laakeroinnista saatiin tehtyä kuvassa 18 näkyvä kokoonpano. Kuvassa osa 1 on iskunvaimentimen putki. Osa 2 on pölysuoja, jonka tarkoituksena on suojata laakeria liialta. Osa 3 kohdistaa painon laakerille, jolloin kaikki ohjauksen kitka tulee laakeripinnoilta. Osa 4 on muoviholkki, joka auttaa keskittämään laakerin vastakappaleen (osan 5) iskunvaimentimen putken ympärille. Laakeri (osa 6) istuu teräsholkin (osan 7) päällä, jolloin laakerin kuulilla on kova kosketuspinta. Osa 8 on potkulaudan rungon alumiiniputki, jonka läpi iskunvaimentimen putki menee.



Kuva 18. Ohjauslaakeroinnin kokoonpano.

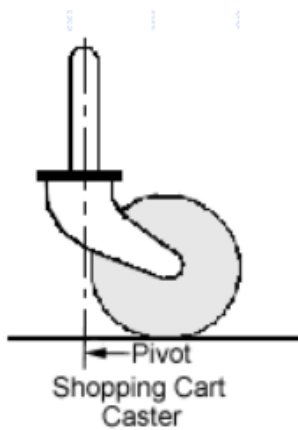
### 5.1.2 Ohjattavuus

Sähköpotkulaudan ohjattavuuteen eniten vaikuttava tekijä on caster-kulma (rake). Caster-kulma on ohjauksen kääntöakselin ja pystysuoran linjan välinen kulma. Caster-kulmalla voidaan vaikuttaa etujättöön (trail), joka vaikuttaa eniten ajotuntumaan. Etujättö on renkaan kontaktipinnan etäisyys ohjainakselin ja maan leikkauspisteestä. Myös ohjainakselin poikkeamalla (offset) voidaan vaikuttaa etujättöön. Tämä tarkoittaa sitä, että ohjausakseli ei kulje linjassa renkaan keskipisteen kanssa. Edellä mainitut asiat on havainnollistettu kuvassa 19, jossa B-C on ohjausakseli,  $\alpha$  on caster-kulma, A-B on etujättö ja nuolilla on havainnollistettu ohjausakselin poikkeama.



Kuva 19. Caster-kulma, etujättö ja offset [29].

Positiivinen etujättö tuo vakautta ja pyrkii palauttamaan ohjauksen suoraan. Negatiivinen etujättö tekee ohjauksesta holtittoman, eikä sitä juurikaan käytetä. Helpoiten havainnollistettava esimerkki etujätön merkityksestä nähdään ostoskärrien renkaista (kuva 20). Niissä ei ole lainkaan caster-kulmaa, mutta etujättö on toteutettu ohjausakselin poikkeamalla. Ostoskärren renkaista voidaan huomata, kuinka rengas pyrkii seuraamaan ohjausakselin ja maan leikkauspistettä.



Kuva 20. Etujättö ostoskärren renkaassa [30].

Koska iskunvaimentimen kiinnitykset kulkevat suorassa linjassa ohjausakselin kanssa, ei se aiheuta ohjausakseliin poikkeamaa, jolloin etujättö riippuu pelkäästään caster-kulmasta. Kuvien avulla analysoitiin eri potkulautavalmistajien käyttämiä caster-kulmia ja selvitettiin, mitä caster-kulmaa valmistajat käyttävät. Kuvien perusteella saatiin hajonta caster-kulmassa viidestä asteesta viiteentoista asteeseen. Tässä otannassa noin 10°:n kulma oli yleisin. Projektissa päätettiin käyttää tätä 10°:n kulmaa, jolla saavutetaan noin 2 cm:n etujättö.

## 5.2 Seisoma-alusta ja taka-akseli

Alustan suunnittelu aloitettiin päättämällä, sijoitetaanko akkupaketti ohjaustangon pystyputkeen vai seisoma-alustaan. Päädyttiin laittamaan akkupaketti ja kontrolleri alustaan, sillä se olisi helpompi toteuttaa sekä painopiste pysyy matalammalla ja potkulautaa on helpompi kantaa, kun akkupaketti ei ole tiellä ohjaustangossa. Toisaalta tällä ratkaisulla menetetään hieman maavaraa mutta ei merkittävästi.

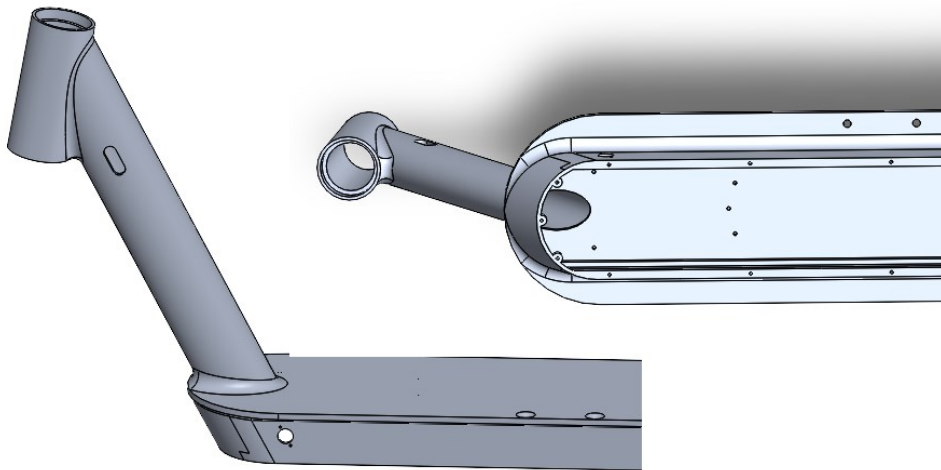
Kontrollerin ja akkupaketin fyysisten mittojen takia ne ovat järkevintä asettaa peräkkäin, jolloin niiden vaatima pinta-ala on noin 43 cm x 7 cm. Muutenkin seisoma-alustan käytettävä pituus tulisi olla lähempänä 50 cm:ä, jotta potkulaudassa olisi helppo olla kyydissä. Toinen tekijä, joka määrittelee rungon kantavan osan leveyden, on takarengas ja sen akseli. Akselin pituus on 88 mm, joka otettiin potkulaudan rungon leveydeksi, jolloin saadaan samalla palalla valmistettua takahaarukka.

