

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

MAASTOPYÖRÄN RUNGON MASSAN OPTIMOINTI

MASS OPTIMIZATION OF MOUNTAIN BIKE FRAME

Lappeenrannassa 15.5.2017

Henri Pellinen

Tarkastaja ja ohjaaja: TkT Kimmo Kerkkänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Henri Pellinen

Maastopyörän rungon massan optimointi

Kandidaatintyö

2017

38 sivua, 20 kuvaa ja 8 taulukkoa

Tarkastaja ja ohjaaja: TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: maastopyörä, runko, massan optimointi, ohutlevy

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin rakenteellisia ratkaisuja, joilla maastopyörän runkoa voidaan keventää jäykkyyden ja kestävyuden heikentymättä. Koska maastopyörä liikkuu ajajan rajallisella lihasvoimalla, pyörän keventäminen tekee siitä herkemmin poljettavan. Työn tarjoajana oli suomalainen maastopyöriä valmistava Pole Bicycle Company Oy.

Ensimmäinen tutkimuskohde oli selvittää rungon emäputken ja ohjaustangon korkeuksien suhteen vaikutusta massaan. Nykyisessä mallissa valmistaja käyttää keskimääräistä korkeampaa rungon emäputkea ja matalanousuista ohjaustankoa. Vertailuun tehtiin malli, jossa oli 35 mm lyhyempi emäputki ja 40 mm korkeampi ohjaustanko. Tulokseksi saatiin lyhyemmän emäputken ja korkeamman ohjaustangon yhdistelmällä 70 gramman massan säästö. Korkea ohjaustanko voi aiheuttaa kuitenkin hankaluuksia, kuten heikko tuotteiden valikoima ja mahdollinen jäykkyyden heikentyminen verrattuna suoraan tankoon.

Toinen tutkimuskohde oli tutkia maastopyörän rungon etukolmion valmistamista muovatuista ohutlevyistä. Työssä pohdittiin ohutlevyjen muovausmenetelmien ja ohentamismahdollisuuksien soveltumista tähän tarkoitukseen. Kirjallisuuskatsauksen perusteella muovaustekniikoista parhaimmat olivat hydromuovaus ja Tailor Welded Blanks -tekniikka. Ohutlevyn hydromuovaus mahdollistaa tarvittavien monimutkaisten muotojen sekä levyn ohentamisen tekemisen. Tailor Welded Blanks -menetelmässä taas ohutlevy aihio valmistetaan yhteen hitsatuista eri paksuista levyistä, jonka jälkeen se voidaan muovata yksinkertaisimmilla menetelmillä.

Jotta rungosta voitaisiin tehdä mahdollisimman optimaalinen massan ja jäykkyyden suhteen, materiaalia pitää olla oikeissa paikoissa. Suurelle rasitukselle kohdistuvat emäputken, vaakaputken ja alaputken liitoskohta. Putkien keskikohtiin ei taas kohdistu suuria jännityksiä, joten niistä pystytään ohentamaan.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Henri Pellinen

Mass optimization of mountain bike frame

Bachelor's thesis

2017

38 pages, 20 figures and 8 tables

Examiner: D. Sc. (Tech.) Kimmo Kerkkänen

Keywords: Mountain bike, frame, optimization of mass, sheet metal

This Bachelor's thesis investigates structural ways to reduce mass in mountain bike frame without losing stiffness or strength. Because mountain bike moves only with drivers limited muscular power, reducing weight of the bike makes it easier to pedal. The thesis was done to Finnish mountain bike manufacturer Pole Bicycle Company Oy.

First subject was find out how relation of frame headtube and handlebar height affects to total mass. The manufacturer uses higher than average headtube and relative flat handlebar. That was compared to model that uses 35 mm shorter headtube and 40 mm higher handlebar. Result was that combination of shorter headtube and higher handlebar saves 70 grams. However high rise handlebar might cause problems like small selection of products and possible weaker stiffness compared to flat bar.

Second subject was to study manufacturing frame front triangle from formed sheet metals. The thesis investigates how to form and thin down sheet metal so it would be suitable to for this application. By literature review, the best forming methods was hydroforming and tailor welded blanks method. Sheet metal hydroforming enables making complex shapes and reducing thickness. In tailor welded blanks method different thicknesses sheets are welded to one preform. After that it can be formed with more simple methods.

When optimizing frame mass and stiffness, it is important to place material in right places. Joint of headtube, top tube and down tube are high stress areas that needs a lot of material. Middle of pipes are conversely lower stress areas and reduce of thickness can be done.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	7
1.1	Tavoitteet ja taustat.....	7
1.2	Tutkimusongelma, -kysymykset ja rajaukset.....	7
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	8
2	KIRJALLISUUSKATSAUS	9
2.1	Ohutlevy.....	9
2.2	Ohutlevyn muovaaminen.....	10
2.2.1	Syväveto ja venytysmuovaus.....	10
2.2.2	Inkrementaalimuovaus.....	11
2.2.3	Nestemuovaus.....	12
2.2.4	Muovaaminen elastista vastinta käyttämällä.....	13
2.2.5	Tailored blanks.....	14
2.3	FE-analyysi.....	15
2.3.1	Kappaleen jännitykset.....	15
3	TUTKIMUSMENETELMÄT	16
3.1	Tutkimusmenetelmät.....	16
3.1.1	Käytetyt ohjelmistot.....	16
3.2	Ensimmäinen tutkimusaihe.....	17
3.2.1	Massan analysointi.....	19
3.2.2	Jännitysten ja siirtymien analysointi.....	20
3.2.3	Rasitustapaus 1.....	20
3.2.4	Rasitustapaus 2.....	20
3.3	Toinen tutkimusaihe.....	21
3.3.1	Rasitustapaukset.....	22
3.3.2	Tulosten analysoiminen.....	23
4	TUTKIMUSTULOKSET	24

4.1	Ensimmäisen tutkimusaiheen tulokset.....	24
4.2	Toisen tutkimusaiheen tulokset	25
4.2.1	Ensimmäinen ja toinen rasiustapaus	25
4.2.2	Kolmas rasiustapaus	27
4.2.3	Neljäs rasiustapaus.....	27
4.2.4	Vaaka- ja alaputki	28
4.2.5	Emäputki	29
5	TULOSTEN POHDINTA	30
5.1	Ensimmäinen tutkimusaihe.....	30
5.2	Toinen tutkimusaihe	31
5.2.1	Emäputken alue.....	31
5.2.2	Vaaka- ja alaputki	33
5.2.3	Keskiön seutu.....	33
5.2.4	Iskunvaimentimen kiinnityskohta.....	33
5.3	Ohutlevymenetelmän pohdinta	33
6	YHTEENVETO	35
	LÄHTEET	36

LYHENNELUETTELO

FE	Finite element, elementtimenetelmä
CAD	Computer-aided design, tietokone avusteinen suunnittelu
TWB	Tailor welded blanks,
FEMAP	Finite element modeling and postprocessing, elementtimenetelmällä suunnittelu ja jälkikäsittely

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan ratkaisuja, joilla maastopyörän runkoa voitaisiin keventää jäykkyyden tai kestävyuden heikentymättä. Työ tehdään suomalaiselle maastopyöriä valmistavalle Pole Bicycle Company Oy:lle. Vuonna 2013 perustettu yritys valmistaa heidän mukaansa laadukkaita polkupyöriä aktiiviharrastajille. Tässä tutkimustyössä keskitytään yrityksen täysjousitettuihin maastopyörien runkoihin. (Kokkonen 2017.)

1.1 Tavoitteet ja taustat

Työn tavoitteena on löytää rakenteellisia ratkaisuja, joita käyttämällä maastopyörän rungosta pystytään valmistamaan kevyempi. Rungon jäykkyys ja kestävyys eivät kuitenkaan saa heikentyä nykyisestä mallista. Koska polkupyörä liikkuu ainoastaan rajallisella pyöräilijän lihasvoimalla, polkupyörän ja pyöräilijän yhdistelmän massan pudottamisella voidaan tehdä etenemisestä nopeampaa. Erityisesti kilpaurheilussa pyöräilijät haluaisivat mahdollisimman kevyen pyörän, koska heille jokainen sekunti on tärkeä. Massan pienentäminen vaikuttaa pyöräilijään Newtonin toisen peruslain mukaan kiihtyvyyden parantumisena sekä potentiaalienergian mukaan pienempänä energian käyttönä ylämäkeen ajettaessa. Massa lukuarvona on myös kuluttajalle helposti esiin nostettava ja vertailtava luku polkupyörien välillä. Kuluttajan on helppo ajatella, että kannattaa valita kevyempi pyörä. Täten massan numeerinen arvo voi olla hyvinkin isossa roolissa kuluttajan ostopäätöstä tehdessä ja pyörän muiden ominaisuuksien vertailu jää pienemmäksi. (McGann Publishing LLC; Burke.)

1.2 Tutkimusongelma, -kysymykset ja rajaukset

Tutkimuksessa keskitytään kahteen osakokonaisuuteen; rungon emäputken ja ohjaustangon korkeuden suhteen tarkasteluun sekä rungon etukolmion valmistusmenetelmän tarkasteluun. Ensimmäisessä tarkasteltavassa osakokonaisuudessa tutkimusongelmana on tietämättömyys siitä, minkälainen ratkaisu on painon suhteen optimaalisin tapa saada ohjaustanko samaan korkeuteen.

Työn toisessa tarkasteltavassa osakokonaisuudessa keskitytään rungon etukolmion valmistukseen monokokki menetelmällä, eli runko on tehty muotoilluista ohutlevyistä

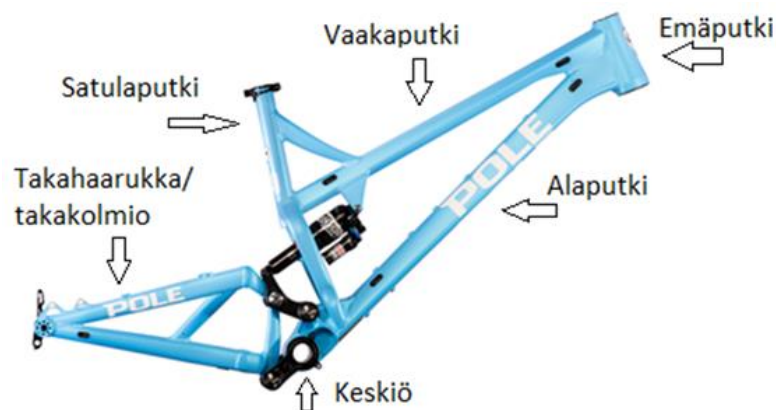
kuorirakenteeksi. Tutkimusongelmana tässä tapauksessa on selvittää, pystyykö tällä tavalla valmistamaan rungon ja mitä asioita pitää huomioida, jotta se olisi ominaisuuksiltaan kilpailukykyinen verrattuna nykyiseen alumiiniseosputkista valmistettuun malliin. Erityisesti tarkastelun kohteena on ohutlevyn tarvittavan seinämävahvuuden selvittäminen. Tutkimuskysymyksiä kummastakin tapauksesta ovat:

- Onko nykyistä matalampi rungon emäputki yhdistettynä nykyistä korkeampi nousuisella ohjaustangolla painon suhteen optimaalisempi rakenne?
- Missä kohdissa runkoa tarvitaan paksumpaa seinämävahvuutta ja mistä voi ohentaa?
- Miten ohutlevyä pystytään ohentamaan määritellyistä kohdista?

