

# Nelikopterin toiminta ja uuden runkorakenteen suunnittelu



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö  
Kone- ja tuotantotekniikka

Riihimäki / Syksy 2017

Niko-Kristian Koivu

Kone- ja tuotantotekniikka  
Hämeen ammattikorkeakoulu Riihimäki

---

<b>Tekijä</b>	Niko-Kristian Koivu	<b>Vuosi</b> 2017
<b>Työn nimi</b>	Nelikopterin toiminta ja uuden runkorakenteen suunnittelu	
<b>Työn ohjaaja/t</b>	Jaakko Vasko	

---

## TIIVISTELMÄ

Tein tämän opinnäytetyön omana projektina ja sen tavoitteena oli parantaa osaamistani suunnittelijana, sekä kehittää 3D-mallinnustaitojani. Valitsin aiheeksi nelikopterin, koska ne ovat lähivuosina kasvattaneet suosiota harrastuksena ja kaupallisina ratkaisuin. Olin myös pitkään miettinyt oman nelikopterin hankintaa tai sellaisen rakentamista.

Kolme keskeistä kohtaa opinnäytetyössäni olivat nelikopterin kokoaminen valmiista komponenteista, ymmärtää miten nelikopterin lennättämiseen tarvittavat komponentit toimivat, sekä suunnitella täysin uusi runkorakenne nelikopterille. Lopuksi oli myös tarkoitus rakentaa jo suunniteltu nelikopterin runkorakenne.

Tulokset olivat onnistuneita. Testiversion rakennus onnistui hyvin ja se antoi hyvän kuvan siitä, millainen uusi runkorakenne tulisi olla ja mitä komponentteja siihen pitäisi saada mahtumaan. Olin myös erittäin tyytyväinen suunnittelemaani uuteen runkorakenteeseen. Siitä tuli yksinkertainen, helposti valmistettava ja esteettisesti tyylikäs.

Suunniteltua runkorakennetta en päässyt kuitenkaan valmistamaan, koska testiversion rakentaminen ja uuden runkorakenteen suunnittelu veivät enemmän aikaa, kuin olin ajatellut.

Vaikka en pystynyt rakentamaan suunnittelemaani runkorakennetta, niin mielestäni asettamani tavoitteet täyttyivät erinomaisesti. Opin paljon nelikopterien toiminnasta, kehityin 3D-ohjelmien käytössä ja pääsin taas askeleen lähemmäksi kohti suunnittelijan työtä.

**Avainsanat** Nelikopteri, drone, suunnittelu

**Sivut** 33 sivua, joista liitteitä 2 sivua

Mechanical and production engineering  
Hamk Riihimäki

---

<b>Author</b>	Niko-Kristian Koivu	<b>Year</b> 2017
<b>Subject</b>	Drone function and new frame designing	
<b>Supervisors</b>	Jaakko Vasko	

---

#### ABSTRACT

I made this thesis as an own project and my main goals were to be a better mechanical designer and improve my 3D modeling skills. I chose drones for my topic, because drones are going to a big thing in the future and I also had thought to buy a drone or build one before I started the thesis.

There were a few main points in my thesis. First I was meant to assemble a test drone and understand how the components work inside the drone. I was also meant to design a new drone frame and build it after that.

The results were positive. Test version assembling succeeded well and it gave me good picture of how I should design the new frame for the drone and what components I had to fit in there. I was also very pleased of the new drone frame that I designed. It became simple, easy to build and also very stylish.

Unfortunately, I couldn't build the drone that I designed, because the test version assembling and designing the new frame took more time than I thought.

I think all the goals I set were fulfilled even if I couldn't build the new frame. I learned a lot of the drones and my 3D-modeling skills improved and the most important thing was that I became a better mechanical designer.

**Keywords** Drone, Designing

**Pages** 33 pages including appendices 2 pages

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	MIKÄ ON NELIKOPTERI? .....	2
3	NELIKOPTERIN OSAT .....	4
3.1	Moottorit.....	4
3.2	Elektroniset nopeudenohjaimet (ESC) .....	7
3.3	Lennonohjain.....	8
3.4	Radiolähetin ja -vastaanotin .....	10
3.5	Propellit .....	13
3.6	Akku ja virranjako.....	15
4	TESTIVERSION RAKENTAMINEN JA LENNÄTYS.....	17
5	RUNKORAKENTEEN SUUNNITTELU .....	19
5.1	Runkorakenteen vaatimukset .....	19
5.2	Muoto ja suunnittelu .....	20
5.3	Valmistusmenetelmät .....	21
5.4	Valmistusmateriaalit .....	24
6	YHTEENVETO .....	27
7	LÄHTEET.....	28
	LIITTEET.....	32

## Liitteet

Liite 1. Suunniteltu nelikopteri takaapäin.

Liite 2. Suunniteltu nelikopteri alhaaltapäin.

Liite 3. Räjätyskuva suunnitellusta nelikopterista.

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni aihe on nelikopterin toiminta ja uuden runkorakenteen suunnittelu. Sen tavoitteena on esitellä, miten nelikopteri toimii ja mitä komponentteja vaaditaan, jotta se saadaan lentoon. Tavoitteena oli myös kasata testiversio valmiista osista ja sen pohjalta suunnitella uusi nelikopterin runkorakenne. Toivon myös, että opinnäytetyöni toimii oppaana niille, jotka haluavat itse kasata oman nelikopterin.

Päädyn kyseiseen opinnäytetyöaiheeseen, koska minua kiinnosti rakentaa oma nelikopteri ja halusin tutustua sen toimintaan. Halusin myös rakentaa oman runkorakenteen, koska toivoin opinnäytetyön kehittävän minua suunnittelijana.

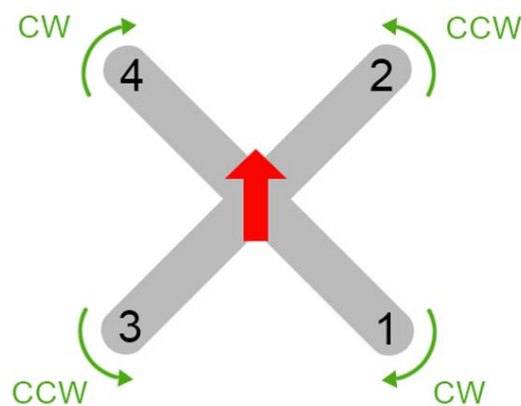
Nelikopterin toiminnasta kertovan osion on tarkoitus antaa yksinkertainen ja ymmärrettävä kuva komponenttien toiminnasta. Sen avulla jokaiselle pitäisi jäädä käsitys siitä, miten nelikopteri toimii. Testiversion rakentaminen-osio kertoo rakennusvaiheesta, sekä siitä missä onnistuin ja mitä olisin voinut tehdä toisin. Uuden runkorakenteen suunnittelu-osio kertoo mitä vaatimuksia runkorakenteelle oli asetettu, miten muoto ja suunnittelu määräytyivät, sekä mitkä olivat valmistustekniikat ja -materiaalit.

Lähteinä olivat pääasiassa englanninkieliset artikkelit sivustoilta, jotka ovat keskittyneet nelikoptereiden harrastustoimintaan. 3D-suunnittelussa ohjelmistona toimi Creo Parametric 2.0.

## 2 MIKÄ ON NELIKOPTERI?

Nelikopteri on jollain tapaa samanlainen kuin helikopteri. Toisin kuin helikoptereissa, nelikopterissa nostovoima tapahtuu neljän moottorin avulla yhden sijaan. Helikoptereissa on myös takana moottori, joka tasapainottaa sen lentoa. Nelikoptereissa tasapainotus tapahtuu neljän moottorin avulla, jotka ovat symmetrisesti sijoitettu rungon ympärille. Moottoreista kaksi pyörii myötäpäivään ja toiset kaksi vastapäivään, mikä pitää kopterin tasapainossa ja mahdollistaa sen hallinnan. Alla olevassa kuvassa on esitetty moottorien ja propellien pyörimissuunnat. Moottorit 1 ja 4 pyörivät myötäpäivään ja moottorit 2 ja 3 pyörivät vastapäivään.

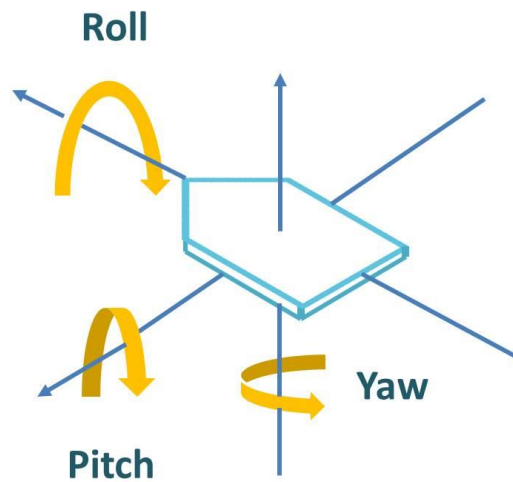
(ArduPilot 2016)



Kuva 1. Moottorien pyörimissuunnat nelikopterissa. (Hobby-wing n.d)

Nelikopteri pystyy liikkumaan eri suuntiin muuttamalla moottorien nopeuksia. Jos kopterilla halutaan lentää vasemmalle (roll), niin silloin oikeanpuoleisten moottoreiden nopeudet nousevat ja vasemmalla olevien laskevat. Jos halutaan lentää eteenpäin (pitch), niin takana olevien moottorien tehot nousevat ja edessä olevien tehot laskevat.

Muuttamalla kulmittain toisiinsa nähden olevien moottoreiden nopeutta pystytään tekemään muutoksia nelikopterin kulkusuuntaan eli kopteri pyörii akselinsa ympäri (yaw). Korkeutta pystyy säätelemään antamalla kaikille moottoreille yhtä paljon tehoa. (ArduPilot 2016)



Kuva 2. Roll, Pitch, Yaw. (Amebaiot 2017)

Nelikoptereiksi kutsutaan koptereita, jotka toimivat neljällä moottorilla. Saatavilla on myös koptereita, jotka toimivat jopa kahdeksalla moottorilla. Yleisesti kaikkia koptereita, jotka toimivat useammalla, kuin yhdellä moottorilla nimitetään multikoptereiksi. Nelikoptereita ja multikoptereita voidaan kutsua myös sanalla drone. (quadcopterhq 2013)

Nelikoptereita on monenlaisia erilaisiin tarkoituksiin. Niitä on olemassa pienistä muutaman senttimetrin kokoisista miehitettyihin koptereihin asti. Yleisesti nelikopterit ovat kuitenkin kooltaan niiden väliltä ja niitä käytetään mm. videokuvaamiseen ja drone-kilpailuun. Nelikoptereissa on useasti myös kamera, jonka avulla sitä voi lennättää ensimmäisestä persoonasta ja tallentaa myös videomateriaalia sen avulla. Alapuolella on kuvat suosituista videokuvaukseen, sekä kilpailuun ja akrobatia lentelyyn tarkoitettuista nelikoptereista.



