



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

SÜSINIIVELJE PROJEKTEERIMINE VORMELAUTOLE FEST19

CARBON FIBER WHEEL DEVELOPMENT FOR FORMULA CAR FEST19

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Villu Sarv

Üliõpilaskood: 183247 MATM

Juhendaja: Martin Eerme, professor

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....." 2020

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2020

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2020

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Villu Sarv, 183247 MATM

Õppekava, peeriala: MATM02/18 - Tootarendus ja tootmistehnika

Juhendaja: professor Martin Eerme, 620 3270

Konsultant:(nimi, amet)

.....(ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

Süsinikvelje projekteerimine vormelautole FEST19

Carbon Fiber Wheel Development for Formula Car FEST19

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Modelleerida vormelauto FEST19 parameetritele vastav süsinikvelg.
2. Leida sobiv tehnoloogia süsinikvelgede tootmiseks.
3. Toota FS Team Tallinna esimesed süsinikveljed.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Varasemate lahenduste uurimine	30.09.2018
2.	Esmase CAD mudeli modelleerimine	14.10.2018
3.	Süsinikvelje tugevusanalüüsiga alustamine	01.11.2018
4.	Detaili laminaadi lukustamine	01.03.2019
5.	Vormide tootmise alustamine	31.03.2019
6.	Süsinikvelgede tootmise alustamine	08.04.2019

Töö keel: Eesti keel

Lõputöö esitamise tähtaeg: "25" mai 2020 a

Üliõpilane: Villu Sarv "....."2020 a
/allkiri/

Juhendaja: Martin Eerme "....."2020 a
/allkiri/

Konsultant: "....."2020 a
/allkiri/

Programmijuht: "....."2020 a
/allkiri/

SISUKORD

Sisukord	4
Eessõna	8
Lühendite ja tähiste loetelu	9
Sissejuhatus	10
1 Eelnevad lahendused ja probleemi püstitus	12
2 Süsinikvelje projekteerimine	15
2.1 Teiste meeskondade lahendused	15
2.2 Katsekehad	16
2.2.1 Õõnes profiil	16
2.2.2 Täitematerjaliga profiil	18
2.3 Kodarvelje ja täisvelje võrdlus	19
2.4 Velje modelleerimine	20
2.4.1 Lähteparameetrid velje modelleerimisel	20
2.4.2 CAD modelleerimine	22
3 Tugevusanalüüs	28
3.1 Varasema detaili analüüs	28
3.1.1 Analüüsimudel	28
3.1.2 Tugevusanalüüs	29
3.2 Projekteeritava detaili analüüsimudel	30
3.3 Komposiitkeha ülesehitus	31
3.4 Analüüsiivõrgustik	32
3.5 Rajatingimused	33
3.6 LEM tugevusanalüüsimine	36
3.7 Rõhu tugevusanalüüs	41
4 Tootmine	42
4.1 Vormimaterjali valik	42
4.2 Vormide modelleerimine	43
4.3 Vormide tootmine ja ettevalmistus	44
4.4 Velgede tootmine	45
4.4.1 Lamineerimine	46
4.4.2 Laminaadi parandused	52
4.5 Tsentreerimisrõnga projekteerimine ja tootmine	52
4.6 Tootmise järelused	53
5 Lahenduse Valideerimine	55
6 Majanduslike aspektide ülevaade	57
Kokkuvõte	59

Summary	61
Kasutatud kirjanduse loetelu	63
Lisad	64
Graafiline osa	67
Sele 1.1 FS Team Tallinna 2008 aasta hooaja võistlussõiduk FEST8	12
Sele 1.2 FS Team Tallinna 2017 aasta hooaja võistlussõiduk FEST17	12
Sele 1.3 FS Team Tallinna 2018 aasta hooaja võistlussõiduk FEST18 [2]	13
Sele 1.4 FEST14/16 purunenud veljetsenter.....	13
Sele 1.5 2019 aasta hooaja tarbeks valminud alumiiniumist võru ja tsentri kombinatsioon	14
Sele 2.1 KA-Raceing kodarvelg vasakul [3] ja AMZ Racingu täisvelg paremal [4].....	15
Sele 2.2 Valminud katsekehad	16
Sele 2.3 Seest tühja katsekeha lamineerimine	17
Sele 2.4 Katsekeha lamineerimine (vasakul sisemise profiiliga, paremal vahuga).....	17
Sele 2.5 Täitematerjaliga katsekeha vormi lamineerimise protsess	18
Sele 2.6 Rehvitootja poolsed parameetrid [8].....	20
Sele 2.7 Velje parameetrid	21
Sele 2.8 Nurgakoost velje läbilõikega	22
Sele 2.9 OZ Formula Student Magnesium CL 10" wheel [9].....	22
Sele 2.10 TU Graz Racing Team 2017 aasta võistlussõiduki süsinikvelg [10]	23
Sele 2.11 CATIA V5 renderdus velgede CAD mudelitest I.....	24
Sele 2.12 CATIA V5 renderdus velgede CAD mudelitest II.....	24
Sele 2.13 Velgede V4 (vasakul) ja V5 (paremal) läbilõiked.....	25
Sele 2.14 CATIA V5 renderdus velgede CAD mudelitest III	26
Sele 2.15 Lõpliku lahenduse CAD mudeli renderdus	26
Sele 2.16 Lõpliku velje CAD mudeli läbilõike renderdus	27
Sele 3.1 Analüüsitava koost tarkvaras ANSYS 17.2.....	28
Sele 3.2 Varasema lahenduse deformatsioon kriitilisimas olukorras.....	29
Sele 3.3 Varasema lahenduse maksimaalne pinge kriitilisimas olukorras.....	29
Sele 3.4 Esimese velje analüüsimudel tarkvaras CATIA V5.....	30
Sele 3.5 Viimase analüüsitava detaili analüüsimudel koos jõu rakenduspunktidega	30
Sele 3.6 Lõpliku detaili komposiitkeha ANSYS 17.2-e ACP Pre keskkonnas	31
Sele 3.7 Nähtav kanga kiu suund (rohelist nooled) ja kasvusuund (roosad nooled).	32
Sele 3.8 Lõpliku analüüsimudeli analüüsivõrgustik	32
Sele 3.9 Nähtaval kohad, kus on vähendatud analüüsivõrgustiku suurust	33
Sele 3.10 Veljele mõjuvad jõud I	34
Sele 3.11 Veljele mõjuvad jõud II.....	34

Sele 3.12 Esimese analüüsitud velje geomeetria Tsai-Wu tegur	36
Sele 3.13 Lõpliku detaili deformatsioon kriitilisimas olukorras.....	37
Sele 3.14 Lõplikus detailis tekkivad pinged kriitilisimas olukorras.....	37
Sele 3.15 Lõpliku detaili Tsai-Wu tegur kriitilisimas olukorras I.....	38
Sele 3.16 Lõpliku detaili Tsai-Wu tegur kriitilisimas olukorras II.....	38
Sele 3.17 Programmi suutmatus kihte ühendada	39
Sele 3.18 Lõpliku detaili Tsai-Wu tegur kriitilisimas olukorras III	39
Sele 3.19 Momendi analüüsi rajatingimused vasakul ja velje deformatsioon paremal	40
Sele 3.20 Momendi analüüsi tulemused (pinge vasakul ja Tsai-Wu koefitsient paremal)	40
Sele 3.21 Kolmekordse momendi analüüs (vasakul deformatsioon ja paremal Tsai-Wu)	40
Sele 3.22 Velje deformatsioon 9 barise rehvirõhu juures	41
Sele 3.23 Velje Tsai-Wu tegur 9 barise rehvirõhu juures.....	41
Sele 4.1 Vormi kahanemise mõju detailile.....	43
Sele 4.2 Vormi mudel (vasakul) ja liitepind (paremal)	43
Sele 4.3 Mutri pesa deformatsioon Z-telje sihis	44
Sele 4.4 Rummu pinna deformatsioon Y-telje sihis.....	44
Sele 4.5 Ülemine vormipool peale lõiketötlust (vasakul), mõlemad vormipooled peale poleerimist (paremal).....	45
Sele 4.6 Süsinikkiud kanga šabloonid (vasakul) ja lõigatu lapid (paremal)	46
Sele 4.7 Esimese vormipoolde kihtide lamineerimine (ülekatte eraldatud roosa eralduskilega)	47
Sele 4.8 Velje täitematerjali sobitamine (vasakul) ja täitematerjal kaetuna liimriidega (paremal)	47
Sele 4.9 Alumine (vasakul) ja ülemine vormipool (paremal)	48
Sele 4.10 Liidetud vormipooltele lamineerimine	48
Sele 4.11 Viimase etapi lamineerimine	49
Sele 4.12 Eralduskile ja õhku juhtiva kangaga kaetud detail vasakul ja vakumeeritud detail paremal.....	49
Sele 4.13 Detail peale termotötlust vasakul ja peale vormist välja võtmist paremal.	50
Sele 4.14 Esimene velg peale lihvimist	51
Sele 4.15 Neljanda velje lihvimine	51
Sele 4.16 Järeltöödeldud (vasakul) ja töötlemata (paremal) velje võrdlus.....	51
Sele 4.17 Puks lahendus.....	52
Sele 4.18 Tsentreerimisrõngas tarkvaras Catia V5 (vasakul) ja programmis ANSYS 17.2 (paremal).....	53

Sele 4.19 Autori modelleeritud (vasakul) ja lihtsustatud (paremal) tsentreerimisrõngas	53
Sele 5.1 FEST19 testipäeval (velgede testimine tagateljel) [16]	55
Sele 5.2 FEST19 võistluse FS Italy tehnilises kontrollis	56
Sele 5.3 FEST19 võistlusel FS Austria	56
Tabel 2.1 Velje tüüpide omadused	19
Tabel 2.2 Velje tüüpide hindamine	19
Tabel 3.1 Maksimaalsete jõudude tabel	35
Tabel 3.2 Maksimaalset deformatsiooni põhjustavad jõud	35
Tabel 4.1 Materjalide termopaisumise koefitsiendid	42
Tabel 4.2 Süsinikvelje termotöötamise tsükkel	50
Tabel 6.1 Toormaterjalide ja ostutoodete hinnad	57

EESSÕNA

Antud magistritöö teema valiti autori soovil dokumenteerida Formula Student Team Tallinna esimeste süsinikvelgede projekteerimine, tootmine ja testimine. Antud dokument on aluseks tulevaste süsinikvelgede valmimisel Formula Student Team Tallinnas. Töö koostamine ning velgede tootmine toimus Tallinna Tehnikaülikoolis ja Tallinna Tehnikakõrgkoolis.

Soovin tänu avaldada oma juhendajale, professor Martin Eermele ja Formula Student Team Tallinna kõigile liikmetele. Samuti soovin tänada kõiki Formula Student Team Tallinna toetajaid, eelkõige meeskonna veterani, Marek Lentsiust, tänu kellele antud projekti teostumine võimalikuks sai.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

CAD – raalprojekteerimise tarkvaraga loodud 3D mudel (ingl k *Computer Aided Design*)

CFD – arvutuslik vedeliku dünaamika (ingl k *Computational Fluid Dynamics*)

FDM – sulanud sadestumise modelleerimine (ingl k *Fused Deposition Modeling*)

FEST14 – 2014 aasta tudengivormeli hooaja tarbeks FS Team Tallinna poolt valmistatud vormelauto

FEST15 – 2015 aasta tudengivormeli hooaja tarbeks FS Team Tallinna poolt valmistatud vormelauto

FEST16 – 2016 aasta tudengivormeli hooaja tarbeks FS Team Tallinna poolt valmistatud vormelauto

FEST17 – 2017 aasta tudengivormeli hooaja tarbeks FS Team Tallinna poolt valmistatud vormelauto

FEST18 – 2018 aasta tudengivormeli hooaja tarbeks FS Team Tallinna poolt valmistatud vormelauto

FEST19 – 2019 aasta tudengivormeli hooaja tarbeks FS Team Tallinna poolt valmistatud vormelauto

FS Team Tallinn – Formula Student Team Tallinn lühend

LEM – lõplike elementide meetod (ingl k *Finite Element Method, FEM*)

SISSEJUHATUS

Tudengivormeli projekt (ingl k *Formula Student*) on üliõpilastele mõeldud rahvusvaheline võistlussari, mille eesmärgiks on anda tudengitele (riskivabas keskkonnas) reaalselt kogemust toote projekteerimise, tootmise, turundamise ja katsetamise valdkonnas. Toote näol on tegemist üheistmelise vormel-tüüpi sõidukiga. Reeglitega on sätestatud, et ühe võistlussõidukiga võib osaleda tudengivormeli sarja võistlustel kuni 12 kuu jooksul, mistõttu tuleb iga aasta projekteerida ja toota uus vormel. Seetõttu tuleb tudengitel pidevalt ennast arendada, et igal võistlushooajal olla konkurentidega võrdväärne või neid edestada. Sellises keskkonnas saavad tudengid vajalikud kogemused, et siseneda edukalt tööturule.

Valminud vormeliga osaletakse tudengivormeli võistlussarjas, kus võetakse mõõtu teiste omasuguste meeskondadega nii staatilistel kui ka dünaamilistel aladel. Staatiliste alade eesmärgiks on tudengite poolt loodud lahenduste kaitsmine oma ala tippspetsialistide ees. Samuti esitatakse kohtunikele, valminud vormeli, kuluaruanne ja vormeliga seotud äriplaani. Dünaamiliste alade eesmärgiks on vormeli võimekuse proovile panek erinevatel sõidualadel (kiirendus, kaheksa sõitmine, sprint ja kestvussõit). Enne dünaamilistele aladele pääsemist viiakse läbi vormeli tehniline kontroll, mille eesmärgiks on sõiduki reeglitele vastavuse kontrollimine ja turvalisuse tagamine sõidualadel.

Alates 2007. aastast on Eestit esindanud tudengivormeli sarjas Formula Student Team Tallinn, Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli koostöös valminud meeskond. 2019. aastal valmis meeskonna 12. vormelauto, FEST19. Antud vormeliga saavutati mitmeid väärikaid kohti, samuti tudengivormeli Austria etapil, FS Austria, kõrge kolmas koht. Elektrivormelite klassi üldarvestuses saavutati 2019 aasta hooaja järgselt kaheksas koht.

Tingituna varasemate tudengivormelite veljelahenduste puudujääkidest, valiti antud magistritöö teemaks süsinikkiust võistlussõiduki velgede projekteerimine ja tootmine, vormelile FEST19. Kuna tegemist oli süsinikkiust velgede esmakordse projekteerimise ja tootmisega, ei olnud töö aluseks võtta varasemaid kogemusi (antud detaili komposiitmaterjalidest valmistamise kohta). Detaili projekteerimisel võeti arvesse meeskonna varasemaid kogemusi alumiiniumvelgede projekteerimisest [1].

Tähtsaimad eesmärgid velgede projekteerimisel ja tootmisel olid vähenenud elastne deformatsioon võistlusolukorras, vähenenud mass võrreldes varasema toimiva lahendusega ja esmakordselt süsinikkiust materjali kasutamine võistlussõiduki velgede valmistamiseks. Eesmärkide täitmisel tuli ka arvestada, et detail pidi olema korduvalt toodetav samade vormidega. Lõplik lahendus pidi ka olema turvaline rehvimontaaži käigus, ning omama kaubanduslikku välimust.

Lõputöö käsitleb varasemate lahenduste nõrkuseid, uue lahenduse väljatöötamise protsessi ja kasutamist võistlusoludes. Samuti on töös välja toodud protsessi jooksul avastatud head ja vead, tagamaks antud detaili areng Formula Student Team Tallinnas ka tulevikus.

Velgede modelleerimiseks kasutati raalprojekteerimise tarkvara CATIA V5. LEM tugevusanalüüside teostamiseks kasutati programmi ANSYS 17.2. Velgede tootmiseks vajalikud vormid toodeti ettevõttes Skarcon Machining OÜ.

1 EELNEVAD LAHENDUSED JA PROBLEEMI PÜSTITUS

Formula Student Team Tallinna vormelitel on varasemalt kasutuses olnud võrust ja tsentrist koosnevad velje lahendused. Kuni 2010. aastani olid kasutusel 13-tollise (nähtav seel 1.1) ja alates 2011. aastast, 10-tollise diameetriga veljevõrud (nähtav seel 1.2). Veljevõruna on peamiselt kasutatud alumiiniumist ostutooteid, firma Keizer tootevalikust. Veljetsentrid on enamasti projekteeritud meeskonna liikmete poolt ja toodetud alumiiniumist (Alumec 89). Veljevõru ja -tsenter on olnud omavahel ühendatud poltliitega.



Sele 1.1 FS Team Tallinna 2008 aasta hooaja võistlussõiduk FEST8



Sele 1.2 FS Team Tallinna 2017 aasta hooaja võistlussõiduk FEST17

2017 aasta hooaja võistlussõidukil kasutati esmakordselt süsinikust veljevõrusid (2018 hooaja võistlussõiduk süsinikust veljevõrudega nähtav seel 1.3). Antud veljevõrud olid ostutooted, mis toodetud firma Blackwave poolt. 2017 ja 2018 hooaeg aga tõestasid, et antud lahendus ei olnud sobilik, kuna veljevõrudel oli kombeks lekkida ja lubatud maksimaalne rõhk rehvi montaaži käigus oli vaid 1.5 bari. Võistlusolukorras tähendas see meeletud ajakulu ja riski meeskonna liikmetele, kuna enamasti asetus rehvi rehvisoonde üle 1.5 barise rõhu juures.



Sele 1.3 FS Team Tallinna 2018 aasta hooaja võistlussõiduk FEST18 [2]

Seetõttu oli ainsaks toimivaks lahenduseks alumiiniumist tsentri ja võru kombinatsioon, mille elastne deformatsioon oli aga võistlusolukorras liialt suur. Liigne elastne deformatsioon võistlussõiduki konstruktsioonis tähendas ebakindlat ja ujuvat sõidujoont, mis muutis sõiduki dünaamilistel aladel konkurentsivõimetuks. Samuti oli lahenduse puuduseks üle 2.2-kilogrammiline mass¹. Alumiiniumist tsentriga lahenduse kahjuks mängis ka asjaolu, et varasematel hooaegadel kippusid, peale mitut võistlust, detailid purunema (sele 1.4). Varasemate detailide negatiivsed omadused tekitasid vajaduse uue lahenduse järele, mis omaks väiksemat elastset deformatsiooni, vastupidavust montaažirõhule, ning alumiinium lahendusest väiksemat massi.

Esimene lahendus probleemile oli ettevõtte OZ Racing poolt toodetav 10-tollise läbimõõduga magneesiumist velg. Kuna detailide maksumus oli liiga kõrge ja veljed ei oleks sobinud vanematele vormelitele (soov oli katsetada detaile vanematel vormelitel - FEST17 või FEST18) jäeti lahendus proovimata.



Sele 1.4 FEST14/16 purunenud veljetsenter

¹ 2019 aasta hooaja alumiiniumvelje mass.

Kuna tudengivormeli sarja võistluste osaks on ka oma disaini kaitsmine, on uuenduslikud lahendused alati kõrgelt hinnatud. Olenemata sellest, et tippmeeskondadel tudengivormeli maailmas on süsinikust veljed olnud kasutusel juba aastaid, on selline lahendus siiski vähe levinud ja võistluste kohtunike poolt kõrgelt hinnatud. Seetõttu võeti meeskonna siseselt vastu otsus proovida 2019 aasta hooajal süsinikust velgede projekteerimist, tootmist ja võistlusolukorras katsetamist. Antud lõputöö eesmärgiks kujuneski seega uue toimiva velje lahenduse projekteerimine, tootmine ja võistlusolukorras katsetamine.



