

Markus Ketonen

Formula SAE -kilpa-auton alumiini- ja komposiittivanteiden suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Auto- ja kuljetustekniikka

Insinöörityö

5.5.2014

Tekijä(t) Otsikko Sivumäärä Aika	Markus Ketonen Formula SAE -kilpa-auton alumiini- ja komposiittivanteiden suunnittelu 51 sivua + 1 liite 2.5.2014
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja(t)	Erikaisopettaja Pasi Oikarinen
<p>Insinööriyössä käsitellään Metropolia Ammattikorkeakoulun Formula SAE/Student -projektin uuden HPF014e-kilpa-auton alumiini- ja komposiittivanteiden suunnittelun ja valmistuksen vaiheet.</p> <p>Tavoitteena oli suunnitella helposti valmistettavat ja luotettavat alumiinivanteet, jotka saadaan valmistettua nopeasti tarpeen vaatiessa, sekä toimivat ja kevyet komposiittivanteet, joiden valmistamiseen ja testaamiseen voidaan varata enemmän aikaa.</p> <p>Vanteiden geometria suunniteltiin kokemusperäisen tiedon ja ETRTO:n standardien avulla. Mallinnus ja lujuusmitoitus tehtiin CATIA-3D-mallinnusohjelmiston avulla. Lujuuslaskennan kuormitustilat määriteltiin ajoneuvodynamiikan ja tiedonkeruun avulla. Lujuuslaskenta tehtiin myös vanhalle pitkään käytössä olleelle vanteelle kuormitustilojen todentamiseksi.</p> <p>Muottien suunnittelussa apuna oli CSI Oy:n teoria- ja kokemuspohjainen osaaminen sekä alan kirjallisuus.</p> <p>Itse suunnittelun ohella työssä on hyödynnetty formulaprojektin aikana opittua projektin- ja riskinhallintaa, jotta kilpa-auton valmistuminen pysyy aikataulussa ja mahdollisten takaiskujen kohdatessa varasuunnitelma on olemassa jo valmiiksi.</p> <p>Vanteiden suunnittelussa onnistuttiin asetetun aikataulun puitteissa, ja kaikki suunnittelulle asetetut tavoitteet saavutettiin. Työn julkaisuvaiheessa vanteiden testausta ei ole vielä suoritettu.</p>	
Avainsanat	Formula SAE, Formula Student, Formula Student Electric, vanteet, mekaniikkasuunnittelu, lujuuslaskenta, ajoneuvotekniikka, komposiitit, Resin Transfer Moulding, RTM

Author(s) Title Number of Pages Date	Markus Ketonen Design of Aluminum and Composite Wheels for a Formula SAE Racecar 51 pages + 1 appendix 2 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive and Transport Engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor(s)	Pasi Oikarinen, Lecturer
<p>This Thesis describes the design and manufacturing processes of aluminum and composite wheels of the new HFP014e race car designed and manufactured by Helsinki Metropolia UAS Formula SAE / Student project.</p> <p>The objectives were to design both easy to manufacture and reliable aluminum wheels, which can be manufactured in very brief time if required, and functional lightweight composite wheels, for which more manufacturing and testing time can be contributed.</p> <p>Wheel geometry was designed on the basis of first-hand experience and ETRTO standards. Modeling and structural analysis was carried out with CATIA 3D software. Load cases for the structural analysis were determined with vehicle dynamics principles and data acquisition of the previous race car. Structural analysis was also performed on the existing wheel model to establish a basis for comparison to a functional product.</p> <p>Mold design was done with the help of theoretical and empirical knowledge of CSI Oy and the literature of the field.</p> <p>In addition to the actual wheel design, experience from the Formula-project was utilized to achieve satisfactory time and risk management. This management enabled the project to keep on schedule and ensured a backup plan in case of any drawbacks.</p> <p>The design work was done successfully to set schedule, and all the objectives set for the Thesis were met. Testing of the wheels has not been carried out yet at the time of the publication of this Thesis.</p>	
Keywords	Formula SAE, Formula Student, Formula Student Electric, wheels, rims, mechanical design, structural analysis, automotive, composites, Resin Transfer Moulding, RTM

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Vanteiden suunnittelu	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Vanteen päämitat	3
2.3	Vanteen kehän geometria	4
2.3.1	Kehän geometrian suunnittelu	4
2.3.2	Rengasasennuksen varmistus	6
2.4	Komposiitivanteen suunnittelu	8
2.5	Alumiinivanteen suunnittelu	9
3	Materiaalit	10
3.1	Alumiini	10
3.2	Komposiitti	11
3.2.1	Laminaattirakenne	11
3.2.2	Laminaatin mitoitusarvot	11
3.2.3	Mitoitusarvojen riippuvuus kuitusuunnista	13
3.2.4	Lujitteet	14
3.2.5	Matriisi	15
4	Laskennallinen kuormitus	15
4.1	Kuormitustilojen määrittely	15
4.2	Sivuttaiskiihtyvyyden aiheuttama kuormitus (kaarreaajo)	16
4.2.1	Laskentaperiaate	16
4.2.2	Pystyvoiman laskenta	17
4.2.3	Vaakavoiman laskenta	17
4.3	Pitkittäiskiihtyvyyden aiheuttama kuormitus (kiihdytys)	17
4.3.1	Laskentaperiaate	17
4.3.2	Pystyvoiman laskenta	18
4.3.3	Painopisteen sijainti pitkittäissuunnassa	18
4.3.4	Vaakavoiman laskenta	19
4.4	Pitkittäiskiihtyvyyden aiheuttama kuormitus (jarrutus)	19
4.5	Yhdistelmäkuormitus (jarrutus mutkaan / kiihdytys mutkasta)	19
4.6	Töyssyn aiheuttama kuormitus	20

4.7	Laskenta-arvojen vertailu tiedonkeruudataan	20
4.7.1	Vertailudata	20
4.7.2	Sivuttaiskuormitus	21
4.7.3	Pitkittäiskuormitus	21
4.7.4	Yhdistelmäkuormitus	21
5	Vanteiden kiinnityksen mitoitus	22
5.1	Mitoitusperiaate	22
5.2	Kitkaliitos ja mutterin kiristysmomentti	22
5.3	Muotolukituksen mitoitus	23
6	Lujuuslaskenta	24
6.1	Laskentaohjelma	24
6.2	Rajaehdot	24
6.3	Kuormitustilat	25
6.4	Vanha alumiinikeskiö	27
6.4.1	Eroavaisuudet	27
6.4.2	Malli	27
6.4.3	Tulokset	28
6.5	Alumiinikeskiö	28
6.5.1	Tavoitteet	28
6.5.2	Malli	29
6.5.3	Tulokset	29
6.6	Komposiittivanteen lujuuslaskenta	30
6.6.1	Tavoitteet	30
6.6.2	Malli	30
6.6.3	Tulokset	31
7	RTM (Resin Transfer Moulding)	32
7.1	Valmistusmenetelmän kuvaus	32
7.2	Muottien valmistelu	33
7.3	Kuitujen asettelu	33
7.4	Injektointi	33
7.5	Kovetus	33
7.6	Osan poisto muoteista	34
7.7	Jälkikovetus	34
7.8	Lopullinen muotoilu	34
8	Muottien suunnittelu	34

8.1	Muottien suunnitteluperiaate	34
8.2	Sulkuvoiman laskenta	35
8.3	Lämpölaajenemiskompensaation laskenta	35
8.4	Muottivälyksen laskenta	36
8.5	Kehämuotin lujuuslaskenta	36
8.6	Sisämuotit	37
8.7	Puolien muotit	38
8.8	Kehämuotit	39
8.9	Sulkulevyt	40
8.10	Injektointikanavat	41
8.11	Työkalut	41
	8.11.1 Tarvittavat työkalut	41
	8.11.2 Sisämuottien irrotustyökalut	41
	8.11.3 Puolamuotin ulosvetotyökalu	42
9	Valmistus	43
	9.1 Alumiinikeskiöt	43
	9.2 Muotit	43
	9.3 Komposiittivanteet	44
10	Testaus	46
11	Yhteenveto	48
	Lähteet	50
	Liitteet	
	Liite 1. Esimerkki kohdistusholkin työkuvasta.	

Lyhenteet

RTM	Resin Transfer Molding
SAE	Society of Automotive Engineers
FSAE	Formula SAE
FS	Formula Student
ET	Vanteen "offset"-luku eli keskilinjan etäisyys asennuspinnasta
ETRTO	European Tyre and Rim Technical Organization
HPF	Helsinki Polytechnic Formula (auton tyypimerkintä)
NCF	Non-crimp Fiber lujitetyyppi, joka koostuu useammasta UD-kerroksesta
UD	Unidirectional, lujitetyyppi, joka koostuu yhdensuuntaisista kuiduista
QI	Quasi-isotropic, kvasi-isotrooppinen laminaatti
CATIA	Computer Aided Three Dimensional Application, Dassault Systemesin 3D-mallinnusohjelmisto

1 Johdanto

Formula SAE on suunnittelukilpailu, jossa korkeakouluopiskelijoiden muodostamat joukkueet kilpailevat itse suunnittelemissaan formula-tyyppisillä kilpa-autoilla. Kilpailu on syntynyt SAE Baja -kilpailun pohjalta Yhdysvalloissa 1970-luvun lopulla, ja alunperin se tunnettiin nimellä SAE Mini Indy.

Eurooppaan kilpailu rantautui vuosituhaten vaihteessa Englannissa perustetun Formula Student -kilpailun myötä. Puolta vuosikymmentä myöhemmin kilpailu alkoi saada jalansijaa muuallakin Euroopassa Saksan ja Italian kisan myötä, ja tällä hetkellä kilpailuja käydään myös Itävallassa, Unkarissa, Tšekissä ja Espanjassa. Joka vuosi Euroopassa kilpaillaan myös Helsingissä perustetussa, eri maita ja kaupunkeja kiertävässä Baltic Open -kilpailussa.

Kilpailu rakentuu seitsemän eri osion varaan, jotka voidaan karkeasti jaotella kahteen eri tyyppiin: staattisiin osioihin, joissa kilpailun tuomarit pisteyttävät auton suunnittelutyön ja dynaamisiin osioihin, joissa autoilla ajetaan erilaisia suorituskykykokeita. Staattisiin osioihin kuuluu suunnittelutyötä arvosteleva ”Engineering Design”, kustannustehokkuutta arvosteleva ”Cost” ja taloudellista kannattavuutta ja markkinointia arvosteleva ”Presentation”, kun taas dynaamisista osioista löytyy omat kokeet pitkäikäis- ja sivutaiskiihtyvyydelle, ajettavuudelle, luotettavuudelle ja polttoainetaloudelle.

Helsingin Ammattikorkeakoulu Stadiaan vuonna 2002 perustettu Formula SAE -tiimi lukeutuu Euroopan vanhimpien ja arvostetuimpien tiimien joukkoon. Oppilaitoksen rakennemuutoksen ja nimenvaihdoksen myötä tiimi kulkee nykyään nimellä Metropolia Motorsport, ja sitä pyörittää vapaaehtoisista opiskelijoista koostuva samanniminen rekisteröity yhdistys. Tiimillä on takanaan 10 valmistettua autoa ja 12 aktiivista kilpakautta.

Uusimmassa HPF014e-sähkökilpa-autossa siirrytään käyttämään 10”-n vanteita aikaisemman 13” vanteen sijaan, koska saatavilla olevan rengasdatan perusteella parhaiten auton haluttuihin ominaisuuksiin sopivat renkaat ovat kaikki 10”-n vannekoolla. Lisäksi 10”-n vanteilla pystytään keventämään jousittamatonta massaa ja tavoitteeksi on asetettu 10 kg pienempi jousittamaton massa kuin edellisessä HPF013e-kilpa-autossa. Painonsäästöä saavutetaan keveämmillä renkailla (-6 kg), alumiinivanteilla (-4 kg) ja pyöräntuen komponenteilla (-1 kg).

Koska kilpasarjassa auton minimipainoa ei ole rajoitettu, pyritään myös vanteiden kohdalla mahdollisimman suureen painonsäästöön kilpailun luonne huomioiden (osien sarjavalmistettavuus). Täten on alumiinivanteiden lisäksi päätetty suunnitella ja valmistaa RTM (Resin Transfer Moulding)-menetelmällä hiilikuituvanteet. Komposiittivanteiden kanssa painonsäästön tavoitteeksi on asetettu 15 kg.

Insinööriyön tavoitteena on siis suunnitella kevyet komposiittivanteet ja niiden valmistamiseen tarvittavat muotit sekä auton 3-osaisiin varavanteisiin helposti valmistettavat ja luotettavat alumiinikeskiöt.

Tärkeänä osana tiimin työskentelyä ovat yhteistyökumppanit: vanteiden laminaatti lasketaan Componeering Oy:n tarjoamalla ESAComp ohjelmalla, muotit ja keskiöt valmistetaan Alumeco Oy:n lahjoittamasta alumiinista ja vanteet suunnitellaan ja valmistetaan yhteistyössä CSI Composite Solutions and Innovations Oy:n kanssa. Komposiittimateriaalien hankinnassa tukee Kevra Oy. Edellä mainitut ja muut työssä mainitsemattomat tiimiä tukevat yritykset ja yhteisöt tarjoavat projektin mahdollistavan elintärkeän tuen.

Lisäksi kiitos kuuluu Metropolia Ammattikorkeakoululle projektin ja päättötöiden tukemisesta, Henry Fordin Säätiölle, jonka tarjoaman apurahan turvin on tehty suuri osa insinööriyön esitöistä, sekä kaikille allekirjoittaneen kanssa samaan aikaan Metropolia Motorsportissa toimineille ja projektiin osallistuneille opiskelijoille.

2 Vanteiden suunnittelu

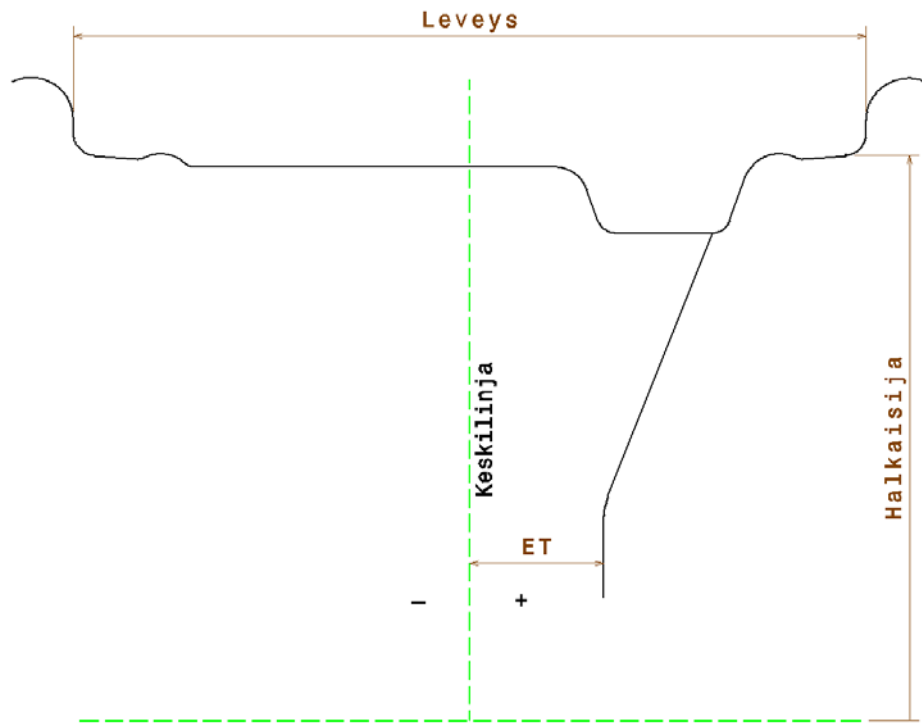
2.1 Yleistä

Vanteet suunniteltiin talven 2013 - 2014 aikana. Jo työn alkuvaiheessa päätettiin kaksien vanteiden valmistamisesta: päävanteiksi tehdään hiilikuituvanteet ja vara- / sadevanteiksi 3-osaiset alumiinivanteet, joissa käytetään Keizerin valmistamia kehiä. Tällä varmistetaan, että nopeasti valmistettavat ja luotettavasti toimivat alumiinivanteet saadaan auton alle varhaisessa vaiheessa ja komposiittivanteet voidaan tehdä ja testata ajan kanssa.

Vanteiden suunnittelu jakautuu karkeasti vanteen päämittojen valintaan ja kehän profiilin suunnitteluun sekä keskiön suunnitteluun ja lujuusmitoitukseen.