Kuva 3. DJI Phantom 3-kuvauskopteri. (Dji 2017)



Kuva 4. QAV 250-kilpakopteri. (FliteFPV n.d)

### 3 NELIKOPTERIN OSAT

Tässä kappaleessa käydään läpi nelikopterin osat, jotka tarvitaan sen lentoon saamiseen, sekä sen vakaaseen ja hallittuun ohjaukseen.

#### 3.1 Moottorit

Nelikopteriin tarvitaan neljä moottoria. Moottoreihin liitetään propellit ja kun ne saadaan pyörimään tarpeeksi nopeasti se aiheuttaa työntövoiman ylöspäin, joka nostaa nelikopterin ilmaan. (Dronetest 2014)

Moottorityypit, joita käytetään nelikoptereissa ovat harjaton ja harjallinen tasavirta moottori. Kerron tässä työssä vain harjattomasta tasavirtamoottorista, koska ne ovat yleisemmin käytössä nelikoptereissa ja käytän selaista myös omassa nelikopterissani.

Harjaton moottori on uudempaa teknologiaa ja se on myös luotettavampi, tehokkaampi, äännettömämpi ja kevyempi kuin harjallinen moottori. Toimintaan harjaton moottori vaatii kuitenkin rinnalleen elektronisen nopeudenohjaimen, josta kerron myöhemmin lisää. (Learn engineering 2014.)

Harjaton moottori koostuu kahdesta erillisestä osasta, roottorista ja staattorista. Roottori on se osa, joka pyörii ja siihen on kiinnitetty pysyviä magneetteja kuoren sisäpintaan. Staattori on osa, joka taas pysyy paikallaan ja siinä on kuparikäämejä ympyrän muodossa. (Dronetest 2014)





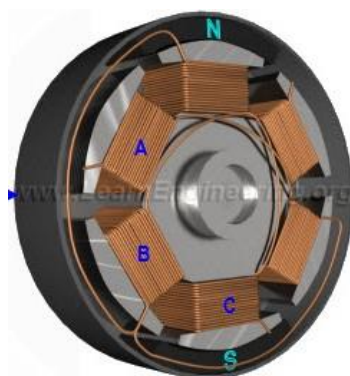
Kuva 5. Staattori ja roottori. (dronetest 2014)

Harjattoman moottorin toiminta perustuu sähkömagnetismiin. Staattori sisältää käämpareja, jotka ovat vastakkain toisiinsa nähden. Kun käämpariin johdetaan virtaa, siitä tulee sähkömagneetti. Moottorin pyöriminen perustuu yksinkertaisesti roottorin pysyvien magneettien ja staattorin sähkömagneettien väliseen vuorovaikutukseen.

(Learn engineering 2014.)

Roottori saadaan pyörimään johtamalla virtaa aina staattorin seuraavaan käämpariin. Kuvasta kuusi nähdään, kun virtaa johdetaan ensiksi käämpariin A, niin staattorin ja Roottorin vastakkaiset navat alkavat vetää toisiinsa puoleensa. Näin Roottorin pohjoinen N-napa alkaa liikkua kohti käämiä A. Kun N-napa saavuttaa käämin A, niin virta syötetään käämiin B ja roottorin N-napa liikkuu kohti käämiä B. Seuraavaksi virta syötetään käämiin C ja N-napa hakeutuu sen kohdalle. Tämän jälkeen jälleen käämiin A johdetaan virtaan, mutta vastakkaisella napaisuudella. Tätä prosessia toistetaan ja roottori jatkaa pyörimistä.

(Learn engineering 2014.)



Kuva 6. Staattori ja roottori yhdessä. (Learn engineering 2014.)

Harjattomia moottoreita on olemassa kahta eri tyyppiä (outrunner, inrunner). Näiden moottoreiden erona on, että outrunner-moottoreissa pyörivä

osa on ulkokehällä ja inrunner-moottoreissa sisäosa pyörii ja ulkokehä pysyy paikallaan. Inrunner-moottoreita käytetään usein R/C-autoissa, koska niiden pyörintänopeus on suurempi, kuin outrunner- moottoreissa. Outrunner-moottorit sopivat paremmin lentokoneisiin ja nelikoptereihin, koska ne tuottavat suuremman väännön, jota tarvitaan suurempien propellien pyörittämiseen. (Dronetest 2014)

Harjatonta moottoria ostaessa sen alapuolella on yleensä pitkä sarja numeroita ja kirjaimia. Yleisesti kirjaimilla ei ole suurta merkitystä, vaan ne kertovat mitä tyyppiä tai mallisarjaa moottori edustaa. Numerot taas kertovat tärkeistä mitoista moottoria valittaessa.

Kuvan seitsemän kuvatekstinä on yleinen numero- ja kirjainyhdistelmä, joka löytyy moottoreista. Ensimmäiset kirjaimet kertovat moottorin valmistajasta ja mallisarjasta. Numerot 1806 taas kertovat staattorin mitat. Tässä tapauksessa staattorin halkaisija on 18mm ja korkeus 6mm. (Dronetest 2014)

2300KV- luokitus on kerroin, jolla voidaan laskea, kuinka monta kertaa minuutissa moottori pyörii. Se voidaan laskea yksinkertaisella kertolaskulla  $kV * V = rpm$ . Eli kertomalla KV-luokituksen akun jännitteellä (V), niin saadaan tulokseksi, kuinka monta kertaa minuutissa moottori pyörii ilman propelleja. Kun propellit kiinnitetään, niin moottoreille tulee suurempi ilmanvastus ja moottorien pyörintänopeus hieman laskee.

(Dronetest 2014)



Kuva 7. DYS BE1806 2300KV CW/CCW. (Himodel n.d).

Kuvan seitsemän kuvatekstissä esitetyt CW/CCW kertovat moottorin pyörimissuunnan. CW (clockwise) tarkoittaa, että moottori pyörii myötäpäivään ja CCW (counter clockwise) tarkoittaa, että moottori pyörii vastapäivään. CW ja CCW moottorit ovat toiminnaltaan samanlaisia, mutta erona niissä, että akselien kierteen ovat päinvastaiset. Tämä tarkoittaa sitä, että

myötäpäivään pyörivien moottoreiden propellien lukitus tapahtuu vastapäivään ja vastapäivään pyörivien moottoreiden propellien lukitus tapahtuu myötäpäivään.

Nelikopterissa kaksi moottoria pyörivät myötäpäivään ja toiset kaksi pyörivät vastapäivään. Käyttämällä kierteitä, jotka ovat päinvastaiset, kuin moottorien pyörimissuunnat, niin propellien mutterit kiristyvät itsestään moottorien pyöriessä ja pysyvät tiukasti kiinni. Jos kierteet ovat samansuuntaiset kuin moottorien pyörimissuunnat, niin on mahdollista, että propellit ja niitä pitävät mutterit irtoavat lennon aikana. (Oscarliang 2016)

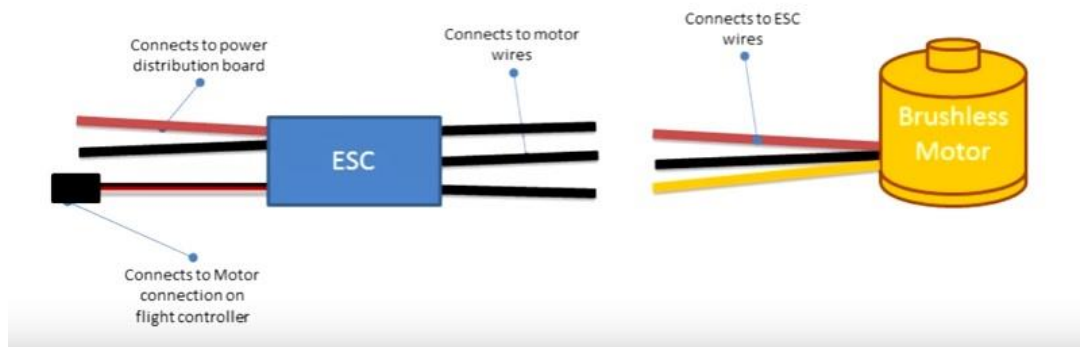
### 3.2 Elektroniset nopeudenohjaimet (ESC)

Elektroninen nopeudenohjain on englanniksi Electronic Speed Controller eli ESC. Se on virtapiiri, jonka tehtävä on säätää sähkömoottorin nopeutta ja toimia lisäksi dynaamisena jarruna. Toinen päätehtävä ESC:llä on muuttaa akusta tuleva jännite 5 voltin jännitteeksi, jotta lennonohjain ja muu elektroniikka toimivat oikein. (Painless360 2015.)

ESC:stä lähtee moottorille kolme johtoa. Ne kuljettavat virran ESC:stä moottorissa oleville käämeille joiden avulla moottori saadaan pyörimään, niin kuin edellisessä moottorit-osiossa on esitetty. Johtojen avulla annetaan myös palautetta moottorilta ESC:lle siitä, missä kohdassa pysyvät magneetit ovat, jonka avulla ESC tietää mille käämille annetaan virtaa seuraavaksi.

Moottorin ja ESC:n väliset johdot voidaan kytkeä miten päin tahansa. Kytkenästä riippuu vain mihin suuntaan moottori pyörii. Jos johdot kytketään suoraan, niin kuin alla olevassa kuvassa, niin moottori pyörii myötäpäivään. Jos taas mitkä tahansa johdoista kytketään ristiin, niin moottori pyörii vastapäivään.

Moottorille lähtevien johtojen lisäksi ESC:stä lähtee johdot virranjakajalle ja servojohto lennonohjaimelle. Kun ESC on muuntanut akusta tulevan jännitteen pienemmäksi, niin servojohto tarjoaa sen viiden voltin jännitteenä nelikopterin muulle elektroniikalle. Servojohto sisältää myös signaalijohdon, joka kertoo ESC:lle tietoa lennonohjaimelta ja sen, kuinka paljon virtaa ESC voi päästää moottorille ja näin hallitsee moottorin nopeutta. (Painless360 2015.)



Kuva 8. ESC ja harjaton moottori. (Painless360 2015.)

Jotta ESC pystyy alentamaan akusta tulevan korkean jännitteen viiden voltin jännitteeksi, niin täytyy siinä olla jonkinlainen BEC-piiri, eli Battery Eliminator Circuit (BEC). BEC-piirit jaetaan karkeasti kahteen ryhmään: linear ja Switched.

Linear BEC -piirin toiminta perustuu siihen, että se käyttää resistoria alentamaan akusta tulevan jännitteen viiden voltin jännitteeksi. Mitä suurempi jännite, niin sitä enemmän BEC-piiri kuumenee, kun virta kulkee resistorin läpi. Linear BEC -piirit ovat halpoja ja ne on helppo asentaa, mutta sopivat vain pienemmille kahden tai kolmen kennon LiPo- eli litiumpolymeeriakuille, koska ne tuottavat niin paljon lämpöä.

Switched BEC-piiri taas toimii niin, että se säätelee jännitettä päälle ja pois erittäin nopealla tahdilla ja pitää jännitteen alhaalla tuottamatta hukkalämpöä ja kuluttamatta turhaan sähköä. Switched BEC-piiri sopii myös suurempi jännitteisille akuille.

