

HARVESTERIKOURAN MITTAPYÖRÄN RUNGON MUU- TOSTYÖ

HITSATUSTA TERÄSRAKENTEESTA VALUOSAKSI

Ylönen Janne

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Konetekniikka
Insinööri (AMK)

2018

Tekniikka ja liikenne
Konetekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Janne Ylönen	Vuosi	2018
Ohjaajat	TkL Lauri Kantola ja Ins. (AMK) Petri Kesälahti		
Toimeksiantaja	Kesla Oyj Ins. (AMK) Paavo Alhainen		
Työn nimi	Harvesterikouran mittapyörän rungon muutostyö		
Sivu- ja liitesivumäärä	62 + 0		

Tämä opinnäytetyö tehtiin Kesla Oyj:n tuotekehitysosastolle. Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää aiemmin hitsattuna kokoonpanona valmistettu Kesla 25RH-harvesterikouran mittapyörän runko valmistettavaksi yhtenäisenä valuosana, optimoida sen rakenne mahdollisimman kevyeksi ja lujaksi sekä tutustua harvesterikourien tekniikkaan ja erityisesti valutekniikkaan.

Teoria-aineistona käytettiin muun muassa alan kirjallisuutta, opinnäytetöitä, internetlähteitä sekä materiaalistandardeja. Tärkeimmät teoria-aineistot olivat Valuatlaksen verkkosivuilla julkaistut valutekniikasta kertovat oppaat ja oppimateriaalit sekä lujuusopista ja käytetyn valumateriaalin teknisistä ominaisuuksista kertovat lähteet. Valutekniikan teoriaosuutta rajattiin siten, että siinä kerrotaan tarkemmin valusuunnittelun kannalta oleellisia asioita ja muista asioista pintapuolisemmin.

Suurin haaste työssä oli löytää riittävästi austemperoidun pallografiittivaluraudan väsymislujuuteen liittyvää tietoa. Sen takia lujuuslaskuihin sovellettiin rakenneterästen teoriaa väsymislujuudesta, sillä tiedettiin, että austemperoidun pallografiittivaluraudan tekniset ominaisuudet ovat hyvin samantapaiset tai jopa paremmat.

Tämän raportin lisäksi opinnäytetyön tulokseksi saatiin valurungon 3D-malli, valmistus- ja koneistuspiirustukset sekä useita FEM-analyyskejä. Lujuuslaskujen ja FEM-analyysien numeeriset arvot sekä valmistus- ja koneistuspiirustukset ovat luottamuksellisia, eikä niitä sen takia ole julkaistu opinnäytetyössä tai sen liitteissä.

Mittapyörän rungon 3D-mallin ja FEM-analyysien perusteella todettiin, että valuosana valmistettu runko on ainakin 29 % alkuperäistä kevyempi ja materiaalin teknisten ominaisuuksien ansiosta vähintäänkin yhtä luja

Avainsanat

tuotekehitys, valurauta, optimointi ja mallintaminen

Technology, Communication and Transport
Mechanical and Production Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Janne Ylönen	Year	2018
Supervisor	Lauri Kantola Lic.Sc. (Tec) & Petri Kesälahti B.Eng.		
Commissioned by	Kesla Oyj Paavo Alhainen, B.Eng.		
Subject of thesis	Modification work of measurement wheel body of the harvester heads		
Number of pages	62 + 0		

This thesis was made for product development department of the Kesla corporation. The aim of the thesis was to develop the previously as a welded assembly produced frame of measurement wheel of Kesla 25RH harvester head to be manufactured as a uniform cast, to optimize its structure as light and robust as possible and to familiarize with the technology of harvester heads and casting technology.

The theoretical material consists of inter alia literature, theses, internet resources and material standards. The most important theoretical materials were the published guide books and teaching materials published on the Valuatlas website, and the sources of used casting material and strength of material. The theoretical part of the casting technique was limited so that it deals more closely with facts relevant to casting design and other points are dealt with more superficially.

The major problems encountered in the work were to find adequate information of the fatigue strength of austempered ductile cast iron. Therefore, in the strength calculation the fatigue strength theory of structural steels was applied, because it is known that the technical characteristics of austempered ductile iron are very similar or even better.

In addition to this report, the results of the thesis were the 3D model, the manufacturing and machining drawings of the frame and several FEM analyses. The numerical values of the strength calculations and FEM analyses as well as the manufacturing and machining drawings are confidential and are therefore not published in the thesis or in the appendices.

Based on the 3D model of the frame of the measuring wheel, it was found that the cast frame is at least 29% lighter and because of the technical characteristics of the material at least as strong.

Key words product development, cast iron, optimization and modelling

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	KESLA OYJ	8
3	HARVESTERIKOURA.....	9
3.1	Kesla -harvesterikourat.....	10
3.2	Tekniikka	12
3.3	Mittapyörä.....	14
4	VALUTEKNIikka	17
4.1	Valimon tuotantoprosessi	17
4.1.1	Sulatus ja valu	17
4.1.2	Jälkikäsitteilyt	20
4.2	Hiekkamuotin valmistus	22
4.2.1	Käsin kaavaus	22
4.2.2	Konekaavaus.....	25
4.2.3	Keerna ja valumalli	28
4.2.4	Täysmuottikaavaus.....	30
5	MITTAPYÖRÄN RUNGON SUUNNITTELU.....	31
5.1	Suunnittelutyön lähtötiedot.....	31
5.1.1	Käytetty materiaali	31
5.1.2	Vaatimuslista	34
5.1.3	Runkoon kohdistuvat rasitukset	35
5.2	Suunnittelussa huomioitavia seikkoja	37
5.2.1	Päästöt	37
5.2.2	Suunnattu jähmettyminen	37
5.2.3	Kulmapyöritykset	39
5.3	Lujuuslaskut	39
5.4	Mallinnustyö	44
5.4.1	Ensimmäinen malli	46
5.4.2	Toinen versio.....	49
5.4.3	Kolmas versio.....	52
6	LUJUUSTARKASTELU.....	54
7	VERTAILU HITSATTUUN KOKOONPANOON	57
8	POHDINTA	59
	LÄHTEET	60

ALKUSANAT

Sain tämän erittäin mielenkiintoisen opinnäytetyön aiheen Kesla Oyj:n tuotekehitysosastolta ollessani siellä kesätöissä harjoittelijana. Tämän opinnäytetyön tekeminen opetti minulle paljon tuotesuunnittelusta ja sen haasteista, sekä erityisesti valutekniikasta.

Haluan kiittää tämän opinnäytetyön aiheesta Kesla Oyj:tä ja erityisesti tuotesuunnittelija Paavo Alhaista. Lisäksi tahdon kiittää opinnäytetyöni ohjaajia Lauri Kantolaa sekä Petri Kesälahtea.

Liperissä 15.3.2018

Janne Juhani Ylönen

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

3D	Kolmiulotteinen grafiikka
ADI	Austempered Ductile Iron (SFS-EN 1564. 2014)
D1	Reiän halkaisija (Valtanen 2008, 423)
D2	Akselin halkaisija (Valtanen 2008, 423)
E1	Rungon materiaalin kimmokerroin (Valtanen 2008, 423)
E2	Akselin materiaalin kimmokerroin (Valtanen 2008, 423)
EPS	Expanded polystyrene (Meskanen ym 2018)
F_s	Hydrauliikkasynterin voima
F_{sMax}	Suurin hydrauliikkasynterin aiheuttama voima
kt	Kerroin
L	Kosketusalan pituus (Valtanen 2008, 423)
P_0	Puristusjännitys akselin ja reiän välillä (Valtanen 2008, 423)
PLA	Polylaktidi (Kvist 2017,8)
Re	$R_{p0,2}$ myötöraja
RH	Roller harvester (Alhainen 2018)
RHS	Roller harvester speed (Alhainen 2018)
Rm	Murtolujuus (Salmi & Pajunen 2010,36)
SH	Stroke harvester (Alhainen 2018)
T	Leikkausjännitys väännössä (Salmi & Pajunen 2010,57)
ν_1	Rungon materiaalin Poissonin luku (Valtanen 2008, 423)
ν_2	Akselin Poissonin luku (Valtanen 2008, 423)
σ	Jännitys materiaalissa (Valtanen 2008, 457)
σ_m	Keskijännitys (Salmi & Pajunen 2010,358)
σ_{Max}	Suurin esiintyvä jännitys
σ_{sall}	Laskennallisesti suurin sallittu jännitys
σ_T	Tykytyslujuus (Salmi & Pajunen 2010,358)
σ_w	Vaihtolujuus (Salmi & Pajunen 2010,358)
$\sigma_{w,red}$	Redusoitu vaihtolujuus (Salmi & Pajunen 2010,367)

1 JOHDANTO

Hakkuukoneiden suunnittelu on vaativaa työtä, sillä niille asetetut vaatimukset ovat usein ristiriitaisia. Hakkuukoneen pitäisi olla puunkorjuun näkökulmasta katsottuna mahdollisimman tehokas, kevyt, kapea, ulottuva, kestävä sekä edullinen hankinta- ja ylläpitokustannuksiltaan. Harvesterikoura on tärkeä osa hakkuukonetta ja sen paino on yksi hakkuukoneen ulottuvuutta rajoittava tekijä. Aivan kuten kaikissa koneissa, myös harvesterikourissa kokonaispaino on sen kaikkien osien summa, siksi jokaisen yksittäisen osan suunnittelulla on suuri merkitys.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on kehittää Kesla 25RH -harvesterikouran mitatapyörän runko valmistettavaksi yksittäisenä valuosana sekä optimoida sen rakenne mahdollisimman kevyeksi ja lujaksi.

Keveyttä ja lujuutta tavoitellaan entistä lujemmalla materiaalilla ja muotoilemalla runko siten, että materiaalia on juuri siellä missä sitä tarvitaan. Rungon muuttamisella valuosaksi pyritään myös tehostamaan sen valmistusprosessia, minkä tarkoituksena on pienentää valmistuskustannuksia.

Rakenteen optimoinnin tavoitteille ei ole määritetty tarkkoja raja-arvoja, vaan niihin pyritään mahdollisuuksien puitteissa kokonaisuus huomioiden. Työn lopputuloksen on tarkoitus olla esisuunnitelma tarjouskyselyjä varten ja siinä otetaan kantaa siihen, onko rungon valmistaminen valuosana järkevää valmistustekniikan näkökulmasta tarkasteltuna.

Tämä työ on osa Kesla-harvesterikourien jatkuvaa tuotekehitystyötä, jonka tavoitteena on vastata harvesterikourille asetettujen teknisten vaatimusten kasvuun. Aiheen valintaan vaikuttivat sen tarpeellisuus, mielenkiintoisuus, haasteellisuus ja mahdollisuus oppia uutta, erityisesti valutuotteiden suunnittelusta.

2 KESLA OYJ

Kesla Oyj on suomalainen metsäteknologian moniosaaja, joka valmistaa työkoineita puun korjuuseen, jalostukseen ja käsittelyyn. Sen huomattavan laaja tuotevalikoima sisältää hakkurit, metsäkonenosturit, harvesterikourat, traktorien metsävarusteet, kahmarit sekä auto- ja teollisuusnosturit. (Kesla Oyj 2017.)

Kesla Oyj:n vaiherikas historia alkoi vuonna 1960, kun pienviljelijä Antti Kärkkäinen päätti perustaa yrityksen nimeltä Rantasalmen raivausväline. Aluksi yritys valmisti pellonraivausvälineitä traktoreihin, mutta ajan myötä valikoimiin tulivat myös monet muut traktorin työvälineet, kuten talikot, reet ja äkeet. (Kesla Oyj 2017.)

Toimipaikan vaihduttua Kesälahdeksi vaihtui yrityksen nimikin luontevasti Kesla Oyj:ksi. Tuotevalikoima laajeni, ja tilauskannat kasvoivat tiiviin yhteistyön alettua Hankkija Oy:n kanssa. Kuitenkin vuonna 1979 Kesla päätti muuttaa strategiansa ja keskittyä pelkästään metsäkoneiden suunnitteluun ja valmistukseen. (Kesla Oyj 2017.)

Tänä päivänä Kesla Oyj:n tuotteet tunnetaan ympäri maailman, sillä sen tuotannosta peräti 70% menee vientiin yli 35:een eri maahan. Vuonna 2016 Keslan liikevaihto oli 42 miljoonaa euroa ja se työllisti 261 henkilöä. (Kesla Oyj 2017.)

Keslan päätoimipaikka on Joensuussa ja muut toimipaikat sijaitsevat Kesälahdella, Tohmajärvellä, Ilomantsissa sekä Saksan Sinzheimissa. (Kesla Oyj 2017.)

3 HARVESTERIKOURA

Harvesterikoura on puutavaralajimenetelmään perustuvassa koneellisessa puunkorjuussa käytettävän hakkuukoneen eli harvesterin työlaite. Sen avulla harvesteri kaataa, karsii sekä katkoo puita määrämittäisiin (Ovaskainen 2012), kuten kuvassa 1 esitetty Sampo-Rosenlewin valmistama harvesteri, joka on varusteltu Kesla- liikeratanosturilla ja harvesterikouralla.

Harvesterikourasta yleisesti käytettäviä muita nimityksiä ovat harvesteripää (Ponsse Oyj 2017), hakkuupää (ProSilva Oyj 2017), hakkuulaite ja koura (Ovaskainen 2012).



Kuva 1. Sampo Rosenlew HR-46 pyöräharvesteri (Sampo-Rosenlew 2018)

Harvesterikouria on erikokoisia erilaisiin käyttötarkoituksiin ja erikokoisille alustakoneille. Pienempiä harvesterikouria käytetään metsien harvennushakkuisiin sekä energiapuun korjuuseen ja suurempia puolestaan etupäässä päätehakkuisiin. Keskikokoisia harvesterikouria käytetään yleiskourina, ja niillä onnistuu harvennusten teko sekä pienempi läpimittaiset päätehakkuut.

Harvesterikourien päätyypit ovat syke- ja rullasyöttöiset harvesterikourat, joista rullasyöttöiset ovat yleisimmin käytettyjä johtuen niiden suuremmasta karsintanopeudesta normaalioloissa. Sykesyöttöiset kourat ovat omimmillaan silloin, kun vaaditaan suurta karsintavoimaa tai ehjää puun pintaa. Sykeharvesteri tuottaa suuren karsintavoiman jo pienelläkin öljyntuotolla, mikä tekee siitä soveltuvan myös alustakoneisiin, joissa ei ole suurta hydraulitehoa. (Kesla Oyj 2017.)

Harvesterikouraa käyttävänä alustakoneena käytetään Pohjoismaissa yleisimmin pyörialustaista hakkuukonetta, joka on suunniteltu erityisesti metsänhakuuta varten. Harvesterikourien alustakoneina käytetään myös tela-alustaisia kaivinkoneita, kuten kuvassa 2, sekä metsävarusteltuja maataloustraktoreita niiden kausiluontoisen käyttökauden jatkamiseksi (Pitenius 2017).

3.1 Kesla -harvesterikourat

Kesla harvesterikourasarja kattaa markkinoiden laajimman harvesterikourien mallivalikoiman, johon kuuluvat syke- ja rullasyöttöiset harvesterikourat. Lisäksi Kesla valmistaa varustepaketteja kaivinkonemotoihin sekä erikoisvarusteltuja kuorivia harvesterikouria eukalyptuspuun korjuuseen. (Kesla Oyj 2017.)

