

Aaro Jalkanen

Moottoroidun
suunnittelu

polkupyörän

takahaarukan

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

25.10.2018

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Aaro Jalkanen Moottoroidun polkupyörän takahaarukan suunnittelu 28 sivua 21.11.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Tuotesuunnittelu
Ohjaaja	Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Insinööriyössä oli tavoitteena suunnitella takahaarukka sähkömoottoroituun polkupyörään olemassaolevien osien ympärille. Ensin selvitettiin, miten pyörän muut osat vaikuttavat takahaarukkaan. Seuraavaksi takahaarukka mallinnettiin 3D-suunnitteluohjelmalla. Määritettiin ja arvioitiin kolme kuormitustapausta, joita käytettiin laskettaessa takahaarukan lujuutta ohjelmallisesti elementtimenetelmällä neljä kierrosta. Jokaisen kierroksen jälkeen laskentamallia tarkennettiin tai malliin tehtiin muutoksia tulosten perusteella.</p> <p>Huomattiin, että haarukkaa taka-akselin olakkeita vasten puristavilla muttereilla on suuri vaikutus haarukan lujuuteen kaikissa kuormitustapauksissa. Työpiirustuksia ei vielä tehty, koska havaittiin, että laskentamallia on syytä tarkentaa edelleen ainakin iskunvaimentimen osalta, jotta iskunvaimentimen kiinnityskohtaan muodostuvat jännitykset saadaan laskettua tarkemmin.</p>	
Avainsanat	sähkömoottori, polkupyörä, lujuuslaskenta, takahaarukka

Author Title	Aaro Jalkanen Designing a swing arm of a motorized bicycle
Number of Pages Date	28 pages 21 November 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Professional Major	Product Design
Instructors	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to design a swing arm around the existing parts of a motorized bicycle. The study was carried out as follows. Firstly, the existing parts, their interaction and requirements for the swing arm were studied. Secondly, the swing arm was designed with a 3D CAD program. Thirdly, three load cases were decided and described. Finally, the load cases and the 3D model were used to calculate the strength of the swing arm with a FEM calculation program. On the basis of the results, the model was enhanced or made more accurate after each of the four rounds of calculation.</p> <p>The calculations point out that the nuts clamping the halves of the swing arm against the shoulders of the rear axle play a remarkable part in the strength of the swing arm structure. In conclusion, it was discovered that further improvements of the calculation model are necessary before finalizing the manufacturing drawings.</p>	
Keywords	electric motor, bicycle, strength calculation, swing arm

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Takahaarukka ja jousitus	1
3	Suunnittelu	4
3.1	Rajapinnat	4
3.2	3D-malli	10
4	FEM-lujuuslaskenta	15
4.1	Lähtötiedot	15
4.2	Laskentakierros 1	17
4.3	Laskentakierros 2	18
4.4	Laskentakierros 3	20
4.5	Laskentakierros 4	22
5	Yhteenveto	26
	Lähteet	28

1 Johdanto

Sähköavusteiset polkupyörät ja sähkömoottoripyörät ovat yleistyneet viime vuosina akkuteknologian kehityksen ja positiivisten käyttäjäkokemusten myötä. Tämän insinööriyön tavoitteena on suunnitella takahaarukka sähkömoottoroituun polkupyörään, joka tulee tutkimuksen tekijän omaan käyttöön. Lainsäädännöllisten rajoitusten vuoksi pyörä on tarkoitettu käytettäväksi vain suljetulla alueella. Moottoripyöriin ja polkupyöriin liittyvää ohjeistusta ja valmiita osia on runsaasti, mutta tehokkaaseen sähkömoottoroituun polkupyörään niitä ei ole suoraan tarjolla.

Suunniteltava pyörä koostuu sekä polku-, että moottoripyörissä käytettävistä osista. Pyörän huippunopeus tulee olemaan yli 100 km/h, ja suunniteltavan takahaarukan tulee kestää huomattavasti suurempia voimia kuin normaalin polkupyörän vastaava osa. Suunnittelun pohjana käytetään takahaarukkaan kohdistuvia laskennallisten voimien sekä aiemmin hankittujen osien kuten rungon ja renkaiden mitoitusta.

Tutkimuspohjana insinööriyössä käytetään kirjallisuus- ja internet-lähteitä sekä laskelmien ja mallinnusten tekoa Solid Works -ohjelmalla. Tutkimuksessa käydään läpi vastaavia moottoripyöriin liittyviä toteutuksia ja sovelletaan tietoja tähän projektiin. Suunnittelussa käytetään apuna myös moottoripyöriin erikoistuneesta liikkeestä hankittua tietoa. Insinööriyön lopputulos eli valmis suunnitelma takahaarukasta on tarkoitus teettää fyysisesti valmiiksi suunnittelun valmistuttua.

2 Takahaarukka ja jousitus

Moottoripyörän jousitus on dynaaminen systeemi, joka koostuu jousista, vaimentimista ja niin kutsutuista jousitetuista ja jousittamattomista massoista. Vaikka kokonaisuus on suhteellisen yksinkertainen, ovat dynaamiset vuorovaikutukset ajonevon ohjattavuuden, stabiiliteetin ja mukavuuden kannalta erittäin monimutkaiset. Muutokset etupäässä vaikuttavat takapäähän ja päinvastoin. Lisäksi muuttujana on kuljettaja, joka voi jousittaa ja vaimentaa oman massansa liikettä, sekä liikutella oman massakeskipisteensä

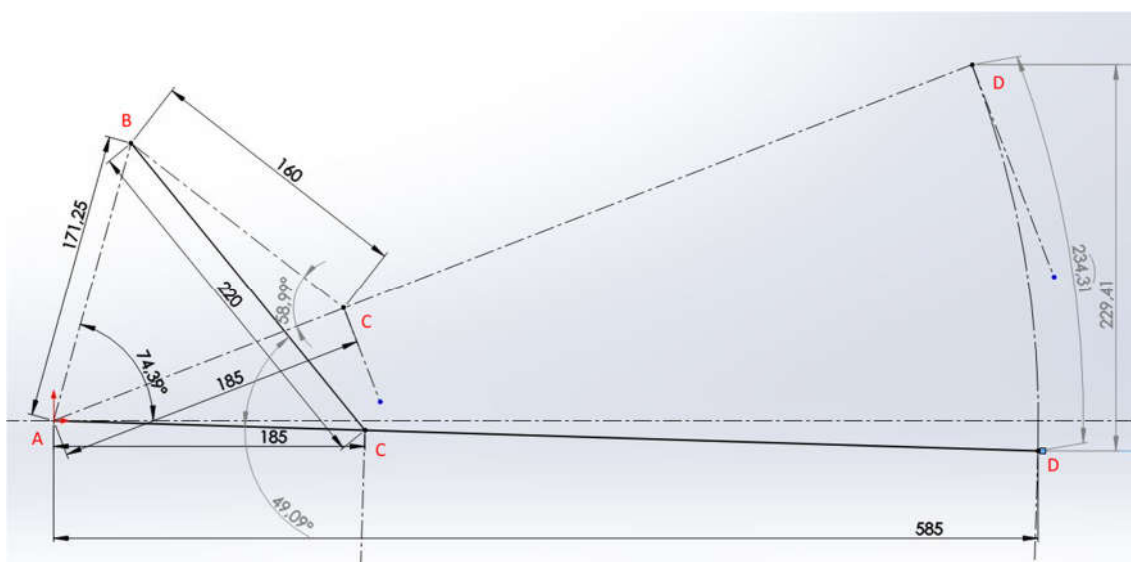
sijaintia. Kevyimmissä pyörissä kuljettajan massa muodostaa suurimman osan ajoneuvon kokonaismassasta.

Kaksipyöräisissä ajoneuvoissa takahaarukka on osa, joka liittyy takapyörän muuhun rakenteeseen. Ensimmäisissä moottoripyörissä niin taka- kuin etuhaarukatkin olivat jäykkiä, niissä ei ollut jousia eikä iskunvaimentimia pehmentämässä iskuja. Ilmakumirenkaiden jousto- ja iskunvaimennusominaisuudet riittivät hitaille nopeuksille. Ajoneuvojen yleistyessä ja nopeuksien noustessa ensimmäisenä jousitettiin ohjaava etuhaarukka. Jos etupyörä nousee ilmaan tien epätasaisuuden johdosta, ei sillä voi ohjata. Jousitus vetävää takapyörää kannattavassa takahaarukassa yleistyi vasta vuosikymmeniä myöhemmin. Ensimmäiset takajousitukset oli rakennettu niin, että takahaarukka oli jäykästi rungossa kiinni, ainoastaan taka-akseli oli jousitettu. Nopeasti huomattiin, että vaikka mukavuus parani, pyörän ajo-ominaisuudet heikkenivät monella osa-alueella mm. vääntöjäykkyyden puutteen vuoksi.

Kun ensimmäisten keinuhaarukkaratkaisujen ylivoimaisuus huomattiin, siirryttiin yksinomaan niihin, ja ne ovat melkein poikkeuksetta käytössä nykyään. Keinuhaarukan etupää on nivelöity runkoon, takapäässä on kiinni pyörä. Ensimmäisissä keinuvarsitoteutuksissa jouset ja vaimentimet kiinnittyivät takapäähän pyörän akselin lähetyville, nykyään ne melkein poikkeuksetta kiinnittyvät haarukkaan pyörän etupuolella. Keinuhaarukasta on erilaisia variaatioita, siitä voi puuttua toinen haara tai voima välitetään jousi-vaimenninyhdistelmälle erilaisten vipumeکانismien välityksellä.

Yksinkertaisimmillaan kuvattuna: kun liikkuvan ajoneuvon jousitettu pyörä osuu tiellä olevaan töyssyyn, osa eteenpäin suuntautuneesta liike-energiasta muuttuu pystysuuntaiseksi. Ilman minkäänlaista vaimennusta tämä saisi aikaan jatkuvan edestakaisen liikkeen renkaassa ja jousituksessa. Vaimennus muuttaa tämän pystysuuntaisen energian lämmöksi ja lopulta pysäyttää edestakaisen liikkeen. Renkaassa rakenne ja materiaali, kumi, toimivat sekä jousena että vaimentimena. Taka- ja etuhaarukassa jousen lisäksi tarvitaan erillinen vaimennin. Melkein aina vaimentimen toiminta perustuu nesteeseen virtausvastukseen. Vaimentimen liikkuva varsi on kiinnitetty mäntään, joka liikkuu öljyssä. Männän liikkuessa öljy virtaa männän toiselle puolelle pienten reikien läpi. Tästä syntyvä virtausvastus hidastaa männän liikettä ja muuttaa liike-energiaa lämmöksi nesteeseen, mistä lämpö johtuu vaimentimen runkoon ja rungosta edelleen ulkoilmaan.

Takahaarukan mittasuhteet sekä sen ja vaimentimen kiinnityspisteiden sijainnit vaikuttavat olennaisesti ajoneuvon toimintaan. Joustoliikkeen pituus riippuu tietysti jousen ja vaimentimen pituudesta ja joustomatkasta, mutta myös vipusuhteista kiinnityspisteiden välillä. Kuvassa 1 on takahaarukka liikematkansa ääripäissä. Piste A on rungon ja takahaarukan välinen nivelointipiste. Pisteessä B kohtaavat runko ja jousi-vaimenninelementin yläpää, pisteessä C elementin alapää ja haarukka. Taka-akseli kiinnittyy pisteeseen D. Kuvasta nähdään, että valituilla mittasuhteilla iskunvaimentimen 60 mm joustomatkalla saavutetaan takapyörälle noin 230 mm liikematka. Muuttamalla iskunvaimentimen kiinnityspaikka rungossa tai haarukassa, muuttuu myös takapyörän liikematka.



Kuva 1. Takahaarukka kuvattuna liikematkansa ääripäissä.