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen ensimmäisessä tutkimustapauksessa mallinnetaan polkupyörän etuosa SolidWorks 3D -mallinnusohjelmalla. Tämä sisältää rungon emäputken, etuhaarukan ohjainputken, ohjainkannattimen sekä ohjaustangon. Ohjelman avulla selvitetään eri korkuisten mallinnettujen osien massat vertailua varten. Tämän jälkeen mallien jännityksiä vertaillaan FE-analyysillä (Finite Element eli elementtimenetelmä analyysillä) FEMAP-ohjelmalla (Finite Element Modeling And Postprocessing).

Työn toisessa tutkimustapauksessa työn teettäjän, Pole Bicyclen, suunnittelemaan rungon etukolmioon suunnitellaan optimaaliset ohutlevyn seinämävahvuudet. Tavoitteena on optimoida painon ja jäykkyyden suhdetta. Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään ohutlevyn ominaisuuksiin, ohentamismahdollisuuksiin ja muovattavuuteen. Kuvassa 1 esitetään Pole Bicyclen nykyisen malliston Pole Evolink 140 -maastopyörän runko, johon on nimetty rungon osat.



Kuva 1. Pole Evolink 140 runko (muokattu Evolink 140 29 EN 2017).

2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Kirjallisuuskatsauksessa perehdytään erilaisiin ohutlevyn muokkaustekniikkoihin, joita voisi käyttää hyväksi polkupyörän rungon etukolmion valmistuksessa. Rungon etukolmiolla tarkoitetaan päärunkoa ilman takahaarukkaa. Täysjousitetuissa pyörissä nämä ovat erillisiä osia, koska jousituksen liike muodostuu takahaarukan liikkeestä suhteessa eturunkoon. Takahaarukka voi olla kiinnitettynä eturunkoon jousitusratkaisusta riippuen joko yhdestä tai kahdesta nivelpisteestä. Kuvassa 1 esitettyssä Pole Evolink pyörässä käytetään kaksoislinkku ratkaisua, jossa takahaarukka kiinnittyy kahden samaan suuntaan kiertyvän linkun avulla päärunkoon. Jousituksen liikettä kontrolloiva iskunvaimennin kiinnittyy etu- ja takarunkojen väliin. Se voi olla kiinnitettynä suoraan molempiin runkojen osiin tai iskunvaimentimen liikkeen suhdetta muokkaavaan linkkuun, kuten kuvan 1 Polen pyörän iskunvaimentimen alempi kiinnitys on toteutettu. Vaikka tässä työssä ei keskitytä takahaarukkaan, pitää takahaarukasta välittyvät voimat, erityisesti jousituksen pohjaustapauksessa, ottaa huomioon. (Glaskin 2013, s. 30–31.) Rungon etukolmio nimi tulee yleisesti käytetystä kolmiomaisesta muodosta runkoputkien välillä. Kolmio on vahvin ja jäykin kaksikulotteinen muoto, jonka takia runkojen pääosista tehdään kolmiomaisia. (Glaskin 2013, s. 18–19.)

2.1 Ohutlevy

Ohutlevyistä pystytään valmistamaan kevyitä, mutta jäykkiä rakenteita kuten esimerkiksi kenno- tai kotelomaiset rakenteet. (Matilainen et al. 2011, s. 3). Tämän takia ohutlevyrakenteita hyödyntäen maastopyörän rungosta voisi olla mahdollista valmistaa kevyempi verrattuna perinteisempään hydroformatuista putkista valmistettuun runkoon. Ideana työssä on tutkia kahdesta tai useammasta hitsatusta ohutlevypalasta valmistettua kotelomaista runkorakennetta. Kahdesta palasta valmistettu rungon etukolmio tarkoittaisi, että peilikuvalliset muovatut vasemman ja oikean puoleiset levyt hitsattaisiin yhteen pitkittäissuunnassa koko rungon ympäriltä. Tähän pitäisi vielä lisäksi hitsata ohjain-, keskiö- ja jousituksen linkun nivelenlaakerille erilliset kaulukset, joihin itse laakerit tai laakerikupit saisi sovitettua. Useammista paloista valmistettaessa esimerkiksi emäputki ja keskiön seutu voitaisiin valmistaa taotuista ja jyrskyistä osista. Näiden välille tulisivat ylä- ja alaputkiksi putkimaiset ohutlevyrakenteet.

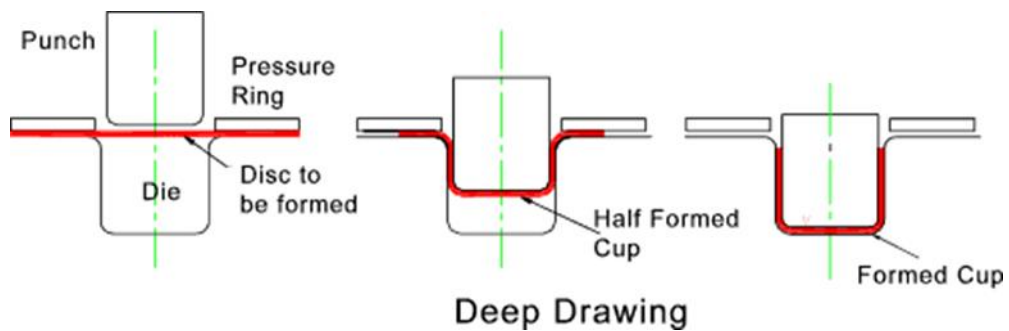
Ohutlevyn määritelmänä pidetään yleisesti 3-4 mm ainevahvuutta, mutta monet valmistustekniikat soveltuvat myös paksummille ainevahvuuksille. (Matilainen et al. 2011, s. 3). Jotta ohutlevystä pystytään valmistamaan jäykkä ja kevyt polkupyörän runkorakenne, sitä pitää muovata putkimaiseksi ontelorakenteeksi sekä pitää pystyä käyttämään eri seinämävahvuuksia.

2.2 Ohutlevyn muovaaminen

Ohutlevyihin saadaan muovaamalla hyvinkin monenlaisia muotoja, jotka antavat suunnittelijoille vapauksia muotoilla tuotteisiin monimutkaisempia muotoja. Ohutlevyjen muovaus tehdään yleensä kylmämuovaamalla, koska sillä saavutetaan suurempi lujuus sekä pienempi valmistusaika kuumamuovaukseen verrattuna. Seuraavassa esitetään muovaustekniikoita, joita olisi mahdollista käyttää pyörän rungon valmistukseen. (Matilainen et al. 2011, s. 215.)

2.2.1 Syväveto ja venytysmuovaus

Syväveto ja venytysmuovaus ovat samankaltaisia prosesseja ja niitä hyödynnetäänkin yleensä yhtä aikaa samassa työvaiheessa. Erona on venytysmuovauksessa tapahtuva materiaalin ohentuminen. Syvävedon (deep drawing) periaate on esitetty kuvassa 2. Siinä levyaihio (disc to be formed) asetetaan pidätinrenkaan (pressure ring) ja muotin (die) väliin. Tämän jälkeen painin (punch) työntää levyaihion muottia vasten ja näin haluttu muoto syntyy levyyn. Kuvan tapauksessa levy on ensin puoliksi muotoiltu kuppi (half formed cup) ja viimeisessä kuvassa täysin muovattu kuppi (formed cup). Aihio pääsee liikkumaan pidätinrenkaan ja muotin välissä, joten materiaalinpaksuus pysyy vakiona. Venytysmuovaukseen pätee sama periaate, mutta levyaihiota pidetään pidätinrenkaan ja muotin välissä, niin ettei levy pääse liikkumaan. Täten materiaali venyy aiheuttaen levyn materiaalinpaksuuden ohentumista ja pinta-alan kasvamista. (Matilainen et al. 2011, s. 220-229.)



Kuva 2. Syvävedon periaate (Roymech 2013).

Syvävedon ja venytysmuovauksen yhdistelmä prosessi mahdollistaisi materiaalinvahvuuden optimoinnin eri kohtiin runkoa. Tällöin levyaihion materiaalivahvuus valittaisiin paksuimman kohdan mukaan ja ohennettavissa kohdissa käytettäisiin venytysmuovausta.

Yleisimpiä virheitä syvävedossa ovat levyn rypytyminen ja murtuminen. Rypyt johtuvat kehän suuntaisesta puristusjännityksestä ja niitä esiintyy enemmän ohuemmissa ja lujemmissa materiaaleissa. Myös geometrian monimutkaisuuden lisääminen aiheuttaa rypyttymisherkkyyttä. Rypyttymisen yhtenä syynä voi olla painimen liian suuri säde. Tämä tarkoittaa sitä, että puolipallomainen kappaleen pohja on hankalampi valmistaa tasapohjaiseen verrattuna. Tämä voi aiheuttaa ongelmia valmistettaessa pyöreitä putkimaisia rungon osia. Levyn murtumiseen ja kykyyn venytysmuovautua vaikuttaa materiaalin muokkauslujittuvuus. Mitä korkeampi muokkauslujittumiseksponentti materiaalilla on, sitä paremmin se on muokattavissa ilman murtumisen riskiä. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi useimmat alumiiniseokset, titaani ja ruostumaton teräs. (Matilainen et al. 2011, s. 220–229.)

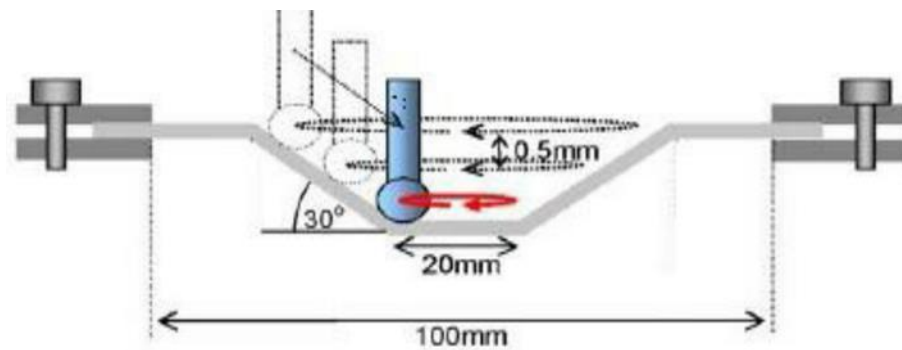
Syvävetoon perustuvat valmistusmenetelmät perustuvat työkalutekniikkaan, eli puristustyökaluilla on suuri merkitys kappaleen onnistumiseen. Työkalut kannattaa siis suunnitella huolella. Koska työkaluille edullisin koneistava valmistustapa on sorvaaminen, niin kappaleissa kannattaa suosia pyörähdyssymmetrisiä muotoja. (Matilainen et al. 2011, s. 220–229.)