Sele 1.5 2019 aasta hooaja tarbeks valminud alumiiniumist võru ja tsentri kombinatsioon

Paralleelselt projekteerimis ja tootmisprotsessiga valmisid meeskonnakaaslase Karl Kaarlõpi käe all tagavaralahendusena alumiiniumist tsentrid. Tsentreid oleks olnud võimalik kasutada koos alumiiniumist veljevõrudega (valminud lahendus nähtav seel 1.5), kui projekteeritav süsinikust lahendus ei oleks toimunud.

2 SÜSINIKVELJE PROJEKTEERIMINE

Süsinikvelje projekteerimine sai alguse inspiratsiooni kogumisest teistelt tudengivormeli meeskondadelt ja autotööstuselt üleüldisemalt. Seejärel toodeti katsekehad, saamaks teada meeskonna suutlikkus valmistada lõplikku detaili. Peale katsekehade tootmisprotsessi valideerimist asuti detaili enda projekteerimise juurde. Projekteerimisel võeti arvesse velje parameetreid piiravaid tegureid, detaili toodetavust ja võimalikult optimaalset disaini kasutusolukorras. Lisaks taotleti detaili projekteerimisel silmapaistvust ja kaubanduslikku välimust.

2.1 Teiste meeskondade lahendused

Kuna meeskonnal süsinikvelgede projekteerimise kogemus puudus, tuli inspiratsiooni koguda konkurentide ja autotööstuse lahendustest. Tudengivormeli maailmas oli enim kasutusel omavalmistatud süsinikkiud võrust ja alumiiniumist tsentri kombinatsioon (sele 1.3). Suuremate ressurssidega meeskonnad olid aastaid valmistanud tervik süsinikvelgesid. Tervikvelgede näol olid kasutusel kodarveljed (sele 2.1, vasakul) täitematerjaliga ja ilma (seest tühjad – ingl k *hollow*). Lisaks kodarvelgedele olid kasutusel ka n-ö täisveljed, kus võru ja rummule kinnituv velje osa (tsenter) olid üks ühtlane tervik (sele 2.1 paremal). Katsetusi oli tehtud ka U-profiili põhimõttel toimivate kodarvelgedega, kus kodarad lamineeriti ilma täitematerjalita, U-kujulise ristlõikega. Antud velgesid olid proovinud kasutusele võtta vaid üksikud meeskonnad ja ka siis oli jäänud protsess vaid katsetamise faasi, mistõttu antud lahendust proovima ei hakatud.



Sele 2.1 KA-Raceing kodarvelg vasakul [3] ja AMZ Racingu täisvelg paremal [4]

Meeskonna kindel soov oli proovida tervik süsinikvelje tootmist, selgitamaks välja meeskonna võimekus luua niivõrd keerukat detaili. Tervik süsinikvelg oleks olnud ka eeliseks disainilahenduse kaitsmisel, kuna tegemist on kordades keerukama detailiga kui süsinik võru ja alumiiniumist tsentriga lahendus.

2.2 Katsekehad

Süsinikkiust velje kasutuselevõtu suurimaks murekohaks, läbi meeskonna ajaloo, on olnud detaili tootmine. Kuna ei ole kindlaks tehtud vajalikku tootmisprotsessi detaili tootmiseks, on süsinikkiust velje kasutamine tagaplaanile jäänud. Selleks, et FEST 19-le oleks võimalik süsinikkiust velgesid toota, oli vaja teada saada, missuguseid detaile on võimalik meeskonnal olemasolevate vahenditega toota. Kuna meeskonna siseselt võeti suund kodarveljele, oli vaja välja mõelda kodarate tootmine. Võru osa kujutas endast lihtsat süsinikkiud kanga vormi pinnale lamineerimist, vakumeerimist ja termotöötlust. Seetõttu koostati olemasolevatest vahendites oletatava velje kodara kujuga detaili vorm.

2.2.1 Õõnes profiil

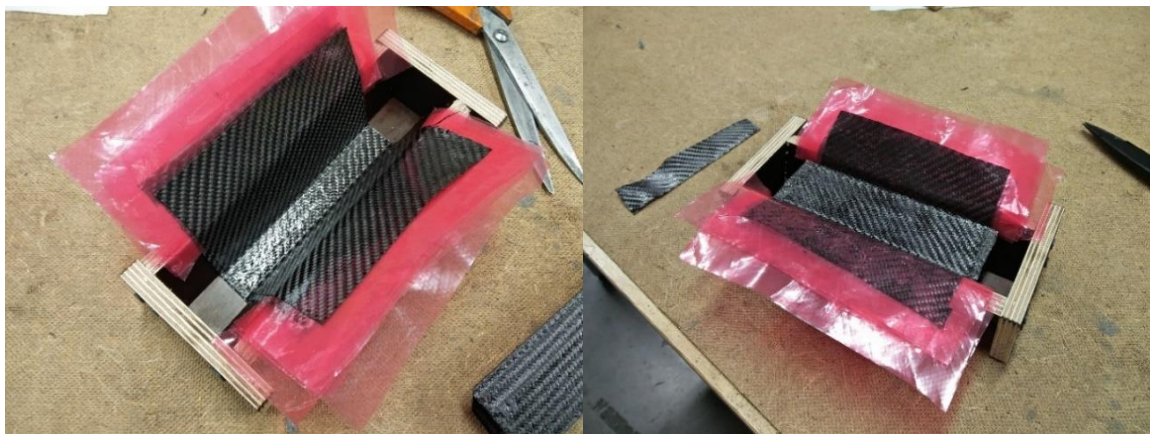
Esimesena katsetati seest tühja profiili lamineerimist (nähtav seel 2.2, parempoolne detail). Seest tühjade kodarate eeliseks oleks olnud väike mass ja tänu suurele ristlõike inertsimomendile, väga hea vastupidavus võistlusolukorras.



Sele 2.2 Valminud katsekehad

Seest tühja kodara katsekeha lamineerimiseks valmistati esmalt vahust (Rohacell IG-F71) profiili tühimiku kujuga vahtprofiil, kuhu peale lamineeriti üks kiht eelimmutatud süsinikkiud kangast (ingl k *prepreg carbon fiber*). Peale süsinikkiu termotöötlust, eemaldati vaht profiilist ja lamineeriti varem valmistatud vormi alumisse poolde tegelik profiil (protsess nähtav seel 2.3 ja 2.4). Antud profiili sisse asetati eelnevalt termotöödeldud ühekihiline süsinikprofiil (nähtav seel 2.4, vasakul). Ühekihilise profiili eesmärgiks oli terviktüki lamineerimisel säilitada profiili õõnsus. Peale profiili lamineerimist alumisse vormipoolde, suruti ülemise vormipoollega profiil kokku

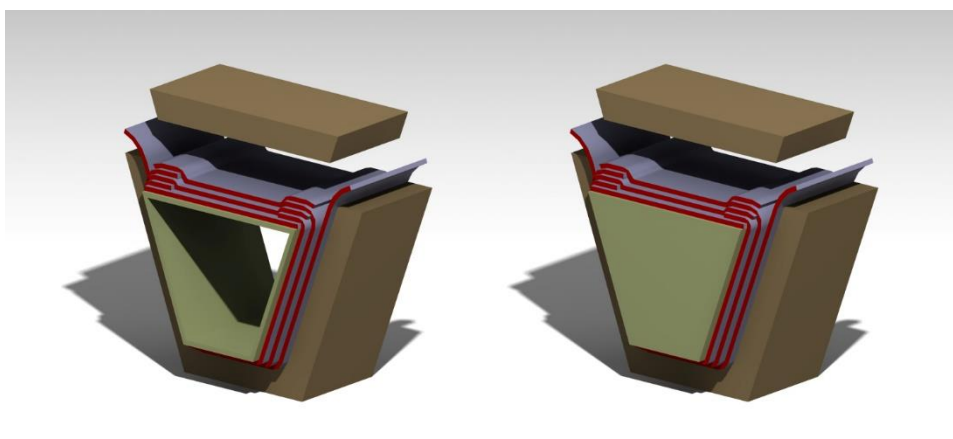
(ülemise vormipoole surve komposiiddetailile asendas üldjuhul kasutatavat vakumeerimist).



Sele 2.3 Seest tühja katsekeha lamineerimine

Valminud katsekeha tõestas, et sellise tootmisviisiga oleks väga keeruline ette aimata vajaliku ühekihilise profiili tegelikku kuju ja antud moel tootmine veniks liialt pikale. Samuti olid katsekeha süsinikkiud kanga kihid mitte täielikult kokku surutud, ehk detail ei omanud maksimaalset tugevust.

Seest tühja profiili oleks olnud võimalik toota ka FDM (sulanud sadestumise modelleerimine, ingl k *Fused Deposition Modeling*) lahustuvat täitematerjali kasutades. Antud juhul oleks 3D prinditud (lahustuvast materjalist) profiili sisestruktuur, mille peale lamineeritaks tegelik süsinikkiud profiil. Peale termotöötlust lahustataks sisestruktuur vees ja järele jääks süsinikust õõnes profiil. [5] Meeskonnal antud tehnoloogiale ligipääs puudus.



Sele 2.4 Katsekeha lamineerimine (vasakul sisemise profiiliga, paremal vahuga)

Samuti meeskonnale kättesaadamatuks tehnologiaks oli latekspõite kasutamine. Latekspõied nimelt asetatakse lamineerimise käigus kodara sisse ja peale vormipoolte üksteise külge kinnitamist täidetakse põied õhuga. Paisunud latekspõied suruks selles olukorras süsinikkiud kanga vastu vormipinda ja tagaks vajaliku surve kanga kihtide kokku surumiseks. [6]

Kuna eelpool mainitud tehnoloogiatele juurdepääs puudus, tuli mõtlema hakata täitematerjaliga profiili lamineerimise peale. Esimese katsekehaga sai tõestatud, et antud moel (ühte vormipoolde detaili lamineerimise ja teise vormipoolega pressimise teel) oli võimalik toota süsinikkiust velje kodaraid.

2.2.2 Täitematerjaliga profiil

Lähtudes kogutud teadmistest ja kogemustest, lamineeriti ka teine katsekeha. Teine katsekeha lamineeriti täitematerjaliga (vaht Rohacell IG-F 71), mida kujutati seel 2.2 (vasakul). Täitematerjaliga profiili puhul toimiks süsinikkiud sarnaselt eelpool mainitud seest tühjale profiilile, kuid väikse tihedusega täitematerjal hõlbustaks detaili tootmist ja lisaks mõningal määral jäikust.

Täitematerjaliga profiili lamineerimine tõestas, et antud meetodiga oli võimalik toota süsinikkiust velje kodaraid, saavutades süsinikkiud kanga kihtide piisav kokkusurutus.



Sele 2.5 Täitematerjaliga katsekeha vormi lamineerimise protsess

Samuti võimaldas vahu kasutamine saavutada süsinikkiud kanga täpse vormi kujutamise, kõigil profiili külgedel. Vaht oli nimelt väikse tihedusega isotroopne materjal, mis vormipoolte liitmisel andis piisavalt liikumisruumi (deformeerus) süsinikkiu ülekattetele (ülekatted kujutatud seel 2.4), et tagada profiili täpne vormi kuju jäljendamine. Olenemata vahu väiksest tihedusest, oli materjal siiski piisavalt tihe, et tagada süsinikkiu kihtide piisav kokkusurutus. Sellele aitas kaasa ka vahu paisumine termotöötlus tsükli käigus. [7]

Sobiliku tootmisprotsessi leidmise järel oli võimalik asuda velje projekteerimise juurde.

2.3 Kodarvelje ja täisvelje võrdlus

Peale kodarate tootmiseks vajaliku protsessi väljamõtlemist, tuli teha otsus: kas projekteerida kodaratega või täisvelg. Mõlemad lahendused omasid nii positiivseid kui ka negatiivseid külgi. Parima selgitamiseks koostati võrdlustabel, toomaks välja mõlema lahenduse head ja halvad omadused.

Velje variant	Eelised	Puudused
Kodaratega velg	<ul style="list-style-type: none"> • Keerukus annab disaini kaitsmisel lisapunkte • Tagatud õhu juurdepääs piduriketasteni • Lihtsam sobitada täitematerjali tootmise käigus 	<ul style="list-style-type: none"> • Ajamahukam toota kui täisvelge • Vormide freesimine 50+ tundi
Täisvelg	<ul style="list-style-type: none"> • Kiirem toota kui kodaratega velge (vähem süsinikkiud kanga lappe) • Vormide freesimine alla 50 tunni 	<ul style="list-style-type: none"> • Täitematerjali kuju on keeruline ette aimata ja sobitada vormi tootmise käigus • Velje väliskülje kaudu ei jõua jahe õhk piduriketasteni (on võimalus, et kettad kuumenevad üle)

Tabel 2.1 Velje tüüpide omadused

Seejärel moodustati, lähtudes eelnevast võrdlustabelist, mõlema lahenduse hindamismatriks.

Velje tüüp \ Omadus	Disain (x2)	Piduriketaste jahutus (x3)	Tootmise keerukus (x5)	Oletatav mass (x4)	Summa
Kodaratega velg	5x2	4x3	1x5	3x4	39
Täisvelg	3x2	1x3	2x5	4x4	35

Tabel 2.2 Velje tüüpide hindamine

Tabelis 2.2 hinnati mõlema velje tüübi omadusi, andes igale omadusele lisaks hinde kordaja (suurem kordaja tähendas omaduse suuremat tähtsust). Hinded anti skaalal ühest viieni, kus 5 tähendas kõige paremat ja 1 kõige halvemat tulemust. Matriksist jäeti välja vormide freesimise faktor, kuna paari tunnine freesimise aja vahe ei mõjutanud detailide tootmist oluliselt (antud projekti puhul).

Tabelist 2.2 selgus, et omadustelt oli parem lahendus kodaratega velg. Lisaks meeskonna tingivale soovile, projekteerida kodaratega velg, võeti vastu kollektiivne otsus jätkata kodarvelje lahendusega.

2.4 Velje modelleerimine

Peale tootmisvõimekuse testimist ja velje tüübi määramist, asuti detaili modelleerimise juurde. Modelleerimisel lähtuti detailile määratud piirangutest ning töö käigus läbi viidud tugevusanalüüside tulemustest.

2.4.1 Lähteparametrid velje modelleerimisel

Enne detaili modelleerimise juurde asumist, pandi paika piiravad tegurid, millest lähtuda.

Kindlad piirangud velje modelleerimisel:

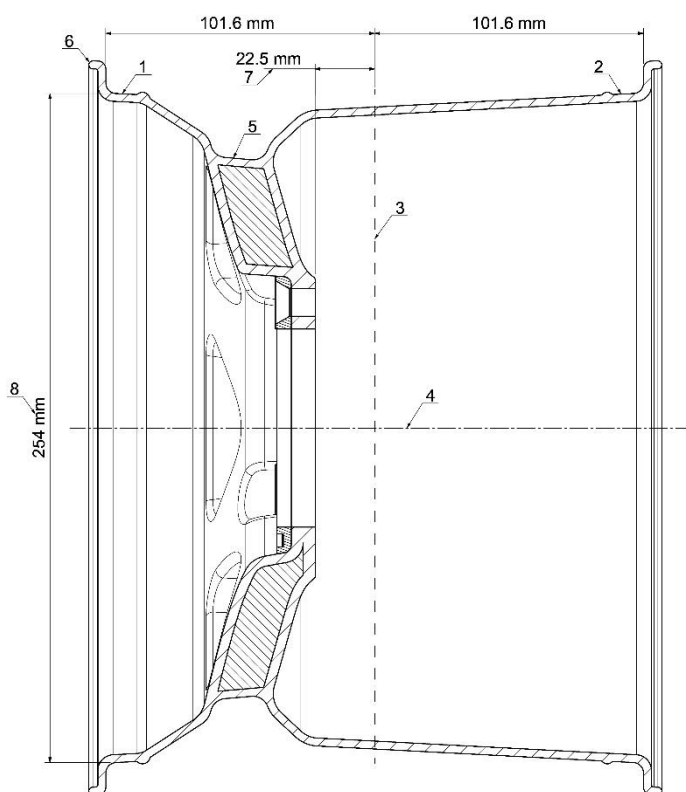
- **Velje läbimõõt ja laius (tulenevalt rehvitootja nõuetest, sele 2.6)**
 - Velje läbimõõduks loetakse rehvipinna diameetrit (10 tolli = 254 mm)
 - Velje laiuks loetakse rehvipinna sisemiste äärte vahelist kaugust (8.5 tolli = 203.2 mm).
- **Velje offset**
 - Velje offsetiks loetakse rummu pinna ja velje ristlõike kesktelje vahelist kaugust (nähtav seel 2.7).
 - Positiivse offseti korral on rummu pind keskteljest velje välispinna poole, negatiivse korral on rummu pind keskteljest velje sisepinna (käänmiku) poole (seel 2.7 on nähtav positiivne offset).
 - Projekteeritava velje offsetiks oli +22.5 mm, mis pandi paika Tudengivormeli meeskonna veermiku osakonna poolt.
- **Nurgakoost**
 - Velje geomeetria pidi olema selline, et pöörlemisel ei puutuks see kokku sõiduki nurgakoostu detailidega (nähtavad seel 2.8), välja arvatud rummu pind kuhu velg kinnitub.
- **Vormi kalded**
 - Velje pinnad pidid olema projekteeritud selliselt, et detaili oleks võimalik vormipooltest välja võtta (vormi kalded suurematel pindadel: >3 kraadi velje pöörlemistelje suhtes, väiksematel: >1 kraadi).

Item #	Size	O.D.	Tread Width	Section Width	Recom. Rim	Rim Measured	Compound	Approx. Weight	Retail	S.A.E Price
43070	16.0 x 6.0-10	16.3"	6.0"	6.9"	6.0"-7.0"	6.0"	R25B, LCO	7 lbs.	\$184	\$147.20
43075	16.0 x 7.5-10	16.2"	7.3"	8.4"	6.0"-8.0"	8.0"	R25B, LCO	8 lbs.	\$203	\$162.40

Sele 2.6 Rehvitootja poolsed parameetrid [8]

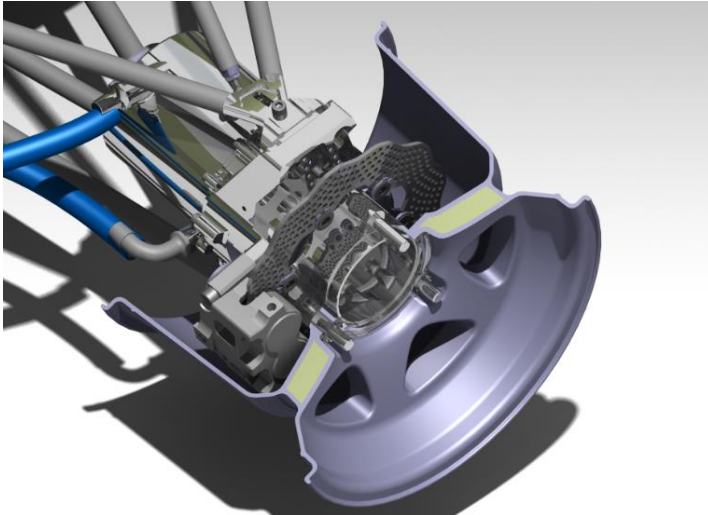
Tegurid, mis vajasid tähelepanu või projekteerimise käigus sätestamist:

- **Montaaži soone diameeter**
 - Peab olema piisavalt väike, et oleks võimalik teostada eelpool mainitud rehvi (16 tolli kõrge, 8.5 tolli lai, rehvipinna läbimõõt 10 tolli) montaaži. Montaaži soone läbimõõt ei oma kindlat mõõtu, projekteerimisel proovitakse (CAD programmis) rehvi montaaži ja lähtutakse sellest.
- **Velje kinnitus rummule (valik)**
 - Kesklukustus-süsteem (ingl k *centerlock*).
 - Kolme tikkpoldiga lahendus (kasutuses olnud meeskonna võistlussõidukitel alates aastast 2011).
- **Rehvipinna geometria**
 - Rehvipind oli vaja projekteerida selliselt, et tagada rehvi püsivus veljel (võistlusolukorras), samas säilitades montaaži lihtsus.