Mallintaminen aloitettiin merkitsemällä kontrollerin ja akkupaketin kiinnityspaikat sekä taka-akselin asema. Näillä mitoilla saatiin sivun pituudeksi 640 mm. Sivut päätettiin tehdä C-muotoisesta alumiiniprofiilista, jolloin saadaan lisää jäykkyyttä rakenteeseen ja pohjalevyn pulteille saadaan tehtyä kierteet suoraan profiiliin.

Tämän rungon päälle suunniteltiin valmistettavaksi 5 mm:n alumiinilevystä alusta, jonka päällä potkulaudan kyydissä ollaan. Alustasta tehtiin 15 cm leveä, joka on hieman leveämpi kuin runko, jolloin potkulaudan kyydissä on helpompi

olla. Akkupaketti ja kontrolleri tulevat kiinni levyyn M3-pulteilla. Seisoma-alustan ja ohjaustangon yhdistää putki, jonka korkeus ja asema suunniteltiin etuhaarukan kokoonpanon mukaan. Eturenkaan keskipisteen ja alemman ohjainlaakerin etäisyys on noin 22 cm. Tämän mitan mukaan suunniteltiin putki, joka yhdistää alustan ja ohjaustangon, jotta alusta saataisiin mahdollisimman vaakatasoon ajotilanteessa sekä riittävä tila eturenkaan ja rungon väliin. Rungon etuosa laitetiin mukailemaan edellä mainitun putken linjaa muotoilun vuoksi.

Ohjaustangolta täytyy saada vietyä jarruvaijeri ja johdot runkoon sekä sähkömoottorin virtapiuha, joten tehtiin läpivienti niitä varten. Lisäksi tehtiin rungon kylkeen kiinnityspaikka latauspistokkeelle latausta varten. Potkulautaan haluttiin myös seisomatuki pysäköintiä varten. Tehtiin seisoma-alustaan reiät seisontatuen kiinnitystä varten. Kuvassa 21 näkyy rungon etuosan mallinnus.

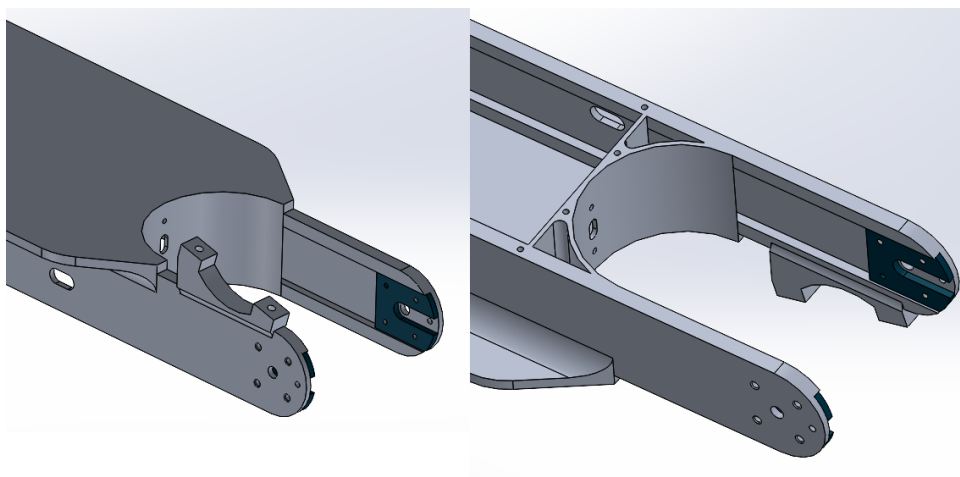


Kuva 21. Seisoma-alustan etuosa sivusta ja alapuolelta.

Akkukotelon ja takarenkaan väliin tehtiin päätylevy, joka eristää akkukotelon. Päätylevystä jatkuu puoliympyrän muotoinen pala, joka mukailee takarenkaan kaarevuutta ja tuo sivuttaissuuntaista jäykkyyttä taka-akselille. Näihin levyihin tehtiin pultin paikat takalokasuojaa varten sekä läpivientireikä takavalon johtoja varten. Takahaarukkaan suunniteltiin myös kiinnitettäväksi teräslevyt, joissa on hahlot, mihin taka-akselin pystyy liu'uttamaan. Tätä samaa hahloa hyödynnetään takalokasuojan tuessa, mikä estää takalokasuojan heilumisen ja tekee siitä

jäykemmän. Teräslevyt auttavat myös jakamaan taka-akselilta tulevan paineen tasaisemmin runkoon.