(Hooked on RC airplanes n.d).

### 3.3 Lennonohjain

Nelikopterit ovat aerodynaamisesti epävakaita ja tarvitsevat lennonohjaimen lentääkseen vakaasti. Tuloksena on "Fly by wire"-ohjaus eli jos tietokone ei toimi, niin et myöskään pysty lentämään kopterilla. (ArduPilot 2016)

Lennonohjain eli flight controller on periaatteessa nelikopterin aivot. Se on keskusyksikkö, joka toimii siihen asennetulla laiteohjelmistolla (esim. Libre pilot). Suurimmassa osassa lennonohjaimia on 32-bittinen prosessori ja erilaisia sisäänrakennettuja antureita, joiden avulla lennonohjain tunnistaa lentoasennon ja laskee tarvittavat laskelmat seuraaviin liikkeisiin.

Lennonohjain myös vastaanottaa käyttäjän antamia komentoja. Komennot vastaanotettuaan lennonohjain osaa antaa oikeat käskyt ESC:lle ja sitä kautta moottoreille ja näin ohjaa nelikopteria oikeaan suuntaan ja pitää sen ilmassa. (Oscarliang 2016)



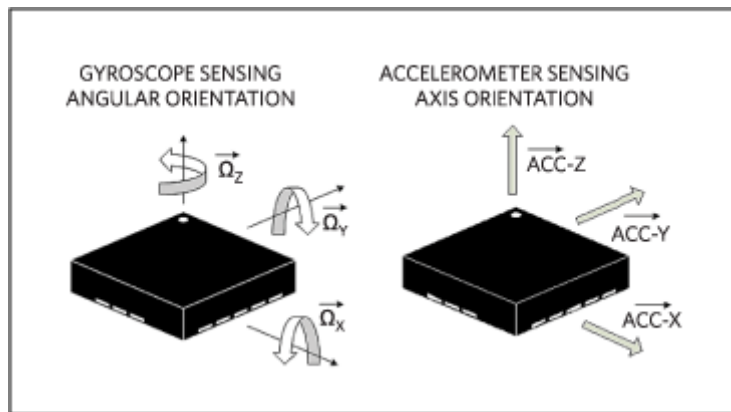
Kuva 9. CC3D -lennonohjain. (Build your own drone n.d)

Melkein kaikissa lennonohjaimissa on sisäänrakennettuna perusanturit, kuten gyroskooppi ja kiihtyvyyssanturi. Jotkut lennonohjaimet sisältävät lisäksi kehittyneempiä antureita, kuten barometrin ja magnetometrin. Lennonohjain voi toimia myös liittimenä oheislaitteille, kuten GPS:lle, ledvaloille, lähestymisanturille yms. (Oscarliang 2016)

Jotta nelikopteri tunnistaa, missä asennossa se on ja mihin suuntaan se on menossa, niin tarvitsee se toimiakseen erilaisia antureita. Tärkeimmät anturit ovat kiihtyvyyssanturi, sekä gyroskooppi. Näiden kahden anturin avulla nelikopteri tunnistaa, että se on oikeinpäin maahan nähden ja pysyy vakaana ilmassa.

Kiihtyvyyssanturin toiminta perustuu painovoimaan ja voimiin. Jos nelikopteri ei ole liikkeessä, niin siihen ei kohdistu mitään voimia. Kun nelikopteri liikkuu eteenpäin, niin syntyy vastakkainen voima taaksepäin. Kiihtyvyyssanturi tunnistaa sen ja tietää näin, että liike tapahtuu eteenpäin. Kiihtyvyyssanturi on kolmiakselinen ja se tunnistaa vain akselinsuuntaisesti tapahtuvan kiihtyvän liikkeen eli se tunnistaa kiihdytyksestä tulevat g-voimat ja tietää näin mihin suuntaan se liikkuu. (Carlos Pineiro 2014.)

Gyroskooppi mittaa kulmakiihtyvyyttä ja sen tehtävä on tunnistaa nelikopterissa tapahtuvat kaltevuuden muutokset. Se tunnistaa maan vetovoiman avulla nelikopterissa tapahtuvat liikkeet, jotka tapahtuvat akseleiden (x,y,z) ympäri. (Carlos Pineiro 2014.)



Kuva 10. Gyroskoopin ja kiihtyvyyssmittarin aistimat suunnat. (Maxim Integrated Products, inc. 2015)

Barometri on painesensori, joka mittaa nelikopterin lentokorkeutta. Se tunnistaa ilmanpaineen eri korkeuksissa ja pystyy sen avulla pitämään lentokorkeuden vakaana muutaman senttimetrin tarkkuudella. Barometri ei ole välttämätön sensori lentämisen kannalta, mutta helpottaa esimerkiksi aloittelijoita, kun lentokorkeus pysyy halutulla tasolla. (Dronetrest 2015)

Magnetometri on sensori, joka tunnistaa magneettisia voimia kompassin tavoin. Magnetometri käyttää maapallon magneettikenttää hyväksi tunnistessaan mihin suuntaan nelikopteri on matkalla. Tämä sensori on tärkeä, koska gyroskooppi ja kiihtyvyyssmittari eivät pelkästään pysty kertomaan lennonohjaimelle, mihin suuntaan nelikopteri liikkuu sillä hetkellä. (Dronetrest 2015)

### 3.4 Radiolähetin ja -vastaanotin

Radiolähetin on laite, joka antaa lennättäjälle mahdollisuuden ohjata nelikopteria langattomasti. Radiolähettimellä annetut signaalit/käskyt vastaanottaa radiovastaanotin, joka on kiinnitetty kopteriin ja yhdistetty lennonohjaimeen. (Oscarliang 2017)



Kuva 11. Fly Sky FS-i6 -Radiolähetin. (Killerplanes n.d)

Radiolähttimen avulla pystytään ohjaamaan nelikopteria ja se sisältää kaksi ohjaussauvaa, joiden avulla erilaiset liikkeet pystytään toteuttamaan. Ohjaus on mahdollista toteuttaa yleisesti neljällä eri tavalla. Alla olevassa kuvassa on esitetty kaksi useimmin käytettyä tapaa toteuttaa ohjaus radiolähttimellä. (Oscarliang 2017)



Kuva 12. Nelikopterin ohjaustapoja. (Oscarliang 2017)

Yleisin tapa toteuttaa ohjaus on tapa 2, jolloin vasemmassa ohjaussauvassa on kaasua eli nelikopterin korkeussäätö. Mitä enemmän kaasua annetaan eli vasenta ohjaussauvaa nostetaan ylöspäin, niin sitä enemmän tehoja siirtyy moottoreille ja nelikopteri nousee korkeammalle ilmaan. Kun vasenta ohjaussauvaa käännetään vasemmalle ja oikealle, niin nelikopteri pyörii z-akselin ympäri eli sillä pystytään muuttamaan suuntaa mihin keula osoittaa. Oikealla ohjaussauvalla taas pystytään tekemään liikkeet eteen- ja taaksepäin, sekä oikealle ja vasemmalle. (Oscarliang 2017)

Kuvassa kuusi oleva Fly Sky FS-i6 radiolähetin sisältää kuusi kanavaa. Kanavien määrä määrittää sen, kuinka montaa yksittäistä toimintoa nelikopterissa pystytään hallitsemaan. Esimerkiksi jokainen radiolähettimellä tehtävä liike vaatii oman kanavan. Se tarkoittaa sitä, että vähimmäismäärä kanavia on neljä, jotta nelikopterilla pystytään lentämään. Ylimääräisiin kanaviin voidaan asentaa muita toimintoja, kuten erilaisia lentotiloja, korkeuden pito yms. Ylimääräisiin kanaviin asennetut toiminnot eivät ole välttämättömiä, mutta lisäävät mukavuutta lennättämiseen.

Radiolähetin toimii 2.4Ghz:n taajuudella ja se on yleisin taajuus, mitä nelikopterien lennättämiseen käytetään. Radiolähettimillä, jotka toimivat matalammalla taajuudella päästään suurempiin välimatkoihin nelikopterin ja pilotin välillä, mutta niitä harvemmin käytetään pienissä nelikoptereissa. (Oscarliang 2017)

Alla olevassa kuvassa on radiovastaanotin. Se vastaanottaa radiolähetimen antamat signaalit langattomasti ja kuljettaa ne johtoja pitkin lennonohjaimelle käsiteltäviksi. Vastaanottimen oikeassa laidassa näkyvät kanavaliitännät, joihin kiinnitetään virta- ja signaalijohdot ja toiset päät johdoista kiinnitetään lennonohjaimeen. Radiovastaanotin ja -lähetin tulevat yleensä samassa paketissa ja niiden täytyy olla yleisesti saman valmistajan tekemiä, jotta toimivat yhdessä. (Oscarliang 2017)



Kuva 13. Radiovastaanotin. (Alexnld n.d)

Radiovastaanottimen ja lennonohjaimen väliseen kommunikointiin on olemassa erilaisia protokollia. Yleisimmät niistä ovat PWM, PPM, SBUS, IBUS. Eroavaisuutena eri protokolilla on pääosin liitännätavat, sekä signaalien vastajat.



PWM (Pulse Width Modulation) on protokolla, jossa jokaiselle kanavalle on kytkettävä oma johtonsa. Mikä tarkoittaa, että jos radiolähetin- ja vastaanotin tukevat kahdeksaa tai jopa kymmentä kanavaa, niin johtojen määrä on melko suuri, mikä lisää nelikopterin painoa ja vaikeuttaa asennusta. PWM on myös hieman vanhempaa teknologiaa ja käyttää analogista signaalia, mutta on kuitenkin suosittu ja löytyy melkein jokaisesta radiovastaanottimesta. (Dronetrest 2015)

PPM (Pulse Position Modulation) käyttää myös analogista signaalia, mutta ei tarvitse jokaiselle kanavalle omaa johtoa, vaan pystyy lähettämään signaalit kaikista kanavista yhdellä johdolla peräkkäin. Tämä helpottaa asennusta ja ei tuo turhaa lisäpainoa nelikopteriin. (Dronetrest 2015)

SBUS (Serial BUS) on uudempi protokolla ja käyttää digitaalista signaalia tiedon siirtoon. Digitaalisen signaalin etuina ovat, että se pystyy käsittelemään paremmin virheitä, joita signaalin siirrossa voi tapahtua. Se myös antaa nelikopterille tarkemman ja nopeamman ohjattavuuden johtuen signaalin korkeammasta resoluutiosta ja pienemmästä vasteajasta. Digitaalisen signaalin vasteaika on noin kolme kertaa pienempi, kuin analogisen signaalin. Se ei kuitenkaan ole huomattava ero tavalliselle nelikopterin lennättäjälle, mutta kilpakopterin lennättäjälle, sillä on jo merkitystä. SBUS protokolla käyttää myös vain yhtä signaalijohtoa, mutta pystyy tukemaan jopa 18-kanavaista radiolähetintä. Tätä protokollaa käytetään yleisesti FrSky:n ja Futaban tuotteissa. (Droneinsider 2016, Dronetrest 2015)