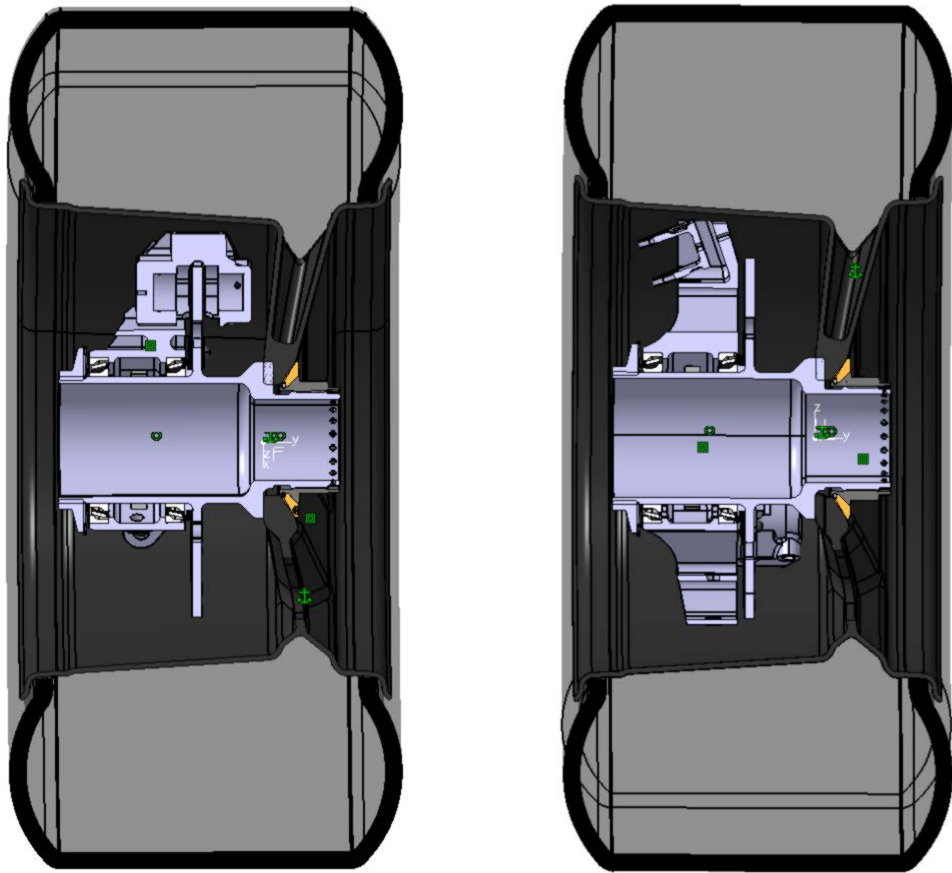
2.2 Vanteen päämitat

Vanteen päämitat määräytyvät suunnittelun alustageometrian, jousittamattoman rakenteen ja valitun rengaskoon (18 x 6 – 10”) perusteella. Vanteen päämitat ovat 10” halkaisija, 7,25” leveys ja 30 mm ET-luku (kuva 1). Virallinen kokomerkintä on 10x7,25JH ET30.



Kuva 1. Vanteen oleelliset päämitat - halkaisija, leveys ja ET.

Auton jousittamattoman rakenteen suunnittelu tehtiin samanaikaisesti vannesuunnittelun kanssa, jolloin voitiin käyttää molempiin rakenteisiin parhaiten soveltuvia ratkaisuja. Suurimman haasteen suunnittelulle asettaa autoon valittu suhteellisen pieni 10”:n vanne koko. Auton jousittamattomalle rakenteella käytössä olevan tilan vähyyttä havainnollistetaan kuvassa 2.



Kuva 2. Naparakenteen alustavan mallin poikkileikkaus jarrusatulan ja olka-akselin kohdalta - molemmissa näkyvä käytössä olevan tilan ahtaus.

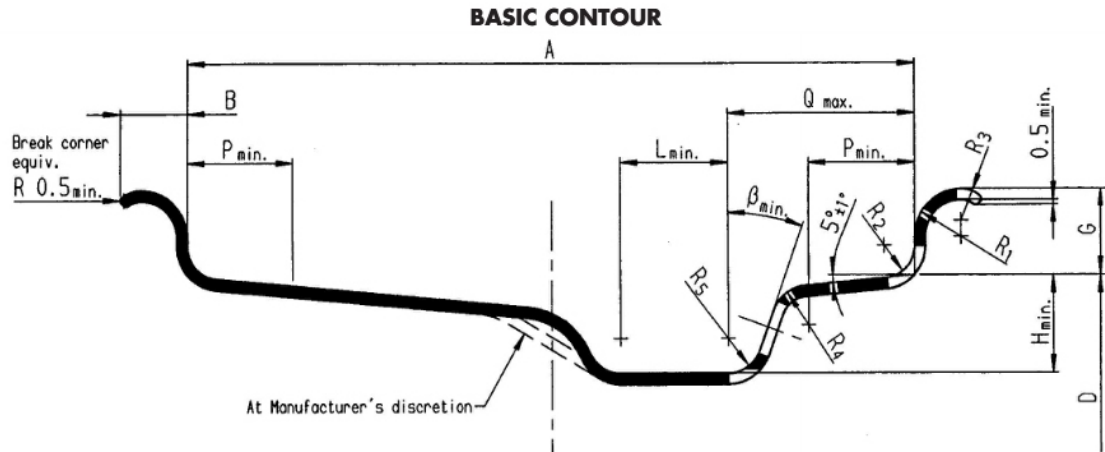
Vanteen rengaskokoon nähden suuren leveyden taustalla on mahdollisimman suuren sivuttaisvoiman tavoittelu ja matalampien rengaspaineiden käytön mahdollistaminen.

2.3 Vanteen kehän geometria

2.3.1 Kehän geometrian suunnittelu

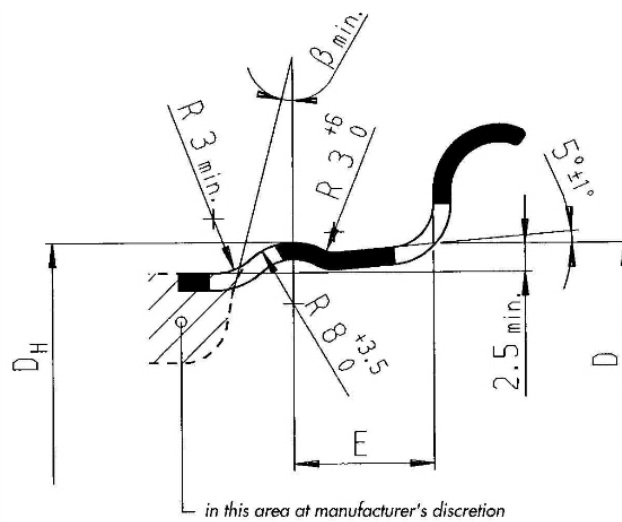
Vanteen kehän muoto on tärkeä renkaan asentamisen ja paikallaan pysymisen kannalta. Vanteen kehän muoto on johdettu European Tyre and Rim Organisationin (ETRTO:n) J-profiilista (kuva 3). Standardoidun profiilin taustalla on Euroopassa myytävien renkaiden ja vanteiden yhteensopivuuden ja asennettavuuden varmistus, joten standardinmukainen profiili toimii luotettavana pohjana oman kehägeometrian suunnittelulle.

10. DIAMETER CODE 10 to 28 on 5° DROP-CENTRE RIMS



Kuva 3. ETRTO:n rengas- ja vannestandardin J-profiili [1, s. R.9].

Sisärenkaattoman ns. tubeless-renkaan kanssa standardi suosittelee käyttämään renkaan paikallaan pitävää kohoumaa [1, s. R.11]. Vanteen kohoumien perustana on ETRTO:n H-profiili (kuva 4).



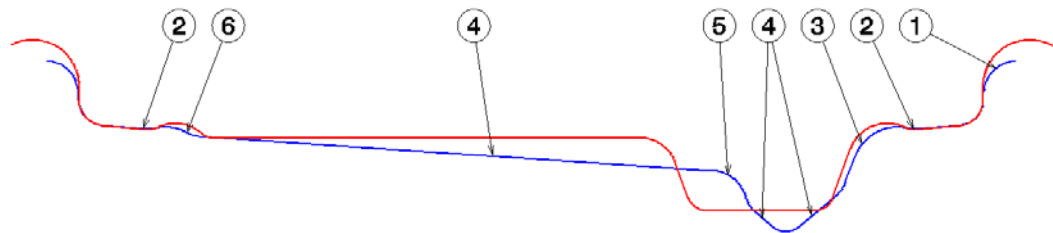
Kuva 4. ETRTO:n rengas- ja vannestandardin H-profiili [1, s. R.12].

Vanteen kehän geometriaa on muutettu käyttötarkoituksen (matala rengaspaine) ja valmistusmenetelmän (päästölliset pinnat) perusteella seuraavin muutoksien:

1. Kehän reunaa on madallettu ja lyhennetty rengasasennuksen helpottamiseksi.

2. Renkaan asennuspinnan nimellishalkaisijaa on kasvatettu ja kulmaa loivennettu renkaan paikallaan pysyvyyden parantamiseksi kuitenkin renkaan asennus ja muotin lämpölaajeneminen huomioon ottaen.
3. Renkaan varmistuskohoumaa on pienennetty rengastyön aikaisten rasiusten pienentämiseksi ja laminoinnin helpottamiseksi.
4. Sisämuottien toiminnallisuuteen tarvittavien päästöjen saavuttamiseksi kaikki kehän akselin suunnassa suorat pinnat on muutettu kartioiksi.
5. Rengasasennuksessa tarvittavaa syvennystä on kavennettu vanteen ja jarrukomponenttien välisen etäisyyden kasvattamiseksi akselin suunnassa. Muutos ei vaikuta juurikaan renkaan asennettavuuteen, sillä sarjan kilparenkaat ovat erittäin pehmeärunkoisia, jonka vuoksi ne tarvitsevat vähemmän asennustilaa leveyssuunnassa katurenkaisiin verrattuna. Lisäksi sisämuotin päästö (kohta 4) helpottaa rengasasennusta tässä suhteessa.
6. Varmistuskohouman sisäpuolista halkaisijaa on kasvatettu vanteen ja jarrukomponenttien välisen etäisyyden kasvattamiseksi säteen suunnassa. Muutos on mahdollinen renkaan varmistuskohouman pienentämisen johdosta.

Muutokset on havainnollistettu kuvassa 5.



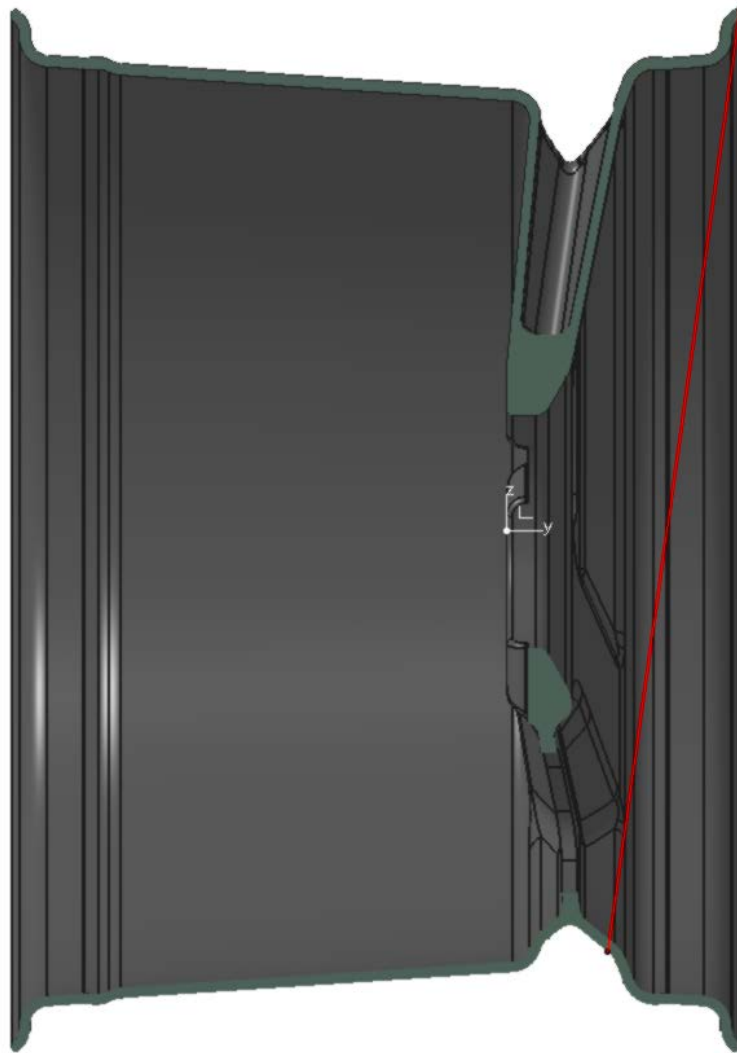
Kuva 5. Standardinmukainen (punainen) ja lopullinen (sininen) kehän profiili

2.3.2 Rengasasennuksen varmistus

Renkaan asennettavuus vanteelle on tärkeää, koska kilpailupaikalla ei välttämättä aina ole käytettävissä rengaskonetta tai sen käyttämiseen menee liikaa aikaa. Tämän lisäksi hiilikuituvanteen hauras rakenne vähentää rengaskoneen käytön mielekkyyttä - ren-

kaan asennus käsin on usein vanteelle vähemmän hankausta ja kolhuja aiheuttava vaihtoehto. Joissain tapauksissa kilpailupaikan rengaskoneen käyttäjät myös kieltäytyvät vaihtamasta renkaita komposiittivanteille.

Renkaan asennettavuutta vanteelle arvioidaan geometrisesti. ETRTO:n standardista voidaan päätellä renkaan olevan asennettavissa kun kehän sivuseinä ja renkaan asennukselle varattu syvennys ovat yhtä suuret (kuva 6).



Kuva 6. ETRTO:n standardista päätelty määritelmä renkaan asennettavuudelle. Punainen viiva on nimellishalkaisijan pituinen ja laippa hieman standardia pienempi.

Rengasasennuskokemusten perusteella myös pääteltiin, että mikäli renkaan asennuspinnan piirin pituutta vastaavan kuvion pystyy piirtämään vanteen muotojen yli (kuva 7), rengas on helposti asennettavissa ilman työkaluja. Lopullinen kehän geometria on suunniteltu tämä huomioiden.



Kuva 7. Rengasasennuksen arviointiin käytetty kuvio. Kuvio jäljittelee renkaan asentoa vanteen yli asennuksen aikana, kun punaisen viiva on suurin piirtein renkaan nimellishalkaisijasta lasketun piirin mittainen (798mm).

2.4 Komposiittivanteen suunnittelu

Komposiittivanteen keskiosa suunniteltiin valmistettavuutta silmällä pitäen. Kolmi-puolaisuuteen päädyttiin materiaalin sijoittelemisen ohella kuitukerrosten jyrkkien käännösten välttämiseksi. Keskiössä ei käytetä ydinaineita valmistusmenetelmästä johtuvan korkean painon takia [2, s. 351]. Tämän vuoksi etenkin vanteen kiinnityskohdan paksuus on pyritty pitämään kohtuullisena.

Ontot puolat ovat avoimet vanteen sisään puolamuottien irrottamisen mahdollistamiseksi. Yhdessä kehän päästöjen kanssa ne kuitenkin lisäävät renkaan sisään jäävää

ilmatilaa alumiinivanteeseen verrattuna. Tämä hidastaa renkaan rungon lämpötilamuutosta molempiin suuntiin. Mahdollista vaikutusta tullaan tutkimaan testikauden aikana.

Vanteen toteutuksessa päädyttiin brutto-osaan kahdesta syystä: osien koneistetuista reunoista saadaan lujemmat [3] ja samalla mahdollistetaan kuitukerrosten leikkaaminen käsin sapluunoiden avulla kustannuksien säästämiseksi.

Suunnittelu toteutettiin vaiheittain: kokonaisratkaisun hahmottelu - konseptin valinta ja lujuuslaskenta - muottien ja valmistettavuuden suunnittelu sekä yksityiskohtien lisääminen (kuva 8). Ajankäytöllisesti vaiheet jakautuivat suurin piirtein 20 % - 45 % - 35 %.



Kuva 8. Vanteen kehitysvaiheita: ensimmäinen hahmotelma - kehitetty ja valittu konsepti - viimeistely vannegeometria yksityiskohdin.

Suunnittelun tavoitteiksi asetettiin noin yhden kilogramman paino ja vähintään 2 g/° jäykkyys. Valmiin vanteen laskennallinen paino on 950 grammaa ja jäykkyys 3 g/°.

2.5 Alumiinivanteen suunnittelu

Alumiinikeskiön suunnitteluperusteina olivat valmistettavuus, komposiittivanteen kanssa yhtenevä ulkonäkö ja saman kiinnityksen käyttäminen. Näistä syistä myös alumiinikeskiö on kolmipuolainen ja kiinnityskohta komposiittivanteen kanssa yhteensopiva.

Suunnittelun tavoitteiksi asetettiin noin 400 gramman paino ja vähintään 2 g/° jäykkyys. Valmiin osan (kuva 9) paino on 390 grammaa ja jäykkyys 3,5 g/°.



Kuva 9. Vannekeskiön malli. Valmistuksessa jyrinnät voidaan toteuttaa yhdeltä puolelta.

3 Materiaalit

3.1 Alumiini

Keskiön ja muottien materiaalina käytetään 7075 alumiinia (taulukko 1) T651 toimitustilassa sen helpon koneistettavuuden ja korkean lujuuden vuoksi.

