



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut

Tootmistehnikaõppetool

MET70LT

*Indrek Hioväin*

**FORMULA STUDENT VORMELAUTO AMORTISAATORI  
VEDRU PROJEKTEERIMINE JA ANALÜÜS**

Autor taotleb

tehnikateaduse magistri

akadeemilist kraadi

Tallinn

2015

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab magistritööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... eriala/õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

TTÜ masinaehituse instituut

Tootmistehnika õppetool

## **MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE**

2015. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Indrek Hiiväin, 132920 (nimi, üliõpilaskood)

Õppekava: MATM02/11 - Tootearendus ja tootmistehnika

Eriala: Tootmistehnika

Juhendaja: Teadur, Henrik Herranen (amet, nimi)

Konsultandid: (nimi, amet, telefon)

### **MAGISTRITÖÖ TEEMA:**

(eesti keeles) Formula Student vormelauto amortisaatori vedru projekteerimine ja analüüs

(inglise keeles) Design and analysis of damper spring for Formula Student racecar

**Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	<b>Diplomitöö struktuuri plaani koostamine</b>	<b>01.03.2015</b>
2.	<b>Prototüüpide valmistamine ja katsetamine</b>	<b>24.04.2015</b>
3.	<b>Diplomitöö põhiosa kirjutamine</b>	<b>20.05.2015</b>
4.	<b>Diplomitöö lõplik vormistamine ja köitmine</b>	<b>25.05.2015</b>

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Diplomitöö eesmärgiks on CAD tarkvara analüüsikeskkondi kasutades ning tehnilisi katsetusi teostades valmistada FS Team Tallinn elektrivormeli amortisaatorile reguleeritava jäikusega prototüüp vedruelement. Alternatiivne lahendus peab vastama Formula SAE 2015/2016 reeglitele, kaaluma vähem kui hetkel kasutuses olev terasvedru ning olema minimaalse maksumusega vastavalt sarja kuluaruandes kasutusel olevatele standarditele.

**Täiendavad märkused ja nõuded:** .....

**Töö keel: Eesti keel**

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 11.05.2015

**Töö esitamise tähtaeg** 25.05.2015

**Üliõpilane** Indrek Hiiväin /allkiri/ ..... kuupäev .....

**Juhendaja** Henrik Herranen /allkiri/ ..... kuupäev .....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

EESSÕNA.....	7
SISSEJUHATUS.....	8
1. TOOTEARENDEUSVÕISTLUS FORMULA STUDENT.....	11
2. TÖÖ EESMÄRK, PIIRAVAD ASJAOLUD JA TEHNILISED NÕUDED.....	13
2.1 Projekteerimist normeerivad Formula SAE reeglid.....	15
2.2 FEST15 vedrustuse kontseptsioon.....	16
3. ERINEVAD ELASTSED VEDRUELEMENID.....	19
3.1 Kummivedru.....	20
3.2 Belleville taldrikvedru.....	22
3.3 Rõngasvedru.....	23
3.4 Õhkvedru.....	24
4. VEDRUELEMENIDI JA MATERJALI VALIK.....	26
4.1 Belleville taldrikvedru materjal.....	28
4.2 Süsinikkomposiit laminaadi materjali omaduste testimine.....	29
4.3 Süsinikkomposiitmaterjali väsimus ja temperatuuritaluvus.....	33
5. VEDRUSEIBI GEOMEETRIA JA PROTOTÜÜPIDE VALMISTAMINE.....	36
5.1 Belleville vedruseibi analüüsimudel ja geomeetria valik.....	38
5.1.1 Parameetrilise arvutusmooduli kalkulatsioonide tulemus.....	42
5.2 Prototüüpdetaili valmistamine.....	46
5.2.1 Prototüüpvedrude testimine ja kvaliteet.....	51

6. BELLEVILLE TALDRIKVEDRU VORMI PROJEKTEERIMINE .....	55
6.1 Vedelikkuumutusega pressvorm .....	56
6.2 Elektrikuumutusega pressvorm .....	57
6.3 Ahikuumutusega moodulpressvorm.....	59
6.4 Sobiva vormikontseptsiooni valik .....	60
7. VÕISTLUSSARJA KULUARUANNE JA VEDRU TOOTMISKULUD.....	62
7.1 Formula Student kuluaruande näidis.....	63
7.1.1 Belleville taldrikvedru kuluaruande detailitabel .....	64
7.2 Reaalse tootmisomahinna arvutamine.....	65
KOKKUVÕTE.....	69
SUMMARY .....	73
KASUTATUD KIRJANDUS .....	77
LISAD .....	81
Lisa 1 Kaalu ümberjaotumise arvutusmoodul.....	81
Lisa 2 Materjali katsetuste arvutusvalemid ja standardid .....	82
Lisa 3 Materjali katsetuste tulemused .....	83
Lisa 4 Amortisaatori ja vedru koostejoonis.....	84
Lisa 4.1 CFRP Belleville taldrikvedru tööjoonis .....	85
Lisa 5 Prototüüpvormi koostejoonis .....	86
Lisa 5.1 Prototüüpvormi alumine pool.....	87
Lisa 5.2 Prototüüpvormi ülemine pool.....	88

Lisa 6 Taldrikvedru lõikerakise koostejoonis .....	89
Lisa 6.1 Lõikerakise tööjoonis 1 .....	90
Lisa 6.2 Lõikerakise tööjoonis 2 .....	91
Lisa 6.3 Lõikerakise tööjoonis 3 .....	92
Lisa 6.4 Lõikerakise tööjoonis 4 .....	93

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema on autori poolt valitud koostöös tudengivormeli meeskonnaga Formula Student Team Tallinn. Organisatsioon kannab äriregistris nime MTÜ Tudengi Vormel ning tegemist on kahe Eesti ülikooli, Tallinna Tehnikakõrgkooli ja Tallinna Tehnikaülikooli, ühisprojektiga aastast 2006.

Lõputöö teema käsitus on meeskonna arengu perspektiivis aktuaalne ning vajalik võistlussarja tippkonkurentsist püsimiseks. Lõputöö tugineb tudengiorganisatsiooni aastatepikkusele insenertehnilisele kogemusele ning meeskonna andmebaasist saadav informatsioon on käesoleva diplomitöö lahutamatuks osaks. Töö kirjutamisel tekkinud küsimustele aitasid lahendusi leida Formula Student Team Tallinn juhendaja, vedrustuse osakonna liikmed ja ülikoolide õppejõud.

Lõputöö autor avaldab suurt tänu Wisefab OÜ-le, kes abistas koostamisel lamineerimisvormide ning lõikerakiste tootmisega ja Prototuba OÜ-le kelle abiga freesiti valmis vedrutaldrikute testkehad.

## SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö teemaks on Formula Student Team Tallinna poolt ehitatava väikevormeli amortisaatori vedru projekteerimine ja analüüsimine. Antud teema valiti FS Team Tallinn meeskonna vedrustuse osakonna kapteni soovitusel. Vedrustuse valdkonnas ei ole meeskond viimase kolme hooaja jooksul teostanud märkimisväärset arendustööd, mis pälviks võistluste disaini kaitsmise kohtunikelt lisapunktide saamist uudse lahenduse implementeerimise eest vedrustuse kinemaatikasse. Alternatiivsete vedruelementide uurimine ning võimalus uudse ja kergema vedruelemendi lahenduse väljatöötamiseks oli töö autorile suureks väljakutseks.

Formula Student sarja raames projekteeritakse ning ehitatakse võistlussarjas osalevate ülikoolide poolt iga-aastaselt uus Formula Student vormelauto ning FS Team Tallinna jaoks on käesoleval hooajal ehitamisjärgus meeskonna ajaloo kaheksas võistlusauto, mis sel korral on neljarattaveoline elektrivormel. Vähem kui kolme aastaga jõudis FS Team Tallinn nelja edukaima elektrivormelit ehitava ülikooli hulka maailmas. Kuna kõik kiiremad meeskonnad kasutavad nelikvedu, siis nelja rummumootori kasutuselevõtt käesoleval hooajal oli meeskonna elektrivormeli konkurentsivõimekuse suurendamise seisukohast ainuke loogiline arengusamm. Ühe vormelauto projekteerimine kestab kuus kuud, millele järgneb kolmekuuline vormeli koostamine ning testperiood, mis kulmineerub meeskonna juhtkonna poolt valitud võistluseelarvesse mahtuvate võistlustega.

Käesoleva lõputöö tulemusena valmib alternatiivne vedru prototüüplahendus, mida testitakse peale lõputöö kaitsmist FS Team Tallinn võistlushooaja eelsel testperioodil. Uus vedru peab vastama võistluste kehtivatele reeglitele, võimaldama vormelauto vedrustuse seadistamist ning olema funktsionaalselt sarnaste parameetritega hetkel kasutusel olevate Cane Creek keerdvedrudega. Vedru testimise eesmärgiks on saada tagasisidet uue lahenduse funktsionaalsuse ning töökindluse kohta, et langetada otsus alternatiivse vedrulahenduse implementeerimise võimalikkusest ning seeläbi täiendava arendustöö teostamise vajadusest 2016. aasta hooajal ehitatava vormelauto Formula Estonia 16 tarbeks.

Formula Student on eelkõige autotehnika ja masinaehituse eriala üliõpilastele suunatud rahvusvaheline tootearendusvõistlus, mis kujutab endast väikese üheistmelise vormelauto projekteerimist, ehitamist ja sellega erinevate katsete läbimist ning võidusõitmist lühikesel ning tehniliselt keerukal ringrajal.



Projektis osalemine kinnistab tudengi poolt ülikoolis omistatud teadmisi, võimaldab omandada kogemusi reaalse auto projekteerimises ja valmistamises ning loob ülevaate distsiplineeritud meeskonnatööst.

Võistluse idee pärineb Ameerika Ühendriikidest, kui sealsed ülikoolid alustasid aastal 1978 omavahelist mõõduvõtmist. Võistlus kandis tol ajal nime SAE Mini Indy. Tänapäevaks on Formula Student võistlus levinud üle kogu maailma – programmist võtab osa üle 500 meeskonna erinevatest maailma ülikoolidest. Suuremad võistlused leiavad aset Ameerika Ühendriikides, Inglismaal, Saksamaal, Austrias, Ungaris, Itaalias, Hispaanias, Brasiilias ja Jaapanis.

Eestis hakkas Formula Student'i idee levima 2005. aastal, kui Tallinna Tehnikaülikooli autotehnika üliõpilane Sten Soomlais tutvustas Formula Student'i olemust Mootorisporti Tehnikaseminaril Tallinna Tehnikakõrgkoolis. Ligikaudu 18 kuud hiljem, 2006. aasta sügisel, jõuti Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli ühismeeskonna loomiseni. Tudengitest koosnev rühmitus hakkas kandma nime TTÜ/TTK Formula Student Team. Esimeseks kapteniks määrati Tallinna Tehnikakõrgkooli üliõpilane Ruben Lend, kelle ülesandeks oli koordineerida liikmete tegevust. Ülikoolide poolt said TTÜ/TTK Formula Student Team'i juhendajateks õppejõud Janek Luppin ja Risto Kõiv.

Peagi 10. tegevusaastapäeva tähistav FS Team Tallinn on võrreldes algusaastatega teinud tudengivormelite maailmas läbi murrangulise arengu. Aastaks 2013 jõuti vormelautoga Formula Estonia 12 võistlusklassis I, mis kasutab jõuallikaks sise põlemismootorit, rohkem kui 500 ülikooli hulgas viie parima ülikooli hulka. Hetkel hoiab FS Team Tallinn maailma elektrivormelite edetabelis väarikat neljandat kohta.

Lõputöö raames valmiva vedru prototüübi projekteerimist piiravad FS Team Tallinn poolt esitatud nõuded ning Formula SAE reeglid, mis reglementeerivad rangelt sõitjate ohutust puudutavaid valdkondi ning määravad vormelauto mõõtmed ja erinevate sõlmede tehnilised tingimused. Vedrustuse elemendid ei ole reeglitega määratud, kuid üksikud nõuded, mis määravad vormeli vedrustuse käigu, mõjutavad projekteeritava vedru kontseptsiooni.

Lõputöö põhiosas antakse lühiülevaade Formula Student võistlusformaadist, mis aitab mõista meeskonna pidevat arendustöö vajadust. Teises peatükis kirjeldatakse töö eesmärki ja loetletakse ülesse FS Team Tallinna poolt esitatud nõuded, mis võetakse aluseks uue vedruelemendi projekteerimiseks ning kirjeldatakse uusima vormelauto vedrustuse

kontseptsiooni. Uus vedruelement peab kohanduma antud disainiga ja sellest lähtuvalt on töö kolmandas peatükis kirjeldatud nelja võimalikku vedru lahendust ning tehakse põhjendatud valik arendatavale vedrulahendusele. Järgmises peatükis antakse ülevaade lõputöös kasutatavatest toormaterjalidest ning teostatakse põhjalik testimine materjali mehaaniliste omaduste väljaselgitamiseks, mis on sisendinfo vedruelemendi analüüsikeskkonna materjali omaduste defineerimiseks.

Edasi luuakse sobiva vedruelemendi geomeetria valiku tegemiseks parameetiline arvutusmoodul, mille tulemusena toodetakse valitud geomeetriast prototüüpvormi abil vedruelementide testkehad. Viienda peatüki alapeatükkides kirjeldatakse testkehade valmistamisel kasutatud erinevaid tootmistehnoloogiaid ning hinnatakse mikroskoopuuringute abil nende meetodite kvaliteeti. Kuuendas peatükis antakse ülevaade võimalikest vedrude tootmiseks sobivatest vormidest ning teostatakse majanduslikult otstarbekaima vormi valik. Viimases peatükis arvutatakse ühe vedru hind Formula Student kuluaruande tabelite põhjal ning võrreldakse saadud tulemust reaalse tootmisomahinna kalkulatsiooni tulemusega. Lõputöö lõppeb töö sisuosa illustreerivate lisadega ning projekteeritud vedru, prototüüp lamineerimisvormi ja lõikerakise joonistega.

# 1. TOOTEARENDESVÕISTLUS FORMULA STUDENT

Formula Student võistluse formaat jaguneb kahte osasse: staatilised kaitsmised ja dünaamilised sõidukatsed. Kaitsmiste osa moodustavad kolm osaülesannet:

- 1) äriplaani esitlus (*business presentation*),
- 2) kulu – ja loodussäästlikkuse aruanne (*cost report and sustainability*),
- 3) disaini aruanne (*design report*). [1]

Äriplaani kaitsmisel kehastuvad kohtunikud väljamõeldud tootmisettevõtte juhtivisikuteks, kes on tudengite äriplaani potentsiaalseteks investoriteks. Üliõpilaste ülesandeks on kümne minuti jooksul oma äriidee sisu kohtunikele selgeks teha ja atraktiivseks muuta. Kulu – ja loodussäästlikkuse aruanne peab sisaldama vormelautol olevate ostutoodete ja omavalmistatud detailide hindasid. Meeskondadevahelise võrdsuse huvides on võistluse korraldajate poolt loodud Microsoft Exceli moodul, kus valemite abil on määratud materjalide, töövõtete ning standardtoodete hinnad 1000 valmistatava vormeli kohta. [1][2]

Kõige olulisem staatiline kaitsmine on disaini aruanne. Vormelauto detaillahendusi tuleb kaitsta kogunud kohtunikežüriidele, millede koosseisu kuuluvad tiptasemel insenerid mootorispori maailmast. Limiteeritud aja jooksul tuleb kohtunikegruppide küsimustele anda õiged vastused ja parima meeskond saab lõpptulemusele juurde 150 punkti. [1]

Vormeli dünaamilist võimekust hinnatakse neljas sõidukatses:

- 1) külgkiirenduskatse kaheksa-kujulisel rajal (*skid-pad*),
- 2) kiirendus (*acceleration*),
- 3) kvalifikatsioon (*autocross*),
- 4) kestvussõit (*endurance*). [1]

Kõik neli osavõistlust toimuvad asfalt- või betoonkattega, koonustega markeeritud alal. Esimene sõidukatse toimub kaheksa-kujulisel rajal. Rada ennast ei läbita kaheksa kujuliselt, vaid mõlemad ringikujulised osad eraldi – ühel poolel kaks tiiru päripäeva ning teisel poolel kaks tiiru vastupäeva. Tulemuseks loetakse mõlemat pidi sõidetud ringide parimate aegade aritmeetiline keskmine. *Skid-pad*'i eesmärgiks on hinnata vormeli kurvisuutlikkust. [1]

*Acceleration* ehk kiirendus on mõeldud vormeli kiirendusomaduste ning rehvide ja vedrustuse kinemaatika omavahelise koostöö hindamiseks. Kiirenduskatsel läbitakse paigaltstardist 75 meetri pikkune sirge lõik ning võitjaks loetakse meeskond, kes läbib selle lühima aja jooksul. Igal meeskonnal on parima soorituse tegemiseks neli võimalust – mõlemal juhul kaks. [1]

Kvalifikatsioonisõit ehk *autocross* on dünaamiliste alade kolmas osavõistlus. Autocross kujutab endast kitsast ja tehnilist rada millesse on kombineeritud kiirendamine, pidurdamine ja kurvides sõitmine. Kvalifikatsiooni pööratud järjekorras starditakse kestvussõitu. [1]

Üheks tähtsaimaks dünaamiliseks sõiduks on 22 km pikkune kestvussõit ehk *endurance*. Kestvussõiduga hinnatakse meeskonna vormelauto üldist võimekust ning vastupidavust. Poole distantsi peal vahetub juht, mille peab sooritama kolme minuti jooksul. Meeskonnal puudub õigus selle käigus võistlusauto juures midagi vahetada või muuta – välja arvatud juhi isteaasendit puudutavad detailid. [1]

Formula Student võistluse võitja selgub osavõistluste punktide kokkuliitmise teel, mille protseduur on määratud Formula Student reeglitega Kokku on ühelt Formula Student võistluselt võimalik koguda maksimaalselt 1000 punkti (vt tabelit 1).

Tabel 1.1. Formula Student võistluse punktitable [3]

<b>Staatilised kaitsmised</b>		
1	Äriplaani esitus ( <i>Business Presentation</i> )	75
2	Kulu- ja loodussäästlikkuse aruanne ( <i>Cost report and sustainability</i> )	100
3	Disaini aruanne ( <i>Design report</i> )	150
<b>Dünaamilised sõidukatsed</b>		
1	Külgiirenduskatse ( <i>Skid Pad</i> )	50
2	Kiirendus ( <i>Acceleration</i> )	75
3	Kvalifikatsioon ( <i>Autocross</i> )	150
4	Kestvussõit ( <i>Endurance</i> )	300
5	Ökonoomsus ( <i>Fuel efficiency</i> )	100
<b>Kokku:</b>		<b>1000</b>

## 2. TÖÖ EESMÄRK, PIIRAVAD ASJAOLUD JA TEHNILISED NÕUDED

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on leida lahendus reguleeritava jäikusega vedruelementide kasutuselevõtuks tulevastele vormelautodele, asendamaks seniseid FS Team Tallinn poolt kasutusel olevaid terasest silindrilisi surve-keerdvedrusid. Vajadus selleks tuleneb asjaolust, et hetkel on meeskonnal võimalik ostutoodetena soetada keerdvedrusid, mille jäikusvahemikud kasvavad 10 N/mm kaupa. Väiksem vedrude jäikuse reguleerimise vahemik on vajalik elektrivormeli dünaamika põhjalikumaks testimiseks, saavutamaks vajalikku kaalu ümberjaotumise suhet esi- ja tagateljel vastavalt sõidualale ning juhi eelistustele.

Vormelil kasutatavate vedrude jäikuse reguleerimise võimaldamise vajadust aitab seletada vormeli kaalu ümberjaotumise arvutusmoodul (vt Lisa 1), mis loodi tudengivormeli meeskonna poolt vormelauto Formula Estonia 08 (edaspidi FEST) projekteerimisel, et kindlaks määrata juhitavuse seisukohast vajalikud vedrustuselementide jäikuste muudetavuse vahemikud. Arvutusmooduli põhifunktsiooniks on välja kalkuleerida vormeli esisilla kaalu ümberjaotumise suhe sõiduki kogu kaalu ümberjaotumisse, mis kirjeldab auto teoreetilist juhitavuse tendentsi. Kui kaalu ümberjaotumise suhe esisillal on kogu auto kaalujaotusest suurem, siis tõenäoliselt on vormel alajuhitavusele kalduv ning vastupidise suhte korral ülejuhitavusele kalduv. [4]

Arvutuse teostamiseks on vajalik moodulisse sisestada vedrustuse põhimõõtmed, rehvimõõdud ning programmiga SusProg projekteeritud vedrustuse ülekandetegurid. Seejärel sisestatakse vormelauto eeldatavad esi- ja tagatelje nurgakaalud, mis moodustuvad vedrustatud ja vedrustamata masside osamasside summana. Andmete sisestamise lõpptulemusena on arvutusmooduli abiga võimalik leida vormelauto nurkade vedrustamata massid ning rehvi koormatud raadiused. Lõpliku vedrustusseade määramiseks tuleb algandmetena sisestada esialgsed vedrude jäikused ja siinkohal on meeskonnal vajadus vedrude jäikusi muuta, et saavutada sobiv külgekaldumisjäikus, mis on vajalik meeskonna vedrustuse osakonna poolt nõutud kaalu ümberjaotumise suhte ja vormeli juhitavusomaduste tagamiseks. Üldjoontes arvestatakse võistlusauto projekteerimisel vedrustuse elastsed elemendid välja selliselt, et kaalu ümberjaotumise suhe oleks 5% suurem kaalujaotuse esisilla protsendist [4].

Leidmaks meeskonnale sobivaimat varianti muudetava jäikusega vedruelemendi projekteerimiseks, tuleb töö autoril lähtuda praeguse vedrustuse komponentide parameetritest

(vt Tabel 2.1), meeskonna poolt esitatavatest nõuetest ning Formula Student tootearendusvõistluse reeglitest. Siinkohal tuleb silmas pidada ka võistluste teoreetiliste kaitsmiste disaini presentatsiooni, kus vedrustuselemendi alternatiivlahenduse uudsus ning praktilisus tuleb kohtunikele atraktiivseks muuta. Meeskonna vedrustuse osakonna poolt esitatavad nõuded reguleeritava jäikusega vedrule on järgmised:

- Vedruelement peab sobima hetkel kasutatavale amortisaatorile (vt Sele 2.1)
- Vedruelemendi jäikust peab saama reguleerida 3-5 N/mm kaupa
- Vedruelement peab tagama vedrustuse käigu 50.8 mm
- Vedruelement peab olema lineaarse ülekandeteguriga
- Uus vedruelement peab olema kergem, kui hetkel kasutusel olev keerddvedru
- Vedruelemendi maksumus kuluaruandes ei tohi ületada \$100 piiri.
- Vedruelemendid peavad olema valmistatavad kasutades FS Team Tallinnale kättesaadavaid lõiketöötlusmasinaid ja tehnilisi võimalusi
- Vedruelement peab töö koostamise hetkel vastama Formula SAE 2015 reeglitele.