IBUS on samantapainen protokolla, kuin SBUS. Sen on kehittänyt yhtiö nimeltä FlySky ja se käyttää myös digitaalista signaalia. IBUS on kahdensuuntainen protokolla, mikä tarkoittaa, että se pystyy signaalien lähettämisen lisäksi myös vastaanottamaan niitä. Vastaanotettavia signaaleja voi olla esimerkiksi akun jännite. (Dronetrest 2015)

### 3.5 Propellit

Propelleja on olemassa monia erilaisia eri käyttötarkoituksiin. Asioita, jotka nelikopterin käyttäjää kiinnostavat, ovat propellien pituus, nousu, materiaalit ja niiden hinta. Materiaaleja ovat mm. muovi, vahvistettu muovi, hiilikuitu ja puu. Yleisimmät materiaalit ovat kuitenkin muovi ja hiilikuitu. Propellit saattavat rikkoontua herkästi osumatilanteissa ja siksi muoviset propellit ovat suosittuja. Ne toimivat hyvin ja ovat halpoja verrattuna puusta ja hiilikuidusta valmistettuihin propelleihin. Hiilikuitupropellit ovat taas selvästi kalliimpia, mutta ovat myös kestävämpiä, kuin muoviset ja puiset. (learnrobotix n.d)

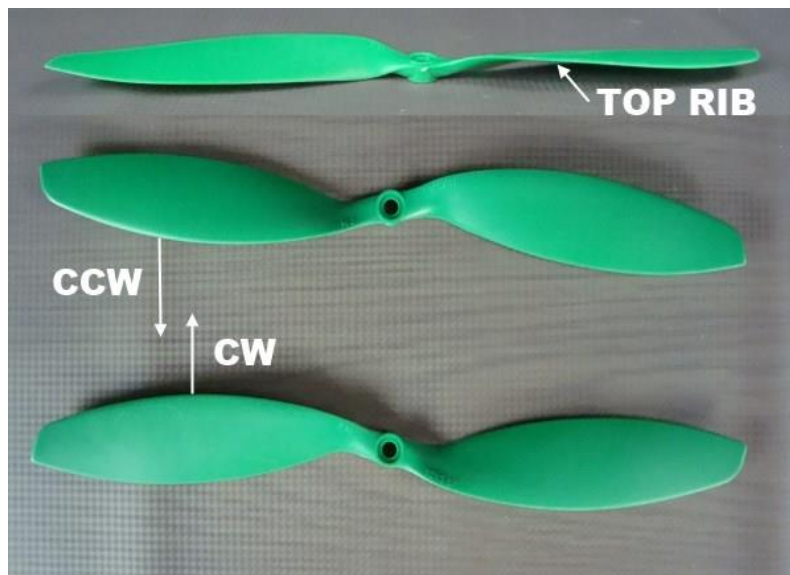
Propellin mitat esitetään yleensä tuumina ja merkitään esimerkiksi muotoon 5x3. Ensimmäinen numero tarkoittaa propellin pituutta ja toinen nu-

mero tarkoittaa nousua. Nousulla tarkoitetaan mitta, jonka propelli nousee yhden pyörähdyksen aikana. Mitä suurempi nousu on, niin sitä suurempi on nostovoima ja myös moottorilta vaadittavat tehot. Yleisesti ottaen matalammalla nousulla saadaan enemmän vääntöä ja aiheutetaan vähemmän turbulenssia. Korkeammalla nousulla propelli pystyy siirtämään suuremman määrän ilmaa eli nelikopteri pystyy lentämään nopeammin, mutta se aiheuttaa enemmän turbulenssia ja tuottaa vähemmän vääntöä.

(Learnrobotix n.d, Clym Montgomery 2014)

Pienempiä, alle kahdeksan tuuman propelleja käytetään yleisesti nelikoptereissa, jotka on tarkoitettu kilpailuun tai akrobatialentämiseen, missä tarvitaan suuria nopeuksia ja ketteryyttä. Niissä käytetään myös pienempiä moottoreita, joissa on suurempi kV-arvo. Suurempia, yli kahdeksan tuuman propelleja käytetään koptereissa, joiden täytyy lentää vakaammin ja kantaa painavampaa lastia, kuten videokuvakseen tarkoitettuja välineitä. Suuremmissa koptereissa käytetään moottoreita, joissa on pienempi kV-arvo. (Learnrobotix n.d, Clym Montgomery 2014)

Karkeasti voidaan sanoa, että yli kilon painavissa nelikoptereissa käytetään moottoreita, joiden kV-arvo on välillä 700-900kV. Nelikopterien, jotka ovat 500g- 1kg:n välissä käytetään moottoreita, joiden kV-arvo on 900-1300kV ja kopterit, jotka painavat alle 500g, käytetään noin 1200-2300kV moottoreita. (Learnrobotix n.d)



Kuva 14. Propellien pyörimissuunnat (learnrobotix n.d)

Kuten aikaisemmin on mainittu, niin nelikopterissa kahden moottorin pitää pyöriä myötäpäivään ja kaksi muuta täytyy pyöriä vastapäivään. Jotta nelikopteria pystytään lennättämään vakaasti, niin tarvitaan myös propellit, jotka ovat suunniteltu pyörimään moottorien kanssa samaan suuntaan,

niin että ne saavat tuotettua nostovoiman ylöspäin. Yllä olevassa kuvassa on esitetty myötä- ja vastapäivään pyörivät propellit. Silloin, kun ylempänä oleva siiven reuna (top rib) osoittaa moottorin pyörimissuuntaan, niin propellit ovat oikein asennettu. (Learnrobotix n.d)

### 3.6 Akku ja virranjako

Nelikopterit tarvitsevat energiaa lentääkseen ja siihen niissä käytetään LiPo eli litium polymeeri- akkuja. LiPo-akut ovat erittäin kevyitä ja ne pystyvät varastoimaan ja luovuttamaan suuria määriä energiaa. Lipo-akut, joita käytetään RC- autoissa, nelikoptereissa yms. koostuvat yksittäisistä LiPo-soluista, jotka on kytketty sarjaan. Jokaisessa solussa on 3.7 voltin nimellisjännite. Tämän takia akkujen jännitteen määrää esitetään usein solujen määrällä. Alapuolella olevassa kaaviossa esimerkiksi 3S tarkoittaa, että akku sisältää kolme yksittäistä LiPo-solua ja ne tuottavat yhteensä 11.1V jännitteen. (Oscarliang 2017)

1S = 1 solua = 3.7V

2S = 2 solua = 7.4V

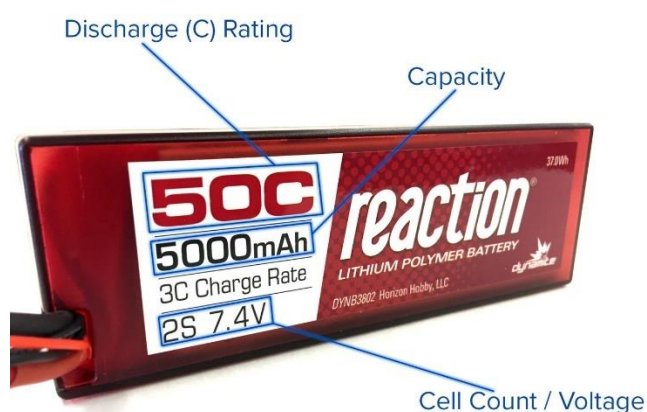
3S = 3 solua = 11.1V

4S = 4 solua = 14.8V

5S = 5 solua = 18.5V

6S = 6 solua = 22.2V

Kuten aikaisemmin mainittiin, niin jännitteen määrä vaikuttaa suoraan moottoreiden pyörimisnopeuteen  $kV * V = rpm$ . Pitää kuitenkin muistaa, jos haluaa käyttää suurempi jännitteisiä akkuja, niin moottoreiden ja nopeudenohjainten on pystyttävä käsittelemään suuremmat virtamäärät. (Oscarliang 2017)



Kuva 15. Litium polymeeri-akku. (rogershobbycenter n.d)

Yläpuolella olevan LiPo-akun kapasiteetti on 5000mAh eli milliampeerituntia. Se tarkoittaa käytännössä, kuinka paljon energiaa akku pystyy itseensä sitomaan. Mitä suurempi kapasiteetti akulla on, niin sitä kauemmin nelikopterilla on mahdollista lentää. Sopiva kapasiteetti riippuu kopterin koosta ja käyttötarkoituksesta. (Brian Schneider n.d)

Pieniin koptereihin sopii akut, joissa on pieni kapasiteetti, koska ne ovat kevyitä ja niissä pienempi tehoiset moottorit. Suuremmissa kuvaukseen tarkoitetuissa koptereissa tarvitaan taas suurempaa kapasiteettia tehokkaammille moottoreille, painavalle kuormalle, kuvausvälineille yms. Kilpakooperit halutaan myös rakentaa mahdollisimman keveiksi, ja silloin joudutaan monesti tinkimään lentoajasta käyttämällä kevyempiä akkuja.

LiPo-akuissa on vielä yksi tärkeä arvo, jota tulee tarkastella ennen, kuin akun valitsee nelikopteriin. Se on purkausarvo (C). C-arvo kertoo, kuinka nopeasti akku pystyy purkautumaan turvallisesti. Kuvassa olevan akun C-arvo on 50C. Kertomalla C-arvon akun kapasiteetilla  $50C * 5A = 250A$ , niin saadaan virtamäärä, jonka akku pystyy luovuttamaan turvallisesti. Akkua valittaessa tulisi miettiä, että akun turvallisesti luovuttama virtamäärä on suurempi, kuin mitä neljä moottoria käyttää virtaa propellit kiinnitettyinä. (Painless360 2016.)