2.2.2 Inkrementaalimuovaus

Inkrementaalimuovaus eli numeerinen painomuovaus on tekniikka, jossa levyaihiota kylmämuovataan pienin askelin kerrallaan. Menetelmää kutsutaan myös muotittomaksi

muovaamiseksi, koska levyä on mahdollista muovata ilman muottia. Tämän takia menetelmä sopii hyvin prototyyppi ja piensarja valmistukseen. Toisaalta pitkä valmistusaika rajaa sarjatuotannon kannattavuuden pois. Inkrementiaalimuovausta voidaan soveltaa esimerkiksi osittaisilla muoteilla, jotka voivat vielä liikkua sitä mukaan, kun työkalu suorittaa muovauskiertoa. Muovaustyökalu voidaan myös kiinnittää teollisuusrobotin rannelaippaan. (Matilainen et al. 2011, s. 230–232.)

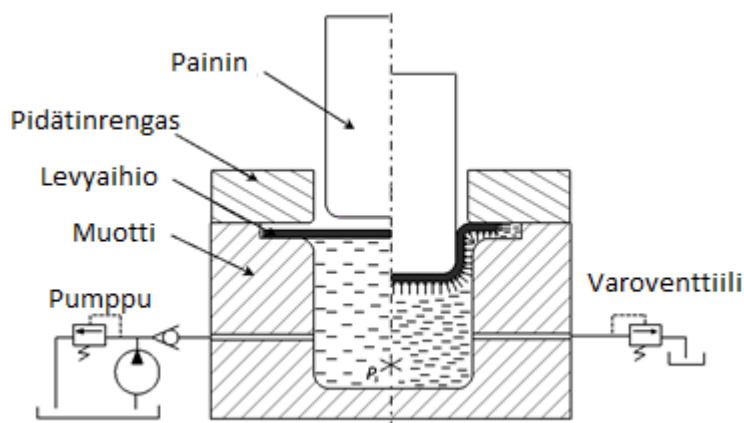
Inkrementaalimuovauksen peruseräite on esitetty kuvassa 3. Siinä pyörivän työkalun liikettä ohjataan CAD (computer-aided design) eli tietokone avusteisesti suunnitellun piirustuksen perusteella siten, että työkalu liikkuu levyn pinnalla muovaten sitä askel kerrallaan. Levy on kiinnitettyä levynpitimiin, joten tässä menetelmässä kappale ohenee muovattaessa. CAD-pohjaisen suunnitelman takia kaikenlaiset muutokset aiempaan suunnitelmaan ovat helppo ja nopea toteuttaa. Menetelmän vahvuuksiin kuuluu myös monimutkaisten muotojen valmistaminen. (Matilainen et al. 2011, s. 230–232.)



Kuva 3. Inkrementaalimuovauksen periaate (Senthil et al. 2014).

2.2.3 Nestemuovaus

Nestemuovaus eli hydroformaus menetelmissä käytetään ohutlevyn muotoiluun hyväksi nesteen painetta. Ohutlevyjien nestemuovauksessa yleisin tapa on hydromekaaninen syväveto. Se muistuttaa periaatteeltaan tavallista syvävetoa sekä venytysmuovausta, mutta toinen muoteista korvataan nesteellä. Neste on yleensä öljyä, mutta myös emulsioita sekä vettä voidaan käyttää. Kuvassa 4 on esitetty hydromekaanisen syvävedon periaate. Siinä muotti on nestekammio, jonka paine muotoilee levyaihion painimen muodon mukaan. Pidätinrenkas tiivistää levyn ja nestekammion välin, jottei neste pääse vuotamaan pois kammioista. (Lamminen et al. 2003; Kivivuori 2003.)

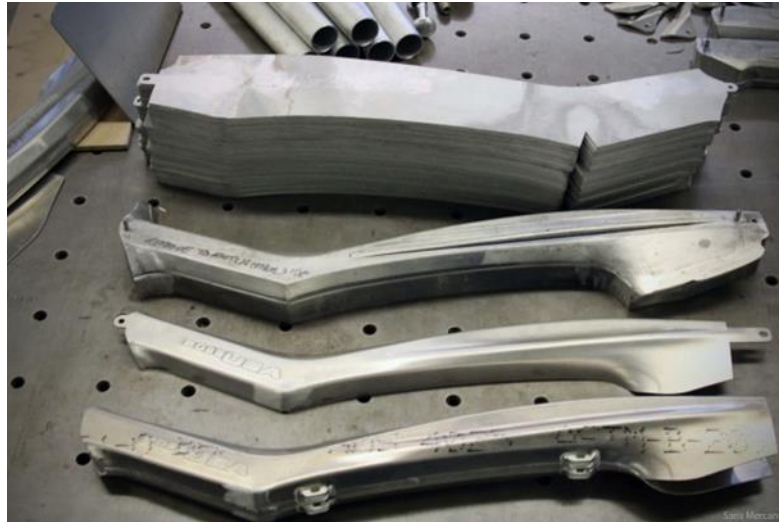


Kuva 4. Hydromekaanisen syvävedon periaate (mukaillen Bakhshi-Jooybari 2012).

Hydromekaanisen syvävedon etuja ovat monimutkaisten muotojen valmistus, soveltuvuus isoille kappaleille, joissa on pienellä säteellä tehtyjä muotoja, sekä pienemmät työkalukustannukset. Hydromekaanisella muovauksella pystytään myös hyvin vaikuttamaan levyn ainevahvuuteen. Muotoja, joita hydromekaanisella syvävedolla on helpompi tehdä verrattuna mekaaniseen syvävetoon ovat kartiomaiset, pallomaiset ja paraboloidiset muodot. Tällaisia kaksoiskaarevia muotoja mekaanisella syvävedolla tehdessä, joudutaan käyttämään useita eri vaiheita ja jopa eri työkaluja. Nesteen paineen avulla nämä voidaan valmistaa yhdellä painimen työnnöllä. Myös mittatarkkuus ja pinnanlaatu ovat hydromekaanisessa muovauksessa paremmat. (Lamminen et al. 2003; Kivivuori 2003.)

2.2.4 Muovaaminen elastista vastinta käyttämällä

Muovaaminen elastisella vastimella muistuttaa hydromekaanista syvävetoa, mutta nesteen sijaan käytetään elastista vastinta, yleensä kumista valmistettua. Kuten nestemuovauksessa tässäkin menetelmässä ei tarvita kuin yksi kiinteä muotti, joten työkalukustannukset ovat alhaiset. Menetelmän vahvuuksia ovat prosessin yksinkertaisuus ja hyvä syntyvä pinnanlaatu. Huonona puolena on venytysmuovaus mahdollisuuden puuttuminen, joten menetelmällä ei voida ohentaa levyn ainevahvuutta. Amerikkalainen Foes racing maastopyöriä valmistava merkki valmistaa runkojen vaakaputkia tällä menetelmällä. Kuvassa 5 esitetään tämän vaakaputken valmistusta. Ylimpänä kuvassa valmiiksi leikattuja levyaihioita. Seuraavana on muotti, johon levy asetetaan muovauksen ajaksi. Toiseksi alimpana on muovattu osa ja alimmaisena kahdesta pelikuvallisesta osasta hitsaamalla valmistettu valmis vaakaputki. (Matilainen et al. 2011, s. 242; Mercanti 2014.)



Kuva 5. Foes Racing vaakaputken valmistuminen (Mercanti 2014).

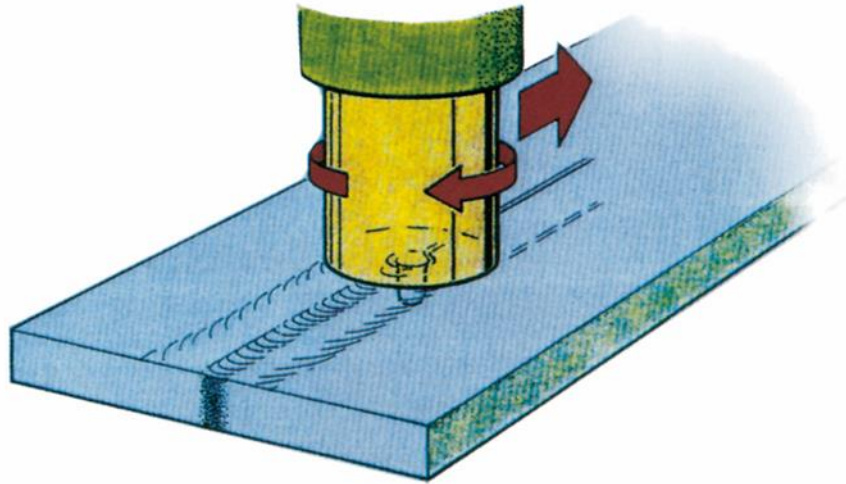
2.2.5 Tailored blanks

Yksi mahdollisuus erilaisten seinämävahvuuksien käytölle on autoteollisuudessa paljon käytetty Tailor Welded Blanks (TWB) menetelmä. Tässä tekniikassa liitetään eri seinämävahvuuden tai eri lujuuksen omaavia ohutlevyjä yhteen, jonka jälkeen levy voidaan muovata haluttuun muotoon. TWB menetelmän ja ohutlevyn muovauksen yhdistelmällä pystytään sijoittamaan paksumpaa levyä sinne missä lujutta tarvitaan ilman venytysmuovauksen käyttöä. (Parente et al. 2015.)

Hitsausliitokset TWB menetelmässä tehdään yleensä laser hitsaamalla tai kitkahitsaamalla pyörivällä työkalulla. Laser hitsausta käytetään yleisesti teräksisten levyjen valmistukseen, mutta harvemmin alumiinisten. Alumiinin korkea heijastavuus sekä herkkyys kuumahalkeiluun tekevät laser hitsauksesta haastavaa. (Parente et al. 2015.)

Kitkahitsaus pyörivän työkalun avulla soveltuu hyvin alumiinilevyjen yhteen liittämiseen. Hitsausprosessi esitetään kuvassa 6. Siinä on hyvin kulutusta kestävä pyörivä työkalu, joka synnyttää kitkalämpöä levyjen railoon sekä siirtää materiaalia työkalun taakse. Tämä aikaansaa materiaalin plastisoitumista ja levyt hitsaantuvat yhteen. Menetelmä on kiinteän tilan liittämistä, eli materiaalien lämpötila ei nouse yli sulamispisteen. Menetelmässä ei myöskään tarvita lisäainetta eikä suojakaasua. Muita etuja ovat helppo railonvalmistus, vähäiset muodonmuutokset, hyvät liitosten ominaisuudet, sama kemiallinen koostumus

perusaineessa ja hitsissä sekä hyvä hitsin laatu. Hitsin pinnat ovat myös molemmilta puolilta perusaineen tasossa, joten sauma on siistin näköinen. (Esab.)



Kuva 6. Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla (Esab).