Taulukko 1. 7075-alumiinin kemiallinen koostumus [8]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Muut	Al
EN AW-7075	0,4	0,5	1,2-2,0	0,3	2,1-2,9	0,18-0,28	5,1-6,1	0,4	Loput

Vanteen mitoituspäännitys 159 MPa on valittu väsymiskestävyys huomioon ottaen. Vanteen kuormitustyyppi on vaihtokuormitus ja suunniteltu kestoikä miljoona sykliä. Mahdolliset loivaikutukset on huomioitu valitsemalla pitkä kestoikä. Lisäksi loivaikutusta pyritään eliminomaan käsittelemällä vanteen pinta pommittamalla se valmistuksen jälkeen [5; 6, s. 382]. Väsymislujuus on tarkastettu tyypillisen 7075 -alumiinin S-N-käyrästä [7, s. 2]. Mitoitusarvot on lueteltu taulukossa 2.

Taulukko 2. Mitoitusarvot [8]

Tiheys (kg/m ³)	Kimmomoduuli E (MPa)	Vetolujuus R _m (MPa)	Myötölujuus R _{0,2} (MPa)	Leikkauslujuus τ (MPa)	Mitoitusjännitys σ _m (MPa)
2810	71 500	min. 530	min. 460	330	159

3.2 Komposiitti

3.2.1 Laminaattirakenne

Komposiitivanteessa käytetään symmetristä kvasi-isotrooppista laminaattia sen tasaisen materiaaliarvojen, yksinkertaisen laskettavuuden ja etenkin hyvän puristuskestävyyden vuoksi.

Laminaatin rakenne on kaikkialla vanteessa samanlainen: reunapinnoissa käytetään twill-punoksia pinnan sitomiseen, ja laminaatin paksuutta säädetään keskimmäisten NCF-kerrosten määrää muuttamalla, symmetrisyys huomioiden. Esimerkki laminaatin rakenteesta on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Keskiön puolikkaan laminaatin rakenne.

Kerros	Lujite	Paino g/m ²	Suunta	Nim. paksuus (mm)
1	Twill 2/2	200	0/90°	0,20
2	Twill 2/2	200	±45°	0,20
3	NCF	400	0/90°	0,40
4	NCF	400	±45°	0,40
5	NCF	400	0/90°	0,40
6	NCF	400	±45°	0,40
7	NCF	400	0/90°	0,40

Keskiön etu- ja takapuolen symmetria-akselina toimii niiden liitoskohta, eli NCF-kerrosten 7 ja 8 väli. Puolien kohdalla käytetään lisäksi kahta kerrosta 100 g/m² twill-punoksesta tehtyä ”sukkaa” vanteen sisälle olevan pinnan sulkemiseen.

Keskiön kiinnityskohdassa kerrokset 8–15 ovat NCF-kerroksia ja kerros 15 toimii symmetria-akselina. Kehällä kerrokset 8 ja 9 ovat kehän sulkevia 200 g/m² twill-punoksia ja kerros 5 toimii symmetria-akselina.

3.2.2 Laminaatin mitoitusarvot

Laminaatin arvot on laskettu ESAComp-ohjelmalla (kuva 10), ja niitä on verrattu TANGO -projektissa tehtyihin materiaalitesteihin [11] sekä CSI Oy:ltä saatuun ohjeistukseen.

Laminate engineering constants and expansion coefficients			
Laminate : NCF			
Modified : Mon Apr 28 21:06:51 2014			
Lay-up : (90a/0a/-45a/+45a)3 h = 2.69663 mm			
Ply			
a IM7-6K estimate/Epoxy/V_f=50,f_1=50 (1)			
Moduli (GPa)			
In-plane		Flexural	
E_x	= 49.85	E^f_x	= 49.85
E_y	= 49.85	E^f_y	= 49.85
G_xy	= 18.63	G^f_xy	= 18.63
Poisson's ratios			
nu_xy	= 0.338	nu_yx	= 0.338

Kuva 10. ESACompin avulla lasketut laminaatin mitoitusarvot

Vanteen suunniteltu venymä normaalikuormituksessa on 0,3 % ja maksimaalisessa kuormituksessa 0,6 % [13]. Jännitys isotrooppisessa laskentamallissa voidaan laskea kaavalla

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Laskennasta saadaan tulokseksi noin 125 MPa ja 250 MPa.

Lasketut ja TANGO-projektissa tehdyt mitoitusarvot on koottu taulukkoon 4.

Taulukko 4. Materiaalitesteihin ja ohjeistukseen perustuvat mitoitusarvot 55 % kuitupitoisuudella [11; 13].

Tiheys (kg/m ³)	Kimmo- moduuli E (MPa)	Vetolujuus R _m (MPa)	Puristuslujuus R _m (MPa)	Leikkauslujuus τ (MPa)	Mitoitusjännitys σ _m (MPa)	Sallittu jännitys σ _s (MPa)
1480	42 000	400	450	230	125	250

Teoreettisten (kuva 11) ja testi- ja kokempohjaisten mitoitusarvojen välillä havaitaan pientä eroavaisuutta, joten työn laskennoissa käytetään jälkimmäisiä.

Laminate DLF strength analysis

Laminate : NCF

Modified : Mon Apr 28 21:06:51 2014

Lay-up : (90a/0a/-45a/+45a)3 h = 2.69663 mm

Ply

a IM7-6K estimate/Epoxy/V_f=50,f_1=50 (1)

Failure criterion : Puck 2D; Max strain; Von Mises; Out-of-plane shear; Out-of-plane shear; None
(UD; non-UD; homogeneous; honeyc. core; foam/other core; adhesive)

Failure crit. param. : p_TII+/TII-/TT-/s/M(carbon)=0.35/0.3/0.275/0.5/0.5;(other)=0.3/0.25/0.225/0.5/0.5

DLF model : stress based

Stress/strain recovery : layer top/bottom

Laminate strength : DLF

In-plane and out-of-plane stresses (zero-curvature)

	mode	crit. layers		mode	crit. layers
sig_xt	= 553.96 MPa	2t (90°)	sig_xc	= -493.41 MPa	2c (90°)
sig_yt	= 553.96 MPa	2t (0°)	sig_yc	= -493.41 MPa	2c (0°)
tau_xy+	= 400.96 MPa	2c (45°)	tau_xy-	= -400.96 MPa	2c (-45°)
tau_zx	= - MPa	-	tau_yz	= - MPa	-

Flexural stresses

	mode	crit. layers		mode	crit. layers
sig^f_x+	= 489.15 MPa	2c 1(90°)	sig^f_x-	= -520.30 MPa	2t 1(90°)
sig^f_y+	= 678.81 MPa	2t 10(0°)	sig^f_y-	= -647.15 MPa	2c 10(0°)
tau^f_xy+	= 358.70 MPa	s 1(90°)	tau^f_xy-	= -353.06 MPa	s 1(90°)

Kuva 11. ESACompin avulla lasketut laminaatin lujuusarvot.

3.2.3 Mitoitusarvojen riippuvuus kuitusuunnista

ESACompin avulla tutkittiin laminaatin mitoitusarvojen lisäksi arvojen herkkyyttä muu-
toksille kuitusuunnissa ts. laminointivirheille (kuva 12).

Probabilistic analysis - Laminate 2.5D behavior								
Laminate : NCF								
Modified : Mon Apr 28 21:06:51 2014								
Lay-up : (90a/0a/-45a/+45a)3 h = 2.69663 mm								
Input variables								
Layer orientations : ±15°								
Analysis parameters								
Probability (p) : 90%			(Sample size: 3601)					
Error : 10%								
		nominal	limit(1-p)	limit(p)	avg.	median	std. dev.	coeff. of var.
E_x	GPa	49.85	46.21	52.02	49.19	49.34	2.34	0.048
E_y	GPa	49.85	46.21	52.02	49.19	49.34	2.34	0.048
G_xy	GPa	18.63	16.65	19.83	18.29	18.29	1.29	0.070
E^f_x	GPa	49.85	44.91	52.18	48.70	48.89	2.99	0.061
E^f_y	GPa	49.85	44.91	52.18	48.70	48.89	2.99	0.061
G^f_xy	GPa	18.63	16.03	19.99	18.06	18.09	1.65	0.091
nu_xy		0.338	0.309	0.386	0.347	0.345	0.0311	0.090

Kuva 12. Laminaatin mitoitusarvojen herkkyys pienille muutoksille

Analyysin perusteella pienet muutokset kuitusuunnissa eivät todennäköisesti aiheuta merkittävää eroa laminaatin mitoitusarvoissa tai lujuudessa, joten laminaatti sopii hyvin käsinlaminointiin.

3.2.4 Lujitteet

Pääasiallisena lujitteena käytetään Hexforce 400 g/m² NCF-lujitetta, joka koostuu käytännössä kahdesta 200g/m² 6K UD-kerroksesta kuitusuunnissa 0°/90°. Yhden tällaisen UD-kerroksen tyypilliset arvot on esitetty taulukossa 5. Lujitteen tuotekoodi on NLT00 HR1270 0400.

Taulukko 5. Yhden 200g/m² UD kerroksen tyypilliset arvot 60 % kuitupitoisuudella [9].

Kimmomoduuli 0° E (MPa)	Vetolujuus R _m (MPa)	Puristuslujuus 0° R _m (MPa)	Leikkauslujuus 0° τ (MPa)	Taivutuslujuus 90° R _m (MPa)
164 000 (veto)	0°: 2723	1793	128	1862
46 000 (puristus)	90°: 111			

Toisena lujitteena käytetään Hexforce 200 g/m² 2/2 twill-punottua lujitetta. Lujitteen tuotekoodi on 46200 W 1000.

Molempien lujitteiden valmistusmateriaalina käytetään korkean lujuuden ja keskinkertaisen kimmomoduulin omaavaa IM7 6K -kuitua, jonka tekniset arvot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. Yhden IM7 6K kuidun tekniset arvot [9].

Tiheys (kg/m ³)	Kimmomoduuli E (MPa)	Vetolujuus R _m (MPa)	Maks. venymä
1780	276 000	5515	1,9%

3.2.5 Matriisi

Matriisina laminaatissa käytetään Araldite LY 1564 -epoksia Aradur 2954 -kovetteella. Matriisin tyypilliset arvot on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Epoksin tyypilliset arvot kovetussykllillä 1 h 80 °C + 8 h 140 °C [10].

Tiheys (kg/m ³)	Kimmomoduuli E (MPa)	Vetolujuus R _m (MPa)	Maks. venymä	Taivutuslujuus R _m (MPa)	Maks. venymä	Leikkauslujuus τ (MPa)
1100	2 600	75	5,0 %	122	7,0 %	61

Kovetussykliksi on valittu 2 h 60 °C + 8 h 140 °C, jolla saavutetaan pitkä työskentelyaika (90 min), sopiva viskositeetti (100 mPas) [2, s. 48] ja korkea lasittumislämpötila (145 °C). Lisäksi matalalla esikovetuslämpötilalla vältetään lämpöjännityksiä ja -vääristymiä [2, s. 53].

4 Laskennallinen kuormitus

4.1 Kuormitustilojen määrittely

Vanteen ajonaikainen kuormitustilanne on erittäin monimutkainen, joten vanteet mitoitetaan yksinkertaistetuilla kuormitustilanteilla ja vertailemalla tuloksia vanhaan 13":n itse suunniteltuun vanteeseen tehtyyn lujuusanalyysiin. Kyseiset 3-osaiset alumiinivanteet ovat olleet käytössä neljä kilpailukautta ilman ongelmia, eikä niiden rakenteessa ole havaittu muutoksia eikä mikrohalkeamia.

Maksimaalinen kuormitustilanne on laskettu auton 100 %:n painonsiirrolla, ts. kaikki auton paino on kahden renkaan päällä. Laskenta-arvoina käytetään FS-autojen keskimääräistä painoa (300 kg kuljettajan kanssa), raidelevyettä (1200 mm), akseliväliä (1550 mm), painopisteen korkeutta (300 mm) ja painojakoa (40 % edessä / 60 % takana).

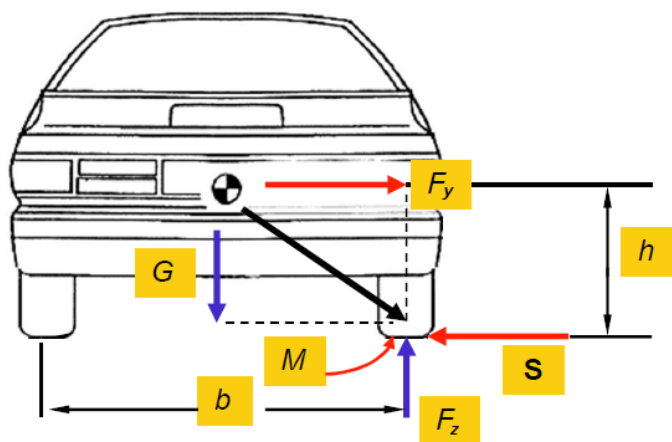
Valitun laskentamenetelmän etuja on riippumattomuus auton alustageometriasta ja tietyissä määrin lopullisesta painosta. Huono puoli on laskennan nimellinen epätarkkuus, mutta virhettä on tietoisesti pyritty ohjaamaan ylimitoitukseen. Ylimitoituksesta ei sinällään ole haittaa, sillä lujuuden suhteen ylimitoitettu vanne on vastaavasti jäykempi, joten ylimääräisestä painosta saavutetaan myös hyötyä.

Tuloksia verrataan lisäksi kauden 2011 kilpa-auton tiedonkeruudataan, joista muodostetaan kuormitustilat suunnittelujännityksille.

4.2 Sivuttaiskiihtyvyyden aiheuttama kuormitus (kaarrajo)

4.2.1 Laskentaperiaate

Sivuttaiskuormituksen laskemiseen käytetään vapaakappalekuviota, jossa auton massa katsotaan keskittyneen auton painopisteeseen ja tukivoimien renkaiden kontaktipisteisiin (kuva 13). Koska molempien renkaiden tukivoima oletetaan samaksi, laskenta tehdään yhdelle tukivoimalle ja puolikkaalle auton massalle. Painopiste oletetaan auton sivuttaissuunnassa keskelle.



Kuva 13. Auton painonsiirron laskenta kaarreajossa [4]. Kuva muokattu kuvastamaan 100 %:n painonsiirtoa.

4.2.2 Pystyvoiman laskenta

Yhden renkaan pystyvoima lasketaan voimakomponenttiyhtälöllä:

$$F_z = \frac{G}{2}, \text{ jossa} \quad (1)$$

G on auton massa: 2950 N

Laskennasta saadaan tulokseksi noin 1500 N.

4.2.3 Vaakavoiman laskenta

Yhden renkaan sivuttaisvoima ratkaistaan momenttiyhtälöllä:

$$F_y \cdot h = F_z \cdot \frac{b}{2}, \text{ sijoitetaan } F_z \text{ ja ratkaistaan } F_y \quad (2)$$

$$F_y = \frac{G \cdot b}{4 \cdot h}, \text{ jossa}$$

b on auton raideleveys: 1,2 m

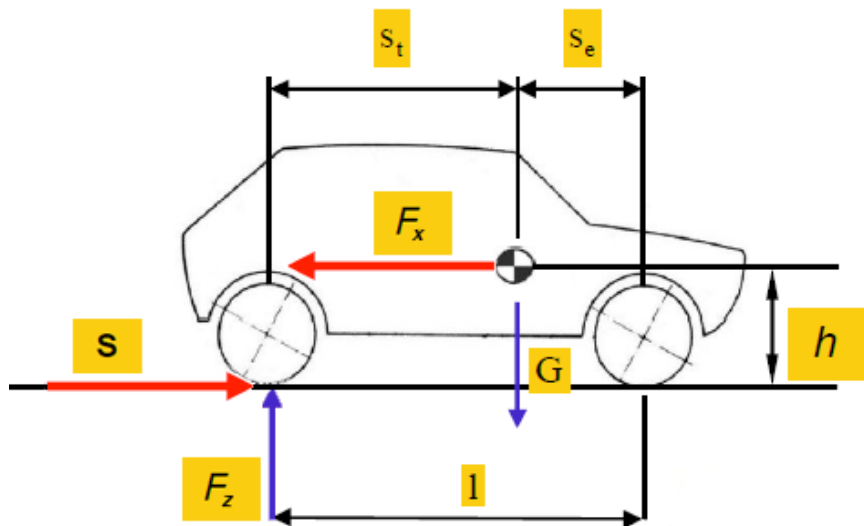
h on auton painopisteen korkeus: 0,3 m

Laskennasta saadaan tulokseksi noin 3000 N. Saatu sivuttaiskiihtyvyys vastaa siis noin 2 g:n kiihtyvyyttä.

4.3 Pitkittäiskiihtyvyyden aiheuttama kuormitus (kiihdytys)

4.3.1 Laskentaperiaate

Pitkittäiskuormitus lasketaan samalla menetelmällä kuin sivuttaiskuormitus, mutta myös painopisteen sijainti pitkittäissuunnassa joudutaan ratkaisemaan painojaon perusteella (kuva 14).



Kuva 14. Auton painonsiirron laskenta kiihdytyksessä [4]. Kuva muokattu kuvastamaan 100 %:n painonsiirtoa.