Sele 2.1 Kaz Technologies amortisaator (vasakul) ja Cane Creek keerddvedru (paremal) [5][6]

Tabel 2.1 Cane Creek 3.00" vedru parameetrid ja uue vedruelemendi tehnilised nõuded [6][7]

	Cane Creek 3.00" FEST14	Nõuded uuele vedruelemendile
<b>Kõrgus (mm)</b>	114	120 ( <i>max</i> )
<b>Välisdiameeter (mm)</b>	esiamortisaator 48	64 ( <i>max</i> )
	tagaamortisaator 50	64 ( <i>max</i> )
<b>Sisediameeter (mm)</b>	esiamortisaator 34,5	34
	tagaamortisaator 36,5	34
<b>Vedru jäikus (N/mm)</b>	esiamortisaator 70	65-85 (3 N/mm sammuga)
	tagaamortisaator 78,75	65-85 (3 N/mm sammuga)
<b>Vedru mass (g)</b>	232	180 ( <i>max</i> )
<b>Hind (€)</b>	33	Sõltuvalt lahendusest minimaalne

## 2.1 Projekteerimist normeerivad Formula SAE reeglid

Nii nagu eelnevalt öeldud, peab alternatiivlahendus terasest keerdvedrule vastama Formula SAE (ingl. k *Society of Automotive Engineering*) 2015. aasta reeglitele. Formula Student tootearendusvõistluse formaadi üheks väljundiks on tudengite ideede praktiline rakendamine võistlusautol ning nende presenteerimine kaasvõistlejatele ning võistluste kohtunikele. Ligi 180 leheküljeline võistlusreeglistik piirab meeskondade loometegevust minimaalselt. Põhjalikumalt on kirja pandud võidusõitjate ohutust puudutavad reeglid, mida on vaja rangelt jälgida.

Käesoleva lõputöö teema raames teostatavat uurimust Formula SAE reeglid väga rangelt ei piira. Sellest hoolimata ei ole Formula Student meeskonnad antud valdkonnas senise võistlusajaloo jooksul midagi väga innovaatilist loonud ning võistlusauto konkurentsivõimeliste dünaamiliste sõiduomaduste realiseerimiseks kasutatakse reeglina ostutooteid teras või – titaanvedrude näol. Antud lõputöö teema käsitlemisel tuleb arvestada järgnevate Formula SAE reeglitega:

### Reegel T 1.2.2 f

Vedrustuse reguleerimine on lubatud osadel, mis ei vaja vahetamist (välja arvatud vedrud, stabilisaatorvardad ja reguleerimise seibid) [1]

### **Reegel T 1.2.3**

Vormel peab säilitama kogu võistluse ajal kõik nõutud spetsifikatsioonid nagu näiteks sõidukõrguse, vedrustuse käigu, piisava piduriklotside hõõrdkatte paksuse pidurdamiseks, müra taseme ning aerodünaamika elementide asukoha. [1]

### **Reegel T6.1.1**

Vormel peab olema ehitatud amortisaatoritega vedrustuse süsteemile (nii ees kui taga), mis peab tagama vähemalt 50,8 millimeetrise (2 tollise) vedrustuse käigu – 25,4 mm (1 toll) kokkuvetrumisel ja 25,4 mm (1 toll) tagasivetrumisel ja seda koos autos istuva juhiga. (Mõõdetakse rehvi ja teekatte vahelist kontaktpinna vertikaalsuunalist liikumist vormelauto staatilises olekus). Võistluste kohtunikel on õigus mittetoimiva vedrustusega või ebaloomuliku juhitavusega vormelautod võistluselt diskvalifitseerida. [1]

## **2.2 FEST15 vedrustuse kontseptsioon**

Lisaks eelmises peatükis nimetatud reeglitele, mis piiravad Formula Student võistlusklassi vormelauto vedrustuse kinemaatika projekteerimist, leidub Formula SAE reeglites hulganisti teisi kitsendusi, mis avaldavad kaudset mõju antud võistlusklassi vormelauto vedrustuse kinemaatika disainimisele. Üks printsiipiaalsemaid reegleid Formula Student võistlussarjas kõlab järgmiselt: “Vormelauto peab olema neljarattaline ühekohalise lahtise juhiruumi ning katmata ratastega sõiduk, mille rattad ei asetse ühel joonel.” [1] Sellega on suuresti ära määratud vedrustuse tüüplahendused, millest tulenevalt on vaja kasutada vormelautol amortisaatoreid ja vedrusid.

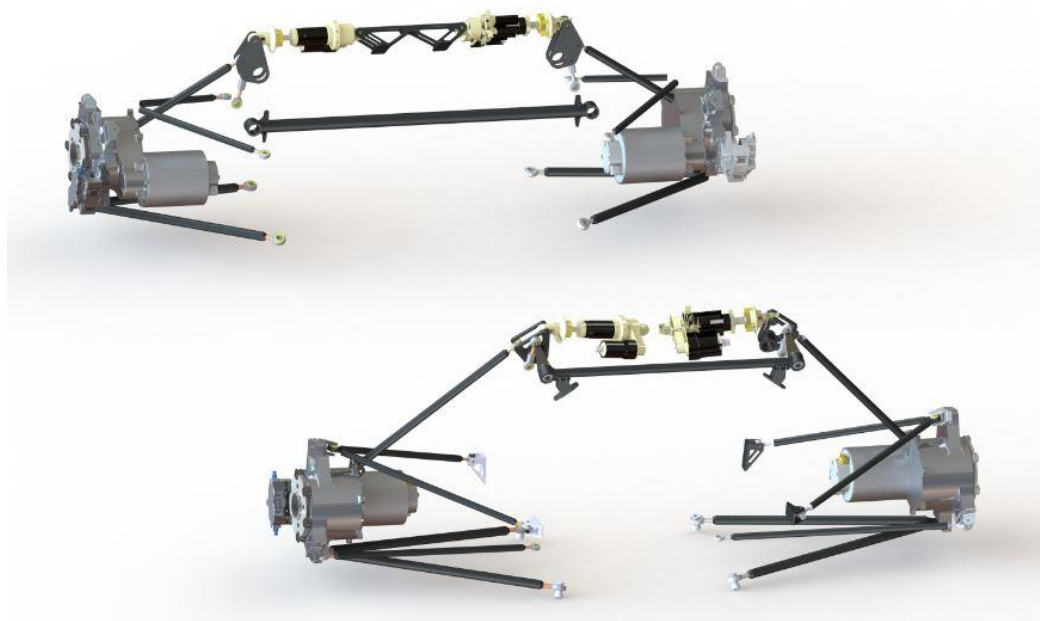
Vormeli vedrustuse väljatöötamisele avaldavad veel mõju toruraami või süsinikmonokoki struktuuri elemente puudutavad ettekirjutused, nõuded pidurisüsteemile ja ka jõuülekannet puudutavad piirangud. Viimasena nimetatud valdkonna juures väärib äramärkimist asjaolu, et viimase nelja aasta jooksul toimunud arengud võistlussarja elektrivormelite klassis on muutnud populaarseks neljarattaveolised võistlusautod. Sama otsuse võttis käesoleval Formula Student võistlushooajal vastu ka FS Team Tallinn, kes ehitab meeskonna ajaloos oma esimest nelikveolist rummumootoriga elektrivormelit FEST15. Uue elektrivormeli süsinikkomposiit monokokile ehitatud virtuaalne koostumudel on nähtav Sele 2.2.





Sele 2.2 FEST15 virtuaalne mudel programmis CATIA V5R21 [8]

Eelpool nimetatud aspekte arvesse võttes ei ole võistlussarjas osalevatel ülikoolidel vedrustuse ja veermiku kontseptsiooni valikul väga palju väljavaateid ning nii nagu vormel-1 tüüpi lahtise kokpitiga ühekohalisele võistlusautodele kohane, projekteeritakse tudengivormelite esi- ja tagavedrustus sõltumatut topelt õõtshoobadega kinemaatikat kasutades (vt Sele 2.3).



Sele 2.3 Topelt õõtshoobadega ja tõukurvarrastega FEST15 vedrustuse kinemaatika [8]

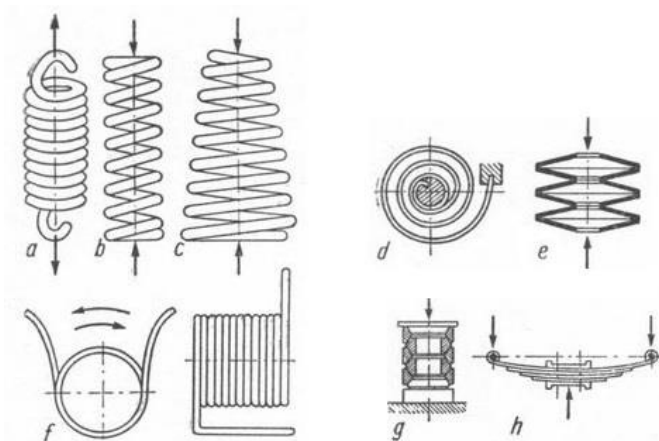
Vedrustavate elementide ühendamiseks ratastega on siinkohal erinevaid variante. Ühekohaliste võidusõiduautode puhul on enamlevinud tõukurvarrastega ning tõmbevarrastega skeemid. Tavapäraselt on sel juhul ülemise või alumise õõtshoova (või käändmiku) külge ühendatud tõmbe- või tõukurvarras. Ratta liikumine kantakse sel juhul varda poolt läbi nookurite vedrustava elemendini [4]. Nookuritega vedrustuse plussideks on:

- 1) Parem võimalus saavutada soovitud ülekandetegurit
- 2) Tulenevalt ehitusest ei pea õõtshoovad olema massiivsed (kaalusääst)
- 3) Head võimalused leida vedrustavatele elementidele sobiv asukoht, paigutuse lihtsus
- 4) Stabilisaatorvarda ühendamise lihtsus [4]

Eelpool toodud plussidest lähtuvalt loetakse Formula Student tüüpi sõidukile sobivaimaks just tõmbe- või tõukurvarrastega vedrustuse kinemaatikat. Kaalusääst on Formula Student võistlusauto projekteerimisel üheks võtmesõnaks ja kuna võistluste reeglitega ei ole vormelauto miinimum ega maksimumkaal määratud, siis sellest tulenevalt on meeskondade põhieesmärgiks ehitada võimalikult kerge võistlusauto. Tõmbe- või tõukurvarrastega vedrustuse kinemaatika projekteerimisel on ülikoolide tudengivormeli meeskondadel elastsete vedrustuse elementide valik piiratud - antud lõputöö puhul just elastse vedru valik. [4]

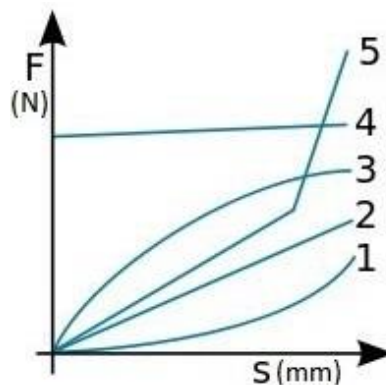
### 3. ERINEVAD ELASTSED VEDRUELEMENID

Käesolev peatükk annab ülevaate potentsiaalsetest vedrude kontseptsioonidest, mis vastavad FS Team Tallinn poolt esitatud nõuetele. Vedrud liigitatakse oma kuju järgi silinder-, koonus- ja kujuvedrudeks ning spiraal ehk keerdvedrudeks. Keerdvedrude hulka loetakse ka suuri jõude taluvaid taldrik- ja rõngasvedrusid. Laialdaselt on kasutuses lame- ehk lehtvedrud. Sõidumugavusele suunatud lahendustena kasutatakse pneumaatilisi-, hüdropneumaatilisi- ja kummivedrusid. [9] Levinumate vedrude geomeetriad on nähtav Sele 3.1.



Sele 3.1 a) tõmbe-, b) silindriline surve-, c) koonus-, d) spiraal-, e) taldrik-, f) väände-, g) rõngas- ja h) lehtvedru [9]

Vedru on elastne element, mille ülesandeks on neelata, salvestada ja vabastada mehaanilist energiat [10]. Vedrusid ja nende jäikust iseloomustatakse graafikute abil, mis sõltuvalt vedru materjalist, geomeetriast ja tööpõhimõttest on vedrudel erinevad. Vedru jäikust iseloomustab vedrule rakendatava jõu ja vedru deformatsiooni suhe. [9][10] Erinevate vedrude jäikuskarakteristikud on näidatud Sele 3.2.



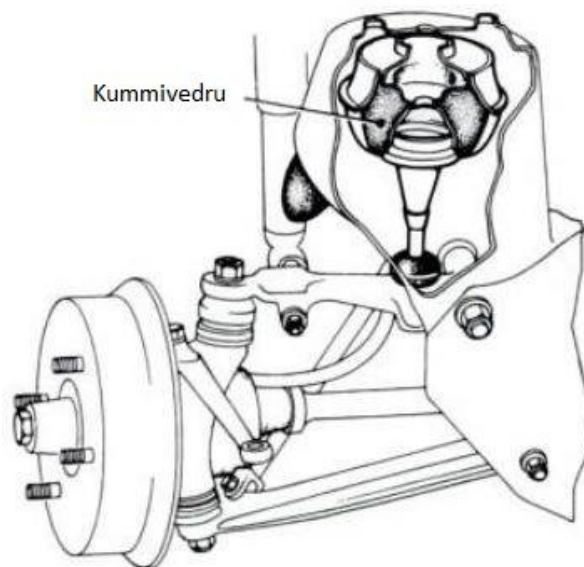
Sele 3.2 Jäikuskarakteristikud: 1) progressiivne, 2) lineaarne, 3) vähenev, 4) konstantne, 5) astmear progressiivne [10]

Eelpool nimetatud vedrudest ei sobi kõik vedrud oma geomeetria ja jäikuskarakteristiku tõttu elektrivormeli muudetava jäikusega alternatiivvedrude valimisse. Sellest tulenevalt antakse põhjalikum ülevaade neljast potentsiaalselt sobivast elastsest elemendist, mis on koormusskeemilt mõeldud töötama aksiaalsuunaliselt surveolukorrale. Nendeks on:

- 1) kummivedru,
- 2) Belleville taldrikvedru,
- 3) rõngasvedru,
- 4) õhkvedru.

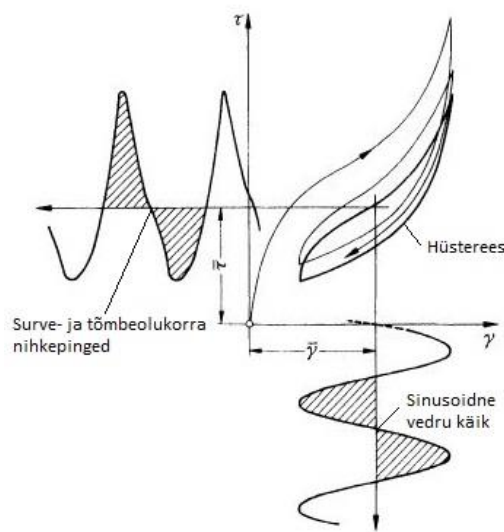
### 3.1 Kummivedru

Kummivedru on masinaelement, mille suur elastsus on määratud vedru elastomeeri elastsusega, vedru kujuga ning vedru ühendusviisist konstruktsiooniga. Kumm suudab materjali massiühiku kohta salvestada rohkem energiat kui ükski teine vedru materjal, mistõttu on kummivedruga võimalik vedrustuse konstruktsioonis saavutada kaalusäästu. [11][12] Kummivedrude jäikus on progresseeruva iseloomuga, mis tähendab, et vedru kokkusurumisel selle jäikus suureneb. Kummivedru vabastamisel koormuse alt väljastab vedruelement märkimisväärselt väiksemal hulgal energiat, kui kokkusurumisel ja seda vedrusisest energia kadu nimetatakse hüstereesiks. [13] Näide kummivedrust mootorsõiduki vedrustuses on näidatud Sele 3.3.



Sele 3.3 Kummivedru kasutamine mootorsõiduki vedrustuses [12]

Dünaamiliste koormuste all käitub kummivedru esimese paarisaja tuhande tsükli ajal jäigemalt. Seejärel materjal pehmeneb ning vedru jäikuskarakteristikud ja sellega koos vedrustuse geomeetria muutuvad. Tulenevalt erinevate elastomeeride füüsikalistest omadustest tuleb kummist vedruelemendi projekteerimisel tähelepanu pöörata vedru staatilise ja dünaamilise jäikuse erinevusele. Dünaamilisel koormusel suureneb vastavalt materjali Shore A kõvadusele dünaamiline tegur  $k_d$ , mis tuleb korrutada kummivedru staatilise jäikusega, saamaks kummivedru dünaamilise jäikuse väärtust [11]. Dünaamilise jäikuse hüsterees võrdluses vedru esimeste – ja lõpptsüklitega ning kummivedru nihkepingsed vedru sinusoidsel koormamisel vastavalt standardile ISO 2856-1975 on näidatud Sele 3.4. [11][14]

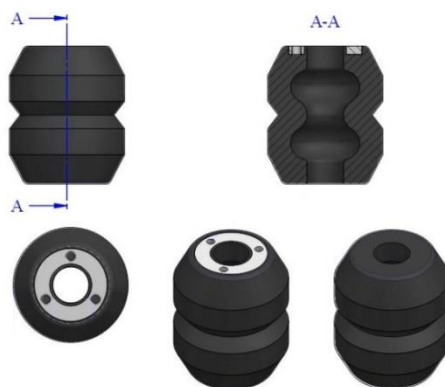


Sele 3.4 Hüsteresi tsüklid sinusoidselt koormatud kummivedrul [11]

Kummivedrusid kui ühendusülisid projekteeritakse konstruktsioonidesse kolmel viisil:

- 1) Konstruktsiooni ühendusviisile vajalikus vabalt valitud geomeetrias
- 2) kompaktsete silindriliste elementidena
- 3) kombineeritud kujul kahest esimesest variandist. [11]

Kummivedrusid toodetakse tavaliselt niiõelda teras-kummi vedrudena, kus kummielemendi vulkaniseerimisel liidetakse tulevase vedru kontaktpindadele metallist tugipinnad, tagamaks võimalikult head koormuste edasikandumist vedru elastsele osale või ühelt elemendilt teisele. Taolise põhimõttega standardvedrusid (vt Sele 3.5) masstoodetakse paljude ettevõtete poolt ning on koos jäikus- ja tugevusväärtustega kataloogides üles loetletud. [11][14]



Sele 3.5 Metallplaadiga kummivedru [15]

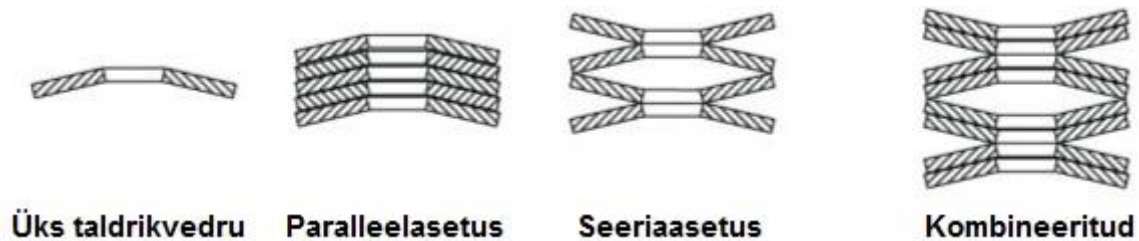
### 3.2 Belleville taldrikvedru

Taldrikvedru on koonilise kujuga seib või rõngas (vt Sele 3.6), mis on tuntud ka nime Belleville vedru all. Viimane tuleneb Belleville taldrikvedru leiutaja Julien F. Belleville nimest. Belleville taldrikvedrusid kasutatakse mehaanilistes konstruktsioonides elastsete vedruelementidena või eelpinge andmiseks painduvatele poldliidetele. Taldrikvedru omadustest väärivad äramainimist seibi hea ruumikasutus (modulaarsus), vähene kujumuutus ning suur koormustaluvus väikese vedru käigu korral. Belleville taldrikvedru valmistamiseks kasutatakse erinevaid vedru-, tööriista- ning roostevabu teraseid. Mootorisporidis kasutatakse süsinikkomposiitmaterjalist Belleville taldrikvedrusid. [11][16][17]



Sele 3.6 Belleville taldrikvedru [17]

Belleville taldrikvedru saab rakendada ühte seibi kasutades või mitut seibi üksteise otsa asetades, moodustades nii suurema kõrgusmõõtmega vedru. Taldrikvedrude üksteise otsa kontsentrist asetamist nimetatakse inglise keeles *stacking* (eesti k virnastamine). See omadus on Belleville taldrikvedrude kõige tugevamaks eeliseks võrreldes teiste vedru tüüpidega, kuna virnastatud vedru jäikusarakteristikut on nii võimalik peenhäälestada. Belleville taldrikvedrudel on neli moduleerimise konfiguratsiooni (vt Sele 3.7). [18]

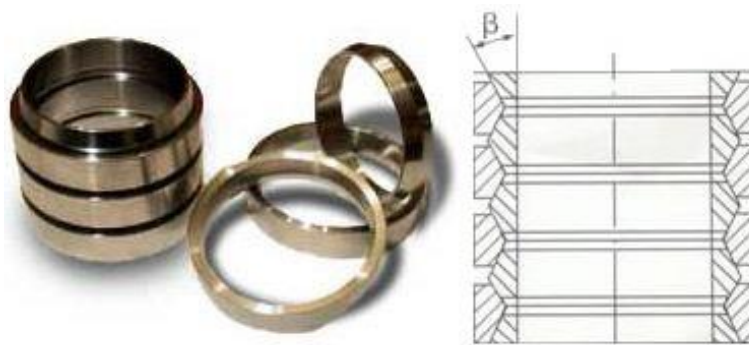


Sele 3.7 Belleville taldrikvedrude konfiguratsioonid [18]

Esimesel juhul on vedru jäikus ja läbipaine määratud taldrikvedru materjali mehaaniliste omadustega, koonilisusega, vedru paksusega ning ristlõike geomeetriaga. Paralleelasetuse korral on vedru kogu läbipaine võrdne üksiku elemendi läbipainumisega, kuid vedru jäikus suureneb üksteise otsa asetatud seibide arvu võrra. Paralleelasetuse korral esineb virnastatud vedruelemendis hüsterees ehk koormuse kadu, mis on tingitud taldrikvedrude hõõrdumisest. Paralleelasetuses ei ole soovitatav järjestada üle 4 taldrikvedru. Seeriaasetuses ei ole vedru läbipaine proportsionaalne vastastikku olevate seibide läbipainete summaga. Elementide kokkusurumisel vedru koonilise osa jõuõlg väheneb ning tekib vedrudevaheline kontaktpinna suurenemine, kui element on läbi paindunud rohkem kui 95%. Kombineeritud asetuse abil saab erineva paksusega taldrikvedrude abil vedru jäikuskarakteristikut muuta ja seetõttu on Belleville vedrud hakanud levima mootorisporadis – näiteks vormel-1 võistlussarjas. [16][18]

### 3.3 Rõngasvedru

Rõngasvedru (vt Sele 3.8) koosneb üksteise otsa vaheldumisi laotud sisemistest ja välimistest rõngastest, mis on omavahel kontaktis määrdeainega kaetud kooniliste kontaktpindadega. Rõngasvedrule rakendatava aksiaalkoormuse toimel mõjub vedru rõngastele radiaalsuunaline surve, mis on ühtlaselt jaotunud rõngaste perimeetri ja kogu vedru ristlõike ulatuses. Radiaalsuunalise surve tulemusena vedru rõngad deformeeruvad – välimiste rõngaste diameeter tõmbepingete tõttu suureneb ning sisemiste rõngaste diameeter väheneb survepingete toimel. Kahe rõnga diameetrite muutuse tõttu toimub mööda koonuspindu vedru tsentri teljesuunaline nihe. Kontakthõõrdumise tõttu on vedru poolt tagastatava jõu suurus umbkaudu kahe kolmandiku võrra väiksem, kui oli seda vedru kokkusurumiseks vajamineva jõu suurus. Ligi 60% vedru kokku surumiseks vajaminevast tööst neeldub vedru hõõrdepaaridesse, mis eraldub soojusena. [19][20]



Sele 3.8 Rõngasvedru (vasakul) ja -ristlõige (paremal) [19][21]

Rõngasvedru omab kolme seda tüüpi vedru iseloomustavad tunnust:

- 1) Neid kasutatakse olukorras, kus on kasutada väike ruum, kuid on vajalik väga suur koormustaluvus – energia mahutavus vedru materjali ruumala kohta on suur.
- 2) Ostsilleerimised ja vibratsioonid neelatakse rõngaspaaride vahelise hõõrde tõttu.
- 3) Vedru käiku ja jäikust muudetakse rõngaspaaride eemaldamise ja lisamisega nii, et ei mõjutata kokkusurumiseks vajamineva ning vedru vabanemisel tekkiva jõu suurust.