2.3 FE-analyysi

FE-analyysi eli elementtimenetelmä on numeerinen menetelmä, jonka avulla voidaan tehdä rasiustarkasteluja rakenteisiin. Menetelmää käytetään rakenteissa, jotka ovat liian vaikeita tai työläitä laskea analyttisesti lujuusopin kaavoja hyödyntäen. FE-analyysissä kappaleeseen muodostetaan elementtiverkko, joka muodostuu solmupisteistä. Näissä solmupisteissä lasketaan solmujen siirtymät, joista taas voidaan laskea koko elementin jännitykset. Kun elementtiverkon kaikkien elementtien jännitykset ja siirtymät yhdistetään, saadaan selville koko kappaleen jännitykset ja siirtymät. (Nelson 2006.)

2.3.1 Kappaleen jännitykset

Tässä tutkimuksessa kappaleiden jännitysten tarkasteluun käytetään Von Mises lujuushypoteesia. Lujuushypoteeseilla ennustetaan materiaalin kestävyyttä. Jos elementtimenetelmällä saatu lujuushypoteesin arvo tietyssä kohdassa kappaletta on suurempi kuin materiaalin myötöraja, kappaleen voi olettaa rikkoutuvan. Von Mises lujuushypoteesi on yksi käytetyimmistä hypoteesista kappaleiden rasiusten tarkasteluun. Se perustuu vääristymisenergiatiheyden laskemiseen. (Learn engineering 2011.)

3 TUTKIMUSMETODIT

Tutkimustyön ensimmäisessä tutkimusaiheessa analysoidaan maastopyörän rungon emäputken korkeuden vaikutusta kokonaismassaan, kun ohjaustangon korkeus pidetään vakiona. Pole Bicyclen maastopyörät ovat geometrialtaan poikkeavia muihin pyöriin nähden selkeästi pidemmän rungon mitoituksen takia. Työn toimeksiantajan Leo Kokkosen mukaan pyörän pitkä runkogeometria toimii paremmin keskimääräistä korkeammalla ohjaustangon korkeudella. Tämän takia pyörissä on muihin vastaavanlaisiin pyöriin verrattuna korkeampi 135mm mittainen emäputki. Tämä mahdollistaa ohjaustangon säätämisen tarpeeksi korkealle ilman suurta määrää väli holkkeja ja käyttämällä matala nousuisia ohjaustankoja. (Kokkonen 2017.)

Työn toisessa tutkimusaiheessa tutkitaan ohutlevyistä tehdyn maastopyörän rungon seinämävahvuuksien ohentamisen vaikutusta rungon jännityksiin rasiutilanteissa. Eri kohtiin runkoa syntyy rasituksessa erilaisia jännityksiä, joten kaikkialla ei tarvita yhtä paljon ainevahvuutta kuin kriittisissä kohdissa. Koska rungoista halutaan tehdä mahdollisimman kevyitä, vähemmän rasitetuissa kohdissa voidaan käyttää ohuempaa materiaalipaksuutta ilman kestävyuden tai jäykkyyden menettämistä. Tavoitteena on löytää näitä kohtia.

3.1 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen molemmissa tutkimusaiheissa käytetään samanlaista kvantitatiivista eli määrällistä tutkimusta. Tämä tarkoittaa sitä, että tutkimus pohjautuu laskennallisiin ja tilastollisiin analyysimenetelmiin. Tutkimuksessa mallinnetaan tietokoneavusteisesti oikean maastopyörän runkoa ja sen käyttäytymistä sekä käytetään laskennallisia menetelmiä tulosten selvittämiseen. Tuloksia taas vertaillaan tilastollisilla menetelmillä. Ohjelmat, joilla mallinnusta ja simulointia suoritetaan ovat SolidWorks 3D sekä FEMAP - mallinnusohjelmat.

3.1.1 Käytetyt ohjelmistot

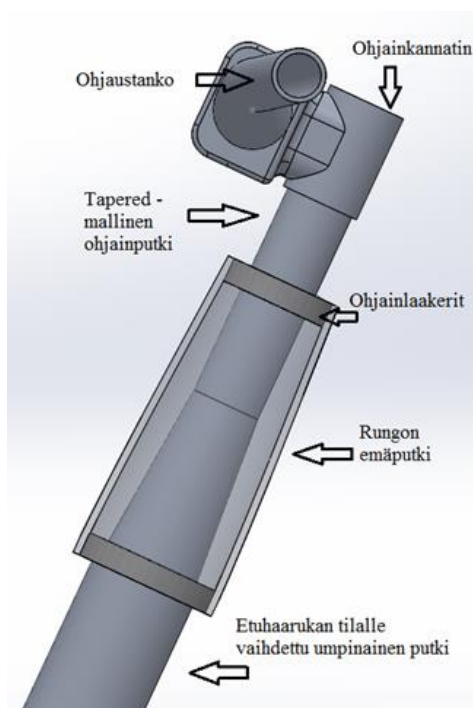
SolidWorks on 3D CAD suunnitteluohjelmisto, jolla voidaan mallintaa erilaisia tilavuus- tai pintamalleja. SolidWorks on ranskalaisen Dassault Systemsin ohjelmisto ja se on yksi

maailman käytetyimmistä 3D CAD -ohjelmistoista. (Shoutmetutorials 2015.) Tutkimuksessa SolidWorksia käytetään mallien luomiseen tai viimeistelyyn.

Femap (Finite Element Modeling And Postprocessing) on 3D CAD ohjelmisto, joka on suunniteltu FE-analyysin (Finite Element) suorittamiseen. Ohjelmistossa on NX Nastran niminen ratkaisija, joka suorittaa analyysin laskemisen. (Siemens 2017.) Tutkimuksessa ohjelmalla tehdään mallien FE-analyysit.

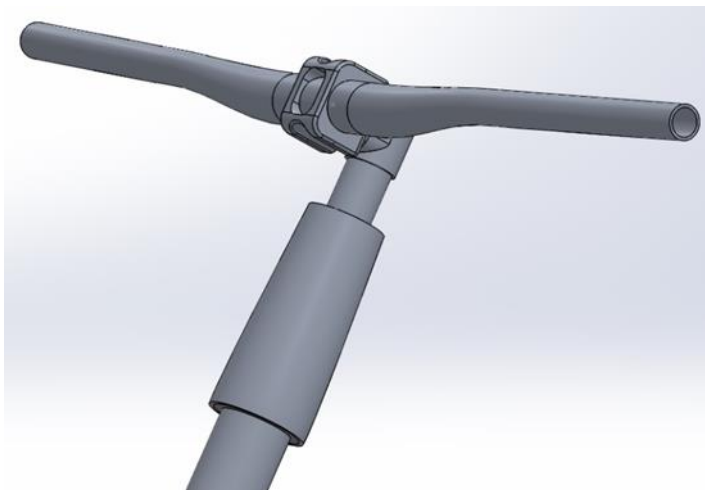
3.2 Ensimmäinen tutkimusaihe

Tutkimuksessa luotiin kaksi 3D-mallinnusta polkupyörän etuosasta. Mallinnetut osat ovat: rungon emäputki, ohjaustanko, ohjainkannatin sekä etuhaarukan ohjainputki. Ohjainputken jatkoksi etuhaarukan tilalle mallinnettiin yksinkertaistamisen takia umpinainen putki, jonka avulla voidaan välittää voimaa rungon emäputkeen. Ohjainlaakerien ja -kupprien tilalle mallinnettiin yksinkertaiset teräksiset pyöreät holkit, koska niiden tarkalla mallinnuksella ei oleteta olevan merkitystä tutkimuksen tuloksiin. Ohjainlaakeri holkit ovat zero stack -tyyppiset, joissa laakerit ja laakerikupit sijoittuvat emäputken sisään, eivätkä tule rungon ulkopuolelle. Ohjainkannattimen ja emäputken välisiä spacereitä ei ole myöskään otettu huomioon, koska niillä ei oleteta olevan isoa merkitystä tuloksiin. Kuvassa 7 on esitetty mallinnetut komponentit.

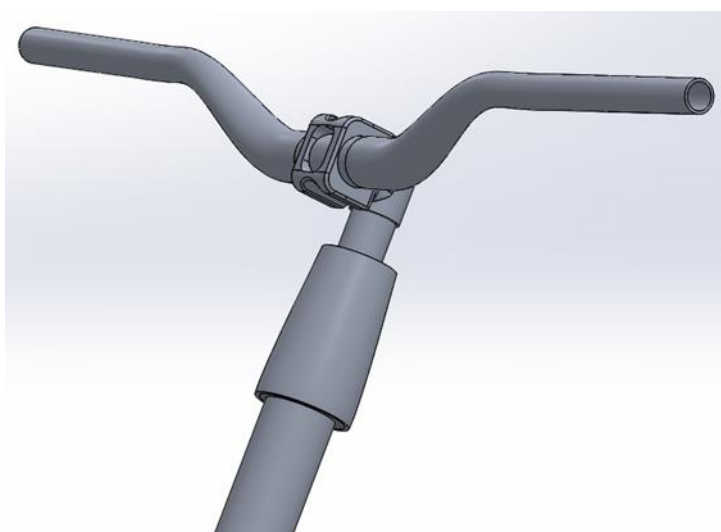


Kuva 7. Polkupyörän etuosan komponentit.

Kuvassa 8 on esitetty ensimmäinen mallinnus, joka kuvaa Polen runkojen nykyistä tilannetta 135 mm pitkällä emäputkella. Kuvassa 9 on taas esitetty vertailumallinnus, johon on valittu 100 mm pituinen emäputki. Emäputkien seinämävahvuudeksi on valittu Polen pyörien mukaisesti kolme millimetriä. Emäputkien päiden koot, eli ohjainlaakerien sovitukset ovat myöskin Polen pyörien mukaiset halkaisijaltaan 56 mm alhaalla ja 44 mm ylhäällä.



Kuva 8. Nykyisen tilanteen mallinnus.

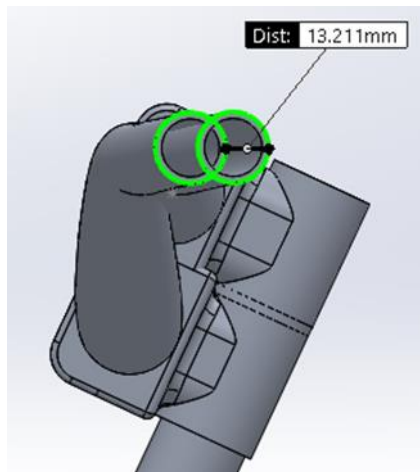


Kuva 9. Vertailtava mallinnus.

Ohjaustangon päiden korkeudeksi suhteessa emäputken alimpaan osaan valittiin 230 mm, joka kuvaa Leon oman pyörän asetusta ohjaustangon korkeutena. Nykyisen tilanteen mallissa on 20 mm nousulla oleva ohjaustanko ja vertailumalliin valittiin 60 mm nousuinen tanko kompensoimaan lyhempää emäputkea. Ohjaustangon seinämävahvuus on kaksi millimetriä koko tangon mitalta. Tangon halkaisijat ovat ohjainkannattimen kiinnityskohdasta 31,8 mm ja tangon päissä 22,2 mm.