Mekaaninen jarru suunniteltiin laitettavaksi taka-akselille, joten tarvittiin kiinnityspaikka jarrusatulalle. Jarrusatula mallinnettiin suunnilleen mittojen mukaan, jotta saatiin asemoitua sen kiinnityspaikka oikealle kohdalle. Kiinnike jarrusatulalle laitettiin pieneen kulmaan, johtuen satulan muodoista. Jarrusatula tulee kiinni kahdella pultilla, joten kiinnikkeelle tehtiin M5-kierteet. Lisäksi tehtiin potkulaudan kylkeen reikä jarrukaapelia varten. Kuvassa 22 näkyy suunniteltu takahaarukka.



Kuva 22. Takahaarukka.

Aluksi potkulautaan suunniteltiin takalippa, jota vasten pystyy taaemmalla jalalla nojaamaan sekä siihen tulisi takalokasuojan kiinnitys, takavalo ja taittomekanismin kiinnitys, kun potkulautaa kannetaan. Tämä suunnitelma ei kuitenkaan käytännössä näyttänyt hyvältä eikä olisi loppujen lopuksi käytännöllinen, ja ratkaisu vaikeuttaisi potkulaudan kyydissä olemista, joten tästä suunnitelmasta luovuttiin. Takalokasuojan kiinnitys päätettiin tehdä potkulaudan kantamista varten sekä laittaa siihen myös takavalo.

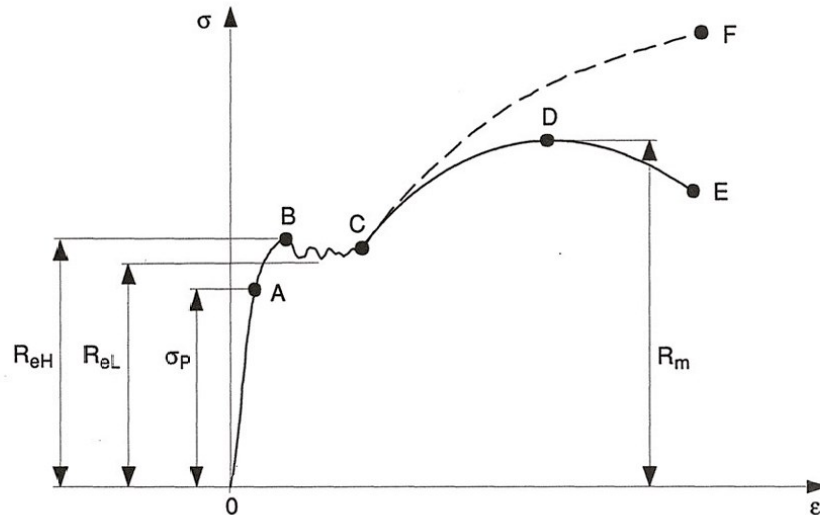
Takalokasuojassa päätettiin hyödyntää potkulaudan rungon muotoja ja aloittaa lokasuojan kiinnitys takaosan kaarevalta pinnalta. Lokasuoja on hieman

leveämpi kuin rengas, jotta se hoitaa tehtävänsä estäen suurimmat roiskeet takarenkaalta mutta on kuitenkin tarpeeksi siro, jotta se näyttää järkevältä. Kaarevaa muotoa hyödynnettiin myös takavalon suunnittelussa, jolloin takavalo seuraa lokasuojan sivuprofiilia. Lokasuojaan suunniteltiin myös lenkki, johon ohjaustangon voi kiinnittää, kun potkulautaa kannetaan. Potkulaudan kantamisesta aiheutuu suuri rasitus muoviselle takalokasuojalle, joten siihen suunniteltiin metallista tuki, joka kulkee lokasuojan takaosalta kiinni takahaarukkaan. Tämä tuo jäykkyyttä lokasuojaan. Lopuksi vielä varmistettiin simulaatiolla, että lokasuoja varmasti kestää potkulaudan kantamista.

### 5.3 Rungon FEA-simulaatio

Potkulaudan suurin rasitus tulee kuljettajan painosta, joka kohdistaa voiman suoraan alaspäin seisoma-alustaan. Potkulaudan tulisi vähintään kestää 100 kg:n paino, joten haluttiin selvittää, millaisia jännityksiä runkoon kohdistuu. Siinä hyödynnettiin FEA-simulaatiota (Finite Element Analysis). Simulaatiossa voidaan rasittaa kappaletta halutulla tavalla ja voidaan nähdä, kuinka materiaali todellisuudessa käyttäytyy.

Materiaalin rasittaminen (veto, puristus, taivutus, vääntö yms.) aiheuttaa materiaalin jännityksen, jonka yksikkö on Pascal ( $\text{N/m}^2$ ). Yleensä lukemat ovat MPa:n tai GPa:n suuruusluokissa. Jokaisella materiaalilla on myötöraja, joka saadaan esimerkiksi selville vetokokeella, josta saadaan venymäpiirros (kuva 23). Kuvaajassa jännitys  $\sigma$  on pystyakselilla ja venymä  $\epsilon$  vaaka-akselilla. Usean materiaalin kuvaaja alkaa lineaarisella osuudella, joka on materiaalin kimmoisa alue. Tällä alueella pysyttäessä muodonmuutokset ovat palautuvia. Mikäli jännitys menee materiaalin myötörajan  $R_e$  yli, ovat muodonmuutokset pysyviä. Myötörajalla yleensä tarkoitetaan alemmää myötörajaa  $R_{eL}$ . Kun materiaalin venytystä jatketaan, saavutetaan materiaalin maksimijännitys eli murtoraja  $R_m$ . Mikäli kappaleen venytystä jatketaan edelleen, menee testikappale lopulta poikki. [31.]