Rullasyöttöisiä harvesterikouria on yhteensä seitsemää eri perusmallia, joita ovat:

- 16 RH/RHS
- 18RH-II/RH
- 20RH/RHS
- 25RH/RHS
- 28RH-II
- 30RH-II
- 27RH-II. (Kesla Oyj 2017.)

Perusmalleista saadaan muunneltua laajan varustevalikoiman ansiosta erilaisia variaatioita eri käyttökohteisiin ilman kompromisseja. Esimerkiksi 16RH/RHS harvesterikoura voidaan varustaa sekä saha- että saksikatkaisulla ja joukkokäsittelytoiminnolla, mikä tekee siitä niin kutsutun yhdistelmäkouran, joka soveltuu yhdistettyyn aines- ja energiapuunkorjuuseen. (Kesla Oyj 2017.)



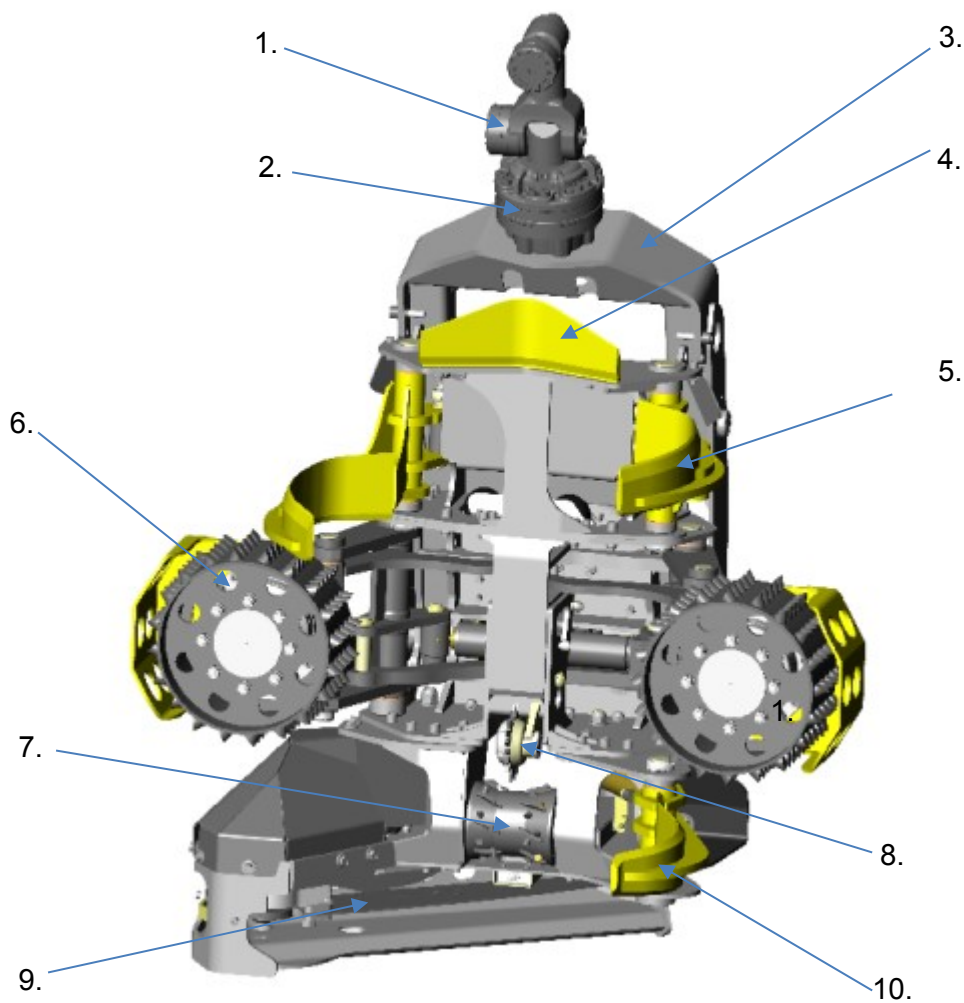
Kuva 2. Kesla 25SH -harvesterikoura (Silvapoli 2018)

Sykesyöttöiset harvesterikouramallit ovat 20SH-II ja 25SH-II, jotka pohjautuvat vastaavankokoisiin rullasyöttöisiin malleihin ja sisältävät siksi paljon samoja ominaisuuksia ja varusteita, kuten vakiona olevan KESLA proLOG mittalaitteen (Kesla Oyj 2017). Kuvassa 2 näkyvän sykesyöttöisen harvesterikouran tunnistaa helposti siitä, ettei siinä ole syöttörullia.

3.2 Tekniikka

Kesla -harvesterikourat koostuvat levyrakenteisesta päärungosta, johon kiinnittyvät muut komponentit. Harvesterikourat sisältävät runsaasti tekniikkaa, kuten hydraulikkalohkoja, hydraulisylintereitä ja antureita.

Alla olevassa kuvassa 3 näkyvät esimerkkinä olevan Kesla 27RH-II harvesterikouran tärkeimmät osat:



Kuva 3. Kesla 27RH-II harvesterikoura (Kesla Oyj 2018)

Kuvassa 3 näkyvän harvesterikouran pääosat ovat:

1. Riipuke
2. Pyörittäjä
3. Riipukesanka
4. Etuterä
5. karsintaterä
6. Syöttörulla
7. Takarulla
8. Mittapyörä
9. Sahalaitteen terälaippa
10. Takaterä

Riipuke yhdistää harvesterikouran hakkuukoneen nosturiin ja mahdollistaa ristikonivelensä avulla kouran vapaan myötäilyn puuta käsiteltäessä. Tällöin esimerkiksi puuta kaadettaessa sen aiheuttama vääntö ei rasita nosturia, vaan puu saa kaatua vapaasti ilman että kouran tarvitsisi menettää otetta puun rungosta.

Riipukkeen alla on kääntäjä, joka mahdollistaa kouran pyörimisen ja samalla yhdistää riipukkeeseen riipukesankaan. Riipukesanka on kiinnitetty nivelillä kouran runkoon siten, että koura pysyy tasapainossa pitäen asentonsa riipukkeesta huolimatta. Koura vaihtaa asentoaan kaato- ja karsinta-asentojen välillä riipukesangan hydraulikkasynterien avulla.

Syöttörullat kannattelevat karsittavaa runkoa sekä liikuttavat sitä kouran otteessa, jolloin puun oksat leikkautuvat irti osuessaan karsintateriin. Karsintaterien tyvessä olevat anturit tunnistavat niiden asennon ja asentotiedon perusteella mittalaite tunnistaa käsiteltävän puun paksuuden. Puun liikuessa mittapyörä kulkee runkoa pitkin mitaten puun pituutta ja antaa pituustiedon mittalaitteelle. Määrämitan täytyttyä sahalaite katkaisee puun haluttuun mittaan.

Takaterät karsivat niihin osuvat oksat, mutta niiden päätehtävä on ottaa puusta hyvä ote etuterien kanssa ja löysätä otetta vain hieman puun karsinnan aikana. Kouran rungon alaosassa on lisäksi niin kutsuttu takarulla, joka vähentää kitkaa puun ja kouran rungon välillä karsinnan aikana.

Harvesterikouran aivoiksikin kutsutut ohjauslaitteet sijaitsevat piilossa suoja Pellin alla. Siellä on useita hydraulikkalohkoja, jotka ohjaavat kouran hydraulisia toimintoja hakkuukoneelta tulevien ohjaussignaalien perusteella.

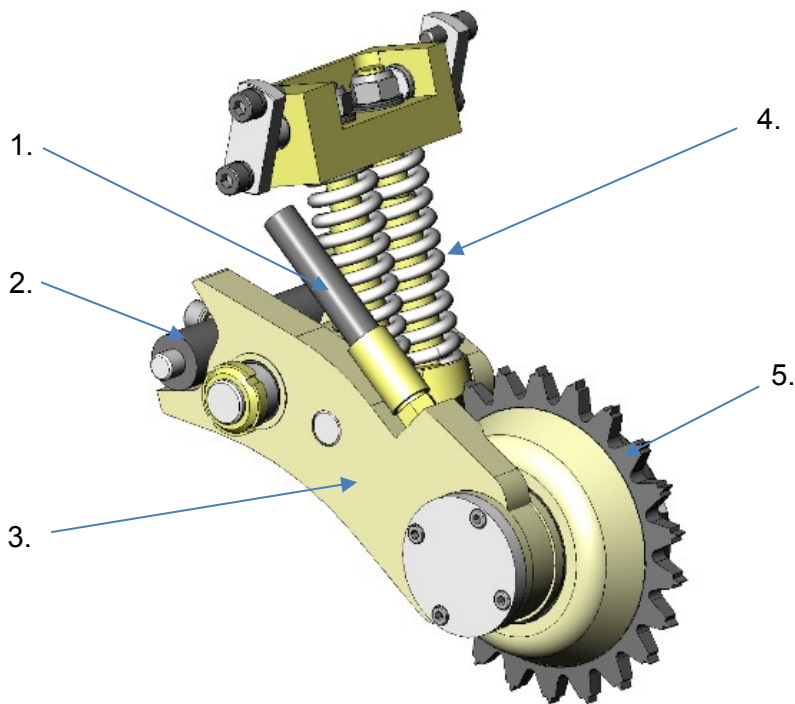
Harvesterikourat voivat sisältää useita lisälaitteita, kuten kantokäsittelylaitteiston, jota käytetään kesäaikaisen puunkorjuun aikana leviävän juurikäävän torjumi- seen. Kuva 4 havainnollistaa kuinka kantokäsittelylaitteisto levittää kantokäsitte- lyainetta ketjusahan terälaipassa olevien reikien kautta kannon päälle puun kaa- tosahauksen yhteydessä. (Metsäteho Oy 2017).



Kuva 4. Kantokäsittelylaite toiminnassa (Metsäteho Oy 2017)

3.3 Mittapyörä

Mittapyörä sijaitsee harvesterikouran sisäpuolella kuten kuvassa 5 siten, että vain sen piikkipyörä ylittää karsittavan puun rungon kylkeen. Mittapyörän pääosat ovat sen runko ja siihen laakeroitu piikkipyörä. (Alhainen 2018.)



Kuva 5. Alkuperäisen mittapyörän kokoonpano (Kesla Oyj 2018)

Mittapyörän pääosat ovat:

1. Anturijohdon suojaletki
2. Vaimenninkumi
3. Runko
4. Jousipaketti
5. Piikkipyörä

Piikkipyörä on laakeroitu runkoon siten, että se saa pyöriä täysin vapaasti. Kuvassa 5 näkyvän jousipaketin paikalle asetetaan vaihtoehtoisesti hydraulisylinteri, jolla saadaan mittapyörä tarvittaessa suojaan kouran rungon sisään. Lisäksi sillä saadaan säädettyä piikkipyörän kuormitusta optimaaliseksi eri puulajien ja lämpötilojen asettamien vaatimusten mukaisesti (Alhainen 2018.) Käsiteltävän puun lämpötilalla ja mittausajankohdalla on suuri merkitys mittatarkkuuteen. Suurin muuttuja eri tilanteissa on puun jäätyminen, jolloin mittapyörä uppoaa puuhun eri tavalla. (Pulkkinen 2009).

Mittapyörän toiminta perustuu siihen, että syöttörullien liikuttaessa puuta piikki-pyörä pyörii runkoa pitkin ja sen sisään keskelle kiinnitetty magneetti pyörii piikki-pyörän mukana. Runkoon kiinnitetty pulssianturi tunnistaa piikki-pyörän asennon muutokset melko tarkasti, sillä jokainen piikki-pyörän kierros antaa mittalaitteelle 50 pulssia, jolloin pulssianturin resoluutio on 7,2 astetta. Pulssien avulla mittalaite tunnistaa puun pituussuuntaisen liikkeen suhteessa kouraan, siis mitatun puun pituuden, jonka tarkkuus voidaan laskea resoluution avulla, kun tunnetaan mittapyörän halkaisija. (Alhainen 2018.)

4 VALUTEKNIikka

Valaminen on yleisesti käytetty muodoiltaan monimutkaisten metallikappaleiden valmistusmenetelmä erityisesti suurissa sarjoissa. Sen erityisin ominaispiirre on metallin lyhin tie sulasta olomuodosta valmiiksi tai lähes valmiiksi kappaleeksi (Meskanen ym. 2017b). Valamisella voidaan saavuttaa paras laatu ja pienimmät valmistuskustannukset, kun huomioidaan valettavan kappaleen suunnittelussa jo alusta lähtien valmistusmenetelmän tuomat rajoitteet. (Honkavaara 2014, 6.)

Koska valutekniikka sisältää niin paljon eri osa-alueita ja tietoa, kerrotaan tässä opinnäytetyössä valimotekniikan perusteita pintapuolisesti ja keskitytään tarkemmin niihin asioihin, jotka vaikuttavat valukappaleen suunnitteluun.

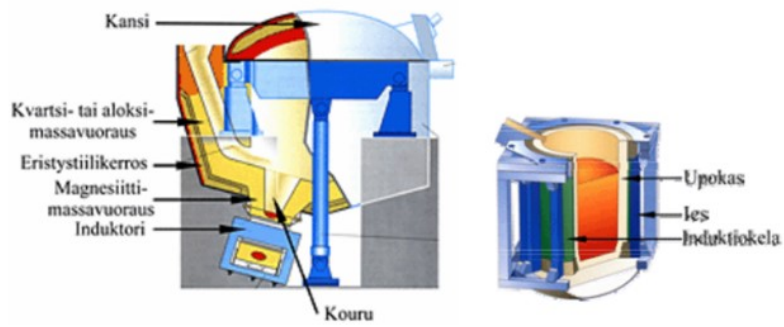
4.1 Valimon tuotantoprosessi

Valimoprosessit eroavat eri valimojen välillä toisistaan, sillä jokainen valimo on rakentunut omanlaisensa historian tuloksena. Valimoprosessin perusidea on kuitenkin kaikissa sama.

4.1.1 Sulatus ja valu

Valimoprosessin ensimmäinen vaihe on raaka-aineen sulatus, joka tapahtuu esimerkiksi induktio- tai induktioupokasuunissa (Kuvio 1), joissa voidaan sulattaa kaikkia metalleja. Valurautojen sulatukseen soveltuvat myös muut uunityypit, esimerkiksi kupoliuunit. Kupoliuuneja käytetään nykyisin enää vanhoissa valimoissa, sillä ne aiheuttavat paljon pölypäästöjä ja niissä käytettävä koksi on kallista, joka heikentää kannattavuutta. (Meskanen ym. 2017a.)

Sulatuksen alussa uuni panostetaan kierrätysteräksellä, harkkoraudalla sekä lisäaineilla, kuten hiilellä. Panostukseen käytetään myös valimon tuotantoprosessissa sekä valukappaleiden jälkikäsittelyissä muodostuvaa romuvalurautaa, kuten valmiista tuotteista irrotettuja valukanavia sekä koneistusjätettä. (Componenta Oyj 2018b)



Kuvio 1. Vasemmalla induktiouuni ja oikealla induktioupokasuuni (Meskanen ym. 2017a)

Sulatuksen jälkeen sula valurauta kaadetaan uunista kuljetussenkkaan (Kuva 6), josta se voidaan kaataa suoraan muottiin suuria kappaleita valettaessa. Yleensä sula kaadetaan ensin valuastioihin, joista se valetaan muotteihin. (Meskanen ym. 2017a.)