Rõngasvedru vedrupaaridevahelist hõõrdumist vähendatakse grafiitmäärdega, mille tulemusel väheneb kokkusurumiseks vajamineva jõu suurus ja vedrust eralduva soojuse hulk [20].

### 3.4 Õhkvedru

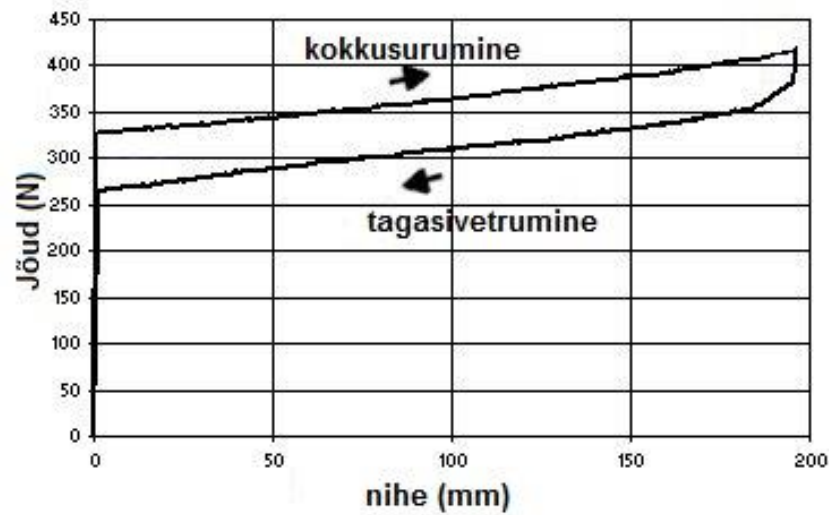
Õhkvedru (vt Sele 3.9) on välimuselt sarnane tavalisele amortisaatorile, mille tööprintsip põhineb vedruelemendi konstruktsiooni suletud suruõhu kokkusurumises. Suletud ja tihendatud silindris olev lämmastik surutakse kokku kolvi poolt, mille pinnale mõjub gaasi poolt tekitatav surve. Kuna gaas on suletud kambris, siis on õhkvedru jäikusarakteristik ideaalse gaasi olekuvõrrandi printsiipe jälgides progressiivne. [11]



Sele 3.9 Õhkvedru [22]



Õhkvedru on oma olemuselt suure hõõrdega vedrulement. Õhkvedru kolvivarrel asuv rõngastihend ja gaasi kokku surumisel liikuv kolb tekitavad hõõret ning vedru esmasel käitlemisel võib jääda mulje, et õhkvedru ei tööta. Antud efekt on näha õhkvedru hüsteresi graafikult (vt Sele 3.10). Õhkamortisaatorile on omane ka väiksem tagasivetrumise jõud, kuna kolvi tagastamisel on kokkusurutud gaasil vaja teha vähem tööd kolvi taga oleva väiksema ruumala tõttu, mis on tingitud silindris olevast kolvivarrest. [22][23]



Sele 3.10 Õhkamortisaatori hüsteresi [23]

## 4. VEDRUELEMENDI JA MATERJALI VALIK

Käesolevas peatükis hinnatakse eelnevas peatükis kirjeldatud nelja vedruelementi, mis tudengivormeli arendustöö seisukohalt omavad kas positiivseid või negatiivseid omadusi. Plussid ja miinused esitatakse tabelitena ning hindamine tehakse 5-punkti süsteemis. Punktid ühest viieni on omaduste hindamiseks jaotatud nii, et hinne “1” märgib tähtsuselt kõige vähem olulisemat ja hinne “5” väga olulise kaaluga kriteeriumi. Tulemustest võetakse aritmeetilised keskmised hinded ning plussidest lahutatakse miinused. Moodustub pingerida, kus parim lahendus saab 4 punkti ja halvim 1 punkti. Kummivedru hinded on esitatud Tabel 4.1, Belleville taldrikvedru hinded on esitatud Tabel 4.2, Rõngasvedru hinded on esitatud Tabel 4.4 ja õhkvedru hinded on esitatud Tabel 4.4.

Tabel 4.1 Kummivedru projekteerimist mõjutavad faktorid

Plussid	Hinne	Miinused	Hinne
Projekteeritav mistahes geomeetriaga	5	Väga keeruline toota	5
Keskmiselt 50% väiksem materjali tihedus võrreldes terasega	3	Tootmise hind	4
Rakendatav nii nihke-, surve-, kui tõmbekoormustele	2	Staatilise ja dünaamilise jäikuse erinevus	2
		Progressiivne jäikus	3
		Kummivedru suur hüsterees	3
		LEM analüüs	4
<b>Keskmine</b>	<b>3,3</b>	<b>Keskmine</b>	<b>3,5</b>

Tabel 4.2 Belleville taldrikvedru projekteerimist mõjutavad faktorid

Plussid	Hinne	Miinused	Hinne
Kompaktne konstruktsioon	3	Aja- ja ressursimahukas tootmistehnoloogia	4
Suur koormustaluvus	2	Vedru laminaadi kvaliteet	3
Kaalusääst	5	Suure vedru käigu tagamine	5
Muudetav jäikuskarakteristika	5	Kontakthõõrdumine	2
Vedru modulaarsus	4		
Sobivus olemasoleva amortisaatoriga	3		
Väike materjali kulu	4		
LEM analüüs	5		
<b>Keskmine</b>	<b>3,9</b>	<b>Keskmine</b>	<b>3,5</b>

Tabel 4.3 Rõngasvedru projekteerimist mõjutavad faktorid

Plussid	Hinne	Miinused	Hinne
Suur koormustaluvus	2	Suur mass	5
Jäikuskarakteristikuid ja vedru käiku lihtne muuta	4	LEM analüüs hõõrdele	3
Sobivus amortisaatoriga	5	Vedru käigu tagamine	5
Materjali omaduste stabiilsus	3	Progressiivne jäikus	3
Tehnoloogiliselt lihtne toota	4	Suur materjali kulu	3
		Mittesobiv funktsionaalsus	4
		Mittesobiv hüsterees	4
<b>Keskmine</b>	<b>3,6</b>	<b>Keskmine</b>	<b>3,9</b>

Tabel 4.4 Õhkvedru projekteerimist mõjutavad faktorid

Plussid	Hinne	Miinused	Hinne
Kaks ühes süsteem	2,5	Progressseeruv jäikus	3
Lihtsasti reguleeritav	3	Ebasobiv amortisaatorile	5
Ostutoode	3	Ebasobilik hüsterees	4
		Rõhu sõltuvus temperatuurist	3
<b>Keskmine</b>	<b>2,8</b>	<b>Keskmine</b>	<b>3,8</b>

FS Team Tallinn 2015. aasta hooaja ambitsioone ja suuri arengusamme silmas pidades tehakse valik uue vedruelemendi arendamiseks Kaz Technologies 7800 Piggypack amortisaatorile, mis võiks suurendada meeskonna võistluskompetentsi rajal ja staatilistel kaitsmistel. Meeskonna sooviks on testperioodil testida reguleeritava jäikusega vedru, nägemaks kas vedru jäikuse peenhäälestamine annab eelise dünaamilistel sõidukatsetel.

Kuna vedrude tootmiskaht on maksimaalselt kolm komplekti vedrusid hooaja kohta, siis valiku tegemisel ei pöörata tähelepanu tootmise keerukusele ja maksumusele, vaid tootmise läbiviimise võimalustele FS Team Tallinna poolt kasutatavatel seadmetel. Leidmaks meeskonna jaoks sobivaimat kompromissi vedru valikuks, antakse hinnang tootmistehnoloogilistele omadustele, mis on esitatud maatrikstabelina Tabel 4.5. Igale tootmistehnoloogilisele aspektile on skaalal 1-5 antud selle tähtsuse osakaal vedru valiku tegemisel. Iga aspekti keerukust tootmisel hinnatakse vedrude seisukohast samuti skaalal 1-5. Osakaalu ja keerukuse hinnete korrutamisel saadakse osahinne. Enim punkte kogunud lahendus valitakse FS Team Tallinna jaoks arendatavaks vedruks.

Tabel 4.5 Sobiva vedru tüübi valiku maatrikstabel

Vedru tüüp	Projekteerimise mõjufaktorite keskmine punktid	Tootmistehnoloogilised kitsaskohad		Abirakiste vajadus		Kulumaterjalid		Valmistamise aeg		Ostutooted		Kaalusääst		TULEMUS
			Hinne		Hinne		Hinne		Hinne		Hinne		Hinne	
Belleville taldrikvedru	4	2	3	3	4	3	5	5	4	3	5	5	5	97
Rõngasvedru	2		4		5		3		5		5		1	79
Õhkvedru	1		2		5		5		4		1		2	68
Kummivedru	3		1		5		2		1		1		2	44

#### 4.1 Belleville taldrikvedru materjal

FS Team Tallinn tudengivormeli amortisaatori Belleville taldrikvedrude väljatöötamiseks on esmalt vaja valida materjal, millest taldrikvedru toodetakse, kuna vedru materjalist sõltub taldrikvedru geometria ja vedrukomplektide tootmistehnoloogia väljatöötamine. Materjali valik on oluline ka kaalusäästu koha pealt, mis on tudengivormeli meeskonna poolt kehtestatud nõudeks – uus vedru peab olema kergem eksisteerivast terasvedrust. Vedru elemendi tootekaalu juures ei arvestata vedru amortisaatorile kinnitamiseks vajalike detailide massi, kuna vedrude kinnitusmehhanismi väljatöötamine ei ole antud lõputöö osaks.

Belleville taldrikvedrude tootmises kasutatakse laias ulatuses erinevaid vedru-, süsinik-, kvaliteet- ja legerteraseid sõltuvalt rakendusest. Kaalu faktorit silmas pidades on mootorisporid kasutuses kerge materjalidena titaani- ja magneesiumi sulamid ning uuendusliku tehnoloogiana ka süsinikkomposiitmaterjalidest vedrud. FS Team Tallinn juhtkonnaga meeskonnale potentsiaalseid sobivaid materjale otsides, osutus arendustöö innovaatilisust ning eelkõige kaalusäästu silmas pidades valituks süsinikkomposiitmaterjalide tootegrupp. Võrdluseks süsinikkomposiitmaterjalide mehaanilistele omadustele on Tabelis 4.6 välja toodud valim erinevad materjale ning nende mehaanilised omadused.

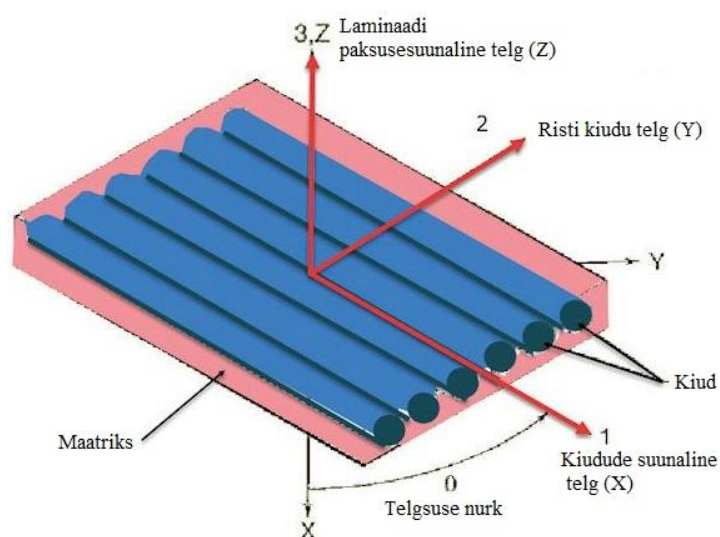
Tabel 4.6 Valik materjale Belleville taldrikvedru valmistamiseks [24][25][26][27][28]

Materjal	Survetugevus [MPa]	Tõmbetugevus [MPa]	Elastsusmoodul [GPa]	Termopaisumine [ $10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ]	Tihedus [ $\text{kg/m}^3$ ]
Vedruteras AISI 5160	2150	724	210	11,9	7800
Rv. teras AISI 301	1980	560-1400	200	10	7480
Alumiinium 7075 T6	550	500	72	23,2	2800
Titaan G5	1550	1060-1330	110	8,8	4430
Klaaskiudkomposiit	870	1000	75	4,9	1950
Süsinikkiudkomposiit	1590	1500	135	3	1550

Tabelist on näha, et süsinikkiudkomposiitmaterjalil on väikseim tihedus, suurim tõmbetugevus ja konkurentsivõimeline survetugevus ning jäikus. Väiksest tihedusest ning kõrgest tõmbetugevusest tingitud materjali eritugevus soosivad süsinikkomposiitmaterjalide kasutust rakendustes, kus on nõutud detaili väike mass.

## 4.2 Süsinikkomposiit laminaadi materjali omaduste testimine

FS Team Tallinn meeskonnal on seoses FEST15 elektrivormeli ehitamisega kasutusel kolme tüüpi süsinikkiud kangaid:  $240 \text{ g/m}^2$  tvill kangas,  $300 \text{ g/m}^2$  ühesuunaline (ingl. k *unidirectional*. Edaspidi UD) kangas ja  $400 \text{ g/m}^2 \pm 45^\circ$  biaksiaalne (ingl. k *biaxial*) kangas. Süsinikkiud kangastel on suurimaid tõmbe- ja survetugevuse väärtused kanga kiudude x-telje ehk kiudude suunaliselt. Laminaadi telgsusi illustreerib Sele 4.1.



Sele 4.1 Laminaadi telgede koordinaadistik [29]

Laminaadi kiudude suunalisest tugevusest tulenevalt on otstarbekas süsinikkomposiitmaterjalist Belleville taldrikvedru geomeetria ning laminaadi projekteerimisel kasutada kahte viimast nimetatud kanga tüüpi. UD kanga kiudude diameeter on 7  $\mu\text{m}$ , mis tähendab, et tegemist on väga tiheda lõimisega. UD kanga tõmbetugevus on 4000 MPa ja tõmbeelastsusmoodul 240 GPa [30]. Laminaadi maatriksina kasutati käesolevas töös kahte epoksiidvaiku: Pro-Set INF 114 ja Larit 285. Kahe vaigu mehaanilisi omadusi on võrreldud Tabelis 4.7.

Võrreldes kahe vaigu mehaanilisi omadusi, siis suurim erinevus kahel vaigul on survetugevuse väärtusel. Valiku tegemisel on olulisteks parameetriteks vaigu elastsusmoodul, paindeelastsusmoodul ja paindetugevus, mis on olulised laminaadi kihtidevahelise nihkepinge seisukohast, sest laminaadi maatriksi ülesanne on kanda detailile mõjuvad jõud edasi sitketesse ja tugevatesse kanga kiududesse. [24]

Tabel 4.7 Pro-Set INF 114 ja Larti 285 mehaanilised omadused [31][32]

	<b>Vaik PRO-SET INF-114</b>	<b>Vaik Larit 285</b>
<b>Kõvadus [Shore D]</b>	86	85
<b>Survetugevus [MPa]</b>	103	130
<b>Tõmbetugevus [MPa]</b>	78	80
<b>Elastsusmoodul [GPa]</b>	3,14	3,2
<b>Katkevenivus [%]</b>	5,7	6,0
<b>Paindetugevus [MPa]</b>	133	120
<b>Paindeelastsusmoodul [GPa]</b>	3,2	3,1
<b>Klaasistumistemp. (Tg) [°C]</b>	85	70
<b>Järelkõvenemise aeg [h]</b>	8	15

Kuna lõplik laminaadi tugevus sõltub kogu laminaadi tugevusomadustest, siis otsustati detailide valmistamisel kasutada kõrgema klaasistumistemperatuuriga ning lühema termotöötlustsükliga epoksiidvaiku PRO-SET INF-114. Üksikutel juhtudel kasutatakse testkehade lamineerimisel ka Larit 285 epoksiidvaiku, nägemaks kas ja kuidas mõjutavad maatriksi mehaanilised omadused taldrikvedru vetrumist.

Vedruseibide geomeetria väljatöötamiseks on süsinikkomposiitmaterjali anisotroopsete materjaliomaduste tõttu vaja vedrutaldriku Lõplike Elementide Meetod (edaspidi LEM) tarbeks teostada süsinikkiu ja epoksiidvaigu laminaadile nihke, surve ja tõmbekatsed,

saamaks teada laminaadi mehaanilised omadused. Testitulemused on Ansys 14.5 Composite PrepPost analüüsikeskkonna materjalikataloogi sisendparameetriteks, saamaks võimalikult reaalseid analüüsitulemusi. Süsinikkomposiitmaterjalist taldrikvedrude analüüsimisest antakse ülevaade käesoleva lõputöö viiendas peatükis.

Belleville vedruseibi lamineerimisel kasutatava laminaadi mehaaniliste omaduste määramine teostati FS Team Tallinn komposiidi osakonna kapteni eestvedamisel. Nihke, surve- ja tõmbekatsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli VB korpuse materjalitehnika katselaboris. Katsetatud parameetrid, teostatud katsete arv, parameetri telgsus süsinikkomposiitlaminaadis, rakendatud arvutusvalemid ning kasutatud standardid vaata Lisa 2.

Süsinikkomposiitmaterjali nihkepingete mõõtmiseks kasutati Iosipescu nihketesti meetodi. Test viiakse läbi kiirusel 2 mm/min ja materjali keskmine nihkepinge arvutatakse valemist:

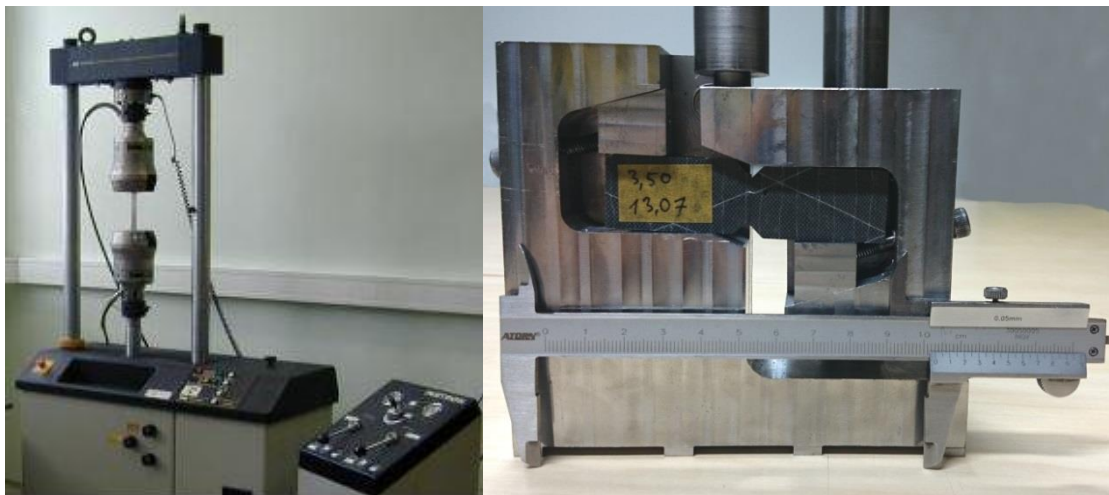
$$\tau = \frac{P}{A}, \quad (4.1)$$

kus  $\tau$  – keskmine nihkepinge

$F$  – testkehale rakendatud jõud

$A$  – katsekeha sälkudega keskosa ristlõike pindala [31]

Materjali katsetused teostati katseseadmel Instron 8516 (vt Sele 4.2)

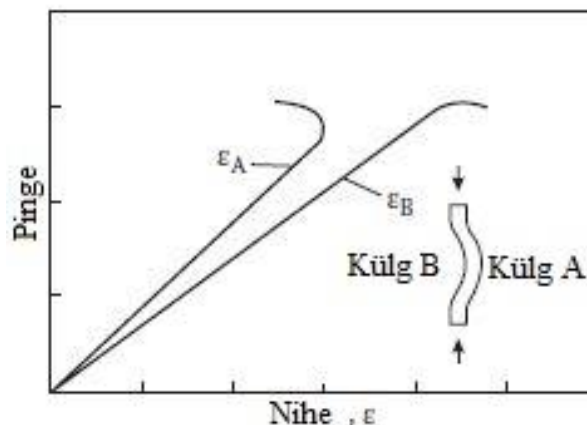


Sele 4.2 Instron 8165 (vasakul) ja süsinikkomposiit testkeha Iosipescu rakises [8]

Iosipescu nihkekatses on võimalik määrata ka materjali nihkeelastsumoodulit, kui katsekeha pinnale sälkudega ristlõike ala juurde kleepida nihet tuvastavad nihkeandurid (ingl. k *strain*

*gauge*). Nihkeanduri kasutusvõimaluse puudumise tõttu teostati katsed nihkeelastsusmoodulit mõõtmata ning hilisemates laminaadi analüüsid kasutatakse erialases kirjanduses leiduvaid standardväärtusi sarnasele laminaadile. [33]

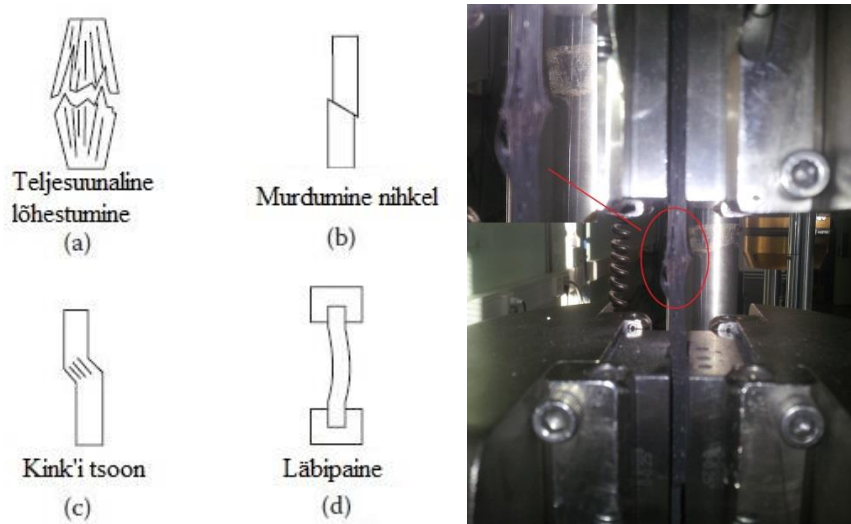
Süsinikkomposiitmaterjali surve- ja tõmbetugevusi testiti Instron 8516 katseseadmel. Survepinge määramiseks testiti 8. katsekeha. Ansys materjalide kataloogi sisestati survepinged testitulemuste aritmeetiliste keskmistena. Komposiitlaminaadi survetesti teostamine on üks enim täpsust nõudev katsemeetod. Oluliseks nüansiks survekatse teostamisel on kanga kiudude telgsus laminaadis ja seda eriti UD kangaste puhul, kuna komposiidi tugevus ja elastsusmoodul vähenevad järsult, kui laminaati ei koormata kiudude x-teljega samasihiliselt. Samuti on oluline katsekeha tasapinnalisus ning testpingi haaratsite telgsus ja paralleelsus. Kui katsekeha surumine sooritatakse ekstsentriliselt, toimub katsekeha läbipainumine. Läbipainumise fikseerimiseks on vajalik kahe vastastikuse nihkeanduri kasutamine testkehal, mille abil saab tuvastada koormuse, mille juures laminaat hakkab läbi painduma (vt Sele 4.3). [24]



Sele 4.3 Testkeha läbipainde tuvastamine nihkeanduritega [24]

Andurite lugemite tulemusena genereeritakse kaks nihkepinge graafikut ning nende vahelise ebasümmeetria korral tuvastatakse läbipaine ning katsetulemusi ei loeta korrektseks. Survetugevuse määramisel on laminaadil neli purunemismehhanismi (vt Sele 4.4), mille hulgas just läbipainet loetakse mitteaktsepteeritavaks. Kink'i tsooni tekkimise eelduseks on kiudude mitteparalleelsusest tingitud läbipaine, mis lubab laminaadil astmeliselt murduda.