4.3.2 Pystyvoiman laskenta

Pystykuorma on sama kuin kohdassa 4.2.2 eli 1500 N.

4.3.3 Painopisteen sijainti pitkittäissuunnassa

Painopisteen sijainti auton pituussuunnassa voidaan ratkaista painojaon avulla:

$$G \cdot s_e = F_z \cdot l, \text{ jossa} \quad (3)$$

F_z on auton tukivoima takapyörällä: $0,6 \cdot G$

l on auton akseliväli: 1,55 m

Ratkaistaan painopisteen etäisyys etuakselilta s_e sijoittamalla F_z :

$$s_e = 0,6 \cdot l \quad (4)$$

Laskennasta saadaan tulokseksi 0,93 m.

Vastaavasti

$$s_t = 0,4 \cdot l, \quad (5)$$

josta saadaan tulokseksi 0,62 m.

4.3.4 Vaakavoiman laskenta

Yhden renkaan pitkittäisvoimaksi kiihdytyksessä ratkaistaan momenttiyhtälöllä:

$$F_x \cdot h = F_z \cdot s_t, \text{ sijoitetaan } F_z \text{ ja ratkaistaan } F_x \quad (6)$$

$$F_x = \frac{G \cdot s_t}{2 \cdot h}$$

Laskennasta saadaan tulokseksi 3000 N, joka vastaa noin 2 g:n kiihtyvyyttä.

4.4 Pitkittäiskiihtyvyyden aiheuttama kuormitus (jarrutus)

Kuormitus jarrutuksessa lasketaan samalla kaavalla kuin kiihdytyksessä, mutta s_t :n tilalla käytetään s_e :tä:

$$F_x = \frac{G \cdot s_t}{2 \cdot h}$$

Laskennasta saadaan tulokseksi 4900 N, joka vastaa noin 3,3 g:n kiihtyvyyttä.

4.5 Yhdistelmäkuormitus (jarrutus mutkaan / kiihdytys mutkasta)

Yhdistelmäkuormituksessa kappaleessa 4.2.3 saatua sivuttaiskomponenttia käännetään maan tason suunnassa 45 astetta olettaen renkaan kitkakertoimen ja siten kokonaiskiihtyvyyden pysyvän samana.

Voima jakaantuu tällöin yhtä suuriin sivuttais- ja pitkittäiskomponentteihin, jotka ratkaistaan Pythagoraan lauseen avulla:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, \text{ sijoitetaan } F_x = F_y, \text{ ja ratkaistaan se } (7)$$

$$F_y = \sqrt{\frac{F^2}{2}}$$

Laskennasta saadaan tulokseksi 2100 N.

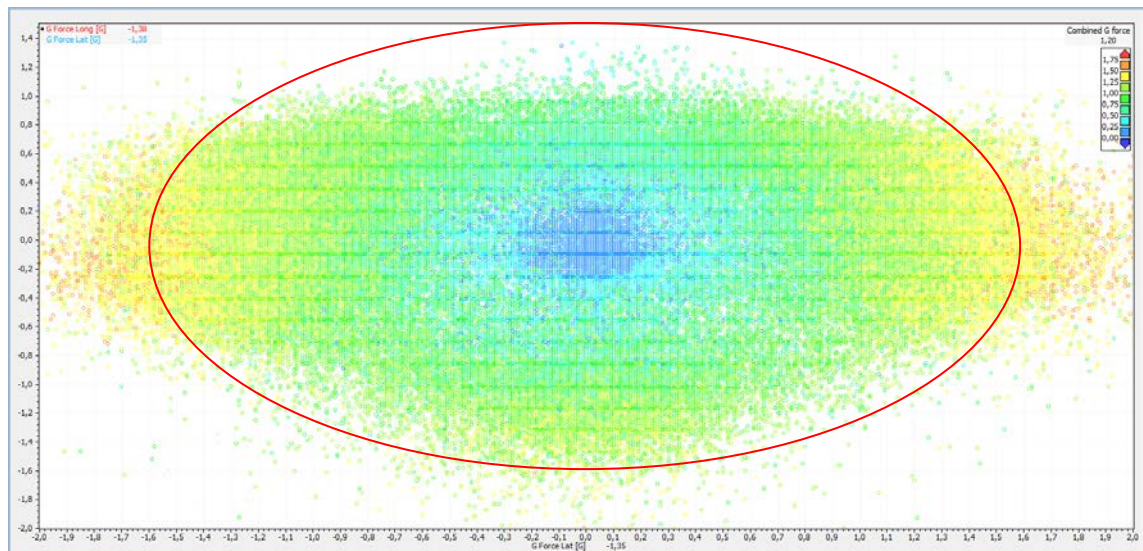
4.6 Töyssyn aiheuttama kuormitus

Töyssyn aiheuttamana kuormitus on kuvitteellinen kolminkertainen pystykuormitus eli 4500 N.

4.7 Laskenta-arvojen vertailu tiedonkeruudataan

4.7.1 Vertailudata

Laskettuja kuormitustiloja verrataan kauden 2011 kilpa-auton tiedonkeruudataan. Vertailussa käytetään auton kiihtyvyydet yhdistävää kitkaympyräkuvaajaa (kuva 15). Tiedonkeruudatan kattavuutta lisää kauteen sisältynyt sadekelinkilpailu.



Kuva 15. Kauden 2011 kaikkien kestävyysajo-osioiden kitkakuvaaja ja 1,6 g:n kitkaympyrä

4.7.2 Sivuttaiskuormitus

Kaarreajon maksimikuormitus vastaa suhteellisen hyvin tiedonkeruudataa - 2011 kauden autolla saavutettiin äärimmillään miltei 2 g:n kiihtyvyyksiä 100 %:n painonsiirrolla.

Normaalitilanteessa kuormitus on kuitenkin lähempänä 1,6 g:n kiihtyvyyttä, josta saadaan kuormitustilanne mitoitusjännitykselle skaalaamalla voimat kertoimella 0,8.

Huomionarvoista on, että auton suorituskyvyn parantamiseksi on painonsiirtoa vähennettävä painopistettä laskemalla ja renkaan pystykuormitusta lisättävä aerodynamiikan avulla. Tällöin ulompien renkaiden tuottama sivuvoima pysyy suurin piirtein samansuuruisena sisärenkaiden osallistuessa enemmän. Tästä johtuen vanteiden laskennalliset kuormitustilat kattavat paljon korkeampia koko auton sivuttaiskiihtyvyyksiä, teoreettisen maksimin ollessa 3,2 g mitoituskuormituksella ja 4 g maksimikuormituksella (50 % painonsiirto).

4.7.3 Pitkittäiskuormitus

Pitkittäiskiihtyvyydessä voidaan kuitenkin havaita suuriakin eroja. Erot johtuvat siitä, että kiihdyttäessä auton teho ei riitä hyödyntämään renkaiden kaikkea pitkittäispitoa ja jarruttaessa taas renkaiden pitkittäispito ei riitä lisäämään painonsiirtoa. Kuormitustilana mitoitusjännitykselle ja vanteiden kiinnityksen mitoittamiseen käytetään tiedonkeruudatan näyttämää 2 g:n kiihtyvyyttä vastaavaa arvoa.

Maksimaalisessa kuormituksessa käytetään edelleen 3 g:n kiihtyvyyttä vastaavaa arvoa, koska vanne on pitkittäissuunnassa altis erinäisille voimaimpulsseille. Esimerkkejä tällaisista impulsseista ovat takarenkaan nouseminen ilmaan ja osuminen takaisin maahan huomattavasti ajonopeutta korkeammalla pyörimisnopeudella tai kytkimen päästäminen erittäin nopeasti. Esimerkiksi jälkimmäinen tilanne aiheuttaa renkaan hitausmomentin vuoksi vanteeseen laskennallisesti noin 3g:n kiihtyvyyden [12].

4.7.4 Yhdistelmäkuormitus

Yhdistelmäkuormitus ei vastaa koko kauden tiedonkeruudataa kovin hyvin. Suurin kuormitustila on pääsääntöisesti 1,6 g:n luokkaa (kuvassa punaisella ympyrällä rajattu alue). Koska yhdistelmäkuormitus kuitenkin on vanteen pääsääntöinen kuormitustila,

käytetään kuormitusilana mitoitusjännitykselle 1,6 g:n kiihtyvyyttä, ja maksimaalisena kuormitusilana mitatun datan selkeästi ylittävää 2 g:n kiihtyvyyttä.

5 Vanteiden kiinnityksen mitoitus

5.1 Mitoitusperiaate

Vanteen kiinnitys on mitoitettu kahdella toisistaan erillisellä tavalla - vanteen laipan kitkaliitoksella ja keskittäväällä muotolukituksella. Kaksoimitoituksen tarkoituksena on vanteen liitoksen varmistus.

5.2 Kitkaliitos ja mutterin kiristysmomentti

Vanteen laippaliitos mitoitetaan siirtämään 2 g:n kiihtyvyyttä vastaava pitkittäissuuntainen vääntömomentti kitkan avulla. Laippaliitoksen tehollisen säteen mitoitusperustana on lähinnä navan valmistettavuus.

Koska navan ja vanteen valmistusmateriaalit on valittu, kitkaliitoksen pitävyyteen vaikuttava muuttuja on keskipulttiliitoksen riittävä kiristysvoima. Tarvittava esikiristysvoima lasketaan levykytkimen kaavasta.

$$F_y = \frac{M}{\mu \cdot R_T}, \text{ jossa} \quad (8)$$

R_T on tehollinen säde: 37,25 mm $\left(R_T = \frac{R_{napa} + r_{napa}}{2} = \frac{42\text{mm} + 32,5\text{mm}}{2} \right)$

μ on kitkakerroin: ~0,57 alumiini-komposiitti [14], alumiini-alumiini [15]

M on vääntömomentti: 690 Nm $\left(M = F \cdot \frac{d_{rengas}}{2} = 3000\text{N} \cdot \frac{0,46\text{m}}{2} \right)$

Laskusta saadaan tulokseksi noin 32 kN. Esikiristysvoiman avulla voidaan laskea kiristysmomentti keskipulttiliitokselle M55 x 1,5.

$$M_K = KDF_y, \text{ jossa} \quad (9)$$

$$K = \frac{\frac{0,5d_p(\tan \lambda + \mu_t \sec \beta)}{1 - \mu_t \tan \lambda \sec \beta} + 0,625\mu_h D}{D} \quad (10)$$

D on pultin nimellishalkaisija: 55,00 mm

p on pultin nousu: 1,50 mm

d_p on pultin sydänhalkaisija: 54,03 mm

λ on pultin nousukulma: 0,51° $\tan \lambda = \frac{p}{\pi d_p}$

β on pultin kylkikulman puolikas: 30°

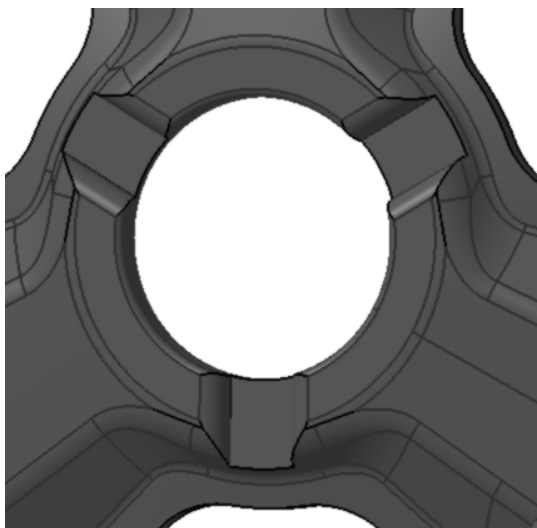
μ_t on kierteen kitkakerroin: 0,1 (voideltu)

μ_h on kannan kitkakerroin: 0,1 (voideltu)

Laskun tuloksena saadaan 32 kN:n kiristysvoimalle 222 Nm:n vääntömomentti. Alumiini-alumiini-kierteen vaikeasti määriteltävän kitkakertoimen vuoksi tulisi esikiristysvoima kuitenkin tarkistaa venymäliuskamittauksella vääntömomentin ja mahdollisen kierrevoiteluaineen vaikutuksen huomioimiseksi.

5.3 Muotolukituksen mitoitus

Vanteessa käytetään keskittävää muotolukitusta (kuva 16), joka mitoitetaan siirtämään auton pitkittäissuuntainen vääntömomentti pinnan puristusrasituksessa.



Kuva 16. Vanteen muotolukitus

Geometria muotolukituksessa on kolme neljänneslieriötä (molempiin pyörimissuuntiin), joista voidaan laskea lukituksen projisoitu kontaktiala:

$$A = 3 \cdot \frac{Dh}{2} \quad (11)$$

D on lieriön halkaisija: 10,0 mm

h on lieriön pituus: 9,5 mm

Laskusta saadaan projisoiduksi kokonaisalaksi 143 mm². Muotolukituksiin vaikuttava pintapainejännitys voidaan laskea kaavalla

$$\sigma_k = \frac{F_r}{A}, \text{ sijoitetaan} \quad (12)$$

$$F_r = \frac{M}{R_T} \quad (13)$$

$$\sigma_k = \frac{M}{A \cdot R_T}$$

Laskusta saadaan jännitykseksi noin 130 MPa.

Puristavaa pintapainejännitystä verrataan yleensä metalliosissa kaksinkertaiseen leikkauslujuuteen tai komposiittiosissa kolminkertaiseen leikkauslujuuteen [16]. Momentinsiirtokyvyssä on siis komposiitivanteella 5,3 varmuuskerroin ja alumiinivanteella 5,1 varmuuskerroin, vaikka keskiöpultin esijännitys menetettäisiin kokonaan.

6 Lujuuslaskenta

6.1 Laskentaohjelma

Vanteen lujuuslaskenta tehtiin CATIA:n omalla lujuuslaskentamoduulilla staattisena kuormituslaskentana.

6.2 Rajaehdot

Kaikissa kuormitustiloissa käytetään samoja rajaehdoja. Vanne on kiinnitetty napaan kontaktiitoksella ja kiinnitysmutterin kartioon esijännitettyllä kontaktiitoksella. Napa on

tuettu laakeripinnoista liukuehdoilla ja sen pyöriminen on estetty ulommaisesta laakeripinnasta. Kiinnitysmutterin kartio on kiinnitetty napaan kontaktiliitoksella.

Kaikissa kontaktiliitoksissa käytetään ääretöntä kitkaa laskennan nopeuttamiseksi. Koelaskennassa äärettömän kitkan ja tietyn kitkakertoimen välillä ei havaittu merkittävää eroa, kun käytössä on kuormaan nähden riittävä esijännitys.

Kaikissa kuormitustiloissa voiman vaikutuspisteenä on renkaan kontaktipinta maahan. Kontaktipinta on renkaan nimellissäteen (228 mm) etäisyydellä ja renkaan keskilinjalla. Todellisuudessa renkaan säde pienenee kuormituksen kasvaessa ja kontaktipinta siirtyy voiman suuntaisesti. Koelaskennassa voiman vaikutuspisteen sijainnin pienillä muutoksilla ei havaittu merkittävää eroa keskiön rasituksissa.

Kontaktipinnan ja vanteen kehän välissä käytetään virtuaaliosaa, joka laskee kuormituksen renkaan asennuspinoille. Virtuaaliosa toimii kappaleen jäykkyyttä muuttamattomana vipuvartena. Todellisuudessa renkaan voimat eivät kuitenkaan jakaudu kehälle näin tasaisesti [17]. Tämän ei katsota olevan merkityksellinen tekijä, sillä kehän rasitus-
tasot ovat verrattain hyvin pieniä ja laskennassa keskitytään enemmän keskiön geometriaan.

6.3 Kuormitustilat

Kiinnityspultin esijännitysvoima on kaikissa kuormitustilanteissa 33 kN. Muut voimat on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Laskennassa käytettävät voimat (N)

Kuormitustila	Pystyvoima (F_z)	Pitkittäisvoima (F_x)	Sivuttaisvoima (F_y)
Sivuttaiskuormitus	1200	0	2400
Sivuttaiskuormitus maks.	1500	0	3000
Pitkittäiskuormitus	1500	3000	0
Pitkittäiskuormitus maks.	1500	4500	0
Yhdistelmäkuormitus	1200	1700	1700
Yhdistelmäkuormitus maks.	1500	2100	2100
Töyssy	4500	0	0

Tämän lisäksi kaikki kuormitustilat lasketaan kahdessa eri vanteen asennossa: puolien välin ollessa renkaan kontaktipinnan kohdalla ja puolan reunan ollessa renkaan kontaktipinnan kohdalla. Visuaalisesti oli päätelty ensimmäisessä olevan pienimmät ja jäl-

kimmäisessä suurimmat rasitukset, ja tämä varmistui eri vanteen asennoille tehdyillä koelaskennoilla (kuva 17).



Kuva 17. Koelaskentoihin käytetyt renkaan kontaktipisteet, joista ympyröidyt valittiin lopullisiin laskentoihin.

Normaaleja kuormitustiloja verrataan mitoitusjännitykseen käyttöasteen laskemiseksi. Käyttöaste kuvastaa vanteen rasitustason etäisyyttä mitoitusjännityksestä. Vanteen rasitukset ovat liian korkeat, jos käyttöaste on yli yhden ja vastaavasti turhan matalat, jos käyttöaste on alle yhden.