1. Velje välimine rehvipind
2. Velje sisemine rehvipind
3. Velje ristlõike kesktelg
4. Velje pöörlemistelg
5. Rehvi montaažisoone
6. Velje serv (ingl k *bead*)
7. Velje offset
8. Velje läbimõõt ehk rehvipinna diameeter

Sele 2.7 Velje parameetrid



Sele 2.8 Nurgakoost velje läbilõikega

Lähtudes eelnevalt väljatoodud parameetritest, asuti velje CAD mudeli loomise juurde.

2.4.2 CAD modelleerimine

Velje CAD modelleerimine viidi läbi raalprojekteerimise tarkvaras Catia V5.

Velje kinnitus rummule valiti lähtuvalt varasemate aastate lahendustele. Kolme tikkpoldiga variandi kasuks rääkis fakt, et velgi oli võimalik testida meeskonna vanemate vormelite peal. Samuti oleks saanud samade vormidega toota velgi ka vanematele meeskonna vormelitele. Velje universaalsus oli ka põhjuseks miks välistati üleminek ostutootele OZ Formula Student Magnesium CL 10" wheel, OZ Racingu tootevalikust (detail nähtav seel 2.9).



Sele 2.9 OZ Formula Student Magnesium CL 10" wheel [9]

Tagamaks võistlusolukorras tekkivate jõudude võimalikult ühtlane jaotumine veljevõrrole, projekteeriti kodarad (velje ristlõikes) suunaga võimalikult otse veljevõrrole (sarnaselt TU Grazi lahendusele – sele 2.10). Samas arvestati nurgakoostu parameetritega ja jäeti piisavalt varu ka pidurisadulale. Suunaga veljevõru välimisse

äärde (nagu näha seel 2.1) lahenduse miinuseks oli suur läbipaine velje sisemises ääres (tingituna suurest jõuolast rummu pinna tsentri suhtes). Samuti oleks antud lahendus nõudnud välimise rehvipinna moodustamist täitematerjalist (nagu näha seel 2.1), mille teostamine oleks liialt keerukaks osutunud.

Tagamaks veljevõru piisav läbimõõt (mahutamaks nurgakoostu), projekteeriti montaažisoone veljevõru kodarate poolsesse osasse. Pingete vähendamiseks kodarate ja montaažisoone liitumiskohas ühildati montaažisoone pind kodarate välispinnaga. Seel 2.12 välja toodud kõige vasakpoolsemal detailil on näha variant, kus kodarate välispind ei ühtinud montaažisoone pinnaga. Antud detaili analüüsimisel, millest on juttu töö tugevusanalüüside peatükkides, oli selgelt näha pinge kontsentreerumist kodarate ja montaažisoone liitumiskohtades.



Sele 2.10 TU Graz Racing Team 2017 aasta võistlussõiduki süsinikvelg [10]

Tudengivormeli sarjas populaarsetest kolme kodaraga velgedest eristumise eesmärgil võeti meeskonna siseselt vastu otsus projekteerida kuue kodaraga velg. Kuus kodarat jagasid veljes tekkivad pinged ühtlasemalt veljevõrule kui kolm kodarat. Kodarate arv valiti korrelatsiooni tikkpoltide arvuga, tagamaks velje sümmeetrilisus pöörlemistelje suhtes. Seetõttu ei projekteeritud näiteks nelja või viie kodaraga velge.

Esimesed kolm velje mudelit projekteeriti raalprojekteerimise tarkvara CATIA V5 Part Design keskkonnas (sele 2.11). Antud velgede puhul kasutati montaažisoone ja veljevõru geometria eeskujuna, varem kasutuses olnud, Blackwave'i süsinikust veljevõrut¹.

Valik säilinud CAD mudelitest (projekteerimise perioodist) toodi välja järgnevatel seledel. Seledel 2.12 ja 2.14 välja toodud mudelitest valmisid ka LEM analüüsimudelid, ning nendega viidi läbi tugevusanalüüse programmis ANSYS 17.2.

¹ CAD mudel laeti alla Blackwave'i kodulehelt [17]



Selel 2.11 CATIA V5 renderdus velgede CAD mudelistest I

Selel 2.11 nähtavad mudelid valmisid enne velje tüübi paika panekut.



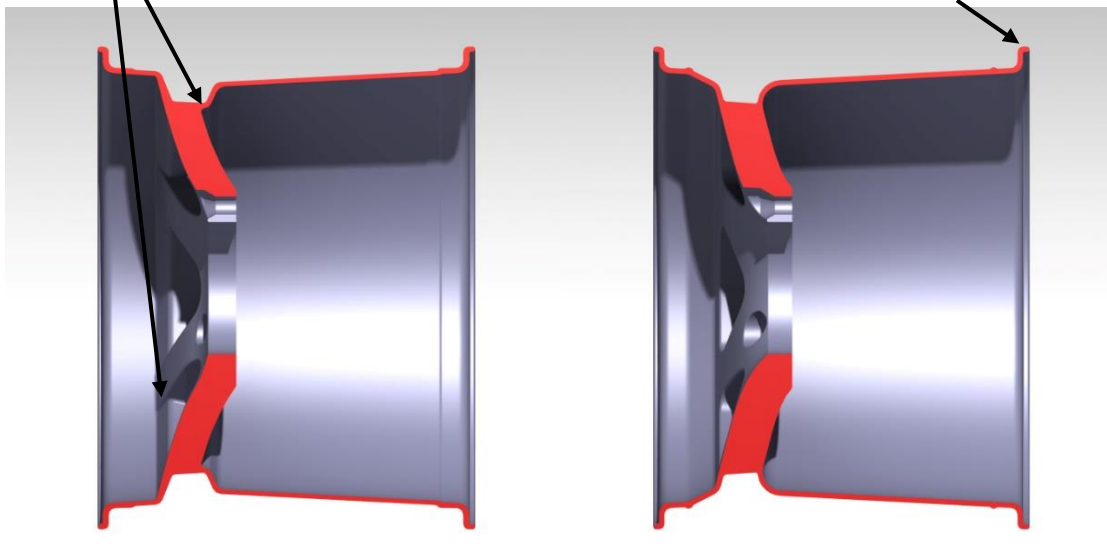
Selel 2.12 CATIA V5 renderdus velgede CAD mudelistest II

Selel 2.12 nähtava keskmise velje näol oli tegemist esimese 100% autori poolt loodud detailiga. Kaotati ära Blackwave'i veljest inspireeritud võru osa, ning esmakordselt keskenduti ka massi pöörlemistelje poole toomisele (muutus kujutatud selel 2.13). Lõpliku lahenduse läbilõikest (sele 2.16) on näha, kuidas veljevõru geometriat muudeti veelgi, et tuua rohkem massi velje tsesse. Tugevusanalüüside põhjal oli selline geometria ka rajatingimustes vastupidavam.

Selel 2.10 kujutatust on näha, kuidas algselt projekteeriti sirge servaga velgi, kuid sooviga lisada velje äärtele jäikust, modelleeriti n-ö murtud serv (nähtav selel 2.13). Selline geometria tugevdas velje servi ja tervet võru, ning tuli kasuks rehvi montaažil, kus oli vajalik võimalikult jäik velje äär. Samuti võimaldas selline geometria jätta süsinikkanga lõigatud ääre võimalikult vähe olulisse velje osasse. Sirge ääre puhul oleks kanga lõigatud äär jäänud kontakti rehvi, ning seda oleks pidanud vägagi täpselt töötleva. Seda selleks, et tagada ühtlane kontakt rehvi.

Pingekontsentraatorid

Murtud serv



Sele 2.13 Velgede V4 (vasakul) ja V5 (paremal) läbilõiked

Selel 2.13 on näha, kuidas kaotati ära Blackwave'i rehvipinna geomeetria. Rehvipinnad modelleeriti selliselt, et neid oleks võimalik võru kihtidega lamineerida, ilma, et oleks vaja lisada süsinikkiud kangast, pinna tõstmiseks. Rehvi veljelt maha vajumise takistamiseks lisati rehvipinna äärde kõrgendik. Kõrgendikku oli võimalik peale lamineerimisprotsessi lihvides töödelda, et saavutada täpselt õige kõrgus. Õiges mõõdus kõrgendik ei takistanud rehvi montaaži aga samas vältis keerulisemates võistlusoludes rehvi veljelt maha vajumist.

Samuti on seelt 2.13 näha, kuidas muudeti kodarate ja rehvi montaažisoone geomeetriat, et vältida pingekontsentraatorite teket.

Peale eelpool mainitud velgede projekteerimist ja tugevusanalüüsimist selgus fakt, et detaili tootmine kujuneks liialt keerukaks. Nimelt oli mutripesade ja rummu pinna vahele (velje sisemusse) projekteeritud alumiiniumist *insert*. Analüüsimudel (komposiitkeha mudel) näitas, et süsinikkiud kangaste paiknemine mutripesade ümber oli niivõrd kaootiline, et sinna õige kujuga alumiiniumist *inserti* projekteerida oleks olnud pea võimatu. Seetõttu muudeti velje rummu äärset disaini selliselt, et oleks võimalik velg toota ilma alumiiniumist *insertita*. Alumiiniumist sisemise *inserti* asemel projekteeriti seega väline tsentreerimisrõngas (nähtav selel 2.14). Selline disain tagas sobiva kujuga pesad mutritele ja lisas jäikust tikkpoltide triangulatsiooni.

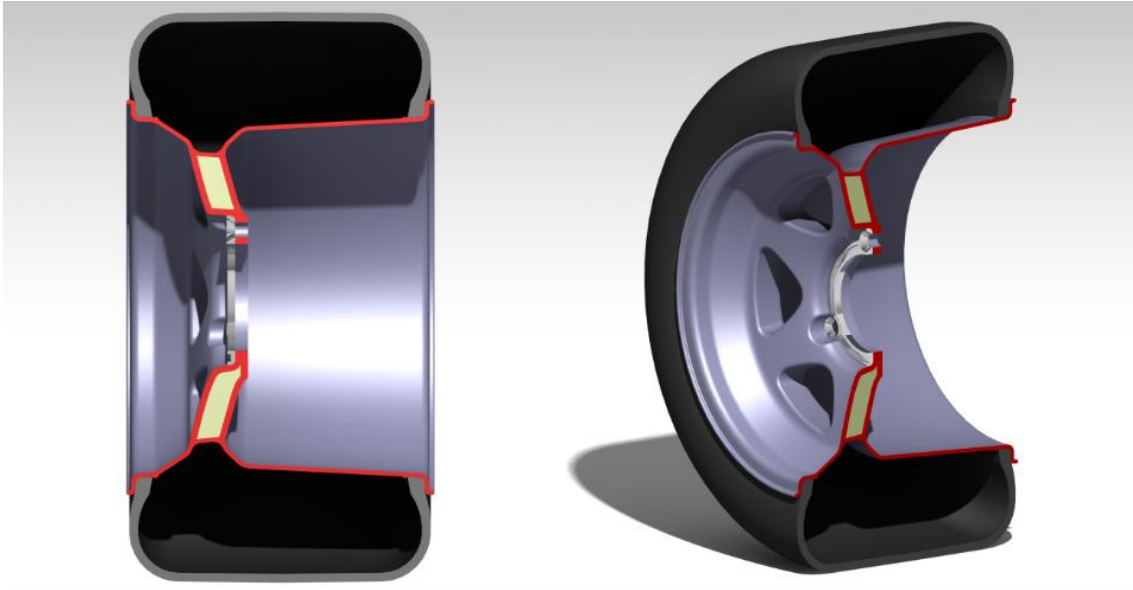


Selel 2.14 CATIA V5 renderdus velgede CAD mudelistest III

Selel 2.14 nähtavat vasakpoolset velge analüüsiti LEM meetodiga üle 400 iteratsiooni. Parempoolne velje mudel (lõplik detail) kujutas endast vasakpoolse parendatud versioon. Detaili kohandati pingekontsentraatorite vähendamiseks ja veljevormide tootmise lihtsustamiseks. Antud (selel 2.14 parempoolne) mudel ei läbinud tugevusanalüüsi, tingituna aja puudusest.



Selel 2.15 Lõpliku lahenduse CAD mudeli renderdus



Sele 2.16 Lõpliku velje CAD mudeli läbilõike renderdus

Selelt 2.16 on näha, kuidas võrreldes varasema disainiga (sele 2.13) on mutripesad eraldatud velje geometriast ja loodud eraldi detail antud ülesannet täitma. Sellise lahenduse puhul oli võimalik asuda süsinikvelge tootma juba enne lõpliku tsentreerimisrõnga disaini lukustamist. Tsentreerimisrõnga projekteerimist kirjeldati detailsemalt peatükis 4.5.

Velgede modelleerimise protsess kestis mitmeid kuid ja kõik geomeetrilised muudatused viidi ellu korrelatsioonis LEM tugevusanalüüside tulemustega.

Lõpliku lahenduse joonised lisati töö lõppu.

3 TUGEVUSANALÜÜS

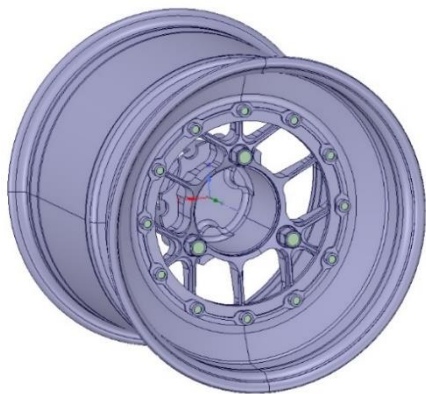
Velje analüüsimisel lähtuti varasema parima toimiva lahenduse (alumiinium tšenter ja võru) tugevusanalüüsi tulemustest. Uue detaili tugevusanalüüside eesmärgiks oli optimaalse geomeetria ja võimalikult efektiivse süsinikkiu laminaadi loomine. Tugevusanalüüside käigus uuriti detaili läbipainet ja sisepingeid (erinevate rajatingimuste puhul), mida üritati võrreldes varasema detailiga vähendada. Sisepingete puhul oli ka oluline nende hajutamine ja pingekontsentraatorite vähendamine või vältimine. Samuti vaadati, anisotroopsete komposiitmaterjalide purunemist kirjeldavat, Tsai-Wu kriteeriumi tegurit. Tegur üle ühe tähendas detaili laminaadi purunemist. Antud kriteeriumi järgi oli võimalik hinnata detaili vastupidavust võistlusolukorras.

3.1 Varasema detaili analüüs

Et uue detaili tugevusanalüüsidel oleks pidepunkt, millega analüüsitulemusi võrrelda, koostati varasema lahenduse LEM tugevusanalüüs. Varasem detail kujutas endast alumiiniumist võru ja tšentri kombinatsiooni. Antud koostu analüüsiti samade rajatingimustega nagu projekteeritavat süsinikvelge – võrreldi detailide kõige kriitilisema olukorra tugevusanalüüside tulemusi. Rajatingimusi ja kasutatud jõudusid kirjeldati täpsemalt peatükis 3.5.

3.1.1 Analüüsimudel

Analüüsimudel modelleeriti raalprojekteerimise tarkvaras Catia V5. Analüüsimudeli koostu moodustasid: sisemine- ja välimine veljevõru (tootjapoolsed CAD mudelid [11]), veljetsenter, koonusmutrid, rumm, tikkpoldid (lihtsustatud), võruseib, võru pooli ja tšentrit ühendavad poldid (lihtsustatud).

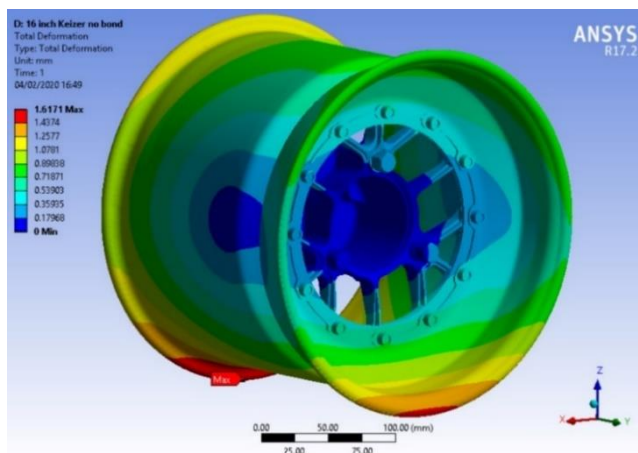


Sele 3.1 Analüüsitav koost tarkvaras ANSYS 17.2

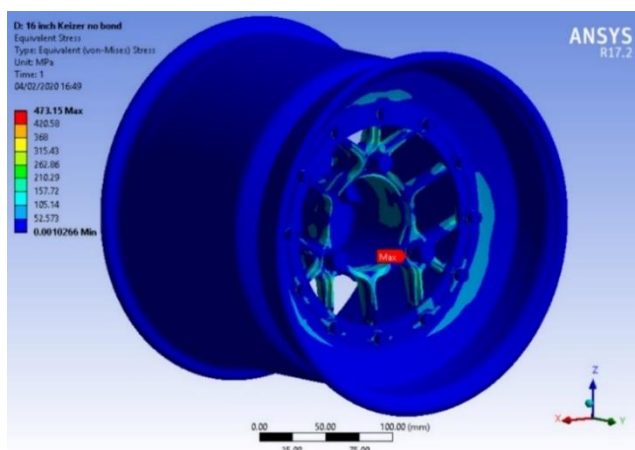
Analüüsimaterjalina kasutati velje puhul ANSYS 17.2 standardparameetritega alumiiniumit. Alumiiniumit kasutati ka rummu ja võruseibi puhul. Tikkpoltide ja võru poltide puhul kasutati standardset S355 terast. Poltidele määrati ka eelpingestus. Ülejäänud rajatingimused vastasid süsinikdetaili analüüsimisele (täpsemalt peatükis 3.5).

3.1.2 Tugevusanalüüs

Seejärel viidi läbi tugevusanalüüs selgitamaks välja loodava detaili lähteparameetrid. Rajatingimustena kasutati samu parameetreid, mida kasutati ka uue süsinik detaili analüüsimisel. Järgnevatel seledel kirjeldati algse koostu deformatsiooni (selel 3.2) ja sisepingeid (sele 3.3).