Etuhaarukan ohjainputkesta tehtiin ideaalin mittainen kumpaankin malliin, eli ohjainputki on katkaistu samaan kohtaan kuin ohjainkannattimen yläpää. Ohjainputkien mitat ovat ensimmäisessä mallissa 215 mm ja vertailumallissa 173 mm. Ohjainputki on nykyaikainen tapered -mallinen, jossa putken alaosa on paksumpi, 39,8 mm, kun yläosa on 28,6 mm halkaisijaltaan

Koska ohjaustangon nousu nostaa tankoa suoraan ylöspäin ja emäputken kulma maahan nähden on Polen pyörissä 62-66 astetta, korkeampi tanko vie käsien otekohtaa edemmäksi verrattuna matalaan tankoon. Tätä on kompensoitu lyhemmällä ohjainkannattimella. Nykyisen tilanteen mallissa on 40 mm pituinen ohjainkannatin referenssipisteenä käytetyn Leon oman pyörän mukaan. Vertailumallissa ohjainkannatin on 35 mm pituinen, joka ei kuitenkaan riitä kompensoimaan tankojen aiheuttamaa eroa. Kuvassa 10 on mitattu jäljelle jäävä ero vaakatasossa.



Kuva 10. Ohjaustankojen vaakasuora etäisyys.

3.2.1 Massan analysointi

Polen pyörän rungot ovat valmistettu lämpökäsitellystä 7005 alumiini seoksesta. (Evolink 140 29 EN). jonka ominaistiheys on noin 2780 kg/m^3 (Aluminium 7005 2017a). Tätä arvoa on käytetty emäputken tiheytenä. Muut mallissa olevat osat ovat tyypillisesti valmistettu 7075 alumiini seoksesta, joten näiden osien tiheydeksi on valittu 2810 Kg/m^3 (Aluminium 7075 2017b). Ohjelmasta saadut tulokset taulukoidaan yksittäisten osien sekä kokonaismassan erotuksina.

3.2.2 Jännitysten ja siirtymien analysointi

Jännityksien ja siirtymien analysointi on tehty elementtimenetelmällä FEMAP ohjelmalla, joka käyttää ratkaisijana NX Nastrania. Malleihin tehtiin muutamia yksinkertaistuksia paremman verkotuksen aikaan saamiseksi: Ohjainkannattimen pyöristystä vähennettiin sekä emäputken ohjainlaakerien korvaavat holkit on muutettu yhtenäiseksi emäputken kanssa. Yksinkertaistuksen vuoksi koko malleissa käytetään 7075 alumiiniseoksen materiaaliarvoja. Tällöin malleista pystyttiin tekemään yhdet kokonaiset geometriat, mikä helpotti mallien verkotusta. Verkotus tehtiin parabolisilla 3D solidi tetraelemeteillä. Analyysi käytettiin lineaarista analyysia, eli materiaalin jännitys nousee lineaarisesti venymän suhteen. Malleihin tehtiin kaksi erilaista rasiustapausta.

3.2.3 Rasiustapaus 1

Ensimmäisenä rasiustapauksena on tilanne, jossa ohjaustangon toista päätä kuormitetaan 220 N voimalla. Samaa arvoa käytetään FairWheelBikes sivuston ohjaustankojen taipumatestissä. (Mountain bike handlebar review 2015). Kyseisen testin tulosten avulla voidaan myös arvioida tämän tutkimuksen tulosten oikeellisuutta. Reunaehdoksi on laitettu jäykkä kiinnitys siihen kohtaan emäputkeen, mihin eturunkokolmio kiinnittyisi emäputkeen. Tämän jälkeen kiinnitys muutettiin ohjaustangon ja ohjainkannattimen väliseen kohtaan, jotta pelkkien tankojen taipumiserot tulivat selville. Asetelma simuloi tilannetta, jossa pyörän runko pysyy pystyasennossa, mutta ajaja kuormittaa ohjaustankoa toisella kädellään suoraan alaspäin.

3.2.4 Rasiustapaus 2

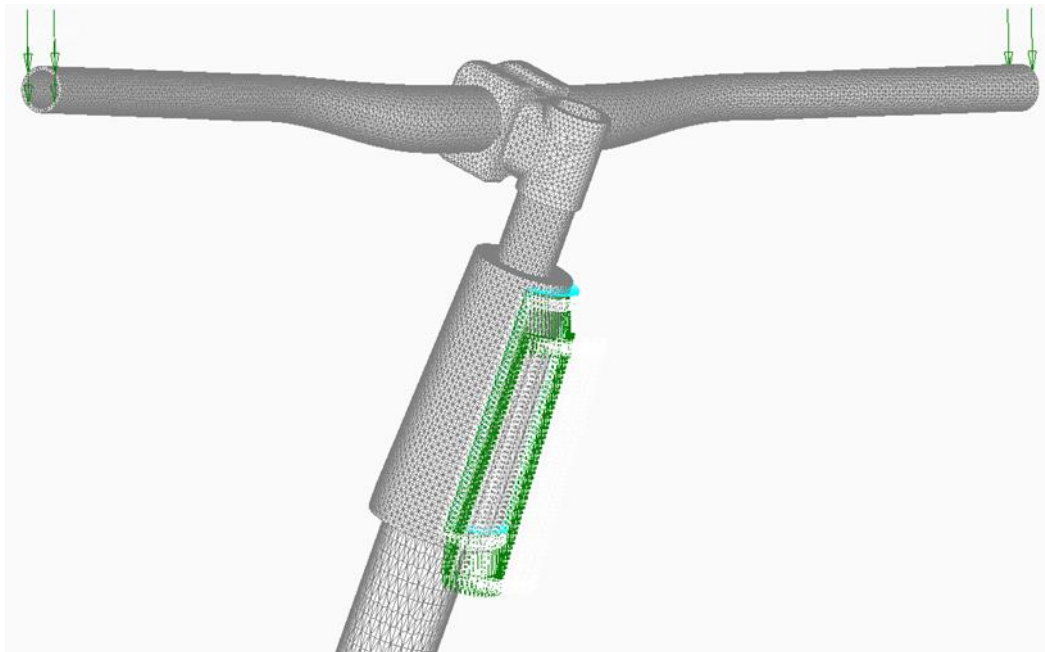
Toisessa rasiustapauksessa simuloidaan tilannetta, jossa pyörällä ajetaan pudotuksesta tasaiselle maalle. Tilanteessa ajajan ja pyörän massaksi on valittu 100 kg ja pudotuksen korkeudeksi 1 metri. Ajajan pyörään kohdistama voima lasketaan impulssiperiaatteen mukaan seuraavilla yhtälöillä:

$$v = \sqrt{2 \times g \times s} \quad (1)$$

$$F = \frac{mv}{t} \quad (2)$$

Yhtälössä 1 lasketaan ajajan putoamisnopeus, kun pyörä osuu maahan. v tarkoittaa ajajan ja pyörän nopeutta, g on maan gravitaatiovakio $9,81 \text{ m/s}^2$ ja s pudottu matka 1 m. Kun nopeus tiedetään, voidaan yhtälön 2 avulla laskea maahan iskusta aiheutuva voima F . Kaavassa m tarkoittaa massaa, joka on 100 kg ja t aikaa, jonka aikana ajajan putoamisnopeus pysähtyy.

Maastopyörän jousituksen on oletettu hidastavan putoamisnopeuden tasaisesti ja ajaksi on arvioitu 0,25 sekuntia. Näillä arvoilla ajajan kohdistamaksi voimaksi on saatu 1772 N. Tämä voima on oletettu jakautuvan puoliksi käsien varaan ja puoliksi jalkojen varaan. Käsille jakautuva voima jaetaan vielä kummallekin kädelle erikseen, joten ohjaustangon molempiin päihin kohdistuu 443 N voima. Jalkoihin kohdistuvan voiman oletetaan siirtyvän rungon etukolmion kautta emäputken kiinnityskohtiin. Voima kohdistetaan suoraan alaspäin. Emäputken ja kuvitellun rungon etukolmion kiinnitys kohdassa on reunaehto, joka sallii liikkeen ainoastaan alas y-suuntaan. Etuhaarukkana toimivan putken alaosan reunaehto sallii liikkeen pitkittäissuunnassa eli x-akselia pitkin. Tämä simuloi eturenkaan akselia maahan osumisen jälkeen. Kuvassa 11 on esitetty tapauksen tilanne.



Kuva 11. Toinen rasiustapaus.

3.3 Toinen tutkimusaihe

Toisessa tutkimuskohdassa, eli ohutlevyistä valmistetun maastopyörän rungon tutkimusaiheessa analysoidaan työn tarjoajan toimittamaa 3D mallia maastopyörän rungon etukolmiosta. Työn tarjoajalla oli rungon mallista ainoastaan yhtenäinen solidi malli, joten työn tarjoaja antoi rungosta kaksiosaisen ulkopuolisen muotin rungosta. Muoteista tehtiin SolidWorksin ohutlevyn muottiin muovaustyökalua hyväksi käyttäen varsinainen malli. Näin tekemällä tietyn paksuisen ohutlevyn pystyi muotoilemaan rungon muotin mukaan. Runko koostuu kahdesta puolikkaasta, vasemman ja oikean puoleisista osista, jotka on yhdistetty keskeltä yhtenäiseksi kuorimaiseksi rungoksi.

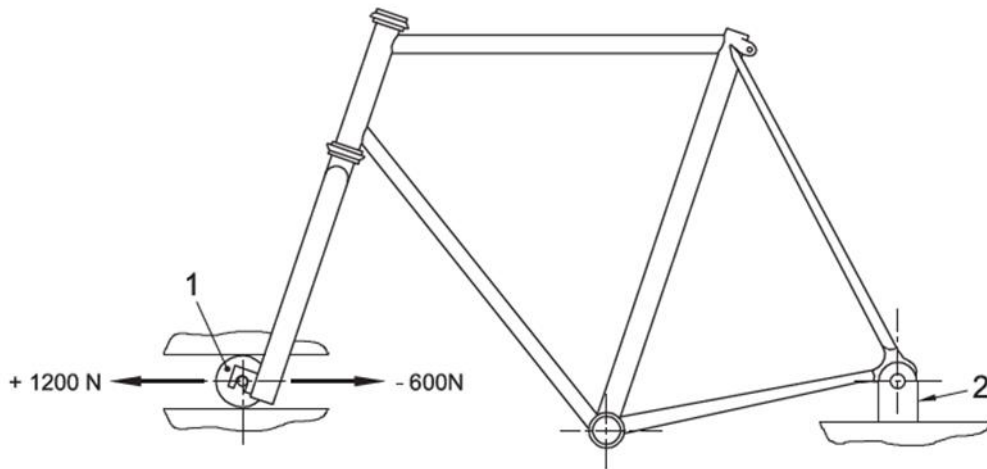
Rungon FE-analyysia varten rungosta tehtiin pintamalli, jossa rungon muodot muodostuvat pinnoista, joilla ei ole paksuutta. Näin mallissa pystyttiin käyttämään elementtimenetelmän laattaelementtejä. Laattaelementit ovat 2D elementtejä, joille annetaan tietty paksuus. Ne sopivat hyvin tähän malliin yhtenäisen pintarakenteen takia ja niillä on helppo vaihtaa haluttua seinämävahvuutta tietyssä kohdassa mallia. Analyysina käytettiin lineaarista staattista analyysia ja elementit olivat kolmiomaisia. Runkoon mallinnettiin myös etuhaarukan tilalle samankaltainen jäykkä putki, kuin ensimmäisessä tutkimusaiheessa. Tämän avulla pystyttiin välittämään rasituksia runkoon.