Materiaalin tehokas hyödyntäminen vanteessa on hankalaa, koska rasitukset ovat sivuttaiskuormituksessa hyvin paikallisia ja tilaa akselinsuuntaisesti on rajallisesti. Tämä johtaa suhteessa liialliseen materiaaliin käyttöön pitkittäiskuormitusta tarkasteltaessa ja näkyy pitkittäiskuormitusten matalina käyttöasteina.

Maksimaalisten kuormitustilojen varmuuskertoimet on laskettu vertaamalla niitä sallittuun jännitykseen (komposiittivanne) tai myötörajaan (alumiinivanne).

Kaikki tulokset on annettu von Mises vertailujännityksinä.

6.4 Vanha alumiinikeskiö

6.4.1 Eroavaisuudet

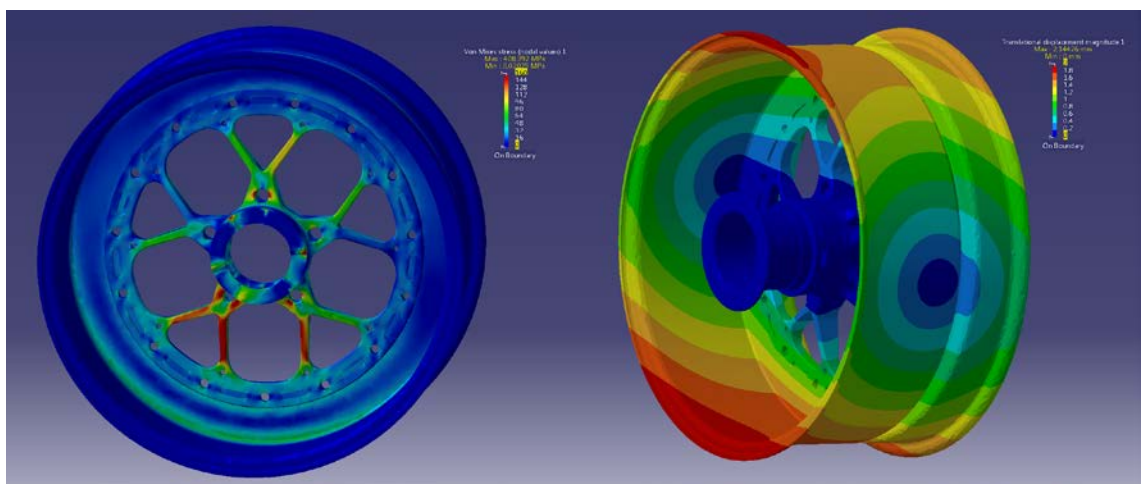
Vanhojen alumiinikeskiöiden materiaalina on käytetty Alumecia, joka vastaa suurilta osin 7075-alumiinia. Vanhojen vanteiden rengaskoko on 20,5 x 7 – 13”, joten voimien vaikutuspisteen etäisyys on muista malleista poiketen 260 mm.

6.4.2 Malli

Malli koostuu 514574 solmun verkosta ja 299217 parabolisesta tetrahedrielementistä (TE10) keskimääräisen verkon koon ollessa 5 mm. Kontaktipinnoissa käytetään tiheämpää 2,5 mm:n verkotusta. Muodonmuutosenergian perusteella arvioitu laskennan virhe on 13 %, ja virhettä esiintyy eniten kontaktipinnoilla ja navan ja kiinnityskartion yksityiskohdissa.

Vanhan alumiinikeskiön malli poikkeaa myös uuden alumiinikeskiön mallista siten, että kehät tuodaan keskiön kanssa samassa osassa, kun taas uuden vanteen mallissa kehät yhdistetään kontaktiparilla. Tällä ei kuitenkaan ole merkitystä laskennan tulokseen.

Kuvassa 18 on esimerkki laskentamallista jälkiprosessoinnin jälkeen.



Kuva 18. Sivuttaiskuormitustilan lujuuslaskenta, vanha vanne

6.4.3 Tulokset

Vertailulaskennan perusteella valitut kuormitustilanteet vaikuttavat oikeutetuilta. Sekä käyttöasteet että varmuuskertoimet vaikuttavat järkeviltä ja tukevat sitä, että vanteet ovat pysyneet ehjänä. Tulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Vanhan vanteen laskentatulokset

Mitoituskuormitus, renkaan kontaktipinta puolien välissä			
Kuormitustila	Siirtymä (mm)	Rasitus (MPa)	Käyttöaste
Sivuttaiskuormitus	1,61	155	0,97
Pitkittäiskuormitus	0,46	68	0,43
Yhdistelmäkuormitus	1,17	151	0,95
Mitoituskuormitus, renkaan kontaktipinta puolan reunalla			
Sivuttaiskuormitus	1,53	163	1,02
Pitkittäiskuormitus	0,46	67	0,42
Yhdistelmäkuormitus	1,06	139	0,88
Maksimikuormitus, renkaan kontaktipinta puolien välissä			
Kuormitustila	Siirtymä (mm)	Rasitus (MPa)	Varmuuskerroin
Sivuttaiskuormitus maks.	2,01	194	2,37
Pitkittäiskuormitus maks.	0,66	97	4,74
Yhdistelmäkuormitus maks.	1,46	189	2,43
Töyssy	0,66	58	7,93
Maksimikuormitus, renkaan kontaktipinta puolan reunalla			
Sivuttaiskuormitus maks.	1,91	204	2,25
Pitkittäiskuormitus maks.	0,66	95	4,84
Yhdistelmäkuormitus maks.	1,33	174	2,64
Töyssy	0,46	62	7,42

Vanhan vannemallin rasitusta töyssyssä lisää vanteen puolan tyveen poratun reiän aiheuttama rasituskeskittymä.

6.5 Alumiinikeskiö

6.5.1 Tavoitteet

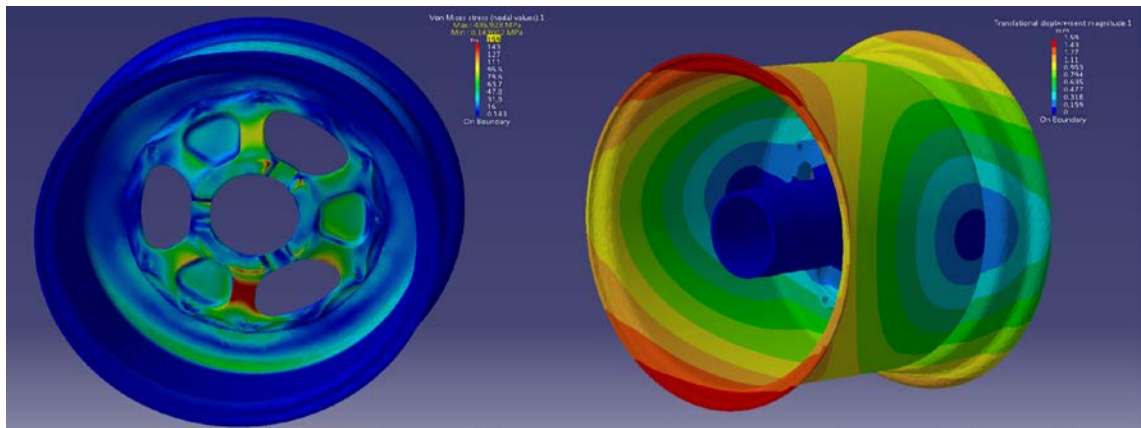
Tavoitteina vanteiden mitoituksessa on riittävän lujuuden lisäksi riittävä jäykkyys sivuttaiskuormituksessa. Vannetta ei pyritä keventämään, sillä tavoitepaino on asetettu kokemusperäisellä arvioinnilla hyvin realistisesti, vaan koko suunnittelupaino pyritään hyödyntämään rasitusten tasaamiseen.

Tavoite varmuuskertoimelle myötörajan on $>2,5$, sillä lujuassa seostetussa alumiinissa ei-toivottua plastista muodonmuutosta tapahtuu jo ennen 0,2 %:n myötörajaa.

6.5.2 Malli

Malli koostuu 315014 solmun verkosta ja 184983 parabolisesta tetrahedrielementistä (TE10), keskimääräisen verkon koon ollessa 5 mm. Kontaktipinnoissa käytetään tiheämpää 2,5 mm:n verkotusta. Muodonmuutosenergian perusteella arvioitu laskennan virhe on 11 %, ja virhettä esiintyy lähinnä kontaktipinnoilla.

Kuvassa 19 on esimerkki laskentamallista jälkiprosessoinnin jälkeen.



Kuva 19. Sivuttaiskuormitustilan lujuuslaskenta, alumiinikeskiö

6.5.3 Tulokset

Alumiinivanteen tavoitepaino oli laskennan perusteella asetettu hieman liian korkeaksi. Keventämällä vanteet lähemmäs käyttöastetta 1 sivuttaiskuormituksessa olisi vanteen painosta saatu pudotettua noin 10–15 grammaa. Painoero päätettiin kuitenkin hyödyntää rasiusten tasaamiseen ja valmistusta helpottaviin ratkaisuihin, esimerkiksi käyttämällä yleisillä työkaluilla valmistettavia geometrioita. Tulokset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Uuden alumiinivanteen laskentatulokset

Mitoituskuormitus, renkaan kontaktipinta puolien välissä			
Kuormitustila	Siirtymä (mm)	Rasitus (MPa)	Käyttöaste
Sivuttaiskuormitus	1,19	134	0,84
Pitkittäiskuormitus	0,42	44	0,28
Yhdistelmäkuormitus	0,86	112	0,70

Mitoituskuormitus, renkaan kontaktipinta puolan reunalla			
Sivuttaiskuormitus	1,18	138	0,90
Pitkittäiskuormitus	0,42	44	0,28
Yhdistelmäkuormitus	0,86	102	0,64
Maksimikuormitus, renkaan kontaktipinta puolien välissä			
Kuormitustila	Siirtymä (mm)	Rasitus (MPa)	Varmuuskerroin
Sivuttaiskuormitus maks.	1,48	168	2,73
Pitkittäiskuormitus maks.	0,60	63	7,30
Yhdistelmäkuormitus maks.	1,07	141	3,26
Töyssy	0,29	38	12,1
Maksimikuormitus, renkaan kontaktipinta puolan reunalla			
Sivuttaiskuormitus maks.	1,47	172	2,67
Pitkittäiskuormitus maks.	0,60	63	7,30
Yhdistelmäkuormitus maks.	1,08	127	3,62
Töyssy	0,31	37	12,4

Vanteen laskennan yhteydessä myös havainnoitiin, että vanteen rasituksista saadaan sitä tasaisemmat mitä enemmän puolia käytetään, ja rajoittavana tekijänä ovat lähinnä valmistusmenetelmät ja -materiaali. Koska vanteen ulkonäkö haluttiin kuitenkin säilyttää yhtenevänä komposiittivanteen kanssa, toteutettiin puolat C-profiililla, joka tekee keskiöstä käytännössä kuusipuolaista vastaavan.

6.6 Komposiittivanteen lujuuslaskenta

6.6.1 Tavoitteet

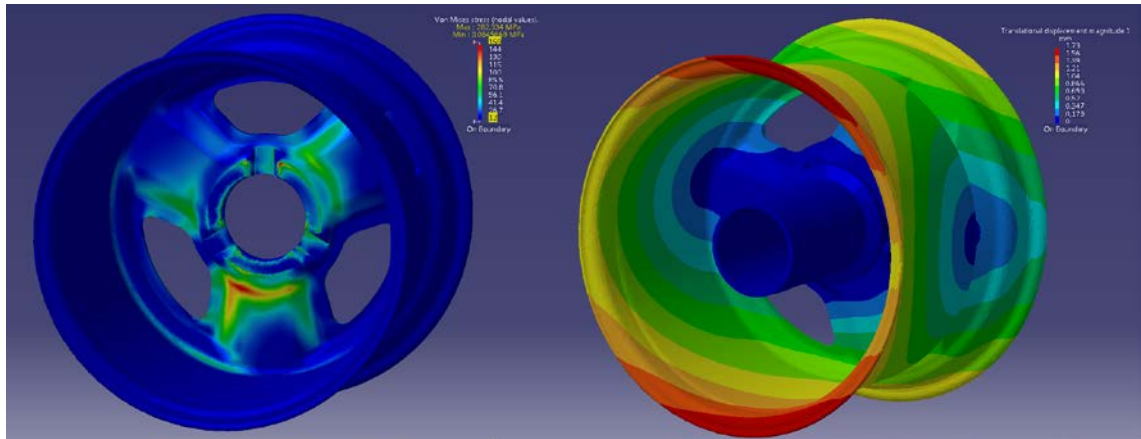
Kuten alumiinivanteenkin kohdalla tavoitteina on riittävä lujuus ja jäykkyys, sekä koko suunnittelupainon hyödyntäminen.

Tavoite varmuuskertoimelle sallittuun jännitykseen on $>1,5$, sillä sallittu jännitys sisältää itsessään vielä kohtalaisen varmuuskertoimen (~ 2) maksimijännitykseen verrattuna.

6.6.2 Malli

Malli koostuu 480198 solmun verkosta ja 27587 parabolisesta tetrahedrielementistä (TE10), keskimääräisen verkon koon ollessa 5 mm. Kontaktipinnoissa käytetään tiheämpää 2,5 mm:n verkotusta. Muodonmuutosenergian perusteella arvioitu laskennan virhe on 13 %, ja virhettä esiintyy lähinnä kontaktipinnoilla.

Kuvassa 20 on esimerkki laskentamallista jälkiprosessoinnin jälkeen.



Kuva 20. Sivuttaiskuormitustilan lujuuslaskenta, komposiittivanne

6.6.3 Tulokset

Komposiittivanteen laskennassa lujuustavoitteisiin päästiin muutaman iteroinnin jälkeen, ja sen jälkeen laskennalla pyrittiin pääasiassa parantamaan vanteen jäykkyyttä ja tasaamaan rasituksia mahdollisimman paljon. Tulokset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Komposiittivanteen laskennan tulokset

Mitoituskuormitus, renkaan kontaktipinta puolien välissä			
Kuormitustila	Siirtymä (mm)	Rasitus (MPa)	Käyttöaste
Sivuttaiskuormitus	1,42	106	0,85
Pitkittäiskuormitus	0,51	48	0,38
Yhdistelmäkuormitus	1,07	82	0,66
Mitoituskuormitus, renkaan kontaktipinta puolan reunalla			
Sivuttaiskuormitus	1,36	123	0,98
Pitkittäiskuormitus	0,51	48	0,38
Yhdistelmäkuormitus	1,03	95	0,76
Maksimikuormitus, renkaan kontaktipinta puolien välissä			
Kuormitustila	Siirtymä (mm)	Rasitus (MPa)	Varmuuskerroin
Sivuttaiskuormitus maks.	1,77	132	1,89
Pitkittäiskuormitus maks.	0,73	69	3,62
Yhdistelmäkuormitus maks.	1,34	102	2,45
Töyssy	0,42	37	6,76
Maksimikuormitus, renkaan kontaktipinta puolan reunalla			
Sivuttaiskuormitus maks.	1,70	154	1,62
Pitkittäiskuormitus maks.	0,73	69	3,62
Yhdistelmäkuormitus maks.	1,29	119	2,10
Töyssy	0,39	41	6,10

Laskennan aikana kiinnitettiin myös huomiota matalan rasiustason kohtiin, jotta kuitukerrostojen liitoksia voidaan pyrkiä sijoittamaan niihin. Lisäksi laskennan perusteella päätettiin, että päällimmäiset kuitukerrokset asetetaan suunnassa $0^\circ / 90^\circ$, 0° :n ollessa vanteen säteen suunta ja 90° :n ollessa vanteen akselin suunta.

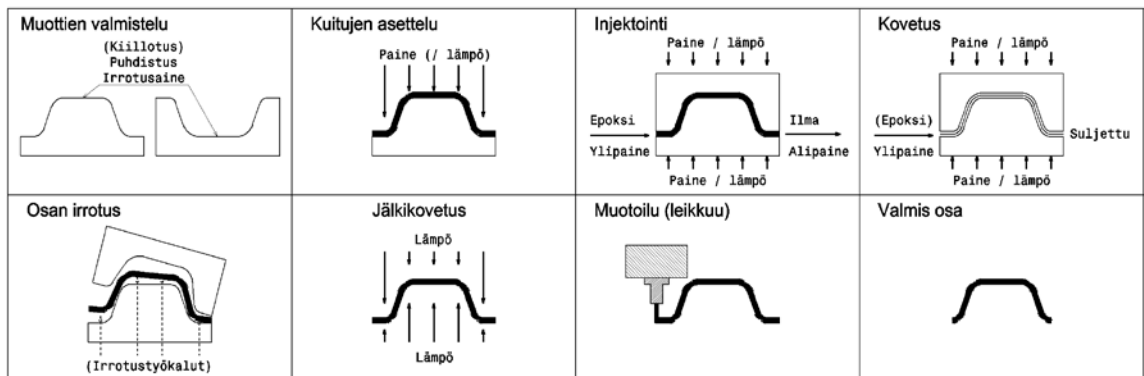
7 RTM (Resin Transfer Moulding)

7.1 Valmistusmenetelmän kuvaus

RTM on valmistusmenetelmä, jossa kuidut laminoidaan suljettujen muottien sisään ja sen jälkeen injektoidaan paineen avulla. Valmistusmenetelmän etuja ovat edulliset valmistuskustannukset, toistettava hyvä mittatarkkuus ja hyvä pinnanlaatu. Menetelmän haittapuolena ovat lähinnä monimutkaiset ja kalliit muotit sekä rajoitukset osan geometriassa. [2, s.4]

Muottien vaatimuksia ovat riittävä lujuus ja jäykkyys, hyvä lämmönjohtokyky ja hyvä pinnanlaatu. Lisäksi muotissa ei saa olla 0° tai negatiivisia päästöjä. Suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon, että muotti toimii osan injektiokanavana. [2, s.282–283]

Valmistus voidaan jakaa kahdeksaan eri vaiheeseen (kuva 21), jotka käsitellään seuraavissa kappaleissa.