Sele 4.4 Purunemismehhanismid (vasakul) ja katsekeha lõhestumine (paremal)[8][24]

Tõmbekatsete teostamisel näeb standard ASTM D3039 ette katsekeha mõõtmetega 25 mm x 250 mm purustava katse (vt Sele 4.6). Soovituslik katse kiirus on 2 mm/min. Tõmbeelastsumooduli määramiseks kasutatakse ekstensomeetrit või nihkeandureid. Z-telje suunalise laminaadi tõmbetugevuse määramiseks teostati katsekeha tõmbekatse vastavalt standardile ASTM D7291 (vt Sele 4.5) -pikenemine registreeriti ekstensomeetri abiga. [34]



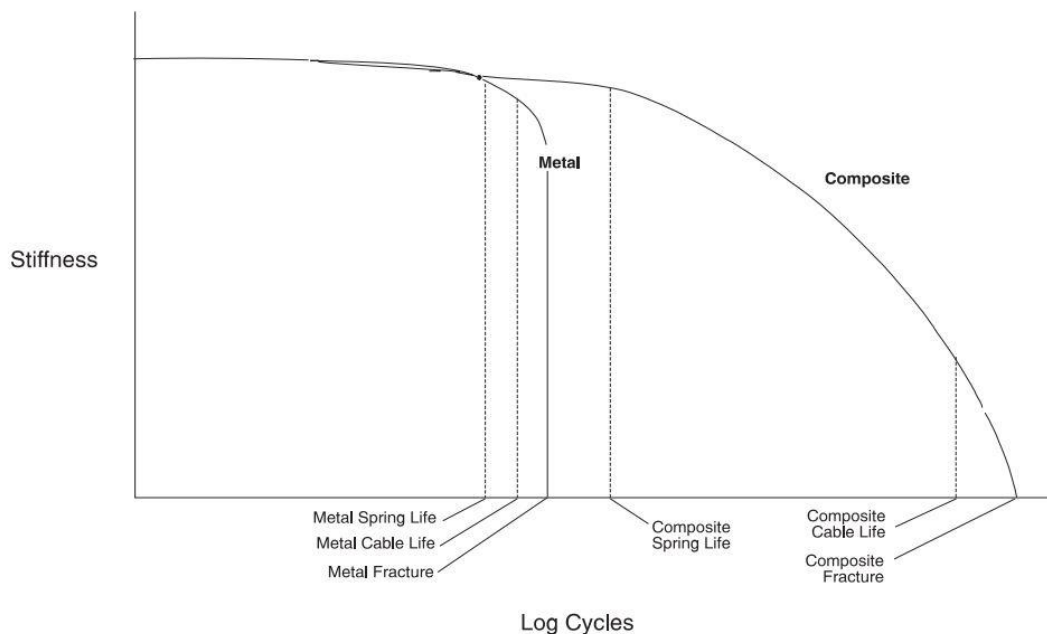
Sele 4.5 UD purustatud katsekeha (vasakul), Z-telje suunaline tõmbekats (keskel) ja purustatud katsekeha (paremal) [8]

### 4.3 Süsinikkomposiitmaterjali väsimus ja temperatuuritaluvus

Süsinikkiudkomposiit materjalide kasutamine erinevates insenertehnilistes valdkondades on teaduse – ja arendustegevuse tulemusena muutumas aina populaarsemaks, kuid endiselt on nende materjalide vastupidavuse hindamine tsüklilistele varieeruvatele koormustele ulatuslikuks probleemikohaks. Komposiitmaterjalidel on staatiliste ja tsükliliste koormuste

korral üsna keeruline purunemismehhanism, mis on tingitud maatriksi anisotroopsetest omadustest. Väsimusest tingituna esineb komposiitmaterjalides neli põhilist purunemismehhanismi: maatriksi pragunemine, delamineerumine, kiudude murdumine ja kiu ning vaigu vahelise sidekihi delamineerumine. Erinevate purunemismehhanismide, materjali anisotroopia, keerukate pingeolukordade ja üleüldised materjalide mittelineaarsete käitumiste kombinatsioonid piiravad komposiitmaterjalide väsimuse olemuse ühest defineerimist. [35]

Võrreldes isotroopsete materjalidega, näiteks metallidega, põhjustab pikaajaline väsimus komposiitmaterjalides kahjustusi kogu materjali ulatuses, tingides nii purunemise materjali üldiste mehaaniliste omaduste järkjärgulise vähenemise arvelt. Metallidel esineb purunemine reeglina materjali struktuuri tekkinud väsimuspraost, mille tagajärjel leiab aset järsk purunemine (vt Sele 4.7). [35]



Sele 4.7 Metalli ja komposiitmaterjalist detaili jäikuse vähenemise karakteristikud [35]

Komposiitmaterjalide väsimuse analüüsimisel on nii tõmbe- kui surveolukordades uuritud materjalide käitumist termomõjudele, sageduse muutusele, eelpingestatusele, niiskusele ja paljudele muudele parameetritele. Kuna iga laminaat on oma unikaalse koostise ja ülesehitusega, siis on uurimistõulemustena esitatud palju erinevaid seisukohti ning arvamusi väsimuse olemusest. FS Team Tallinn seisukohast on süsinikkomposiitmaterjali kasutamisel olulisim faktor detaili keskkonna temperatuur, mis mõjutab otseselt laminaadi jäikusomadusi. Laminaadi maatriksi puhul tuleb jäikusomaduste muutumise põhjust otsida epoksiidvaigu klaasistumistemperatuurist. [36]

Vaigu klaasistumistemperatuur  $T_g$  (ingl. k *Glass Transition Temperature*) on epoksiidvaikude üks kõige olulisemaid omadusi ja see määrab ära temperatuuri, millest alates polümeer muutub kõvast klaasjast olekust pehmeks kummi- ja elastiliseks materjaliks. Kuna epoksiidvaigud on termoreaktiivsed, siis lõplikult kõvenenud vaigud hilisemal kuumutamisel ei sulaga ega voola, vaid pehmeneb ning muutub amorfseks polümeeriks. [36][37]

Toatemperatuuril laminaadi kõvenemine tagab detaili kõige madalama  $T_g$ . Kuumutades sama laminaati ahjus on võimalik saavutada klaasistumistemperatuur vahemikus 60 °C – 110 °C sõltuvalt vaigule ettenähtud kuumutustsüklist. Kõrge klaasistumistemperatuuriga vaigud taluvad hästi kõrgemaid temperatuure ja seetõttu omavad ka parimaid mehaanilisi omadusi laminaadi tõmbeolukordades. Klaasistumistemperatuuridel on siiski oma ülempiirid ja reeglina ei ole epoksiidvaikude  $T_g$  suurem järelkõvendamise temperatuurist. [36]

Käesolevas lõputöös kasutatava epoksiidvaigu Pro-Set INF 114 klaasistumistemperatuur on 85 °C. Üle selle temperatuuri laminaadi jäikus ja sellega koos survetugevus ning nihketugevus langevad drastiliselt. Laminaadi pehmenemise vältimiseks on soovitatav vedruseibid katta heledat tooni kilega või valge värviga. [36][37]

## 5. VEDRUSEIBI GEOMEETRIA JA PROTOTÜÜPIDE VALMISTAMINE

Vedru lahenduse projekteerimist piiravad asjaolud, FS Team Tallinn poolt esitatud nõuded ning Formula Student reeglid on kirjeldatud käesoleva töö peatükkides 2 ja 2.1. Vedru gabariitmõõtmete ja jäikusomaduste kõrval on üheks oluliseks projekteerimise pidepunktiks vormeli rataste minimaalne nõutud liikumisulatus, millest sõltub vedru töökäigu ulatus. Reeglitega on vormeli ratta vertikaalsuunaliseks liikumiseks nõutud minimaalselt 50,8 mm. Vormeli vedrustuse kinemaatikast tingituna ei ole amortisaatoril oleva vedru liikumine 1:1 seoses ratta vertikaalsuunalise liikumisega. [1][4]

FS Team Tallinn vormelitel kantakse ratta liikumine vedrustava elemendini läbi tõukurvarda, mis on amortisaatoriga ühenduses nookuri abil. Sellest tulenevalt omab vedrustuse kinemaatika ülekandetegurit, mis määrab kui palju surutakse vedru kokku ratta vertikaalsel liikumisel. Ülekandetegur (ingl. k *Motion Ratio*) on arvutatav järgneva valemiga:

$$MR = \frac{l_1 - l_2}{\delta Z}, \quad (5.1)$$

kus  $MR$  – ülekandetegur

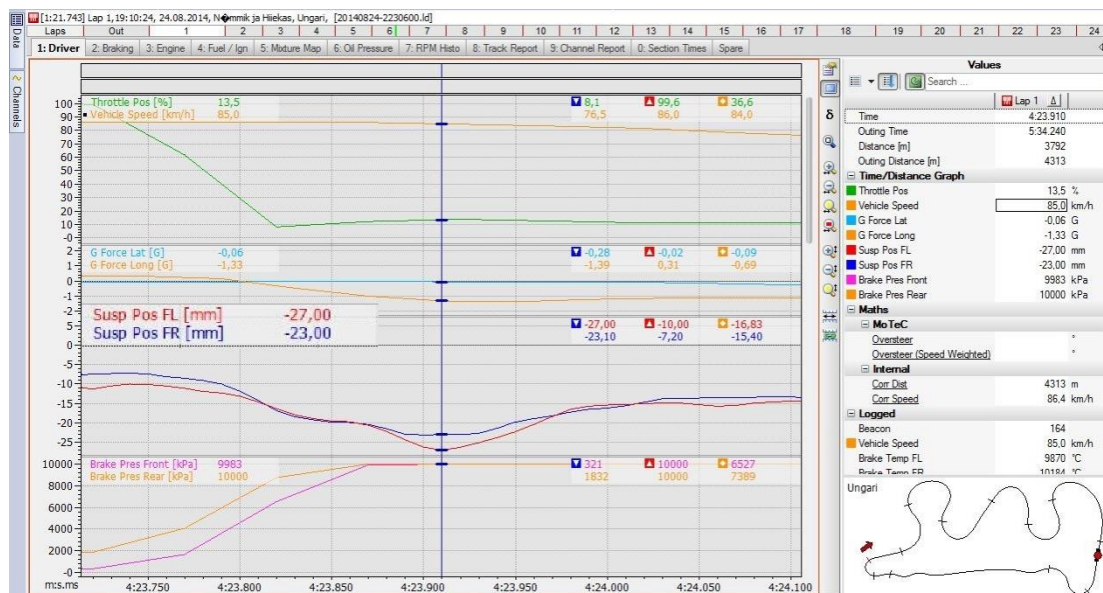
$l_1$  – vedru algpikkus

$l_2$  – vedru pikkus kokkusurutuna

$\delta Z$  – ratta kontaktpinna vertikaalne nihe [4]

Valemist näeme, et üheks sisendparameetrik on ratta vertikaalne nihe, mis peab reeglite kohaselt olema minimaalselt 50,8 mm. Saamaks teada, kui suur peab olema vedru minimaalne tagatud käik on vaja teada vedrustuse kinemaatika ülekandetegurit. Siinkohal võetakse kasutusse FS Team Tallinn vedrustuse kinemaatika arvutusmoodul (vt Lisa 1). Arvutusmooduli põhieesmärgiks on välja arvutada vedrustuse elastsete elementide jäikused inseneri poolt määratud külgiirendus väärtuse juures, saamaks teada kaalu ümberjaotumise protsente vormeli esi- ja tagasillal, mille alusel antakse hinnang sõiduki teoreetilisele juhitavusomadustele. Üheks sisendparameetrik on ülekandetegur, mis meeskonna värskeima vormeli FEST15 arvutusmoodulis on tagasilla vedrude puhul 0,699. See tähendab, et kui vormeli ratas liigub ülesse 1 mm, siis surutakse vedru kokku 0,7 mm. Ülekandetegurist lähtuvalt peab vedru minimaalseks käiguks vedru kokkusurumisel olema 17,8 mm ja lahti liikumisel 17,8 mm ehk minimaalne teoreetiline vedru käiguulatus peab olema 35,6 mm.

Vedru geomeetria väljatöötamisel tuleb arvestada ka reaalseste rajaoludega ning tegelike rataste vertikaalsuunalise liikumise vahemikuga. FS Team Tallinn vormelautod on varustatud mitmete sensorite ning anduritega, saamaks vajalikku tagasisidet vormelauto käitumisest võistlusrajal. Igale amortisaatorile on vedrustuse käigu logimiseks paigaldatud vedrustuse käigu andur, mis mõõdab amortisaatori kokku ja lahti liikumist millimeetrites. Reaalse vedrustuse käigu hindamiseks analüüsiti möödunud hooaja võistlustelt kogutud andmeid vormelauto FEST14 kohta. [39] Kuna tegemist on elektrivormeliga on see ka läbi aegade kõige suurema tühimagiga FS Team Tallinn pool projekteeritud võidusõiduauto. Suurem mass tähendab rajal suuremat külgekaldumist ja seetõttu on ka vormeli vedrustuse käik kurvides ning järskudel pidurdamistel suurte külgiõudude korral suuremad. Logitud andmeid saab analüüsida programmiga MoTeC i2 Standard 1.1, mille töökeskkond on nähtav Sele 5.1.

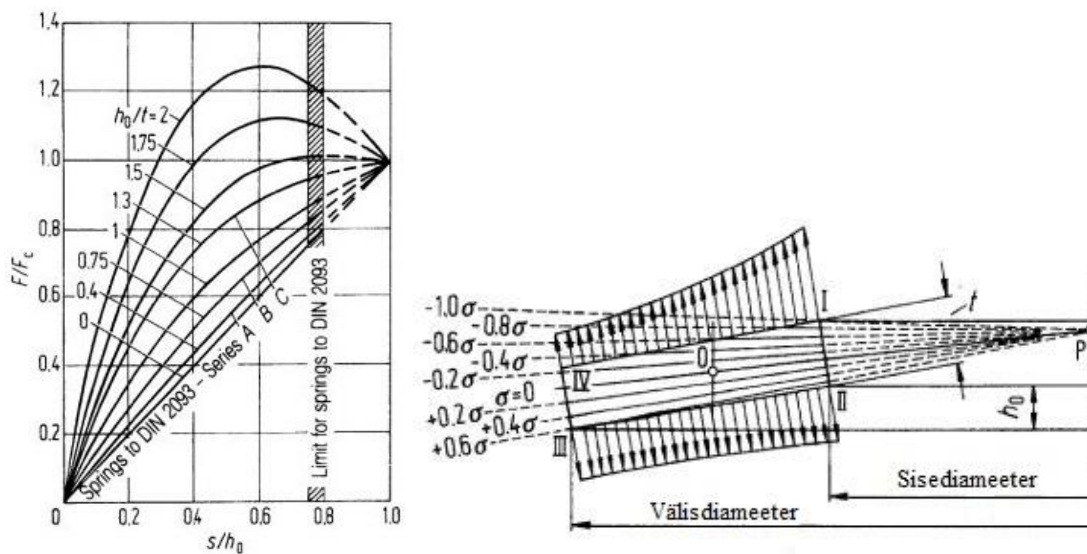


Sele 5.1 MoTeC Standard 1.1 töökeskkond ja maksimaalne vedru kokkusurumine

Analüüsi tulemusena jõuti järeldusele, et maksimaalne vedru kokkusurumise distants staatilisest asendist oli 27 mm ja lahtiliikumine 10,1 mm ehk kokku 37,1 mm, mis on kaks millimeetrit rohkem, kui teoreetiline vormelauto vedru kokkusurumise ulatus. Käesoleva lõputöö koostamise hetkeks on teada, et vormel FEST15 kaalub vähem, kui FEST14. Sellest lähtuvalt võetakse vajalikuks vedru käigu ulatuseks 40 mm, mis sobib ka FS Team Tallinn meeskonna 7800 Piggypack amortisaatorile, mille maksimaalne töökäik on 50 mm.

## 5.1 Belleville vedruseibi analüüsimudel ja geometria valik

Belleville prototüüp vedruseibi väljatöötamiseks rakendati lähtepunktina standardit DIN 2093, mis kirjeldab standardse terasest Belleville taldrikvedru disaini ning mehaanikainseneri käsiraamatus leiduvaid taldrikvedru jäikuse karakteristikuid (vt Sele 5.2), mis on välja töötatud General Motors'i inseneride John O. Almen'i ja A. Laszlo poolt. [11] Belleville taldrikvedrude projekteerimise juures on vedrude suureks plussiks jäikuskarakteristikute variatsioonide hulk, mida lähtuvalt rakendusest on võimalik inseneri nägemuse järgi muuta. Jäikuskarakteristikud on defineeritud taldrikvedru koonilisuse ehk kõrguse ja seibi ristlõike paksuse suhtega. Mida väiksem on suhtarv, seda lineaarsem on taldrikvedru jäikuskarakteristik. Belleville taldrikvedru koormamisel töötab vedruseib üheaegselt nii tõmbe- kui ka survepingetele tekitades suurimad pinged vedru kontaktpindade lähedusse (vt Sele 5.2). [11] Käesolevas lõputöös projekteeritava süsinikkomposiit vedruseibile lisanduvad detaili laminaati ka kihtidevahelised nihkepinged.



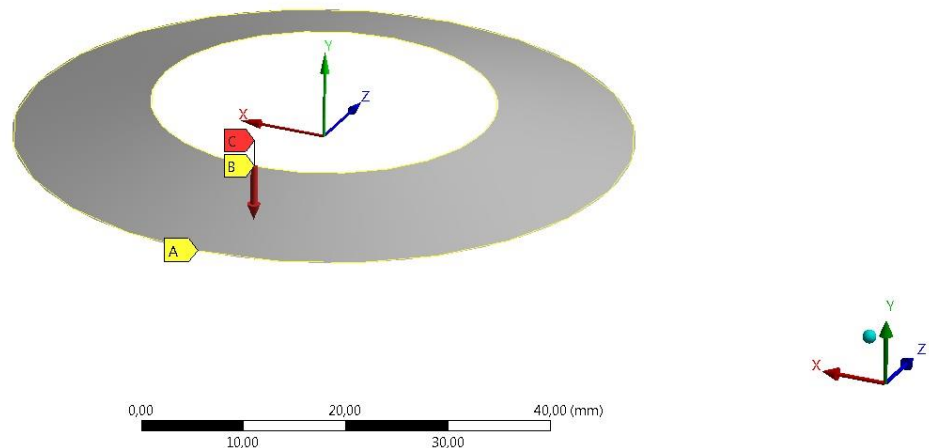
Sele 5.2 Belleville taldrikvedru jäikuskarakteristikud (vasakul) ja pinged vedruseibi koormamisel (paremal) [11]

Kuna antud töös otsitakse alternatiivi terasest keerdvedrule, mille jäikuskarakteristik on lineaarne, siis soovitakse lõpptulemusena saavutada taldrikvedru võimalikult lineaarne jäikuskarakteristik. Sisendparameetrid, mille vahel tuleb leida kompromiss soovitud tulemuse leidmiseks on vedruseibi koonilisus, ristlõike paksus, sise- ja välisdiameeter ning vedru jäikus. Selleks, et tuvastada FS Team Tallinn tudengivormelile sobivaim lahendus, koostati Ansys 14.5 Composite PrepPost analüüsikeskkonnas optimaalseima vedruseibi geometria parameetiline arvutusmoodul, et arvutuste ja analüüside arvelt aega kokku hoida.