Akusta saatava virta pitää vielä jakaa neljälle elektroniselle nopeudenohjaimelle (ESC), johon käytetään yksinkertaista virranjakajaa (Power distribution board). Siihen kytketään akun, sekä ESC-piireiltä tulevat virta ja maadoitus johdot. Näin akusta saatava virta pystytään jakamaan neljälle ESC:lle ja sitä kautta muille nelikopterin komponenteille. Jotkut virranjakajat sisältävät myös BEC-piirin, millä pystytään alentamaan akun jännite 12 voltin tai 5 voltin jännitteeksi. Alennettuun jännitteeseen pystytään kytkeämään esimerkiksi led-valoja. (Dronetrest 2015)

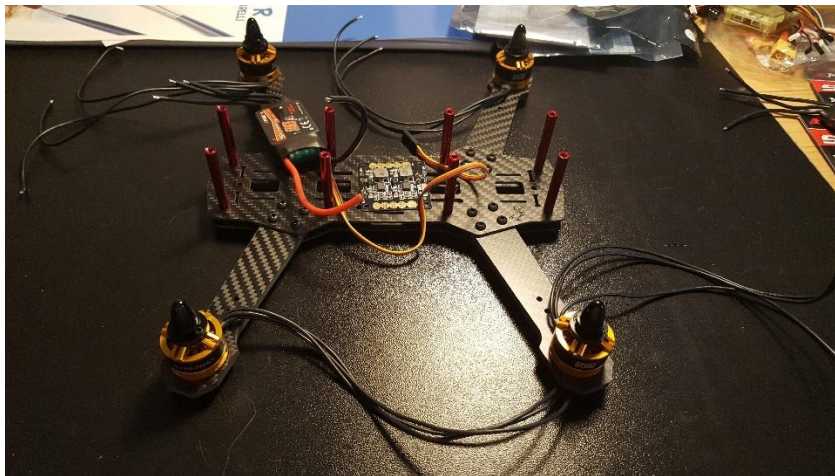


Kuva 16. Virranjakaja (Power Distribution Board). (DHgate n.d)

## 4 TESTIVERSION RAKENTAMINEN JA LENNÄTYS

Testiversion rakentaminen oli tärkeä osa opinnäytetyötä ja se auttoi minua ymmärtämään, mitä komponentteja vaaditaan nelikopterin lennättämiseen ja miten komponentit ovat yhteydessä toisiinsa. Myös uuden runkorakenteen suunnittelun kannalta oli tärkeää tietää, kuinka paljon komponentit vievät tilaa. Testiversion avulla ymmärsin myös, mitkä asiat ja komponentit nelikopterissa ovat tärkeitä ja pystyin tutustumaan niihin paremmin ja rajaamaan opinnäytetyötäni selkeämmäksi.

Nelikoptereiden rakentaminen on yleisesti melko uusi harrastus ja siitä löytyy vähän kirjallista tietoa, joten tutustuin nelikopterin rakentamiseen lähinnä Youtube-videoiden avulla. Ne auttoivat minua ymmärtämään nelikopterin toiminnan perusteita, sekä ostamaan oikeat komponentit, jotka sopivat keskenään toistensa kanssa.



Kuva 17. Testiversion rakennusvaihe.

Testiversion rakentaminen sujui hyvin, mutta rakentamisen aikana ja sen jälkeen huomasin muutaman asian, jotka olisin voinut tehdä toisin. Valitsin 20 ampeerin elektroniset nopeudenohjaimet ja huomasin rakennusvaiheessa, että ne olivat fyysiseltä kooltaan melko suuret ja ne oli vaikea mahtuttaa nelikopterin varsiin, niin että propellit pääsevät pyörimään. Olisin voinut valita 12 ampeerin nopeudenohjaimet, sillä ne olisivat hyvin riittäneet päästämään virran läpi moottoreille.

Maksimi virtamäärä, jonka moottorit tarvitsevat yhteensä 5x3 propelleilla on  $4 \cdot 6.5A = 26$  ampeeria. Eli riittää, että nopeudenohjaimet päästäisivät läpi 26 ampeeria. Valitsemani 20 ampeerin nopeudenohjaimet ovat siis selvästi ylimitoitettuja, koska neljä nopeudenohjainta voivat päästää läpi yhteensä 80 ampeeria.

Toinen ongelma tuli vastaan, kun nopeudenohjaimet piti liittää virranjakajaan. Liian suuret nopeudenohjaimet, lyhyet johdot ja virranjakajan plus-

ja miinusnapojen sijoittelu vaikeuttivat juotosten tekoa. Pienemmät nopeudenohjaimet ja toisenlainen virranjakaja olisivat helpottaneet asennusta.

Testivaiheessa huomasin myös, että yksi moottoreista on rikki ja se täytyi vaihtaa. Onneksi olin lukenut mahdollisista ongelmista komponenteissa ja olin tilannut varamoottorin. Olisin myös kaivannut lennonohjaimeen barometriä, mikä olisi pitänyt nelikopterin lentokorkeuden paikallaan, mutta ymmärsin sen vasta tutustuttuani lennonohjainten toimintaan tarkemmin.

Testiversion komponentit:

- Akku: VP Flight 1300mAh Li-Po 30C/60C
- 4 x Moottori: DYS BE1806 – 2300Kv
- 4 x ESC: EMAX Simonk series 20A
- Lennonohjain: Openpilot CC3D
- Virranjakaja: CC3D Power Distribution Board
- Propellit: Gemfan 5030
- Radiolähetin ja -vastaanotin: Fly Sky FS-i6
- Runko: QAV250-hiilikuitu



Kuva 18. Nelikopterin valmis testiversio.

Yläpuolella on kuva rakentamastani testiversiosta. Ennen ensimmäistä lennätystä täytyi kalibroida moottorit, nopeudenohjaimet, sekä ohjaus. Kalibroinnin suoritin liittämällä lennonohjaimen USB-kaapelilla tietokoneeseen ja käyttämällä LibrePilot-ohjelmaa. Ohjelman avulla nopeudenohjaimet kalibroivat itsensä automaattisesti, moottoreihin täytyi laittaa minimi- ja

maksimiarvot, joilla ne toimivat, sekä radiolähetin piti kalibroida niin, että ohjaukset vastaavat nelikopterin liikkeitä.

Kalibroinnin jälkeen tein nelikopterilla ensimmäisen lennon omalla pihalla. Kopteri nousi ilmaan tyylikkäästi, mutta huomasin heti, että alue missä kopteria lennätin oli sille liian pieni. Sain pidettyä kopteria ilmassa, mutta liikkuminen eteen- taaksepäin oli mahdotonta. En ollut aikaisemmin lennättänyt nelikopteria, joten sen hallinta ja suunnan muuttaminen osoittautuivat haastaviksi. Kopterissa on myös melko paljon tehoa, joten pienikin liike radiolähettimellä sai kopterin liikkumaan useita metriä eteenpäin. Lennätin kopteria muutaman kerran ylös ja alas, jonka jälkeen ymmärsin, että se tarvitsee suuremman alueen lennättämiseen.

Ostin ensilennon jälkeen pienen ja tehottomamman nelikopterin, jonka avulla pystyin harjoittelemaan nelikopterin hallintaa.

## 5 RUNKORAKENTEEN SUUNNITTELU

Tutustuminen nelikopterin toimintaan ja sellaisen kokoaminen valmiista osista antoi hyvän pohjan runkorakenteen suunnittelua varten. Testiversio rakentaminen mahdollisti tiedon, mitä komponentteja kopterin runkoon pitää sisällyttää ja kuinka pieneen tilaan ne on mahdollista asentaa. Testiversio on rakenteeltaan kilpakopteri ja myös uusi runkorakenne on suunniteltu sen mukaan, että se toimii kilpakopterin runkona ja siihen pystyy asentamaan samat komponentit, mitä testiversioon on asennettu.

### 5.1 Runkorakenteen vaatimukset

Suunnittelun lähtökohtana halutaan aina valmistaa jokin tuote tiettyyn käyttötarkoitukseen. Vaatimus ja ominaisuusprofiili antavat silloin tietyt lähtökohdat tuotteen suunnitteluun ja valmistukseen. Esimerkiksi auton suunnittelussa voidaan määritellä, että halutaan valmistaa tehokas ja laadukas auto, mikä tarkoittaa, että silloin joudutaan käyttämään kalliimpia materiaaleja ja pienempiä toleransseja. Eli tuotteille ja materiaaleille asetetaan ominaisuusvaatimuksia, mitkä määrittelevät minkälainen tuoteesta tulee ja näiden ominaisuuksien avulla päästään haluttuun lopputulokseen. (Koivisto, Kaarlo & al. 2004)

Vaatimukset nelikopterin runkorakenteelle:

- Kevyt
- perusrakenne pitää muotonsa ja kestää osumia
- Mahdollisuus asentaa kaikki tarvittavat komponentit
- Propelleilla on oltava tilaa pyöriä

- Tyylikäs
- Yksinkertainen valmistaa
- Osien liittäminen toisiinsa on oltava helppoa
- Osia pystyttävä vaihtamaan tarpeen tullen
- Materiaalien kestävä tiettyjä lämpötiloja

Yllä olevat ominaisuudet ovat perusvaatimuksia uuden rungon suunnittelun tueksi. Rungon on oltava kevyt, jotta moottorien ja propellien aikaansaama noste on riittävä ja nelikopteri saadaan ilmaan. Perusrakenteen on pidettävä muotonsa ja sen on pystyttävä vastaanottamaan mahdollisista törmäyksistä aiheutuvia iskuja.

Rungossa pitää olla tarpeeksi tilaa, jotta kaikki lentämiseen tarvittavat komponentit saadaan asennettua. Moottorien paikat on mietittävä niin, etteivät propellit osu runkoon tai muihin komponentteihin. Esteettinen ulkoasu on aina tärkeä. Rungon valmistus täytyy olla yksinkertaista, jotta kustannukset pysyvät alhaisina ja osat pystytään valmistamaan mahdollisesti koulun laitteilla. Osien liittäminen toisiinsa pitää olla yksinkertaista, mikä helpottaa rungon kokoamista. Osat pitää suunnitella myös, niin että rikkoutuneita osia pystytään vaihtamaan uusiin. Rungossa on käytettävä materiaaleja, jotka kestävät akun ja muiden komponenttien kuumenemisen.

## 5.2 Muoto ja suunnittelu

Kilpakopterit on yleisesti suunniteltu hyvin yksinkertaisiksi ja ne valmistetaan melkein kokonaan hiilikuidusta. Oman kopterin suunnittelussa halusin kuitenkin tuoda myös kestävyuden lisäksi muotoilua, joka näkyy korirakenteessa ja laskutelineissä. Korirakenteen muodoista halusin suunnitella virtaviivaisen ja mahtipontisen. Se on myös mitoitettu niin, että sen sisään mahtuu tarvittavat komponentit (lennonohjain, radiolähetin ja virranjakaja). Laskeutumistelineet ovat suunniteltu niin, että ne antaisivat nelikopterille hämähäkkimäisen ulkonäön. Kaareva muoto auttaa myös laskeutumaan pehmeämmin ilman, että laskeutumistelineet rikkoutuvat. Ruuvi-kiinnitykset auttavat telineitä kestävämmän paremmin sivuttaissuuntaisia voimia.

Akulle tarkoitettu alumiinilevy on sijoitettu erikseen perusrungon alapuolelle, jotta akun kiinnittäminen ja irrottaminen olisi helppoa. Akun sijoittaminen rungon alapuolelle mahdollisti myös korirakenteen suunnittelun rungon yläpuolelle. Akku kiinnitetään aluslevyyn tarranauhan avulla, joka on kilpakoptereissa yleisesti käytössä oleva kiinnitystapa. Lennonohjaimelle ja virranjakajalle on myös kiinnitystä varten tehty reiät runkolevyyn. Radiovastaanotin taas joudutaan kiinnittämään korin alle kaksipuolisella teipillä ja nopeudenohjaimet kiinnitetään nelikopterin raajoihin nipusiteillä.