Kuva 6. Kuonan poisto senkasta (Niemi 2010)

Ennen valamista sula käsitellään tarpeen mukaan, sillä käsittelemätön sula on harvoin sellaisenaan laatuvaatimukset täyttävää. Erilaisia sulankäsittelyitä on monia, kuten:

- Ei-toivottujen aineiden, kuten rikin poisto.
- Lisäaineistus
- Ymppäys
- Mellotus
- Analyysin tarkennus
- Käsittelyt kiderakenteen muokkaamiseksi. (Meskanen ym. 2017a.)

Sulan käsittelyn jälkeen sula valetaan jo ennalta valmistettuihin muotteihin joko koneellisesti (Kuva 7) tai manuaalisesti. Valettujen kappaleiden jäähtyttyä riittävästi poistetaan muotit kappaleiden ympäriltä sekä mahdolliset keernat kappaleiden sisältä. Tällä voidaan vaikuttaa paljon valetun kappaleen jäähtymisnopeuteen, sillä muotin sisällä kappaleen jäähtyminen pitkittyy, mikä vähentää mahdollisia sisäisiä jännityksiä, mutta toisaalta nopealla jäähtymisellä voidaan saada kappaleeseen juuri oikeanlainen kiderakenne. (Meskanen ym. 2017a.)



Kuva 7. Koneellinen valuprosessi konekaavauslinjastolla (Componenta Oyj 2018a)

Kappaleiden jäähtyttyä niille suoritettava seuraava työvaihe on niin kutsuttu puhdistus. Siinä kappaleesta puhdistetaan siihen kuulumattomat osat ja epäpuhtaudet, kuten keernojen jätteet, valukanavat ja syöttökuvut (Kuva 8). Lopuksi tasoitetaan purseet ja valukanavien sekä syöttökupujen liittymäkohdat, esimerkiksi kulmahiomakoneella. (Meskanen ym. 2017a.)



Kuva 8. Valukkeen irrotus (AHC 2018)

4.1.2 Jälkikäsittelyt

Puhdistuksen jälkeen kappaleet voidaan tarvittaessa vielä jälkikäsitellä seuraavilla jälkikäsittelytoimenpiteillä:

- Tuotantohitsaus
- Koneistus
- Lämpökäsittelyt
- Pintakäsittelyt.

Tuotantohitsaus jaetaan liitos- ja viimeistelyhitsaukseen. Liitoshitsauksella liitetään valettuja osia toisiinsa tai muihin metallikappaleisiin. Esimerkiksi traktorin vetovarsien silmukkapäät ovat usein valuterästä, ja ne on hitsattu kiinni teräksiseen lattatankoon (Kuva 9).



Kuva 9. Vetovarsi (IKH 2018)

Korjaushitsauksessa korjataan puhdistuksen yhteydessä havaitut pintavirheet, jos se vain on mahdollista, sillä valurautojen ominaisuuksista, kuten suuresta hiilipitoisuudesta johtuva huono hitsattavuus voi olla esteenä joidenkin materiaalien hitsaukselle. (Meskanen ym. 2017a.)

Koneistus tapahtuu yleensä tavanomaisilla työstökoneilla, kuten jyrsinkoneella tai aarporalla. Suurimmat haasteet koneistuksessa ovat terien nopea kuluminen materiaalin pintaa koneistettaessa, kappaleen kiinnittäminen ja paikoittaminen sekä erikoisten muotojen vaatimat erikoisterät ja lisälaitteet. (Sairanen 2011)

Lämpökäsittely kuuluu joidenkin valukappaleiden valmistusprosessiin niille vaadittavien ominaisuuksien saamiseksi. Esimerkiksi standardin SFS EN 1564 mukaisten ausferriittisten pallografiittirautojen (ADI) mikrorakenne saadaan aikaan

lämpökäsittelmällä kiinteänä perliittisen matriisin omaavaa pallografiittivalurautaa, joka on monesti standardin SFS-EN 1563 GJS-800 kaltaista ennen lämpökäsittelyä.

Kaikki valukappaleet eivät kuitenkaan tarvitse lämpökäsittelyä ollenkaan, tai ne voidaan lämpökäsitellä tilaajan niin halutessa, esimerkiksi standardin SFS-EN 12513 mukaiset kulumiskestävät valuraudat voidaan karkaista kulutuskestävyyden lisäämiseksi. (Meskanen ym. 2017a.)

Valimolla pintakäsiteltävät kappaleet saavat pintaansa konepohjaksi kutsutun pohjamaalin kuljetuksen aikaisen ruostumisen estämiseksi. Koska valimojen valmistamat osat ovat usein osa asiakkaan valmistamaa suurempaa kokonaisuutta, määräytyy maalaukseen käytettävä maali asiakkaan toiveiden mukaisesti. Maaleina käytetään useimmin fysikaalisesti kuivuvia vinyyli- ja kloorikautsumaaleja sekä kemiallisesti kuivuvia alkyyli- ja epoksihartsimaaleja. (Meskanen ym. 2017a.)

Valukappaleet tarkistetaan ennen asiakkaalle toimittamista, jotta valmiiden tuotteiden laatu täyttää asiakkaan kanssa sovitut vaatimukset. Tuotteita tarkastetaan silmämääräisesti eri työvaiheissa muotin purkamisesta lähtien, mutta perusteellisin tarkistus suoritetaan ennen jälkikäsitteilyä ja tarvittaessa niiden jälkeenkin esimerkiksi hitsausvirheiden toteamiseksi. (Höök, Meskanen, Orkas & Tennilä 2017.)

Asiakkaan kanssa sovittuja laatuvaatimuksia voivat olla esimerkiksi lujuus, kovuus, sitkeys ja sallitut pintaviat. Materiaalin mekaanisten ominaisuuksien varmistamiseksi valetaan kappaleen yhteyteen koesauva-aiho, josta työstetyistä koesauvoista todetaan ainetta rikkovilla tutkimusmenetelmillä materiaalin laatu. (Höök ym 2017.) Materiaalin haluttu koostumus todetaan hieestä esimerkiksi optisella emissiospektrometrillä (VTT Expert Services Oy 2018).

Kappaleen sisäisten valuvirheiden, kuten imuonteloiden tarkistamiseen voidaan käyttää kaikkia ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Esimerkiksi röntgen- ja ultraäänikuvausta sekä tunkeumaneste- ja magneettijauhetutkimusta. (Meskanen ym. 2017a.)

4.2 Hiekkamuotin valmistus

Valurautoja valetaan pääasiassa kertavalettaviin hiekka- ja keraamimuotteihin. Hiekkamuotin etuna on sen edullisempi kustannus valettua kappaletta kohden sekä normaalisti riittävä pinnanlaatu ja tarkkuus. Keraamisia muotteja käytetäänkin lähinnä niin kutsutuille tarkkuusvalettaville kappaleille, niille asetettujen tarkkojen pinnanlaatuvaatimusten takia. Keraamisten muottien vähäisempi käyttö johtuu niiden suuremmista valmistuskustannuksista. (Meskanen ym. 2017a.)

Hiekkamuotti on valuhiekasta käsin tai koneellisesti kaavattu kertamuotti, joka valmistetaan tekemällä valettavan kappaleen muotoinen onkalo kaavauskehysten sisään sullottuun valuhiekkaan. Koska käytettävältä hiekalta vaaditaan suurta tulenkestävyyttä, on käytettävä hiekka usein joko maasälpää tai kvartsia. Hiekkaan sekoitetaan sideainetta, jotta kuiva valuhiekka pysyisi muodossaan ja kovettuisi sullottaessa. Sideaineina käytetään useimmiten joko luonnosta saatavia savisideaineita, kuten bentoniittia (Ihalainen, Aaltonen, Aromäki & Sihvonen 1995) tai kemiallisesti kovettuvia hartsisideaineita. (Keskinen & Niemi 2007.)

Valettavan kappaleen sisäiset muodot, joita ei voida kaavata, kuten esimerkiksi kanavat, saadaan aikaan muottiin asetettavilla keernoilla. Ne ovat erillisiä muotin osia, jotka valmistetaan valuhiekasta erikseen. Yleensä keernat valmistetaan joko käsin muotoilemalla tai koneellisesti keernatykillä. Yksinkertaisempia keernoja voidaan valmistaa myös esimerkiksi sorvaamalla. (Keskinen & Niemi 2007.)

4.2.1 Käsin kaavaus

Irtomallikaavauksessa ei käytetä mallialustaa ja siksi kyseinen menetelmä soveltuu vain käsin kaavaukseen. Kaavausta varten tarvitaan valettavan kappaleen mukaan valmistettu valumalli, joka on jaettu jakotason kohdalta osiin kuten kuvassa 10. Jos kappaleen jakotaso ei ole suora, puhutaan murtojakopinnasta. Silloin kappaleen mallin lisäksi tarvitaan murtojakopintamalli murtojakopinnan aikaansaamiseksi. Murtojakopintamallia, eli paartilossia käytettäessä voidaan käyttää myös yksiosaista valumallia. (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuva 10. Erään venttiilin rungon jaettu keernakannallinen valumalli (Soininen 2018)

Tavanomaisin, kahdella kehyksellä tapahtuva kaavaus alkaa sijoittamalla malli pohjalevyn päälle keskelle muotin alemmaksi jäävää kaavauskehystä, kuten kuvassa 11 (Keskinen & Niemi 2007).



Kuva 11. Irtomallikaavauksen ensimmäinen vaihe (Keskinen & Niemi 2007)

Kun malli on asetettu paikoilleen, täytetään kaavauskehys sullomalla se täyteen sideaineseosteista valuhiekkaa. Lopuksi pinta tasataan kuvan 12 mukaisesti. (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuva 12. Tasoitettu muotin pinta (Keskinen & Niemi 2007)

Tasoituksen jälkeen syntynyt muotin puolikas käännetään ylösalaisin ja poistetaan pohjalevy, jota vasten ollut muotin pinta muodostaa jakotason. Kuvassa 13 näkyy valettavan kappaleen murtojakopinnan saamiseksi käytetty paartilossi, joka poistetaan valumallin päältä ennen seuraavaa vaihetta. (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuva 13. Muotin puolikas käännetty (Keskinen & Niemi 2007)

Muotin valmiin alaosan päälle asetetaan seuraavaksi ylempi kaavauskehys ja valumallin päälle ylempi valumallin osa. Paartilossia ja yksiosaista mallia käytettäessä niiden alta paljastuu tässä vaiheessa yksiosaisen valumallin toinen puolisko, joka toimii ylemmän muottipuoliskon valumallina. Jakopinnalle levitetään kuivaa hiekkaa, etteivät muottipuoliskot tarttuisi toisiinsa, ja valumallin päälle asetetaan vielä syöttökanavien kohtaan tapit valukanavien malleiksi (Kuva 14). (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuva 14. Hiekkamuotti ennen yläkehän sullontaa (Keskinen & Niemi 2007)

Seuraavaksi ylempikin kaavauskehys sullotaan täyteen valuhiekkaa ja annetaan kovettua (Kuva 15), kunnes muottipuoliskot puretaan ja valu- sekä kanavamallit irrotetaan. Valuhiekkaan painetaan tarvittava määrä kaasunpoistoreikiä hiekassa valun aikana muodostuvien kaasujen poistumiseksi. (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuva 15. Valmis hiekkamuotti (Keskinen & Niemi 1989)

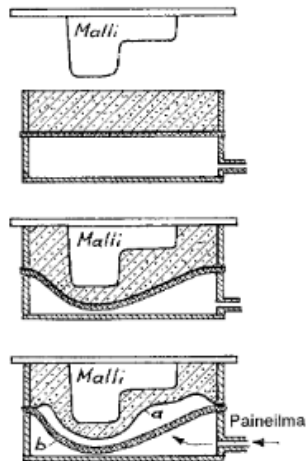
Lopuksi ennen valua muottipuolikkaat asetetaan takaisin paikoilleen ja lukitaan toisiinsa, ettei sula metalli pääse vuotamaan jakotasoja pitkin pois muotista. (Keskinen & Niemi 2007.)

Muotti voidaan kaavata myös käyttäen useampaa kaavauskehystä, jolloin ei enää puhuta muottipuolikkaista, vaan muottiviipaleista. Tällöin kappaleeseen syntyy useita jakotasoja ja kappaleen suunnittelu voi olla hyvinkin haasteellista. Usean kaavauskehän käyttö rajoittuu lähinnä käsin kaavaukseen, mutta se mahdollistaa erikoisten sekä korkeiden kappaleitten valamisen. (Keskinen & Niemi 2007.)

4.2.2 Konekaavaus

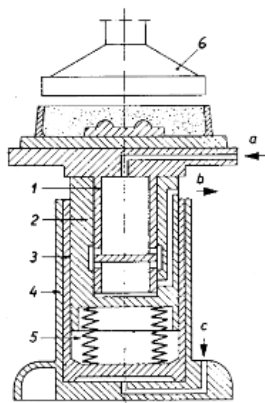
Konekaavauksen periaate muotin valuonkalon muodostumisen kannalta on sama kuin käsin kaavauksessakin. Suurimmat erot muotin valmistuksessa konekaavauksella ovat valuhiekan sullonnassa ja monesti paremmassa lopputuloksen laadussa. Konekaavaus on huomattavasti tehokkaampaa ja mahdollistaa pienempien, vain 0,5° päästöjen käytön, mikä perustuu siihen, että konekaavauksessa malli nousee ylös suoraviivaisemmalla liikkeellä. (Keskinen & Niemi 2007.)

Konekaavauksessa valumallit kiinnitetään tasaisiin laattoihin, jotka asetetaan esimerkiksi kuvion 2 tyyppiseen kaavauskoneeseen. Kaavauskoneita on eri tyyppiä, kuten täristys-puristus-, suurpaine-, kääntö-, monimäntä-, kumikalvo- eli membraanikaavauskoneita ja puhalluspuristuskaavauskoneita.



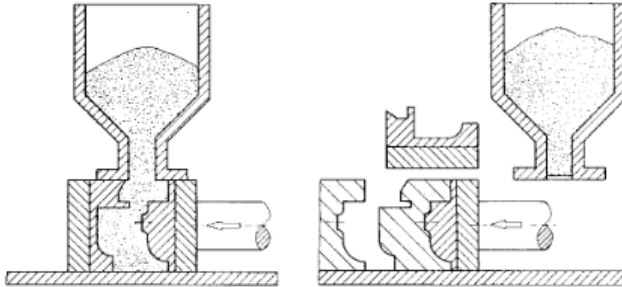
Kuvio 2. Membraanikaavauskoneen periaatekuva (Keskinen & Niemi 2007)

Kuviossa 3 esitettyä, paineilmalla toimivaa täristys-puristuskaavauskonetta käytetään tuorehiekkamuottien valmistamiseen. Siinä koneellinen sullonta tapahtuu kahdessa vaiheessa: ensiksi täristysvaihe tiivistää muotin alapinnan muttei yläpintaa, ja toisessa vaiheessa muotin yläpinnan hiekka tiivistetään puristamalla se puristuslevyä vasten. Kumpikin työvaihe voi tapahtua myös samanaikaisesti. (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuvio 3. Täristys-puristuskaavauskoneen periaatekuva (Keskinen & Niemi 2007)

Disamatic (kuvio 4) on puhalluskaavauskoneista erikoisin, sillä se puhaltaa muot-tihiekan teräsmuottiin, jossa hiekka puristetaan kasaan ja lopputuloksena on muotinpuolikas ilman kaavauskehyyksiä, eli niin kutsuttu pullamuotti.