Ansyst 14.5 Composite PrePost analüüsikeskkonnas teostatakse komposiitmaterjalide analüüs reeglina kahte meetodi kasutades: koorikelement- või *solid* keha analüüs. Kuna koorikelemendil baseeruvat arvutusmodeli struktuuri on lihtsam koostada ning nõuab arvutuste läbiviimiseks vähem arvutusmälu ressursi väiksema arvu elementide tõttu, koostati antud töös parameetiline taldrükvedru arvutusmoodul esmase valiku tegemiseks koorikelemente kasutades. Hilisemalt, kui välja valitud geometriale on vajadus teostada laminaadi optimeerimine, on soovituslik kasutada *solid* keha analüüsi.

Parameetrilise arvutusmooduli koostamise jaoks projekteeriti programmiga Catia 5V R21 esmalt kolmemõõtmeline kooniline Belleville vedruseib meelevaldse koonusenurgaga 10 kraadi, mille välisdiameeter oli 61 mm, sisediameeter 34 mm. Solid keha sisemine pind valiti laminaadi juhtpinnaks, millest tekitati koorikelement ehk pind, millele omistatakse hilisemalt virtuaalne laminaadi paksus ja -struktuuriomadused (vt Sele 5.3). Hilisemalt on parameetrilises mudelis koorikelemendi koonusenurka võimalik hõlpsasti muuta, mis on ka üheks sisendparameetriks optimaalse geometria leidmisel.

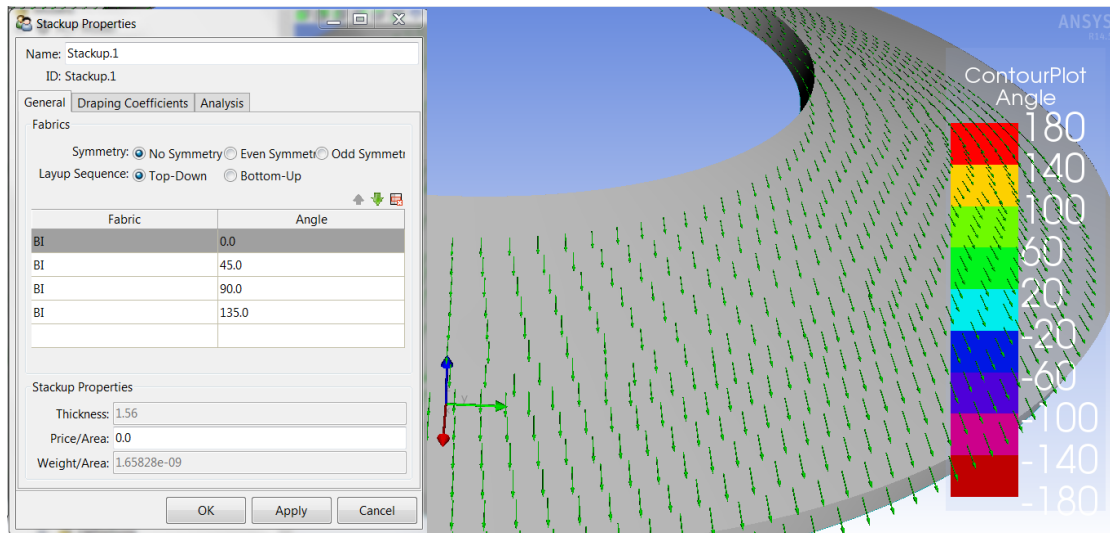
C: Static Structural  
 Force  
 Time: 1, s  
 10.05.2015 13:41  
 A Displacement  
 B Displacement 2  
 C Force: 500, N



### Sele 5.3 Parameetrilise analüüsi koorikelement koos detailile määratud rajatingimustega

Rajatingimustega määratakse detaili positsioon ruumis ja vedruseibile rakendatavast koormusest tekkivate deformatsioonide vabadusastmed. Toega A piiratakse liikumine detaili Y-telje suunas, mis on detaili tsentriteljeks. Koormamisel tekkiva radiaaldeforatsiooni tõttu on suunad X ja Z jäetud vabaks. Tugi B välistab vedruseibi ülemise perimeetri radiaalse liikumise X ja Z suunaliselt. Detaili ülemisele perimeetrile on rakendatud Y-telje suunaline jõud 2000 N, mis on tulevase vedru soovitud algjäikuseks.

Parameetrilise mudeli laminaadi kihtide orientatsioon on määratud vastavalt laminaadis olevatele kihtide arvule. Kangakihtide kiudude suunad on jaotatud võrdseteks vahemikeks 180 kraadi ulatuses. Esimene kiht asetseb X-telje sihiliselt ehk laminaadi esimese kihi kiudude suunaliselt (vt Sele 5.4).

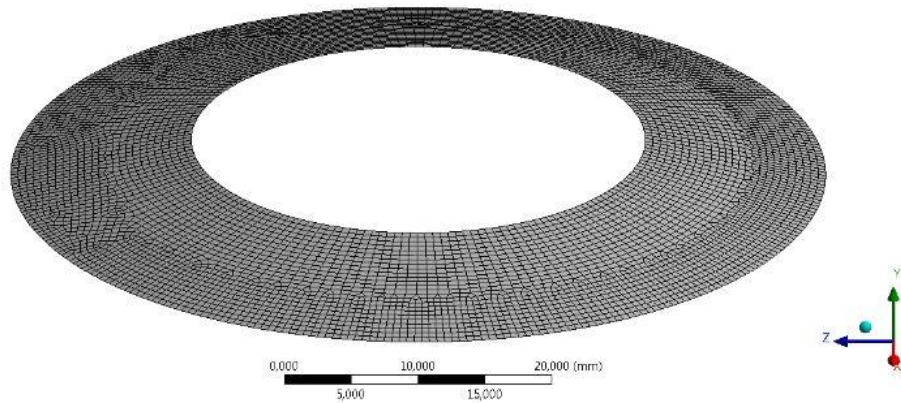


Sele 5.4 Laminaadi esimese kihi kiudude suund

Seitsmekihilise laminaadi kangakihtide kiud on omavahel 25-kraadises nihkes, kaheksakihilise 22,5- kraadises, üheksakihilise 20- kraadises nihkes ja nii edasi ehk kihtide arvu kasvades väheneb kiudude omavaheline asetusnurk. Käesoleva töö neljandas peatükis kirjeldati laminaadis kasutatavate materjalide füüsikaliste omaduste määramiseks teostatud laboratoorseid katseid. Saadud tulemused (vt Lisa 3) sisestati Ansys 14.5 PrePost materjalide andmepanka, mida kasutatakse LEM analüüsi sisendandmeteks.

LEM tugevusanalüüsi tulemused sõltuvad suuresti sellest, kuidas on defineeritud laminaadi võrgustik (ingl. k *Mesh*). Tugevusanalüüsides on kasutusel erinevat tüüpi võrgustiku elemendid, mis igaüks annab arvutuse tulemuseks erinevaid pingete väärtusi. Elementide võrgu koostamiseks kasutati *Hex-Dominant Triangle surface mesher* meetodi (vt Sele 5.5), mis tekitab mudelile kuupidest koosneva elementide võrgustiku. Soovituslik on analüüsides kasutada nelinurkseid elemente. Vältida tuleks hulknurkseid ja mittesümmeetrilisi võrguelemente, sest need suurendavad arvutustulemuste ebatäpsust. Antud töös rakendati võre loomiseks *solid-shell* elemente, millel on 3 vabadusastet ja 8 sõlmpunkti ühe elemendi kohta. Elemendi suuruse määramisel rakendatakse laminaadi faktoriaali ja paksuse korrutist. Laminaadi faktoriaal tuleneb laminaadi küljepikkuse ja paksuse suhtest. [39][40][41][42][43] Arvutustes kasutatud elementide arv oli 6277.





Sele 5.5 Vedruseibi kuupelementidest koosnev võrgustik

Peale koorikelemendi materjali omaduste, võrgustiku ja rajatingimuste määramist koostati parameetrilise arvutusmooduli sisend- ja väljundandmete kogum, mis koordineerib kogu arvutusprogrammi tegevust (vt Sele 5.6).

Table of Design Points									
	A	B	C	D	E	F	G	I	J
1	Name	P5 - Nurk	P13 - BI (1) v UD (2)	P17 - 10kihti .active	P16 - 9kihti .active	P15 - 8kihti.active	P14 - 7kihti .active	P3 - Total Deformation Maximum	P18 - Maximum Shear Elastic Strain Maximum
2	Units							mm	mm mm^-1
3	Current	10	1	True	False	False	False	1,202	0,024546
4	DP 1	10	1	False	True	False	False	1,5821	0,029254
5	DP 2	10	1	False	False	True	False	2,7937	0,039166
6	DP 3	10	1	False	False	False	True	2,7937	0,039166
7	DP 4	11	1	True	False	False	False	1,2446	0,025913
Outline: No data						False	False	1,6475	0,031078
	A	B			True	False	False	2,9483	0,042114
1	ID	Parameter Name			False	True	False	2,9483	0,042114
2	Input Parameters				False	False	False	1,2801	0,027181
3	ACP (Pre) (B1)				False	False	False	1,7067	0,032843
4	P5	Nurk			True	False	False	3,1113	0,045268
5	P13	BI (1) v UD (2)			False	True	False	3,1113	0,045268
6	P17	10kihti.active			False	False	False	1,307	0,028266
7	P16	9kihti.active			False	False	False	1,7563	0,034449
8	P15	8kihti.active			True	False	False	3,2827	0,048566
9	P14	7kihti.active			False	True	False	3,2827	0,048566
10	Static Structural (C1)				False	False	False	1,3207	0,029097
11	P12	Force Y Component ( 2000 N )			False	False	False	1,7907	0,035805
*	New input parameter	New name			True	False	False	3,4657	0,052085
13	Output Parameters				False	True	True	3,4657	0,052085
14	Static Structural (C1)				False	False	False	1,3191	0,02951
15	P3	Total Deformation Maximum			False	False	False	1,8043	0,036683
16	P18	Maximum Shear Elastic Strain Maximum			True	False	False	3,6588	0,055815
26	DP 23	15	1	False	False	False	True	3,6588	0,055815

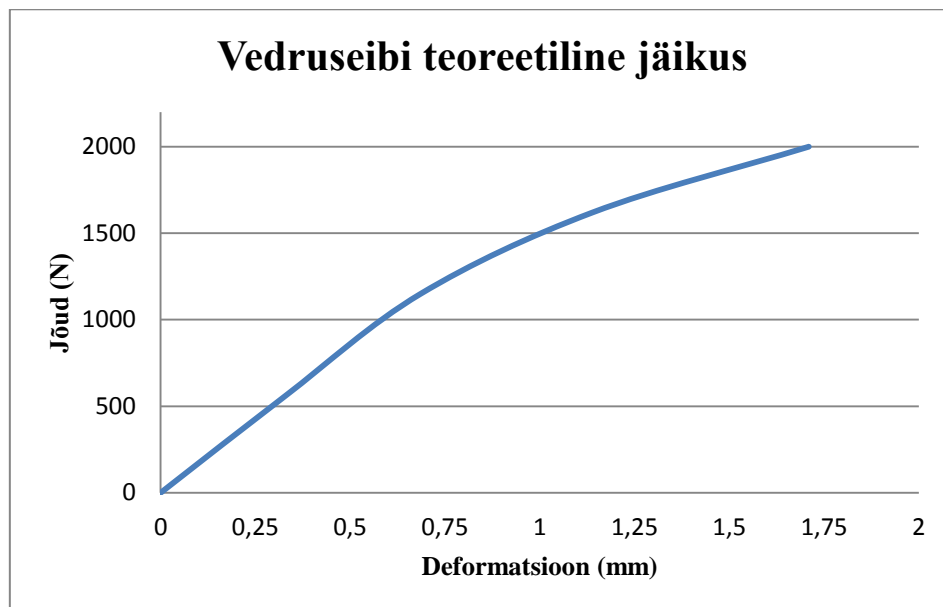
Sele 5.6 Ansys 14.5 Composite PrepPost parameetrilise arvutusmooduli näide

Arvutusmooduli tööõhimoete on ülesse ehitatud soovitavale maksimaalsele läbipaindumisele töö autori poolt määratud koormustingimuste juures. Lõputöö eesmärgist, Belleville taldrikvedru teooriast ja jäikusarakteristikutest lähtuvalt on ühe taldrikvedru soovitavaks aksiaalsuunaliseks deformatsiooniks 2mm, mis tähendab, et 20 taldrikvedru elemendi vastandikulisel asetusel moodustub vedru, mille käigupikkuseks on 40 mm. Taldrikvedru

jäikus ja läbipainde suurus on omavahelises otseses sõltuvuses. Arvutusmooduli ülesandeks on leida parim võimalik taldrikvedru geometria, mis 2000 N suuruse Y-teljelise jõu juures painduks läbi 2 mm. Moodulis on defineeritud erinevad laminaadi kihtide paksused ning taldrikvedrude koonuse nurgad. Tulemuseks on parim võimalik laminaat, millel on sobiv laminaadi koonuselise osa kõrguse ja laminaadi ristlõike paksuse suhe  $h_0/t$ . Eesmärgiks on saavutada  $h_0/t$  väärtus, mis ei ületa 1,4 ühikut.

### 5.1.1 Parameetrilise arvutusmooduli kalkulatsioonide tulemus

Analüüsi tulemusena osutus teoreetiliselt kõige sobivamaks vedruseibiks  $12,5^\circ$  koonusenurgaga ja 2,4 mm paksune ehk 9 kihiline biaktsiaalsest süsinikkangast laminaat, mille deformatsioon 2000 N juures on 1,7 mm ja  $h_0/t$  suhe 1,2. Antud vedruseibi teoreetiline jäikusgraafik on näidatud Sele 5.7. Geomeetriad, mille korral deformatsioonid on suuremad, kui 2 mm on materjali tõmbepikenemisest lähtuvalt võimalik hinnata teoreetiliste nihkepingete suurust. Antud töös loetakse kriitiliseks tõmbepikenemiseks 0,4 mm, mille juures toimub laminaadi pindmistes kihtides kiudude purunemine ning vedruelemendi jäikuse langus.

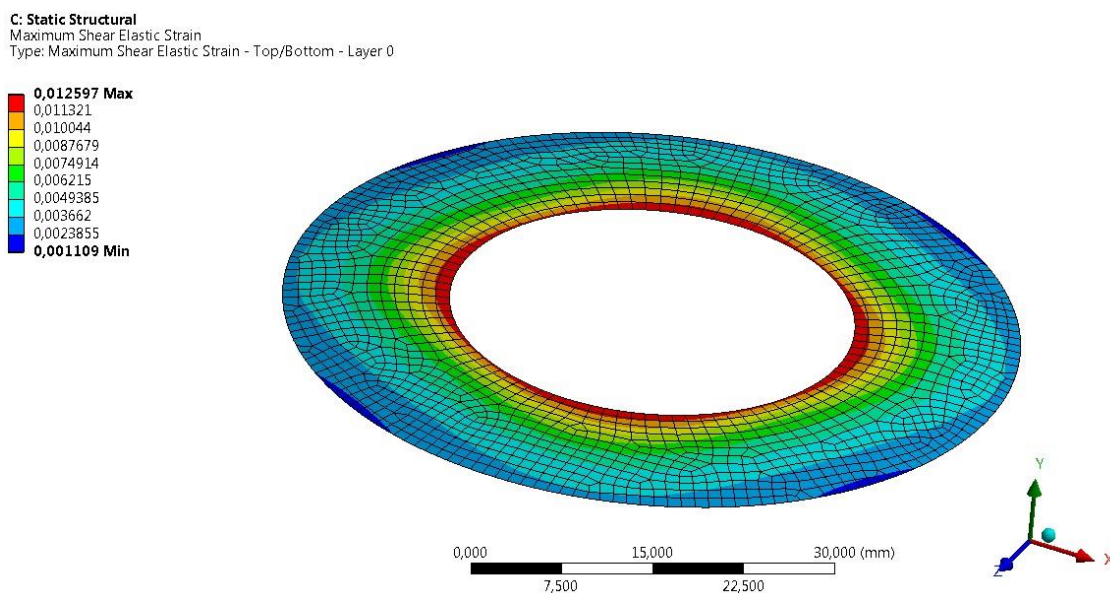


Sele 5.7 Vedruseibi teoreetiline jäikus

Graafikult on näha, et vedruelemendi jäikuse karakteristik ei ole lineaarne vaid deformatsiooni ulatusest lähtuvalt mittelineaarne. See on tingitud Belleville taldrikvedru jäikuskarakteristiku iseloomust, mis tuleneb vedruseibi vabakäigu ja ristlõike paksuse suhtest  $h_0/t$ . [11] Antud juhul on  $h_0/t$  väärtuseks 1,2, mis tähendab vedruelemendi elastsus on

mittelineaarne. Belleville taldrikvedrudel loetakse lineaarseks veel suhte väärtust 0,4 – selle ületamisel tuleb vedrustuse lahenduse projekteerimisel arvestada jäikuse mittelineaarsusega. FS Team Tallinn seisukohast on parimaks lahenduseks väikseim  $h_0/t$  suhe, sest sellisel juhul on vedru mittelineaarsuse erinevus terasvedru lineaarsest jäikusest väikseim, ning selle võrra on lihtsam teostada vedrustuse seadistamist vastavalt juhtide tagasisidele.

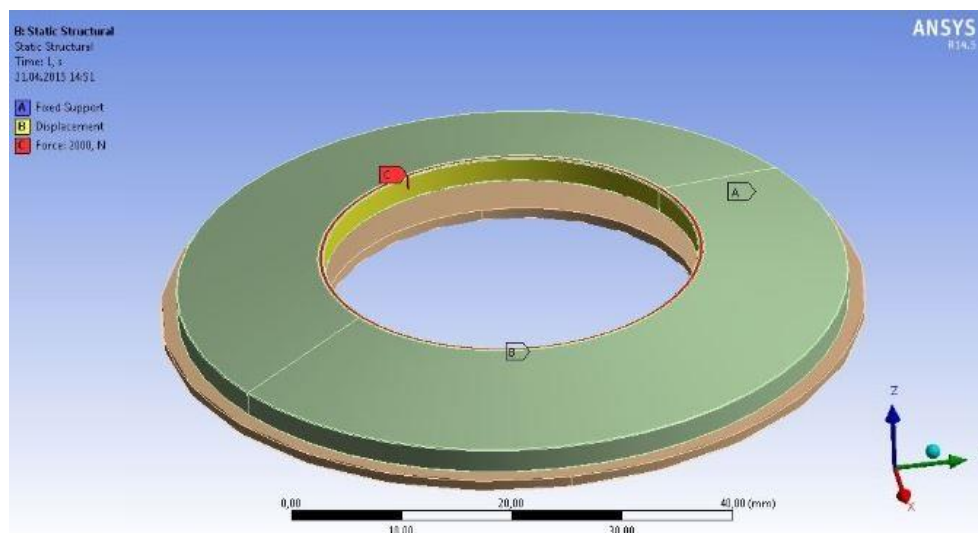
Materjali piknemise jaotumine vedrutaldriku laminaadi vahekihtides on näidatud Sele 5.8. Suurimad nihkepinged tekivad taldrikvedru kontaktpindade lähedusse ning antud juhul on suurimad nihkepinged koondunud taldrikvedru ülemisse serva, kus eksisteerivad laminaadis koormuse rakendamisel survepinged.



Sele 5.8 Nihkepingete jaotumine tõmbepikenemisel taldrikvedru koormamisel 2000 N

Analüüsi kohaselt ei ületa detaili nihkepinged kriitilisi väärtusi, kuna kiusuunaline deformatsioon  $\varepsilon = 0,0126$  tähendab tõmbepikenemist 1,3 %, millest tingituna laminaadi kihtide purunemist 2 mm deformatsiooni korral ei esine. Toatemperatuuril kõvenenud detaili piknemine 2% ehk laminaadi kiudude deformatsioon  $\varepsilon = 0,027$  on juba kriitiline, kuna ületatakse elastse deformatsiooni tsoon. Analüüsi tulemuste täpsus on siinkohal küsitav, kuna käesolevas lõputöös kasutati analüüsitavate detailide materjalide nihkemooduliteks erialases kirjanduses leiduvaid koefitsiente [33] ja väärtusi vastavalt kangaste tüübile kuna Iosipescu testkatsel puudus nihkeandurite kasutamise võimalus.

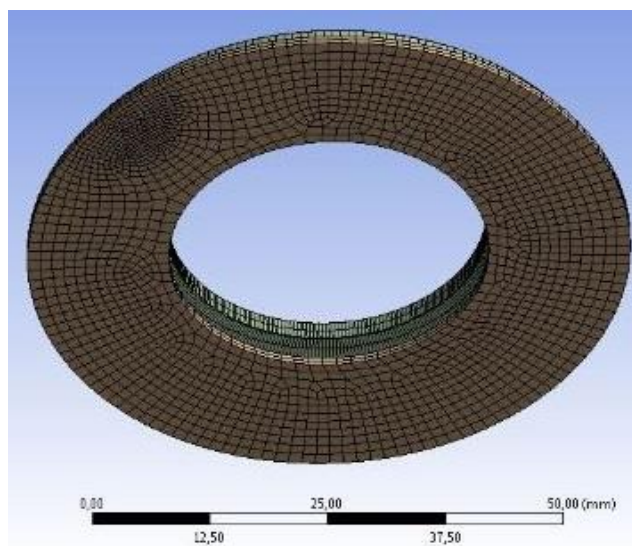
Vedrutaldrikute vastastikuse asetuse kontsentrisuse tagamiseks käesoleva töö raames võimalikke konstruktsioonilahendusi ei projekteerita ega analüüsita. Ühe võimalusena näeb töö autor võimalust amortisaatoril kontsentreerivate seibide kasutamist. Sellest lähtuvalt teostati vedruseibile ka kontaktitsooni analüüs, eesmärgiga välja selgitada, kui suured pinged esinevad vedruseibi kontaktpindadel ning vedruseibe separeerivatel kontsentrilistel vaheseibidel. Analüüsitava vaheseibi materjaliks valiti polüetüleen PE-500 tihedusega  $950 \text{ kg/m}^3$ , tõmbeelastsusmooduliga  $850 \text{ MPa}$  ja kuulkõvadusega  $45 \text{ MPa}$  [44]. Analüüsi teostamiseks koostati vedruseibi ja vaheseibi koostu fail, millele teostati *static structural* analüüsikeskkonnas *contact tool*'i kasutades vaheseibi ja vedruseibi kontaktitsooni analüüs. Analüüsitava koost koos rajatingimustega on näidatud Sele 5.9.