Kori kiinnitetään neljällä M3-ruuvilla ja mutterilla kiinni runkolevyyn. Myös jokaisen laskeutumistelineen kiinnitykseen käytetään neljää M3-ruuvia ja mutteria. Akun aluslevy on kiinnitetty runkolevyyn M3-ruuveilla, joiden välissä on alumiiniset tukiputket. Tukiputkien sisällä on vastaavasti M3-ruuveille tarkoitetut kierteet. Moottorit ovat valmisosia ja ne kiinnitetään runkoon M2-ruuveilla. Alapuolella on kuva suunnittelemastani nelikopterista ja liitteistä löytyy siitä lisäkuvia. Liitteistä löytyy myös räjäytyskuva, josta näkee mitkä osat kopterista ovat valmisosia ja mitkä minun suunnittelemani.



Kuva 19. Valmis 3D-mallinnettu kuva suunnitellusta nelikopterista

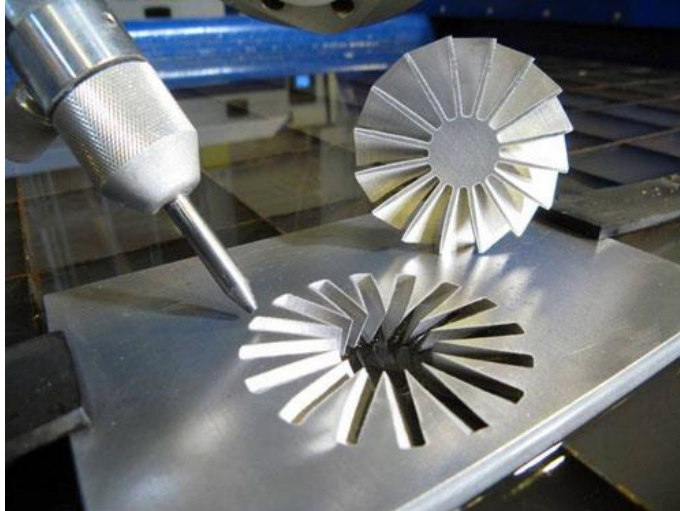
Uuden nelikopterin suunnittelunimeksi muotoutui Orion ja se mallinnettiin Creo Parametric 2.0 -ohjelmalla. Rungon halkaisija on noin 300mm, joka mitataan ristikkäin toisiinsa nähden olevien raajojen päästä päähän. Korkeutta uudella rungolla on noin 80 mm.

### 5.3 Valmistusmenetelmät

Työstömenetelminä rungon valmistuksessa käytetään vesileikkausta ja 3D-tulostusta. Rungon pohjalevy, sekä sen alapuolelle sijoitettu akun aluslevy vesileikataan. Rungon ja komponenttien päälle sijoitettava kori ja nelikopterin raajoihin sijoitettavat laskutelineet valmistetaan käyttäen 3D-tulostusta.

Vesileikkaus on mekaaninen työstöprosessi, jossa vettä suihkutetaan korkealla paineella työstettävään kappaleeseen ja se irrottaa siitä materiaalia. Se on tehokas ja hellävarainen menetelmä, jolla voidaan leikata monia erilaisia materiaaleja, kuten muovia, betonia, puuta ja terästä. Kaikkia materiaaleja pystytään vesileikkaamaan ilman, että niihin tulee minkäänlaisia

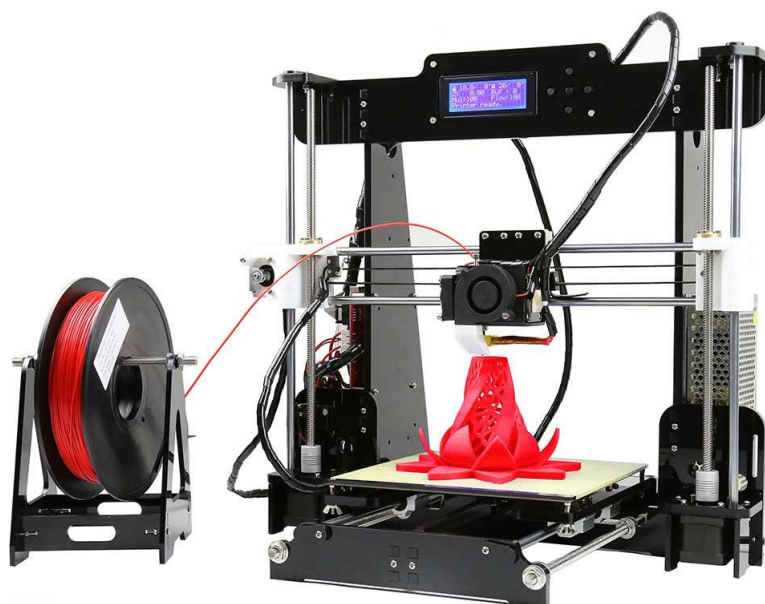
termisiä tai kemiallisia muutoksia, repeilyjä yms. Pehmeämmissä materiaaleissa käytetään leikkauksessa pelkkää vettä, mutta kovempia materiaaleja leikatessa käytetään abrasiivileikkausta, jossa veden sekaan sekoitetaan hiekkaa. Vesileikkauksella on mahdollista työstää tarkkoja ja monimutkaisia muotoja ja sillä saavutetaan jopa 0.1mm tarkkuus, jolloin materiaalihukka pysyy myös alhaisena. (Aki Tulikari 2011.)



Kuva 20. Vesileikkauksella työstetty turbiini. (Aaron Sherwood 2013)

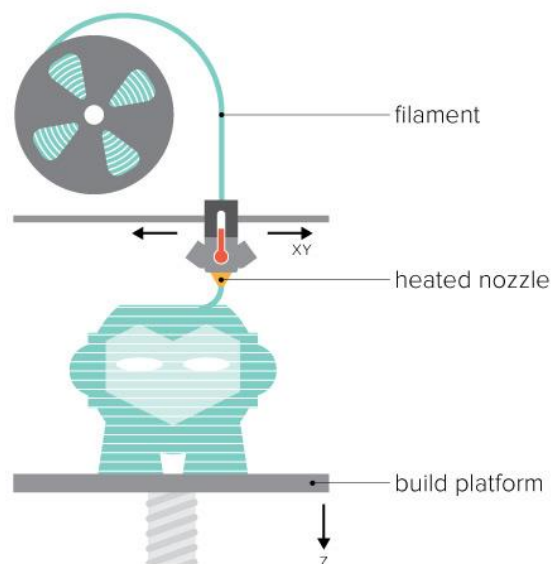
Vesileikkaus sopii erinomaisesti kilpakoptereille suunniteltujen muotojen toteuttamiseen. Sen avulla saadaan työstettyä nelikopterin perusrunko ja akulle tarkoitettu aluslevy. Osat saadaan valmistettua yhdestä kappaleesta, jolloin hitsausta ei tarvita, mikä auttaa tekemään kopterista tasapainoisen ja ulkoasultaan tyylikkään.

Toinen työstömenetelmä uuden nelikopterirungon valmistuksessa on 3D-tulostus. 3D-tulostus on valmistustekniikka, jossa CAD-ohjelmalla (Computer Aided Design) tehdään digitaalinen malli, joka muutetaan fyysiseksi kolmiulotteiseksi objektiksi tulostamalla materiaalia kerroksittain. 3D-tulostus tekniikoita on erilaisia ja myös materiaalit vaihtelevat laajasti. (3D Hubs 2017)



Kuva 22. FDM-tekniikalla toimiva 3D-tulostin (Gearbest 2017)

Yleisin teknologia 3D-tulostuksessa on FDM (Fused Deposition Modeling), suomeksi pursotus. Siinä filamentti eli tulostusmateriaali ohjataan vastuksilla kuumennetun suuttimen läpi ja se sulattaa filamentin. Heti suuttimen läpi päästyään filamentti alkaa kuitenkin jäähtyä. Jäähtyvä materiaali voidaan ohjata haluttua rataa pitkin ja rakentaa näin kerros kerrallaan fyysinen objekti. (3D Hubs 2017)



Kuva 21. FDM-tekniikka. (3D Hubs 2017)

FDM on markkinoiden halvin 3D-tulostusteknologia. Siinä on kuitenkin mahdollista käyttää monia eri muovimateriaaleja ja niiden sekoituksia.

Yleisimpiä ovat Akryylnitriini Butadieeni Styreeni (ABS), Biohajoava Polyaktidi (PLA) ja Nylon. Lisäksi voidaan tehdä materiaalisekoituksia, jotka sisältävät esim. hiilikuitua, puuta ja pronssia. (3D Hubs 2017)

3D-tulostus sopii parhaiten pienten tuotantoerien valmistukseen ja sopii näin erittäin hyvin nelikopterin osien valmistukseen. Sillä pystytään tehdä monimutkaisia muotoja nopeasti, edullisesti ja ilman hukka materiaalia. Tämä mahdollistaa sen, että nelikoptereiden suunnittelussa voidaan käyttää mielikuvituksellisia muotoja ja valmistaa melkein minkäläinen kopteri tahansa. Halvat valmistuskustannukset mahdollistavat myös sen, että nelikopteriin on mahdollista tehdä helposti ja nopeasti varaosia rikkoontuneiden tilalle.

#### 5.4 Valmistusmateriaalit

Valmistusmateriaalina kilpakoptereiden rungoissa käytetään yleisesti hiilikuitua, koska se on erittäin kevyttä ja kestävä. Käytän kuitenkin suunnittelemani kopterissa runkomateriaalina alumiinia, koska se on halvempaa ja helposti saatavilla. 3D-tulostimella tehdyissä osissa käytetään materiaalina Nylonia tai vaihtoehtoisesti PETG:tä eli Polyetyleenitereftalaattia, jota on muunneltu glykolilla.

Vaikka hiilikuidun ominaisuudet ovat lyömättömät kilpakoptereiden runkomateriaalina, niin ei alumiini ole myöskään huono valinta. Alumiini on kevytmetalli ja sen tiheys on  $2,7g/cm^3$ , joka on kolmasosa teräksen painosta ja kolmasosan painavampaa kuin hiilikuitu. Vaikka alumiini on erittäin kevyt metalli, niin on se kuitenkin melko luja materiaali. Teräksen lujuus on parempi kuin alumiinin, mutta keveyden ja lujuuden yhdistelmä tekee alumiinista erinomaisen materiaalin esimerkiksi lentokoneiteollisuuteen. Puhtaan alumiinin ja sen seosten vetolujuus on 70-700MPa.

Alumiinia on helppo työstää ja sen konetyöstö vaatii vain vähän energiaa, mikä tekee siitä ympäristöystävällisen metallin. Yleisiä alumiinin työstömenetelmiä ovat mm. leikkaus, poraus, jyrsintä ja taivutus. Alumiinia pystyy myös muotoilemaan melkein mihin muotoon tahansa ja siksi se sopii hyvin erilaisiin käyttötarkoituksiin. (Sapa Group n.d)

Alumiinin parhaita ominaisuuksia on sen korroosionkesto. Sen päälle muodostuu ohut oksidikerros, joka suojaa sitä korroosiolta. Oksidikerros korjaantuu automaattisesti, jos siihen tulee jokin osuma tai naarmu. Alumiinilla on siis luonnostaan hyvä korroosionkesto, toisin kuin monilla muilla metalleilla, jotka täytyy päällystää esimerkiksi maalilla tai sinkillä, jotta ne eivät ruostuisi.