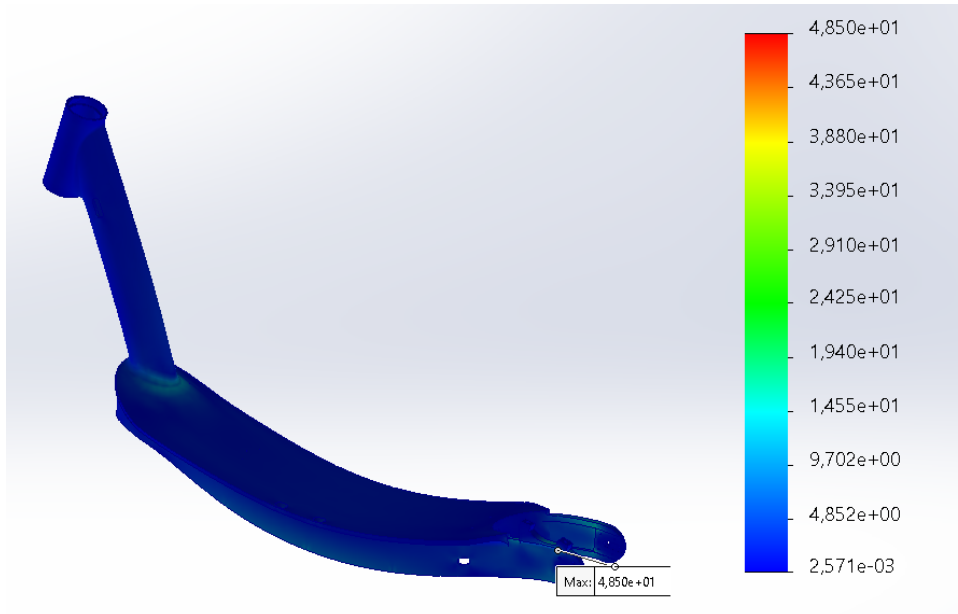
Kuva 23. Teräksen venymäpiirros [31].

Simuloinnin tarkoituksena on varmistaa, että pysytään materiaalin kimmoisalla alueella eikä ylitetä myötörajaa. Vaikka simuloinnista saataisiinkin myötörajan alapuolella oleva jännitys, täytyy ottaa huomioon varmuusluku. Varmuuslukua käytetään siksi, että sillä varmistetaan materiaalin kestävyys laskennan virheistä huolimatta. Tässä tapauksessa piti selvittää, kuinka moninkertainen sallittu jännitys täytyy materiaaliin kohdistaa, ennen kuin saavutetaan materiaalin myötöraja.

Simulaatio aloitettiin määrittämällä rajaehdoja eli tässä tapauksessa pisteet, jotka eivät pääse liikkumaan. Rungossa pystysuuntaisia voimia kantaa taka-akseli ja rungon pystyputki, joka vie paineen ohjainlaakerille. Nämä pisteet määritettiin siten, etteivät ne pääse liikkumaan, jolloin runkoon kohdistuu voima kussakin painosta. Tämän jälkeen määritettiin voiman suuruus, joka kohdistuu suoraan alaspäin seisoma-alustaan. Simulaatiossa käytettiin 1000 N:n voimaa, mikä on 100 kg hieman pyöristettynä ylöspäin. Takahaarukkaan paikoilleen teräslevyt ruuvikiinnityksellä, koska ne jakavat taka-akselilta tulevaa kuormaa runkoon.



Kun on saatu määriteltyä parametrit simulaatiota varten, luo tietokone kappaleeseen verkon, joka koostuu pienistä kolmionmuotoisista elementeistä. Näiden elementtien avulla ohjelma pystyy laskennallisesti määrittämään, minkälaisia muodonmuutoksia ja jännityksiä kappaleeseen muodostuu. Alla olevassa kuvassa 24 näkyy rungon simulaatio.



Kuva 24. Rungon simulointi.

Simuloinnista huomataan, että suurin jännitys on 48,5 MPa. SolidWorks-ohjelma korostaa muodonmuutoksia, joita materiaalissa tapahtuu, minkä takia kuvassa 24 muodonmuutokset näyttävät suurilta. Todellisuudessa maksimipoikkeama alkuperäisestä asemasta oli alle 0,2 mm. Simulaation avulla voidaan valita sopiva alumiinimateriaali, sillä tiedetään, mitä voimia sen täytyy kestää. Tähän kävisi esimerkiksi EN AW-5005 -alumiiniseos, koska sillä on tarpeeksi korkea myötöraja ja sitä voidaan hitsata [32].