Sele 5.9 Vedruseibi kontaktitsooni analüüsi mudel koos rajatingimustega

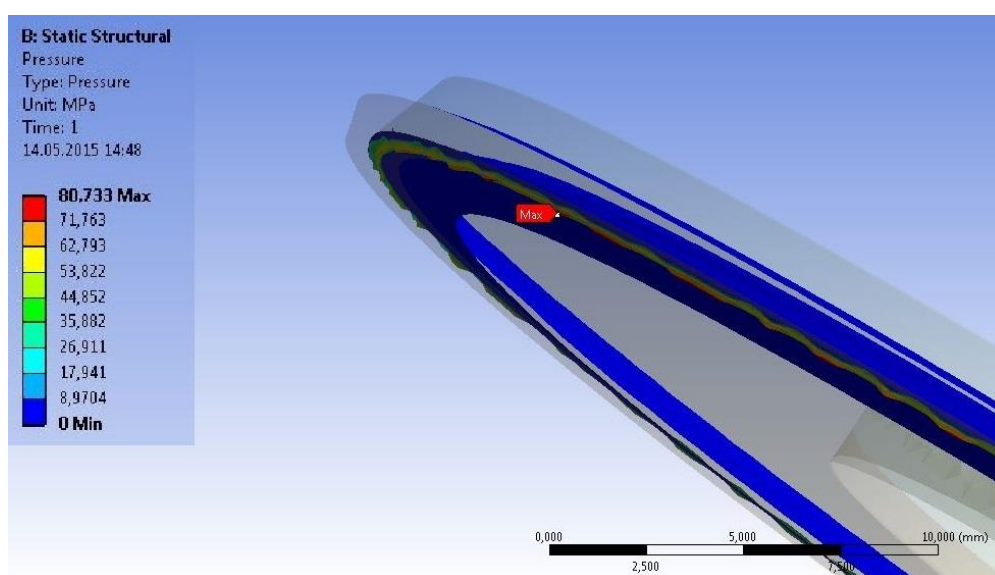
Koostumudel kinnitati vaheseibi alumisele pinnale rakendatud *fixed support* töökäsku kasutades. Vedruseibi vabadusastmetest kaotati ära x ja y-telje suunaline liikumine ja z-teljesuunaline liikumine jäeti vabaks. Vedruseibi ülemisele pinnale rakendati jõud  $2000 \text{ N}$ .

Elementide võrgustiku loomisel kasutati kuupelemente ja *Hex dominant triangle surface mesher* funktsiooni. Töökäsuga *body sizing* määrati elemendi suuruseks vaheseibile  $1 \text{ mm}$  ja vedruseibile  $2 \text{ mm}$ . Elemendi külje pikkuseks oli  $0,5 \text{ mm}$ . Elementide arv analüüsis oli  $7900$ . Peale esmast arvutust täiustati maksimaalse pinge tsooni. Võrkelementide suurust tihendati funktsiooni *sphere of influence* abil (vt Sele 5.10)  $0,5$  millimeetrini, mille tulemusena elementide arv tõusis  $8600$  elemendini. [40]



Sele 5.10 Kontaktitsooni tihedam võrgustik

Koormuse 2000 N juures avaldub vaheseib pinnale maksimaalne rõhk 80 MPa (vt Sele 5.11), mis ei tekita vaheseibi materjali pinnale purustavaid kahjustusi.

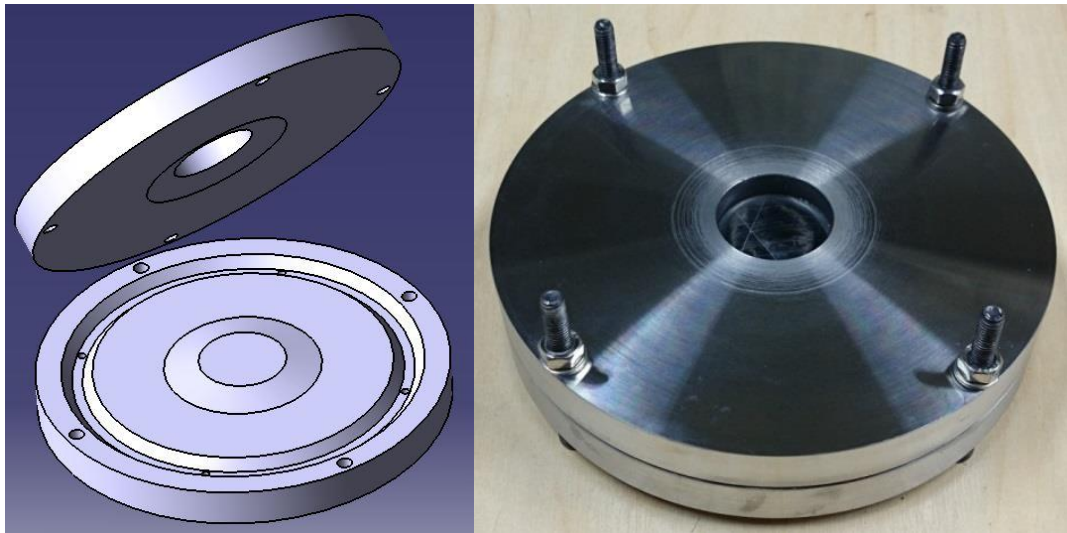


Sele 5.11 Vedruseibi separaatoril tekkivad kontaktpinged

Tsüklilise koormuse toimel tekib materjali pinnale kontaktpinna hõõrdejälg. Soovituslik on kasutada suurema kuulkõvadusega materjali separaatori valmistamiseks. Teise lahendusena saab vedruseibi projekteerida suurema tugipinnaga, kuid see mõjutab oluliselt vedruseibi elastsusomadusi ning nõuab uue põhjaliku analüüsi teostamist.

## 5.2 Prototüüpdetaili valmistamine

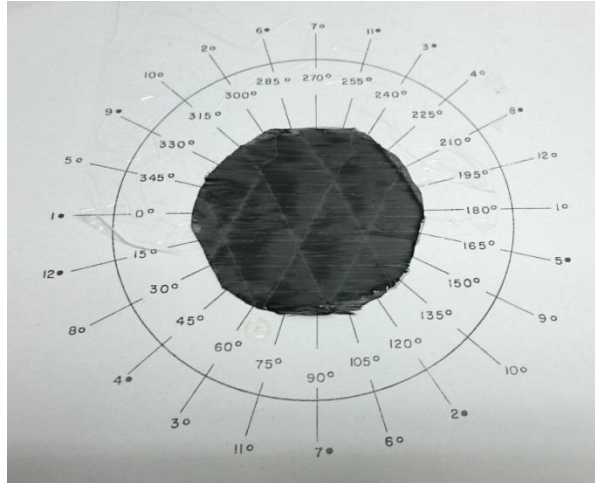
Selleks, et hinnata analüüsi tulemusena valitud Belleville vedruseibi geometria, jäikuse ja deformatsiooni vastavust teoreetilistele arvutustele, projekteeriti antud lõputöö raames programmiga Catia V5 R21 kahepoolne terasest lamineerimise prototüüpvorm näidisvedruseibide toorikute valmistamiseks (vt Sele 5.12).



Sele 5.12 Projekteeritud prototüüpvorm (vasakul) ja CNC treitud prototüüpvorm (paremal)

Vormi ülemine- ja alumine osa valmistati CNC treiteenust pakkuvast ettevõttes. Kuna vormimisel surutakse laminaadi kangakihtid tihedalt üksteise vastu, eraldub laminaadist ka üleliigset vaiku ja selleks, et töö teostamine oleks mugav, projekteeriti vormi alumisse poolde vaigu kogumise soon, vältimaks käte ja riiete määrdumist ning vaigu valgumist tööpindadele. Vormipoolte korduvaks sulgemiseks kasutati 12.9 tugevusklassiga M6 sisekuuskantpolte ja M6 mutreid.

Tagamaks prototüüp vedruseibide ühtlaseid ristlõikepaksusi, kasutati vormi liitepindade vahel sobiva paksusega distantsseibe. Lamineerimistööd teostati FS Team Tallinn meeskonna Tallinna Tehnikaülikooli VI korpuses asuvates tööruumides. Proovidetailide valmistamisel kasutati FS Team Tallinn lõiketööriistu, isikukaitsevahendeid, kaalumisevahendeid, materjalilaos olevaid epoksiidvaike ja kangaid ning vaakumpumba süsteemi. Tagamaks prototüüpdetailides samasugust kangakihtide telgsust, kasutati laminaadi kihtide ladumisel kiu nurga määramiseks pakkekile alla asetatud nurgakraadidega sektordiagrammi (vt Sele 5.13).



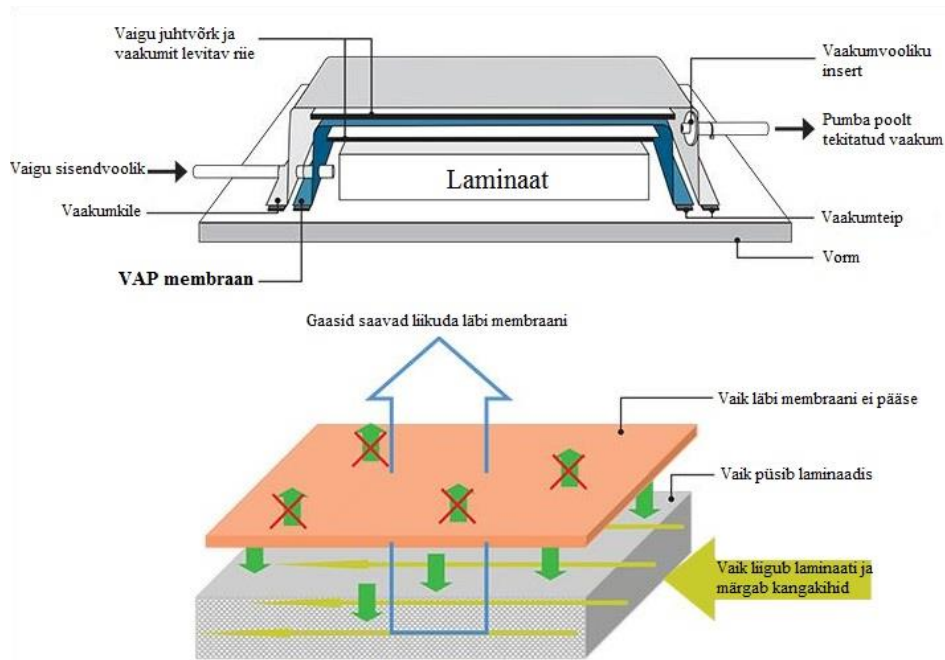
Sele 5.13 Nurgakraadidega sektordiagramm kanga telgsuse määramiseks

Ühe prototüüp taldrükvedru lamineerimise tööetapid olid järgmised:

- 1) Vormipoolte vahatamine, vältimaks laminaadi liimumist vormi külge
- 2) Süsinikkiudkangast ümartoorikute lõikamine
- 3) Kangaste kaalumine digitaalsel kaalul (täpsus 0,1 g)
- 4) Vaigu koguse kaalumine ja kõvendiga segamine vastavalt kangaste kaalule
- 5) Kangakihtide märglamineerimine või vaakuminfusioonimine
- 6) Laminaadi vormi tõstmine
- 7) Vormipoolte sulgemine poltliidete ühtlase pingutamise teel
- 8) Laminaadi kuivamine toatemperatuuril 24 h
- 9) Laminaadi järelkõvendamine ahjus 8 h temperatuuril 82 °C

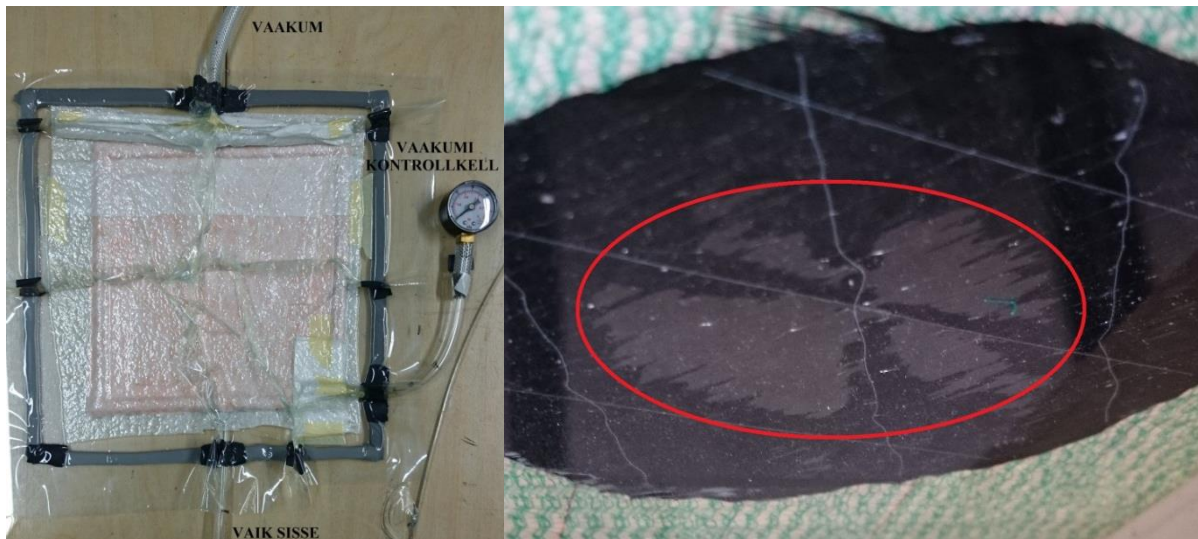
Lamineerimistöde teostamisel kasutati prototüüpdetaili parima võimaliku kvaliteedi saavutamiseks kahte erinevat valmistusmeetodi – märglamineerimine ja vaakuminfusioonimine. Märglamineerimise korral toimub kangakihtide vaiguga märgamine ning laminaati asetamine ükshaaval. Iga paigaldatud vahekiht rullitakse üle spetsiaalse tööriistaga, et tagada täielik märgumine ning maksimaalne võimalik õhumullide eemaldamine laminaadist. Peale laminaadi koostamist tõstetakse laminaat vormi ning vorm suletakse.

Vaakuminfusioonimise teostamisel rakendati laminaadi märgamisel VAP tehnoloogiat, mille lühend tuleneb ingliskeelsest nimetusest *Vacuum Assisted Process* ehk vaakumiga assisteeritud protsess (vt Sele 5.14). Tehnoloogia eesmärgiks on minimeerida õhumullide kogust laminaadis ning suurendada nii laminaadi tiheduse protsenti (ingl. k *Fiber volume fracture*).



Sele 5.14 VAP membraani tööpõhimõtte kirjeldus [45]

Antud lõputöö raames teostatud VAP tehnoloogia vaakuminfusioonimised UD kangast moodustatud laminaadi puhul ebaõnnestusid. Laminaat ei märgunud infusiooni käigus täielikult – keskosa ei märgunud (vt Sele 5.15) kanga kiudude suure tiheduse tõttu. Teostada tuleb täiendavad katseid – vastasel juhul vaakuminfusiooni tootmises kasutada ei saa.



Sele 5.15 VAP vaakuminfusioon (vasakul) ja kanga lõimise tihedusest tingitud kuiv ala laminaadi tsentris (paremal)

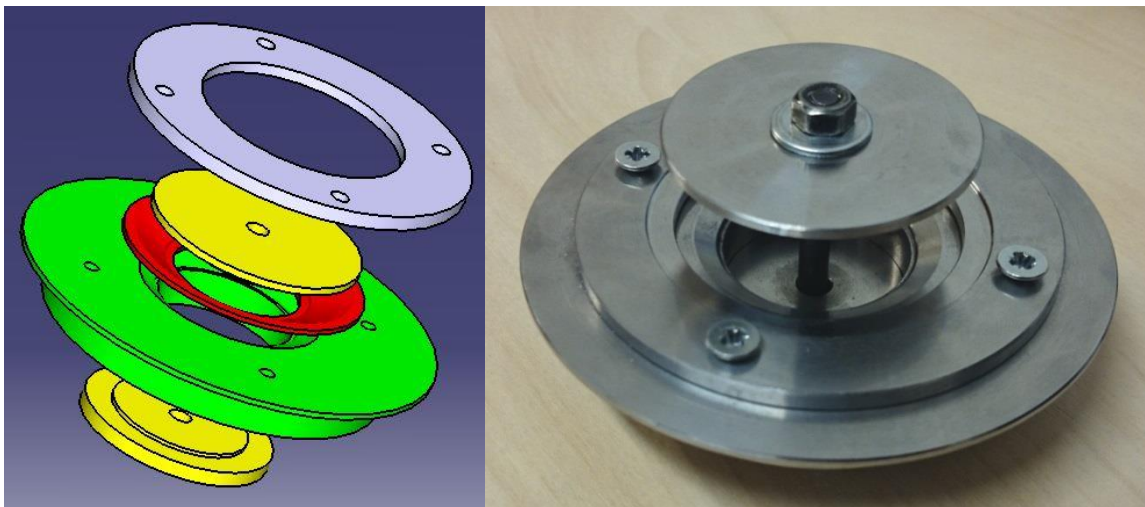
Lamineerimistöö tulemusena valmis Belleville vedrutaldriku toorik (vt Sele 5.16) ja lõppdetaili valmistamiseks kasutati CNC lõiketööstust.





Sele 5.16 Prototüüpvorm ja vormist eemaldatud vedrutaldriku toorik

Vedrutaldriku lõiketöötlemiseks projekteeriti programmis Catia V5 R21 neljaosaline terasest abirakis (vt Sele 5.17), mille abil oli võimalik kahte paigutust kasutades lõppdetail välja lõigata.

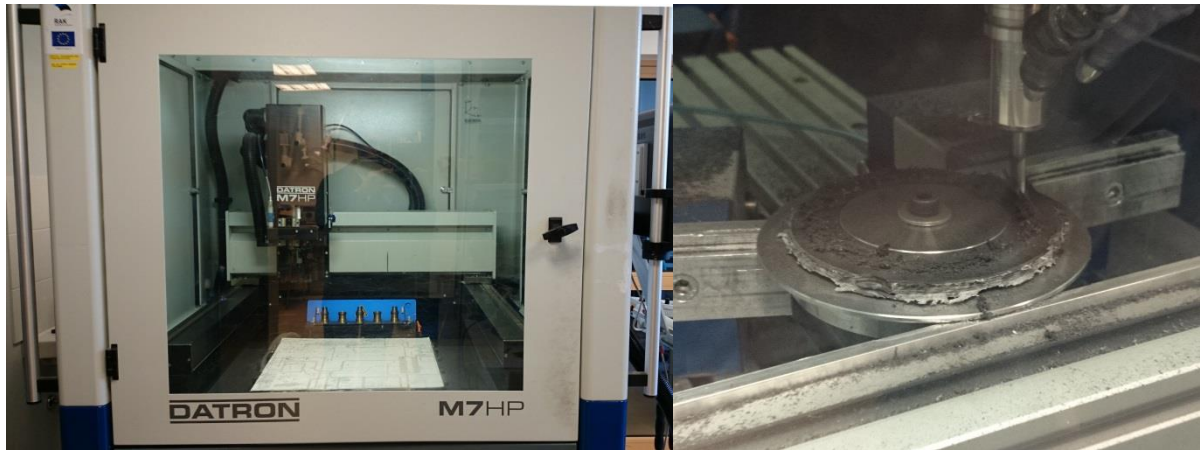


Sele 5.17 Lõikerakise 3D mudel koos vedrutaldrikuga (vasakul) ja treitud lõikerakis (paremal)

Detaili lõiketöötlemisel katsetati enne CNC freesimist ka manuaalset treimist. Eesmärgiks hoida kokku kulusid freesimise programmi kirjutamisest ning CNC freespingi kallima tunnihinde arvelt. Treipingis lõiketöötlemise katsetused oodatud tulemust ei andnud.

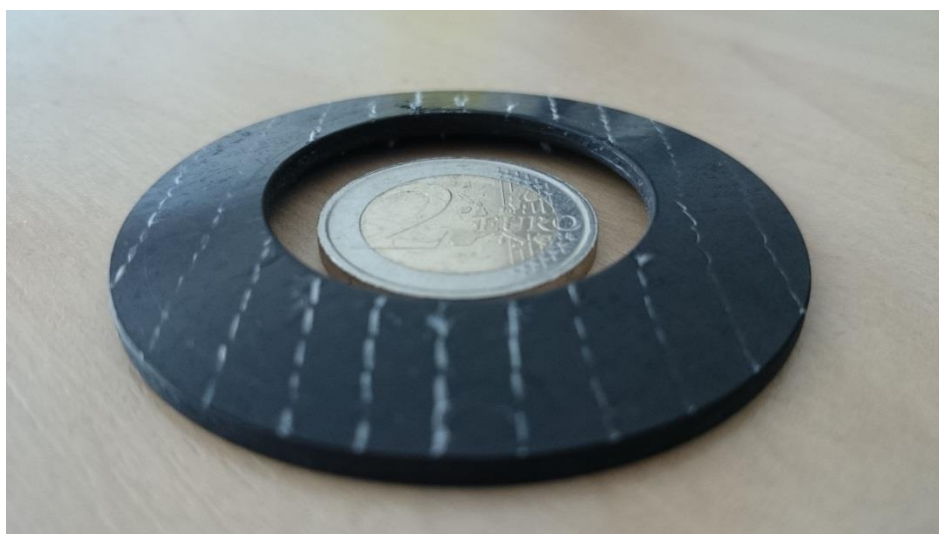
Treimisel ei õnnestunud saavutada detaili puhast lõikeserva. Lõikeserv jäi narmendav ning laminaadi kiud murdusid lõikamisel, mille tõttu hilisemal detaili koormamisel omab detail delamineerumise ohtu. Põhjus ebaõnnestunud lõike teostamisel oli tõenäoliselt liiga madal

lõikekiirus ning piisavalt terava lõiketera puudumine. Vedrutaldrikute lõiketöötus sooritati Tallinna Tehnikaülikooli II korpuses Prototuba OÜ freespingis Datron M7 HP (vt Sele 5.18). Lõiketöötusel kasutati lõppviimistluslõike teostamisel eriotstarbelist Jabro™ JC870 lõiketera süsinikkomposiitlaminaatide freesimiseks, mis tagas detaili hea lõikekvaliteedi [46].



Sele 5.18 Freespink Datron M7HP (vasakul) ja taldrikvedru freesimine (paremal)

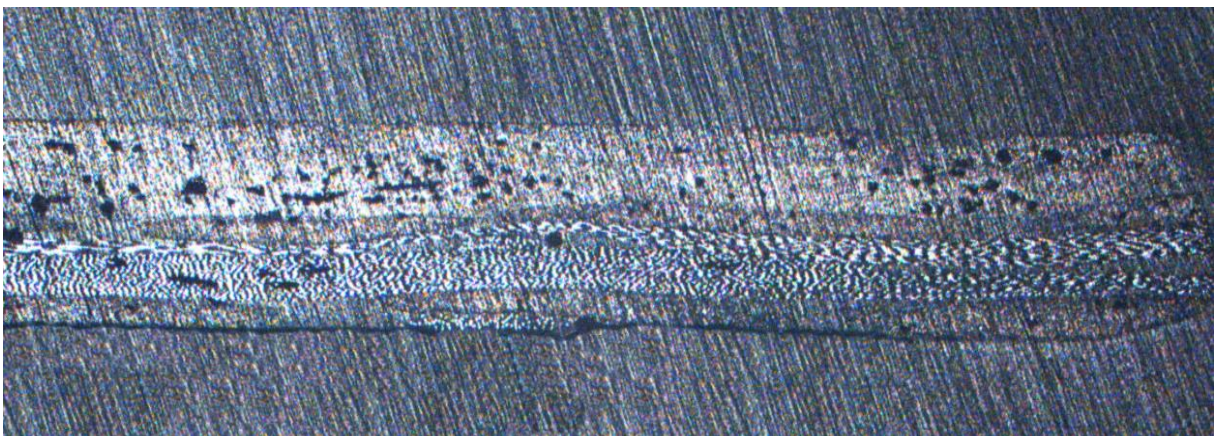
Freesimistöö tulemusena valmis Belleville taldrikvedru prototüüp vedruelement (vt Sele 5.19), millega teostati Tallinna Tehnikaülikooli VB korpuse materjaliteaduste katselaboris Ansys 14.5 Composite PrepPost parameetrilise arvutusmooduli tulemuste kontrollimiseks purustavad survetestid. Lõputöö raames valmistati erinevatel meetoditel 13 katsekeha, kasutades kahte erinevat epoksiidvaiku. Prototüüpvedrude testimisest ja laminaadi kvaliteedist annab ülevaate järgnev alapeatükk 5.2.1.