Alumiini johtaa erinomaisesti lämpöä ja sähköä, minkä takia sitä käytetään laajalti lämmitys- ja jäähdytyssovelluksissa. Se on palamaton materiaali ja sen palonsuoja ominaisuudet ovat selvästi paremmat, kuin hiilikuidulla, joka sisältää palavia hartseja. (Sapa Group n.d)

Puhdas alumiini on pehmeää ja hyvin muokattavaa, mutta jossain tilanteissa sen lujuus ei ole kuitenkaan ole riittävä. Kun puhtaaseen alumiiniin sekoitetaan pieniä määriä muita aineita, niin voidaan muuttaa alumiinin ominaisuuksia. Seostuksella saadaan tehtyä alumiinista esimerkiksi lujempaa tai paremmin hitsattavaa. Tärkeimpiä seosaineita ovat pii (Si), magnesium (Mg), mangaani (Mn) ja sinkki (Zn). (Nordic aluminium 2014)

Oman nelikopterin suunnittelussa päädyin alumiiniin, koska se on esteettisesti tyylikäs ilman pinnoitusta, sitä on helppo työstää ja se on riittävän luja, sekä kevyt materiaali. Alumiini on väriltään hopeanharmaa ja sopii erinomaisesti nelikopterin väritykseen. Se on myös riittävän kevyt materiaali, että saadaan riittävä noste nelikopterin lennättämiseen. Oletan, että puhdas alumiini on lujuudeltaan riittävä, koska nelikopteri ei joudu taivutuksen alaiseksi ja mahdollisten törmäysten aiheuttamat iskut eivät ole kovinkaan suuria johtuen nelikopterin pienestä massasta. Seostetut alumiinit ovat hinnaltaan kalliimpia ja siksi puhdas alumiini olisi paras materiaali tässä tilanteessa. Alumiini materiaalina täyttää myös kaikki runkorakenteelle aiemmin asetetut vaatimukset. Huonona puolena alumiinissa on, että se johtaa erittäin hyvin sähköä. Sen takia on tärkeää eristää komponentit runkorakenteen pinnasta, jotta ei tapahtuisi oikosulkuja.

Kuten aiemmin valmistusmenetelmän kappaleessa mainittiin, niin kolme yleisintä materiaalia, mitä käytetään 3D-tulostuksessa ovat PLA, ABS ja Nylon. Näistä materiaaleista PLA eli Polyaktidi on rakenteeltaan melko vahvaa, mutta se on myös haurasta. Sitä ei voi myöskään jättää tilaan, jossa lämpötila nousee yli 38 celcius asteen. PLA ei siis ole vaihtoehto nelikopterini valmistusmateriaaliksi, koska se saattaa pehmentyä auringonpaisteissa ja hauras rakenne menee helposti rikki laskeutumisessa tai törmäyksissä. (Matter Hackers 2014)

ABS eli Akryylinitriini Butadieeni Styreeni on materiaalina halvempaa, kuin PLA. Se ei kuitenkaan 3D-tulostuksessa saavuta yhtä vahvaa rakennetta, kuin ruiskuvalussa. ABS:n vahvuus ei yleensä riitä toiminnallisiin osiin, minkä takia se ei myöskään sovi materiaaliksi suunnittelemaani nelikopteriin. (Matter Hackers 2014)

Nylon on erittäin vahva, halpa ja monikäyttöinen materiaali 3D-tulostuksessa. Ohuina kerroksina nylon on taipuisaa, mutta paksumpina kerroksina se on vahvaa ja sopii hyvin toiminnallisiin osiin, kuten saranoihin. Nylonilla on myös pieni kitkakerroin, hyvä kestävyys ja korkea sulamispiste. (Matter Hackers 2014)

Nylon Ominaisuudet:

- Ominaispaino 1,18 g/cm<sup>3</sup>
- Käyttölämpötila -40°C - +80°C
- Veto- ja puristuslujuus eivät ole kovin hyviä
- Lämmönkestävyys ei ole muovilaaduista parhaimpia

- Suuri veden imeytyminen
- Hyvä vaimennuskyky
- Erinomainen kulutuskestävyys
- Kitkakerroin pieni
- Hyvät eristysominaisuudet sähköteollisuuteen
- hyvä mekaaninen lujuus ja kemiallinen kestävyys
- kulutuskestävyys hyvä myös karkealla vastinpinnalla
- hyvä väsymislujuus - vaimentaa tärinää
- kestää useimpia hiilivetyjä (liuottimia) sekä emäksiä
- itsestään sammuva
- materiaalia seostamalla ja lujittamalla voidaan: parantaa lujuutta ja jäykkyyttä. parantaa lämmönkestävyyttä ja pienentää kitkakerrointa

(Muovityöstö 2016)

Ominaisuuksiltaan Nylon sopii erinomaisesti rungon 3D-tulostettaviin osiin. Se on kuitenkin melko hankala materiaali 3D-tulostaa. Se vaatii korkeamman sulamislämpötilan kuin monet muut muovimateriaalit ja tuloslaadusta tulee heikkoa, jos ilmassa on liikaa kosteutta.

Toinen varteenotettava materiaali on PETG. Se on ominaisuuksiltaan erinomainen erilaisiin käyttötarkoituksiin. Se on materiaalina joustavaa, vahvaa, kestää hyvin erilaisia lämpötiloja ja pystyy myös vastaanottamaan iskuja. Se kestää erilaisia kuormitustiloja ja sopii toiminnallisiin osiin, sekä suojaaviin komponentteihin. PETG on myös halpa materiaali ja sen 3D-tulostuslaatu on erinomainen Sen ominaispaino  $1,27\text{g/cm}^3$  ja käyttölämpötila  $-30$  asteesta  $+65$  asteeseen. (all3dp 2017)

Nylon ja PETG sopivat molemmat erinomaisesti suunnittelemani nelikopterirungon materiaaleiksi. Nylon on hieman kevyempää ja vahvempaa kuin PETG, mutta PETG-muovi on helpompaa tulostaa ja sillä saadaan parempi tulostuslaatu. Molempien materiaalien ominaisuudet ovat kuitenkin riittävät suunnittelemani nelikopterin laskeutumistelineisiin ja korirakenteeseen.

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyö oli aiheena erittäin mielenkiintoinen ja sen avulla sain hyvän kuvan nelikopterien toiminnasta. Testiversion rakennusvaiheessa opin juottamaan liitoksia, sekä sain tärkeää käytännön kokemusta nelikopterin eri komponenteista, ennen oman runkorakenteen suunnittelua.

Tärkeintä opinnäytetyössäni oli kuitenkin runkorakenteen suunnittelu. Se auttoi minua kehittymään mekaniikkasuunnittelija, sekä antoi hyvän kuvan siitä, miten tarkkaan asiat täytyy miettiä etukäteen, jotta suunniteltu tuote pystytään oikeasti rakentamaan. Runkorakenteen suunnittelu auttoi myös kehittämään omaa 3D-mallinnus osaamistani, sekä ymmärtämään, että on tärkeää tehdä tuotteesta yksinkertainen valmistaa ja valita oikeat työstötavat materiaaleille.

Alun perin opinnäytetyössä oli tarkoitus myös valmistaa suunnittelemani runkorakenne, mutta testiversion rakentaminen ja uuden runkorakenteen suunnitteluun meni enemmän aikaa, kuin olin ajatellut ja sen takia jouduin jättämään runkorakenteen valmistuksen pois opinnäytetyöstäni.

Kaiken kaikkiaan olen erittäin tyytyväinen lopputulokseen ja suunnittelemastani runkorakenteesta tuli hienompi, kuin osasin odottaa. Opinnäytetyö antoi itseluottamusta suunnitteluun ja kokemus auttaa varmasti myös työelämässä mekaniikkasuunnittelijana.

## 7 LÄHTEET

3D Hubs (2017). What is 3D printing? Haettu 7.8.2017 osoitteesta <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>

3D Hubs (2017). FDM-tekniikka. Haettu 7.8.2017 osoitteesta <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing>

Aaron Sherwood (2013). Vesileikkauksella työstetty turbiini. Haettu 7.8.2017 osoitteesta <http://aaron-sherwood.com/blog/?p=593>

Aki Tulikari (2011). Vesileikkaus. Haettu 3.8.2017 osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=TT8sCWX-Xil>

Alex NLD (n.d). Radiovastaanotin. Haettu 5.7.2017 osoitteesta <http://alexnld.com/wp-content/uploads/2015/07/SKU233735-6.jpg>

All3dp (2017). PETG filament. Haettu 22.9.2017 osoitteesta <https://all3dp.com/petg-filament-3d-printing>

Amebaiot (2017). Roll, Pitch, Yaw. Haettu 17.7.2017 osoitteesta <https://www.amebaiot.com/en/ameba-arduino-quadcopter>

ArduPilot (2016). What is multicopter and how does it work? Haettu 17.7.2017 osoitteesta <http://ardupilot.org/copter/docs/what-is-a-multi-copter-and-how-does-it-work.html>

Brian Schneider (n.d). A guide to understanding lipo batteries. Haettu 13.7.2017 osoitteesta <https://rogershobbycenter.com/lipoguide/>

Build your own drone (n.d). CC3D -lennonohjain. Haettu 3.7.2017 osoitteesta <https://www.buildyourowndrone.co.uk/openpilot-cc3d-evo-flight-controller-stm32-straight-pins>

Carlos Pineiro (2014). Simple Guide on Accelorometer, Magnetometer, Digital Gyro, GPS, Barometer Pros and Cons. Haettu 29.6.2017 osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=7DELJMW2ZW0>

DHgate (n.d). Virranjakaja (Power Distribution Board). Haettu 17.7.2017 osoitteesta <http://www.dhgate.com/product/matek-pdb-xt60-power-hub-distribution-board/391718260.html>

Dji (2017). DJI Phantom 3-kuvauskooperi. Haettu 20.7.2017 osoitteesta <https://www.dji.com/phantom-3-pro>

Droneinsider (2016). PPM vs SBUS. Haettu 8.7.2017 osoitteesta <http://droneinsider.org/ppm-vs-sbus>



Dronetrest (2015). Beginners guide to drone autopilots (flight controllers) and how they work. Haettu 3.7.2017 osoitteesta <http://www.dronetrest.com/t/beginners-guide-to-drone-autopilots-flight-controllers-and-how-they-work/1380>

Dronetrest (2014). Brushless motors – How they work and what the numbers mean. Haettu 3.6.2017 osoitteesta <http://www.dronetrest.com/t/brushless-motors-how-they-work-and-what-the-numbers-mean/564>

Dronetrest (2015). Power Distribution Boards – How to choose the right one. Haettu 17.7.2017 osoitteesta <http://www.dronetrest.com/t/power-distribution-boards-how-to-choose-the-right-one/1259>

Dronetrest (2015). RC radio control protocols explained: PWM, PPM, PCM, SBUS, IBUS DSMX, DSM2. Haettu 8.7.2017 osoitteesta <http://www.dronetrest.com/t/rc-radio-control-protocols-explained-pwm-ppm-pcm-sbus-ibus-dsmx-dsm2/1357>