Kuvio 4. Disamatic-puhalluskaavauskoneen periaatekuva (Keskinen & Niemi 2007)

Disamaticin kaavausnopeus on jopa 360 pullaa tunnissa. Kaavauksessa syntyvät keskenään identtiset pullat asetetaan peräkkäin ennen valua kuten kuvassa 16, jolloin niiden väliin muodostuu muottionkalo. (Keskinen & Niemi 2007.) Disamatic-menetelmällä kaavattujen muottien etuna on myös se, että niihin on helppo kaavata myös valukanavisto sen tullessa keskelle jakotaso.

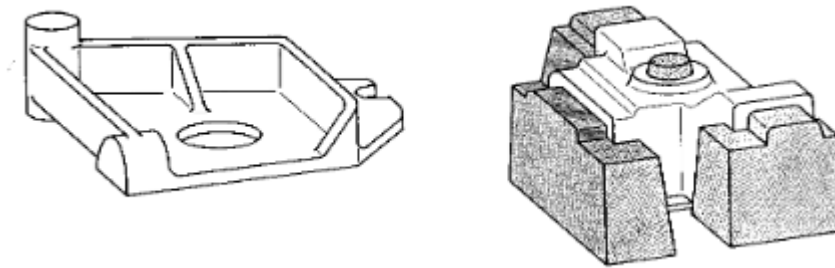


Kuva 16. Manuaalinen valu valmiisiin pullamuotteihin (Caffier Barreau Industries 2018)

4.2.3 Keerna ja valumalli

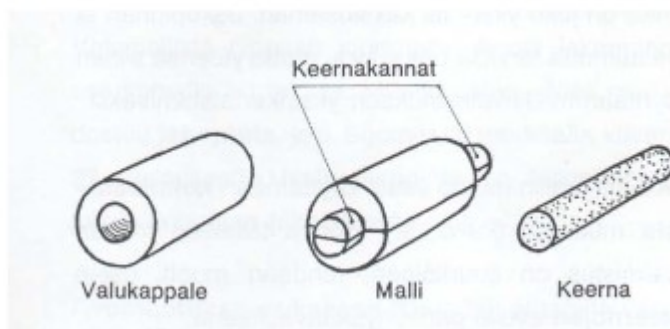
Valumallit valmistetaan yleensä puusta, koska puu on edullinen ja helposti työstettävä materiaali. Sen kestävyys konekaavauksessa ei kuitenkaan ole riittävä, mistä johtuen konekaavausmallit valmistetaan mieluummin muoveista ja metalleista. (Keskinen & Niemi 2007.)

Mallit voidaan jakaa luonnollisiin ja keernallisiin malleihin (kuvio 5). Luonnollinen malli vastaa valmistettavaa kappaletta lähes täysin, erona on vain kappaleen kiinteäkiillotuksen vaatima suurempi koko, joka valuraudoilla on alle yhden prosentin.



Kuvio 5. Luonnollinen ja keernallinen malli (Keskinen & Niemi 2007)

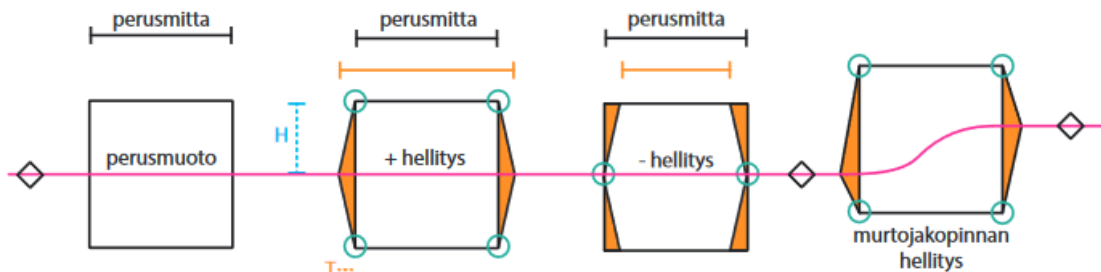
Keernallisessa valumallissa on keernakannat (kuvio 6), joiden muodostamiin onkaloihin keerna asettuu tukevasti. (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuvio 6. Valukappale, sen keernallinen valumalli ja keerna (Keskinen & Niemi 2007)

Valumalleissa on oltava hellitykset (kuvio 7) eli päästöt, jotta valumalli irtoaisi hiekkamuotista sitä rikkomatta. Päästö tarkoittaa jakotasoon nähden kohtisuorien

pintojen kaltevuutta siten, että kappale on leveimmillään jakotason kohdalla, jolloin malli irtoaa helposti. Jos kaltevuus on jossakin kohtaa mallia väärään suuntaan, kutsutaan sitä negatiiviseksi päästöksi. (Honkavaara 2014).



Kuvio 7. Esimerkkejä hellityksistä. (Honkavaara 2014)

Keernat valmistetaan valuhiekasta useimmiten keernalaatikossa (kuvio 8), minkä takia myös ne tarvitsevat päästöt irrotukseen ehjänä. Keernan valmistamisessa käytettävä tulenkestävä hiekka on yleensä kvartsihiekkää, sillä keerna altistuu valun aikana muotin eri osista kaikkein kovimmalle kuumuudelle. (Keskinen & Niemi 2007.)



Kuvio 8. (Keskinen & Niemi 2007)

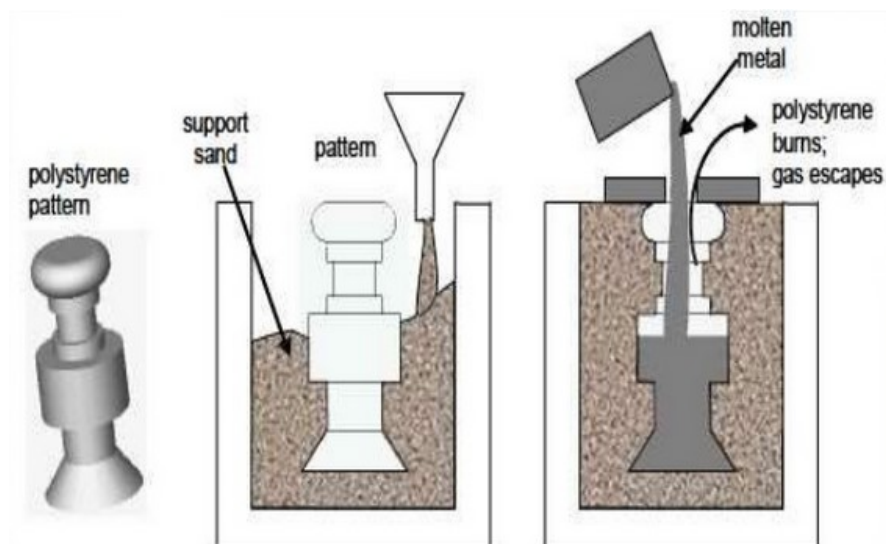
Kun keernan antamalta muodolta vaaditaan hyvää pinnanlaatua, voidaan sen saavuttamiseksi peitostaa keerna maalinomaisella peitosteella, jolloin keernasta jää myös vähemmän hiekkajäämiä valetun kappaleen pintaan. (Keskinen & Niemi 2007.)

4.2.4 Täysmuottikaavaus

Täysmuottikaavaus soveltuu käsin- ja konekaavaukseen. Se eroaa muista kaavausmenetelmistä lähinnä siinä, että muottihiekan sisään kaavattavaa paisutetusta polystyreenistä (EPS) valmistettua valumallia ei oteta pois ennen valua, vaan sen annetaan kaasuuntua sulan raudan valuessa muottiin (kuvio9). (Meskanen ym. 2018.)

Muottikehys voi olla yksiosainen, koska kappaleeseen ei tule jakotasoja eikä se myöskään tarvitse suuria päästöjä. Etuina on suuri valettavan kappaleen muotoilun vapaus ja mahdollisuus valaa monimutkaisia kappaleita ilman keernoja, mutta muotin sisään kaasuuntuva polystyreenimalli jättää helposti valettuun kappaleeseen jälkiä ja hiilettää voimakkaasti valettavan kappaleen pintaa, minkä takia tämä menetelmä ei sovellu niukkahiilisille valuteräksille. (Meskanen ym. 2018.)

Polystyreenimalli suunnitellaan siten, että se voidaan valmistaa sarjatuotannossa kahteen suuntaan avautuvalla muotilla yhtenä tai useampana osana. Jos valettavia kappaleita on hyvin vähän, voidaan malli valmistaa myös jyrsimällä, jolloin malli ei tarvitse päästöjä ollenkaan. (Meskanen ym. 2018.)



Kuvio 9. Täysmuottikaavausprosessi (Sol Lare 2015)

5 MITTAPYÖRÄN RUNGON SUUNNITTELUYÖ

Jokaisen valukappaleen suunnittelutyö on omanlaisensa prosessi, sillä kappaleen valutekniset vaatimukset ja rajoitteet vaikuttavat suuresti kappaleen lopulliseen muotoiluun. Tässä työssä kappaleelta toivotut toiminnalliset muodot yhdessä valuteknillisten vaatimusten kanssa jättivät vähän mahdollisuuksia rakenteen optimoimiseksi mahdollisimman keveäksi.

Kappale mallinnettiin Autodesk Inventor Professional 3D-mallinnusohjelmalla, sillä se oli soveltuvin Lapin ammattikorkeakoulussa käytettävissä olevista mallinnusohjelmistoista.

5.1 Suunnittelutyön lähtötiedot

Suunnittelutyön lähtötiedot saatiin toimeksiannon yhteydessä Kesla Oyj:n tuotekehitysosastolta. Lähtötietoihin kuului vaatimuslista, runkoon kohdistuvat kuormitukset sekä alkuperäisen rungon 3D-malli, josta saatiin uudelle rungolle sen toiminnalliset mitat, kuten kiinnitysakseliin sijainnit.

5.1.1 Käytetty materiaali

Rungon ensisijaiseksi materiaaliksi valittiin austemperoitu pallografiittivalurauta (ADI) EN GJS 1050-6. Materiaalin valintaan vaikuttivat kyseisestä materiaalista saadut hyvät kokemukset ja sen erinomaiset tekniset ominaisuudet, jotka ovat paremmat kuin monella muulla vastaavat lujuusominaisuudet omaavalla suurlujuusteräksellä (Meskanen ym. 2018). Lisäksi kyseinen materiaali on valimoilla yleisesti käytetty, joten pientenkin kappale-erien teettäminen on valimon ja tilaajan kannalta järkevää.

Vaikka materiaalin väsymislujuuden suurin sallima jännitys on noin puolet myötölujuudesta, sallii 700 MPa:n myötöraja huomattavasti tätä rajumman yksittäisen jännityspiikin epätavallisessa kuormitustilanteessa materiaalin väsymättä. Tällainen epätavallinen kuormitus voi sattua vahinkotapauksissa esimerkiksi silloin kun harvesterikouralla kasataan paksuoksaisten puiden hakkuujätettä ja kouran suojaavasta rungosta huolimatta paksun oksan tyvi pääsee vääntämään tai iskemään mittapyörää.

Taulukosta 1 näkee, että materiaalin EN-GJS1050-6 murtolujuus ja murtovenymä ovat riippuvaisia materiaalin paksuudesta. Myötöraja (taulukossa venymisraja) $R_{p0,2}$ on kuitenkin aina sama, mutta siitä huolimatta materiaalin väsymislujuus heikkenee määräävän seinämäpaksuuden kasvaessa (Tekninen tiedotus 5/85 1985, 5.)

Taulukko 1. Ausferriittisten pallografiittivalurautojen teknisiä ominaisuuksia (SFS-EN 1564. 2014)

Valurautalajin nimike		Määräävä seinämäpaksuus ^{a)}	0,2 % -venymisraja	Murtolujuus	Murtovenymä
Tunnus	Numeerinen nimike	t mm	$R_{p0,2}$ MPa min.	R_m MPa min.	A % min.
EN-GJS-800-10	5.3400	$t \leq 30$	500	800	10
EN-GJS-800-10-RT	5.3401	$30 < t \leq 60$		750	6
		$60 < t \leq 100$		720	5
EN-GJS-900-8	5.3402	$t \leq 30$	600	900	8
		$30 < t \leq 60$		850	5
		$60 < t \leq 100$		820	4
EN-GJS-1050-6	5.3403	$t \leq 30$	700	1 050	6
		$30 < t \leq 60$		1 000	4
		$60 < t \leq 100$		970	3
EN-GJS-1200-3	5.3404	$t \leq 30$	850	1 200	3
		$30 < t \leq 60$		1 170	2
		$60 < t \leq 100$		1 140	1
EN-GJS-1400-1	5.3405	$t \leq 30$	1 100	1 400	1
		$30 < t \leq 60$			
		$60 < t \leq 100$			Sovittava valmistajan ja ostajan kesken.

HUOM. 1 Määräävä seinämäpaksuus ei vaikuta 0,2 % -venymisrajan vähimmäisarvoon edellyttäen, että lämpökäsittelyn parametrit ja seostus on valittu määräävän seinämäpaksuuden mukaisesti.

HUOM. 2 Näiden valurautalajien Brinell-kovuuksien opastavia arvoja esitetään liitteessä D.

^{a)} Yli 100 mm määrävillä seinämäpaksuuksilla valmistajan ja ostajan on sovittava valetun näytteen tyypistä ja koosta sekä vaadituista vähimmäisarvoista.

Standardin SFS-EN 1564 mukaisesta ausferriittisestä valuraudasta valmistettujen kappaleiden yhteydessä valetuista koesauvoista leikatusta näytepaloista saatujen arvojen on täytettävä taulukon 1 mukaiset mekaaniset ominaisuudet. (SFS-EN 1564. 2014.)

Taulukossa 2 kerrotaan materiaalin muita suunnittelun kannalta hyödyllisiä mekaanisia ominaisuuksia kuten Wöhler-kiertotaivutuskokeen arvot, sekä puristuslujuus, joka on valurautoilla yleisesti vetomurtolujuutta suurempi.