Sele 5.19 Belleville taldrikvedru prototüüp

### 5.2.1 Prototüüpvedrude testimine ja kvaliteet

Belleville taldrikvedru prototüüpide valmistamisel katsetati ja analüüsiti kahe erineva lamineerimismeetodi kvaliteeti ja selle mõju taldrikvedru mehaanilistele omadustele. Käsilamineerimine märjalt ja VAP tehnoloogial põhinev vaakuminfusioon olid käesoleva lõputöö uurimisalusteks meetoditeks. Täiendavalt eksperimenteeriti epoksiidvaigu degaseerimisega ja hinnati selle lisaetapi mõju laminaadis esinevate õhutühimike vähendamisele. Laminaadi struktuuri hindamiseks valmistati vedruseibide ribadest vaiku valatud katsekeha. Katsekeha lõigati pooleks, et hinnata vedruseibide laminaatide ristlõigete struktuuri (vt Sele 5.20). Vajaliku mikroskoopilise pildikvaliteedi tagamiseks teostati ristlõigetele vesimikrolihv liivapaberi teralisuseni P1200. Laminaadi materjali struktuuri vaatlemiseks ja pildistamiseks kasutati Tallinna Tehnikaülikooli VB korpuse materjaliteaduste katselabori metallimikroskoopi Zeiss AXIOVERT 25. Sele 5.20 on kujutatud vedrutaldriku number 7 ristlõike 200. kordne suurendus, mis valmistati biakiaalsest süsinikkangast, kasutades meetodina märglamineerimist. Maatriksina kasutati degaseerimata epoksiidvaiku Pro-Set INF 114.



Sele 5.20 Vedrutaldrik nr 7 ristlõike suurendus 200x

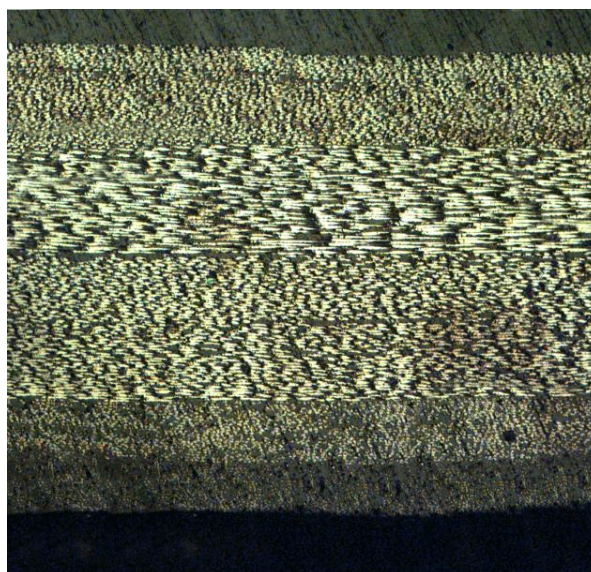
Sele 5.20 ristlõikest on hästi näha struktuuris olevaid musti alasid, milleks on laminaadis olevad õhumullid. Käsilamineeritud laminaadi kihtides esineb degaseerimata vaigus olevaid õhumulle. Tõenäoliselt on õhutühimike olemasolu tingitud ka kangaste asetamisel kihtide vahele lukustunud õhust, mis hoolimata vormipoolte kokkusurumisest ei ole laminaadi struktuurist välja pääsenud. Sele 5.21 illustreerib olukorda, kus degaseerimata vaiguga märglamineeritud detaili vormist eemaldamisel on näha laminaadist välja pressitud vaigus suures koguses õhumulle.



Sele 5.21 Vedrutaldriku tooriku laminaadi maatriksis olevad õhumullid

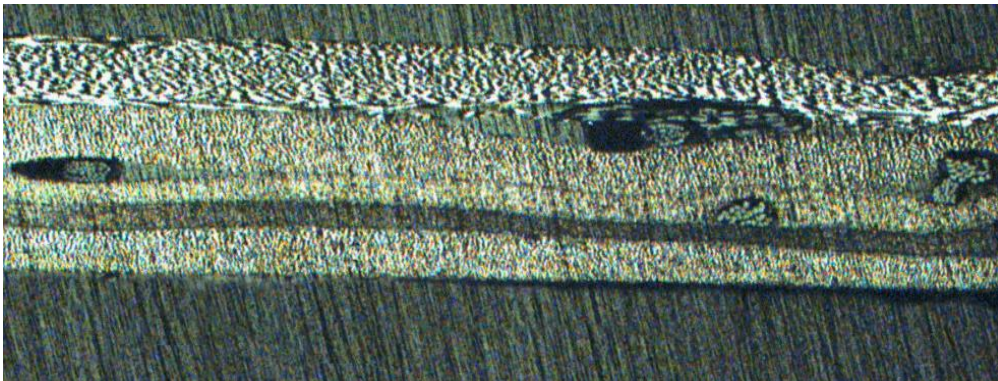
Vedruseibi struktuuris esinevad õhutühimikud vähendavad laminaadi väsimustugevust ning on pingekontsentraatoriks laminaadi kihtidevahelise nihkepingete tekkimisel.

Järgnevalt teostati biakiaalse süsinikkiudkangaga lamineerimise kombinatsioon, kus epoksiidvaik degaseeriti ning laminaat märjati vaakuminfusiooni kasutades. Vaigu degaseerimine kujutab endast vaigu segamistopsi asetamist degaseerimise anumasse, millele rakendatakse vaakumpumba abil vaakum. Mõneminutilise protsessi käigus eemaldub vaigu koostisest 90% segamise käigus vaigu sisse tekkinud õhumullidest. Peale laminaadi täielikku märgumist hoiti laminaati vaakumi all kuni epoksiidvaigu geelistumiseni, misjärel geelistunud maatriksiga laminaati suleti vormipoolte vahele. Viimasel meetodil valmistatud vedrutaldrik number 10 laminaadi struktuur peale toatemperatuuril kõvenemist on näidatud Sele 5.22.



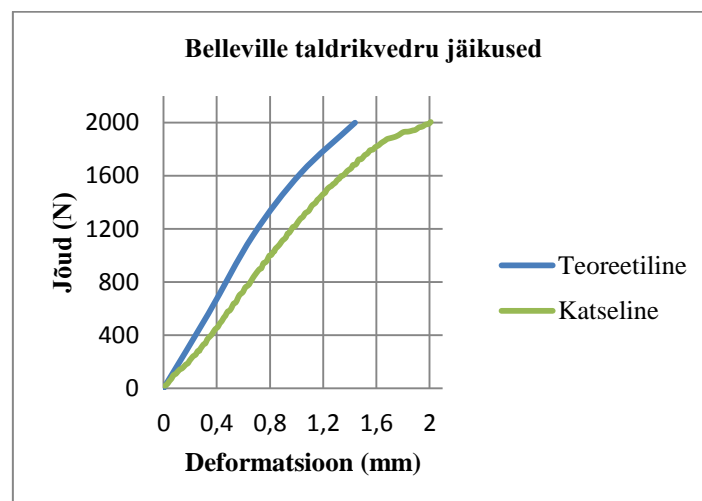
Sele 5.22 Vedrutaldrik nr 10 täielikult impregneerunud laminaat (suurendus 250x)

Katsetamiste käigus tehti huvitav tähelepanek UD süsinikkiudkangaste kohta. Nimelt hoolimata vaigu degaseerimisest, põhjalikust käsilamineerimisest ja vaakuminfusioonimisest, eksisteerivad UD kangast lamineeritud detailide struktuurides märgatavad üksikud õhutühimike kolded (vt Sele 5.23). UD kanga puhul ei täitnud vaakuminfusioonimine soovitud tulemust, kuna ühesuunalise kanga kiudude suur tihedus takistab vaigu frondi levikut laminaadis. Õhutühimikud laminaadis tähendavad aga vähenenud väsimustugevust või märgatavat jäikuse langust peale esimesi surveteste.



Sele 5.23 UD kangaga laminaadis olevad suured õhutühimikud (suurendus 200x)

Erinevatel meetoditel lamineeritud prototüüpdetailide jäikusi võrreldi survekatsete abil. Taldrikvedrude jäikuste võrdlemisel hinnati ka parameetrilise arvutusmooduli kalkulatsioonide täpsust. Prototüüp taldrikvedrude survekatsed teostati Tallinna Tehnikaülikooli katseseadmel Instron 8516. Katse teostati parima kvaliteedi taganud tootmismeetodi abil ning biaktsiaalsest süsinikkangast valmistatud vedrutaldrikuid kasutades. Teoreetilise ning tegeliku jäikusgraafiku võrdlus on näidatud Sele 5.24.



Sele 5.24 Belleville taldrikvedru teoreetiline ja reaalne jäikus

Graafikult on näha, et biaktsiaalsest kangast valmistatud vedruseibi tegelik deformatsioon on teoreetilisest vedruseibi läbipaindest 0,6 mm võrra suurem. Ligi 30% suurem läbipaine on tingitud kahest asjaolust. Esimene neist tuleneb analüüsi mudelist. Vedruseibi laminaat analüüsikeskkonnas on oma ülesehituselt ideaalilähedane, mis tähendab, et laminaat on vaba defektidest ning kanga kiud asetsevad paralleelselt olenemata detaili kumerpindadest. Laminaadis olevad kangakiud töötavad maksimaalsele võimalikule tõmbe – ja survepingetele ning seeläbi materjali pikenemise omadused soosivad väiksema deformatsiooni teket. Teine põhjus, miks reaalne jäikusgraafik omab suuremat deformatsiooni, tulenebki laminaadi kvaliteedist ja defektidest. Katsegraafikul on märgatav reaalse katsekeha graafiku madalam lõpuosa 1,8 mm läbipaine juures. Põhjuseks on elastse deformatsiooni piiri ületamine ning vedrutaldriku laminaadis toimunud pindmiste kihtide kiudude purunemine.

Testkehade koormamisel tuvastati detailide purunemine survepingete tsoonist lähtuvate nihkepingete tõttu. Laminaadi ülemistes kihtides toimub kanga kiudude purunemine, kui ületatakse vedrutaldriku elastsus ehk antud vedrutaldriku puhul, mille koonuse nurk on 12,5 kraadi ja vedrutaldriku vabakäik 3mm, juhtub see 1,8 mm deformatsiooni juures, mis soovitud läbipainet arvestades ei ole aktsepteeritav. Nimetatud asjaolust tingituna on vajalik täiendavate testide teostamine kõrgema elastsusmooduliga süsinikkangastest ja vaigust valmistatud katsekehadega. Ühe ettepanekuna on soovitav valmistada katsekehad eelimmutatud süsinikkangast ja võrrelda testiandmeid käsilamineeritud vedrutaldrikute katsetulemustega.

Kuna vedru soovitava jäikuskarakteristiku tagamiseks on amortisaatorile vaja paigutada 20 vedruseibi, mille käiguks on 40 mm, siis antud olukorras on ühe vedruelemendi käiguks vajalik 2 mm. Kuna uurimise käigus väljavalitud taldrikvedru geomeetriaal puudub nihkepingetest tekkivate purunemiste tõttu varutegur, siis vedru laminaat ei ole aktsepteeritav, arvestades vedru soovitud funktsionaalsust ning eluiga. Funktsionaalsuse seisukohast on süsinikkomposiit taldrikvedrule ohtlikuks raja ebatasasusest tingitud amortisaatori täielik kokkusurumine (ingl k. *full bump*). See tähendaks vedrutaldrikute omavahelist täielikku kokkusurumist, mis analüüsi tulemustena lõppeb laminaadi kihtide purunemisega, mille tõttu väheneb vedru jäikus ja sellega koos vedru väsimustugevus. Vedrutaldrikute täieliku kokkusurumise piiramiseks on soovitav FS Team Tallinn vedrustuse osakonnal vedruelementide koostu projekteerida stopperseibid.

## 6. BELLEVILLE TALDRIKVEDRU VORMI PROJEKTEERIMINE

Tallinna Tehnikaülikooli, Tallinna Tehnikakõrgkooli ja Formula Student võistluse loojate üheks põhieesmärgiks on meeskonna liikmete poolt ülikoolis omandatavate teoreetiliste teadmiste rakendamine praktilises töös. Tulevastel noortel inseneridel on kogu hooaja vältel antud võimalus lähedalt teha tutvust erinevate tootearenduse etappidega, millest ühe osa moodustab tootmistehnoloogiate tundmaõppimine ning nende rakendamine reaalse toote valmistamisel.

Nelja vedru valmistamiseks on vaja projekteerida vorm süsinikkiud laminaadile vajaliku kuju andmiseks. Vormi valmistamise põhikriteeriumiks on mitme taldrikvedru üheaegne vormimine, mille juures on vaja tagada laminaadi maksimaalsed mehaanilised omadused. Vormi on vaja vedruelemendi tootmisprotsessi kiirendamiseks ning optimeerimiseks, kuna üks tooriku valmimise tsükkel on 39 tundi pikk. Nelja vedru valmistamiseks on vaja lamineerida 80 taldrikvedru, mis prototüüpvormi kasutades teeks toomisperioodi pikkuseks ligi 4,5 kuud. Arvestada tuleb ka asjaolu, et tegemist on väikeseeria tootmisega ning väga keerulist vormi luua ei ole majanduslikult otstarbekas.

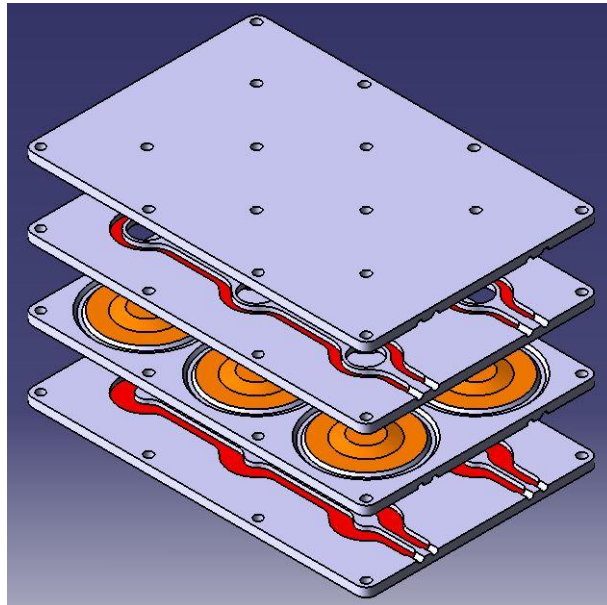
Järgnevates alapeatükkides kirjeldatakse arendustöö käigus tekkinud erinevaid vormide kontseptsioone, tuuakse välja nende plussid ja miinused, ning tehakse vormi valik tootmise läbiviimiseks. Vormi valikul saavad määravaks FS Team Tallinn poolt esitatud täiendavad nõuded tootele:

- 1) Kasutusmugavus ja ergonoomilisus,
- 2) minimaalne detailide järeltöötlus,
- 3) vedrutaldriku kahepoolne hea pinnakvaliteet,
- 4) hea laminaadi kihtide pakketihedus.

Kahest viimasest nõudest lähtuvalt kasutatakse Belleville taldrikvedrude valmistamiseks vaakumvormimise asemel kuumutusega pressvormimist. Laminaadi kuumutamine on vajalik maksimaalselt plastse ning sitke laminaadi saavutamiseks, tagamaks kõrge pehmenemise temperatuuri ning vastupidavuse laminaadi kihtidevahelistele nihkepingetele.

## 6.1 Vedelikkuumutusega pressvorm

FS Team Tallinn pikaajaliseks koostööpartneriks on seitsme hooaja vältel olnud Uddeholm Tooling Eesti OÜ, kes varustab meeskonda alumiinium- ja terastoorikutega. Survevormimisel on Uddeholmi soovitusel otstarbekas kasutada survevaluvormimisel laialdaselt kasutatavat Impax Supreme eelkarastatud valuvormiterast [47], millel on väga head poleeritavuse omadused. Vedelikkuumutusega pressvorm (vt Sele 6.1) on projekteeritud töötama vesi- või õlikuumutusega. Vormi kontseptsioon võimaldab toota ühe kuumutustsükliga 6 vedruseibi toorikut. Vormipindade kuumutuskanalid on asetatud detaili kujupindade alla kummalegi vormipoolele – kuumutuskanalid tekivad vormipoolte hermeetilisel liitmisel. Vormi massiivne disain teeb vormi gabariitmõõtmeteks 390mm x 265mm x 60mm ja massiks 28,3 kilogrammi.



Sele 6.1 Vedelikkuumutusega pressvorm

Vesi- või õlikuumutusega vormi vedeliku temperatuuri ning kuumutustsüklite programmeerimiseks on ostutoodetena müügil erinevaid kontrollereid (vt Sele 6.2), millesse on ühildatud pumbad, juhtklapid, küttekehad ning mikroprotsessoriga juhtprogramm. Kuna näiteks eelimmutatud süsinikkangaste puhul ulatuvad nõutavad kuumutustemperatuurid sõltuvalt tootjast üle 100°C, siis see eeldab kuumutusseadme vee rõhu all kuumutamise võimalust, mille abil on vee temperatuur tõsta 160 °C lähedale. Õlikuumutust kasutades on võimalik detaile termotöödelda 350-360 °C kraadi juures. [48] Komposiitmaterjalide rakenduses nii kõrgeid temperatuure siiski ei vajata.





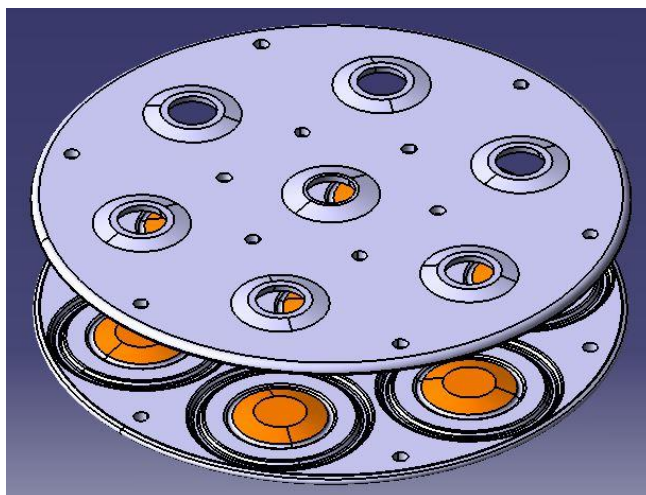
Sele 6.2 Kontroller Shini STM-W [49]

Vormipoolte valmistamiseks on vaja kasutada CNC freesimist. FS Team Tallinn puhul on ülikooli laboris võimalik selleks kasutada 3-teljelist CNC freespinkki Bridgeport GX 1000. Lõiketötlusprogrammide valmistamiseks kasutab tudengivormeli meeskond MasterCam X7 tarkvara, hindamaks vormide töötlemiseks kuluvat aega.

Vormipoolte kokkusurumiseks on soovitatav kasutada hüdraulilist pressi, et saavutada laminaadi kihtide ühtlane pakketihedus. Toorikute ühtlase ristlõike paksuse saavutamiseks asetatakse vormi liitepindade vahele soovitava kõrgusega distantspuksid. Peale vormipoolte kokkupressimist suletakse vorm poltliiteid kasutades, ning vabastatakse pressi alt. Hüdraulilise pressi puudumisel piisab, kui vorm suletakse ainult poltliiteid kasutades. Viimasel juhul tuleb luua poltide pingutuse järjekord tagamaks ühtlase koormuse jaotumise tooriku kujumoodustavatele pindadele.

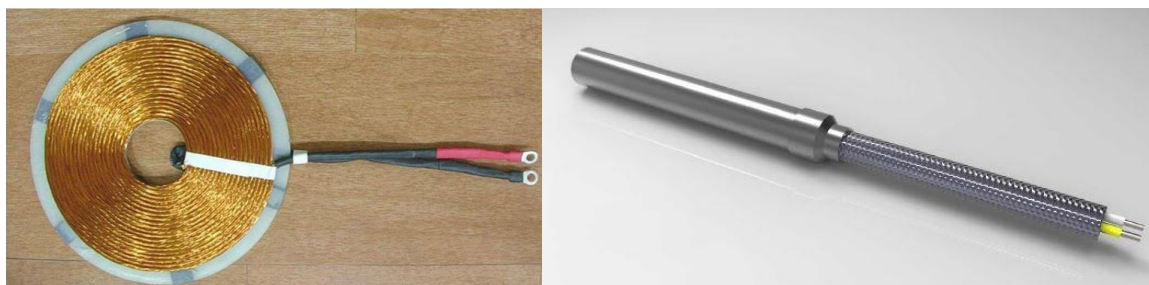
## 6.2 Elektrikuumutusega pressvorm

Vedrütaldrikute kõrge kahepoolse viimistlustaseme saavutamiseks on elektrikuumutusega pressvormi (vt Sele 6.3) valmistamisel samuti otstarbeks kasutada Impax Supreme eelkarastatud survevaluvormiterast, millel on head lõiketöödeldavuse ja materjali pinna pooleeritavuse omadused. Vormi läbimõõt on 280 mm, kõrgus 35 mm ning mass ilma kuumutuselementideta on 12 kilogrammi. Võrreldes vedelikkuumutusega pressvormiga on antud kontseptsioon rohkem kui 50 % kergem ning ühe vormitsükliga on võimalik toota seitse vedrütaldriku toorikut.



Sele 6.3 Induktsioonkuumutusega pressvorm

Küttekehadena sobib laminaadi maatriksi termotöötlemiseks kasutada vormipooltes induktsioonpliitidel kasutatavaid induktoreid (vt Sele 6.4), terasesulamist või vasest küttekehi, padrunküttekehi (vt Sele 6.4) või mikaniit küttekehi. Temperatuuri juhtimiseks on vaja vormi kontseptsiooni integreerida kontrolleri.