Ohutlevy aihion paksuudeksi työn tarjoaja oli miettinyt 3 mm, joten se valittiin mallin seinämävahvuudeksi. Näin rasituksen kriittisille paikoille voidaan jättää 3 mm ainevahvuus ja rasituksen suhteen helpommilta paikoilta ohentaa vahvuutta.

3.3.1 Rasitustapaukset

Maastopyörään ajaessa kohdistuvia todellisia rasituksia on hyvin hankala simuloida teoreettisesti. Tässä tutkimuksessa rasitustapauksiksi on valittu yksinkertaisia tilanteita ja rasitusten absoluuttiseen suuruuteen ei kiinnitetä niinkään huomiota, vaan missä ne sijaitsevat.

Rungon rasitustapauksiksi valittiin standardin SFS-EN 14766:2005 mukaisia tapauksia hieman sovellettuna. Standardi käsittelee polkupyörien turvallisuusvaatimuksia. Ensimmäisenä ja toisena tapauksena on kuvan 12 kaltainen tilanne. Ensimmäisessä tapauksessa kohdan 1 rasitus on ainoastaan eteenpäin 1200 N voimalla ja toisessa tapauksessa rasitus on kohdan 1 mukaisesti 600 N ainoastaan taakse päin. Koska mallissa ei ole takahaarukkaa, on kohdan 2 nivelellinen kiinnityspiste laitettu rungon keskiöön. Kolmantena rasitustapauksena on samankaltainen tilanne, mutta nyt 600 N rasitus suuntautuu polkupyörän menosuuntaan katsottuna sivulle, oikealle päin.



Kuva 12. Ensimmäinen ja toinen rasiustapaus (SFS-EN 14766 2005 s. 51).

Neljäntenä rasiustapauksena on tilanne, jossa takajousitus pohjaa ja takahaarukasta johtuva voima välittyy rungon etukolmion iskunvaimentimen kiinnityskohtaan. Voima on laskettu seuraavasti. Tilanteessa ajatellaan ajajan olevan 90 kg painoinen. Mojestoren jousen jäykkyys laskinta käyttämällä on saatu arvio tarvittavasta jousen jäykkyydestä huomioiden ajajan massa sekä pyörän jousituksen vipusuhde. Jousen jäykkyydeksi valittiin 550 naulaa/tuumaa. Jousen jäykkyys kerrottuna iskunvaimentimen liikematkalla, 2,25 tuumaa, saadaan kuormittavaksi voimaksi 5500 N. Tapauksessa tämä voima asetetaan etukolmion kiinnityskohtaan iskunvaimentimen suunnan mukaisesti.

3.3.2 Tulosten analysoiminen

Rungon FE-malli tehtiin ensin kokonaisuudessaan 3 mm levyelementeillä, jonka jälkeen suoritettiin rasiustapaukset. Näistä tuloksista pystyttiin määrittämään kohtia, joissa Von Mises jännitykset olivat pieniä. Tämän jälkeen näihin kohtiin vaihdettiin ohuempia levyelementtejä ja suoritettiin uudestaan rasiustapaukset. Etuhaarukan tilalla oleva putki mallinnettiin 10 mm levyelementeillä, jotta sen taipuminen olisi hyvin vähäistä. Materiaalin arvoiksi valittiin 6061 alumiiniseoksen arvot: Kimmokerroin 69 GPa ja Poissonin luku 0,33.

4 TUTKIMUSTULOKSET

Työn molempien tutkimusaiheiden tulokset esitetään tässä kappaleessa. Malleista on poimittu tutkimuksen kannalta oleellisemmat asiat ja ne esitetään molemmissa aiheissa taulukoiden ja kuvien avulla.

4.1 Ensimmäisen tutkimusaiheen tulokset

Taulukossa 1 on esitetty osien massat sekä niiden erotukset grammoina. Lopuksi erotukset on laskettu yhteen. Harmaalla pohjalla olevat osat muodostavat nykyisen tilanteen kokonaisuuden ja valkealla pohjalla ovat vertailumallin osat.

Taulukko 1. Osien massat ja erotukset.

Osa	Massa (g)	Erotus (g)	Erotus (%)
Ohjaustanko 25mm nousu	316,6		
Ohjaustanko 65mm nousu	328,3	11,7	3,6 %
Ohjainkannatin 40mm	117,1		
Ohjainkannatin 35mm	111,7	-5,4	-4,8%
Etuhaarukka ohjainputki 215mm	109,9		
Etuhaarukka ohjainputki 173mm	90,2	-19,7	18%
Rungon emäputki 135mm	195,2		
Rungon emäputki 100mm	144	-51,2	-26%
	Yhteensä:	-64,6	

Taulukossa 2 on esitetty ensimmäisen rasiustapauksen tulokset. Taulukossa ylimpänä on koko mallin tulokset ja alimpana pelkän ohjaustangon taivutus tulokset. Malli 1 tarkoittaa nykyisen tilanteen mallia ja malli 2 vertailtavaa mallia.

Taulukko 2. Ensimmäisen rasiustapauksen tulokset.

Kokonainen malli	Malli 1	Malli 2	Erotus (%)
Siirtymä tangon päässä alaspäin.	7,4 mm	8,0 mm	8,1%
Kuormittamattoman tangonpään siirtymä ylöspäin	2,4 mm	2,1 mm	-12,5%
Pelkkä ohjaustanko			
Siirtymä tangon päässä alaspäin.	4,8 mm	5,9 mm	23%

Taulukossa 3 on esitetty toisen rasiustapauksen tulokset. Tulokset ovat von Mises vertailujännityksiä eri kohdista malleja.

Taulukko 3. Toisen rasiustapauksen tulokset.

	Malli 1	Malli 2	Erotus (%)
Suurin jännitys emäputken ja kaulaputken välissä alalaakerissa	46,9 MPa	49,0 MPa	4,3%
Suurin jännitys emäputken ja kaulaputken välissä ylälaakerissa	42,5 MPa	56,2 MPa	32%
Suurin jännitys emäputken ja etukolmion kiinnittymiskohdan yläosassa	145 MPa	359 MPa	150%
Suurin jännitys emäputken ja etukolmion kiinnittymiskohdan alaosassa	140 MPa	276 MPa	97%

4.2 Toisen tutkimusaiheen tulokset

Koska työnteettäjän antama 3D malli on salainen, tulokset esitetään kuvissa yleisen maastopyörän rungon etukolmion avulla. Kyseisessä rungossa on samankaltainen paljon käytetty kolmio rakenne vaakaputken, alaputken ja satulaputken välillä. Lisäksi iskunvaimennin kiinnittyy vaakaputkeen, kuten analysoidussa mallissa. Tarkasteltavia alueita ovat alaputki, vaakaputki sekä emäputki. Satulaputki on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle

4.2.1 Ensimmäinen ja toinen rasiustapaus

Tapaukset, joissa etuhaarukan alapäätä kuormitetaan eteen sekä taakse päin aiheuttavat hyvin samankaltaiset jännityskeskittymät runkoon. Runko on kokonaisuudessaan

mallinnettu 3 mm paksuiseksi. Kuvassa 13 esitetään selkeimmät jännityskeskittymien alueet.



Kuva 13. Suurimmat jännityskeskittymät kuormitettaessa etuhaarukan alaosa eteen ja taakse päin (muokattu Weber 2015)

Suurimmat Von Mises jännitysten arvot kuormitettaessa etuhaarukkaa taaksepäin 600 N voimalla ovat esitetty taulukossa 4:

Taulukko 4. Kuvan 13 kohtien jännitykset.

Kohta	1	2	3	4	5	6
Suurin jännitys levyn ulkopinnalla	24 MPa	18 MPa	22 MPa	15 MPa	15 MPa	17 MPa

Suurimmat Von Mises jännitysten arvot kuormitettaessa etuhaarukkaa eteenpäin 1200 N voimalla ovat esitetty taulukossa 5:

Taulukko 5. Kuvan 13 kohtien jännitykset.

Kohta	1	2	3	4	5	6
Suurin jännitys levyn ulkopinnalla	48 MPa	35 MPa	42 MPa	30 MPa	30 MPa	35 MPa

4.2.2 Kolmas rasiustapaus

Kolmannessa rasiustapauksessa etuhaarukan alaosan voima suuntautuu pyörän päältä eteenpäin katsottaessa oikealle päin. Vasemmalle päin suuntautuva voima aiheuttaa täsmälleen samanlaiset rasiukset, joten tätä tapautta voidaan kutsua sivullepäin rasiukseksi. Runko on kokonaisuudessaan mallinnettu 3 mm paksuiseksi. Kuvassa 14 esitetään selkeimmät jännityskeskittymien alueet.



Kuva 14. Suurimmat jännityskeskittymät kuormitettaessa etuhaarukan alaosa sivulle päin. muokattu (Weber 2015).

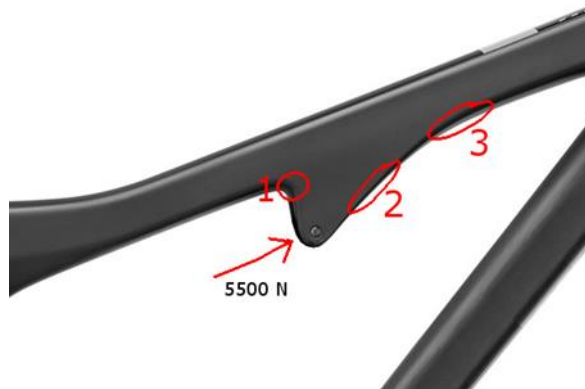
Suurimmat Von Mises jännitysten arvot kuormitettaessa etuhaarukkaa sivullepäin 600 N voimalla ovat esitetty taulukossa 6:

Taulukko 6. Kuvan 14 kohtien jännitykset.

Kohta	1	2	3	4
Suurin jännitys levyn ulkopinnalla	44 MPa	28 MPa	36 MPa	25 MPa

4.2.3 Neljäs rasiustapaus

Neljännessä rasiustapauksessa rungon etukolmion iskunvaimentimen kiinnityspisteeseen kohdistetaan 5500 N voima. Kuvassa 15 on esitetty tapauksen tilanne ja jännityskeskittymät.



Kuva 15. Neljännen rasiustapauksen rasiutukset (muokattu Weber 2015).

Tapauksen Von Mises jännitykset ovat esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Kuvan 15 jännitykset.

Iskunvaimentimen kiinnityskohdan siirtymä eteenpäin	1,9 mm		
Kohta	1	2	3
Suurin jännitys rungossa	160 MPa	130 MPa	100 MPa

4.2.4 Vaaka- ja alaputki

Rasiustapausten perusteella rungon seinämävahvuutta ohennettiin kohdista joihin ei kohdistunut suuria jännityksiä. Kuvassa 16 on esitetty ohennetut kohdat vaaka- ja alaputkessa.