Sele 3.2 Varasema lahenduse deformatsioon kriitilisimas olukorras

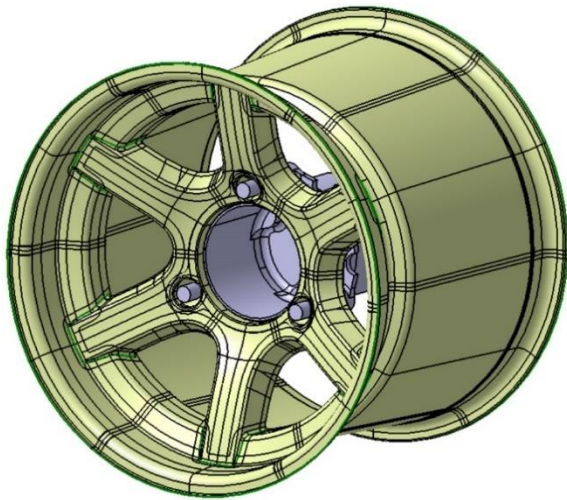


Sele 3.3 Varasema lahenduse maksimaalne pinge kriitilisimas olukorras

Antud tulemused said süsinikvelje tugevusanalüüside aluseks, mida projekteeritav detail pidi oma omadustelt edestama. Tähtsaimaks parameetrik sai 1.62-millimeetrine elastne deformatsioon, millest projekteeritav detail pidi vähem deformeeruma.

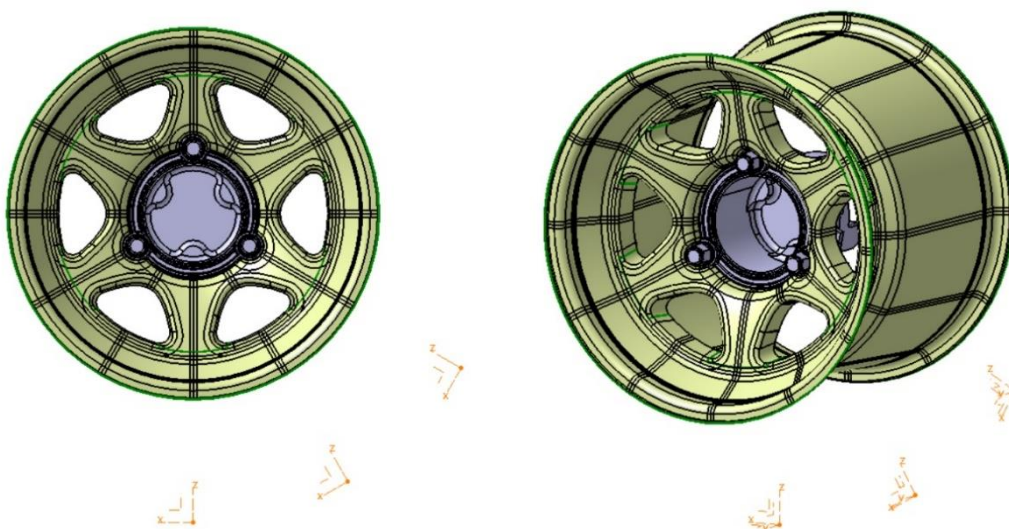
3.2 Projekteeritava detaili analüüsimudel

Komposiiddetaili analüüsimiseks tuli luua detaili pindmudel, millele oli võimalik kasvatada süsinikkiu kihte (laminaati). Selleks modelleeriti velje vormi poolsem pind (0 paksusega), mida sarnaselt reaalse detaili tootmisele oli võimalik kiht kihi haaval kasvatama hakata. Velje täitematerjal (vaht), mutrid, tikkpoldid ja rumm modelleeriti täiskehadena (ingl k *solid model*).



Sele 3.4 Esimese velje analüüsimudel tarkvaras CATIA V5

Selleks, et tugevusanalüüsi tulemused võimalikult suurel määral reaalselt olukorda kujutaksid, tükeldati analüüsimudel (pindmudel) vastavalt süsinikkiu lappide kujule (nähtav seledel 3.4 ja 3.5). Nõnda oli võimalik analüüsiprogrammis ANSYS 17.2 kasvatada süsinikkiu laminaati lapi kaupa ja tekitada ülekatted, nägemaks ülekattete mõju reaalsele detailile.



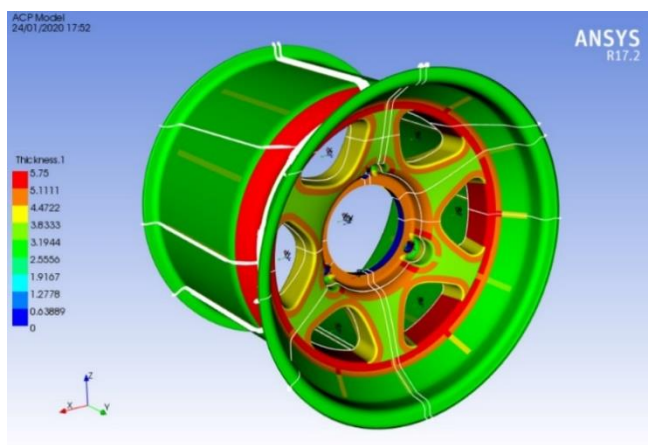
Sele 3.5 Viimase analüüsitava detaili analüüsimudel koos jõu rakenduspunktidega

Selel 3.5 kujutatud rehvi ja maapinna kontaktpinna tsentrid (kujutatud telgedena) asusid tugevusanalüüside puhul velje tsentrist kaugusel 203.2 mm ehk 8 tolli. Antud punkte kasutati tugevusanalüüsidest jõu rakenduspunktidenä.

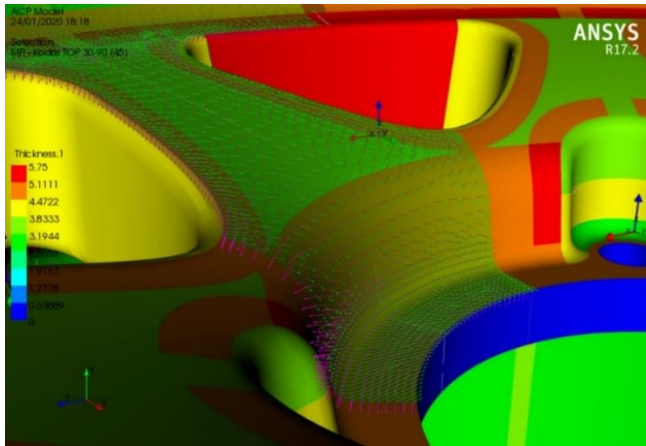
3.3 Komposiitkeha ülesehitus

Modelleeritud analüüsimudelile oli võimalik hakata ehitama komposiitkeha, tarkvara ANSYS 17.2 ACP (Pre) keskkonnas (sele 3.6 ja 3.7). Iga pinna väljalõike (lapi) kohta moodustati nimega sektsioon, millele määrati kanga siht ja kasvusuund (sele 3.7). Sihi suhtes määrati kanga kiu nurk. Kasvusuunas kasvatati süsinikkiu kihte. Kangaste suunda, hulka ja lappide kuju muudeti vastavalt LEM tugevusanalüüside tulemustele. Süsinikkiu anisotroopsuse tõttu tuli kihtide lisamisel arvesse võtta ka antud sektsioonis mõjuvaid jõude. Vastavalt erinevates detaili osades mõjuvatele jõududele määrati süsinikkiu suund ja lappide kuju, tagamaks kanga maksimaalne efektiivsus ja võimalikult optimaalne kihtide arv. Komposiitkeha materjalidena kasutati varasemalt Formula Student Team Tallinna liikmete poolt ANSYSis defineeritud ristpõiminguga (ingl k *twill*) süsinikkiudu Gurit SC 110(T2) ja ühesuunalist (ingl k *unidirectional* ehk *UD*) süsinikkangast Gurit SE 70.

Täitematerjal ja tsentreerimisrõngas lisati komposiitkehale ANSYS 17.2 static structural moodulis, ühendades see komposiitkeha pindadega. Täitematerjalina kasutati varasemalt meeskonna poolt ANSYSis defineeritud vahtu Rohacell IG-F 71. Tsentreerimisrõnga materjalina kasutati ANSYSi standard alumiiniumit.



Sele 3.6 Lõpliku detaili komposiitkeha ANSYS 17.2-e ACP Pre keskkonnas

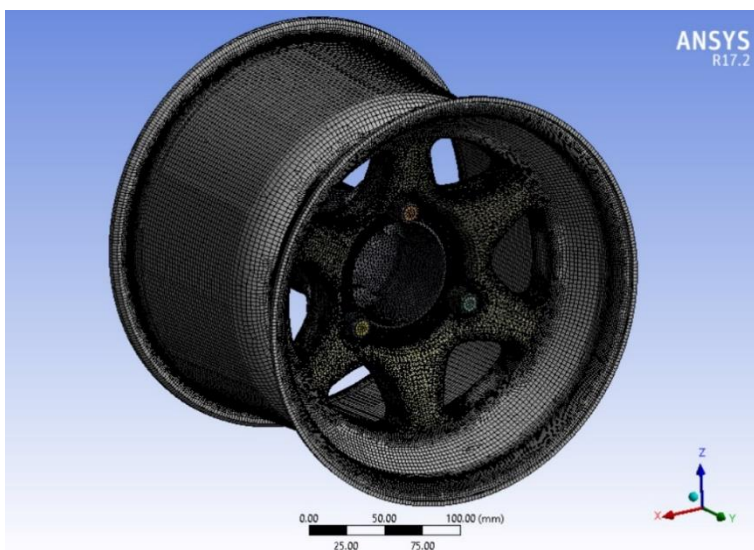


Sele 3.7 Nähtav kanga kiu suund (rohelised nooled) ja kasvusuund (roosad nooled)

Seledel 3.6 ja 3.7 kujutati lõpliku analüüsimudeli komposiitkeha, kus värvid kirjeldasid laminaadi paksust. Valged jooned kujutasid laminaadi läbilõiget. Läbilõiked olid vajalikud kontrollimaks kihtide üksteise suhtes paiknemist ja õiget kasvusuunda. Samuti kontrolliti nii ülekatete seisukorda (visuaalne hindamine tootmise keerukuse seisukohast).

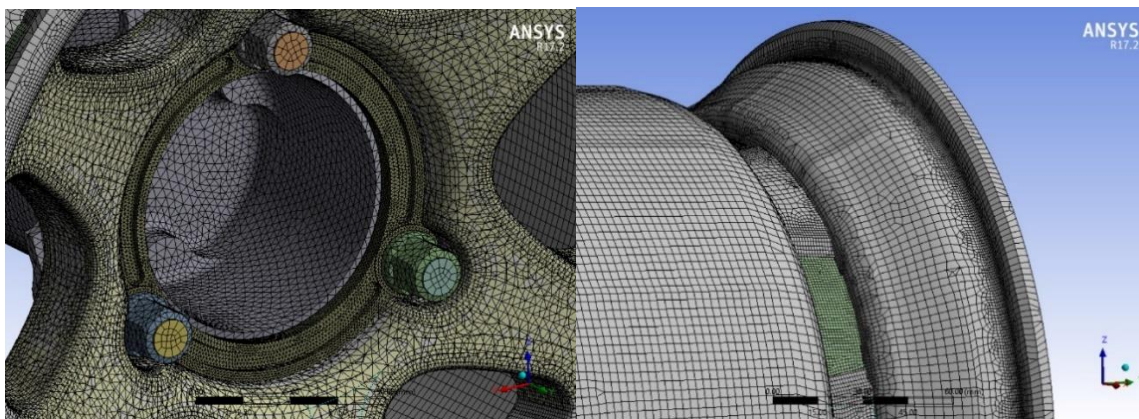
3.4 Analüüsivõrgustik

Järgnevalt genereeriti analüüsimudelile analüüsivõrgustik. Analüüsivõrgustiku suuruse lähteparameetrikks valiti *curvature* ehk võrgustik lähtus detaili kumerustest. See tähendas väiksemat võrgustiku elementi keerulisemate geomeetria korral ja suuremat lihtsamate pindade puhul. Elemendi suuruseks valiti vahemik 2-3 mm. Elemendi kuju oli adaptiivne – programm genereeris elemendi kuju vastavalt pinnale.



Sele 3.8 Lõpliku analüüsimudeli analüüsivõrgustik

Suuremat analüüsitäpsust nõudvates ja pingekontsentraatorite tekke kohtades vähendati analüüsivõrgustiku elemendi suurust (sele 3.9). Elemendi suurust vähendati tsentreerimisrõnga, kodarate äärte, rehvipindade, montaažisoone ja rummu pinna puhul. Elemendi suuruseks määrati 1 millimeeter ja tüübiks *uniform* ehk ühtne elemendi kuju terve ala või detaili ulatuses. Programm määras antud sektsioonides, kas kasutatakse kolmnurkset või nelinurkset analüüsivõrgustiku elementi.



Sele 3.9 Nähtaval kohad, kus on vähendatud analüüsivõrgustiku suurust

Analüüsitud valmimise järgselt asuti tugevusanalüüsime juurde.

3.5 Rajatingimused

Velje tugevusanalüüsime alustati rajatingimuste määramisega. Esmalt nulliti analüüsi koostu vabadusastmed. Rumm kinnitati laagerduspinnast jäigalt (ingl k *fixed support*)¹. Tikkpoldid ühendati mutrite ja rummuga jäigalt, ning määrati telje sihiline eelpingestus, mis imiteeris mutrite pingutamist (eelpingestused nähtavad seel 3.11). Eelpingestuse aksiaalsuunaline jõud leiti järgnevast valemist:

$$T = K * F * D, [12] \text{ kus} \tag{1}$$

T – mutri moment (Nmm);

K – hõõrdetegur mutri ja mutripesa vahel $(0.61)^2$ [13];

F – aksiaalsuunaline jõud (N);

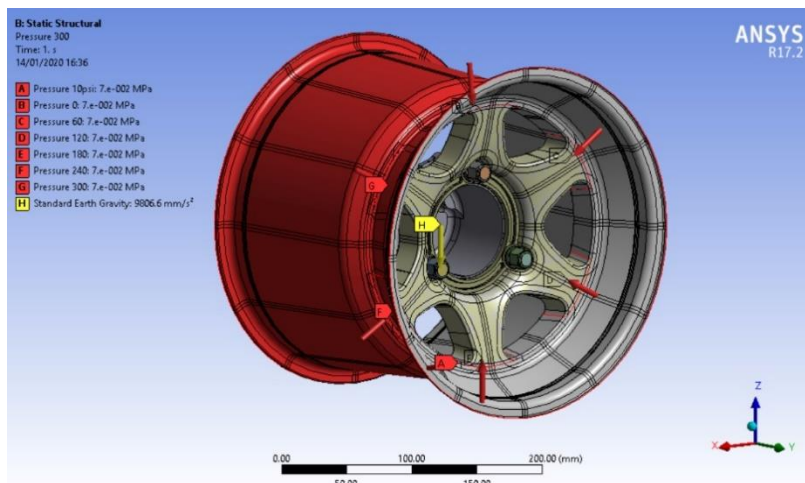
D – tikkpoldi diameeter (mm).

$$55000 \text{ Nmm} = F * 10 \text{ mm} * 0.61 \rightarrow F = \frac{55000}{6.1} \text{ N} \approx 9017 \text{ N}$$

¹ Rummu tõttu kirjeldatakse tugevusanalüüsime tulemustega n-ö koostu deformatsiooni, mitte ainult velje deformatsiooni.

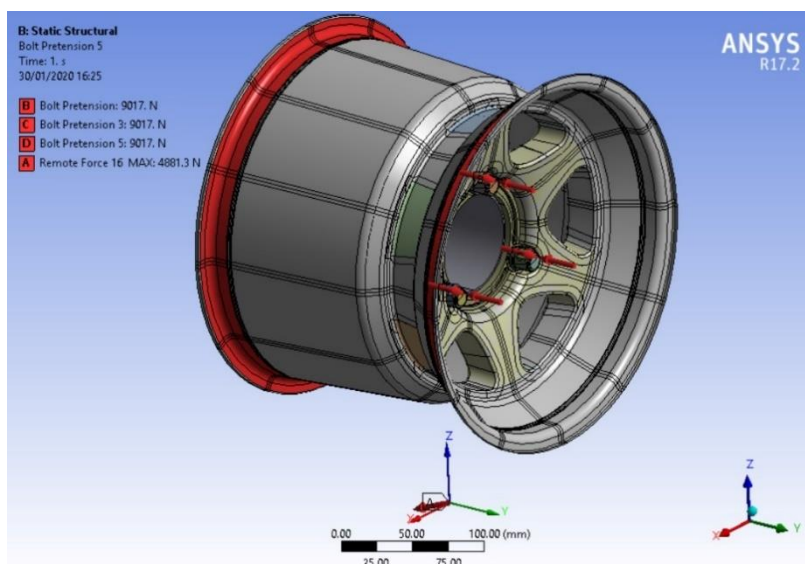
² Hõõrdetegur on vastav alumiiniumi (tsentreerimisrõngas) ja terase kokkupuutele (mutter).

Peale detaili vabadusastmete nullimist, määrati detailile mõjuvad jõud. Tervele koostule määrati gravitatsioonist tekkiv jõud, suunaga teekatte poole (suund -Z, nähtav seel 3.10 kollase noolena). Velje rehvi poolsele pinnale määrati rehvirõhk 10 psi ehk 0.07 MPa (piirkond ja suund nähtavad seel 3.10).



Sele 3.10 Veljele mõjuvad jõud I

Rehvipinnale määrati *remote force*, mille rakenduspunktiks valiti rehvi ja maapinna kontaktpinna tseenter (nähtav seel 3.11). Seda juhul kui teostati kurvi pidurdamise ja kurvist kiirendamise analüüse. Kohalt kiirendamise puhul kinnitati velg rehvipinnalt jäigalt ja määrati rummule kiirendamisel tekkiv moment (nähtav seel 3.19). Rummult võeti seejuures ära kõik muud vabadusastmed peale pöörlemise ümber Y-telje.



Sele 3.11 Veljele mõjuvad jõud II

Tugevusanalüüsis kasutatud rehvipinnale mõjuvad jõud saadi, varasemalt Formula Student Team Tallinna meeskonna liikmete poolt koostatud, kinemaatika jõudude arvutusmoodulist. Antud arvutusmooduli kohandas 2019 aasta hooaja vormelile

vastavaks meeskonnaliige Jaagup Laaser. Moodul arvutas võistlussõiduki veermiku detailides tekkivad jõud kõigis sidestus ellipsi (ingl k *traction ellipse*) punktides¹. Antud töö jaoks kasutati arvutatud maksimaalseid jõude rehvi ja maapinna kontaktpunktis. Erinevate olukordade puhul kasutatavad jõud toodi välja tabelis 3.1. Jõudude puhul ei kasutatud varuteguriga läbi korrutamist, kuna antud jõud ei mõjuks eales reaalses olukorras. Esiteks, deformeeruks elastselt rehvi, mis ei laseks jõududel otse velge mõjuda. Eelpool mainitud arvutusmoodul nimelt ei arvestanud rehvi deformatsiooni. Samuti kaotaks rehvi mingist hetkest pidamise ja hakkaks läbi libisema. Libisemisel väheneksid mõjuvad jõud drastiliselt. Varasematest komposiidianalüüsides oli ka teada, et analüüsitud tulemused kippusid olema ~20% päriselust halvemad. See võis olla tingitud vigadest analüüsivõimaluste defineerimisel. Lisaks viidi läbi maksimaalse rõhu analüüs, millest on rohkem juttu peatükis 3.7.