Joustomatkan lisäksi vipusuhteita muutettaessa muuttuu myös jouseen kohdistuva voima. Jousi valitaan usein niin, että kuormattuna pyörän joustomatkasta on käytetty noin 30 %. Näin saadaan nk. negatiivista joustoa, eli jousitettu pyörä ei ainoastaan väistä töyssyjä, vaan myös palaa niiden jälkeen nopeammin kiinni ajoalustaan ja on hyödyksi ajoalustasta ulkonevien kohtien lisäksi ajoalustan sisään menevissä kuopissa. Jousitus pyritään myös tekemään progressiiviseksi niin, että jousituksen painuessa kasaan jousen kokoon puristamiseen tarvittava voima kasvaa. Karkea progressiivisuus saadaan asentamalla jäykempi ja löysempi kierrejousi peräkkäin. Huomattavasti kalliimpi ja paremmin toimiva ratkaisu on tehdä jousesta progressiivinen tihentämällä kierrettä toisessa päästä. Joustoelementin kiinnityksessä käytetään myös vipumekanismeja,

joilla saadaan tarkkaan hallittua elementin kokoonpainumisen ja joustomatkan suhdetta. Yksinkertaisin tapa saada takajousitus toimimaan progressiivisesti on kallistaa joustoelementti kuvan 1 tapaan vinoon, sen sijaan että se olisi kohtisuorassa janaa AD vastaan. [1, s. 8.5; 2, s. 8.10.]

Yleensä ajoneuvon voima välitetään rungon puolelta takahaarukan päässä sijaitsevalle taka-akselille ketjun tai hihnan välityksellä. Jos hihna- tai ketjupyörä ei sijaitse samalla akselilla takahaarukan nivelöintikohdan kanssa, muuttuu voimansiirron akseliväli takahaarukan liikkuessa. Tätä on sekä polku- että moottoripyörissä pyritty korjaamaan erilaisilla vipumekanismeilla, joilla haarukan virtuaalinen nivelöintipiste saadaan siirrettyä oikealle kohdalle. Toinen vaihtoehto on tehdä ketjusta ylipitkä, jolloin ketjulle tarvitaan jousikuormitteinen kiristin.

3 Suunnittelu

3.1 Rajapinnat

Pyörän runko ostettiin sen omaan käyttöönsä suunnittelelta ja valmistaneelta yksityishenkilöltä. Se on hitsattu kotelon muotoon laserleikatusta ja taivutetusta 1,5 mm vahvuisesta AISI 4120 -teräslevystä (kuva 2). Vasemmalla puolella runkoa on ruuveilla kiinnittävä kansi, mikä mahdollistaa akun sijoittamisen 170 mm leveän rungon sisään. Edessä on emäputki, jonka molempiin päihin on sorvattu pesät ohjainlaakereille. Takana ylhäällä on halkaistu ruuvilla kiristettävä putki satulatolpalle ja sen alapuolella iskunvaimentimen yläpäähän kiinnityspiste. Alimpana on kiinnityspaikka V-Boxx -vaihteistolle. Rungon mukana tuli kaksi takahaarukkaa. Ensimmäinen oli AISI 4130 -putkesta hitsattu takahaarukka, joka oli tehty erittäin paljon muokatulle moottorille. Sen haarukanpäät eivät sopineet valitulle moottorille, eivätkä ne olleet helposti muokattavissa, minkä takia takahaarukka päätettiin tehdä alusta alkaen uudelleen. Toinen takahaarukka on heikkorakenteinen, eikä mukana tullut iskunvaimennin sopinut siihen. Vanhan rungon geometria haluttiin säilyttää, joten suunnittelun lähtökohtana käytettiin mittoja ensin mainitusta vanhasta takahaarukasta.



Kuva 2. Pyörän runko ja V-Boxx -vaihteisto.

Rungon mukana hankittu takaiskunvaimennin oli kaasu-nestetoiminen Manitou Swinger, jossa vaimennin sijaitsee kierrejousen sisäpuolella. Siinä on säädöt sisäänjouston vaimennusteholle erikseen nopeille ja hitaille liikkeille, ulosjouston vaimennusteholle, jousen esijännitykselle, ilmanpaineelle ja ilmatilavuudelle. Ilmatilavuutta säätämällä voidaan vaikuttaa sisäänjouston progressiivisuuteen joustomatkan viimeisellä puolikkaalla ja ilmanpaineella voidaan vaikuttaa jousituksen pintakovuuteen. [3, s. 7.] Ylä- ja alapään kiinnitysreikien väli on 215 mm ja joustomatka 63 mm.

Etuhaarukaksi valittiin Marzocchi 888 RC3 WC iskunpituudella 200 mm. Siinä on kierrejouset sekä säädettävä ilma-avusteinen nesteiskunvaimennus. Haarukassa on erilliset säädöt sisään- ja ulosjouston vaimennusteholle, jousen esijännitykselle ja ilmatilavuudelle. Pyörän kiinnitys tapahtuu 20 mm läpimenevällä akselilla.

Suntour V-Boxx on poljinkeskiön yhteyteen rakennettu 9-portainen sekventiaalivaihteisto, jolla saavutetaan 610 % välitysalue. Polkimilla tuotettu voima välitetään takapyörälle vaihteiston toisioakselilta 22-hampaisen ketjupyörän ja polkupyörissä yleisesti käytettävän 1/2" ketjun välityksellä. Samalla toisioakselilla molemmin puolin vaihdelaatikkoa sijaitsee kaksi 61808-laakeria, joihin takahaarukka kiinnittyy. Koska laakerit sijaitsevat samalla akselilla ketjuvälityksen hammaspyörän kanssa, pysyy ketjuvälityksen akseliväli muuttumattomana takahaarukan liikkuaessa.

Valittu sähkömoottori, Zelena Vozila -yrityksen myymä Cromotor (kuva 3) on harjaton kestmagnetoitu tasavirtamoottori, jonka käämit sijaitsevat akselin ympärillä staattorissa ja magneetit moottorin pyörivällä ulkokehällä roottorissa, johon vanteen pinnat kiinnittyvät. Staattorissa on myös kolme Hall-anturia, joilla saadaan moottorinohjaimelle tieto magneettien asemasta käämeihin nähden. Moottorin läpi kulkee akseli, joka moottorin molempien kylkilevyjen ulkopuolella on halkaisijaltaan 16 mm. Näihin osiin akselia on tehty kierteet 1,5 mm nousulla ja niihin on jyrskitty yhdensuuntainen pinta molemmin puolin akselia niin, että näiden pintojen väli on 9,95 mm. Näin moottori voidaan asentaa useimpien polkupyörien takahaarukoihin. Akselin läpi kulkee moottorin vaihe- ja anturijohdot, ne tulevat vasemmalta puolelta ulos. Moottorin oikeassa kylkilevyssä on ISO 6698 -standardin mukaiset kierteet vapaakytkimellisen hammasrattaan kiinnitystä varten. Myyjä lupaa moottorille 6 kW jatkuvan tehonkeston [4]. Sähkömoottoria voi kuitenkin kuormittaa hetkellisesti huomattavasti suuremmalla teholla. Moottorin kiinnitystä varten hankittiin DIN 6923 -laippakantamutterit ja NL16SP-lukitusaluslevyt.



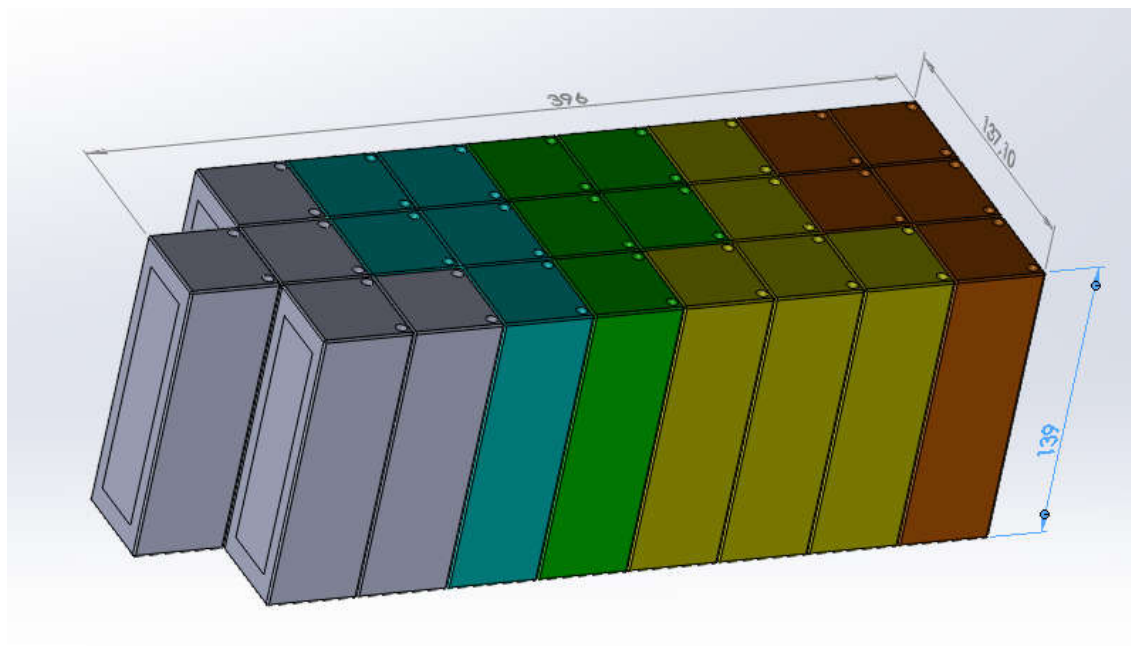
Kuva 3. Takapyörä moottoreineen kiinnitettynä vanhaan takahaarukkaan.

Vanteiksi valittiin Prowheelsin Yamaha motocross-pyörään tarkoitetut 1,85x19” vanteet, joissa oli nippelireikien poraukset valmiiksi sopivaan suuntaan. Takapyörässä napana toimii moottori, etupyörän navaksi valittiin Zelena Vozilan myymä 20 mm läpiakselille tarkoitettu napa, jossa on jarrulevykiinnikkeet molemmin puolin napaa. Pinnoksi tilattiin mittatilaustyönä 12/13 g pinnat, joiden pituudet laskettiin navan ja vanteen halkaisijoiden ja leveyksien avulla. Renkaiksi valittiin Shinko SR241 trial-renkaat 2,75x19” koossa.

Moottorin vasemmassa kylkilevyssä on ISO-standardin mukaiset 6 kpl M5-kierrereihiä Ø44 mm kehällä akselin ympäri polkupyörissä käytettävää jarrulevyä varten. Levyyn jarrupaloja kiinni puristavat männät sijaitsevat jarrusatulassa. Jarrusatulaksi valittiin saatavuuden ja hinnan perusteella Shimano BR-M785, jossa on ns. post mount -standardin mukainen kiinnitys. Bike Radar -julkaisu on mitannut jarrumomentiksi tälle jarrulle 180 mm levyllä 107 Nm [5]. Jotta jarrusatula saatiin mahtumaan moottorin ja levyn väliin, valittiin jarrulevyn halkaisijaksi suurempi 203 mm. Koska momentti on suoraan verrannollinen säteeseen, voidaan jarrumomentiksi laskea $107 \text{ Nm} \cdot (203/180) = 120.7 \text{ Nm}$.