#### 5.4 Taittomekanismi

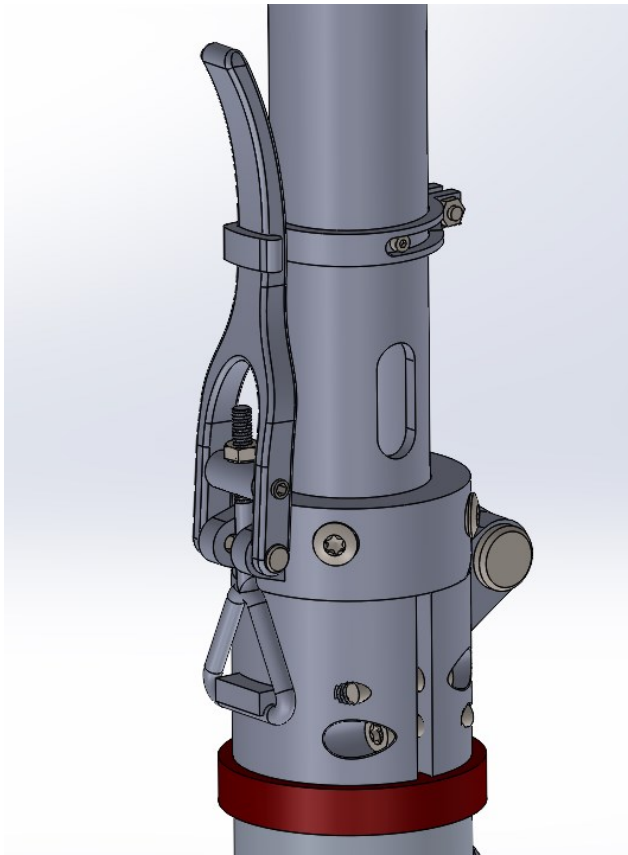
Potkulautaan suunnitellaan taittomekanismi, jotta potkulautaa olisi helpompi kantaa ja se mahtuisi pienempään tilaan säilytykseen. Markkinoilla olevissa potkulaudoissa taittomekanismeja löytyy kahdesta paikkaa: ohjaustangon

pystyputkesta ja seisoma-alustan juuresta. Tässä projektissa päätettiin asettaa taittomekanismi ohjaustangon pystyputkeen, koska se on helpompi toteuttaa eikä se altistu niin suurelle rasitukselle.

Mekanismin suunnittelu aloitettiin alaosasta, joka tulee kiinni iskunvaimentimen putkeen ja puristuu laakeripakettia vastasten. Taittomekanismin alaosa tulee pultilla kiinni iskunvaimentimeen ylhäältä päin, jolloin saadaan kiristettyä mekanismin alaosa laakerointia vasten. Jotta ohjausvoima saadaan välitettyä, tehtiin alaosaan klemmarimainen kiinnitys iskunvaimentimen putken ympärille, mikä varmistaa ohjauksen välittymisen renkaalle ja estää mekanismin liukumisen putken ympärillä.

Mekanismi suunnitellaan siten, että kuskin puolelle tulee nivel, jolloin ohjaustanko taittuu taaksepäin ja menosuuntaan tulee lukitusmekanismi. Tämä lukitusmekanismi pyrittiin pitämään mahdollisimman yksinkertaisena, joten mekanismi on samankaltainen mitä käytetään esimerkiksi lavakauluksissa, peräkärryn takalaidoissa ja laskettelumonojen siteissä. Tällaisen mekanismin suurin voima saadaan silloin, kun kiinnityspiste ja nivelet ovat suorassa linjassa, eli silloin, kun ensimmäisen ja viimeisen pisteen välinen etäisyys on suurin. Kuitenkin ollessaan suorassa linjassa mekanismi pääsee helposti kääntymään siitä toiselle puolelle ja avaamaan lukituksen, mikä ei ole suotavaa. Tämän takia mahdollistetaan mekanismin taittuminen hieman tämän pisteen yli, jotta mekanismi ei niin herkästi pääsisi itsestään aukeamaan.

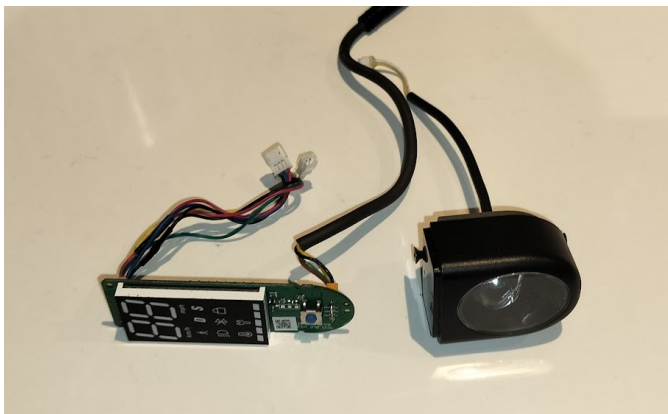
Aluksi suunniteltiin mekanismin osat kiinteiksi, jolloin niiden mittoja ei pysty jälkeenpäin muuttamaan. Tästä ratkaisusta kuitenkin luovuttiin, sillä ajan myötä nivelet saattavat löystyä, mikä aiheuttaa ajan myötä väljyyttä taittomekanismissa ja ohjaustangon heilumista. Niinpä mekanismissa käytetään hyväksi mutteriki-ristystä, jolloin optimaalinen kireys mekanismille on helppo säätää. Mekanismi varmistetaan vielä varmistussalvalla, joka tulee pystyputken ympärille ja käännetään mekanismin vivun eteen. Tämä varmistaa sen, että mekanismi ei pääse vahingossa aukeamaan ajossa. Mekanismin kokoonpano näkyy kuvassa 25.



Kuva 25. Taittomekanismin kokoonpano.