Taulukko 2. Ausferriittisten pallografiittivalurautojen teknisiä ominaisuuksia (SFS-EN 1564. 2014)

Ausferriittisten pallografiittivalurautojen ominaisuuksia [8]		Valurautalajin nimike EN-GJS-					
		800-10 800-10-RT	900-8	1050-6	1200-3	1400-1 HB400	HB450
Ominaisuus	yksikkö	Ominaisuuksien opastavat arvot ^{a)}					
Puristuslujuus σ_{db} 0,2 % -venymisraja	MPa	1 300 620	1 420 700	1 675 840	1 900 1 040	2 200 1 220	2 500 1 350
Leikkauslujuus σ_{aB} 0,2 % -venymisraja	MPa	720 350	800 420	940 510	1 080 590	1 260 770	1 400 850
Vääntölujuus σ_{tB} 0,2 % -venymisraja	MPa	720 350	800 420	940 510	1 080 590	1 260 770	1 400 850
Murtumissitkeys K_{Ic}	MPa \sqrt{m}	62	60	59	54	50	–
Väsymisraja (Wöhler) (kiertotaivutus) loveamaton (halkaisija 10,6 mm) N = 2 × 10 ⁶ jaksoa	MPa	375	400	430	450	375	300
Väsymisraja (Wöhler) (kiertotaivutus) lovettu ^{b)} (halkaisija 10,6 mm) N = 2 × 10 ⁶ jaksoa	MPa	225	240	265	280	275	270
Ominaisuus	yksikkö	Tyypilliset arvot					
Kimmomoduuli E (veto ja puristus)	GPa	170	169	168	167	165	165
Poissonin luku ν	–	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
Leikkauskimmomoduuli	GPa	65	65	64	63	63	63
Tiheys ρ	g/cm ³	7,1	7,1	7,1	7,0	7,0	7,0
Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin α 20...200 °C [1]	$\mu M(m \cdot K)$	18 ^{c)} – 14					
Lämmönjohtavuus λ lämpötilassa 200 °C	W(m · K)	23 ^{d)} – 20					
HUOM. Ellei toisin ole mainittu, tässä taulukossa esitetyt arvot on määritetty huoneenlämpötilassa.							
a) Vähimmäisarvot voidaan saavuttaa enintään 50 mm seinämäpaksuuksilla. Paksumpien seinämien arvoista suositellaan sopimista ostajan ja valmistajan kesken.							
b) Lovettu lämpökäsittelyn jälkeen, 45° V-kehäovi, jonka säde on 0,25 mm.							
c) Lineaarinen lämpölaajenemiskerroin α on suurempi valurautalajeilla, joilla on matalampi lujuus.							
d) Lämmönjohtavuus λ on suurempi valurautalajeilla, joilla on matalampi lujuus.							

Materiaalia ei voi hitsata tai karkaista, sillä se on saanut hyvät tekniset lujuusominaisuutensa mahdollistavan austeniittis-ferriittisen mikrorakenteen valimolla suoritetusta lämpökäsittelystä, austemperoinnista. Se on siksi koneistettavuudeltaan keskiverto ja kulutuskestävyydeltään sekä säänkestoltaan erinomainen. (Vonroll-casting 2018.)

Materiaalin korkein sallittu käyttölämpötila on 200 °C, mikä sallii koneistamisen tavanomaisilla menetelmillä. (Vonrollcasting 2018.) Koneistuksessa on hyvä ottaa huomioon se, että terien kuluminen voi olla jopa 40-50 % nopeampaa kuin tavallista pallografiittirautaa koneistettaessa (Sandvik Coromant 2018).

5.1.2 Vaatimuslista

Rungon muotoilulle oli asetettu seuraavat päävaatimukset:

- Anturijohtojen suojaputken yhteen tulee olla kohtisuora rungon yläpintaan nähden, jotta johdon suojaputki kulkisi rungon yläpintaa pitkin.
- Rungon tulee olla mahdollisimman kevyt ja tasaluja rakenteen kestävydestä tinkimättä.
- Rungon tulee olla vaihtokelpoinen entisen version kanssa, jotta uusi malli soveltuu varaosana myös aiemmin valmistettuihin harvesterikouriin.
- Sylinterin kiinnitystapin lukitus suunniteltava kolmella tai kahdella lukituspultilla, ja tapin kannalle tehtävä upotus rungon kylkeen.
- Voitava koneistaa mahdollisimman pitkälle yhdestä suunnasta yhdellä kiinnityksellä, jolloin koneistus on mittatarkempaa.

Ja toiveet:

- Anturijohtojen suojaputken kiinnitysreiän reunoille olisi hyvä saada lisää materiaalia koneistuksen helpottamiseksi.
- Rajoittimien vastepintojen leveyttä voisi kasvattaa, rajoittimen vaimennuskumien kestoian pidentämiseksi.
- Työstövaraa olisi hyvä olla koneistettavissa pinnoissa vähintään noin 3mm

5.1.3 Runkoon kohdistuvat rasitukset

Mittapyörän runkoon kohdistuu dynaamista, siis väsyttävää kuormitusta. Väsyttävä kuormitus koituu rungon kohtaloksi käytön myötä, ellei rakenteessa esiintyvän suurimman jännityksen arvo ole kohtuullinen väsymislujuuden suhteen. Tässä tapauksessa merkittävää väsytytkuormitusta on kolmenlaista:

1. Puun pituutta mitattaessa mittapyörän sylinteri painattaa mittapyörää hydraulikkasyylinterillä, jonka voima lasketaan kaavalla 1. Siinä paineena p käytetään suurinta hydraulikkajärjestelmän kyseiselle sylinterille tuottamaa paineen arvoa.

Suurin sylinterin tuottama voima saadaan tällöin laskettua kaavalla 1.

$$F_s = A \times p \quad (1)$$

Missä

A	on	Männän tehollinen pinta-ala [mm ²]
F_s	on	Voima [N]
p	on	Paine [bar]

Männän tehollinen pinta-ala voidaan laskea kaavasta 2.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

Missä

A	on	Männän pinta-ala [mm ²]
d	on	Männän halkaisija [mm]

Yhdistämällä kaavat 1 ja 2 saadaan kaava 3, jonka tuloksena on sylinterin tuottama suurin voima.

$$F_s = \frac{\pi d^2}{4} \times p \quad (3)$$

F_s	on	Voima [N]
p	on	Paine [bar]

2. Rungon pituuden mittauksen aikana mittapyörä voi törmätä esimerkiksi oksanpattiin. Ylittääkseen sen on sylinterin annettava periksi, ja voima jolla sylinteri vastustaa ennen joustoa saadaan arvioitua karkeasti kertoimen k_t avulla kaavalla 4.

$$F_{sMax} = F_s \times k_t \quad (4)$$

Missä

F_{sMax}	on	Sylinterin voima joudessa [N]
k_t	on	Kerroin

3. Kolmas merkittävä kuormitus syntyy, kun karsittava runko pyörähtää kourassa ja vääntää mittapyörää sivuttain. Suurimmaksi sivuttaisvoimaksi tällöin on arvioitu noin 2000N.

5.2 Suunnittelussa huomioitavia seikkoja

Valukappaleiden suunnittelussa tärkeimmät muotoiluun vaikuttavat seikat ovat jakopinta, päästöt, suunnattu jähmettyminen, kulmapyöristykset ja seinämäpaksuuden tasaiset muutokset, ainekeskittymien välttäminen sekä kappaleen puhdistettavuuden huomioiminen. (Hiltunen 2009, 24.)

5.2.1 Päästöt

Valukappaleen tarvitseman päästökulman suuruus riippuu sen kunkin osan mitoista ja muodoista. Suurempi päästökulma varmistaa kaavatessa mallin irtoamisen muottia särkemättä, mutta lisää myös kappaleelle turhaa painoa. (Asanti 1962.) Siispä päästö suunnitellaan mahdollisimman pieneksi. Taulukossa 3 on esitetty yleispätevät päästöjen suuruudet muodon korkeuden suhteen.

Taulukko 3. Päästökulma muodon korkeuden suhteen (Honkavaara 2014)

Muodon korkeus (H)	$H \leq 30\text{mm}$	$30\text{mm} < H \leq 80\text{mm}$	$80\text{mm} < H \leq 180\text{mm}$	$180\text{mm} < H \leq 250\text{mm}$
Hellitys (T)	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
Hellitys (O)	4°	3°	2°	1°

5.2.2 Suunnattu jähmettyminen

Kun täyteen valetun muotin sula valurauta alkaa jähmettymään ohuimmasta kohdasta kohti paksumpaa, sen tilavuus pienenee ja vielä sulana oleva metalli siirtyy kohti jähmettyvää osaa. Tämä voi aiheuttaa valukappaleelle imuonteloita (kuvio 10), ellei käytetä syöttökupuja, joista muottionkalo saa lisää sulaa tarvittavan määrän imuonteloiden välttämiseksi. Toisinaan pelkkä valukanavassa oleva sula voi riittää syötöksi. (Keskinen & Niemi 2007.)



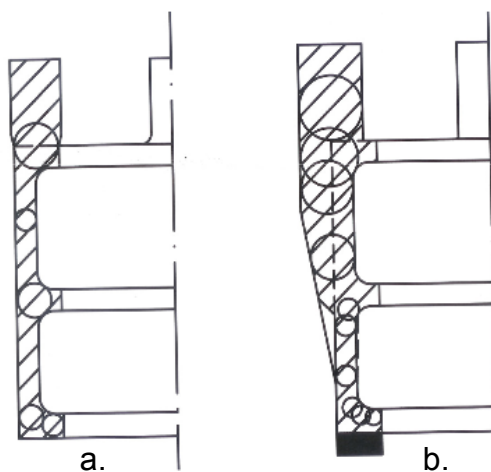
Kuvio 10. Valun sisäinen imuontelo (Keskinen & Niemi 2007)

Kuten kuviossa 11 näkyy, voi imuontelo muodostua myös kappaleen ulkopuolelle, mikä on kuitenkin harvinaisempaa. Mikäli ulkopuolinen imuontelo ei ole sallittu, eikä sitä voida korjata hitsaamalla, menee valettu kappale romutukseen.



Kuvio 11. Valun ulkopinnassa oleva imuontelo (Keskinen & Niemi 2007)

Jotta sula saataisiin jähmettymään kauimmasta kohdasta kohti syöttökanavaa, suunnitellaan kappale mahdollisuuksien mukaan sellaiseksi, että kappaleen materiaali paksunee tasaisesti kauimmasta kohdasta kohden syöttöä. Suunnittelun helpottamiseksi käytetään Heuversin ympyrämenetelmää (Kuvio 12). (Niemi 2010.)



A: syöttö ei ole täydellinen, koska eräitä ympyröitä ei saada ulos syöttökupujen kautta.

B: kappaleen kuviteltua muotoa on muutettu jäähdytysraudan ja seinämän vahvuuksia muuttamalla siten, että syöttö tapahtuu täydellisesti yläpuolella sijaitsevasta syöttökuvusta.

Kuvio 12. Heuversin ympyrämenetelmä sovellettu erään kappaleen suunnittelussa (Niemi 2010)

Heuversin menetelmässä piirretään valettavan kappaleen poikkileikkauksen sen profiilin levyisiä ympyröitä. Jos kaikki ympyrät mahtuvat pois samaa reittiä, on profiili paksuneva kauimmasta kohdasta kohti syöttökupua, jolloin sula jäähtyy tasaisesti ja kutistuman mahdollisesti aiheuttama imuontelo jää syöttökupuun.

5.2.3 Kulmapyöristykset

Valukappaleen muotoilussa on pyrittävä välttämään teräviä kulmia, sillä valumuottiin valetun sulan jäähtyminen kiinteäksi alkaa valettavan kappaleen nurkista, sekä muista rakenteen ohuista kohdista muotin ja sulan kosketuspinnasta kohti keskustaa. Tällöin terävissä nurkissa metalli jäähtyy siten, että siinä muodostuvat kiteet asettuvat toisiaan vastaan muodostaen heikon rakenteen johon saattaa muodostua repeämä. (Hiltunen 2009, Tekninen tiedotus osa 1 1988, 30. mukaan.) Lisäksi terävät kulmat ja rakenteen profiiliin äkilliset muutokset aiheuttavat rakenteeseen jännityshuippuja, jotka heikentävät kappaleen väsymislujutta. (Salmi & Pajunen 2010.)

5.3 Lujuuslaskelmat

Runkoon kohdistuvat oleelliset kuormitukset ovat dynaamisia taivutuskuormituksia, joiden aiheuttamat jännitykset materiaalissa ovat veto- ja puristustykytyskuormitusta. Ylikuormitustilanteessa keskijännitys ja maksimijännitys kasvavat samassa suhteessa alemman rajajännityksen ollessa nolla, jolloin ylin rajajännitys, joka ei johda vielä materiaalin murtumiseen on tykytyslujuus σ_T , ja keskijännitys on aina puolet ylemmästä rajajännityksestä. Tarkin tykytyslujuuden arvo materiaalille saadaan väsytykskokeesta, mutta koska sitä ei ollut mainittu materiaalin standardissa, katsottiinärkevimmäksi määrittää se Smith -diagrammin avulla

Kuvion 13 Smith -diagrammi piirrettiin yksinkertaisimmalla kokemukseen perustuvalla menetelmällä, jota käytetään usein yleisimmille rakenneteräksille. Menetelmää voidaan soveltaa myös austemperoimattomalle pallografiittivaluraudalle, vaikka sen väsymislujuus ei ole yhtä hyvä kuin vastaavat lujuusarvot omaavalla teräksellä. Pallografiittivaluraudan loviherkkyys on valmiissa rakenteessa kuitenkin huomattavasti parempi, jolloin se kestää enemmän väsyttävää kuormitusta. (Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto 1984, 106-107.)

Piirustuksen lähtötietoina käytettiin materiaalin standardissa esitettyjen Wöhler -kiertotaivutuskokeen väsymisrajaa (430 MPa) sekä materiaalin myötörajaa (700 MPa).