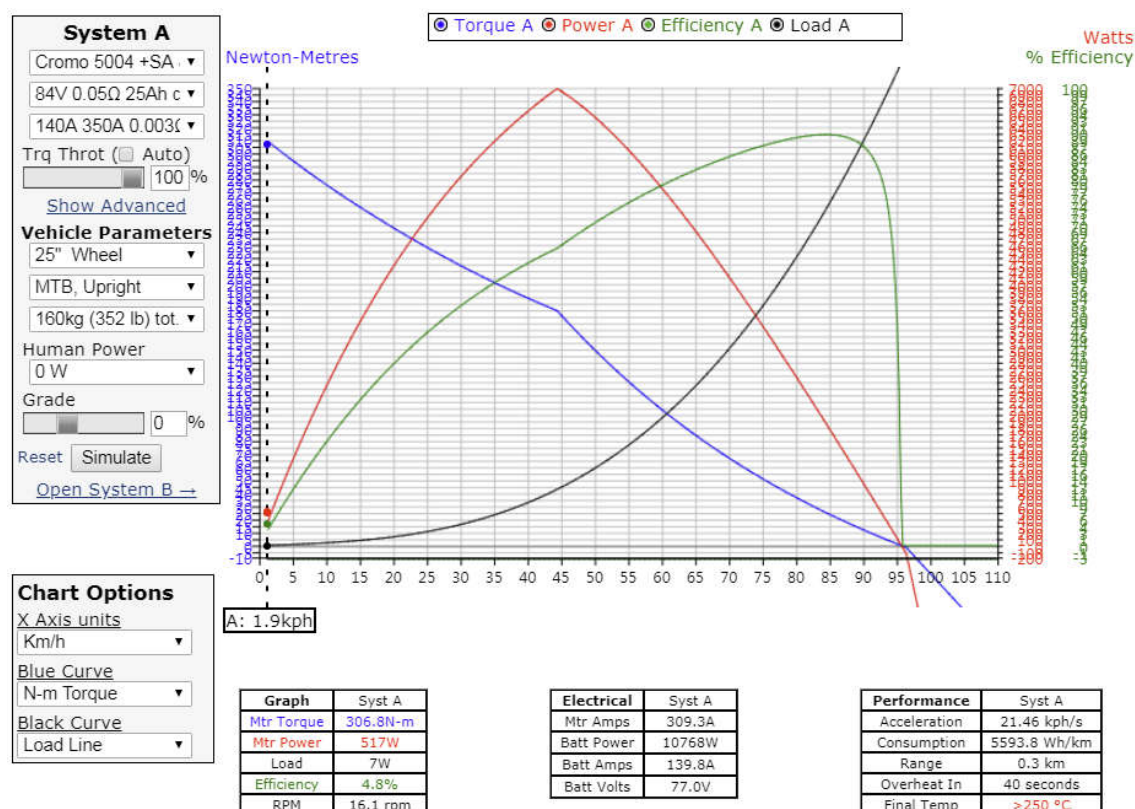
Moottorin ohjainlaite muuttaa akun tasajännitteen vaihtojännitteeksi moottorille, syöttää virtaa käämeihin oikeaan aikaan, oikeassa järjestyksessä ja oikean määrän oikealla jännitteellä käyttäjän kahvaa kiertämällä tekemän pyynnön mukaan. Valittu moottorinohjain on Adapto MAX-E. Siinä käytetään vektoriohjausta edullisemmän ja toistaiseksi yleisemmän pulssileveysmodulaation (PWM) sijaan. Vektoriohjauksen etuja sähköpyöräkäytössä ovat etenkin parempi hyötysuhde, hiljaisempi ääni sekä tarkempi voimanhallinta. Kentänheikennysominaisuudella voidaan myös saavuttaa suurempi huippunopeus samalla jännitteellä, tosin hyötysuhteen kustannuksella. Ohjain tukee moottorijarrutusta, jossa jarrutusenergia otetaan takaisin akkuun sekä toimii laturina akuille erillisen virtalähteen kanssa. MAX-E:n maksimikäyttöjännite on 90 V ja maksimivirta akulta 140 A. [6.]

Akku päätettiin koota harrastekäyttöön tehdyistä LiPo-akuista. Akuiksi valittiin Turnigyn kovamuovikuoriset paketit, joissa on 4 kpl 3,7 V 5 Ah kennoja sarjassa, josta saadaan nimellijännitteeksi 14,8 V. Valmistaja lupaa kennoille jatkuvaksi virranantokyvyksi $20 \cdot 5 = 100$ A ja 20 sekunnin hetkelliseksi virranantokyvyksi $30 \cdot 5 = 150$ A. Suurimmaksi latausnopeudeksi luvataan 25 A. [7.] Litium-akut tarvitsevat akunhallintajärjestelmän (BMS) valvomaan akkujen tilaa turvallisuuden ja pitkäikäisyyden varmistamiseksi. BMS pitää huolen, etteivät yksittäisten kennojen jännitteet mene sallittujen rajojen ulkopuolelle. Adaptolla oli tarjota BMS, joka voidaan liittää moottorinohjaimen ja sen mukana toimitettavaan näyttöön. Adaptton BMS koostuu modulaarisista osista, joita voidaan liittää toisiinsa. Yhteen moduuliin voi liittää neljä kennoa. Kunkin neljän kennon kanssa voi olla kytkettynä rinnan rajaton määrä kennoja. Ottaen huomioon ohjaimen maksimijännite, päätettiin kytkeä viisi akkupakettia sarjaan, jolloin nimellijännitteeksi tulee $5 \cdot 14,8 \text{ V} = 74 \text{ V}$. Litiumkennon jännite täyteen ladattuna on 4,2 V, joten koko akkupaketin jännite täyteen ladattuna on 84 V. Pyörän runko mitattiin ja päätettiin, että sinne saadaan helposti mahtumaan 25 Turnigyn pakettia, jolloin paketteja on kytketty viisi rinnan ja kapasiteetti on $5 \cdot 5 \text{ Ah} = 25 \text{ Ah}$, eli $74 \text{ V} \cdot 25 \text{ Ah} = 1850 \text{ Wh}$. 30 pakettia voisi olla mahdollista mahtuttaa runkoon, mutta se vaatisi paketin hajottamista, nyt koko akkupaketin saa yhtenä kappaleena pyörään ja pyörästä ulos. Akkupaketin jatkuva virranantokyky valmistajan lupauksien mukaan on $20 \cdot 5 \cdot 5 \text{ A} = 500 \text{ A}$ ja hetkellinen $30 \cdot 5 \cdot 5 \text{ A} = 750 \text{ A}$. Ohjaimen maksimivirta 140 A on siis hyvin akkupaketin virranantokyvyn rajoissa, vaikka ottaisi huomioon reilut varmuuskertoimet kiinalaisen akkuvalmistajan lupauksiin nähden. Nimellijännitteellä ja ohjaimen maksimivirralla suurin akkupaketista otettava teho on $74 \text{ V} \cdot 140 \text{ A} = 10080 \text{ W}$. (Kuva 4.)



Kuva 4. Akkupaketti mittoineen Solid Works –ohjelmassa mallinnettuna. Kuvassa rinnan kytketyt ryhmät eroteltu eri väreillä.

Moottorin vääntömomentti saatiin Grin Technologies -yrityksen moottorisimulaattorista [8]. Simulaattoria varten on mitattu sähköpyörien moottoreita, joista kustakin on muodostettu matemaattinen malli. Valitsemalla moottorin ja syöttämällä moottorinohjaimen, akun ja pyörän tiedot, saa siitä ulos suoritusarvoja. Simulaattorista saatu suurin vääntömomentti pyöristettiin alaspäin tasan 300 Nm:iin. (Kuva 5.)

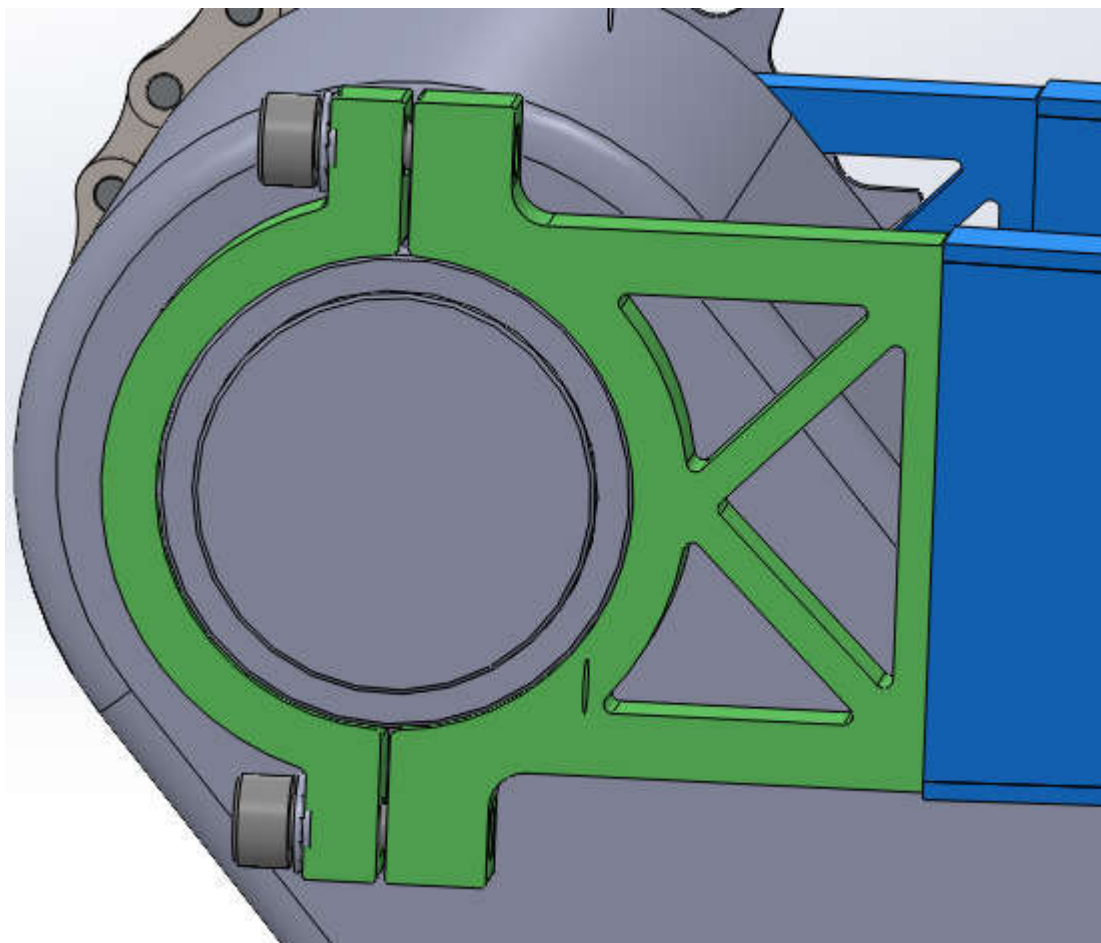


Kuva 5. Simulaattorin tulostusnäyttö

3.2 3D-malli

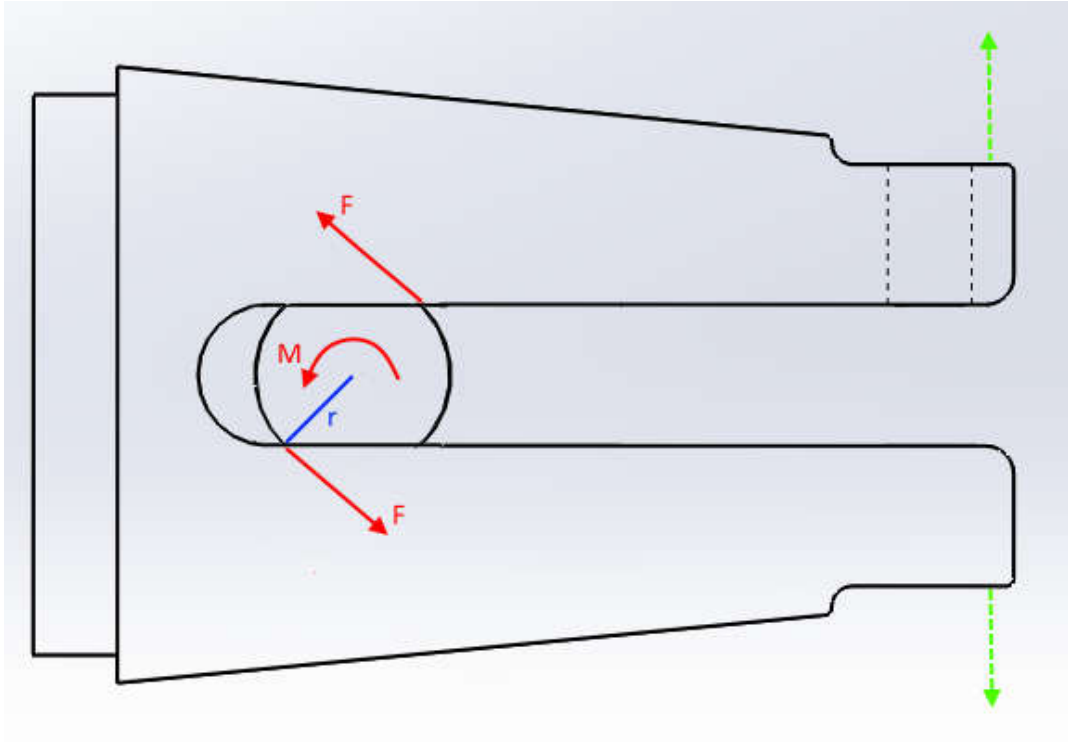
Ketjulenkit, jarrusatula ja jarrulevy saatiin valmiina GrabCAD-yhteisöpalvelusta. Loput osat mitattiin ja mallinnettiin itse Solidworks-ohjelmalla.