## 5.5 Ohjaustanko

Ohjaustangon keskiö päätettiin suunnitella näytön ja ajovalon ympärille (kuva 26), jotka integroidaan keskiöön. Ajatuksena on upottaa näyttö ohjaustangon keskelle, mihin sitten laitetaan tummasta läpikuultavasta muovista tehty kansi. Muovimateriaali näyttäisi käytännössä mustalta, mutta kun näyttö menee päälle, sitä pystyy silti helposti lukemaan. Ajovalo asetetaan suoraan näytön perään, sillä se on järkevin paikka asettaa valo.



Kuva 26. Näyttö ja ajovalo.

Kun keskiö saatiin mallinnettua valon ja näytön ympärille, lähdettiin suunnittelemaan muita elementtejä. Aloitettiin tekemällä kansi, joka menee näytön ja valon päälle. Kansi ajateltiin kiinnittää liimalla tai teipillä, joten sille ei sen kummempia kiinnitysratkaisuja tehty. Näytössä on yksi painike, jolla näyttöä voi kontrolloida, joten sitä täytyy olla mahdollista käyttää. Kanteen tehtiin painikkeen kohdalle reikä ja tähän reikään suunniteltiin sopiva painike kumista. Kumi on joustavaa, ja tässä hyödynnettiin sen ominaisuutta. Nappi tulee kanteen kiinni sisäpuolelta ja täyttää kanteen tehdyn reiän, jolloin sillä pystyy käyttämään näytön painiketta.

Ohjaustangot lähtevät keskiöstä, ja niihin tehtiin ura johdotusta varten. Monet ohjaustankoon kiinnitettävistä asioista, kuten peukalokaasu, käsijarru ja äänimerkinantolaite, tulevat kiinni klemmarikiinnityksellä, joka vain puristetaan ohjaustangon ympärille, joten ohjaustankoon ei tarvitse liikaa miettiä kiinnitysratkaisuja.

Ohjaustangon keskiöön suunniteltiin vielä koukku, johon voi matkan ajaksi ripustaa esimerkiksi kauppakassin sekä se toimii myös taittomekanismin kiinnityksenä takalokasuojaan potkulaudan kantamista varten. Ohjaustanko kiinnitetään pystyputkeen pulteilla, jolloin tehtiin keskiöstä lähtemään putki, joka istuu pystyputken sisälle. Pystyputken pituus mitoitettiin sen mukaan, että saatiin

ohjaustanko noin metrin korkeudelle, jolloin se on sopivalla korkeudella ajettavuuden kannalta. Kuvassa 27 näkyy suunnitellun ohjaustangon kokoonpano.



Kuva 27. Ohjaustanko.

## 5.6 Valmis runko

Kun kaikki tarvittavat komponentit saatiin suunniteltua, asemoitiin viimeisenä tarvittavat heijastimet paikoilleen. Koska potkulauta on suunniteltu käytettäväksi myös pimeällä ja hämärässä, täytyy siinä olla eteenpäin valkoista tai vaaleankeltaista valoa näyttävä ajovalo ja taaksepäin punaista väriä näyttävä takavallo sekä heijastin [33, s. 7].

Vaikka edellä mainitut valaisimet ja heijastimet on pakollisia, lisätään potkulautaan silti samat heijastimet, joita vaaditaan polkupyörässä, sillä ne on sallittua

asentaa [33, s. 8]. Etuheijastimen täytyy olla valkoinen, takaheijastimen punainen ja sivuheijastimien valkoisia tai ruskeankeltaisia [33, s. 4]. Alla olevassa kuvassa 28 näkyy suunnitellun potkulaudan lopullinen kokoonpano.



Kuva 28. Potkulaudan lopullinen kokoonpano.

## 6 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön aihe, sähköpotkulaudan suunnittelu, valikoitui omasta mielenkiinnosta sekä halusta kehittää osaamista suunnittelussa ja 3D-mallinnuksessa. Tässä projektissa pääsi monipuolisesti käyttämään 3D-mallinnusohjelmaa sekä miettimään erilaisia mahdollisuuksia toteuttaa haluttu lopputulos. Lisäksi projekti syvensi tietotaitoa sähkömoottoreista ja akkukemioista.

Projekti aloitettiin perehtymällä ajoneuvolakiin ja selvittämällä, mitä vaatimuksia potkulaudan rungolle ja komponenteille lain kautta tulee. Kun oli saatu selvitettyä lain vaatimukset, alettiin perehtyä erilaisiin sähkömoottoreihin ja akkukemioihin. Sähkömoottorit esiteltiin yleisellä tasolla, puntaroitiin niiden heikkouksia ja vahvuuksia sekä mietittiin niiden soveltuvuutta sähköpotkulaudan moottoriksi.

Akkukemioihin perehdyttäessä kävi nopeasti ilmi Li-ion-akkujen vahvuudet muihin akkuihin verrattuna. Li-ion-akkuihin perehdyttiin ja selvitettiin niiden eroavaisuuksia. Projektissa käytiin myös läpi BMS:n toimintaa, mikä on oleellinen osa Li-ion-akkupakettia.

Lopulta runkoa alettiin suunnittelemaan valikoituneen voimalinjan ympärille. Suunnittelussa keskityttiin runkoon, jolloin muut komponentin mallinnettiin vain tarpeen mukaan, kuten mitoitusta varten. Suunnittelun aikana pidettiin mielessä potkulaudan valmistettavuus ja pyrittiin pitämään ratkaisut yksinkertaisena. Projektissa tehtiin myös rungolle FEA-simulaatio rungon kestävyuden selvittämiseksi.