Kuva 16. Ohennetut kohdat vaaka- ja alaputkessa (muokattu Weber 2015).

Taulukossa 8 on esitetty ohennusten vaikutukset rungon siirtymiin ja massaan.

Taulukko 8. Ohennettujen vaaka- ja alaputkien vaikutukset.

	Etuhaarukan alapään siirtymä, kun 1200 N eteen	Etuhaarukan alapään siirtymä, kun 600 N sivulle	Massa	Erotus (%)
Koko malli 3 mm	3,2 mm	14,0 mm	2,93 kg	
Yläputki 1 mm	3,4 mm	15,5 mm	2,74 kg	-6,5%
Alaputki 1,5 mm	3,4 mm	15,7 mm	2,77 kg	-5,5%
Molempien putkien ohennukset	3,6 mm	17,6 mm	2,58 kg	-12%

4.2.5 Emäputki

Rasitustapausten perusteella pystyi toteamaan, että emäputken keskelle etu- ja sivuseinämiin ei kohdistu suuria jännityksiä. Ainoastaan emäputken ylä- ja alapäähän mihin ohjainlaakerien sovitukset tulevat, tarvitaan enemmän ainevahvuutta. Kun kuvassa 17 esitetyn linjan sisäpuolelta seinämävahvuus on ohennettu kolmesta millimetristä yhteen millimetriin, massa väheni 80 grammaa.



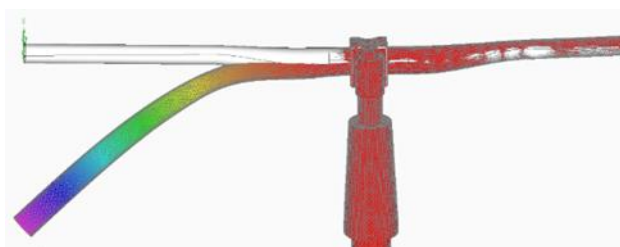
Kuva 17. Emäputken ohennettu kohta (muokattu Weber 2015).

5 TULOSTEN POHDINTA

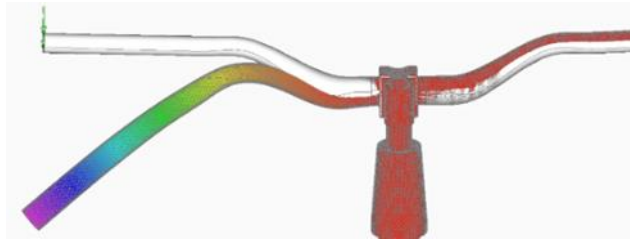
Tässä kappaleessa pohditaan tutkimuksen tuloksia sekä niiden vertailtavuutta ja yhtymistä aikaisempiin tutkimuksiin ja havaintoihin muista pyöristä. Kirjallisuuskatsauksessa selvitettyä tietoa ohutlevyjen muovaustekniikoista pohditaan myös tässä kappaleessa.

5.1 Ensimmäinen tutkimusaihe

Tutkimustyön ensimmäisen osan tuloksista voidaan todeta, että lyhyemmän rungon emäputken ja korkeamman ohjaustangon yhdistelmällä saavutetaan pieni painon säästö. Ero ei ole kuitenkaan kovin selkeä suhteutettuna kokonaisen polkupyörän 14-15kg massaan verrattuna. Tuloksista voidaan myös todeta, että tämän työn korkeampi nousuinen ohjaustanko taipuu enemmän kuin matala tanko. Toisaalta korkeamman tangon mahdollistama lyhyempi ohjainputki taipuu vähemmän ja tasoittaa hieman kokonaistaipumisen eroa. Korkeamman tangon suurempi taipuman tulos on hieman ristiriidassa FairWheelBikesin tuloksiin. (FairWheelBikes 2015). Kyseisessä testissä oli muutama samanlainen tanko, joissa ainoa ero oli tangon nousu. Näitä tuloksia vertailtaessa voi todeta, että nousulla ei ollut vaikutusta taipumaan. Toisaalta kyseisessä testissä korkeimmat tangot olivat vain 30mm nousuisia ja niihin vertailtavissa malleissa 15-20mm nousua. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty ohjaustankojen ylikorostuneet taipumat. Kuvista voi todeta, että korkeammassa tangossa on jyrkemmät mutkat, joilla tangon nousu tehdään. Tanko näyttäisi taipuvan eniten juuri näistä mutkakohdista. Se miten tällainen korkeanousuinen ohjaustanko valmistetaan jäykemmäksi ja kuinka paljon se lisää massaa jää jatkotutkimukseen.



Kuva 18. Nykyisen tilanteen mallin tangon taipuma.



Kuva 19. Vertailtavan mallin tangon taipuma.

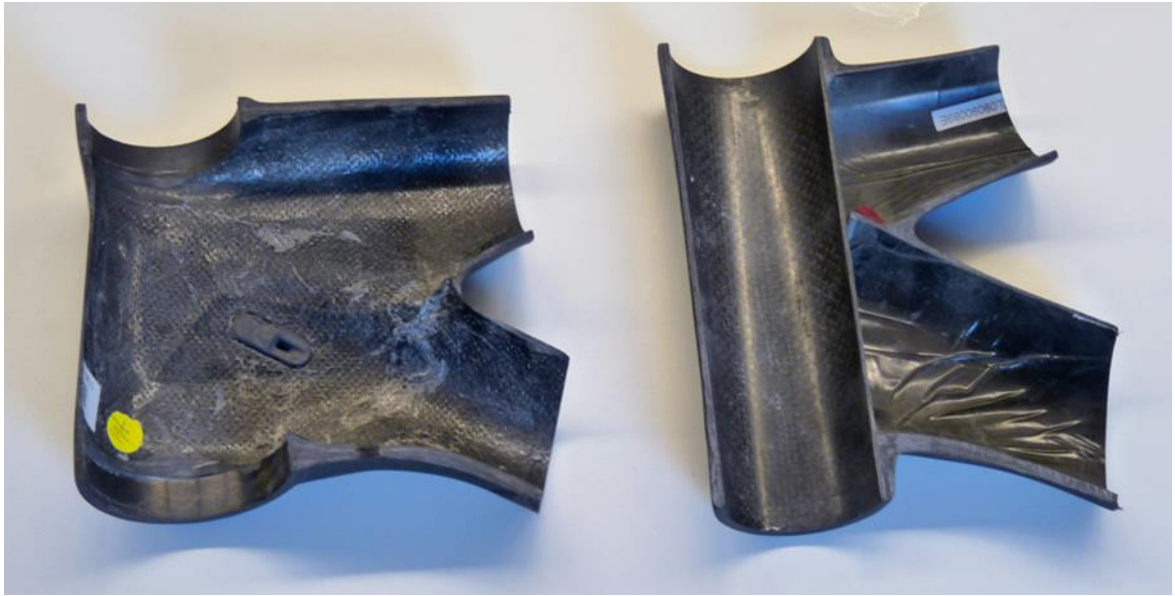
Toisen rasiustapauksen tuloksista voidaan todeta, että kyseisessä rasiustilanteessa lyhemmän emäputken ohjainlaakerien kohtaan kohdistuu odotetusti hieman enemmän rasiusta. Suurempi ero on kuitenkin emäputken kohdissa, joihin rungon etukolmion ajatellaan kiinnittyvän. Tämä emäputken ja etukolmion liitoskohta on kuitenkin mallinnettu hyvin yksinkertaisesti, joten tarkempia tuloksia varten siihen tarvittaisiin todenmukaisempi ja tarkempi mallinnus. Näistä tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että muutaman sentin lyhennys emäputkesta lisää rungon etukolmioon johtuvaa rasiusta selkeästi.

5.2 Toinen tutkimusaihe

Ohutlevyistä valmistetun pyörän rungon tutkimuksessa keskityttiin selvittämään työn tarjoajan antaman mallin avulla rungon rasiuskohtia ja niiden perusteella ohennettavia kohtia. Pohdinta on jaettu rungon osien mukaan emäputken alueeseen, vaaka- ja alaputkeen, keskiön seutuun sekä iskunvaimentimen kiinnityskohtaan.

5.2.1 Emäputken alue

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että emäputken keskelle etu- ja vähän sivuosaankin ei kohdistu suuria jännityksiä. Tämä tuntuu järkevältä tulokselta, koska etuhaarukka tukeutuu ainoastaan emäputken ylä- ja alaosissa oleviin laakeripesiin. Näistä voima johtuu suoraan emäputken taakse kiinnittyvään runkoon. Kuvassa 20 esitetään kahden Scott Bicyclen hiilikuituisten runkojen leikattua emäputkea. Vasemmalla on uudempi paremmin paino-optimoitu rakenne ja oikealla vanhempi ja painavampi putkimaisista osista tehty rakenne.



Kuva 20. Scott Bicyclen kaksi leikattua emäputken aluetta (Benedict 2010).

Kuvasta voi päätellä, että uudempaan malliin emäputken etuseinämää on ohennettu rakenteen keskeltä. Ohjainlaakerien kohdalla materiaalia on kuitenkin paljon, erityisesti emäputken takana, josta runko jatkuu taaksepäin. Rungosta on tehty myös kuorirakenne, eli ylimääräiset putkien seinämät ovat jätetty pois rungon sisältä. Kuvasta voi myös huomata, että uudessa versiossa runko jatkuu ohjainlaakereista samansuuntaisina taaksepäin, eikä näin rakenteeseen tule taivuttavaa momenttia.

Etuhaarukkaa eteen ja taakse päin rasitettaessa jännitykset kohdistuivat samoihin kohtiin molemmissa suunnissa. Nämä kohdat olivat emäputken takana, josta vaaka- ja alaputki erottuvat rakenteesta. Tuloksista voi nähdä, että alaputken alaosaan kohdistuu suurin jännitys. Tämä tulos sopii myös yllä olevaan kuvaan 20, koska siinä molemmissa rakenteissa alaputken alaosa on tehty huomattavan paksulla ainevahvuudella.

Etuhaarukkaa sivulle kuormitettaessa jännitykset kohdistuivat myös alemman ohjainlaakerin ympäristöön sekä alaputken yläpään alapuolelle. Uutena alueena oli vaaka- ja alaputken yhtymiskohta. Kuvassa 20 olleissa Scottin emäputkissa uudemmassa versiossa tämä yhtymä kohta on viety kauemmaksi emäputkesta, joka antaa mahdollisuuden tehdä tähän alueeseen halkaisijaltaan suuremman kuorirakenteen. Tämän pitäisi olla jäykempi ja kestävämpi rakenne.

5.2.2 Vaaka- ja alaputki

Polkupyörissä käytetään yleisesti keskeltä ohennettuja putkia, koska putkimaisten rakenteiden päihin syntyy suurempia jännityksiä, kuin putkien keskelle. Tämä on helppo tapa vähentää rungon painoa (Banishki 2016). Tämän tutkimuksen tulokset vahvistavat nämä oletukset. Putkien ohentaminen keskeltä vaikuttaa hyvin vähän tämän mallin rungon jäykkyyteen ja kestävyYTEEN FE-analyysin perusteella. Tämän takia maastopyörissä ainevahvuuden rajoittavana tekijänä onkin ehkä enemmän putkien kestävyys ulkoisia osumia vastaan, esimerkiksi kaatumistilanteessa. Mikäli ohutlevyn muovausmenetelmä sallii, yhtenä vaihtoehtona on ohentaa alaputken yläpuolta enemmän kuin alapuolta, johon osumia tulee helpommin.