Takahaarukka päätettiin toteuttaa kotelarakenteena laserleikatuista levyosista hitsaamalla. Takahaarukan kiinnitys V-BOXXin laakereihin tehtiin 10 mm levyistä. Sen leveämpi ei mahdu vaihdelaatikon seinän ja ketjurattaan väliin. Laakerin ympärille tehtiin kehä, joka halkaistiin keskeltä, puolikkaat kiinnitettiin M6-ruuvilla. Lukituksen varmistamiseksi ruuvien alle laitettiin Nord-Lock-aluslevyt. Osaa jatkettiin taka-akselin suuntaan sen verran, kuin oli tarpeellista ahtaan kohdan ohittamiseksi. (Kuva 6.)

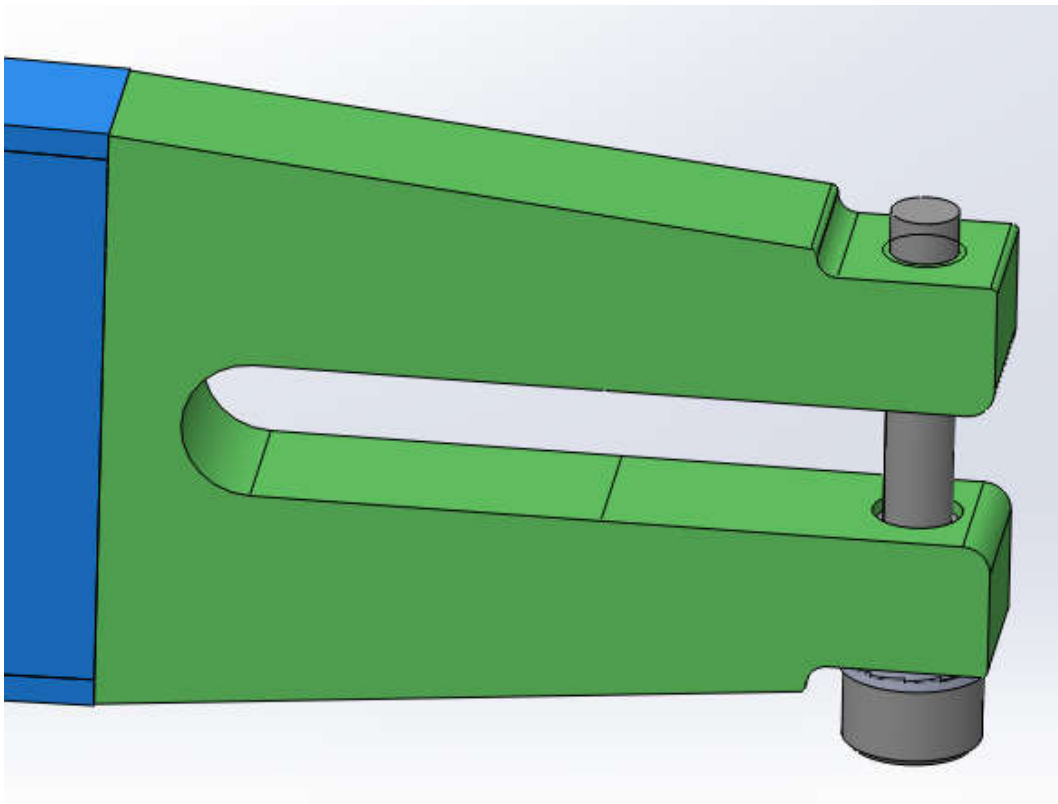


Kuva 6. Osa takahaarukan kiinnittämiseksi vaihdelaatikon laakeriin

Haarukanpää, osa, jolla moottori kiinnittyy taka-akseliin, tehtiin 12 mm levystä. Siihen tehtiin akselia varten pitkä, toisesta päästä avoin reikä, halkaisijaltaan 10 mm. Pitkä reikä mahdollistaa ketjun kiristämisen taka-akselia liikuttamalla, jolloin erillistä kiristäjää ketjulle ei tarvita. Sähköpyöräharrastajien keskustelupalstoilta luettujen kokemusten perusteella tiedetään, että haarukanpää pyrkii aukeamaan moottorin akselille tuottaman vääntömomentin vuoksi (kuva 7). Mikäli se aukeaa liikaa, pääsee akseli pyörähtämään, jolloin akselin läpi tulevat anturi- ja vaihejohtimet kiertyvät ja katkeavat. Pahimmassa tapauksessa pyörä putoaa kokonaan pois ja aiheuttaa vakavan onnettomuuden. Aukeamista voi estää riittävän vahvalla ja paksulla materiaalilla, tai tekemällä rakenteesta suljetun. 12 mm paksun rakenneteräslevyn oletettiin olevan riittävän vahvaa, mutta varmuuden vuoksi pitkän reiän avoimeen päähän tehtiin ruuvia varten toiseen haaraan 6,5 mm läpireikä ja toiseen M6-kierreikä läpi. Ruuvien kannan alle laitettiin Nord-Lock-aluslevy estämään ruuvien aukikiertyminen (kuva 8).



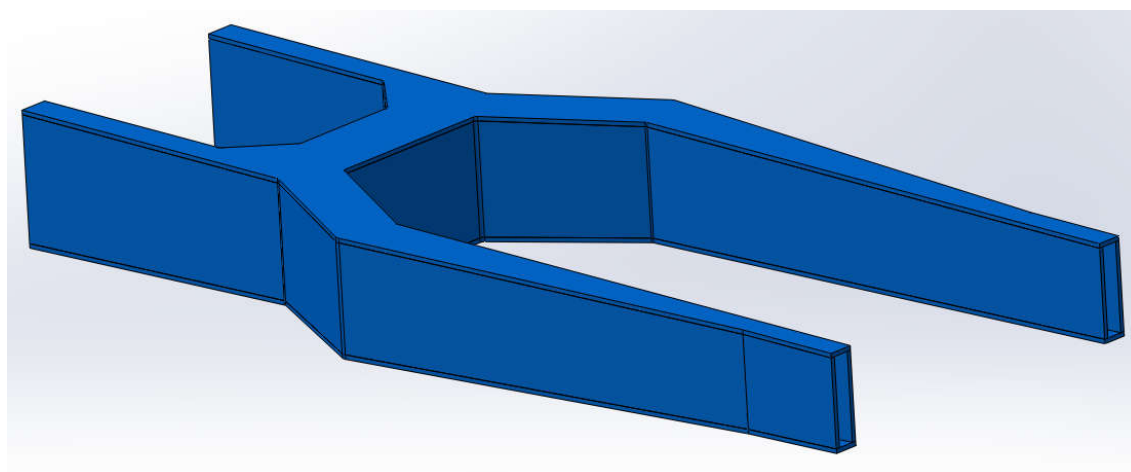
Kuva 7. Akselin vääntömomentti pyrkii levittämään haarukanpäätä auki



Kuva 8. Haarukanpää, joka on suljettu ruuvilla.

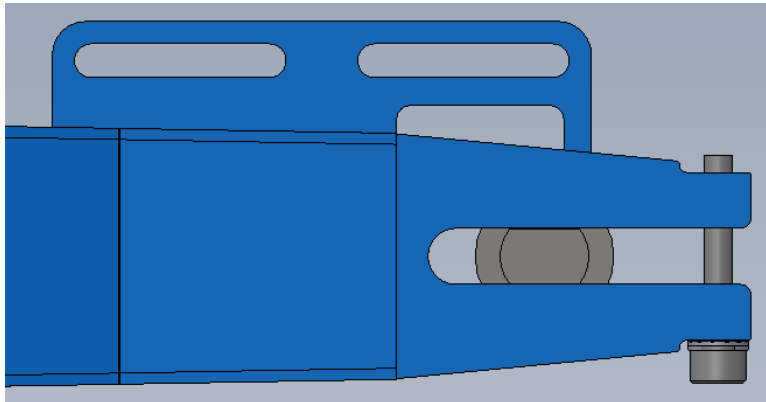
Haarukanpäät ja vaihdelaatikon puolen kiinnitysosat aseteltiin 3D-malliin muiden osien kanssa niille kuuluville paikoille. Moottorin akselin ja vaihdelaatikon laakerien välimatka ja iskunvaimentimen alapään kiinnityskohta mitattiin vanhasta takahaarukasta.

Takahaarukan runko tehtiin 2 mm levyistä kotelorakenteena (kuva 9). Ulkopuolen pystylevy mallinnettiin kokoonpanon päälle kulkemaan laakerikiinnityksestä haarukan päähän ja peilattiin toiselle puolelle. Sisäpuolen pystylevyt tehtiin samalla periaatteella, huomioiden oikealla puolella ketjupyörä ja vasemmalla puolella levyjarru. Sisäpuolen levyjen väliin jätettiin puolikkaat yhdistävä kannas, johon iskunvaimentimen alapää kiinnittyy. Lopuksi piirrettiin sisä- ja ulkolevyjen äärimuotoja hyödyntäen kansi, joka kopioitiin myös pohjaksi.



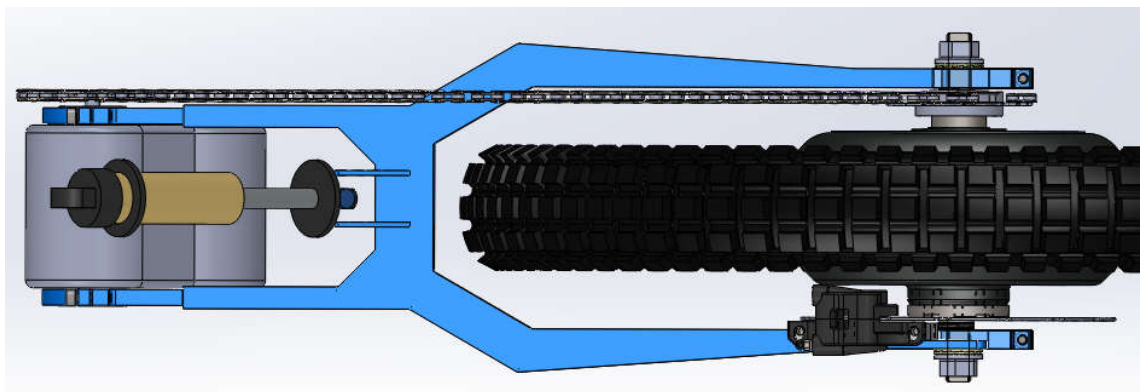
Kuva 9. Haarukan kotelorakenteinen runko.

Valitun jarrusatulan pystysuuntaiset post mount -kiinnitysreiät muutettiin kaupasta saatavalla sovitinkappaleella vaakasuuntaisiksi ISO-standardin mukaisiksi M5-kierreiksi. Sovitinkappaleelle tehtiin kiinnityslevy takahaarukan vasempaan haaraan. Levyssä on pitkät reiät, jotta jarrusatulaa voi liikuttaa takapyörän mukana liikkuvan jarrulevyn mukaan (kuva 10).



Kuva 10. Kiinnike jarrulevyn sovitinkappaleelle.

Iskunvaimentimen kiinnittämiseen suunniteltiin 3 mm paksu levy, joita asetettiin kaksi vierekkäin 30 mm välimatkalla. Kiinnityspaikan sijainti sivuttaissuunnassa mitattiin rungosta. Levyn tehtiin useita vaihtoehtoisia kiinnitysreikiä. Iskunvaimentimen kiinnityskohdan paikkaa vaihtamalla voidaan vaikuttaa jousituksen progressiivisuuteen sekä vipusuhteeseen. (Kuva 11.)