Koska valetun kappaleen pinnanlaatu ei ole läheskään sama kuin Wöhler -kierrottaivutustestissä käytetyn koesauvan, redusoitiin taivutusvaihtolujuus kappaleen pinnanlaadun mukaisella kertoimella kaavan 4. mukaisesti.

$$\sigma_{Wred} = k \times \sigma_W \quad (4)$$

Missä:

k	on	Mittakerroin
σ_W	on	Vaihtolujuus [MPa]
σ_{Wred}	on	Redusoitu vaihtolujuus [MPa]

Koska tämän tapauksen tykytyskuormituksessa alempi rajajännitys on laskennallisesti aina nolla ja keskijännitys puolet ylemmästä rajajännityksestä, saatiin diagrammiin piirrettyä jana origosta jännitysrajalle 60 asteen kulmassa, mikä laskettiin kaavalla 5.

$$\alpha = \tan^{-1}(\sigma_{Max} / \frac{\sigma_{Max}}{2}) \quad (5)$$

Missä:

α	on	Astekulma janalle OA [°]
σ_{Max}	on	Ylempi rajajännitys [MPa]

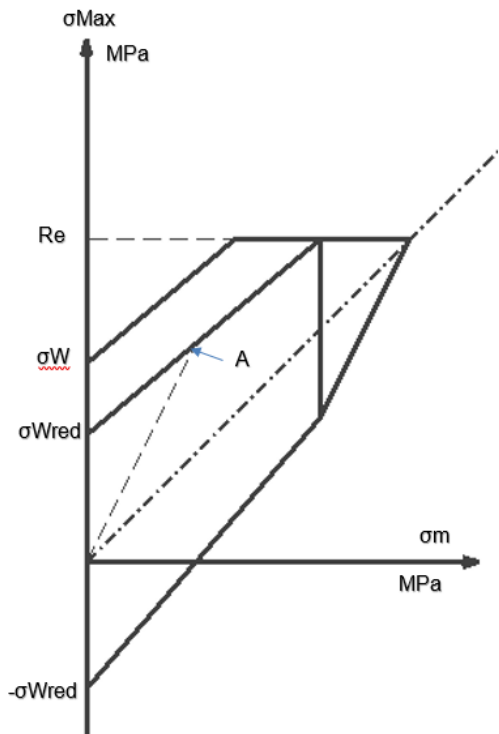
Tällöin saatiin kuvion 14. piirroksen tykytyslujuuden arvo kohtaan A. Koska piste A sijaitsee janalla OA ja jännitysrajan leikkauspisteessä, saatiin sen arvo ratkaistua kaavasta 6 muokkaamalla se eri välivaiheiden kautta kaavaksi 7.

$$\sigma_T = Y_A = 2 \times X_A = \tan(40) \times X_A + \sigma_{wred} \quad (6)$$

$$\sigma_T = Y_A = 2 \times \frac{\sigma_{wred}}{2 - \tan(40)} \quad (7)$$

Joissa:

Y_A	on	Pisteen A y-akselin arvo [MPa]
σ_T	on	Tykytyslujuus [MPa]
σ_{wred}	on	Redusoitu taivutusvaihtolujuus [MPa]



Kuvio 13. Smith diagrammi materiaalille EN-GJS-1050-6

Diagrammin symbolien selitykset:

A	on	Raja-amplitudi väsymisrajalla
Re	on	$R_{p0.2}$ myötöraja
σ_m	on	Keskijännitys
σ_w	on	Vaihtolujuus
σ_{wred}	on	Redusoitu vaihtolujuus

Smith-diagrammista saadun tykytyslujuuden ja halutun varmuusluvun avulla laskettiin kaavalla 8 kappaleelle laskennallinen nimellisjännityksen arvo, mitä tavoitellaan kappaleen muotoa suunniteltaessa.

$$\sigma_{Sall} = \frac{\sigma_T}{n} \quad (8)$$

Missä:

n	on	Varmuusluku
σ_{Sall}	on	Laskennallinen nimellisjännitys [MPa]
σ_T	on	Tykytyslujuus [MPa]

FEM-analyysien todenperäisyys varmistettiin laskemalla käsin reunajännitykset kriittisimmistä kohdista. Pelkän taivutuksen aiheuttama reunajännitys laskettiin kaavalla 6. (Digma, 2018.)

$$\sigma_{Max} = \frac{M}{I_z} \times y \quad (6)$$

Missä:

I_z	on	Poikkipinnan neliömomentti [mm ⁴]
M	on	Taivutusmomentti [Nmm]
y	on	Reunaetäisyys neutraaliakselista [mm]
σ_{Max}	on	Reunajännitys [MPa]

Poikkipinnan neliömomentit saatiin kaavaan 6 suoraan 3D-mallista Inventorin Region Properties- työkalulla, ja taivutusmomentit laskettiin kaavalla 7.

$$M = F \times l \quad (7)$$

Missä:

F	on	Voima [N]
l	on	Voiman varsi [mm]
M	on	Momentti [Nmm]

Kun mittapyörää painatetaan puuta vasten, kohdistuu rungon varteen yhtäaikaista taivutusta ja vääntöä. Sen takia varren kriittisimmässä kohdassa esiintyvän

jännityksen tarkistamiseen käytettiin yhdistettyä taivutuksen ja väännön kaavaa 8. (Valtanen 2008, 457.)

$$\sqrt{\sigma^2 + 3 \times \tau^2} \quad (8)$$

Jossa:

σ	on	taivutusjännitys	[MPa]
τ	on	Väännön leikkausjännitys	[MPa]

Väännön aiheuttama leikkausjännitys laskettiin kaavalla 9.

$$\frac{2 \times M_v}{\pi r^3} \quad (9)$$

Jossa:

M_v	on	Vääntömomentti	[Nmm]
r	on	Laskennallisen poikkipinnan säde	[mm]

Pintapaine rungon ja sen kiinnitysakselin sekä rungon ja hydraulisynterin kiinnitysakselin välillä tarkistettiin kaavalla 10. (Valtanen 2008, 423.)

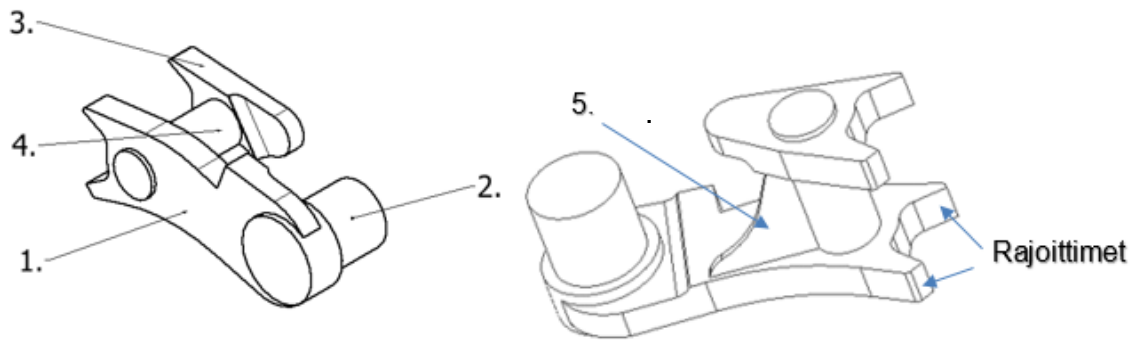
$$P_0 = 0.798 \sqrt{\frac{F \times \frac{D_1 - D_2}{D_1 D_2}}{L \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (10)$$

Missä

D_1	on	Reiän halkaisija [mm]
D_2	on	Akselin halkaisija [mm]
E_1	on	Rungon materiaalin kimmokerroin
E_2	on	Akselin materiaalin kimmokerroin.
F	on	Akselille kohdistuva voima [N]
L	on	Kosketusalan pituus [mm]
P_0	on	Kosketuspinnan maksimiarvo [N/mm ²]
ν_1	on	Rungon materiaalin Poissonin luku
ν_2	on	Akselin Poissonin luku

5.4 Mallinnustyö

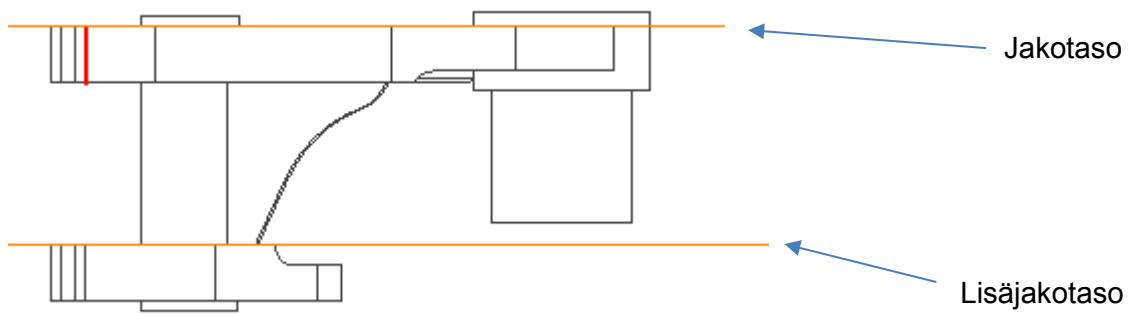
Mallinnustyö alkoi mallintamalla alkuperäisestä rungosta yksiosainen kopio. Tarkoituksena oli muodostaa sellainen malli, jonka mallinnusjärjestys Inventorin historiapuussa olisi mahdollisimman järkevä muokkauksia ajatellen.



Kuvio 14. Pääosien mallinnusjärjestys numeroituna.

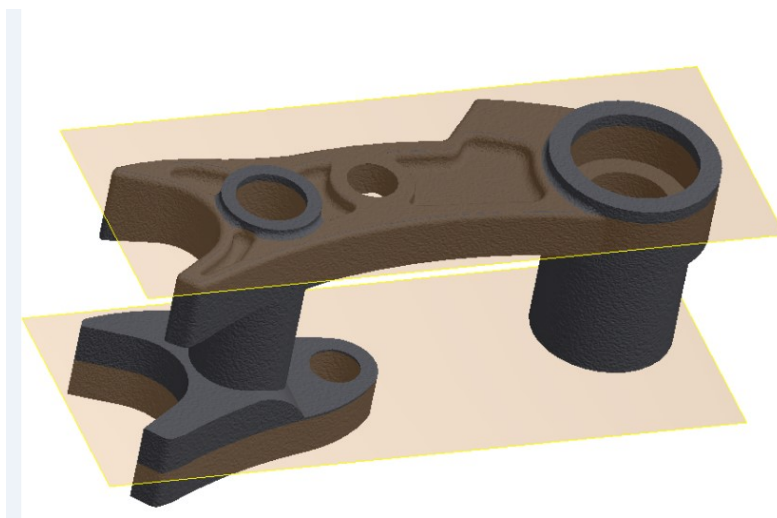
Kuviossa 14 näkyvän karkean mallinnuksen avulla oli hyvä suunnitella kappaleen jakotason paikkaa. Mahdollisia jakotasovaihtoehtoja tunnistettiin neljä erilaista. Käyttämällä yhtä jakotasoa kuvion 15 ylemmän poikkiviivan mukaisesti tulisi jakotasolle suoraa pintaa mahdollisimman paljon, mikä olisi konekaavauksen kannalta hyvä. Osa 3 aiheuttaisi silloin suuren negatiivisen päästön, mikä rikkoisi hiekkamuotin mallia irrotettaessa. Osa 3 voisi toki valmistaa erikseen ja hitsata valun jälkeen paikalleen, mikäli runko valmistettaisiin hitsattavuudeltaan hyvästä materiaalista. Osa 3 voitaisiin muotoilla malliin myös vahasta, joka jäisi kaavatessa muottiin ja sulaisi hiekkamuotissa sulan tieltä pois.

Toinen vaihtoehto olisi kaavata muotti kolmella kehyksellä, mikä vaatii kaksi jakotasoa kuvion 15 mukaisesti. Se onnistuisi varsin hyvin käsin kaavatessa, mutta suuren sarjan valmistuskustannusten hillitsemiseksi on kappaleen muotti syytä valmistaa konekaavauslinjastolla.



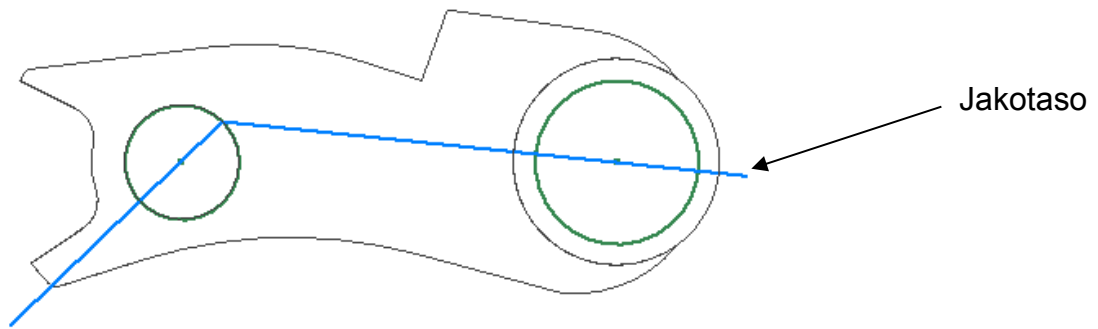
Kuvio 15. Jakotasovaihtoehto

Kuvion 15 mukaiset jakotasot mahdollistavat myös kappaleen keventämisen vähemmän rasitetuista kohdista, kuten kuvassa 17 on sen havainnollistamiseksi mallinnettu, jolloin materiaalia voisi käyttää tehokkaammin. Tällöin osien 1 ja 3 muoto muistuttaisi moottorin kiertokangen profiilia, mikä on hyvä esimerkki hyvin optimoidusta valuosasta. Osan 1 akseleiden reiät vaativat kuitenkin leveyttä niin paljon, ettei osan 1 sivuja saada kevennettyä kauttaaltaan, eikä keventämisestä ole siksi riittävän suurta hyötyä.



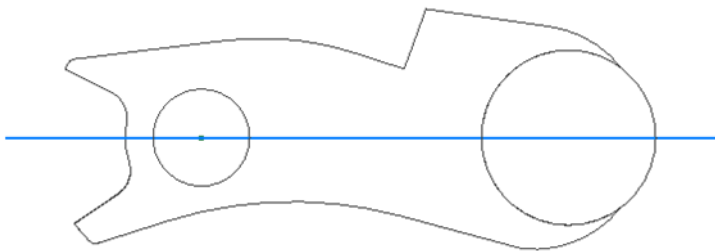
Kuva 17. Havainnollistava malli sivuilta kevennetystä rungosta

Kolmas jakotasovaihtoehto on murtojakopinta kuvion 16 mukaisesti. Siinä jakotaso tekisi mutkan, mitä ei suositella, mutta kappaleen saisi valettua siten, että runkoa tarvitsisi koneistaa jälkeempään mahdollisimman vähän. Rajoittimien muodot tosin vaativat keernojen käytön, mutta alemman rajoittimen kohdalla kulkeva jakotaso ei kavenna sitä oleellisesti, kun taas ylemmän vähemmän rajoitetun rajoittimen leveys kapenee päästön takia, mistä olisi hyötyä optimoinnin kannalta.



Kuvio 16. Kolmas jakotasovaihtoehto

Neljäs vaihtoehto jakotasolle oli asettaa se kuvion 17 mukaisesti suoraan rungon sylinterien läpi, mikä olisi konekaavauksen kannalta helpoin, mutta vaatii rajoittimien muotojen takia kuitenkin keernat. Lisäksi tässä vaihtoehdossa päästöt kaaventavat kumpaakin rajoitinta



Kuvio 17. Neljäs jakotasovaihtoehto

5.4.1 Ensimmäinen malli

Ensimmäisen mallin jakotasoksi valittiin kolmas vaihtoehto. Mallinnustyö alkoi muotoilemalla rungon pääosat kuvion 14 mukaisessa järjestyksessä, mutta vahvikelevy osa 5 päätettiin kuitenkin jättää pois, sillä se olisi saatava jakotasolle, mikä ei tässä tapauksessa ole mahdollista.

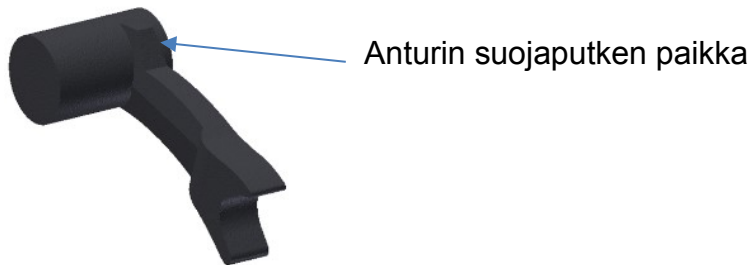
Kuvassa 18 näkyy mallinuksen ensimmäinen vaihe, jossa osan yksi mallinnus alkoi kopioimalla alkuperäisen rungon sivuprofiili, josta jätettiin vastinpintojen muodot sekä osan 2 keskipiste paikoilleen. Muita profiilin osia muotoiltiin täysin arvioon siten, että profiilissa olisi korkeutta eniten sen rasitetuimmassa kohdassa.



Kuva 18. Muokattu osan 1 profiili

Rungon päämuotojen valmistuttua oikeaan järjestykseen aloitettiin rakenteen optimointi käyttämällä Inventorin FEM-työkaluja. Rakenteen muokkauksen ensimmäisessä vaiheessa palattiin Inventorin historiapuussa taaksepäin ja muotoiltiin osaa 1 siten, että alempi rajoitinpinta sai tarvitsemansa leveyden ja varren leveys kapeni sopivaan mittaan.