Kuva 21. RTM:n vaiheet.

7.2 Muottien valmistelu

Valmiit muotit kiillotetaan pintavirheiden poistamiseksi ja käsitellään pinnan huokokset sulkevalla kemikaalilla. Jokaista tai joka toista valmistuskertaa ennen muotit käsitellään irrotusaineella.

7.3 Kuitujen asettelu

Kuidut muotoillaan valmiin kappaleen muotoihin. Tämä voidaan tehdä erillisen muotin avulla tai suoraan muottiin. Kuitujen asettelussa käytetään usein apuna epoksin kanssa yhteensopivaa liimaa. Etenkin sarjavalmistuksessa erillisen muotin käyttämisestä on hyötyä, sillä kuidut voidaan muotoilla valmiiksi, joka nopeuttaa varsinaista laminointia [2, s. 173]. Lopuksi muotit suljetaan ja puristetaan yhteen lopullisen kuitupitoisuuden saavuttamiseksi.

7.4 Injektointi

Injektointi suoritetaan usein 6–7 bar:n paineella [2, s.38]. Menetelmällä voidaan kuitenkin käyttää matalaa 0,5 bar:n injektioainetta tai korkeampaa jopa 20 bar:n painetta nopeasykliseen valmistukseen. Injektoinnissa käytetään usein myös alipainetta poistokanavan puolella, koska sen on havaittu parantavan osan laatua ja lujuutta [18].

Muotit esilämmitetään injektointilämpötilaan ja muotti alipaineistetaan. Alipaine muotin sisällä poistaa kuiduista niihin kertyneen kosteuden. Tämän jälkeen epoksi injektoidaan muottiin ja poistokanavat suljetaan yksitellen, kun epoksin mukana ei tule enää ilmakuplia.

7.5 Kovetus

Injektiokanava pidetään paineistettuna poistokanavien sulkemisen jälkeen mahdollisten ilmakuplien pienentämiseksi [19]. Muottien lämpötila nostetaan esikovetuslämpötilaan, mikäli se poikkeaa injektioilämpötilasta.

7.6 Osan poisto muoteista

Osa poistetaan muoteista mekaanisesti erinäisiä työkaluja tai esimerkiksi paineilmaa käyttäen. Muottien suunnittelussa tulee ottaa huomioon riittävät päästöt ja muottimateriaalien lämpölaajenemiskertoimet. Jälkimmäinen tulee ottaa myös huomioon osien irrotusta suunniteltaessa - tietynlaiset konstruktio on parempi irrottaa lämpiminä, kuten hiilikuituosan ulkopuolinen alumiinimuotti ja tietynlaiset kylminä, kuten hiilikuituosan sisäpuolinen alumiinimuotti.

7.7 Jälkikövetus

Jälkikövetus suoritetaan korotetussa lämpötilassa joko erillisen muotin päällä tai ilman. Tässä yhteydessä voidaan myös esimerkiksi poistaa onttojen kappaleiden lämmöllä sulatettavat keernat.

7.8 Lopullinen muotoilu

Brutto-osan reunat ja muu viimeistely tehdään yleensä koneistamalla tai käsityökaluilla lopullisesta muodosta riippuen. Riittävä leikkuuvara varmistetaan muottien suunnittelulla ja kuituja asetellessa. Valmistusmenetelmällä voidaan tehdä myös netto-osia, jolloin luonnollisesti vaatimukset kuitujen leikkuun ja asettelun tarkkuudesta kasvavat.

8 Muottien suunnittelu

8.1 Muottien suunnitteluperiaate

Muottien suunnittelussa tärkeitä kohteita ovat riittävä jäykkyys ja sulkuvoima, kuitujen hyvä aseteltavuus, hyvin sijoitellut injektiokanavat ja toimiva kohdistus ja tiivistys.

Jäykkyys saavutetaan riittävillä seinämävahvuuksilla, lujalla kiinnityksellä ja riittävällä sulkuvoimalla. Muotti prässätään kiinni vanteen akselin suunnassa, joten jäykkyyttä tarvitaan lähinnä kehämuottien suuntaan. Kohdistus tehdään erillisillä ohjuri- ja kohdistuspinoilla, ja kaikilla isoilla tiivistyspinoilla käytetään tuplatiivistystä.

8.2 Sulkuvoiman laskenta

Sulkuvoima määritellään niin, että kehät pysyvät kiinni pelkän kitkan voimalla. Yhtä sivumuottia avaava voima voidaan laskea injektio-paineen ja muotin pinta-alan perusteella:

$$F = p \cdot A, \text{ jossa} \quad (14)$$

p on injektio-paine 6 bar = 600 kPa

A on sivumuotin pinta-ala $\frac{0,204 \text{ m}^2}{3} = 0,068 \text{ m}^2$

Laskennasta saadaan tulokseksi noin 40 kN.

Tarvittava sulkuvoima saadaan kitkan kaavasta:

$$F = \frac{F_\mu}{\mu}, \text{ jossa} \quad (15)$$

F_μ on vaadittava kitkavoima 41 kN

μ on kitkakerroin: ~0,57 alumiini-alumiini [7]

Laskennasta saadaan tulokseksi 72 kN. Tähän lisätään sulkulevyjä avaamaan pyrkivä voima 1,2 kN, joka laskettiin sulkuvoiman kanavapinta-alasta (0,002 m²) kaavan 14 mukaan. Varmuuskertoimella 2 tarvittava sulkuvoima on siis noin 150 kN.

8.3 Lämpölaajenemiskompensaation laskenta

Muotit suunnitellaan valmiin kappaleen nimellismitoilla, ja lopuksi mallit skaalataan valmistusmittoihin, joissa on huomioitu lämpölaajeneminen injektio-lämpötilassa. Pituu-den lämpölaajeneminen lasketaan kaavalla

$$\Delta l = \alpha l_1 \Delta T \quad (16)$$

Sijoitetaan pituuden muutos $l = l_1 - \Delta l$ ja ratkaistaan l_1 :

$$l_1 = \frac{l}{(1+\alpha\Delta T)}, \text{ jossa} \quad (17)$$

l on muotin nimellismitta

l_1 on muotin valmistusmitta

Δl on mittamuutos

α on materiaalin lämpölaajenemiskerroin: $0,0000233 \frac{1}{^\circ\text{C}}$ [8]

ΔT on lämpötilaero: $60^\circ - 20^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$.

Laskennasta saadaan mittojen skaalauskerroimeksi $\frac{1}{1,000932}$.

Esimerkiksi renkaan asennuspinnan nimellimitan (253,9 mm) valmistusmitta on 253,7 mm.

8.4 Muottivälyksen laskenta

Muottiväly (eli laminaatin paksuus) lasketaan kaavalla

$$s = \frac{m_A \cdot n}{V_f \cdot \rho}, \text{ jossa} \quad (18)$$

m_A on kuitukerroksen pinta-alapaino $0,2 \text{ kg/m}^2$

n on kuitukerrosten määrä

V_f on valittu kuitupitoisuus tilavuuden suhteen 55 %

ρ on kuitujen tiheys 1780 kg/m^3

Laskennasta saadaan tulokseksi $0,204 \text{ mm per } 200 \text{ g/m}^2 \text{ kerros}$.

8.5 Kehämuotin lujuuslaskenta

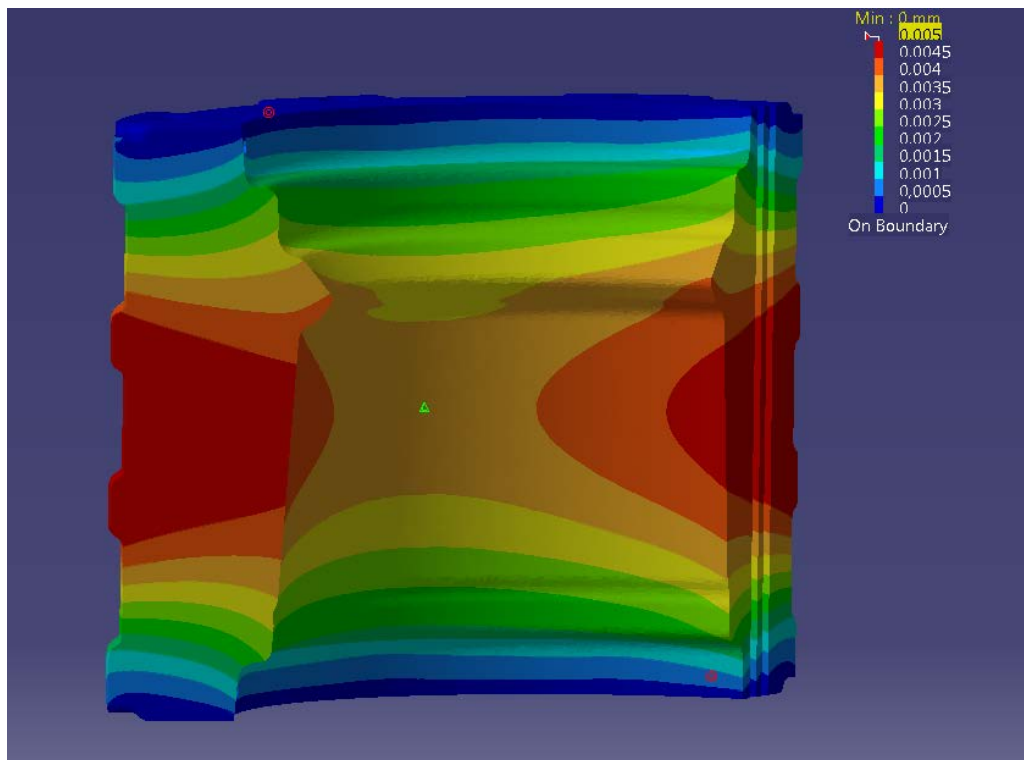
Sivumuotit ovat muoteista ainoat, joissa injektiopaineen reaktivoimat eivät välity suoraan mihinkään tukevaan pintaan, joten muotin jäykkyys varmistettiin lujuuslaskennalla.

Malli koostuu 577447 solmun verkosta ja 386432 parabolisesta tetrahedrielementistä (TE10), keskimääräisen verkon koon ollessa 9 mm. Kontakti- ja painepinnoissa käyte-

tään tiheämpää 5 mm:n verkotusta. Muodonmuutosenergian perusteella arvioitu laskennan virhe on 5,5 %.

Kiinnityspintoina käytettiin muotin todellisia kiinnityspintoja ja sisäpintaa vasten kohdistettiin injektioaine.

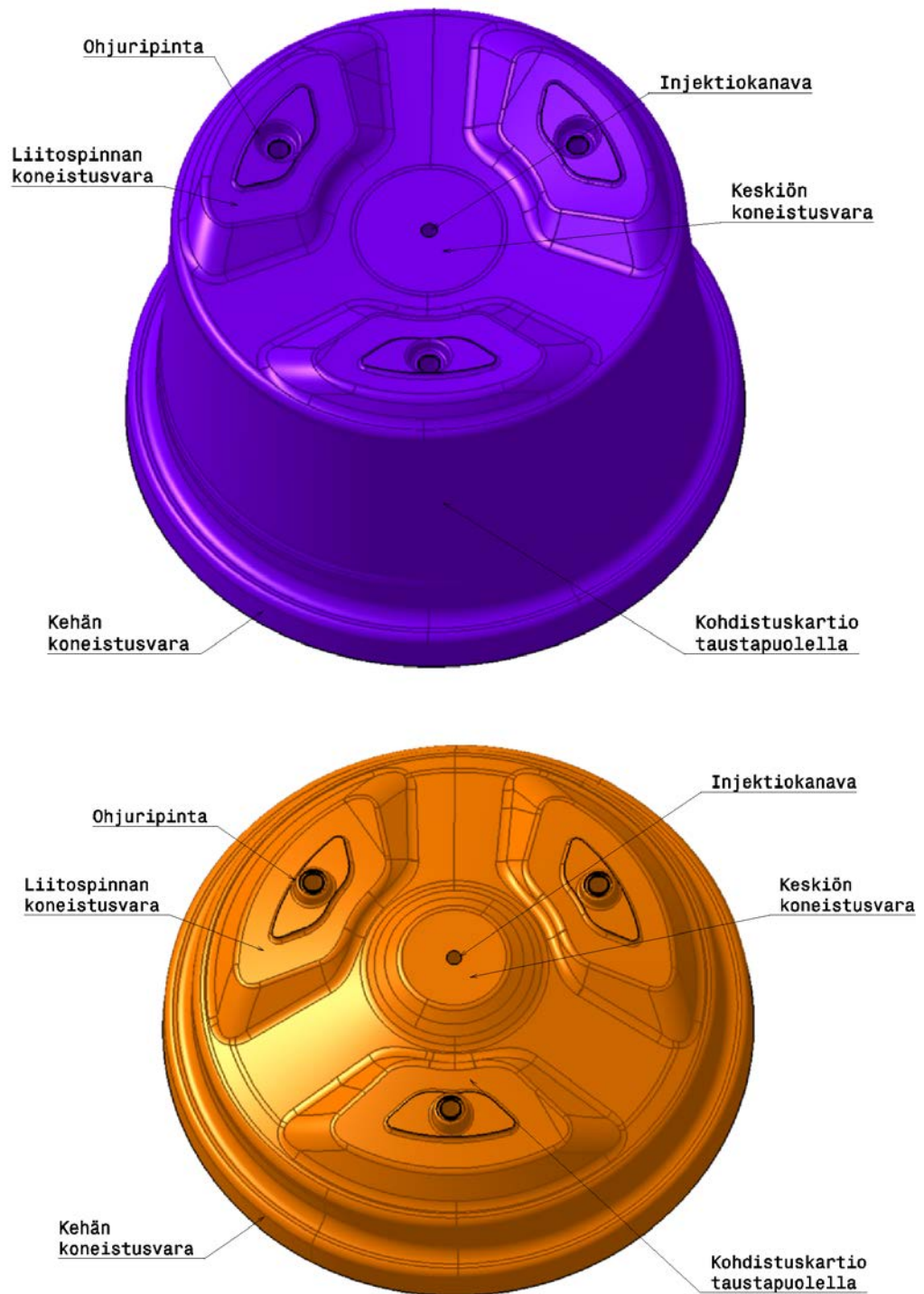
Injektioaineen aiheuttava muodonmuutos muottiin on keskimäärin vain 0,004 mm (kuva 22), joten muotin jäykkyys katsotaan riittäväksi. Lisäksi jäykkyyttä lisäävät hieman sivumuottien keskinäinen kitka ja muotin ympärille jätettävät kiristyspannat.



Kuva 22. Sivumuotin muodonmuutos injektioaineen vaikutuksesta

8.6 Sisämuotit

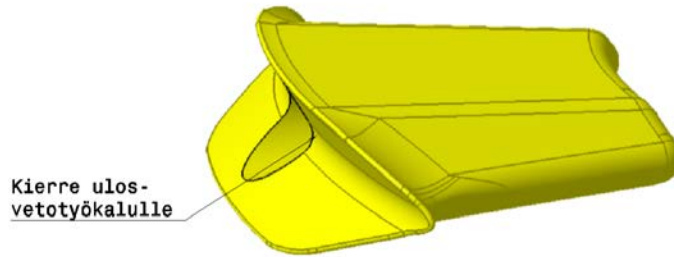
Sisämuottien suunnittelussa erityisen tärkeää on riittävien päästöjen (4° tai enemmän [19]) varmistaminen. Muotit ohjataan toisiinsa välyksellisillä koneistetuilla kartiopinnoilla, ja lopullinen kohdistus tehdään sulkulevyjen ja kehämuottien kautta. Sisämuottien toiminnallisia kohtia on esitetty kuvassa 22.



Kuva 23. Sisämuottien mallit.

8.7 Puolien muotit

Puolan muottina käytetään muotokappaletta (kuva 24), joka vedetään vanteen säteen suunnassa ulos valmiista vanteesta. Kierre suojataan valmistuksen ajaksi talttapäisellä senkkikantaruuvilla ja silikonitulpalla.