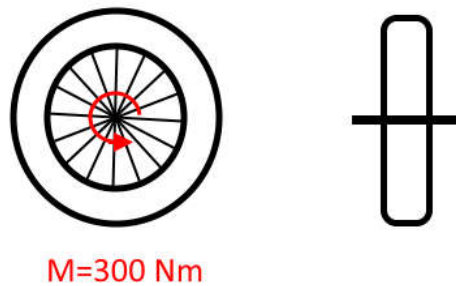
Kuva 11. Takahaarukka ja siihen liittyvät osat ylhäältä kuvattuna

4 FEM-lujuuslaskenta

4.1 Lähtötiedot

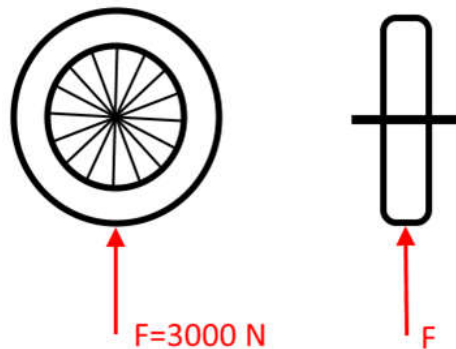
Valmiille mallille tehtiin staattisia lujuuslaskuja Solidworks Simulation-FEM-laskentaohjelmistolla. Laskentaa varten määritettiin 3 eri kuormitustapausta (kuvat 12-14):

- täyskiihdytys tasaisella alustalla, jota kuvaa 300 Nm vääntömomentti moottorin akselilla.



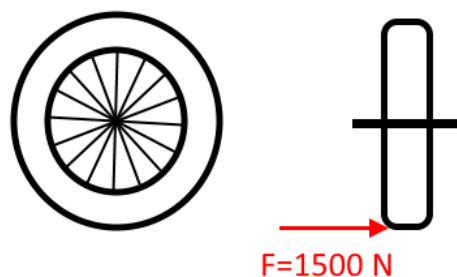
Kuva 12. Kuormitustapaus 1, täyskiihdytys tasaisella alustalla.

- Osuma esteeseen, 3000 N pystysuuntainen voima takapyörän kautta



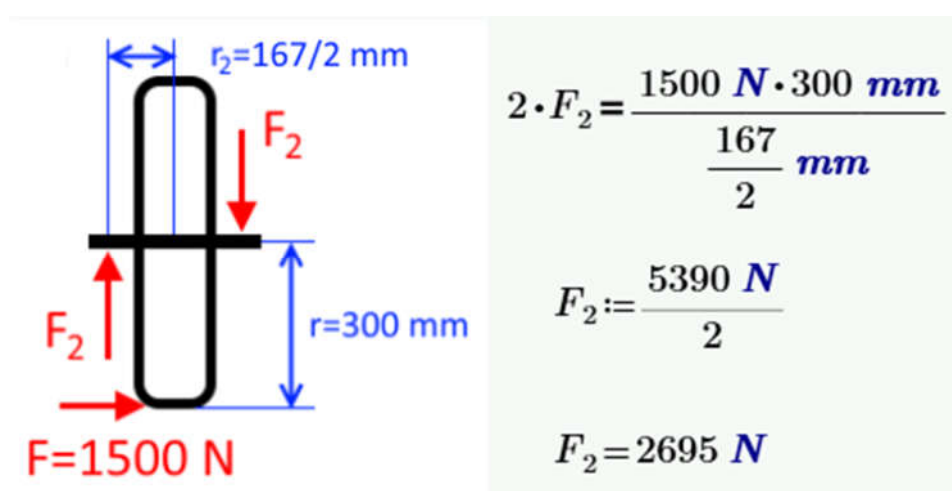
Kuva 13. Kuormitustapaus 2, osuma esteeseen tiellä.

- Voimakas kaartaminen, 1500 N sivusuuntainen voima takapyörään.



Kuva 14. Kuormitustapaus 3, voimakas kaartaminen.

Kolmannessa kuormitustapauksessa kuormitus siirrettiin vaikuttamaan taka-akselille haarukanpäiden kohdalle, jolloin akselille saatiin 1,5 kN vaakasuuntaisen voiman lisäksi haarukanpäissä vaikuttavat 2,7 kN vastakkaiset pystysuuntaiset voimat. (Kuva 15.)



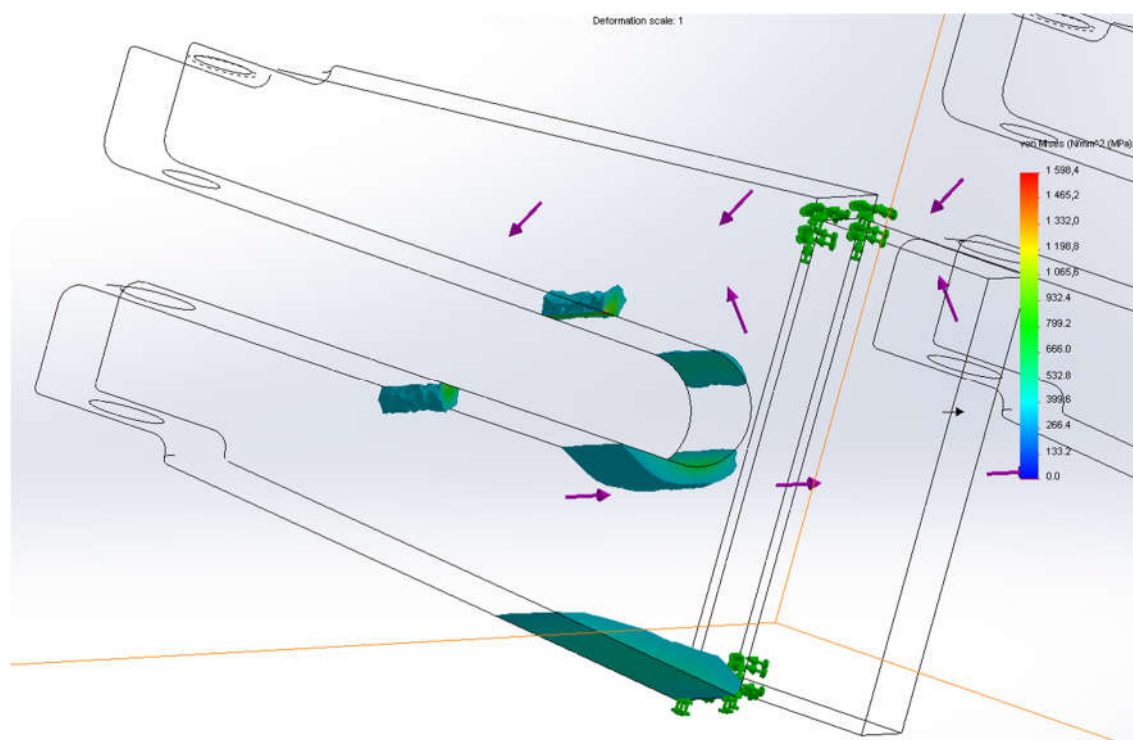
Kuva 15. Kuormitustapaus 3. Voiman siirto akselille.

Materiaaliksi kaikkiin suunniteltuihin osiin valittiin rakenneteräs S355, jonka myötölujuus on 355 MPa, liukukerroin 206 GPa ja Poissonin luku 0,29. Myös akseli ja aluslevyt otettiin laskentaan mukaan. Niille annettiin materiaaliksi 34CrNiMo6-nuorutusteräs, jonka myötölujuus on 710 MPa, liukukerroin 205 GPa ja Poissonin luku 0,32. Takahaarukan runkolevyihin valittiin kolmisivuiset taselementit. Muissa osissa käytettiin kolmiulotteisia tetraedrielementtejä. Elementtiverkkoa tihennettiin paikoissa, joissa oletettiin syntyvän

suuria jännityksiä: akselin kosketuspinoilla haarukanpäissä ja iskunvaimentimen alapään kiinnitysreikien ympärillä.

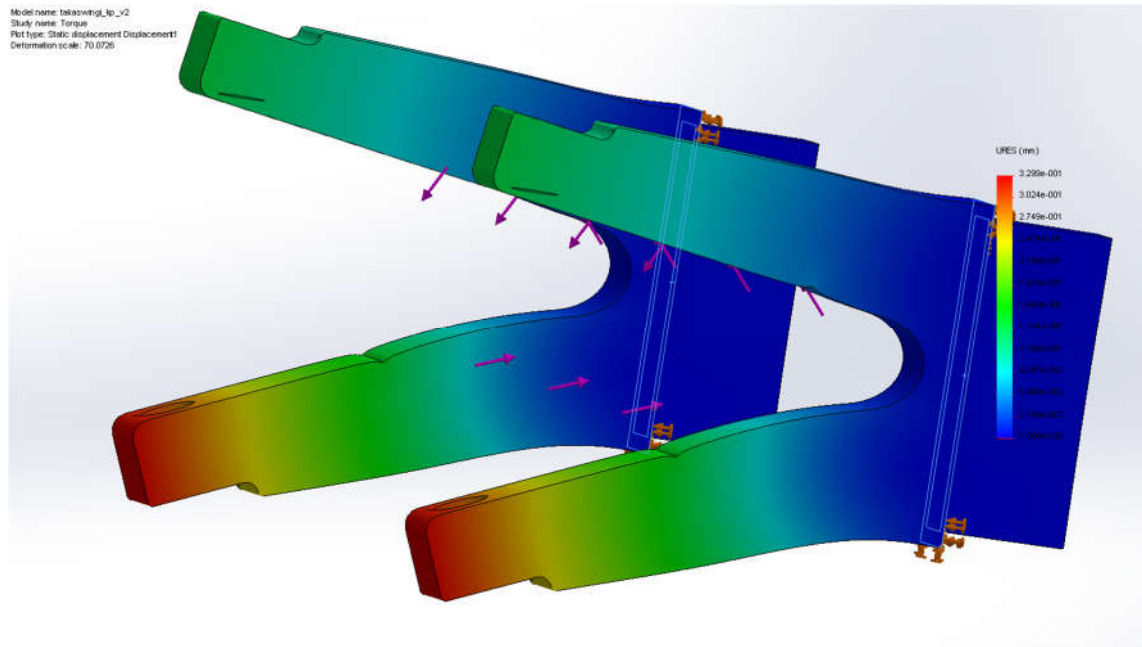
4.2 Laskentakierros 1

Ensimmäisessä laskennassa keskityttiin ainoastaan kuormitustapaukseen 1. Laskentamallissa oli mukana ainoastaan taka-akseli ja haarukanpäät. Haarukanpäät kiinnitettiin jäykästi kuvassa 16 näkyvien vihreiden nuolien osoittamasta pinnasta. Laskennassa saatiin korkeat pintajännitykset akselin ja haarukanpään kosketuskohdissa ja haarukanpää aukeaa hieman. Kuvassa 16 näkyy, että korkeimmat von Mises -vertailujännitykset haarukanpäähän syntyvät akselin tasaisen ja kaarevan osan välisen särmän kohdalla. Korkein jännitys on yli 1500 Mpa, mikä on moninkertainen materiaalin myötölujuuteen verrattuna. Todennäköisesti akseli muokkasi itselleen vähitellen tien pyörähtää ympäri suuren pintapaineen kohdistuessa aina uuteen metallipintaan edellisen muovaantuessa pois tieltä.



Kuva 16. Jännitykset väännössä. Vain yli 355 MPa jännitykset näkyvissä.