Muotoilemalla päästöt osaan 1 huomattiin, että anturin johdon suojausputken liittymäkohtaan (Kuva 19) tarvittaisiin enemmän leveyttä, jota sai kasvatettua mallintamalla sen molemmilla puolin eräänlaiset posket. Niiden alle muodostui hieman vastapäätä, jonka ajateltiin poistuvan muuttamalla kappaleen kaavausasetusta.



Kuva 19. Ensimmäinen malli vaiheessa 2

Koska tässä vaiheessa oli vielä epävarmaa, onnistuuko kappaleen kaavaus kyseisellä jakotasolla, päätettiin kappaleesta mallintaa hieman karkea malli valimon arvioitavaksi ilman kaikkia yksityiskohtia, kuten koneistettavien kohtien työvaroja. Malliin muotoiltiin ainoastaan valamisen kannalta oleelliset pääpiirteet, kuten päästöt.

Mallin piirteille historiapuuhun muodostui seuraava järjestys:

1. Osat 1 ja 2
2. Päästöt ja muotoilut osalle 1
3. Osa 3
4. Päästöt ja muotoilu osalle 3
5. Osa 4
6. Loput päästöt
7. Pyöristykset
8. Koneistukset

Rungon eri osien piirteet mallinnettiin käyttämällä hyväksi työtasoja, jotka mitoitettiin samasta pisteestä. Se mahdollisti osien mallintamisen edellä mainitussa järjestyksessä, jolloin esimerkiksi osa 4 ei ollut osien 1 ja 3 muotoilun esteenä (Kuva 20), eikä eri osien muokkaaminen tuhonnut myöhempiä piirteitä.



Kuva 20. Runko ennen osan 4 mallintamista

Kuvassa 21 esiintyvän ensimmäisen mallin valmistuttua siitä luotiin versio ilman koneistuspiirteitä, josta valmistettiin luonnollisen kokoinen muovinen mallikapale 3D-tulostamalla polylaktidista (PLA).



Kuva 21. Ensimmäinen malli

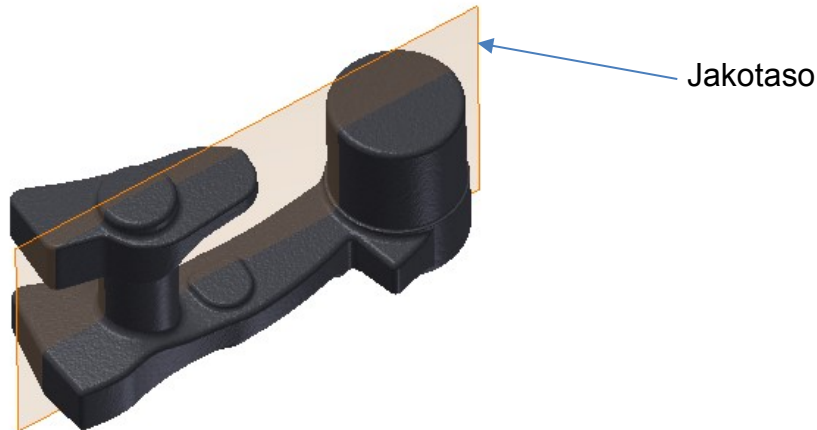
Mallikappaleen valmistuttua päästiin vierailemaan Componenta Oy:n Karkkilan valimolle, missä valimon edustajat arvioivat ensimmäisen mallin valmistettavuutta. Valimolla muovinen mallikappale osoittautui erinomaiseksi havainnollistamisvälineeksi.

5.4.2 Toinen versio

Valimolta saadun palautteen jälkeen päädyttiin asettamaan jakotaso suoraan kuvion 17 mukaisesti konekaavauksen helpottamiseksi. Valimon mielestä tämä olisi paras vaihtoehto siksi, että kaavaus voidaan suorittaa tavanomaisilla kaavauskehysillä ilman lisälaitteita, eivätkä sylinteripinnat vaadi erillisiä päästöjä, koska niillä on tällöin niin sanotut luonnolliset päästöt.

Valimon edustaja suositteli luopumaan keernojen käytöstä ja mallintamaan rungon siten, että rajoittimet saavat muotonsa valun jälkeen koneistamalla, sillä keernoja käytettäessä on suuri riski, että valettaessa keernat pääsevät nousemaan muotissa ylöspäin ja tässä tapauksessa keernojen tuoma hyöty suhteessa lisäkustannuksiin jäisi hyvin pieneksi. Keernojen käytöstä luovuttiin myös reikien osalta, sillä kaikki reiät täytyy koneistaa mittatarkoiksi joka tapauksessa ja ne ovat halkaisijoiltaan niin pieniä, ettei keernoista olisi hyötyä.

Toinen versio mallinnettiin käyttämällä ensimmäistä versiota hyödyksi. Kuvassa 22 keernoja tarvitsevat muodot ovat mallinnettuna umpeen siten, että ne saavat muotonsa, kun ylimääräinen materiaali koneistetaan pois.



Kuva 22. Valumallin toinen versio

Valimon edustajan näkemyksen mukaisesti suoralla jakotasolla tämä kappale soveltuu parhaiten valettavaksi kuvan 22 mukaisessa pystyasennossa. Koska jakotaso olisi silloin pystyssä, soveltuu kappale parhaiten valettavaksi Disamatic-menetelmällä kaavattuun pullamuottiin, jossa muodostuva jakotaso on pystyssä. Tällöin syöttökanava ja mahdollisesti tarvittava syöttökupu voidaan asettaa osan 2 tai 3 päälle, jolloin suunnattu jäähtyminen alkaisi kappaleen varren keskeltä ylöspäin, eikä silloin mahdollisesti syntyvät kuonasulkeumat tai imuviat muodostu varteen, joka on rungon kriittisin osa. Osa 2 sen sijaan sietää pieniä imuonteloita, erityisesti jos ne muodostuvat täysin keskelle, josta materiaali koneistetaan pois.

Anturin johtojen läpiviennin kohdan leveyden saaminen oli haasteellista. Sen takia täytyi tehdä varren päästä tarpeettoman leveä, että läpiviennin piirteille saisi mallinnetuksi päästöt.

Hydraulisynterinin kiinnitystapin lukitsemiseksi varteen muotoiltiin kuvassa 23 näkyvä uloke, jonka sisäpuolella on upotus sylinterintapin päätylaipalle sekä lukitusruuvien reiät. Tällöin tapin lukitukseen käytettävien kuusiokolopulttien kannat eivät kolhiudu käytössä.



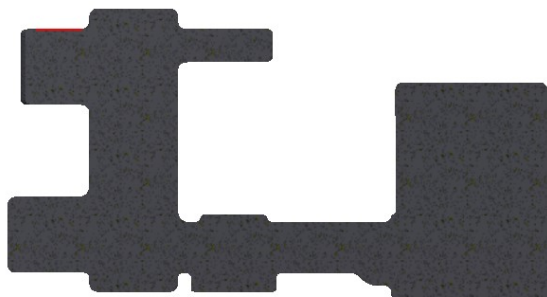
Kuva 23. Sylinterin kiinnitystappi mallissa paikoillaan ilman lukitusruuveja

Lukitusruuvien reiät pyrittiin sijoittamaan mahdollisimman lähelle varren neutraaliakselia, sillä jännityshuippuja aiheuttavat muodot olisi sijoitettava matalan nimellisjännityksen omaaviin kohtiin, jotta ne heikentäisivät rakennetta mahdollisimman vähän.



Kuva 24. Toinen versio koneistuspiirteillä

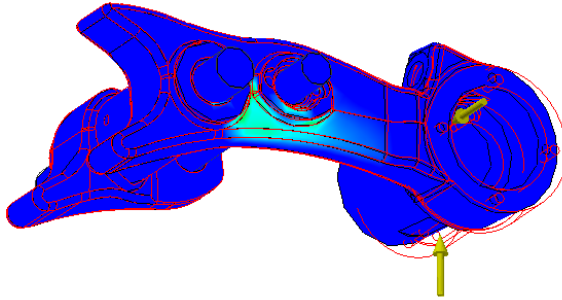
Kuvassa 24 toinen malli on toiminnallisesti valmis, mutta kuten kuvasta 25 näkee, ei malli ole valuteknillisesti ihanteellinen suunnatun jäähtymisen kannalta.



Kuva 25. Kappaleen halkileikkaus jakotason kohdalta

Kuvan 25 poikkileikkauksesta pääteltiin, että akseleiden kiinnitystä varten mallinnettujen ulokkeiden välissä oleva ohuempi kohta jäähtyisi liian nopeasti, minkä takia ulokkeisiin tulisi valettaessa todennäköisesti sisäisiä imuvaurioita mitä ei sallita, sillä varsi altistuu suurimmille rasituksille ja sen on siksi oltava

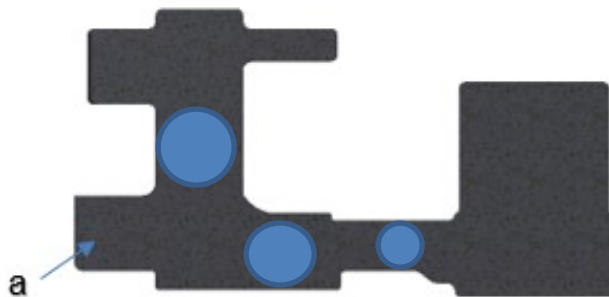
mahdollisimman virheetön. Lisäksi kuvan 26 FEM-analyysissä sivuttaisvoima yhdessä sylinterin voima kanssa aiheutti jännityskeskittymän akseleiden reikien välille, joten rungon varteen päätettiin tehdä vielä muutoksia.



Kuva 26. Toisen version FEM-analyysi

5.4.3 Kolmas versio

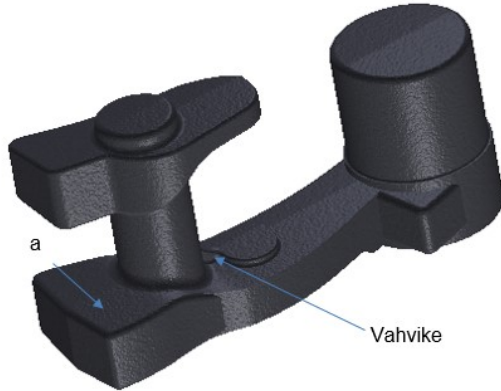
Kolmanteen versioon lisättiin pieni vahvike osien 1 ja 3 väliin ja akseleiden ulokkeet yhdistettiin yhdeksi piirteeksi, mikä edesauttaa suunnattua jäähtymistä. Toimenpiteistä huolimatta on riski, että oikeanpuoleisen rajoittimen sisään jää imuja (kuvien 27 ja 28 kohta a). Mitä todennäköisimmin ne kuitenkin jäävät rajoitinpinnojen väliin, jolloin niistä ei ole toiminnallista haittaa, sillä niiden välistä koneistetaan materiaali pois kaikkine imuineen.



Kuva 27. Kolmannen version leikkauskuva suunnatun jäähtymisen tutkimiseksi

Kolmannen version leikkauskuvasta (kuva 27) näkee, että Heuversin menetelmällä piirretyt ympyrät mahtuvat kaikki poistumaan samaa reittiä, jolloin voidaan todeta kappaleen jäähtyvän suunnatusti varresta kohti syöttökupua.

Malliin lisättiin vielä pieni vahvike (Kuva 28), sillä sen huomattiin FEM- analyysin perusteella pienentävän kyseisen kohdan jännityshuippua, mikä aiheutuu mittapyörään kohdistuvasta sivuttaisvoimasta.



Kuva 28. Valumallin kolmas versio

Tässä vaiheessa kuvan 28 mukaisen rungon valunjälkeiseksi painoksi Inventor ilmoitti 4099 g ja kuvan 29 koneistuksen jälkeiseksi painoksi 2422 g, mikä tarkoittaa sitä, että rungosta poistuu koneistamisen seurauksena noin 1,7 kg valurautaa. Koneistusjätteenä rautaromuksi menevä materiaali voidaan kuitenkin kierrättää kuten muukin metalliromu.



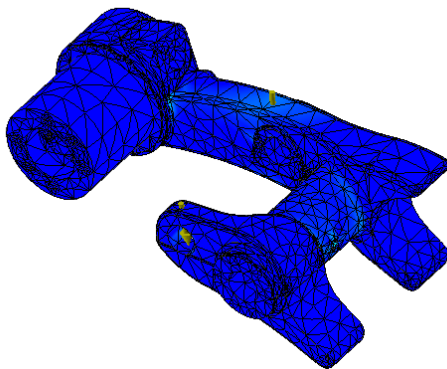
Kuva 29. Valmiiksi mallinnettu kolmas versio

6 LUJUUSTARKASTELU

Rungon lujuustarkastelu suoritettiin FEM-menetelmällä käyttäen Inventorin Stress Analysis -työkaluja. Tulosten paikkansapitävyys varmistettiin laskemalla rasitetuimpien kohtien reunajännitykset käsin käyttäen kaavoja 6-9.

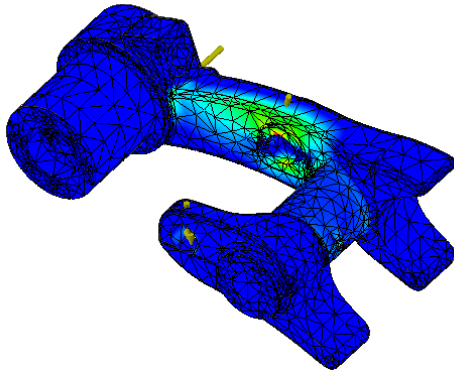
Rungon jännityksiä tarkasteltiin neljän eri tapauksen kautta, jotka ovat tavanomaisia rungon todellisessa käyttöympäristössä. Kaikissa tapauksissa runko oli sidottu avaruuteen Pin constraint -työkalulla, mikä vastaa kiinnitysakselia, jolla runko kiinnitetään harvesterikouraan.

Ensimmäisessä tapauksessa simuloitiin rungon tavanomaisin tilanne, jossa runko on rasitettu suurimmalla sylinterin aiheuttamalla voimalla F_{sMax} . Rungon etupäää tuettiin avaruuteen Frictionless -työkalulla, mikä vastaa riittävän tarkasti todellista tilannetta, missä runko tukeutuu mitattavaa puuta vasten piikkiyörälään. Kuvassa 30 näkyvät keltaiset nuolet ovat asetettu hydraulisynterinin kiinnitysakselin reikiin vastaamaan sylinterin aiheuttamaa voimaa. Tässä tapauksessa runko ei rasitu paljoa ja siksi suurimmat jännitykset näkyvät kuvassa vaaleina rasittamattomien kohtien ollessa sinisiä.



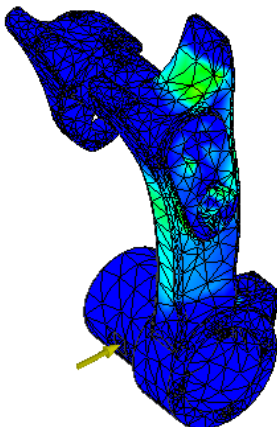
Kuva 30. Ensimmäinen tapaus

Toisessa tapauksessa simuloitiin tilannetta, jossa puu pyörähtää karsinnan aikana. Tällöin runkoon kohdistuu sylinterin tuottaman voiman lisäksi sivuttaisvoima, jonka arvioitiin olevan korkeintaan noin 2000N. Voimat ja kappaleen kiinnitykset asetettiin muuten samoin kuin ensimmäisessä tapauksessa. Kuvasta 31 näkee, kuinka yhdistetty sylinterin voima, sekä sivuttaisvoima rasittavat rungon vartta erityisesti hydraulikkasyylinterin kiinnitystapin reiän kohdasta.