Dronetrest (2015). SBUS or PPM, which is better? Haettu 8.7.2017 osoitteesta <http://www.dronetrest.com/t/sbus-or-ppm-which-is-better/1356>

FliteFPV (n.d). QAV 250-kilpakopteri. Haettu 20.7.2017 osoitteesta <http://www.flitefpv.com/QAV250-Mini-FPV-Quadcopter-Carbon-Fiber-Edition>

Gearbest (2017). FDM-tekniikalla toimiva 3D-tulostin. Haettu 11.8.2017 osoitteesta [http://www.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits/pp\\_337314.html](http://www.gearbest.com/3d-printers-3d-printer-kits/pp_337314.html)

Himodel (n.d). DYS BE1806 2300KV CW/CCW. Haettu 8.6.2017 osoitteesta [http://www.himodel.com/electric/DYS\\_BE1806\\_2300KV\\_2-3S\\_Outrunner\\_Brushless\\_Motor\\_for\\_Mini\\_Multicopters.html](http://www.himodel.com/electric/DYS_BE1806_2300KV_2-3S_Outrunner_Brushless_Motor_for_Mini_Multicopters.html)

Hobby-wing (n.d) Moottorien pyörimissuunnat nelikopterissa. Haettu 17.7.2017 osoitteesta <http://www.hobby-wing.com/sunnysky-x2207s-kv2700-motor.html>

Hooked on RC airplanes (n.d). Electronic speed controller basics. Haettu 13.6.2017 osoitteesta <http://www.hooked-on-rc-airplanes.com/Electronic-speed-controller.html>

Killerplanes (n.d). Radiolähetin. Haettu 4.7.2017 osoitteesta [https://www.killerplanes.com/sites/default/files/imagecache/product\\_full/FLYSKY\\_6\\_CHANNEL\\_TX\\_RX\\_03.jpg](https://www.killerplanes.com/sites/default/files/imagecache/product_full/FLYSKY_6_CHANNEL_TX_RX_03.jpg)

Koivisto, Kaarlo & al. 2004. Konetekniikan materiaalioppi. 10. painos. Helsinki: Edita Prima Oy. 336 s. ISBN 951-37-2912-5

Learn engineering (2014). Brushless DC Motor, How it works? Haettu 3.6.2017 osoitteesta

<https://www.youtube.com/watch?v=bCEiOnuODac>

Learn Robotix (n.d). Propellien pyörimissuunnat. Haettu 11.7.2017 osoitteesta <http://learnrobotix.com/img/pics/propeller-direction-600x433.jpg>

Learn robotix (n.d). Quadcopter, Multicopters: The basic Of Propellers and Motors. Haettu 11.7.2017 osoitteesta <http://learnrobotix.com/uavs/quadcopter-basics/quadcopters-multirotors-motors-propellers-basics.html>

Maxim Integrated Products (2015). Gyroskoopin ja kiihtyvyyssmittarin aistimat suunnat. Haettu 29.6.2017 osoitteesta <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5830>

Matter Hackers (2014). Printing with nylon. Haettu 3.9.2017 osoitteesta <http://www.matterhackers.com/articles/printing-with-nylon>

Muovityöstö (2016). Nylon. Haettu 3.9.2017 osoitteesta <http://www.muovityosto.fi/materiaalit/pa6-nylon-polyamidi.html>

Nordic aluminium (2014). Alumiiniseokset. Haettu 12.8.2017 osoitteesta [http://www.nordicaluminium.fi/palvelut/palvelut\\_7\\_1.html](http://www.nordicaluminium.fi/palvelut/palvelut_7_1.html)

Oscarliang (2016). CW & CCW motors – Thread direction and prop nut. Haettu 13.6.2017 osoitteesta <https://oscarliang.com/propeller-shaft-adap-ter-nuts-cw-ccw/>

Oscarliang (2016). How to choose flight controller for quadcopter. Haettu 29.6.2017 osoitteesta <https://oscarliang.com/best-flight-controller-quad-hex-copter>

Oscarliang (2017). How to choose lipo battery beginner guide for miniquad, drones and quadcopters. Haettu 13.7.2017 osoitteesta <https://oscarliang.com/lipo-battery-guide>

Oscarliang (2017). How to choose radio transmitter & receiver mini quad and quadcopter. Haettu 8.7.2017 osoitteesta <https://oscarliang.com/choose-rc-transmitter-quadcopter>

Painless360 (2016). Quadcopter building for beginners: How to choose a lipo battery. Haettu 13.7.2017 osoitteesta [https://www.youtube.com/watch?v=b1Lc5\\_piUX0](https://www.youtube.com/watch?v=b1Lc5_piUX0)

Painless360 (2015). RC Basics – Understanding electronic speed controllers. Haettu 5.6.2017 osoitteesta <https://www.youtube.com/watch?v=OZNxbxL7cdc>

Quadcopterhq (2013). What is quadcopter? Haettu 20.7.2017 osoitteesta <http://quadcopterhq.com/what-is-a-quadcopter/>

Roger's Hobby Center (n.d). Litium polymeeri-akku. Haettu 13.7.2017 osoitteesta <https://rogershobbycenter.com/lipoguide>

Sapa Group (n.d). Alumiinin lyömättömät ominaisuudet. Haettu 11.8.2017 osoitteesta <https://www.sapagroup.com/fi/miksi-alumiini/materiaali/alumiinin-ominaisuudet>

**LIITTEET**

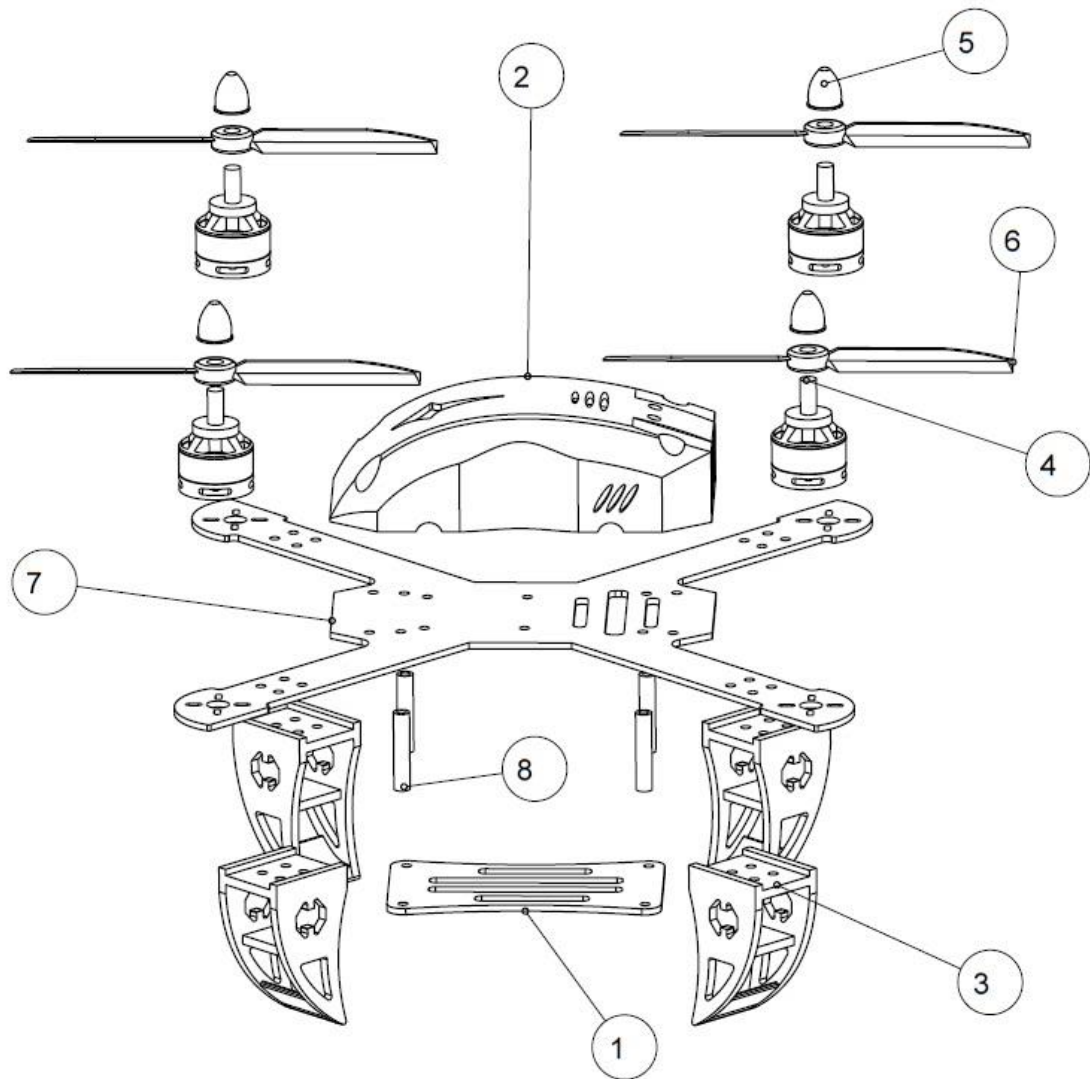
Liite 1. Suunniteltu nelikopteri takaapäin.



Liite 2. Suunniteltu nelikopteri alhaaltapäin.

No part of this document may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base, without the written permission of owner.

Tätä dokumenttia ei saa kopioida, uudelleenkäyttää, taikka tallentaa missään muodossa eikä millenkään tarkoitukseseen, ilman kirjallista lupaa omistajalta.



8	Tukiputket	Valmisosa/sorvasus			0.002	4
7	Runko	Vesileikkaus			0.082	1
6	Propellit	Valmisosa			0.012	4
5	Propellien hatut	Valmisosa			0.005	4
4	Mootorit	Valmisosa			0.042	4
3	Laskeutumistelineet	3D-tulostus			0.010	4
2	Kori	3D-tulostus			0.035	1
1	Akkuteline	Vesileikkaus			0.042	1
Osa Part	Descript: Nimitys:	Additional Description: Kuvaus:	Tunnus: Identification:	Koko: Size:	Massa Kg Mass Kg	Kpl Pcs
<b>HAMK</b> University of Applied Sciences		 A4	Tunnus: Identific: Descript: Nimitys: Orion Add Desc: Kuvaus:	Kokonaismassa: Total mass: 0.444 Kg Materiaali: Material: Värisävy: Color:		
Yleistoleranssit: General tolerances:		Skaala: Scale: 1:2	Suunnittelija / Pvm: Designer / Date: Niko Koivu - 27.8.2017 Hyväksytty / Pvm: Approved / Date: -	Pinta käs: Treatment: Pint. viimeist: surf. finish:		
		Tuote: Product: Nelikopteri	Korvaa: Replaces:	Sivu numero: Sheet nro: 1/1		

Model filename: RAJAYTYS\_PIIRUSTUS

Drawing filename: RAJAYTYS\_PIIRUSTUS

Drawing file date: 27.08.2017

Liite 3. Räjätyskuva suunnitellusta nelikopterista.