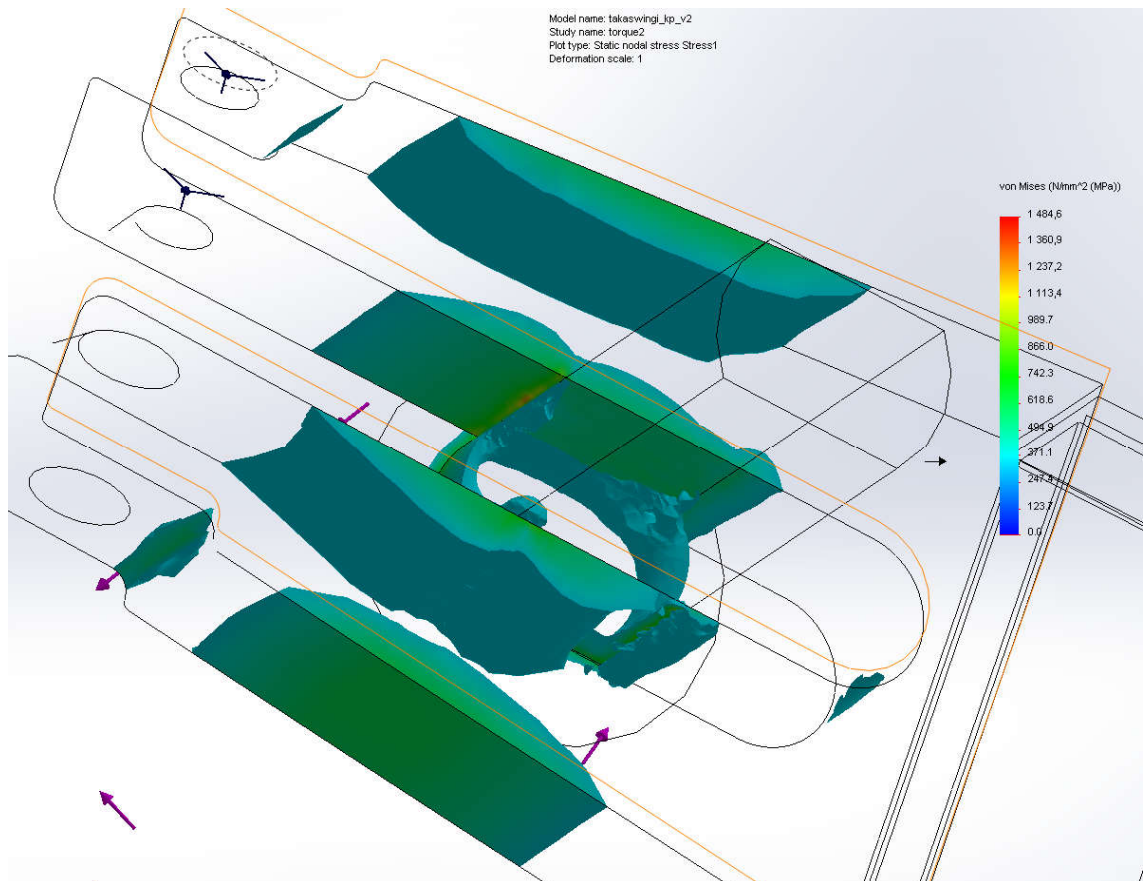
Kuvassa 17 nähdään vääntömomentin taipumus avata haarukanpäättä. Siirtymät ovat hyvin pieniä johtuen suuresta materiaalinpaksuudesta, maksimisiirtymä on n. 0,33 mm.



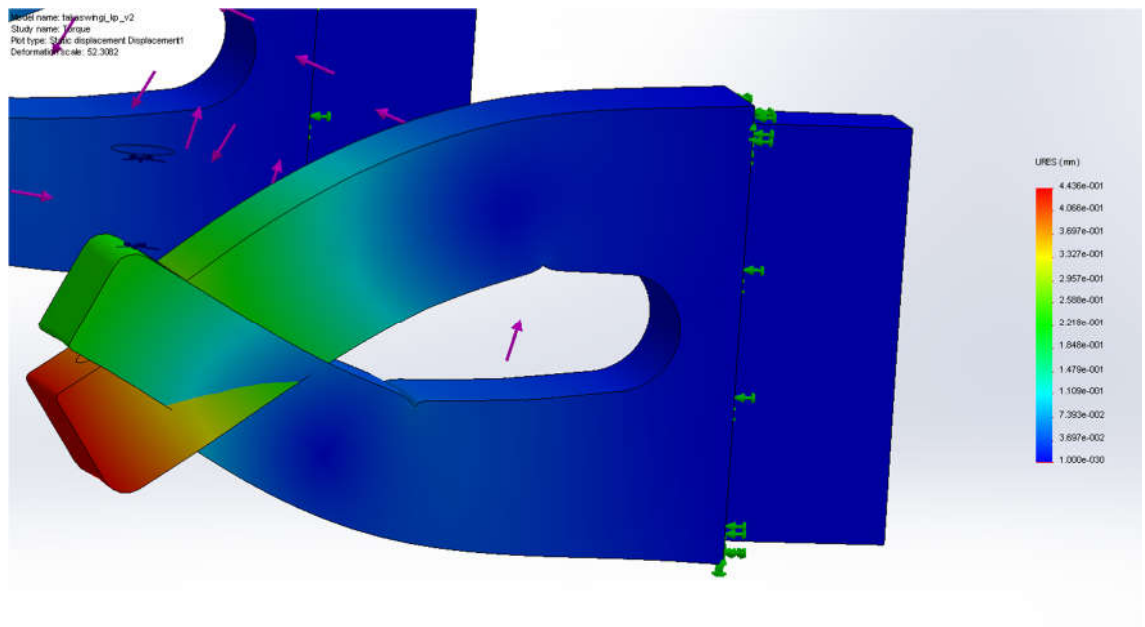
Kuva 17. Siirtymät liioiteltuna noin 70-kertaisena.

4.3 Laskentakierros 2

Toiseen laskentaan malliin lisättiin ruuvi 10 Nm kiristyksellä puristamaan haarukanpään haaroja toisiinsa. Kuvasta 18 nähdään, että myötölujuuden yli menevä jännitysalue kasvoi ruuvin puristaessa haarukanpäättä kasaan suurimman jännityksen pysyessä suunnilleen samana kuin ensimmäisessä laskennassa. Kuvassa 19 nähdään, että siirtymät ovat nyt ruuvivoiman vuoksi vastakkaiseen suuntaan verrattuna laskentaan 1.



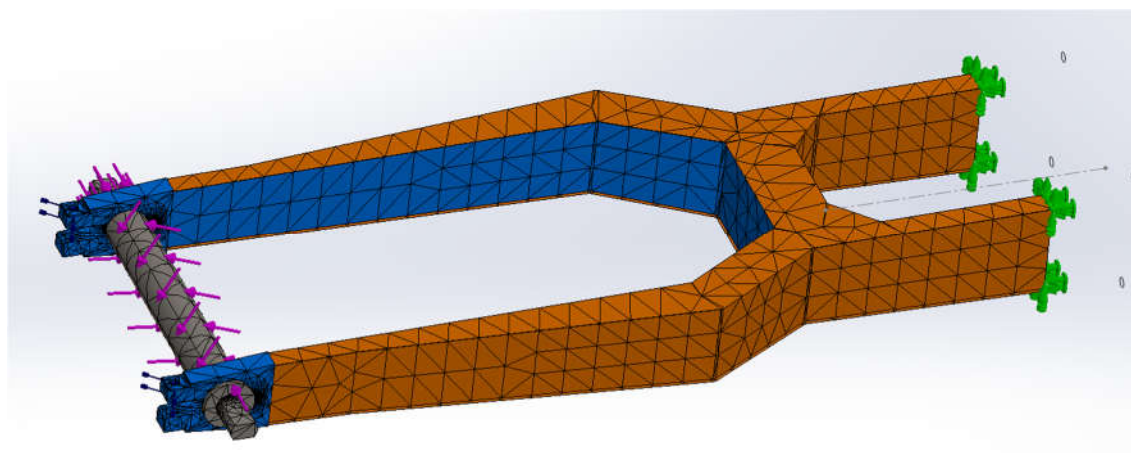
Kuva 18. Jännitykset väännössä. Vain yli 355 MPa jännitykset näkyvissä.



Kuva 19. Siirtymät liioiteltuna 52-kertaisesti.

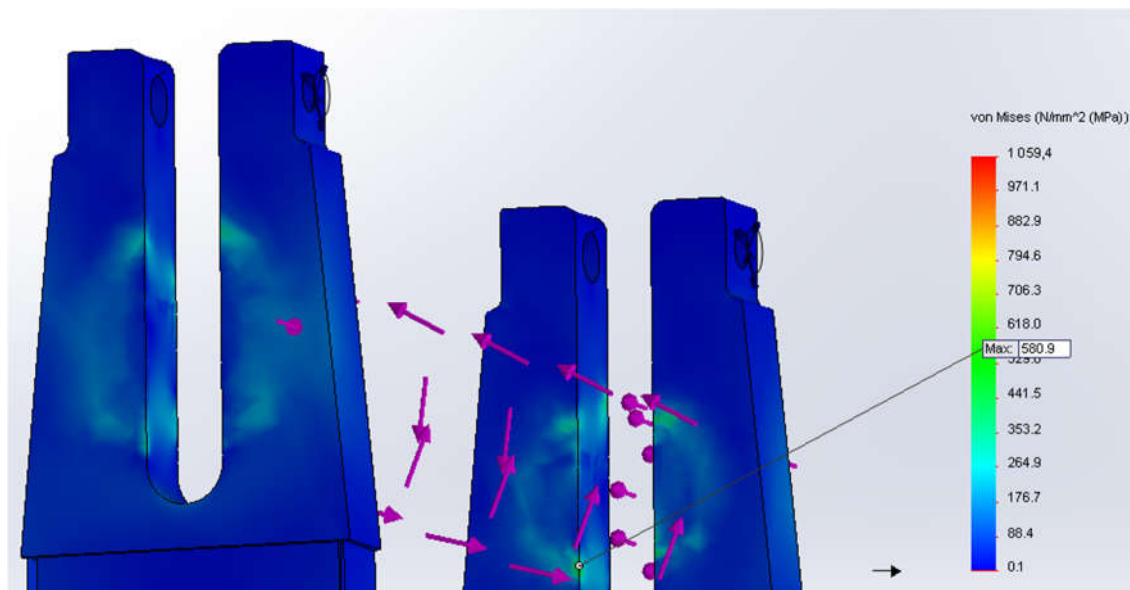
4.4 Laskentakierros 3

Kolmanteen laskentamalliin lisättiin taka-akselille haarukanpäiden ulkopuolelle aluslevyt, joita puristamaan asetettiin 62 kN ruuvivoima, joka vastaa 215 Nm kiristysmomenttia M16-mutterille ilman voitelua [9]. Aluslevyn ja haarukanpään väliseksi kitkakertoimeksi asetettiin ohjelmaan 0,15, mikä on hieman pienempi kuin valmistajan antama kerroin 0,20. Akselin ja haarukanpään väliseksi kitkakertoimeksi valittiin 0,12. Haarukanpään ruuvivoima laskettiin 0,5 Nm:iin, jotta sen aiheuttama rasitus pysyisi mahdollisimman pienenä, mutta ruuvi edelleen estää haarukanpään leviämisen. Takahaarukan runko otettiin mukaan vääntölaskentaan, kun aiemmin laskennassa oli mukana vain haarukanpäät. Kuvassa 20 on esitetty elementtiverkko ja kuormitukset kuormitustapauksessa 1. Vihreät nuolet osoittavat kiinnitetyn haarukan etupään, punaiset nuolet akselille asetettua vääntökuormitusta ja aluslevyihin kohdistuvaa ruuvivoimaa.

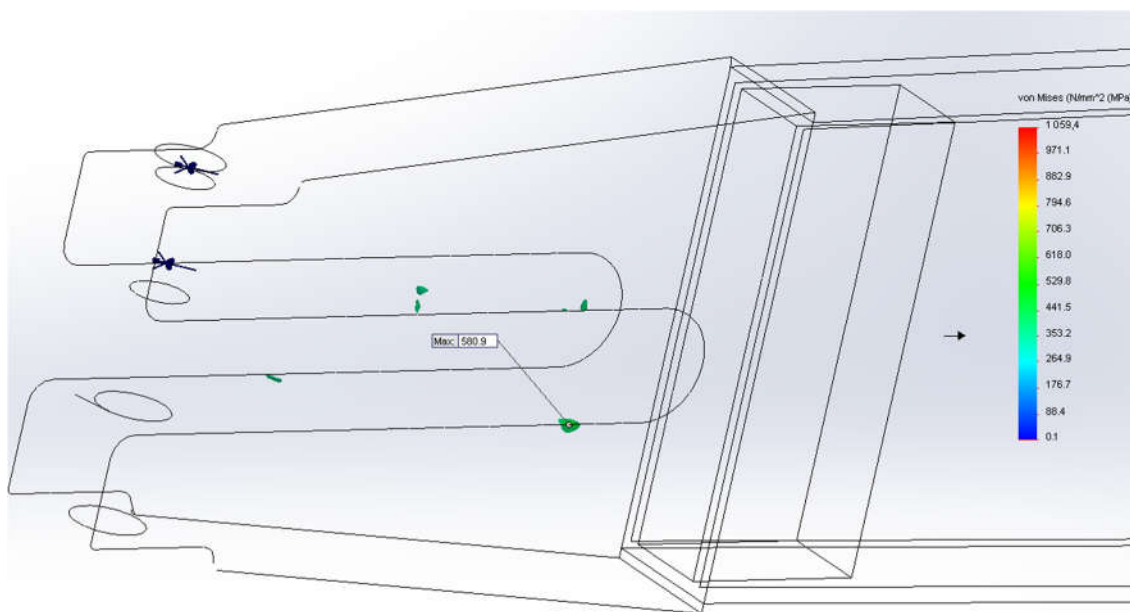


Kuva 20. Mallin elementtiverkko, kiinnitykset ja kuormitukset kuormitustapauksessa 1.