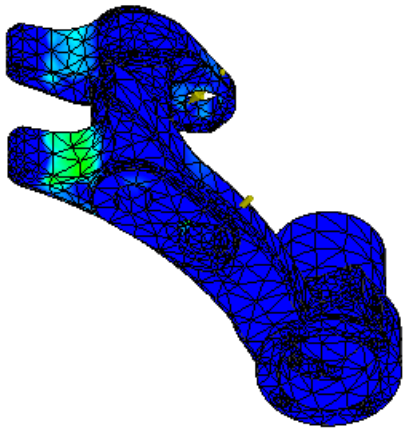
Kuva 31. Toinen tapaus

Kolmannessa tapauksessa simuloitiin tahatonta tilannetta, jossa esimerkiksi ok-san tyvi painaa mittapyörän ääriasentoonsa rajoitinta vasten, kun kouralla tartutaan kiinni puun runkoon. Tässä tapauksessa runko kiinnitettiin vain Pin Constraint -työkalulla kuten aiemmissakin tapauksissa sekä Frictionless -työkalulla vastimen suorasta pinnasta. Kuvan 32 FEM-analyysistä huomataan, että suurin jännitys aiheutuu tässä tilanteessa rajoittimen tyveen sekä varren alapuolelle.



Kuva 32. Kolmas tapaus

Neljännessä tapauksessa simuloitiin tilannetta, jossa sylinteri tai jousipaketti painattaa mittapyörää uloimpaan ääriasentoonsa, jolloin alemmat rajoittimet pysäyttävät liikkeen osuttuaan kumivaimentimeen. Runko on kiinnitetty Pin constraint -kiinnityksen lisäksi Frictionless-työkalulla kummastakin alapuolen rajoittimesta. Kuvasta 33 nähdään, että oikeanpuoleisen rajoittimen pintajännitys on suurempi, vaikka rajoittimien profiili on yhtä suuri. Suurempi jännitys johtuu luultavammin ylärajoittimen muodon aiheuttamasta epäjatkuvuudesta.



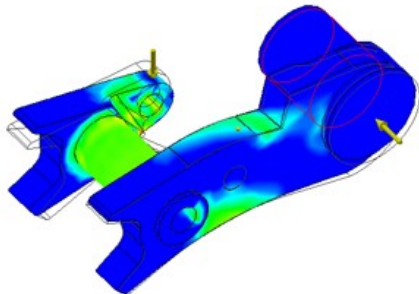
Kuva 33. Neljäs tapaus

7 VERTAILU HITSATTUUN KOKOONPANOON

Mittapyörän rungon valettu versio painaa noin 2400 g, kun taas alkuperäinen hitsattu versio noin 3100 g. Painon eroa valetun rungon eduksi kertyy siis noin 900 g, mikä tarkoittaa, että valettu runko on noin 29 % kevyempi kuin alkuperäinen.

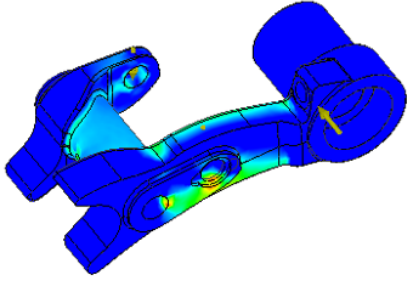
Alkuperäinen runko on valmistettu levyosista sekä ainesputkesta käyttäen eri lujuisia teräsmateriaaleja. Levyosat on valmistettu polttoleikkaamalla ja sylinterimäiset osat sorvaamalla, mikä vaatii automatisoiduista polttoleikkaus- ja koneistustyövaiheista huolimatta paljon käsityötä, erityisesti hitsaajalta. Valetun rungon työläimmiksi käsityövaiheiksi jää valun jälkeinen puhdistus, sekä paikoitus ennen koneistusta.

FEM-analyyseistä (Kuvat 34 ja 35) huomaa, että alkuperäinen ja valettu runko käyttäytyvät kuormitettuna hyvin samankaltaisesti. Valetun rungon rasitukset samalla kuormalla ovat tarkoituksen mukaisesti jopa kaksinkertaiset alkuperäiseen nähden, minkä mahdollistaa valumateriaalin huomattavan suuri lujuus.



Kuva 34. Alkuperäinen mittapyörän runko

FEM-analyyseistä otettujen kuvien 34 ja 35 jännityksiä kuvaavat värit eivät ole täysin verrattavissa toisiinsa, sillä Inventor esittää rakenteessa esiintyvän suurimman jännityksen aina punaisena, pienimmän sinisenä ja skaalaa muut värisävyt sen mukaan. Suurimmat punaisella värillä näkyvät jännitykset esiintyivät kummankin rungon tapauksessa osan 2 alapuolelle asetetun voiman aiheuttamana pintapaineena, millä ei tässä tapauksessa ole mitään väliä, sillä todellisuudessa sen voiman aiheuttama pintapaine jakautuu tasaisesti huomattavasti isommalle alalle piikkiäpyörän laakerin kautta.



Kuva 35. Valettu mittapyörän runko

8 POHDINTA

Tämän työn tavoitteina oli suunnitella mittapyörän runko valmistettavaksi va-
luosana, sekä optimoida sen rakenne mahdollisimman lujaksi ja kevyeksi. Lisäksi
oli tarkoitus ottaa kantaa siihen, onko rungon valmistaminen valamalla valmistus-
teknillisesti järkevää.

Jo alusta lähtien rungon valmistaminen valamalla vaikutti olevan valmistustekni-
lisesti mahdollista, vaikkakin jakotasoä määriteltäessä se alkoi vaikuttaa haas-
teelliselta.

Valetun rungon noin 29 % painonsäästö on mielestäni erittäin hyvä saavutus,
vaikka rungon rakenteen voisi mitoittaa käyttäen vieläkin suurempia jännityksiä
materiaalin ja painon säästämiseksi. Suurempien jännitysten käyttö rungon suun-
nittelussa vaatii kuitenkin materiaalin kokemusperäistä tuntemusta, tai edes lu-
kuisiin kokeisiin perustuvan tarkan Smith-piirroksen. Lisäksi olisi tunnettava tark-
kaan runkoon kohdistuvat kuormitukset, jotka vaihtelevat tässä tapauksessa to-
della paljon. Niiden toteamiseksi voisikin tehdä mittauksia käytännössä, esimer-
kiksi venymäliuskenetelmällä. Se olisi kuitenkin erittäin haasteellista johtuen
mittapyörän olosuhteista, joten on teknis-taloudellisesti järkevämpää perustaa
laskelmat kokemusperäisiin ja laskennallisiin tietoihin.

Taivutuskuormituksille altistuvien rungon osien mitoittamiseen voisi mielestäni
käyttää tietokoneperustaista laskentaa, kuten MathLab- ohjelmistoa, sillä valu-
kappaleen vaatimat päästöt tekevät rungon profiilista laskennallisesti niin moni-
mutkaisen, ettei sen optimaalinen mitoitus rasituksen suhteen ole käsin laske-
malla kohtuullista, jos edes mahdollista.

Tämän opinnäytetyön tuloksena syntynyt malli on jo toiminnallisesti niin valmis,
että sen pohjalta voisi valmistaa ensimmäisen prototyypin jatkotutkimuksia ja -
kehittelyä varten.

LÄHTEET

AHC 2018. Fettling. Viitattu 26.1.2018. <http://www.ahd.fr/fettling-heat-treatment/>.

Alhainen, P. 2018. Kesla Oyj. Tuotesuunnittelijan haastattelu 26.1.2018.

Asanti, P. 1962. Valukappaleen suunnittelu. Porvoo: Werner Söderström osakeyhtiö.

Caffier Barreau Industries 2018. Disamatic. Viitattu 20.1.2018. <http://www.caffier-barreau.com/>.

Componenta Oyj 2018a. Image bank. Viitattu 15.1.2018. http://www.componenta.com/media/image_bank/?dirid=17.

Componenta Oyj 2018b. Sanasto. Viitattu 24.1.2018. http://www.componenta.com/fi_media/fi_glossary/.

Digma 2018. Taivutusjännitys. Viitattu 23.2.2018. <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/material/attachments/vanhaamk/digma/5h5F56QYb/LOS19.pdf>.

Hiltunen, L. 2009. Valaminen ja valamisessa huomioitavat seikat sekä selvitys teräs- ja rautavaluja tekevistä yrityksistä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Kandidaatintyö ja seminaari.

Honkavaara, T. 2014. Valutuotteiden suunnitteluopas. Viitattu 15.1.2018. http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/valutuotteiden_suunnitteluopas.pdf.

Höök, T., Meskanen, S., Orkas, J. & Tennilä, P. 2017. Suunnittelijan perusopas, valukappaleen hankinta. Viitattu 17.1.2018. <http://www.valuatlas.fi/?q=node/281>.

Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. 1995. Valmistustekniikka. 5., Uudistettu painos. Espoo: Otatieto.

Isojoen Konehalli Oy 2018. VETOVARSI VALTRA 940MM CAT3 OIK. 35471420 T565114 – IKH. Viitattu 24.1.2018. <https://www.ikh.fi/fi/vetovarsi-valtra-940mm-cat3-oik--35471420-t565114>.

Keskinen, R. & Niemi, P. 2007. Muotinvalmistustekniikka. Viitattu 16.1.2018. <http://www.valuatlas.fi/?q=node/184>.

Kesla Oyj 2017. Keslan historia - 60-luvulta nykypäivään. Viitattu 15.12.2017. <http://www.kesla.fi/fi/yritys/kesla-60-luvulta-nykypaivaan/>.

Kesla Oyj 2018. Tuotekehitys.

Silvapol 2018. KESLA maszyny i urządzenia leśne. Viitattu 23.3.2018. <http://www.kesla.pl/glowice-kroczone20sh-25sh.html>

Kvist, M. 2017. 3D-tulostuslaitteiston huolto ja käyttöönotto. Lapin AMK, tekniikka ja liikenne. opinnäytetyö.

Lahti, R. 2007. FM-käytön järjestelmän kehittäminen. Tampereen ammattikorkeakoulu. tutkintotyö.

Meskanen, S., Höök, T., Niini, E., Orkas, J., Piha, O., Tiainen, T. & Toivonen, P. 2017. Hiekkavalimon valimoprosessi. Viitattu 29.12.2017. <http://www.valuatlas.fi/?q=valimoprosessi>.

Meskanen, S., Höök, T., Niini, E., Orkas, J., Piha, O., Tiainen, T. & Toivonen, P. 2017b. Valimotekniikan perusteet. Valuatlas. Viitattu 18.12.2017. http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_johd_johdanto.pdf.

Meskanen, S., Höök, T., Niini, E., Orkas, J., Piha, O., Tiainen, T. & Toivonen, P. 2018. Valimotekniikan perusteet. Viitattu 15.1.2018. http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_mat_valuraudat.pdf.

Metsäteho Oy 2017. Juurikäävän torjunta kantokäsittelyllä. Viitattu 25.12.2017. http://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/2015/03/Juurikaavan_torjunta_kantokasittelylla_opas.pdf.

Niemi, P. 2010. Suunnattu jähmettyminen. http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_valun suunnittelu_11.pdf.

Ovaskainen, H. 2012. Koneellinen puunkorjuu. Metsätehon opas. Viitattu 21.12.2017. <http://puuhuolto.fi/koneellinen-puunkorjuu/koneellinen-puutavaranvalmistus/>.

Pitenius, T. 2017. Traktorin käyttö. Viitattu 21.12.2017. http://www.luonnossa.org/Metsanhoito/Traktorin_kaytto/body_traktorin_kaytto.html.

Ponsse Oyj 2017. harvesteripäät. Viitattu 21.12.2017. <http://www.ponsse.com/fi/tuotteet/harvesteripaeet>.

ProSilva Oyj 2017. Hakkuupäät. Viitattu 21.12.2017. <http://www.prosilva.fi/fi/tuotteet/hakkuupaet>.

Pulkkinen, M. 2009. Lämpötilan vaikutus puun rungon mekaanisessa pituudenmittauksessa. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Puutekniikka. Opinnäytetyö.

Sairanen, T. 2011. Valukappaleen koneistuksen optimointi, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta, Kandidaatintyö.

Salmi, T. & Pajunen, S. 2010. Lujusoppi, Tampere: Pressus Oy.

Sampo-Rosenlew 2018. HR46x Harvesteri. Viitattu 8.1.2018. <http://www.sampo-rosenlew.fi/fi/media-center/pressikuvat/hr46-harvesteri.html>.

Sandvik Coromant 2018. Austemperoidut pallografiittivaluraudat (ADI) K 5.1–5.3. Viitattu 29.1.2018. [https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_k_cast_iron/pages/austempered-ductile-iron-\(adi\)-k-5.1--5.3.aspx?_t_id=1b2m2y8asgtpgamy7phcfg==&_t_q=&_t_tags=language:en&_t_ip=66.249.73.151&_t_hit.id=web_content/d1ba3ee92e27b50408f1b52520f1f5abedc0f8a1&_t_hit.pos=499](https://www.sandvik.coromant.com/fi-fi/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_k_cast_iron/pages/austempered-ductile-iron-(adi)-k-5.1--5.3.aspx?_t_id=1b2m2y8asgtpgamy7phcfg==&_t_q=&_t_tags=language:en&_t_ip=66.249.73.151&_t_hit.id=web_content/d1ba3ee92e27b50408f1b52520f1f5abedc0f8a1&_t_hit.pos=499).

SFS-EN 1564. 2014. Valut. Ausferriittiset pallografiittivaluraudat. Helsinki:SFS.

Sol Lare, M. 2015. Expandable Pattern Casting and Plaster Mold Casting. Viitattu 29.1.2018. <https://www.slideshare.net/msol0829/expandable-pattern-casting-and-plaster-mold-casting>.

Soininen, P. 2018. Images. Viitattu 16.1.2018. http://userscontent2.emaze.com/images/7492e6d1-7801-4e64-86dc-49fa2e0bc57f/Slide6_Pic2_636100525941998076.png.

Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto 1984. Raaka-ainekäsikirja, valuteräkset, valuraudat.

Tekninen tiedotus 1985. Pallografiittiraudan, adusoidun raudan ja valuteräksen väsymisominaisuudet. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Valtanen, E. 2008. Tekniikan taulukkokirja, 16., uudistettu painos. Jyväskylä: Genesis-Kirjat Oy.

Vonroll casting 2018. Austempered ductile iron (ADI). Viitattu 11.1.2018. <http://www.vonroll-casting.ch/en/austempered-ductile-iron-adi.html>.

VTT Expert Services Oy 2018. Metallien analytiikka. Viitattu 27.1.2018. <http://www.vttexpertservices.fi/palvelut/testaus-ja-tarkastus/rakentamisen-tuotteet-ja-materiaalit/rakennusmateriaalien-testaus/metallien-analytiikka>.