5.2.3 Keskiön seutu

Etuhaarukkaa eteen ja taakse rasiittaessa keskiön seudun rasitukset kohdistuivat alaputken yläpuolelle kohtaan, josta alaputki eroaa keskiön seudusta. Etuhaarukkaa sivulle kuormitettaessa jännitykset olivat selkeästi laajemmalla alueella. Näin ollen keskiön alapuolelle alaputken suuntaan jäi ainoa ohut suikale, josta olisi mahdollista ohentaa ainevahvuutta. Kuitenkin tämäkin kohta on alttiina kiviin kosketuksille. Toinen huomioitava asia on jättää alaputken ohennuksen loppumiskohta tarpeeksi kaukana alaputken keskiön puoleisesta päästä, johon jännitykset kohdistuvat.

5.2.4 Iskunvaimentimen kiinnityskohta

Iskunvaimentimen kiinnitys uloke vaakaputkessa on tulosten perusteella kohta, joka vaatisi nykyisellä mallilla paksumpaa ainevahvuutta, kuin 3 mm. Kiinnityskohdan siirtymä oli melkein 2 mm tutkimuksen rasiitustapauksella. Tämä on kyseisessä osassa paljon ja todellinen rasitus voi nousta suuremmaksi kuin tämän tutkimuksen rasiitustapauksella on laskettu. Parempi parannuskeino voisi olla lyhentää kyseistä uloketta, jolloin osaan kohdistuva momentti olisi pienempi. Vaakaputkeen kiinnittyvässä iskunvaimentimessa on hyvänä asiana se että, iskunvaimentimesta johtuva voima pystytään johtamaan helposti vaakaputken suuntaisesti, jota putkimainen rakenne kestää parhaiten.

5.3 Ohutlevymenetelmän pohdinta

Ohutlevyn muovaus niin, että seinämävahvuuteen pystytään ottamaan kantaa, on vaativa menetelmä. Puristimissa käytettävät muotit ovat kalliita ja niitä tarvitaan eri runkokokojen

takia useita. Myös oikeanlaisten parametrien löytyminen, jottei kappaleissa tapahdu repeytymisiä tai rypistymisiä, voi olla hankalaa. Lohtanderin mukaan tällaisille monimutkaisille muodoille paras menetelmä on ohutlevyn hydromuovaus, koska se soveltuu hyvin vaikeille muodoille ja levyn venytysmuovaus onnistuu. Tässäkin menetelmässä valmistuskustannukset ovat korkeat verrattuna putkista valmistettuun runkoon (Lohtander 2017).

Kirjallisuuskatsauksen perusteella tailor welded blanks -menetelmä voisi olla paras vaihtoehto. Menetelmässä ei tarvitsisi niin monimutkaisia työkaluja hydraulipuristimeen. Esimerkiksi elastiseen vastimeen puristaminen on soveltuva yksinkertainen menetelmä. Jatkotutkimukseen jää kitkahitsatun kappaleen kestävyys ja muovattavuus.

6 YHTEENVETO

Maastopyörän rungon emäputken lyhentämisellä yhdistettynä korkeampaan ohjaustankoon ei saada merkittävää massan säästöä eikä jäykkyyden parantumista, kun tarkastellaan koko polkupyörää. Pelkästään rungon valmistajalle 50 g säästö emäputkessa voi tuntua merkittävältä, mutta kun yhteensä säästetyn 70 g suhteuttaa koko pyörän massaan, se ole kovin merkittävää. 50-60 mm korkuisella nousulla valmistettuja tankoja ei myöskään ole paljon saatavilla, joten valikoima on suppea. Yksi ongelma korkeassa tangossa on myös käsien otekohtien siirtyminen eteenpäin verrattuna matalaan tankoon. Jotta otekohdat pysyisivät samassa kohdassa, tangon nousun pitäisi suuntautua emäputken suuntaisesti takaviistoon ja tangon päiden taivutukset suunniteltu tämän mukaan.

Rungon valmistaminen ohutlevyistä kuorirakenteeksi mahdollistaa tekemään rungosta kilpailukykyisen verrattuna perinteisiin putkista valmistettuun runkoon. Ohutlevyn muovaaminen siten, että seinämävahvuuksia ohennetaan tietyistä kohdista, on kuitenkin kallis menetelmä. Jotta paino-optimointia pystyisi tekemään hyvin, seinämävahvuuksien määrittäminen on hyvin tärkeää. Yksi vahva vaihtoehto on autoteollisuudessa käytetty Tailor Welded Blanks -menetelmä, jossa levyaiho muodostetaan hitsaamalla eri paksuisia levyjä päistään yhteen. Tämän jälkeen levy voidaan muovata rungon osiksi yksinkertaisemmalla puristimella. Tämä menetelmä mahdollistaisi rungon ainevahvuuden määrittämisen eri kohtiin ainakin kohtuullisen suurissa ja selkeissä alueissa.

LÄHTEET

Aluminium 7005. 2017a. MatWeb material property data. [www-dokumentti]. [Viitattu 6.3.2017]. Saatavissa: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=34c308934f7a4be589a80ecbee94406e>

Aluminium 7075. 2017b. MatWeb material property data. [www-dokumentti]. [Viitattu 6.3.2017]. Saatavissa: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=4f19a42be94546b686bbf43f79c51b7d>

Bakhshi-Jooybari, M., Gorji, A. & Elyasi, M. 2012. [Chapter 3] Developments in Sheet Hydroforming for Complex Industrial Parts. Teoksessa: Kazeminezhad, M. Metal Forming - Process, Tools, Design. InTech.

Banishki, N. 2016. Theoretical framebuilding part 2: I like big butts, tubes and ride feel. [www-artikkeli]. [Viitattu 28.4.2017]. Saatavissa: <http://www.thetallcyclist.com/2016/09/theoretical-framebuiling-part-2-tube-size-and-butting/>

Benedict, T. 2010. First Look! 2011 Scott 899 Gram Hardtail Mountain Bike, The New Scale. [www-artikkeli]. [Viitattu 28.4.2017]. Saatavissa: <https://www.bikerumor.com/2010/06/25/first-look-2011-scott-899-gram-hardtail-mountain-bike-the-new-scale/>

Burke, E. R. The Effect of Weight on Speed. [verkkoartikkeli]. [Viitattu 21.2.2017]. Saatavissa: <http://www.active.com/cycling/articles/the-effect-of-weight-on-speed>

Esab. Esabin osaamiskeskus. Kitkahitsaus. [www-artikkeli]. [Viitattu 12.4.2017]. Saatavissa: <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/kitkahitsaus.cfm>

Evolink 140 29 EN. 2017. Pole Bicycle Company Oy. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 6.3.2017]. Saatavissa: <https://www.polebicycles.com/bicycles/enduro/evolink-140-en-29/>

FairWheelBikes. 2015. Mountain bike handlebar review. [www-dokumentti]. [Viitattu 9.3.2017]. Saatavissa: <http://blog.fairwheelbikes.com/reviews-and-testing/mountain-bike-handlebar-review/>

Glaskin, M. 2013. Cycling Science: How Rider and Machine Work Together. Frances Lincoln. 192 s.

Kivivuori, S. 2003. Hydromekaaninen syväveto. Ohutlevy, 2/2003. S. 54 Saatavissa: <https://www.yumpu.com/fi/document/view/4680011/hydromekaaninen-syvaveto>

Kokkonen, L. 2017. Suunnittelija ja yrityksen perustaja. Jyväskylä, Pole Bicycle Company Oy. Kandidaatintyön aloituspalaveri 31.1.2017.

Lamminen, L., Wadman, B., Kuttner, R. & Svinning, T. 2003. Prototyping and low volume production of sheet metal components. Tutkimusraportti, Nordic Industrial Fundin www-sivut. [Viitattu 6.4.2017]. Saatavissa: http://nordicinnovation.org/Global/_Publications/Reports/2004/Prototyping%20and%20low%20volume%20production%20of%20sheet%20metal%20components.pdf

Learn engineering. 2011. What is Von Mises Stress. [www-artikkeli]. [Viitattu 12.4.2017]. Saatavissa: <http://www.learnengineering.org/2012/12/what-is-von-mises-stress.html>

Lohtander, M. 2017. Tekniikan tohtori, LUT. Lappeenranta. Haastattelu 11.4.2017.

Matilainen, J., Parviainen, M., Havas, T., Hiitelä, E. & Hultin, S. 2011. Ohutlevytuotteiden suunnittelijan käsikirja. Teknologiateollisuus ry. 387 s.

McGann PUBLISHING LLC. Bicycle Weight, the Benefits Quantified. [verkkoartikkeli]. [Viitattu 21.2.2017]. Saatavissa: <http://www.bikeraceinfo.com/tech/weight.html>

Mercanti, S. 2014. Factory Tour: Foes Racing, Part 1 – How They’re made. [www-artikkeli]. [Viitattu 6.4.2017]. Saatavissa: <https://www.bikerumor.com/2014/05/08/factory-tour-foes-racing-part-1-how-theyre-made/>

Nelson, J. 2006. The ABCs of FEA. [www-artikkeli.] [Viitattu 10.4.2017]. Saatavissa: <http://www.compositesworld.com/articles/the-abcs-of-fea>

Parente, M., Safdarian, R., Santos, A.D., Loureiro, A., Vilaca, P. & Natal Jorge, R. M. 2015. A study on the formability of aluminum tailor welded blanks produced by friction stir welding. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. April 2016. Volume 83. Issue 9. s. 2129-2141.

Roymech. 2013. Deep drawing. [www-dokumentti]. [Viitattu 2.4.2017]. Saatavissa: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Manufacturing/Deep_Drawing.html

Senthil, R. & Gnanavelbabu, A. 2014. Numerical Analysis on Formability of AZ61A Magnesium Alloy by Incremental Forming. [www-artikkeli]. [Viitattu 3.4.2017]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/figure/270453726_fig3_Fig-3-Single-Point-Incremental-Forming-SPIF

SFS-EN 14766. 2005. Maastopolkupyörät. Turvallisuusvaatimukset ja testimenetelmät. Helsinki: suomen Standardisoimisliitto SFS. 89 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

Shoutmetutorials. 2015. Solidworks Basics. [www-artikkeli]. [Viitattu 6.4.2017] Saatavissa: <http://shoutmetutorials.com/solidworks-basics/>

Siemens. 2017. Femap Overview. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 6.4.2017] Saatavissa: https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/femap/features/index.shtml

Weber, J. 2015. First ride: 2016 santa cruz bronson. [www-artikkeli]. [Viitattu 18.4.2017]. Saatavissa: <http://www.bikemag.com/gear/mountain-bikes/all-mountain-bikes-gear/2016-santa-cruz-bronson/#dGdzs8dTTqlrvP8F.97>