Olukord	X-telg, F	Y-Telg, F	Z-Telg, F
Kurvi pidurdamine (esitelg)	531.1 N	-3749 N	-1269.1 N
Kurvist välja kiirendamine (esitelg)	-2359.5 N	-3511.7 N	-1528.6 N
Kurvi pidurdamine (tagatelg)	2493.1 N	-3710.6 N	-1615.2 N
Kurvist välja kiirendamine (tagatelg)	-573 N	-4044.8 N	-1369.2 N
Rummu moment kohalt kiirendades	328 Nm ²		

Tabel 3.1 Maksimaalsete jõudude tabel

Tabelis 3.1 välja toodud jõud maksimaalset deformatsiooni, algse detaili analüüsimisel, ei tekitanud. Maksimaalne deformatsioon tekkis, vormeli tagatelje parempoolses veljes, olukorras kus sõiduk keeras vasakule (Y telje negatiivses suunas). Olukorras detailile mõjuvad jõud (rehvi ja maapinna kontaktpinna tsentris) toodi välja tabelis 3.2. Antud olukorras mõjus võistlussõidukile külgsuunaline ülekoormus 2.95 G-d (kinemaatika arvutusmoodulist).

Olukord	X-telg, F	Y-Telg, F	Z-Telg, F
Maksimaalne deformatsioon	649,1 N	-4582,5 N	-1551,2 N

Tabel 3.2 Maksimaalset deformatsiooni põhjustavad jõud

Peamised analüüsid viidi läbi tabelis 3.2 mainitud jõududega. Velje vastupidavust ja deformatsiooni kontrolliti kolmes rehvi ja maapinna kontaktpinna tsentris,

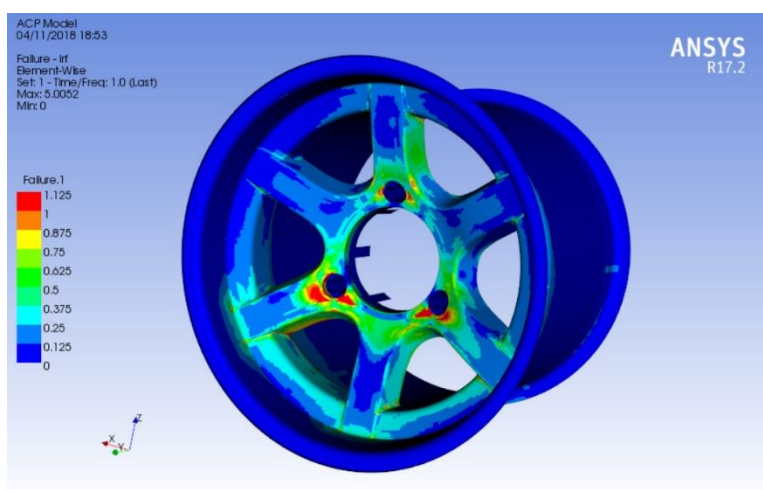
¹ Arvutusmoodul ei arvestanud rehvi deformatsiooni.

² Kohalt kiirendamisel maksimaalse rummus tekkiva momendi leidis meeskonnakaaslane Konrad Ilustrumm, ülekande projekteerimisel.

(nähtavad seel 3.5) nägemaks erinevate olukordade mõju. Tabelis 3.1 mainitud jõududega viidi läbi vaid kontroll analüüse, enne detaili lõplikku valideerimist.

3.6 LEM tugevusanalüüsimine

Eelpool mainitud rajatingimustel viidi läbi tugevusanalüüse, selgitamaks välja velje deformatsioon, Tsai-Wu tegur ning tekkivate pingete suurus ja mõjuala. Analüüside eesmärk oli luua vastupidav detail, mis omaks väiksemat elastset deformatsiooni kui seda oli algsel detailil (kirjeldatud peatükis 3.1). Samuti oli võimalik analüüsides leida geomeetrisel pingekontsentratsioonid, ning paika panna võimalikult optimaalne süsinikkiud kanga laminaat.

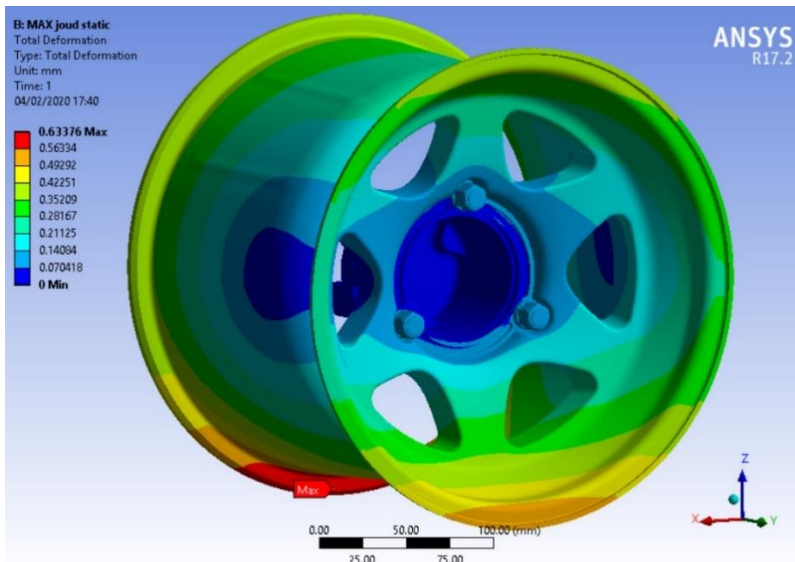


Sele 3.12 Esimese analüüsitud velje geometria Tsai-Wu tegur¹

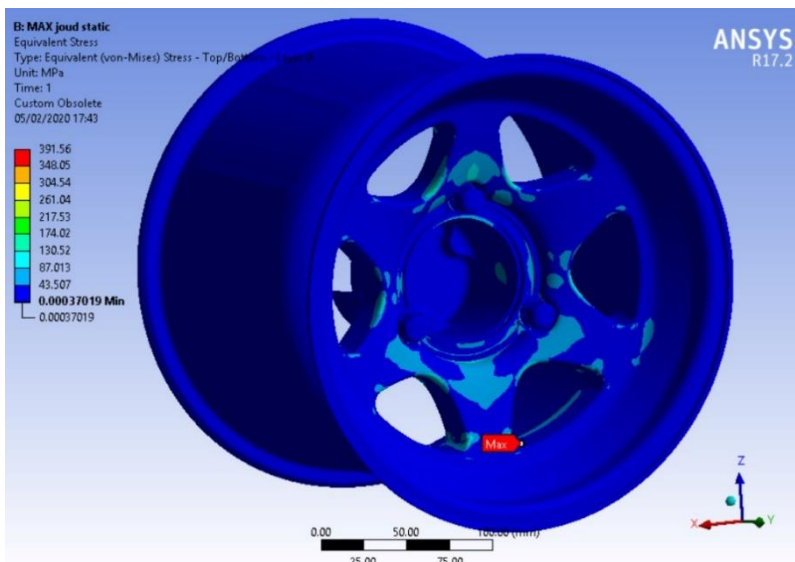
Kõigi analüüsitud peale kokku viidi läbi üle 600 analüüsi iteratsiooni. Enam kui pooled neist lõpliku detaili valmimisele otseselt kaasa ei aidanud, kuna analüüsiti kas teistsugust velje kontseptsiooni või vale offseti. Projekteerimise faasis nimelt muudeti velje offseti korduvalt, tingituna meeskonna veermiku osakonna poolsetest muudatustest. Analüüsides rohkus oli tingitud võimalikult optimaalse laminaadi saavutamiseks – prooviti läbi võimalikult palju erinevaid kombinatsioone.

Maksimaalse deformatsiooni olukorras (jõud tabelist 3.2) olid velje tugevusanalüüsides tulemused alljärgnevad (kirjeldatud seledel 3.13, 3.14, 3.15 ja 3.16). Antud juhul kasutati, rehvi ja maapinna kontaktpinna tsentrina, koordinaatteljestikku, mis seel 3.5 asus kõige vasemal. Teiste jõu rakenduspunktidega (koordinaatteljestikega) niivõrd suurt deformatsiooni ei saavutatud.

¹ Antud juhul polnud tegemist esimese velje lõpliku laminaadiga. Analüüs viidi läbi maksimaalset deformatsiooni tekitavate jõududega.



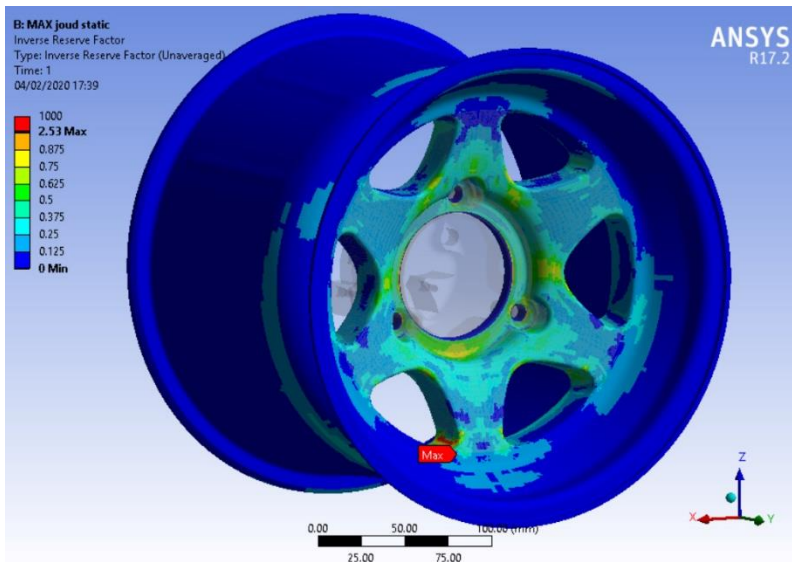
Sele 3.13 Lõpliku detaili deformatsioon kriitilisimas olukorras



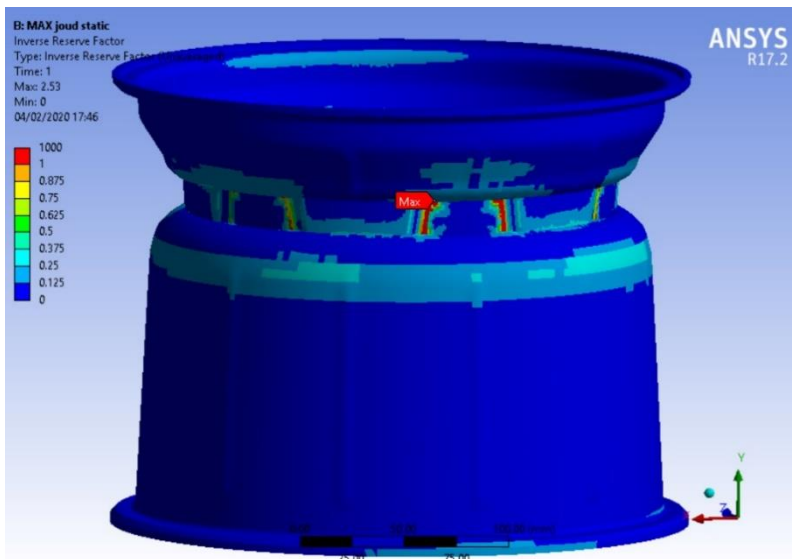
Sele 3.14 Lõplikus detailis tekkivad pinged kriitilisimas olukorras

Lõpliku analüüsi koostu deformatsiooniks, kriitilisimas olukorras, kujunes ~ 0.63 millimeetrit. Algse detailiga võrreldes vähenes elastne deformatsioon pea millimeetri võrra (algse detaili deformatsioon 1.61 mm). Hilisemate testisõitude järgselt väitsid vormeli piloodid, et võrreldes varasema velje lahendusega oli võistlussõiduk kordades jäigem ja sõidujoon konkreetsem.

Selelt 3.14 on näha, et velje võrus tekkinud pinged olid väga madalad. Kuna varasem kogemus süsinikvelje projekteerimisest puudus, otsustati võru mitte optimeerida. Tekkinud pingete vähendamiseks, kodarate äärtes, suurendati tootmisesse mineval detailil servade raadiuseid. Raadiuste suurendamise vajadust näitasid ka Tsai-Wu teguri analüüsitulemused.

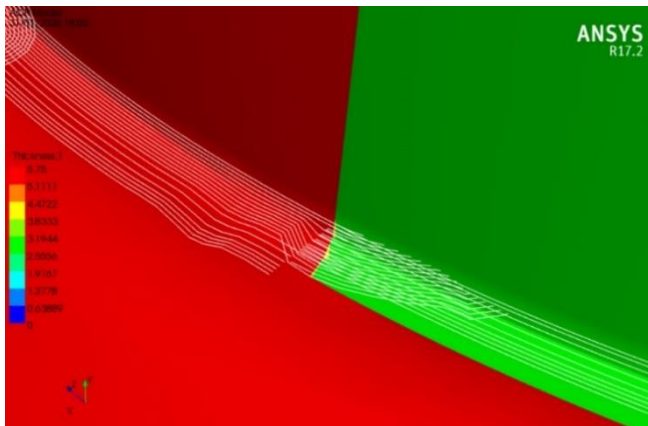


Sele 3.15 Lõpliku detaili Tsai-Wu tegur kriitilisimas olukorras I

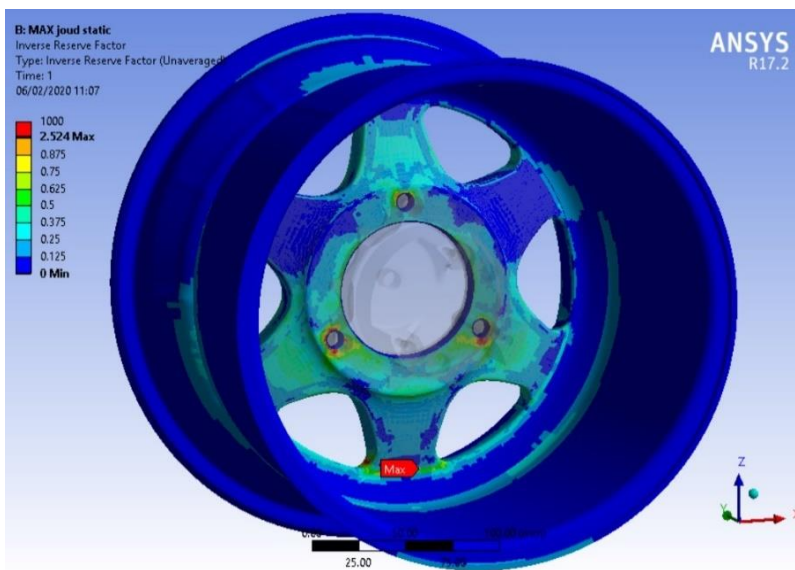


Sele 3.16 Lõpliku detaili Tsai-Wu tegur kriitilisimas olukorras II

Kodarate ja montaažisoone liitumiskohta tekkinud suur Tsai-Wu tegur võis olla tingitud programmi võimetusest luua ühtset kihti kodara otspinna ja montaažisoone pinna vahel. Kihtide lahsust kirjeldati seel 3.17. Suutmata probleemile lahendust leida, arvestati antud kohta kui programmi tekitatud viga. Arvesse võeti ka, et Tsai-Wu tegur 2.53 tekkis vaid ühes analüüsivõrgustiku elemendis, terve velje kohta. Ülejäänud punased alad (nähtavad seledel 3.15 ja 3.16) omasid tegurit 1,01 kuni 1,1. Hilisemal valmis detaili katsetamisel pöörati antud regioonile visuaalsel kontrollil suuremat tähelepanu – probleeme ei esinenud.



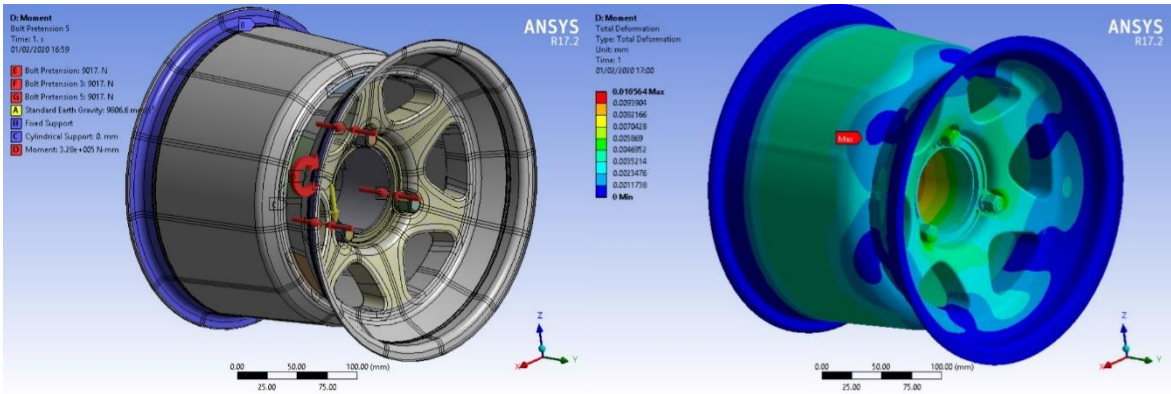
Sele 3.17 Programmi suutmatus kihte ühendada



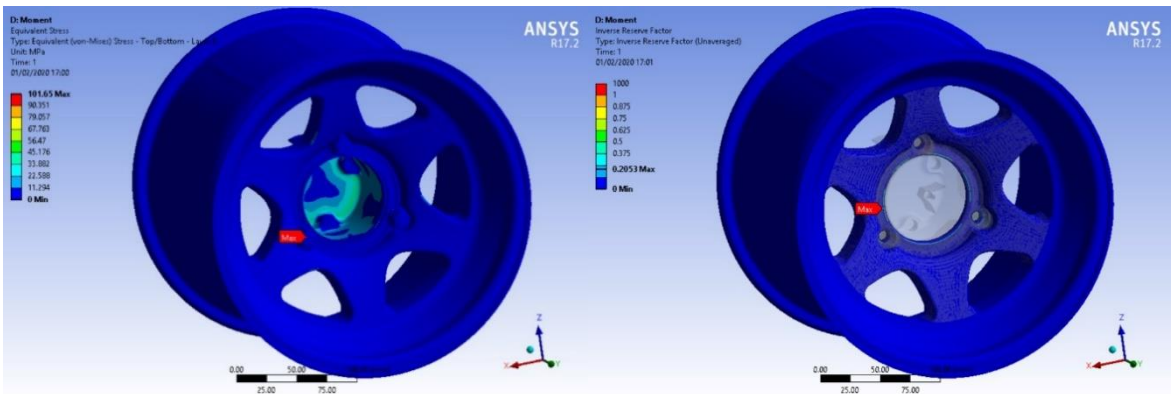
Sele 3.18 Lõpliku detaili Tsai-Wu tegur kriitilisimas olukorras III

Rummu pinnal tekkinud Tsai-Wu tegurile 1.02, laminaadi muutmise lahendust ei leitud. Seega võeti arvesse teatavat analüüsiviga ning pöörati antud regioonile täpsemat tähelepanu valmis detaili katsetamisel (testisõitudel). Hilisematel testisõitudel, ega ka võistlushooaja jooksul, antud regioonis detaili omaduste muutumist ei täheldatud.

Kohalt kiirendamise analüüsimisel selgus, et antud olukorras oli detail üle dimensioneeritud. Seetõttu lähtuti detaili projekteerimisel ja laminaadi paika panemisel täielikult maksimaalse deformatsiooni olukorrast.