Potkulauta saatiin onnistuneesti mallinnettua haluttujen tavoitteiden ja ominaisuuksien mukaisesti. Lisäksi mietittiin potkulaudan ominaisuudet siten, että se täyttää lain vaatimukset, jotta sitä voisi käyttää muun liikenteen seassa. Haluttaessa potkulaudan rungosta voitaisiin tehdä tekniset piirustukset, jos potkulauta tulevaisuudessa halutaan valmistaa.

## Lähteet

- 1 Ajoneuvolaki 2021. 15.1.2021/82.
- 2 Kevyiden sähköisten liikkumisvälineiden vakuuttaminen. Verkkoaineisto. Liikennevakuutuskeskus. <<https://www.lvk.fi/ajoneuvon-vakuuttaminen/ajoneuvon-vakuuttamisvelvollisuus/kevyiden-sahkoisten-liikkumisvalineiden-vakuuttaminen/>>. Luettu 26.10.2023.
- 3 Chau, K.T. 2015. Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application. E-kirja. John Wiley & Sons Incorporated.
- 4 How does an Electric Motor work? DC Motor explained. 2020. Verkkoaineisto. The Engineering Mindset. < <https://www.youtube.com/watch?v=GQatiB-JHdl&t=1s>> Katsottu 30.10.2023.
- 5 How Electric Motors Work - 3 phase AC induction motors ac motor. 2021. Verkkoaineisto. The Engineering Mindset. <[https://www.youtube.com/watch?v=59HBoIXzX\\_c&list=PLWv9VM947MKjMtpgoXJ\\_azxuDdMnlSo69&index=1](https://www.youtube.com/watch?v=59HBoIXzX_c&list=PLWv9VM947MKjMtpgoXJ_azxuDdMnlSo69&index=1)> Katsottu 30.10.2023.
- 6 Hanejko, Fran. 2022 Induction vs. Permanent Magnet Motor Efficiency. Verkkoaineisto. Horizon Technology Inc. <<https://www.horizontechnology.biz/blog/induction-vs-permanent-magnet-motor-efficiency-auto-electrification>> 29.11.2022. Luettu 30.10.2023.
- 7 Collins, Danielle. How do switched reluctance motors differ from stepper motors? Verkkoaineisto. Motion Control Tips. <<https://www.motioncontroltips.com/how-do-switched-reluctance-motors-differ-from-stepper-motors/>> Luettu 1.11.2023.



- 8 Devesh, Kumar. 2016. Review of Synchronous Reluctance Motors. Verkkoaineisto. The University of Texas. <[https://www.researchgate.net/publication/301341254\\_Review\\_on\\_Synchronous\\_reluctance\\_motors](https://www.researchgate.net/publication/301341254_Review_on_Synchronous_reluctance_motors)> Luettu 3.11.2023.
- 9 Goldberg, Lee. New Motor Designs Help EV Makers Kick the Rare-Earth Habit (Part 3). 2023. Verkkoaineisto. ElectronicDesign. <<https://www.electronicdesign.com/markets/automotive/article/21273164/electronic-design-new-motor-designs-help-ev-makers-kick-the-rare-earth-habit-part-3>> 6.9.2023. Luettu 4.11.2023.
- 10 Liang, Jing; Dong, Yan & Jing, Jie. 2023. Control Strategy of Synchronous Reluctance Motor Using Empirical Information Brain Emotional Learning Based Intelligent Controller Considering Magnetic Saturation. Verkkoaineisto. Applied Sciences. <<https://www.mdpi.com/2076-3417/13/9/5327>> 24.4.2023 Luettu 4.11.2023
- 11 Alarco, Jose & Talbot, Peter. 2015. The history and development of batteries. Verkkoaineisto. Phys.org. <<https://phys.org/news/2015-04-history-batteries.html>> 30.4.2015. Luettu 7.11.2023.
- 12 Gianfranco, Pistoia. 2014. Lithium-Ion Batteries Advances and Applications. E-kirja. Elsevier.
- 13 How does the Lead Acid Battery Work? 2021. Verkkoaineisto. Battery University. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-201-how-does-the-lead-acid-battery-work>> Päivitetty 21.10.2021. Luettu 7.11.2023.

- 14 Battery Energy Density. 2020 Verkkoaineisto. Grepow. <<https://www.grepow.com/blog/battery-energy-density.html>> 26.10.2020. Luettu 8.11.2023.
- 15 Nickel-based Batteries. 2021. Verkkoaineisto. Battery University. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-203-nickel-based-batteries>> Päivitetty 22.10.2021. Luettu 8.11.2023.
- 16 How to Restore Nickel-based Batteries. 2021. Verkkoaineisto. Battery University. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-807-how-to-restore-nickel-based-batteries>> Päivitetty 3.11.2021. Luettu 22.11.2023.
- 17 NiMH Battery Charging: how to charge them. Verkkoaineisto. Electronics Notes <[https://www.electronics-notes.com/articles/electronic\\_components/battery-technology/nimh-nickel-metal-hydride-charging.php](https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/battery-technology/nimh-nickel-metal-hydride-charging.php)> Luettu 8.11.2023
- 18 Andrea, Davide. 2010. Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs. E-kirja. Artech House.
- 19 Leinonen, Joakim. 2021. Litiumioniakun fysikaaliset käyttäytymismallit ja akkukemian valinta. Insinööriyö. Metropolia Ammatikorkeakoulu. Theseus-tietokanta. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/508707/Leinonen\\_Joakim.pdf;jsessionid=4C84466D92AE0536059B982AEA0664E8?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/508707/Leinonen_Joakim.pdf;jsessionid=4C84466D92AE0536059B982AEA0664E8?sequence=2)>
- 20 Types of Lithium-ion. 2021. Verkkoaineisto. Battery University. <<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>> Päivitetty 22.10.2021. Luettu 9.11.2023.
- 21 Miao, Yu; Hynan, Patrick; von Jouanne, Annette & Yokochi, Alexandre. 2019. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric