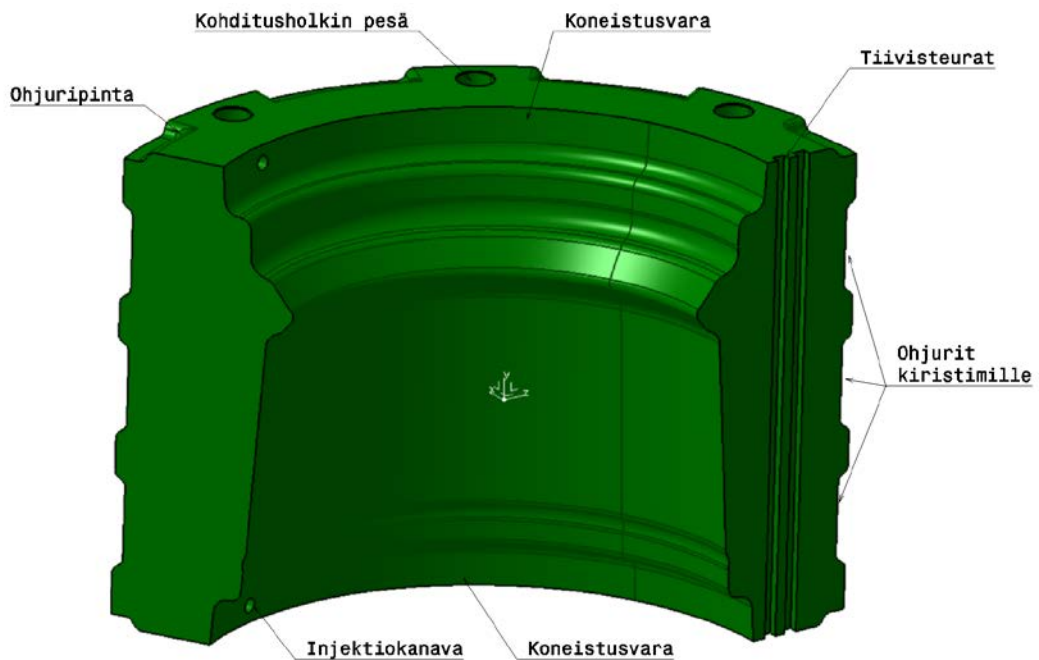


Kuva 24. Puolan sisämuotin malli.

Mikäli puolien sisämuottien irrottamisessa ilmenee ylipääsemättömiä ongelmia, voidaan vanteiden valmistusta yrittää ydinaineen tai sulavien keernojen avulla.

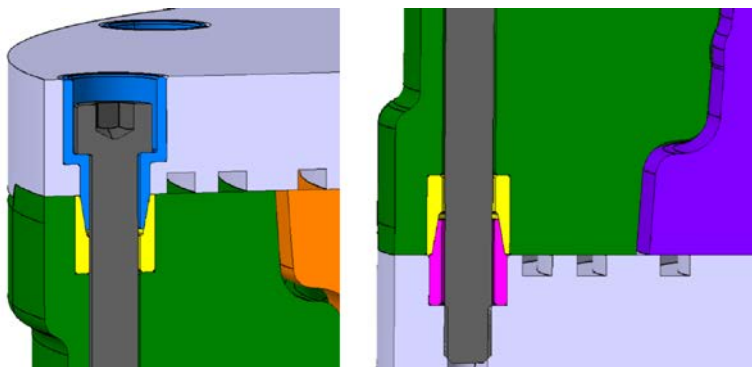
8.8 Kehämuotit

Muotin kehä koostuu kolmesta samanlaisesta muotista (kuva 25), jotka asetetaan paikalleen kiristyspannoilla ja lukitaan sulkulevyissä olevilla ohjuripinnoilla ("kynsillä"). Kiristyspannat pidetään paikallaan injektoinnin aikana muotin jäykkyyden lisäämiseksi.



Kuva 25. Kehämuotin malli.

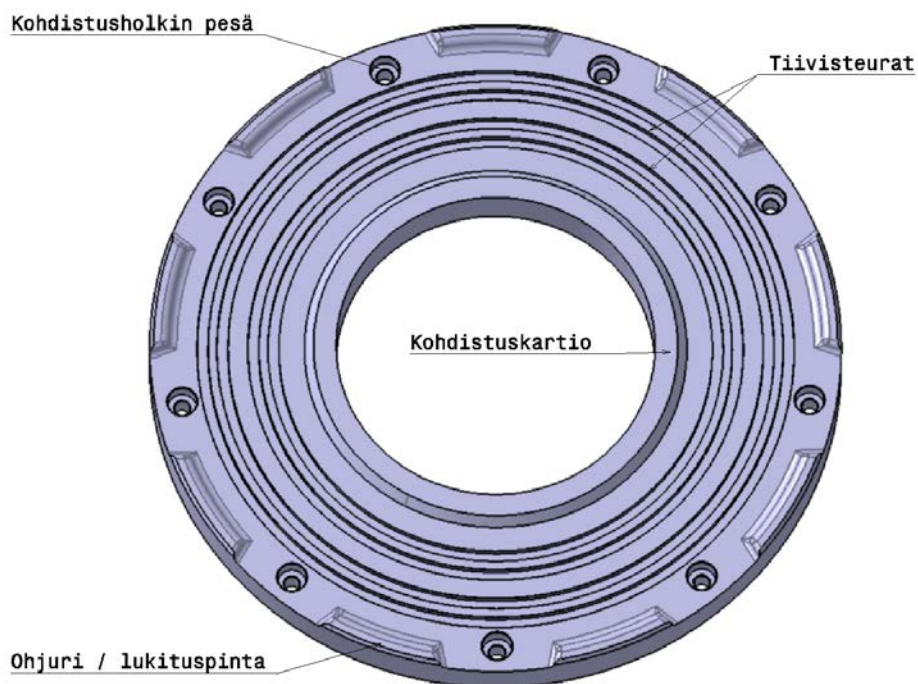
Lopullinen kohdistus tapahtuu teräksestä valmistetuilla kartioholkeilla (liite 1), joiden läpi myös kiinnityspultit kulkevat (kuva 26).



Kuva 26. Teräksiset kohdistusholkit ja kehän lankapultit.

8.9 Sulkulevyt

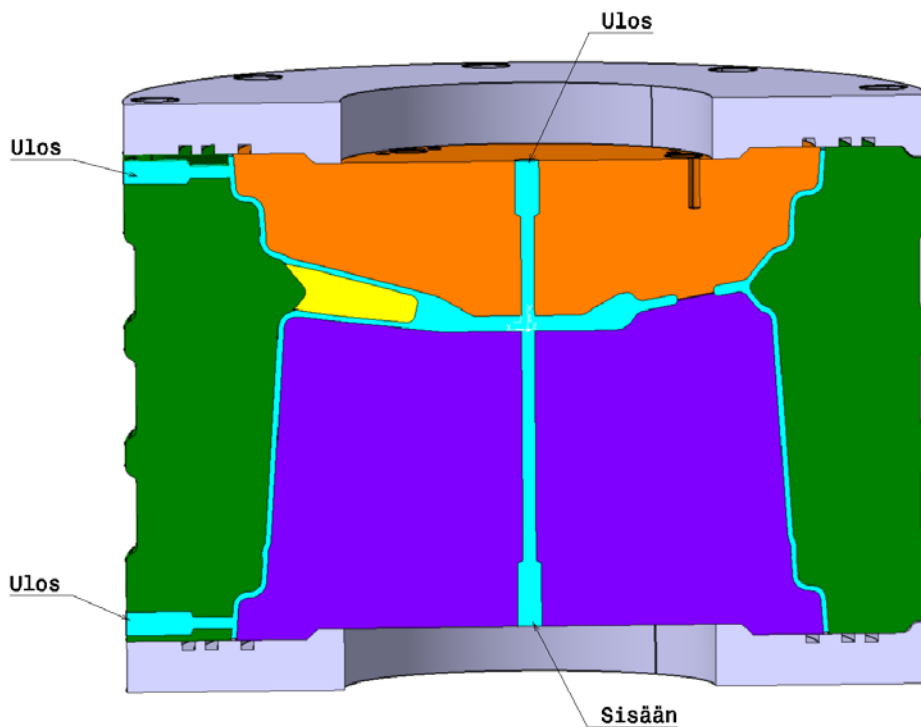
Sulkulevyjä käytetään muotin lopulliseen sulkemiseen, kohdistamiseen ja tiivistämiseen (kuva 27). Sulkulevyn keskellä on aukko injektioletkuja ja sisämuottien pulttien kiristämistä varten. Sulkulevyn taustapuolella on syvennys injektioletkulle ja M10 kierteet nostolenkeille.



Kuva 27. Alasulkulevyn malli.

8.10 Injektointikanavat

Injektointi tehdään yhdestä kanavasta alamuotin kautta. Poistokanavat sijaitsevat injektointivan tilavuuden äärelaidoilla, jotta muotista saadaan ilma mahdollisimman hyvin pois. Kolme poistokanavaa sijaitsee ylämuotin keskellä ja kehämuotin ylä- ja alareunassa (kuva 28).



Kuva 28. Muotin injektiokanavat.

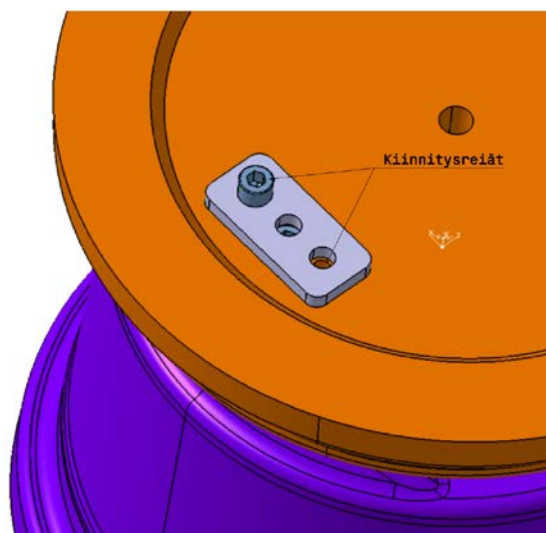
8.11 Työkalut

8.11.1 Tarvittavat työkalut

Muotit irrotetaan pääsääntöisesti normaaleilla käsityökaluilla, mutta muottien irrottamiseen valmistetaan myös kaksi erikoistyökalua.

8.11.2 Sisämuottien irrotustyökalut

Muottien irrottamiseen käytetään muotit toisiinsa kiinnittäviä pultteja. Pultin kantojen päälle kiinnitetään levyt, jolloin kiinnityspulttien kiristysvoima saadaan käännettyä muotteja erottavaksi voimaksi (kuva 29).



Kuva 29. Sisämuottien erotustyökalu.

Mikäli vanne jää irrottaessa toiseen muottiin kiinni, voidaan vanteen keskiön koneistusvaraa lyödä tuurnalla injektiokanavan kautta. Irrottamista voidaan myös avittaa muotteja jäähdyttämällä.

8.11.3 Puolamuotin ulosvetotyökalu

Ulosvetotyökalu on vanteen kehän mallinen muotokappale, jossa on kohdistusreiät ja pesä puolan muotille (kuva 30). Ulosvetotyökalu voidaan valmistaa erikseen tai esimerkiksi kehämuotin valmistuksen harjoituskappaleesta. Puolan muotti vedetään ulos pinnapultin avulla.



Kuva 30. Puolan sisämuotin ulosvetotyökalu.

9 Valmistus

9.1 Alumiinikeskiöt

Alumiinikeskiöt valmistettiin koneistamalla koulun konelaboratoriossa. Aihiot sorvattiin ensin molemmin puolin ja samalla tehtiin keskiön reikäkehä, jota käytettiin keskiön paikoittamisessa jrsintää varten. Sen jälkeen keskiö jrsittiin yhdeltä puolelta.

Koneistuksen jälkeen keskiöt lasikuulapommitettiin ja maalattiin. Kuvassa 31 on keskiö ennen pommitusta.



Kuva 31. Alumiinikeskiö koneistuksen jälkeen.

Valmistusaika kymmenelle keskiölle oli noin 30 tuntia, josta 10 tuntia käytettiin ohjelmien tekemiseen ja 10 tuntia itse koneistamiseen. Jrsinpäällä varustetulla sorvilla valmistaminen olisi ollut mahdollista 20 tunnissa.

9.2 Muotit

Alumiinimuotit valmistetaan koneistamalla koulun konelaboratoriossa. Sisämuottien aihiot sorvataan ensin molemmin puolin. Sen jälkeen muotteihin jrsitään puolien muodot. Paikoituksessa käytetään muottien kohdistamiseen tarkoitettua kartiota muotin taustapuolella.

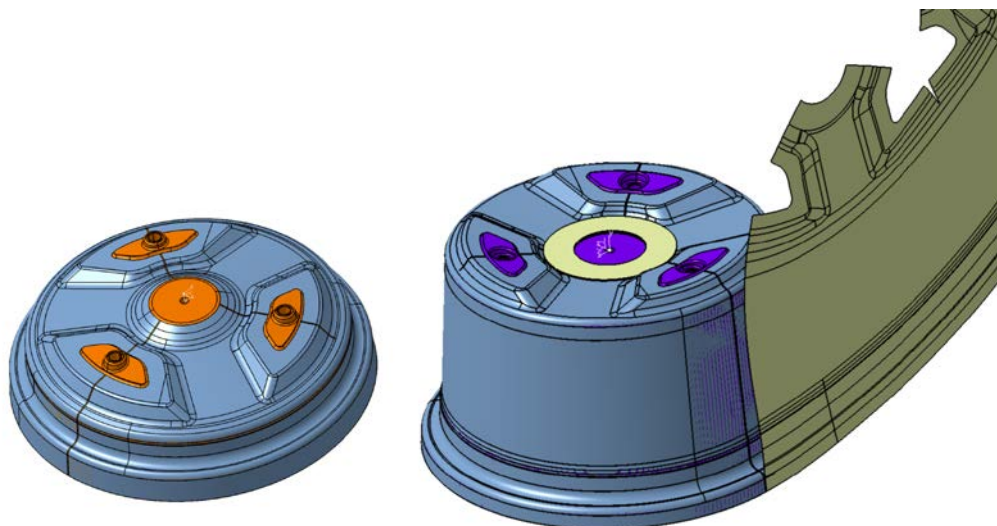
Kehämuotit jyrsitään molemmin puolin vanteen akselin suuntaisesti. Lopuksi päätyyn jyrsitään tiivisteurat ja yhteen kehämuottiin injektiokanavat. Paikoittamiseen käytetään kohdistuspintoihin muotoiltua kiinnitintä.

Sulkulevyt jyrsitään molemmilta puolilta. Paikoittamiseen käytetään levyjen keskireikää.

Muottien valmistusaika on noin 150 tuntia, joka jakaantuu tasan ohjelmien teon, työkalujen valmistuksen ja aihoiden paikoittamisen, ja varsinaisen koneajan välille. Lisäksi muottien viimeistelyyn ja kiillottamiseen menee noin 15 tuntia.

9.3 Komposiittivanteet

Komposiittivanteet valmistetaan CSI Oy:n tiloissa Mänttä-Vilppulassa. Vanteiden valmistamisessa seurataan pitkälti RTM:n yleisiä valmistusvaiheita (luku 7). Kuidut leikataan sapluunoiden avulla ja asetellaan muotteihin käsin. Laminointi aloitetaan kehäpinoilta, joista kuidut taitetaan keskiöihin ja limitellään kontaktipinnan kuitujen kanssa (kuva 32). Liitoskohdat ja mahdolliset helpotusviillot pyritään sijoittamaan mahdollisimman pienen rasituksen omaaville alueille.

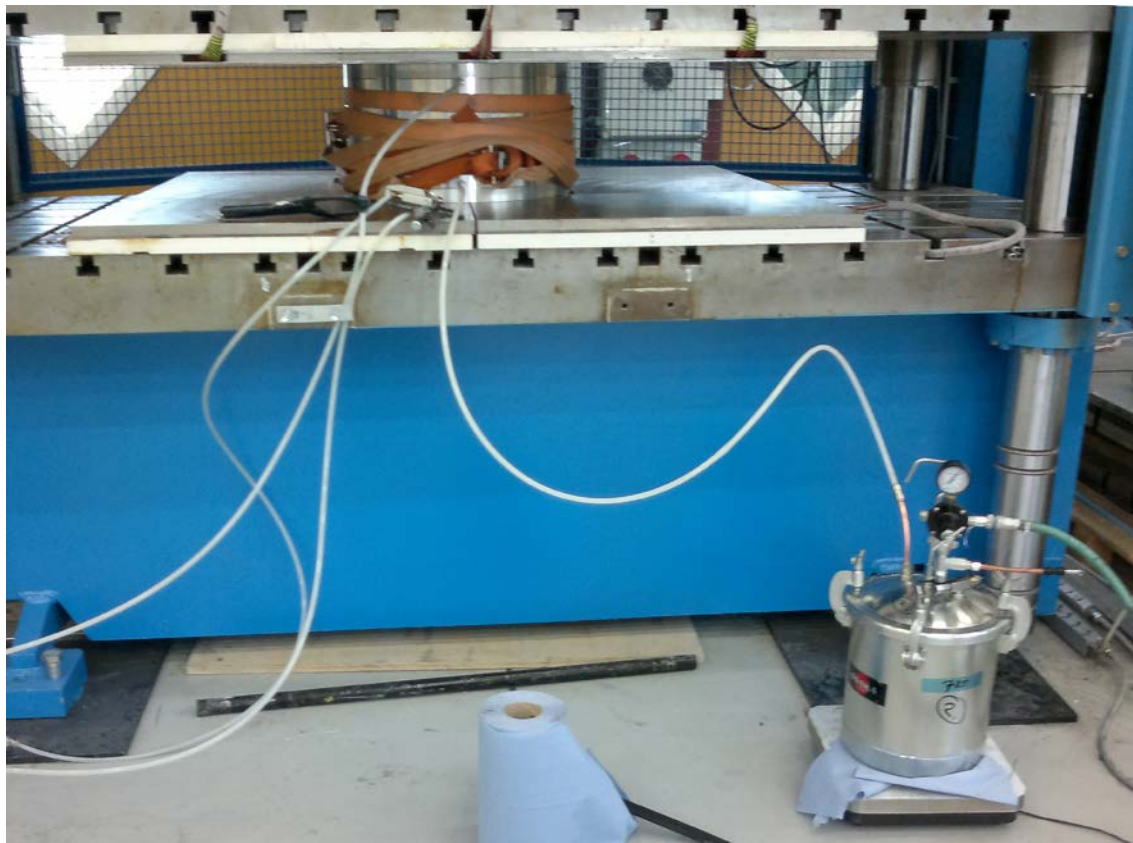


Kuva 32. Ensimmäiset laminointivaiheet. Keskiöön taitettavat kuidut limitetään keskiön kuitujen kanssa.