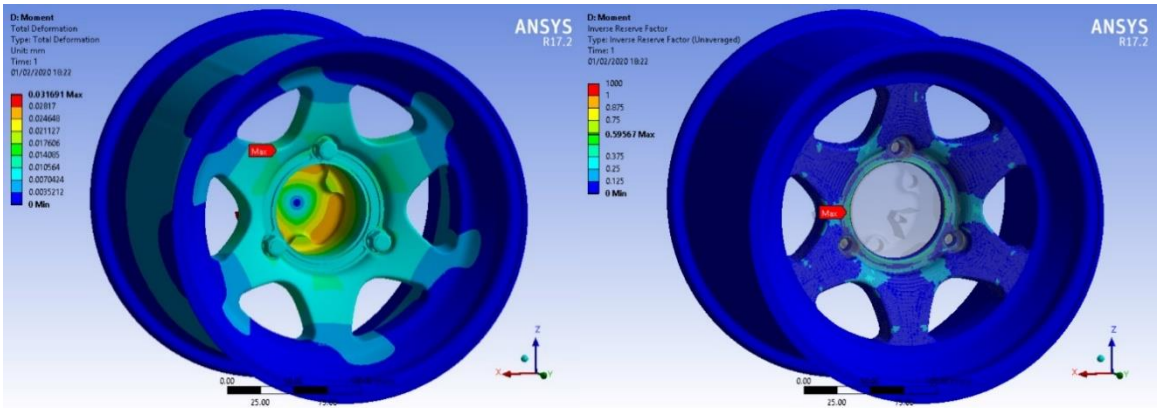


Sele 3.19 Momendi analüüsi rajatingimused¹ vasakul ja velje deformatsioon paremal



Sele 3.20 Momendi analüüsi tulemused (pinge vasakul ja Tsai-Wu koefitsient paremal)

Tugevusanalüüsi korrati ka kolmekordse momendiga. Analüüside tulemused kinnitasid fakti, et detail oli antud olukorras üle dimensioneeritud.



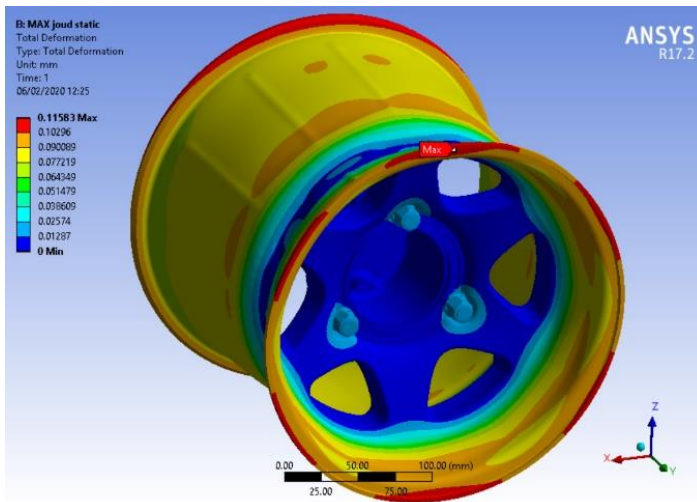
Sele 3.21 Kolmekordse momendi analüüs (vasakul deformatsioon ja paremal Tsai-Wu)

Viimase tugevusanalüüsi tulemuste põhjal vähenes analüüsi koostu deformatsioon 1.61-lt millimeetrilt 0.633-le millimeetrile. Seega uus disain vähendas (teoreetiliselt) deformatsiooni pea millimeetri võrra.

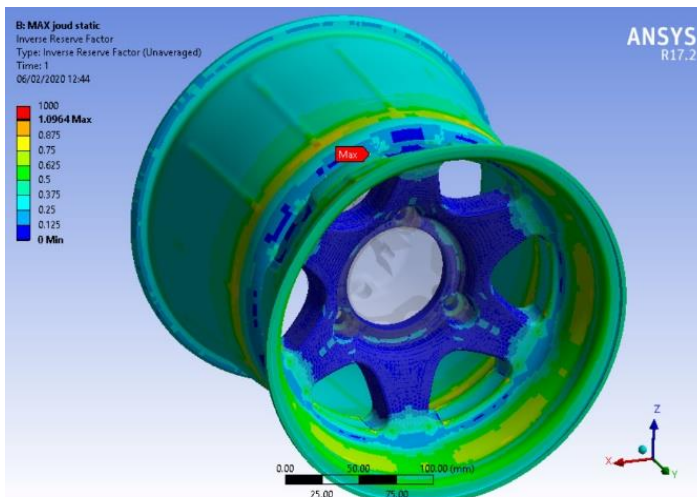
¹ Seale ei näidatud veljele mõjuvat rehvirõhku.

3.7 Rõhu tugevusanalüüs

Varasemalt oli meeskonnal olnud probleeme rehvi veljele saamisega – piiranguks velje tootjapoolne rehvirõhu piirang. Seetõttu võeti süsinikvelje kasutajasõbralikumaks ja ohutumaks tegemise eesmärgil arvesse rehvi tootjapoolne maksimaalne lubatud rehvirõhk (40 psi ehk ~ 2.76 bari)¹. Kuna 2.76 barine rõhk analüüside järgi velge ei lõhkunud (Tsai-Wu tegur ei ületanud ühte), viidi läbi lisa analüüsid, selgitamaks välja maksimaalne lubatud rõhk.



Sele 3.22 Velje deformatsioon 9 barise rehvirõhu juures



Sele 3.23 Velje Tsai-Wu tegur 9 barise rehvirõhu juures

Minimaalne rõhk, millega detaili Tsai-Wu tegur ületas ühte, oli analüüside järgi 9 bari. Hilisemal valmis detaili kasutamisel selgus, et montaažil ei ületanud rehvi rõhk 2.3 bari. Samuti ei täheldatud montaaži käigus Blackwave'i veljega sarnast ragisemist, rehvirõhu suurendamisel. Seega loeti projekteeritav detail (analüüside põhjal) turvaliseks.

¹ Rõhu väärtus saadi rehvi pealt.

4 TOOTMINE

Tudengivormeli meeskonna jaoks valmis, antud töö käigus, neli süsinikvelge. Algne plaan oli toota kolm – üks LEM analüüside valideerimiseks ja kaks testisõitude jaoks. Lõpptulemusena valmis neli velge, millest kaks läbisid testisõidud ja kõigi neljaga osaleti võistlustel. Lisa (tagavara) velgede tootmist takistas töökäte puudus ja fakt, et vormide tootmise aeg venis plaanitud pikemaks. Viimane (neljas) velg valmis 24 tundi enne hooaja teise võistluse algust, mis tähendas, et peale velje valmimist asuti koheselt teele võistlustele.

4.1 Vormimaterjali valik

Tootmisprotsessi alustati vormimaterjali valikust. Valikus olid necuron EP700 (epoksiid vormimaterjal) ja alumiinium 6082 T6. Necuronist vormidega oli meeskonnal varasem kogemus, alumiiniumvormidega aga mitte. Varasemast kogemusest necuron vormidega oli teada, et antud vormid vajasid peale igat kasutuskorda uuesti mehaanilist töötlemist (lihvimist) ja vormi pinda taastava keemiaga katmist. Seda kõike veel enne lamineerimiseks vajaliku vormikeemia kasutamist. Igakordse kasutamise järel mehaanilise töötlemise läbiviimine, oli üks faktor, mis rääkis alumiiniumi kasuks. Nimelt oli võimalus, et mehaanilise töötlemisega väheneb vormi täpsus. Samuti mängis alumiiniumi kasuks fakt, et 6082 T6-e termopaisumine, termotöötlus tsükli temperatuurivahemikus, oli väiksem kui necuronil (tabel 4.1).

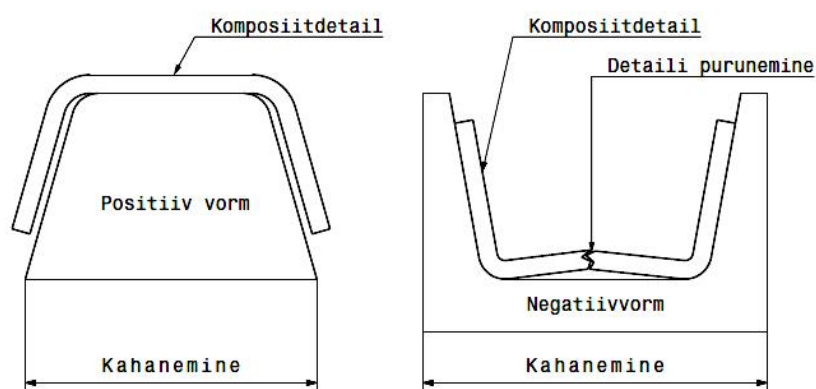
Materjal	Termopaisumise koefitsient temperatuurivahemikus 10°C – 100°C [$10^{-6}K^{-1}$]
Alumiinium 6082 T6	24 [14]
Necuron EP700	35 – 40 [15]

Tabel 4.1 Materjalide termopaisumise koefitsiendid

Väike termopaisumine oli vajalik detailis sisepingete tekkimise vältimiseks ja tolerantside saavutamiseks. Lähtuvalt eelpool mainitust, valiti vormimaterjaliks alumiinium 6082 T6.

4.2 Vormide modelleerimine

Järgnes vormide modelleerimine raalprojekteerimise tarkvaras Catia V5. Kuna detail ise oli modelleeritud selliselt, et piisas kahest vormipoolest, siis lähtuti antud kontseptsioonist (sele 4.2). Võimalus oli kasutada ka eraldi vorme rehvipinna kujundamiseks (kahe eelpool mainitud vormi ümber). Antud olukorras oleks see tähendanud meeletult suurt materjalikulu ja otsese kontakti puudumist süsinikkiu ja termotötlusahju õhu vahel. Rehvipinda kujundavad vormid oleks antud olukorras olnud ka üleliigsed, sest sisemised vormid (vormid, mis moodustasid velje nähtava pinna) kujundasid ka rehvipinna, kuna võru pind oli terve velje ulatuses sama läbimõõduga. Vormide modelleerimisel arvestati ka faktoriga, et alumiinium omas suuremat termopaisumise koefitsienti kui süsinikkiud. Antud juhul võisid negatiivvormid peale termotötlus tsükli (jahutamisel) detaili pingestada, halvemal juhul selle purustada.

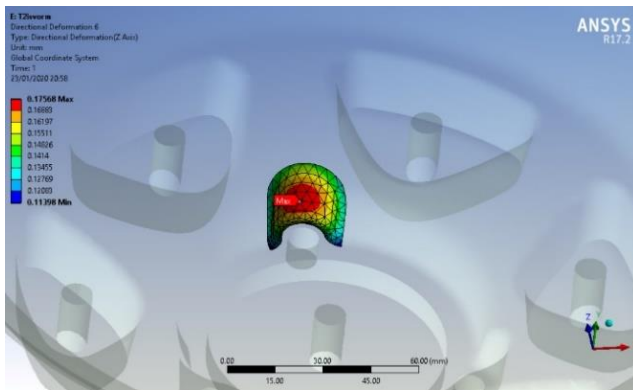


Sele 4.1 Vormi kahanemise mõju detailile

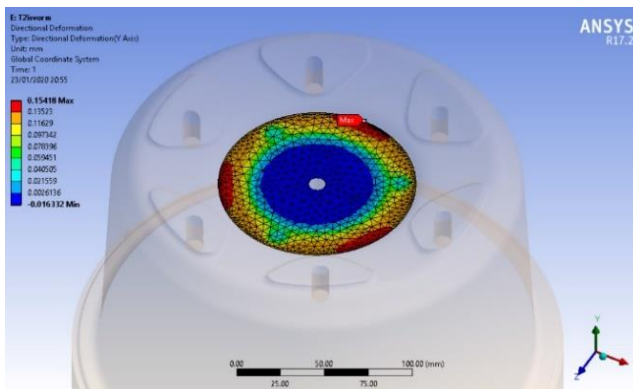
Täpsust nõudvatel pindadel arvestati, vormi modelleerimisel, termopaisumist. Paisumise maht saadi teada vormi termoanalüüsiga, mis viidi läbi ANSYS 17.2-es. Analüüs viidi läbi temperatuurivahemikus 22 – 120°C, ning jälgiti detaili erinevate pindade deformatsiooni, nende ristsirgega ühtiva (selle lähedase) telje sihis (sele 4.3). Vormide modelleerimist alustati silindrilisest toorikust velje mudeli välja lõikamisega. Seejärel poolitati vorm kaheks pooleks nõnda, et detaili oleks võimalik mõlemast vormipoolest kätte saada. Moodustunud vormipoolte liitepind kujutati selal 4.2.



Sele 4.2 Vormi mudel (vasakul) ja liitepind (paremal)



Sele 4.3 Mutri pesa deformatsioon Z-telje sihis



Sele 4.4 Rummu pinna deformatsioon Y-telje sihis

Peale lõplike vormipoolte mudelite modelleerimist (arvestades termopaisumist), vormistati detailide joonised (lisatud töö lõppu) ning asuti vormide tootmise juurde.

4.3 Vormide tootmine ja ettevalmistus

Vormide lõiketöötlus viidi läbi Skarcon Machining OÜ poolt. Antud võimaluse, vormid tasuta freesida, võimaldas meeskonna veteran, Marek Lentsius. Härra väitel kulus kahe vormipoolte freesimiseks umbes 50 töötundi. Vormide kvaliteeti, peale lõiketöötlust, kujutati sel 4.5 (vasakul).

Lõiketöötlusele järgnevalt töödeldi vorme, töö autori poolt, lihvpaberitega 1200, 1500 ja 2000 (õlikeskkonnas). Seejärel poleeriti vormipooled Aluchrom poleerpastaga. Peale poleerimist vormid puhastati ja kaeti vormikeemiaga.



Sele 4.5 Ülemine vormipool peale lõiketöötlust (vasakul), mõlemad vormipooled peale poleerimist (paremal)

Nelja velje tootmise järgselt võis tõdeda, et vormide vastupidavus, võrreldes valikus olnud necuroniga, oli kordades parem. Peale iga velje tootmist piisas vormide kergest poleerimisest ja vajaliku eralduskeemiaga katmisest.

4.4 Velgede tootmine

Peale vormide ettevalmistamist oli võimalik hakata velgi lamineerima. Selleks lõigati vajaliku kujuga süsinikkiud kangast lapid, mida lamineeriti vastavalt varem tugevusanalüüsidega paika pandud laminaadile. Ühe velje valmistamiseks oli tarvis 381 süsinikkiud kanga lappi. Lappide jaoks valmistati Exceli tabel¹ kuhu pandi jooksvalt kirja kanga tüüp, kiu suund (lähtuvalt lapi sümmeetria teljest), mass (kaaluti enne vormi asetamist) ning staatus (kas on lamineeritud või mitte). Selline süsteem võimaldas tootmise käigus ette näha valmiva detaili massi ja aitas pidada järge lamineerimisel, tagamaks õige koguse lappide kasutamise.

Materjalidena kasutati, tugevusanalüüsides mainitud, ristpõiminguuga (Gurit SC 110(T2)) ja ühesuunalist (Gurit SE 70) süsinikkiud kangast. Täitematerjalina kasutati vahtu Rohacell IG-F 71 ja liimriidena Gurit SA 80. Liimriiet kasutati süsinikkiud kanga ja täitematerjali omavaheliseks sidumiseks.

¹ Väljavõte Exceli tabelist nähtav töö lisades (Lisa 3).



Sele 4.6 Süsinikkiud kanga šabloonid (vasakul) ja lõigatu lapid (paremal)

4.4.1 Lamineerimine

Lamineerimist alustati esimesest vormipooldest (ülemine pool). Süsinikkiud kangas lamineeriti (sarnaselt katsekehale) esimesse vormipoolde, jättes mõningatele kihtidel ülekatted, mida oli võimalik teise vormipoolde (alumine pool) kihtide vahele painutada. Kihtide ülekatted eraldati üksteisest eralduskilega, mis võimaldas läbi viia vahevaakumeid ilma, et kihid üksteise külge kinni jääks (ülekatteid ja eralduskile kujutati selel 4.7). Vahevaakumid olid vajalikud kihtide omavahel kokkusurumiseks. Kuna kihte oli niivõrd palju, ei piisanud ainult esimese (välispinna) kihi ja terve komposiitkeha vakumeerimisest (hetkel kui juba terve detail pidi minema termotöötlusesse). Seetõttu teostati vahevaakumeid kahe kuni kolme täiskihi vahel. Iga kiht ei moodustanud täiskihti ja mõneti lisati kangalappe vaid teatud kohtadesse. Vahevaakumid võimaldasid saavutada ka võimalikult autoklaavile (ingl k *autoclave*) sarnast lõpptulemust. Autoklaav kujutab endast ülerõhuahju, millega oli võimalik termotöötluse ajal süsinikkiu kihte suruda kokku suurema rõhuga, kui seda võimaldas tavaline 1 barine vaakum (vaakumkotis).

Lamineerimise suurim erinevus, võrreldes katsekehade tootmisega, seisnes selles, et reaalsel detaili ei olnud võimalik ühe süsinikkiu lapiga katta kolme kodara külge. Seetõttu tekkisid ülekatted, lisaks kodara tagumise külje pinnale, ka esiküljele.



Sele 4.7 Esimese vormipoole kihtide lamineerimine (ülekatte eraldatud roosa eralduskilega)

Peale esimese vormipoole kihtide lamineerimist, täideti velje sisemus täitematerjaliga. Täitematerjalina kasutati vahtu IG-F 71, mida on kujutatud seel 4.8. Vahu tükid liideti üksteise ja süsinikkiud kangaga liimriide abil. Liimriie tekitas epoksiidvaiguga võrdse materjalide liite, peale termotöötlust läbimist. Toatingimustes oli tegemist väga hästi liimuva kanga laadse tootega, mis peale termotöötlust kõvenes. Liimriiet kujutati seel 4.8 (roheline materjal).



Sele 4.8 Velje täitematerjali sobitamine (vasakul) ja täitematerjal kaetuna liimriidega (paremal)

Peale velje sisemuse täitmist täitematerjaliga oli võimalik lamineerida n-ö teise vormipoole kangaid. Teise vormipoole kangad lamineeriti suuremas jaos varem lamineeritud detaili peale (nähtav seel 4.9, paremal), ning välispinna moodustavad kangad teisele vormipoolele (nähtav seel 4.8 vasakul).



Sele 4.9 Alumine (vasakul) ja ülemine vormipool (paremal)

Selel 4.7 on kujutatud laminaati enne vormipoolte liitmist. Peale vormipoolte kangaste lamineerimist, liideti vormid omavahel poltliitega. Liidetud vormile oli võimalik lamineerida alumise ehk teise vormipoole võru kangaid (rummu poolne võru), mis ülekattega liideti kodarate laminaadiga (kodarate laminaadi ülekatted nähtaval selel 4.9 paremal ja selel 4.10 vasakul).



Sele 4.10 Liidetud vormipoolte lamineerimine

Peale võru (rummu poolse osa) kangaste lamineerimist (seis nähtav selel 4.10 paremal) oli võimalik alustada viimase etapiga, enne termotöötlust. Viimase etapina lamineeriti montaažisoone tugevduslapid, tervet võru katvad (rehvi poolsed) süsinikkiu kihid ja rehvipinna kõrgendikud (nähtavad selel 2.7).