Kuvista 21 ja 22 nähdään, että korkeat jännitykset akselin ja haarukanpäiden kosketuskohdissa hävisivät. Vääntömomentti välittyy nyt pääosin aluslevyn ja haarukanpään välisen kitkan avulla ja jakaantuu suuremmalle pinta-alalle.

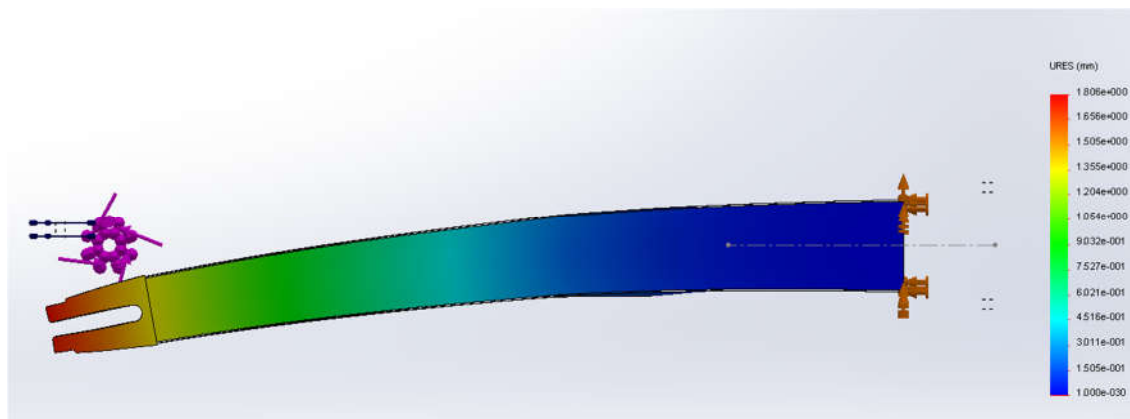


Kuva 21. Jännitykset haarukanpäissä kuormitustapauksessa 1.



Kuva 22. Suurimmat jännitykset vääntökuormituksella. Vain yli 355 MPa jännitykset näkyvissä.

Kuvassa 23 nähdään vääntömomentin taivuttava vaikutus, kiihdytettäessä takahaarukan pää taipuu maata kohden. Suurin siirtymä 1,8 mm ei vaikuta suurelta takahaarukan mittakaavassa.



Kuva 23. Siirtymät liioiteltuna.

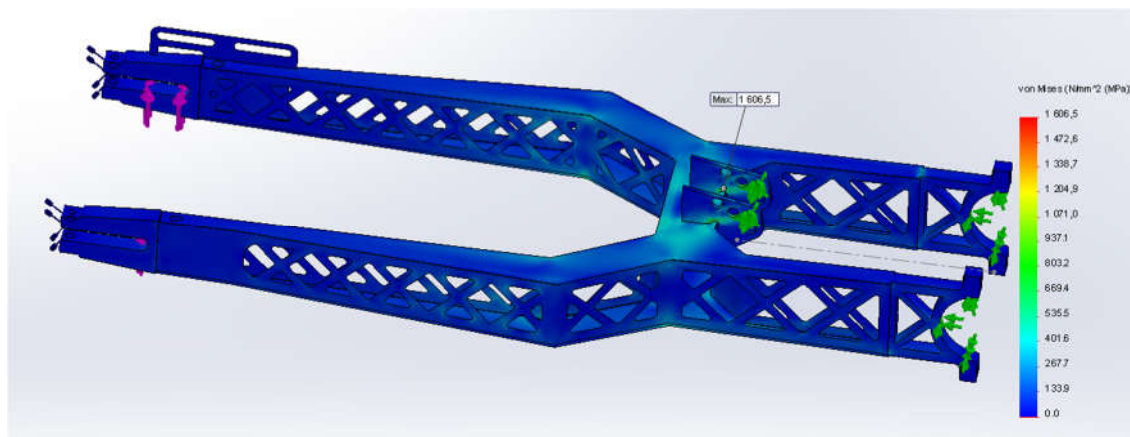
4.5 Laskentakierros 4

Lopuksi kylkilevyjä kevennettiin leikkaamalla niihin aukkoja. Levyjen pyöristys- ja taivutussäteitä kasvatettiin, jotta jännitykset niiden lähellä pienenisivät. Koko mallin elementtiverkkoa tihennettiin, malliin lisättiin kaikki osat ja tuentoja muutettiin (kuva 24). Takahaarukka tuettiin iskunvaimentimen kiinnityskorvakkeesta ja vaihdelaatikon kiinnityskohdasta sarananivelillä, jotka sallivat vain pyörimisliikkeen reiän akselin ympäri. Jännitykset ja taipumat eivät kasvaneet merkittävästi, vaikka takahaarukka keveni noin 13 %.

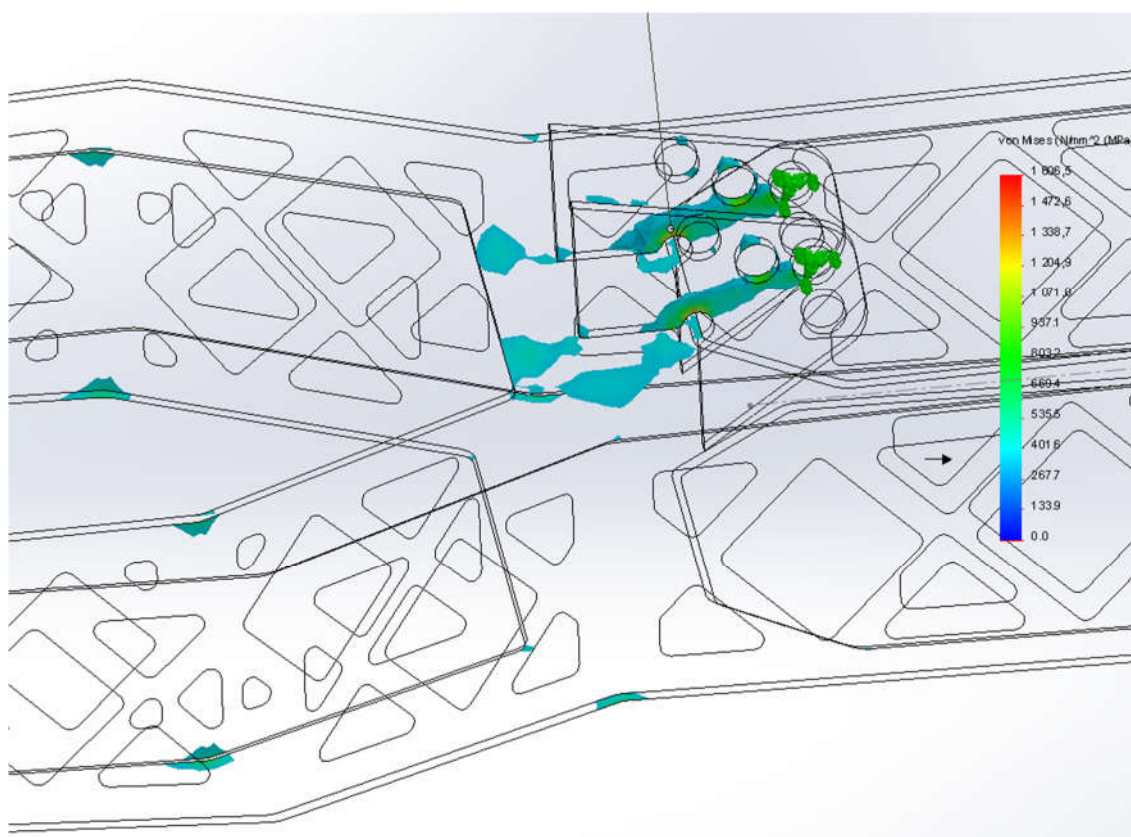


Kuva 24. Elementtiverkko.

Kuvista 25 ja 26 nähdään, että suurimmat jännitykset kuormitustapauksessa 2 syntyvät iskunvaimentimen alapään kiinnityksen lähelle.

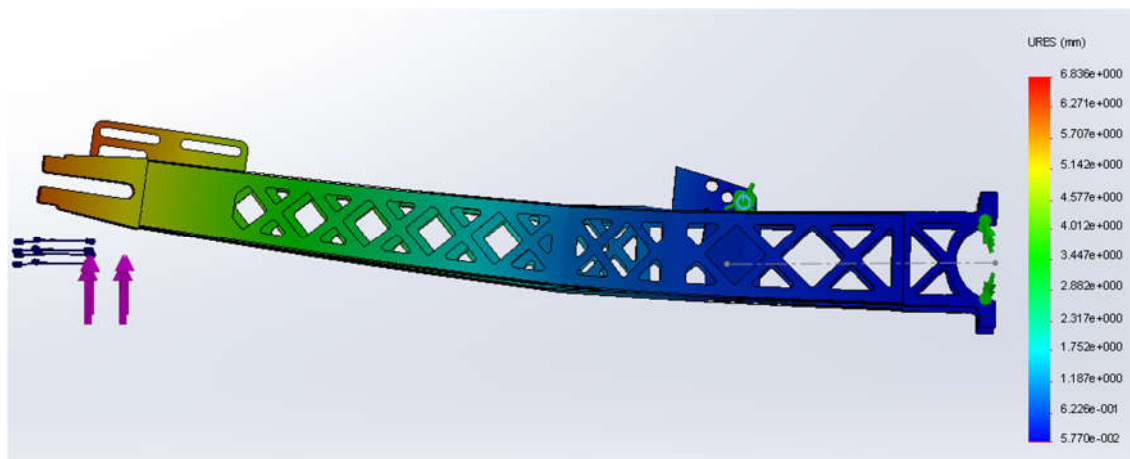


Kuva 25. Yleiskuva jännityksistä pystysuuntaisella kuormituksella.



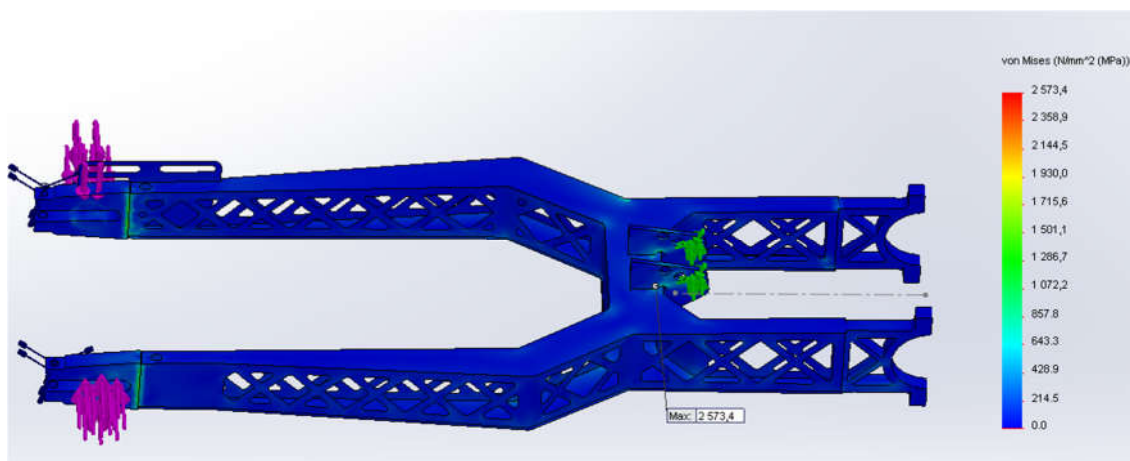
Kuva 26. Suurimmat jännitykset pystysuuntaisella kuormituksella. Vain yli 355 MPa jännitykset näkyvissä.

Kuvassa 27 esitetetään pystysuuntaisella kuormituksella syntyvät siirtymät. Taka-akselin kohdalla noin 5,5 mm.