Kehäpintojen laminoinnin jälkeen asetellaan puolamuotit ja suljetaan (löysästi) sisämuotit. Kehälle laminoidaan vielä kaksi twill-kerrosta, jonka jälkeen kehämuotit sulje-

taan. Sulkulevyjen asentamisen jälkeen viimeisenä kiristetään sisämuottien kiinnityspultit.

Muotti siirretään prässäiin, jossa muotti suljetaan 1500 kN:n voimalla (kuva 33). Muotti lämmitetään prässäissä olevien lämpölevyjen avulla 60 °C injektio- $\text{\textcircled{C}}$ lämpötilaan. Sen jälkeen muotti alipaineistetaan kuitujen kuivaamiseksi.



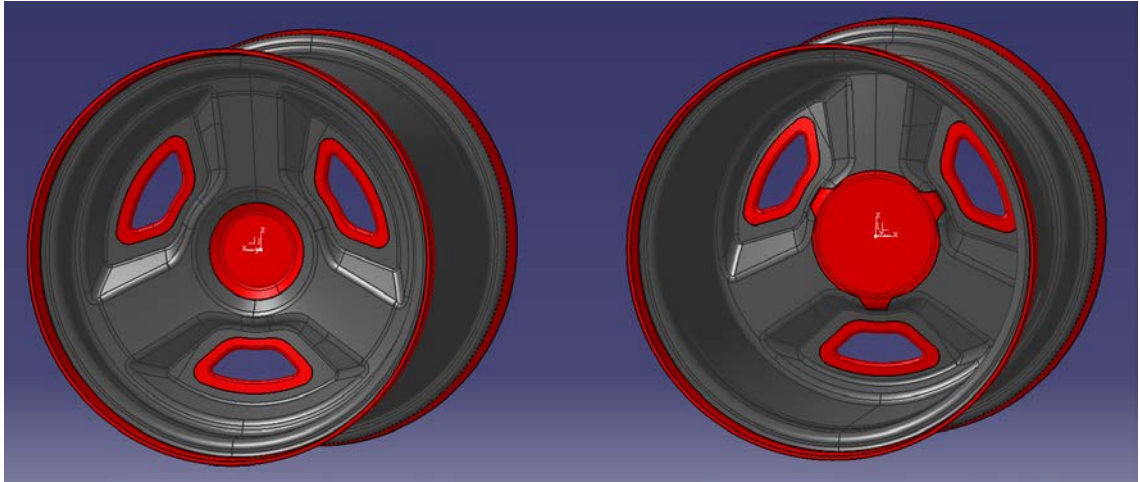
Kuva 33. Prässäillä varmistettu muotti ja injektio- $\text{\textcircled{C}}$ laitteistoa. Massavirtausta seurataan vaa’an ja kellon avulla.

Injektointi tehdään 6 bar:n paineella. Injektointia seurataan visuaalisesti ja epoksin massavirtausnopeutta mittaamalla. Näin voidaan huomata injektioinnissa mahdollisesti ilmenevät ongelmat välittömästi.

Muottiin jätetään esikoveituksen ajaksi injektio- $\text{\textcircled{C}}$ paineen suuruinen jälkipaine. Esikoveitussykli on 2 tuntia 60 °C:ssa, jonka jälkeen muotin annetaan jäähtyä huoneenlämpötilaan. Muotin avaamisen jälkeen vanne irrotetaan ja jälkikovetetaan 8 tuntia 140 °C:ssa.

Lopuksi vanne koneistetaan lopulliseen muotoonsa: kehien ja puolien reunat viimeistellään, ja keskiöön jyrsitään muotolukitukset (kuva 34). Keskiön kiinnityspinta myös plaa-

nataan, jotta vältetään epoksin pinnan rikkoontumisesta aiheutuvasta asettumisesta ja kitkakertoimen muutoksilta [14].



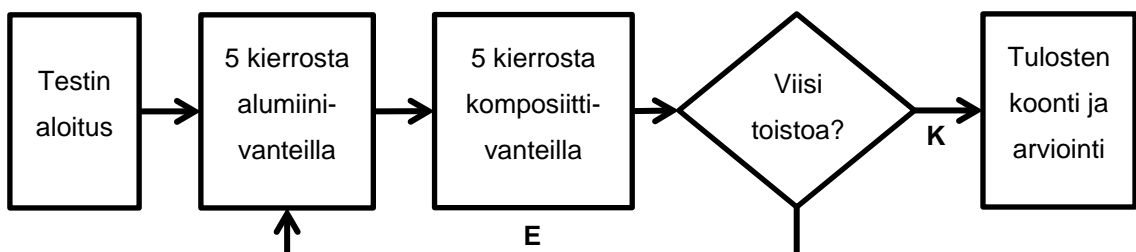
Kuva 34. Vanteen koneistettavat alueet.

Koneistuksen jälkeen vanteet punnitaan, jolloin voidaan varmistua vanteen keskimääräisestä kuitupitoisuudesta.

Yhden vanteen valmistusaika on noin vuorokausi. Lisäksi jokaisen vanteen koneistamiseen menee noin puoli tuntia. Vanteen valmistuskykliä pystyttäisiin tarpeen vaatiessa nopeuttamaan, mutta näin pienellä sarjalla siihen ei ole tarvetta.

10 Testaus

Vanteiden pääasiallinen testausmetodi on niillä ajaminen. Suorituskykyä voidaan arvioida ajamalla testejä peräjälkeen alumiini- ja komposiittivanteilla ja sitten vertailemalla testin kierrosaikoja. Esimerkki testistä on esitetty kuviossa 1.



Kuvio 1. Vanteiden suorituskykyvaikutuksen testaaminen

Testissä on tärkeää pyrkiä pitämään renkaiden lämpötila hyvin samankaltaisena vannerarjojen välillä ja eliminoimaan ympäristön vaikuttavat tekijät, esimerkiksi hetkelliset sääolosuhteet. Molempiin ratkaisuna ovat lyhyet ajotestit useammalla toistolla.

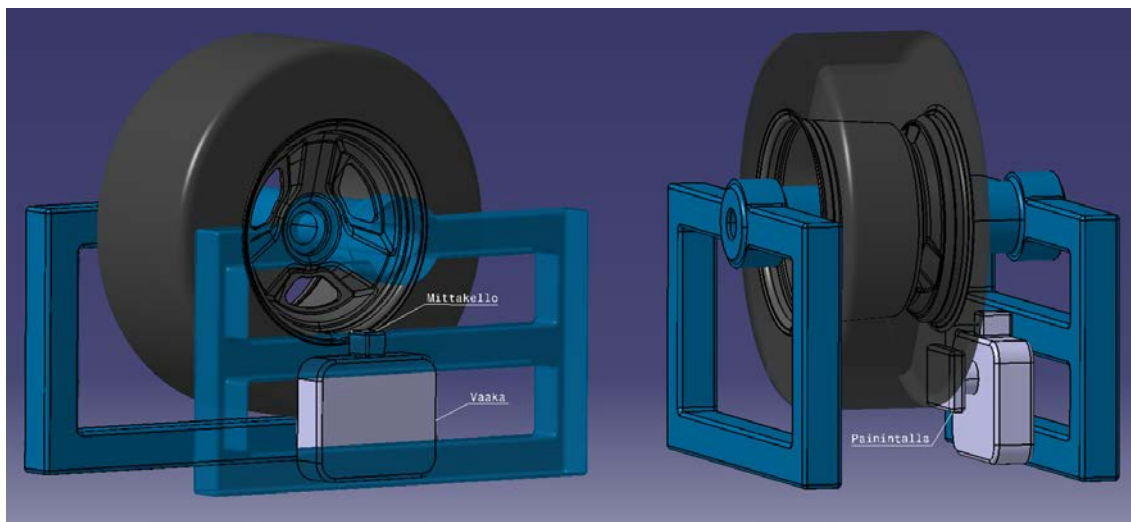
Samanlaisella testillä voidaan arvioida myös vanteen vaikutusta renkaan lämpenemisnopeuteen, mikäli auto varustetaan suunnitelmien mukaisesti rengaslämpöantureilla (kuva 35). Testin tuloksia selkeyttää, mikäli se tehdään erillisenä testinä, jossa jokaisen toiston välissä renkaiden annetaan jäähtyä tiettyyn ennalta määritettyyn lämpötilaan.



Kuva 35. Infrapunalla toimivat rengaslämpöanturit HPF011/20-kilpa-autossa.

Vanteiden mekaanisista ominaisuuksista tärkein on vanteen jäykkyys sivuttaiskuormituksessa. Vertaileva testaus pystytään suorittamaan suhteellisen yksinkertaisella laitteistolla, joka koostuu vanteen paikalleen lukitsevista pukeista, vaa'asta, mekaanisesta tai hydraulisesta painimesta ja vähintään yhdestä mittakellosta (kuva 36).

Testi suoritetaan lisäämällä rengasta sivulle työntävää voimaa asteittain ja kirjaamalla vanteen kehän siirtymä kullakin sivuvoimalla. Testi toistetaan esimerkiksi alumiinivanteelle tai toiselle komposiittivanteelle vertailutulosten saamiseksi.



Kuva 36. Yksinkertainen testijärjestely vanteiden jäykkyyden vertailuun.

Mikäli halutaan vertailun lisäksi mitata vanteen todellista jäykkyyttä, voidaan laitteisto varustaa useammalla mittakellolla, joilla mitataan ja kompensoidaan itse laitteiston jousto kuormituksen alla.

11 Yhteenveto

Työssä käytiin läpi HPF14e-kilpa-auton alumiinivanteiden ja komposiittivanteiden sekä vannemuottien suunnittelu ja esiteltiin valmistuksen vaiheet. Työn palautusvaiheessa kokemusta vanteiden toiminnasta ei vielä ole. Kokemusten perusteella alumiinivanteiden toiminnassa ei ole syytä odottaa suurempia yllätyksiä, ja testikauden aikana selviää komposiittivanteiden toimivuus ja mielekkyys. Joka tapauksessa tiimi saa tärkeää kokemusta itse suunnitellun kehäprofiilin toimivuudesta ja rakenteellisten komposiittiosien käytöstä.

Suunnittelussa on annettu erityistä painoarvoa osien helppolle valmistettavuudelle, joka etenkin alumiinivanteiden kohdalla osoittautui onnistuneeksi. Myös komposiittivanteiden laminoiminen pitäisi olla suhteellisen helppoa ja siten edesauttaa valmistusvirheiden välttämisessä.

Suunnittelun ja valmistuksen kannalta vaikein osa on komposiittivanteen muotit. Muotien tulee käytännössä soveltua sekä komposiittiosan että valuosan valmistukseen, joka aiheuttaa suunnittelussa tarpeen monenlaisille kompromisseille. Tämän lisäksi muodot tulisi olla vielä valmistettavissa käytettävissä olevilla tai edullisilla koneistustyö-

kaluilla. Lopputuloksessa kaikki lähtökohtaiset ongelmat kuitenkin onnistuttiin ratkaisemaan.

RTM vaikuttaa valmistusmenetelmänä pätevältä sarjavalmisteisien komposiittiosien valmistukseen. Prototyypikäytössä muottikustannukset nousevat korkeiksi, mutta valmiilla muoteilla vanteita pystyttäisiin tekemään satoja yhden - kahden vanteen päiväsyklillä ilman suurempia lisäkustannuksia. Lisäksi kappaleiden muototarkkuuden pitäisi olla hyvä ja pysyvä toistettavana.

Komposiittivanteiden valmistuksen aikana vanteet tullaan 3D-skannaamaan eri valmistusvaiheiden välillä muotomuutosten ja -tarkkuuden tutkimiseksi. Skannaus suoritetaan muotista irrottamisen, jälkikövetuksen ja koneistuksen jälkeen mahdollisten muutosten havaitsemiseksi.

Työn pohjalta jää monia eri haaroja jatkokehittämiseksi, joista jokaisen pohjalta olisi mahdollista tehdä oma päättötyönsä:

- vanteiden lujuuslaskennan kehittäminen tarkemmaksi, ja laskentojen vertaaminen fyysisten kokeiden tuloksiin
- vanteiden lujuuslaskenta kuitukerrosten ominaisuudet huomioiden ja optimaalisten kuitusuuntien etsiminen
- injektoinnin simulointi ja optimointi (mm. kanavien sijainti ja kuitusuunnat)
- erilaisten puolaratkaisuiden tutkiminen: ydinaineen käyttö ja sulavat keernat. Etenkin jälkimmäinen vaihtoehto on erittäin potentiaalinen kehityskohde, ja nykyinen muotti ja jälkikövetussykli mahdollistavat kokeilut esimerkiksi matalassa lämpötilassa sulavilla metalleilla (vismuttipohjaiset seokset)
- onttojen puolien hyödyntäminen vakiopainevanteen toteuttamisessa.

Näistä etenkin kuituoptimointi ja erilaisten puolaratkaisuiden tutkiminen on kannattavaa, mikäli komposiittivanteet osoittautuvat testikaudella toimiviksi ja jatkokehittäminen nähdään tarpeelliseksi.

Lähteet

- 1 European Tyre and Rim Technical Organisation. 2004. Standards manual 2005. Bryssel, ETRTO.
- 2 Kruckenberg, T. & Paton R. 1998. Resin Transfer Moulding for Aerospace Structures. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- 3 Cândido G. & Rezende M. & Almeida S. 2000. Hygrothermal Effects on the Tensile Strength of Carbon/Epoxy Laminates with Molded Edges. Materials Research, Vol. 3, No. 2. s.11-17.
- 4 Auton Dynamiikka AT09. Luentomateriaali. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 5 Suzuki H., Makino H., Mizuno K. & Tomita T. 2008. Influence of Shot Peening on Fatigue Strength of Aluminium-Alloy Parts. Nagoya, Sintokogio LTD.
- 6 Zupanc U. & Grum J. 2011. Surface Integrity of Shot Peened Aluminium Alloy 7075-T651. Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering 57.
- 7 Boyer, Howard E. 2006. Atlas of Fatigue Curves. Ohio, ASM International.
- 8 Alumeco Oy. 2013. Tuote-esite.
- 9 Hexcel Corporation. 2013. Tuote-esite HexTow IM7.
- 10 Huntsman Advanced Materials. 2011. Tuote-esite Araldite LY 1564 / Aradur 2954.
- 11 Halme, Juha. 2002. Development Testing of a Composite Wing Rib. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu.
- 12 Elonen, Timo. 2011. Tekninen päällikkö, Metropolia Motorsport ry, Helsinki. Keskustelu 12.10.2010.
- 13 Kannisto, Kari. 2011. Toimitusjohtaja, CSI Composite Solutions and Innovations Oy, Vilppula. Keskustelu 28.11.2011.
- 14 Schön, Joakim. 2004. Tribology International 37 / Coefficient of friction in contact with a carbon fiber epoxy composite. Stockholm, Swedish Defence Research Agency.
- 15 American Society for Metals. 1992. ASM Handbook Volume 18: Friction, Lubrication and Wear Technology.

- 16 Heslehurst, Rik. 2011. Estimating Composite Bearing Strength. Composites Australia.
- 17 Heinrietz A., Lehrke H-P. & Rupp A. 2003. Identification of Parametric Tire Models for the Fatigue Evaluation of Suspension Components. Darmstadt, SAE.
- 18 Hayward, J. & Harris B. 1990. Effect of Process Variables on the Quality of RTM Mouldings. SAMPE Journal, Vol. 26, No. 3, s. 39–46.
- 19 Korpimäki, Jani. 2012. Suunnittelija, CSI Composite Solutions and Innovations Oy, Vilppula. Keskustelut 09.01.2012 ja 10.04.2012.

Esimerkki kohdistusholkin työkuvasta