Sele 4.11 Viimase etapi lamineerimine

Seejärel kaeti detail eralduskile ja õhku juhtiva kangaga (ingl k *breather*) ning vakumeeriti (vaakum -1 bari). Eralduskile vältis detaili nakkumist vaakumkile külge. Õhku juhtiv kangas tagas ühtlase vaakumi terves vaakumkotis (vältis vaakumluku teket mingis vaakumkoti osas).



Sele 4.12 Eralduskile ja õhku juhtiva kangaga kaetud detail vasakul ja vakumeeritud detail paremal

Järgnes detaili termotöötlus. Kuna kasutuses oli eelimmutatud süsinikkiud kangas, mis ei nõudnud autoklaavi kasutamist, viidi termotöötlus läbi Tudengivormeli meeskonna komposiidi ahjus. Termotöötlus oli vajalik eelimmutatud süsinikkiud kanga kõvendamiseks. Tavalise süsinikkiud kanga puhul toimuks vaigu kõvenemine etteantud aja jooksul (toatingimustes) ja termotöötlus viiaks läbi vaid omaduste parendamiseks. Antud töös valmivate velgede puhul kasutatud termotöötlus tsükli parameetrid toodi välja tabelis 4.2.

Aeg / Temperatuuri tõstmise kiirus	Temperatuur, °C
2°C/min	Toatemperatuurist 70°C-ni
2-3 tundi seisutamist	70°C
2°C/min	70°C-ist 120°C-ni
4 tundi seisutamist	120°C
~24 h	Toatemperatuuril jahutamine

Tabel 4.2 Süsinikvelje termotöötuse tsükkel

Viimase (neljanda) velje puhul kiirendati jahtumisprotsessi suruõhu ja jaheda veega. Antud velg võeti vormist välja 2 tundi peale termotöötus tsükli lõppu.



Sele 4.13 Detail peale termotöötlust vasakul ja peale vormist välja võtmist paremal¹

Järgnes mehaaniline järeltöötus, mille eesmärgiks oli detaili kasutuskõlblikuks muutmine. Rumm- ja rehvipind lihviti spetsiaalses veljerakises, Tallinna Tehnikakõrgkoolis (nähtav seel 4.15).

Rehvipinna lihvimisel eemaldati termotöötus tsükli ajal tekkinud vaigu konarused. Eesmärgiks oli luua võimalikult ühtlane pind (pinnakaredusega Ra 0.4-0.8), mis taganuks hermeetilise kontakti rehvi ja velje vahel, terve diameetri ulatuses.

Rummupind töödeldi vastavalt projekteeritud tolerantsile, tagamaks velje vaba ist rummule. Lisaks eemaldati vormipoolte liitepinna jälg (kodarate vahelt) ning tikkpoltide avad puuriti õigesse mõõtu. Avadele oli jäetud vormi negatiivne varu, et alumiiniumi soojuspaisumine avasid liialt suureks ei venitaks. Detaili mõõdistamisel selgus, et vorm ei paisunud niivõrd palju kui seda oli kujutanud ANSYSi termoanalüüs. Seega oleks võinud vormi modelleerimisel paisumisvaru arvestamata jätta.

¹ Teadaolevatel andmetel on tegemist esimese süsinikveljega Eesti Vabariigi ajaloos.



Sele 4.14 Esimene velg peale lihvimist



Sele 4.15 Neljanda velje lihvimine



Sele 4.16 Järeltöödeldud (vasakul) ja töötlemata (paremal) velje võrdlus

4.4.2 Laminaadi parandused

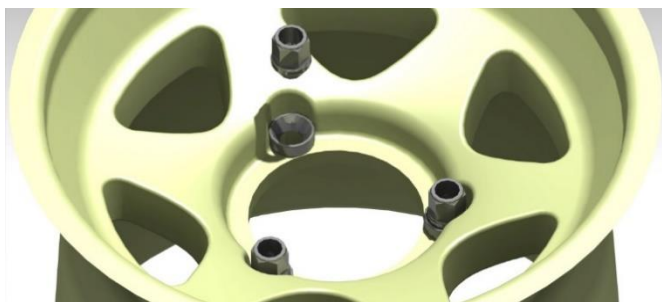
Esimese velje lamineerimise käigus selgus, et veljevõrul paiknevate lappide ülekatte kohad kordusid liialt ja tekitasid liialt kõrged kühmud, mis takistasid (küll vähesel määral) rehvi montaaži. Järgnevatel velgedel lamineeriti võru lapid väiksema nihke sammuga, mis tagas, et vähem ülekatteid koondus ühte tsooni. Selline moodus tagas siledama võru pinna ilma liialt kõrgete ülekatteteta.

Samuti muudeti lamineerimisprotsessi käigus osade lappide kuju, tagamaks mugavam lamineerimine ja parem detaili kvaliteet.

4.5 Tsentreerimisrõnga projekteerimine ja tootmine

Kuna velje tootmisest tulenevalt võis olla detailil mõningaid ebatäpsusi, tuli luua lahendus tsentreerimaks rummu ja velje pöörlemistelg. Probleem lahendati sarnaselt meeskonna varasematele velje lahendustel – koonusmutritega. Seega tekkis vajadus koonuselise pinna järele, mis oleks osa veljest. Samuti oli vaja vastupidavast materjalist vahelüli komposiitkeha ja koonusmutrite vahele, kuna süsinikkiu vastupidavus mehaanilisele kulumisele (mutrite pingutamise) ei olnud just kõige parem.

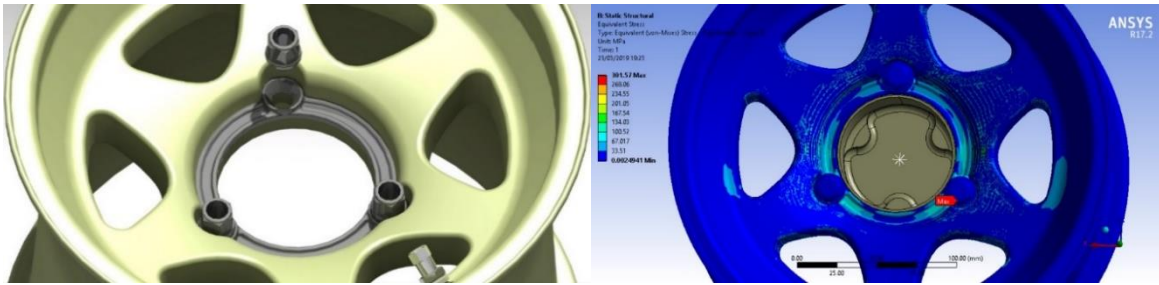
Esmase lahendusena, antud probleemile, modelleeriti ja LEM analüüsiti puks lahendust (kujutatud seel 4.17).



Sele 4.17 Puks lahendus

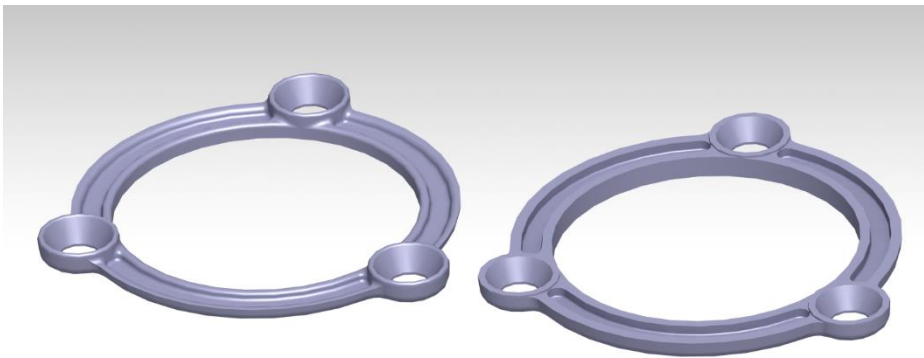
Lahenduse puuduseks oli võimalus, et mutrite pingutamisel hakkavad puksid oma pöörlemisega süsinikkiudu hõõruma – korduvkasutusel ka lõhkuma. Samuti oli probleemiks pukside rohkus ja võimalus, et võistlusolukorras suudetakse need ära kaotada. Pukside kadumist oleks takistanud nende liimimine komposiitkeha külge, kuid antud lahendust ei kasutatud. Ilma detaili liimimiseta säilitati võimalus pukse vahetada, ilma süsinikkiudu rikkumata.

Kasutusmugavuse eesmärgil liideti puksid ühtseks detailiks, mida antud olukorras hakati kutsuma tsentreerimisrõngaks.



Sele 4.18 Tsentreerimisrõngas tarkvaras Catia V5 (vasakul) ja programmis ANSYS 17.2 (paremal)

Detaili kujule piiranguid ei seatud (v.a mutrite pesad), kuna plaan oli tootmisel kasutada titaani 3D-printimist. Kuna titaani printida ei olnud võimalik (selgus viimasel hetkel), tuli vahetada materjali ja tootmismeetodit. Seetõttu muudeti detail lihtsamini toodetavaks (freesitavamaks) ja materjaliks kujunes alumiinium (Alumec 89). Detaili modelleeris lihtsasti toodetavaks meeskonnakaaslane Timo-Martti Järv, kes antud detailid ka realselt valmis tootis.



Sele 4.19 Autori modelleeritud (vasakul) ja lihtsustatud (paremal) tsentreerimisrõngas

4.6 Tootmise järeldused

Valminud detaili massiks kujunes $\sim 1.51 \text{ kg}^1$. See tähendas, et detaili mass vähenes võrreldes varasema lahendusega (2.2 kg) 0.69 kg. Võistlussõiduki nelja velje peale saavutati kokku massivõitu 2.76 kilogrammi.

Lõputöö käigus valminud süsinikvelgedega osales võistlussõiduk FEST19 viiel võistlusetapil, mistõttu võis valminud detailid lugeda õnnestunuks. Teadaolevatel andmetel oli esimesena valminud süsinikvelje (sele 4.13) näol tegemist esimese omalaadse detailiga Eesti Vabariigi komposiitmaterjalide ja autospordi ajaloos.

Tootarendusprotsessi järgselt oli võimalik kogetu põhjal kirja panna muudatused, mis tõhustaksid tulevase süsinikvelje arendust ja tootmist. Esimese muudatusena soovitaks vähendada kodarate arvu kuuelt kolmele. Kolme kodaraga velge oleks lihtsam toota

¹ $1.47\text{kg (komposiitkeha)} + 0.0314\text{kg (tsentreerimisrõngas)} + 0.013\text{kg (ventiil)} = 1.5144\text{kg}$

ning samuti kiirendaks see tootmisprotsessi. Samuti oleks kolme kodaraga velje analüüsimudelit lihtsam üles ehitada, mis omakorda vähendaks projekteerimise perioodi.

Saadud kogemuste põhjal, soovitaks muuta ka velje võru laminaati – vähendaks süsinikkiu kihtide arvu ja kasutaks võrus täitematerjali, kuna valminud detailil oli antud regioon liialt üle dimensioneeritud. Kui täitematerjali kasutamine osutuks olemasolevate ressursside puhul võimatuks oleks lahendus vähendada süsinikkiu kihtide arvu ja parendada võru vastupidavust geomeetria muutmisega (näiteks astmeline võru).

5 LAHENDUSE VALIDEERIMINE

Algse plaani järgi pidid läbi viidama velje test Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja metroloogia katselaboris, millega oleks valideeritud LEM tugevusanalüüside tulemusi. Test oleks kujutanud endast velje deformeerimist mutripinnast (rummu suunas) kuni purunemiseni. Sama protsess oleks läbi viidud ka analüüsiprogrammis ANSYS 17.2, ning mõlema katse tulemusi oleks võrreldud, leidmaks analüüsi ja reaalelu erinevus. Kuna aga velgede tootmine hilines (vormide hilise valmimise tõttu), otsustati läbi viia rehvi montaaž.

Rehvi montaaži eesmärgiks oli luua võrdlusmoment varasemate kogemustega. Kuna aga rehvi montaaži käigus Blackwave'i velgedega sarnast olukorda ei esinenud, otsustati proovida velge sõiduolukorras.

Testisõidud viidi läbi Tabasalu kardirajal. Testisõitude järgse visuaalse kontrolli käigus detaili omaduste muutumist (kulumine, pragunemine) ei täheldatud. Visuaalse kontrolli käigus suunati erilist tähelepanu tugevusanalüüsides esinenud nõrkkohtadele.

Peale teise velje valmimist katsetati velgi ka võistlusolukorras¹ – algul sõiduki esiteljel, kus mõjusid väiksemad jõud, ning seejärel tagateljel. Ka võistlusolukorras ei täheldatud detailide omaduste muutumist ega väsimuse tundemärke, mistõttu otsustati võtta risk ja osaleda võistlustel antud velgedega.



Sele 5.1 FEST19 testipäeval (velgede testimine tagateljel) [16]

Esimeseks võistluseks valmis kolm velge, mis andis võimaluse testida kahte velge (esiteljel) reaalses võistlusolukorras. Töö autor esimesel võistlusel ei osalenud ja

¹ Võistlusolukord tähendas vormeliga ringrajal kestvussõidu katsetamist.

keskendus neljanda velje tootmisele. Esimene võistlus kinnitas asjaolu, et veljed olid võistluskõlbulikud ja seetõttu mindi ülejäänud hooajale vastu juba nelja süsinikveljega. Neljas velg valmis natuke rohkem kui 24 tundi enne teise võistluse (FS Italy) algust.



Sele 5.2 FEST19 võistluse FS Italy tehnilises kontrollis



Sele 5.3 FEST19 võistlusel FS Austria

Hooaja jooksul olid veljed kasutuses kokku viiel võistlusel ja kõikidel testipäevadel, mis viidi läbi võistluste vahel ja ka peale hooaega. Selle aja jooksul veljed väsimusmärke ei näidanud ja olid võistluskõlbulikud ka peale hooaega. Seetõttu loeti töö eesmärk täidetuks.

6 MAJANDUSLIKE ASPEKTIDE ÜLEVAADE

Tavapäraselt kuulus Tudengivormeli võistluse juurde ka kuluaruande koostamine. Kuna aga 2019 aasta hooajal oli antud ülesanne niivõrd lihtsustatud, et tõelist pilti ei olnud võimalik kujutada, moodustati (teadaolevate andmete põhjal) tootmise kuluaruanne ühe velje kohta (tabel 6.1). Kuluaruandesse kanti kasutatud materjalid, tootmiseks vajalikud vahendid ja nende maksumus, lähtuvalt Tudengivormeli meeskonnale esitatud arvetele. Tabelis 6.1 toodi välja ka potentsiaalne süsinikkiud kangaste maksumus, mida oleks pidanud finantseerima juhul, kui meeskonna jaoks ei oleks antud materjalid olnud tasuta (süsinikkiud kangad saadi ettevõttelt Gurit sponsorluskorras).

Materjal	Tk/m2/m/l hind	Kogus	Summa	Kommentaar
Gurit SC 110(T2)	46.58 €	6.722	313.08 €	M2 hind, kogus ühe velje kohta
Gurit SE 70	21.91 €	0.428	9.38 €	M2 hind, kogus ühe velje kohta
Gurit SA 80	22.50 €	0.068	1.53 €	M2 hind, kogus ühe velje kohta
IG-F 71 x 10 mm	40.57 €	0.074	3.00 €	M2 hind, kogus ühe velje kohta
Loctite Frekote PMC (puhastusvahend)	7.34 €	0.0129	0.09 €	Liitri hind, vormi kaetakse 3x
Loctite Frekote FMS (täitevahend)	42.13 €	0.0129	0.54 €	Liitri hind, vormi kaetakse 3x
Loctite Frekote 770NC (eralduskeemia)	19.82 €	0.0258	0.51 €	Liitri hind, vormi kaetakse 6x
AW6082 D 300 L=100mm ja L=200mm	521.76 €	0.25	130.44 €	Vormimaterjali hind ühe velje kohta
Ventiil (4tk)	2.25 €	0.25	0.56 €	Ühe ventiili hind
Poleerotsik	7.20 €	0.25	1.80 €	Maksumus ühe velje kohta
K2 Aluchrom poleerimispasta 120g/tuub	1.59 €	0.25	0.40 €	Maksumus ühe velje kohta
Eralduskile	3.20 €	0.9	2.88 €	M2 hind, kogus ühe velje kohta
Õhku juhtiv kangas	1.52 €	0.468	0.71 €	M2 hind, kogus ühe velje kohta
Vaakumkile	0.97 €	9	8.69 €	M2 hind, kogus ühe velje kohta
Vaakumteip	0.39 €	9	3.54 €	M hind, kogus ühe velje kohta
		SUMMA:	477.16 €	Koos süsinikkiu hinnaga
		SUMMA:	153.17 €	Tegelik kulu antud projekti käigus

Tabel 6.1 Toomaterjalide ja ostutoodete hinnad^{1 2}

Kulumaterjalidele oleks lisandunud, reaalses tootmisolukorras, ka töötaja(te) palk. Kuna aga FS Team Tallinna liikmed tootmise eest palka ei saanud või olid detailid toodetud sponsorite poolt tasuta, siis palganumbreid töös ei kajastatud.

Tootmisest suurema pildi kujundamiseks võis mainida, et nelja velje valmistamisel kujunes ühe velje tootmise (keskmiseks) ajaks kaks nädalat (14 päeva), võttes arvesse, et detaili tootis üks inimene, kes töötas päevas keskmiselt 22 tundi (reaalne olukord antud töö puhul). Sellest lähtuvalt, kulus ühe velje tootmisele 308 tundi. Masstootmisel oleks antud velje tootmine arvestatav ainult siis, kui süsinikkiud kanga lapid oleks lõigatud masinaga (lõikuriga, ingl k *plotter*), mis võimaldanuks selle arvelt aega kokku hoida. Suurema osa tootmise ajast moodustaski süsinikkiud kanga lappide käsitsi lõikamine, mis oli ka antud tootmisprotsessi n-ö pudelikaelaks.

¹ Arvutustel kasutatud maksumustesse on arvestatud käibemaks, aga mitte transpordikulud.

² Kõik maksumused on saadud FS Team Tallinnale esitatud arvetest.

FS Team Tallinna jaoks kujunes seega ühe velje tootmise maksumuseks 153.17€ (+materjalide transport). Võttes arvesse, et ainuüksi ühe Blackwave'i süsinikust veljevõru hinnaks oli 400€¹ (+transport, tsentri materjal ja muud vajalikud osad), võis valminud lahenduse lugeda majanduslikult mõistlikumaks variandiks. Kui meeskond oleks pidanud ka süsinikkiud kangaste eest maksma, oleks valminud lahendus ennast ära tasunud suurema partii tootmise puhul. Seda seetõttu, et velje vormide maksumus jagati, antud arvutuste puhul, nelja detaili vahel. Kui oleks toodetud suurem partii, oleks vormide hind, velje ühiku kohta, tulnud odavam. Eelmainitu põhjal, võis projekti lugeda majanduslikult kordaläinuks.

¹ FS Team Tallinnale esitatud arve põhjal (4 võru x 400€ + 50€ transport = 1650€).

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö ülesandeks oli projekteerida ning valmistada Formula Student Team Tallinna 2019 aasta hooaja võistlussõiduki, FEST19, süsinik veljed.

Töös käsitleti kõiki velje projekteerimise etappe, alustades varasemate lahenduste analüüsimisest ja lõpetades detaili kasutamisega võistlusolukorras. Varasemate lahenduste analüüsimisega leiti uue detaili lähteparameetrid ja negatiivsed omadused, mida sooviti parandada. Arvesse võeti ka varasemate detailide kasutuskogemust ja eelkäiva detaili LEM tugevusanalüüsi tulemusi.