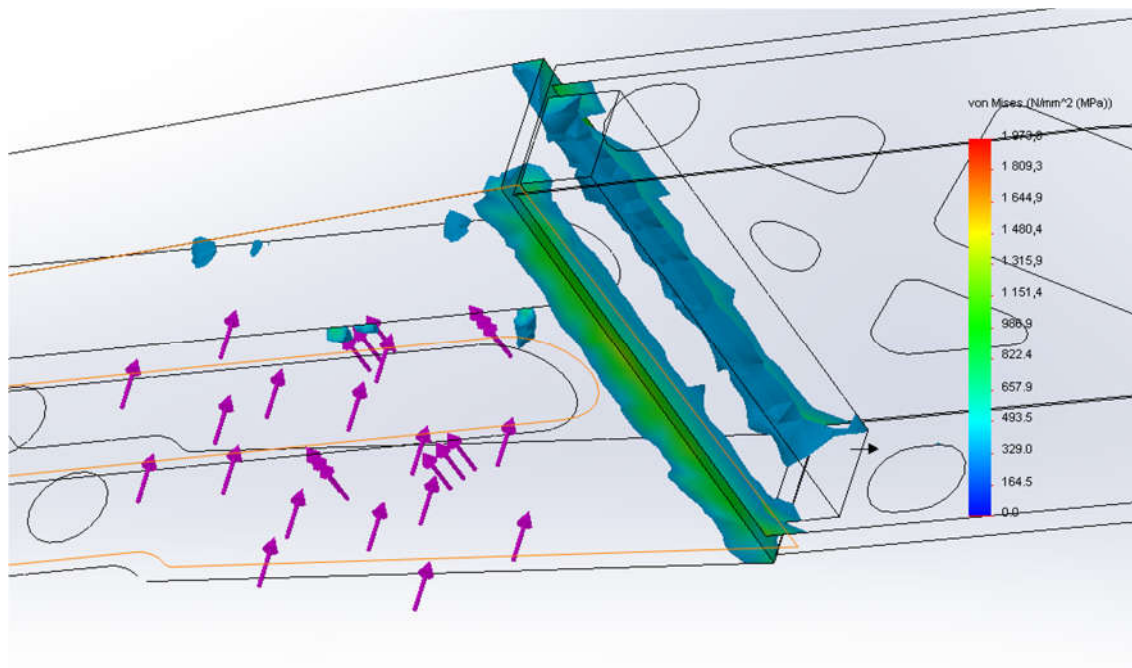


Kuva 27. Siirtymät pystysuuntaisella kuormituksella (kuormitustapaus 3).

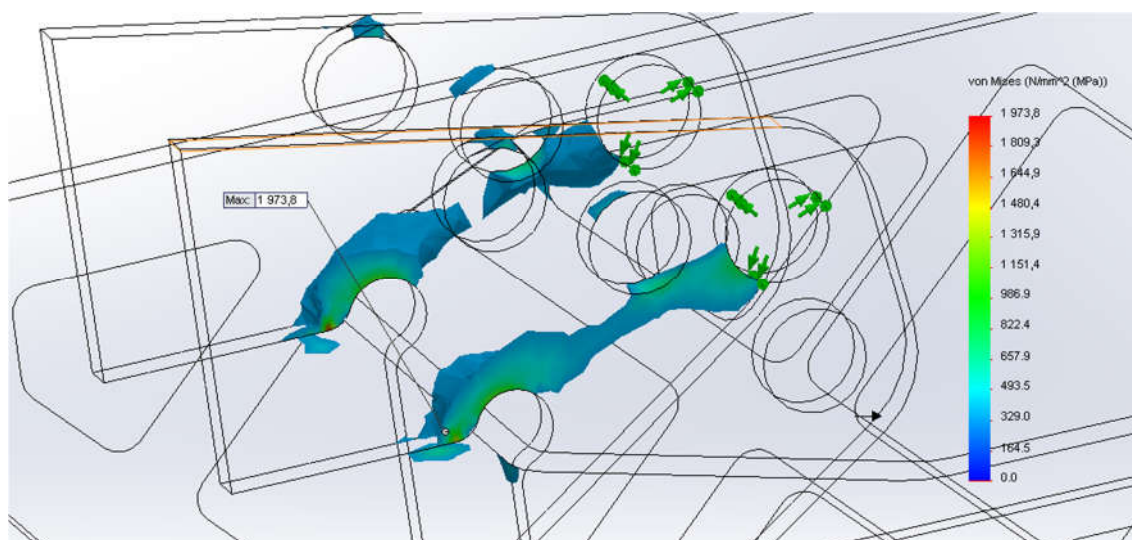
Kuvissa 28-30 näytetään Von Mises -vertailujännitykset kuormitustapauksessa 3. Suurimmat jännitykset syntyivät iskunvaimentimen alapään kiinnityksen lähetyville ja haarukanpäiden ja haarukan rungon saumakohtiin. Jälkimmäinen johtuu ilmeisesti osien välisistä sidonnoista laskentamallissa ja haarukanpäiden kavennuksen terävästä nurkasta.



Kuva 28. Kuormitustapaus 3. Yleiskuva jännityksistä.

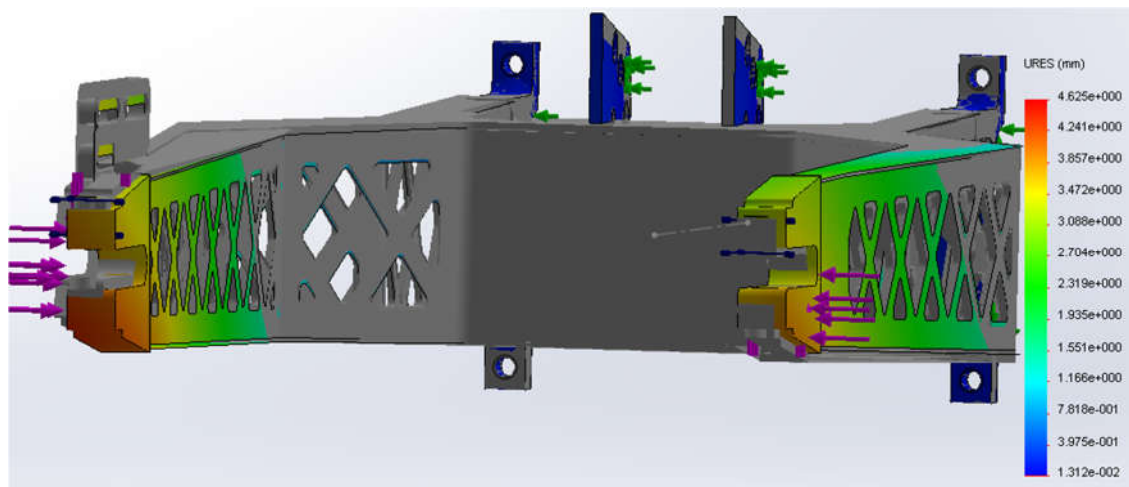


Kuva 29. Kuormitustapaus 3. Yksityiskohta suurimmista jännityksistä. Vain yli 355 MPa jännitykset näkyvissä.



Kuva 30. Kuormitustapaus 3. Yksityiskohta suurimmista jännityksistä. Vain yli 355 MPa jännitykset näkyvissä.

Siirtymät sivuttaiskuormituksella näytetään kuvassa 31. Harmaa kuormittamaton muoto on jätetty kuvaan havainnollistamaan siirtymän suuruutta. Kuvan perusteella siirtymät ovat hyväksyttäviä. Suurin siirtymä on noin 4 mm.



Kuva 31. Kuormitustapaus 3. Siirtymät oikeassa mittakaavassa.

Suuret jännitykset iskunvaimentimen alapään kiinnityslevyissä eri kuormitustapauksissa johtuvat ainakin osin siitä, että lujuuslaskennassa käytettiin siinä kiinnitystä, mikä sallii ainoastaan rotaation kiinnitysreiän akselin ympäri. Oikeasti jousi ja iskunvaimennin muuttavat lämmöksi suuren osan takapyörään kohdistuneesta iskusta.

5 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli suunnitella takahaarukka olemassaolevien sähkömoottoripolkupyörän osien ympärille. Työssä selvitettiin lähtötietoja eri lähteistä, arvioitiin syntyviä voimia ja laskettiin elementtimenetelmällä takaahaarukkaan syntyviä jännityksiä ja siirtymiä. Tulosten perusteella mallia parannettiin, minkä jälkeen uudella laskennalla todennettiin muutosten hyödyllisyys. Työhön käytettävien aikaresurssien niukkuudesta johtuen kappaleen valmistuttamiseen asti ei päästy. Työpiirustuksia ei keskeneräisestä suunnitelmasta tehty. Sen sijaan syntyi uusia kysymyksiä ja jatkokehitysehdotuksia.

Valmistettavuutta voisi parantaa helpottamalla hitsausenaikaista koossapysymistä ja osien sijoittamista muotoilemalla levyjen reunoihin jyvät ja hahlot. Malliin pitää lisätä poljinkammet ja polkimet oikeille paikoilleen, jotta voidaan varmistua siitä, että polkimet eivät osu takahaarukkaan kampia pyöritettäessä. Iskunvaimentimen alapään kiinnitys ei ole suunnittelu loppuun asti, eikä jousi-vaimenninelementtiä ole huomioitu

lujuuslaskuissa. Tästä syystä jännitykset sen alapään kiinnityksessä ovat laskennassa suuret. Taka-akselin muttereiden kiristysvoiman pienentämistä tulisi myös tutkia, nykyisessä laskelmassa käytetty 62 kN ruuvivoima on ilman voitelua 215 Nm vääntömomentiksi muutettuna. Riittääkö em. ruuvivoima estämään yksin haarukanpään levittymisen? Voiko haarukanpäästä yhteen puristavat ruuvit jättää pois? Laskennassa käytetyt kuormitukset ovat hyvin summittaisia arvioita. Paremmat lähtötiedot kuormitusten osalta voisi saada esimerkiksi olemassaolevien takahaarukoiden ominaisuuksien mittauksella tai laajemmalla dynaamisella simuloinnilla.

Lähteet

- 1 Foale, Tony. 2002. Motorcycle Handling and Chassis Design the art and science. E-book. Tony Foale Designs.
- 2 Coombs, Matthew & Mauno, Esko. 2002. Moottoripyörän tekniikka: Rakenne, tekniikka, toiminta : moottoripyörät, skootterit, mopot. Helsinki: Alfamer.
- 3 User manual, Swinger Rear Shocks. 2007. Manitou.
- 4 Cromotor v2 - Aluminum Dream. Zelena Vozila. Verkkoaineisto. <<http://www.zelenavozila.com/cromotor>> Luettu 26.2.2018.
- 5 Contollers. Adaptto E-Drive Lab. Verkkoaineisto. <<http://adaptto.com/Products/Controllers/>> Luettu 26.2.2018.
- 6 Kesteven, Guy. How we test hydraulic disc brakes. Verkkoaineisto. <<http://www.bikeradar.com/mtb/gear/article/how-we-test-hydraulic-disc-brakes-24345/>> Päivitetty 2.3.2012. Luettu 26.2.2018.
- 7 Turnigy 5000mAh 4S1P 14.8v 20C Hardcase Pack. Verkkoaineisto. <https://hobbyking.com/en_us/turnigy-5000mah-4s1p-14-8v-20c-hardcase-pack.html?__store=en_us> Luettu 26.2.2018.
- 8 Motor Simulator. Grin Technologies. Verkkoaineisto. <http://www.ebikes.ca/tools/simulator.html?bopen=false&motor=MCRO5004_Sinks&cont=cust_140_350_0.003_T&batt=cust_84_0.05_25&hp=0&mass=160&wheel=25i&cont_b=cust_70_200_0.003_T&motor_b=MCRO5004_Sinks&batt_b=cust_84_0.05_25&wheel_b=25i&mass_b=150&hp_b=0&grade_b=0&grade=0&autothrot=false&throt_b=100&throt=100&blue=Nm&axis=kph&k=1&k_b=1&black=load> Luettu 26.2.2018.
- 9 User Manual, Nord-Lock original washers. Verkkoaineisto. <https://www.nord-lock.com/globalassets/mediavalet/web-assets/downloads/user-manual/nl-washer/nord-lock_user-manual_washers_en.pdf> Luettu 26.2.2018.