- Vehicles and Opportunities for Advancements. Verkkoaineisto. Energies. <<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/6/1074/pdf>> 20.3.2019. Luettu 9.11.2023.
- 22 Stroe, Daniel Ioan. 2014. Lifetime Models for Lithium-ion Batteries used in Virtual Power Plant Applications. PhD thesis. Department of Energy Technology, Aalborg University. <[https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/549543532/Lifetime\\_Models\\_for\\_Lithium\\_ion\\_Batteries\\_used\\_in\\_Virtual\\_Power\\_Plant\\_Applications.pdf](https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/549543532/Lifetime_Models_for_Lithium_ion_Batteries_used_in_Virtual_Power_Plant_Applications.pdf)> Luettu 9.11.2023
- 23 Nitta, Naoki; Wu, Feixiang; Tae Lee, Jung & Yushin, Gleb. 2014. Li-ion battery materials: present and future. Verkkoaineisto. ReserachGate. <[https://www.researchgate.net/publication/269631963\\_Li\\_ion\\_Battery\\_Materials\\_Present\\_and\\_Future](https://www.researchgate.net/publication/269631963_Li_ion_Battery_Materials_Present_and_Future)> Luettu.10.11.2023.
- 24 Lithium Titanate (LTO) Cells - Technical Advantages. Verkkoaineisto. GWL Group. <<https://shop.gwl.eu/LTO-Tech/>> Luettu 23.11.2023.
- 25 Lithium Titanate Battery LTO. Verkkoaineisto. EVLithium. <<https://www.evlithium.com/lithium-titanate-battery-lto/>> Luettu 23.11.2023.
- 26 Sähkökootteri etuhaarukan vaimennin kestävä. Verkkosivut. Fruugo.fi <[https://www.fruugo.fi/sahkoskootteri-etuhaarukan-vaimennin-kestava-sahkoskootteri-etuhaarukan-jousitus-xiaomi-m365-lle/p-220858562-470838182?language=fi&ac=croud&asc=pmax&gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiA7OqrBhD9ARI-sAK3UXh2UVNA6DhdFo3mWN3YptRtzP0wXTmfRIrtome-llk-JxzwdmHBAYfO4aAjm9EALw\\_wcB](https://www.fruugo.fi/sahkoskootteri-etuhaarukan-vaimennin-kestava-sahkoskootteri-etuhaarukan-jousitus-xiaomi-m365-lle/p-220858562-470838182?language=fi&ac=croud&asc=pmax&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiA7OqrBhD9ARI-sAK3UXh2UVNA6DhdFo3mWN3YptRtzP0wXTmfRIrtome-llk-JxzwdmHBAYfO4aAjm9EALw_wcB)> Luettu 14.12.2023

- 27 Rolling bearings. 2018. Verkkoaineisto. SKF <[https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802809de/pdf\\_preview\\_medium/0901d196802809de\\_pdf\\_preview\\_medium.pdf](https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/0901d196802809de/pdf_preview_medium/0901d196802809de_pdf_preview_medium.pdf)> Luettu 14.12.2023.
- 28 Xiaomi ohjainlaakerisetti. Verkkoaineisto. Sähköpotkulaudat.fi <<https://sahkopotkulaudat.fi/tuote/xiaomi-ohjainlaakerisetti/>> Luettu 14.12.2023.
- 29 Santtu Ahonen & Risto Kaivola. 2006. Ajodynamiikka. Verkkoaineisto. Suomen motoristit ry. <<http://www.mmaf.fi/documents/Kopterilaki-Ajogeometria101.pdf>> Luettu 15.12.2023.
- 30 Pyörän asentokulmien perusteet. Verkkoaineisto. Suomentyökalu.fi. <<https://www.suomentyokalu.fi/app/uploads/2022/08/pyoran-asentokulmien-perusteet.pdf>> Luettu 15.12.2023.
- 31 Karhunen, Jouko; Lassila, Veikko; Pyy, Seppo; Ranta, Aarno; Räsänen, Satu; Saikkonen, Matti & Suosara, Eero. 11. painos. 1992. Lujuusoppi. E-kirja. Otatieto.
- 32 Seoksen käyttö. Verkkoaineisto. Alumeco Group. <<https://www.alumeco.fi/asiantuntemus-ja-teknikka/alumiinitiedot/seoksen-kaytto/>> Luettu 25.1.2024.
- 33 Kaksi- ja kolmipyöräisten ajoneuvojen, nelipyörien, kevyiden sähköajoneuvojen, niiden perävaunujen sekä kevyiden auto-maattisten tavarankuljettimien rakenne ja varusteet. 2024. 1.1.2024. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom. <<https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/454001/50058>>