Enne velje projekteerimist koguti inspiratsiooni ja kogemusi nii meeskonna kui ka konkurentide varasematest lahendustest. Samuti viidi läbi katsetusi saamaks teada meeskonna suutlikkus toota projekteeritavat detaili. Kogutud teadmistega asuti velje projekteerimise juurde. Projekteerimisel lähtuti võistlussõiduki kinemaatika parameetritest, rehvitootja poolsetest nõuetest, võimalikult optimaalsest geometriast ja ohutusest detaili kasutamisel. Samuti arvestati, et valmiv detail pidi omama kaubanduslikku välimust.

Modelleeritud velje põhjal ehitati üles LEM analüüside jaoks sobilik koost, millega viidi läbi tugevusanalüüse, reaalselt elu imiteerivate rajatingimustega. Tugevusanalüüsis kasutatud rehvipinnale mõjuvad jõud saadi kinemaatika jõudude arvutusmoodulist, mille oli kohandanud projekteeritavale vormelile vastavaks meeskonnaliige Jaagup Laaser. Korrelatsioonis analüüsitulemustega muudeti velje geometriat ja laminaati, kuni saavutati võimalikult optimaalne disain.

Optimaalse geometria ja laminaadi leidmise järel asuti detailide tootmise jaoks vajalike vormide modelleerimise juurde. Esmalt modelleeriti, vastavalt CAD mudelile, kaks vormipoolt, millega viidi läbi termoanalüüs. Termoanalüüsis kasutati reaalse termotöötlus tsükli parameetrid, ning leiti nii vormipoolte soojuspaisumine. Soojuspaisumist arvesse võttes modelleeriti lõplikud vormipooled, mis seejärel Skarcon Machining OÜ poolt toorikust välja freesiti. Lamineerimiseks valmistati vormid ette töö autori poolt.

Järgnevalt kirjeldati süsinikvelje tootmist. Välja toodi nii süsinikku lamineerimise etapid kui ka järgnev termotöötluse tsükkel. Samuti kirjeldati lamineeritud velgede järeltöötlust, millega muudeti detailid kasutuskõlblikuks võistlusolukorras.

Ajapuuduse tõttu jäeti ära LEM tugevusanalüüside võrdlus päriseluga. Selle asemel valideeriti velgede vastupidavus rehvimontaaži katsetamise ja testisõitudega ringrajal. Velgede suutlikkust tõestati ka viiest võistlusest koosneva võistlushooaja läbimisega. Hooaja järgsel detailide uurimisel, süsinikku omaduste muutumist ei täheldatud, ning velgede projekteerimise ja tootmise projekt loeti õnnestunuks.

Samuti toodi töös välja projekti majanduslik külg, kus kirjeldati velgede tootmiseks kulunud materjalide kogust ja maksumust. Samuti võrreldi kulusid varasema lahenduse maksumusega ning loeti selle põhjal projekt õnnestunuks.

SUMMARY

The purpose of this master's thesis was to design and manufacture carbon fiber wheels for Formula Student Team Tallinn's 2019 season formula car FEST19.

All stages of wheel designing process, from analysis of previous solutions to using the finished product in a real life situation were addressed in this thesis. By analysing previous solutions, base parameters and negative properties (in need of improvement) were determined and taken into account. The user experience of previous solutions and the strength analysis of the preceding design were also taken into account.

Before the design process began, inspiration and experiences were gathered from Formula Student Team Tallinn's and competitors previous solutions. Several tests were carried out to determine teams capabilities to produce the designed detail. With acquired information the design process was started. The wheel design was determined to obtain the most optimal geometry whilst following formula cars kinematics and tire producer's requirements. Furthermore, the finished product had to have a commercial appearance whilst also being safe for end user.

Based on the designed CAD model a FEM analysis assembly was constructed. The assembly was used to carry out strength analysis using conditions and forces that imitate real life situations. Forces used in strength analysis were obtained from the kinematics calculation module, which was adjusted for the 2019 season formula car by Jaagup Laaser. In correlation with strength analysis results the geometry and composite laminate of the wheel were changed until the most optimal design was obtained.

After the most optimal geometry and laminate were obtained, the focus was shifted to the designing of necessary moulds. Firstly, two mould sides were modelled after the original CAD model. Then, thermal analysis was carried out (using the real life heat treatment cycle parameters) to determine the expansion of mould sides during the heat treatment cycle. Final mould sides were then modelled (considering the mould expansion) which were then milled out of blank by Skarcon Machining OÜ. Finished moulds were prepared for the lamination process by the author of this thesis.

Subsequently, the manufacturing process of the carbon fiber wheels was described. Specifically, the lamination of carbon fiber and the following heat treatment cycle were brought out. Also, the post-processing of heat treated wheels was described. The purpose of post-processing was to make the carbon fiber parts usable in prescribed conditions.

Due to lack of time, the comparison between FEM strength analysis and real life was abandoned. Instead, the durability of manufactured wheels was validated by trying tire mounting and test driving the formula car on a race track. The durability was also proven by competing in a full racing season, composed of five competitions. During the

after season inspection no signs of changes in carbon fiber mechanical properties were discovered which meant that the project was deemed successful.

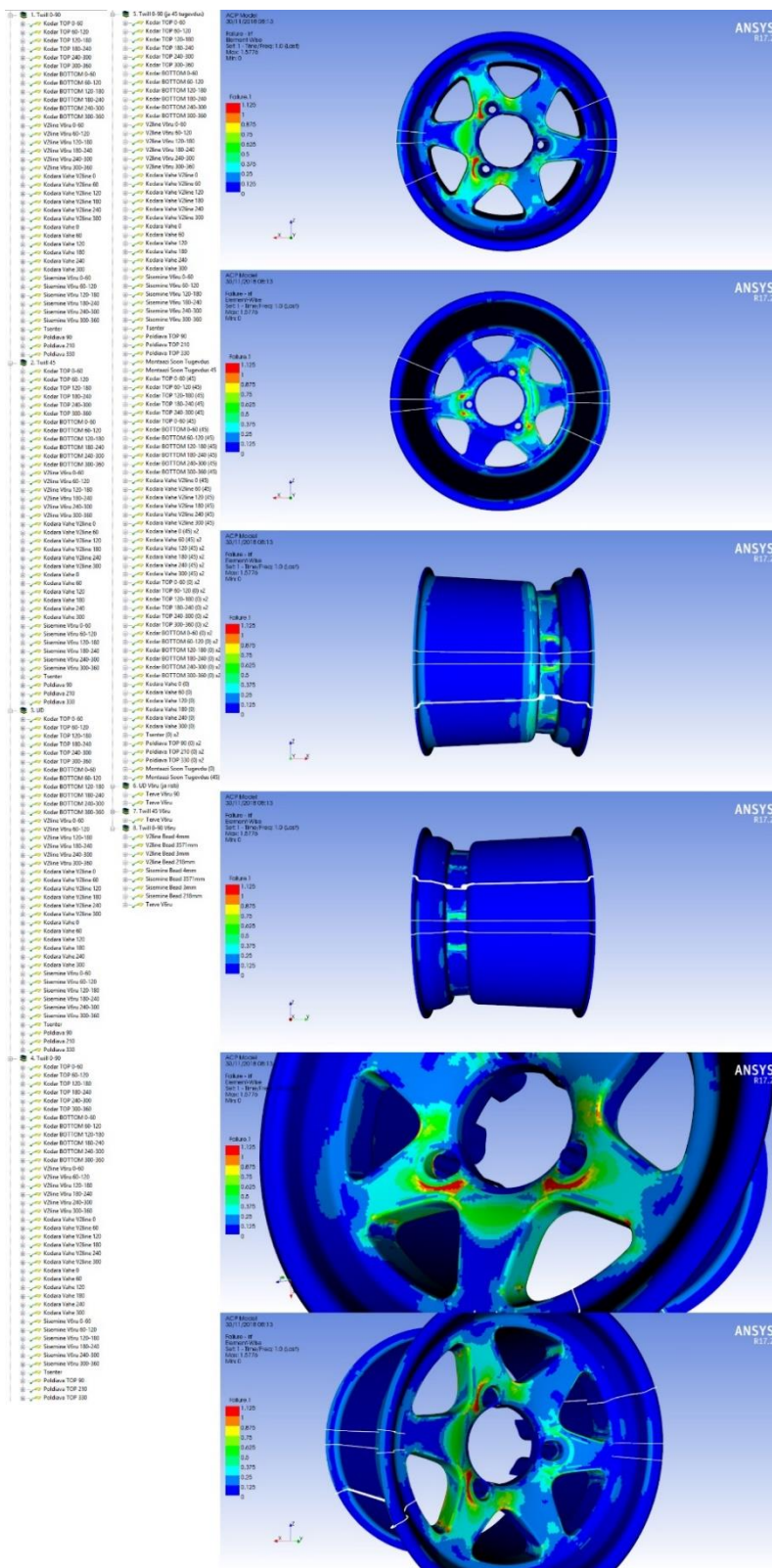
The financial aspect of the production was also brought out to describe the amount of used materials and their cost. The expenses of the project were also compared to the cost of previous solutions and based on the comparison the project was deemed successful.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] S. Nõmme, Formula Student klassi vormelauto FEST14 velgede projekteerimine, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2014.
- [2] „FS East 2018 Day 2,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.flickr.com/photos/fseast/41707760100/in/album-72157699247353995/>. [Kasutatud 04 05 2020].
- [3] „Bereich Automotive,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.carbonform.de/automotive.html>. [Kasutatud 24 10 2019].
- [4] „AMZ Racing,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.facebook.com/amzracing/photos/a.10150152867816107/10155984930911107/>. [Kasutatud 27 10 2019].
- [5] „3D Printing - Hollow Composites,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=kIxfUERrwIs>. [Kasutatud 08 05 2020].
- [6] „Bladder Molding by Rock West Composites,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=7MT1GKrjngU>. [Kasutatud 08 05 2020].
- [7] „Rohacell,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.rohacell.com/product/peek-industrial/downloads/rohacell%20ig-f_2020_january.pdf. [Kasutatud 08 05 2020].
- [8] „Hoosier Racing Tire,“ Hoosier, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.hoosiertire.com/news/article/64377/Circuit_Series_Tire_Specs. [Kasutatud 06 05 2020].
- [9] „Formula Student,“ OZ Racing, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.ozracing.com/cache/simpleimage/797-oz-formula-student-magnesium-cl-10-wheel-690x517.jpg>. [Kasutatud 13 01 2020].
- [10] „Tu Graz Racing Team,“ 25 4 2017. [Võrgumaterjal]. Available: <http://tiny.cc/enr7lz>. [Kasutatud 17 10 2019].
- [11] „Keizer wheels,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://keizerwheels.com/product_cat/formula-sae-racing-wheels/. [Kasutatud 07 05 2020].
- [12] „SmartBolts,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.smartbolts.com/insights/nut-factor-affect-torque/>. [Kasutatud 07 05 2020].
- [13] „Coefficients of Friction,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.engineersedge.com/coefficients_of_friction.htm. [Kasutatud 29 01 2020].
- [14] „6082 - T6~T651 Plate,“ [Võrgumaterjal]. Available: http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6~T651_148.ashx. [Kasutatud 23 01 2020].
- [15] „High Temperature Epoxy Tooling Board,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://system.eu2.netsuite.com/core/media/media.nl?id=405956&c=3937524&h=fc7b6cb86bb3cf675e84&_xt=.pdf. [Kasutatud 23 01 2020].
- [16] R. Läänemets, Artist, *FEST19 Testipäeval*. [Art]. 2019.
- [17] „Blackwave,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://blackwave.de/en/formula-student-carbon-rim/>. [Kasutatud 06 05 2020].

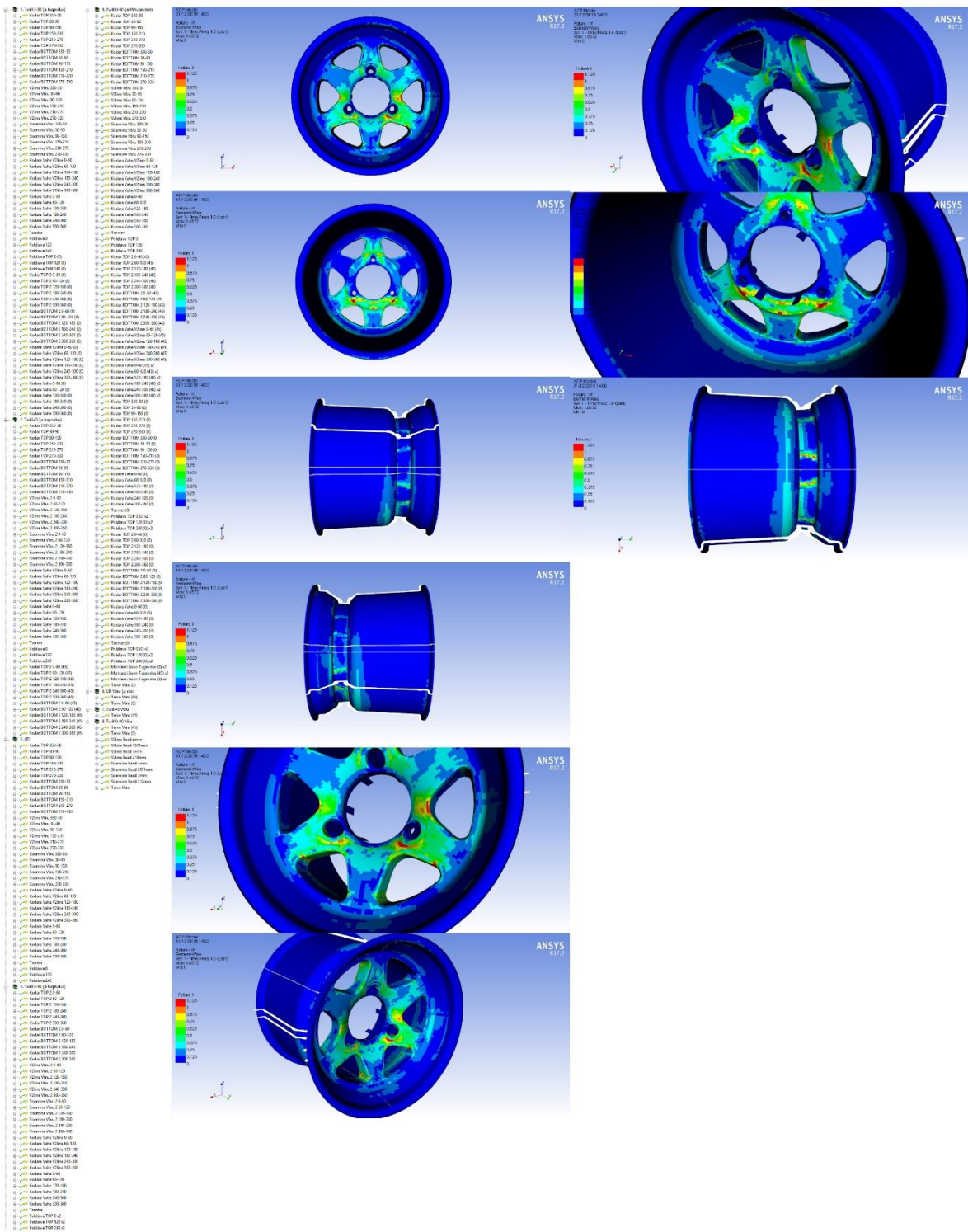
LISAD

Lisa 1 LEM-analüüsi tulemused (Tsai-Wu tegur) ja laminaat seisuga 30.11.2018¹



¹ Analüüs läbi viidud maksimaalsete jõudude olukorras.

Lisa 2 LEM-analüüsi tulemused (Tsai-Wu tegur) ja laminaat seisuga 31.12.2018¹



¹ Analüüs läbi viidud maksimaalsete jõudude olukorras.

Lisa 3 Laminaadi Exceli väljavõte

Kiht	Kangas	Nurk	Mass	Lamineeritud?	Jääk:
1	Kodar TOP 330-30	45	6.2	Jah	-20 g
1	Kodar TOP 30-90	45	7	Jah	Kaal kokku:
1	Kodar TOP 90-150	45	6.2	Jah	217.8 g
1	Kodar TOP 150-210	45	7	Jah	47
1	Kodar TOP 210-270	45	6.2	Jah	
1	Kodar TOP 270-330	45	7	Jah	
1	Kodar BOTTOM 300-60	45	5.5	Jah	
1	Kodar BOTTOM 60-180	45	5.5	Jah	
1	Kodar BOTTOM 180-300	45	5.4	Jah	
1	Tsenter Tugevdus BOTTOM	45		Ei	
1	Sisemine V6ru 330-30	45	11.3	Jah	
1	Sisemine V6ru 30-90	45	12.1	Jah	5mm ülekate
1	Sisemine V6ru 90-150	45	11.3	Jah	
1	Sisemine V6ru 150-210	45	11.8	Jah	
1	Sisemine V6ru 210-270	45	11.5	Jah	
1	Sisemine V6ru 270-330	45	12.2	Jah	
1	Poldiava 0 2	45	0.566667	Jah	
1	Poldiava 120 2	45	0.566667	Jah	
1	Poldiava 240 2	45	0.566667	Jah	
1	Tsenter Tugevdus R6ngas 2	0/90	3.3	Jah	
1	Kodara Vahe 0-60	45	3.033333	Jah	
1	Kodara Vahe 60-120	45	3.033333	Jah	
1	Kodara Vahe 120-180	45	3.033333	Jah	
1	Kodara Vahe 180-240	45	3.033333	Jah	
1	Kodara Vahe 240-300	45	3.033333	Jah	
1	Kodara Vahe 300-360	45	3.033333	Jah	
1	Kodar TOP 2 0-60	0/90	7.6	Jah	
1	Kodar TOP 2 60-120	0/90	7.6	Jah	
1	Kodar TOP 2 120-180	0/90	7.6	Jah	
1	Kodar TOP 2 180-240	0/90	7.6	Jah	
1	Kodar TOP 2 240-300	0/90	7.6	Jah	
1	Kodar TOP 2 300-360	0/90	7.6	Jah	
1	Kodar BOTTOM 2 0-120	45	5.6	Jah	muudetud
1	Kodar BOTTOM 2 120-240	45	5.6	Jah	ilma ülekatteta
1	Kodar BOTTOM 2 240-360	45	5.6	Jah	
1	Kodara Vahe 0-60 Tugevdus	0/90	2.366667	Jah	
1	Kodara Vahe 60-120 Tugevdus	0/90	2.366667	Jah	
1	Kodara Vahe 120-180 Tugevdus	0/90	2.366667	Jah	
1	Kodara Vahe 180-240 Tugevdus	0/90	2.366667	Jah	
1	Kodara Vahe 240-300 Tugevdus	0/90	2.366667	Jah	
1	Kodara Vahe 300-360 Tugevdus	0/90	2.366667	Jah	
1	Kodara Vahe 0-60 Tugevdus 2	0/90	1.483333	Jah	
1	Kodara Vahe 60-120 Tugevdus 2	0/90	1.483333	Jah	
1	Kodara Vahe 120-180 Tugevdus 2	0/90	1.483333	Jah	
1	Kodara Vahe 180-240 Tugevdus 2	0/90	1.483333	Jah	
1	Kodara Vahe 240-300 Tugevdus 2	0/90	1.483333	Jah	
1	Kodara Vahe 300-360 Tugevdus 2	0/90	1.483333	Jah	
1	Tsenter	45	2.9	Jah	

GRAAFILINE OSA