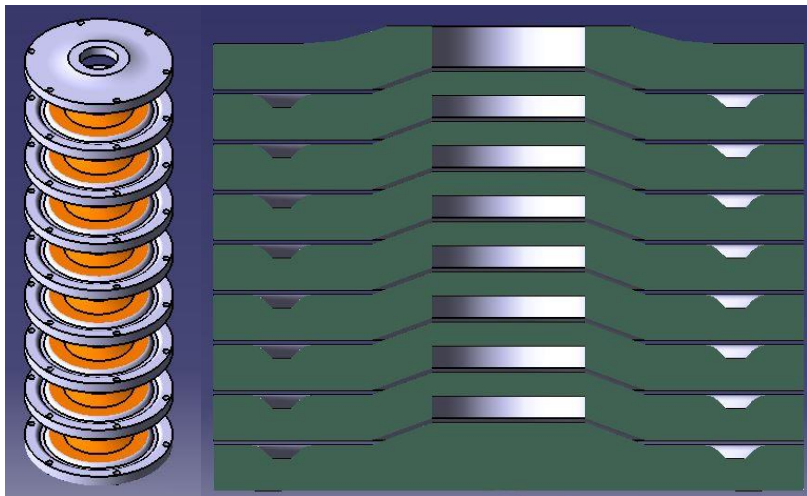
Sele 6.4 Induktor Zephyr (vasakul) ja padrun küttekeha Heatex (paremal) [50][51]

Vormipoolte valmistamiseks on vaja kasutada CNC freesimist. FS Team Tallinn puhul on ülikooli laboris võimalik selleks kasutada 3-teljelist CNC freespinkki Bridgeport GX 1000. Lõiketöötlusprogrammide valmistamiseks kasutab tudengivormeli meeskond MasterCam X7 tarkvara, tegemaks tööriistade valikud ja optimeerimaks vormide töötlemiseks kuluvat aega.

Antud kontseptsioonis on samuti vajalik vormipoolte kokkusurumiseks kasutada hüdraulilist pressi, saavutamaks laminaadi kihtide hea pakketihedus. Toorikute ühtlase ristlõike paksuse saavutamiseks asetatakse vormi liitepindade vahele soovitava kõrgusega distantspuksid. Hüdraulilise pressi puudumisel piisab, kui vorm suletakse poltliiteid ning ühtlast pingutuskeemi kasutades.

### 6.3 Ahikuumutusega moodulpressvorm

Nii nagu kahe eelneva kontseptsiooni puhul on ka kolmanda vormi materjaliks Uddeholm Tooling Eesti OÜ poolt vahendatav Impax Supreme survealuvormi teras. Antud lahendus võimaldab ühe vormitsükliga valmistada 8 taldrikvedru toorikut. Ahikuumutusega moodulpressvormi (vt Sele 6.5) diameeter on 130 mm ja kõrguseks 115 mm. Kahe eelneva vormi konstruktsiooniga võrreldes on tegemist kõige kergema vormiga. Antud vormi koost koosneb üheksast detailist, mille kogumass on 8,7 kilogrammi.



Sele 6.5 Moodulpressvorm

Laminaadis kasutatava maatriksi maksimaalsete mehaaniliste omaduste saavutamiseks on antud vormikontseptsiooni puhul termotöötlus vaja teostada kuumutusahjus. FS Team Tallinnale on siinkohal sobiv kasutada Tallinna Tehnikaülikooli materjalitehnika termotöötluste labori programmeeritavat noolutusahju Nabertherm N 15/65HA (vt Sele 6.6). Kuumutustükkel tuleb programmeerida vastavalt vaigu tootja tehnilisele andmelehele.



Sele 6.6 Nabertherm N 15/65HA [52]

Vormi detailide valmistamiseks on otstarbekas kasutada ümartoorikut, mille lõiketöötlust saab teostada Tallinna Tehnikakõrgkooli lõiketöötustuslabori CNC treipingis. Treimise puhul on võrreldes freesimisega väiksem materjalikulu ning lühem tööaeg. Moodulvormile piisab kolme detaili programmi kirjutamisest, kuna seitse detaili vormi koostus on identsed. Moodulpressvormi puhul on vajalik vormi moodulite kokkusurumiseks kasutada hüdraulilist pressi, saavutamaks laminaadi kihtide hea pakketihedus. Toorikute ühtlase ristlõike paksuse saavutamiseks asetatakse vormi liitepindade vahele soovitava kõrgusega distantspuksid. Hüdraulilise pressi puudumisel piisab, kui vorm suletakse poltliiteid ning diagonaalis neljaastmelist tähtpingutuskeemi kasutades.

## 6.4 Sobiva vormikontseptsiooni valik

FS Team Tallinn hooajasisesesse tootmisperioodi sobiva vormikontseptsiooni valik tehakse sarnaselt vedruelemendi valikul kasutatud 5-punkti süsteemis, hinnates meeskonna jaoks tähtsaid kriteeriume ja vormide valmistamistehnoloogiat osakaalude tähtsusega, kus 1 on vähetähtis ja 5 väga tähtis omadus. Hinded ühest viieni on hinnangu andmiseks jaotatud nii, et hinne “1” märgib kõige vähemsoosivat ja hinne “5” olemuselt väga head pooltargumenti. Osakaal ja hinne korrutatakse omavahel. Enim punkte kogunud vorm on meeskonnale parim võimalik valik vedrude tootmiseks. Hindamise tulemused on näidatud Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Sobiv vormikontseptsioon vedrutaldrikute tootmiseks [47]

Vedelikkuumutusega pressvorm	Kommentaar	Osa-kaal	Hinne
Toormaterjali kulu	Vormi tootmiseks on vaja osta neli 20 mm paksust Impax Supreme toorikut kogumassiga 73,6 kg	3	6
Vormi ergonomilisus	Vormi projekteeritud kogumassiks on 28,3 kg. Transport koos lisaseadmetega keeruline	5	10
Lõiketöötluste keerukus	Kaks üksikpaigutusega ning kaks kahe paigutusega detaili freesitakse CNC freespingis	4	12
Ostutooted	Vedeliku kuumutamiseks on vaja kontrolleri, ühendusvoolikud ja –stutsid. Poldid ja mutrid vormi sulgemiseks	2	4
Laminaadi termotöötlus	Kuumutusvedelikuna tuleks kasutada rõhu all vett. Võrreldes õliga tagatakse ühtlasem temperatuur ning väiksem energiakulu vormi kuumutamisel ja jahutamisel	4	12
Tootmisaeg ja aeg	Ühe vormitsükliga võimalik toota 6 toorikut. Nelja vedru tootmiseperioodi pikkuseks 30 päeva	5	17,5
<b>Kokku</b>			<b>61,5</b>

<b>Elektrikumutusega pressvorm</b>	Kommentaar	Osa-kaal	Hinne
Toomaterjali kulu	Tootmiseks vaja ümartoorikuid 380 mm x 30 mm ja 380 mm x 15 mm. Impax Supreme toorikute massiks on 40 kg	3	9
Vormi ergonoomilisus	Vormi projekteeritud kogumassiks on 12 kg. Vorm on kohmakas ja koos lisaseadmetega tülikas transportida	5	15
Lõiketöötuse keerukus	Kaks vormipoolt vaja freesida kahes paigutuses CNC freespingis	4	16
Ostutooded	Vormipooltesse on vaja küttekihi, termobaare ning juhtkontrollerit. Poldid ja mutrid vormi sulgemiseks	2	6
Laminaadi termotöötlus	Termotöötlust tuleb jälgida termobaaride abil. Elektriküttekahel puudub jahutamise võime.	4	12
Tootmismaht ja aeg	Ühe vormitsükliga võimalik toota 7 toorikut. Nelja vedru tootmisperioodi pikkuseks on 25 päeva	5	20

Kokku

**78**

<b>Ahikumutusega pressvorm</b>	Kommentaar	Osa-kaal	Hinne
Toomaterjali kulu	Tootmiseks vajalik ümartoorik läbimõõduga 165 mm ja pikkusega 210 mm. Terastooriku mass 35 kg	3	12
Vormi ergonoomilisus	Vormi projekteeritud kogumassiks on 8,7 kg	5	20
Lõiketöötuse keerukus	Vormi 9 detaili on vaja treida CNC treipingis	4	16
Ostutooded	Poldid ja mutrid vormi sulgemiseks	2	10
Laminaadi termotöötlus	Termotöötuseks sobiv noolustusahi Nabertherm N15/65HA. Kuumutus- ja jahutusajad on pikad	4	12
Tootmismaht ja aeg	Ühe vormitsükliga võimalik toota 8 toorikut. Nelja vedru tootmisperioodi pikkuseks on 22 päeva	5	22,5

Kokku

**92,5**

## 7. VÕISTLUSSARJA KULUARUANNE JA VEDRU TOOTMISKULUD

Formula Student võistlussarja üheks lahutamatuks osaks on majandusliku kuluaruande ehk *Cost Report*'i koostamine ning selle presenteerimine kohtunikele. Tegemist on mahuka dokumendiga, milles on välja toodud kõikide vormelauto ehitamisel kasutatud töövõtete, abiseadmete ning rakistuse, ostutoodete ning tudengite endi poolt valmistatud detailide arvutuslikud hinnad. Kuluaruande staatilisel kaitsmisel pööratakse enim tähelepanu kolmele asjaolule:

- 1) Lähtuvalt võistluse formaadist on meeskondadele seatud eesmärgiks ehitada vormelauto, mis on sobilik pühapäeva võidusõitjale – inimesele, kes ei tegele mootorisportiga professionaalsel tasemel, kuid soovib sellelähedast sõiduelamust. Nimetatud kriteeriumist tingituna peavad meeskonnad suutma ehitada vormeli minimaalse eelarvega, tagades seejuures lõpptoote head sõiduomadused ning detailide kõrge kvaliteedi. Enim punkte kogub väikseima kogumaksumusega vormelauto.
- 2) Oluline on sisestatud andmete korrektsus ning loogilisus. Kohtunikel on õigus paluda meeskonna liikmetelt füüsilist tõestust või üles lugemist mõne rohkearvulise detaili kohta. Ebakõla detailide arvus, sisestamata koostu element kuluaruandes või valemite ebakorrektna kasutamine toob meeskonnale kaitsmiselt miinuspunkte.
- 3) Üheks alapunktiks aruande kaitsmisel on tootmise loodussäästlikkus ning taaskasutus ehk *sustainability*. Siinkohal on vajalik põhjendada tootmises kasutatud materjalide ning tootmistehnoloogiate rakendamist ja veenma kohtunikke faktiliselt, et kuluaruandes nimetatud toormaterjalid ja detailide valmistamise meetodid on meeskonna vormelauto ehitamisel parimad võimalikud valikud.

Formula Student kuluaruandes esitatud detailide maksumusi ning tööjõukulusid ei saa võrrelda tänapäeval kasutatavate toodete omahinna kalkulatsioonidega, kuna see põhjustaks meeskondade vahel suure ebavõrdsuse. Kuluaruande koostamiseks on Formula SAE poolt välja töötatud tabelid, kus on välja toodud ostutoodete, erinevate töövõtete, abirakiste kui ka kõikvõimalike kinnitusvahendite ühikhinnad 1000 vormelauto aastase tootmismahu kohta. Nii välistatakse subjektiivsus ning meeskondade aruanded on üheselt mõistetavad ja võrreldavad.

Kuni aastani 2009 oli vormelauto valmistamise piirhinnaks 25000 USA dollarit (dollar on Formula Student'i hinnakalkulatsioonide rahaühik) ning kohustati kulude tõestamiseks esitama ostutšekke. See võimaldas aga reaalse väljaminekute ja arvete võltsimist. Reeglite muudatuste sisseviimine tootmiskulude arvestamisse väldib pettusi ning lihtsustab kohtunike tööd kuluaruannete kontrollimisel. Kavalate ja odavaimate töövõtete ning -ostutoodete kasutamine kuluaruandes on eduka kaitsmise põhialuseks. Järgnevad alapeatükid annavad ülevaate sellest, kuidas koostatakse Formula Student kuluaruannet, tuuakse välja ühe vedruelemendi rakistuse ning tootmise hind, võrreldakse terasvedru kui ostutoote ja süsinikkomposiit taldrikvedru maksumust ja teostatakse reaalne omahinna arvutus ühe vedru tootmiseks. [3][53]

## 7.1 Formula Student kuluaruande näidis

Formula Student kuluaruande ülesehitus on võistluste korraldajate poolt määratud järgnevalt. Majandusliku kuluaruande täitmist alustatakse üksikdetailide valmistamisega seotud kulude tabelite sissekannetega (vt Sele 7.1). Reeglina teeb seda vastava sõlme projekteerimise ja valmistamise ning koostamise eest vastutav isik, kuid aruande täitmine toimub ühissetteõtmisena, et vajadusel keerukamatele detaillahendustele kiire ja odav lahendus leida. Kui üksikdetailide tootmiskulud on teada, täidetakse ära tabel alamkoostude koostamiseks tehtavate töövõtete ning selle juurde kuuluvate ostutoodete maksumuse jaoks. Kolmanda etapina liidetakse omavahel alamkoostude tabelid ning lõppkoostu kulutabelisse (vt Sele 7.2) sisestatakse vormelauto külge monteerimiseks vajaminevate töövõtete maksumused.

University	Tallinn UT								Car #	644	Part Cost	\$ 6,90	
System	Suspension System		FileLink1								Qty	1	
Assembly	Front Bell Crank Assembly		FileLink2						FileLink1				
Part	Bellcrank Plate 1		FileLink3						FileLink2		Extended Cost	\$ 6,90	
P/N Base	71001		Full P/N	FSAEI-14-644-SU-71001-AA					FileLink3				
Suffix	AA												
Details	Bell Crank, Front												
ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Aluminium, Premium	Bellcrank Plate	\$ 4,20	0,24	kg							1,00	\$ 1,01
												Sub Total	\$ 1,01
ItemOrder	Process	Use	UnitCost	Unit	Quantity	Multiplier	Mult. Val.	Sub Total					
1	Machining	Bellcrank plate	\$ 0,04	cm^3	82,29	Aluminium	1	\$ 3,29					
2	Machining Setup, Install and remove	Bellcrank plate	\$ 1,30	unit	1			\$ 1,30					
3	Machining Setup, Change	Bellcrank plate	\$ 0,65	unit	2			\$ 1,30					
4	Anodize	Bellcrank plate	\$ -	unit	1			\$ -					
								Sub Total	\$ 5,89				
ItemOrder	Fastener	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Quantity	Sub Total				
									\$ -				
								Sub Total	\$ -				
ItemOrder	Tooling	Use	UnitCost	Unit	Quantity	PVF	FracInclId	Sub Total					
								\$ -					
								Sub Total	\$ -				

Sele 7.1 Formula Student kuluaruande detailitabel [38]

University	Tallinn UT							Car #	644	Asm Cost	\$ 2 799,13
System	Suspension System									Qty	1
Assembly	Suspension System Assembly							FileLink1			
P/N Base	A7000	Full P/N	FSAEI-14-644-SU-A7000-AA					FileLink2		Extended Cost	\$ 2 799,13
Suffix	AA							FileLink3			
Details											

ItemOrder	Part	Part Cost	Quantity	Sub Total
A7001	Front Bell Crank Assembly	\$ 40,96	2	\$ 81,91
A7002	Rear Bell Crank Assembly	\$ 34,68	2	\$ 69,37
A7003	Front A-arms Assembly	\$ 87,40	1	\$ 87,40
A7004	Front uprights assembly	\$ 111,45	2	\$ 222,89
A7005	Pushrods assembly	\$ 45,43	1	\$ 45,43
A7006	Rear A/Arms Assembly	\$ 110,70	1	\$ 110,70
A7007	Rear uprights assembly	\$ 131,32	2	\$ 262,64
A7008	Front Stabilizing Bar Assembly	\$ 114,49	1	\$ 114,49
A7009	Rear Stabilizing Bar Assembly	\$ 166,16	1	\$ 166,16
A7010	Suspension Mechanism Assemb	\$ 126,17	1	\$ 126,17
			Sub Total	\$ 1 287,17

ItemOrder	Material	Use	UnitCost	Size1	Unit1	Size2	Unit2	Area Name	Area	Length	Density	Quantity	Sub Total
1	Damper, Penske 7800-Piggyback Dbl. Adj. (Kaz Tech.)	Damper, Penske 7800	\$ 337,50	1	unit							4	\$ 1 350,00
2	Suspension Springs, Coil Spring, Steel	Damper, Penske 7800	\$ 25,00	1	unit							4	\$ 100,00
												Sub Total	\$ 1 450,00

## Sele 7.2 Formula Student kuluaruande koostu tabel [38]

Senise meeskonna üheksa tegevusaasta jooksul on vormelite amortisaatoritel kasutatavad keerdvedrud hangitud ostutoodetena ning nendena kuluaruande koostu tabelisse ka kirja läinud. 1000 vormelauto tootmise korral on ühe terasest keerdvedru hinnaks 25 dollarit. Käesolevas lõputöös projekteeritava vedruelemendi Formula Student kuluaruande hinna kalkuleerimiseks tuli töö autoril täita kuluaruande detailitabel.

### 7.1.1 Belleville taldrikvedru kuluaruande detailitabel

Ühe vedru valmistamise jaoks on vaja toota 20 taldrikvedru. See tagab võistluste reeglitega nõutud minimaalse vedrustuse käigu 50,8 mm, mis vedru ülekandetegurit arvestades teeb vedru enda minimaalseks käigupikkuseks 35,5 mm. 20 taldrikvedru kombineerimisel on vedru kogu käigupikkus 40,5 mm, mis jätab käigupikkusel varuks 5mm.

Ühe vedru hind kujuneb välja kolmest kuluallikast: toormaterjali maksumus, toormaterjali ning pooltoote töötlemine ja kolmandana vormide rakendamine detaili valmistamiseks. Belleville taldrikvedrude valmistamisel kasutatakse biaksiaal süsinikkiud kangast Süsinikkiu hinnaks kuluaruande materjalide tabelis on 200 dollarit  $\text{kg/m}^2$ . Detaili kangaste kaalude määramisel tuleb laminaadile lisada ka vaigu kogus. Ühe seibi tegemiseks on vaja  $0,044 \text{ m}^2$  ehk 17,6 g kangast.

Lamineerimisel kasutatakse käsilamineerimist ning laminaadi järelkõvendamist kuumutusahjus. Töötlemisprotsessidest kasutatakse CNC kangalõikust ja freesimist, millele tuleb lisada abiaegade ja seadistamise kulud. Freesimise hind tuleneb toorikult eraldatud



materjali hulgast, mille kogust arvestatakse kuupsentimeetrites. Terasest prototüüpvormi maksumuseks on 40000 dollarit, kuid siinkohal arvutatakse vormi maksumus ühe detaili kohta kogu tootmismahu juures. Vormi eluiga 3000 detaili on ette määratud. Vormi maksumus jagatakse vormi eluea ning toodetavate detailide arvu korrutisega. Tabelis 7.1. on välja toodud ühe vedruelemendi valmistamiseks vajaminevate materjalide, tööprotsesside ja vormi maksumus.

Tabel 7.1. Belleville taldrikvedrudest koostatud vedruelemendi maksumus

Materjal	Rakendus	Ühikmaksumus	Ühik	Kogus	Kogumaksumus
Süsinikkiud (UD)	Taldrikvedru	\$ 200,00	kg/m <sup>2</sup>	0,36	\$ 33,4
Tööprotsess	Rakendus	Ühikmaksumus	Ühik	Kogus	Kogumaksumus
CNC lõikus	Süsinikkangas	\$ 0,01	lõige	180	\$ 1,8
Käsilamineerimine	Vedru laminaat	\$ 35,00	m <sup>2</sup>	0,07697	\$ 2,69
Kõvenemine ahjus	Vedru laminaat	\$ 20,00	m <sup>2</sup>	0,07697	\$ 1,54
Freespingi seadistus	Taldrikvedru	\$ 1,30	unit	1	\$ 1,30
Paigutused pingis	Taldrikvedru	\$ 0,65	unit	53	\$ 25,35
Freesimine	Taldrikvedru	\$ 0,04	cm <sup>3</sup>	81	\$ 4,10
Rakistus/Vormid	Rakendus	Ühikmaksumus	Ühik	Kogus	Kogumaksumus
Lamineerimise vorm	Taldrikvedru	\$ 40 000,00	tk	240 000	\$ 4,5
				<b>KOKKU:</b>	<b>\$ 74,7</b>

Ühe vedru tootmise maksumuseks on ligi 75 dollarit, mis on ostutootena soetatavast Cane Creek terasvedrust 50. dollari võrra kallim. FS Team Tallinn kuluaruandes teeb see nelja vedru kogusumma juures vedrustuse alamkoostu hinnatõusuks 198 dollarit.

Vormeli koguhinda silmas pidades ei mõju nii suur hinnatõus kuluaruande kaitsmisele positiivselt, kuid kaalusääst 25% ning vedruelemendi tehniline lahendus võimaldavad disaini kaitsmiselt sellevõrra rohkem punkte koguda, kuna kohtunikud hindavad tudengite leidlikkust ning oskust rakendada võistlusautodel uudseid lahendusi, läbi mille kasvab üldine võistluste konkurentsi tase.

## 7.2 Realse tootmisomahinna arvutamine

Formula Student võistlussari on ülemaailmselt aina suuremalt kanda kinnitamas ning leidub hulk ettevõtteid, kes teevad koostööd tudengivormeli meeskondadega ja nende meeskondade ülikoolidega, et arendada välja tooteid, mida oleks tulevikus võimalik müüa ka teiste ülikoolide meeskondadele. Eelnevas peatükis arvutati välja ühe vedru maksumus Formula

Student sarja kuluaruande tabelite põhjal. Käesolevas peatükis arvutatakse välja toote omahind (vt Tabel 8.1.2.1), kasutades arvutustes reaalseid kuluallikaid ja nende maksumusi. Tulemust võrreldakse FS Team Tallinn kuluaruande toote maksumusega, nägemaks kui palju erineb reaalne toote omahind 1000 vedru tootmisel Formula Student võistlussarja võistlusautole. Väikeseeria tootmise, mis viiakse läbi 5 kuu jooksul, plaan on järgmine:

Toodetav kogus:	1000 tk (20 000 üksikelementi)
Tööpäevade arv:	105 päeva (01.01.16 - 30.05.16)
Päevane vajalik toodetav kogus:	191 tk
Tööajaks päevas:	1 vahetus (08:00-17:00. 8h (480 min)

Toote omahinna arvutamisel kasutatakse valemit:

$$C_U = C_M + C_L + OH, \quad (7.1)$$

kus  $C_U$  – toote omahind (€/tk)

$C_M$  – materjali maksumus (€/tk)

$C_L$  – tööjõu maksumus (€/tk)

$OH$  – tootmise üldkulud (€/tk) [54]

Tootmise maksumust arvestatakse tavaliselt kas kogutoodangu ( $C_P$ ) – või üksiku toote omahinna ( $C_U$ ) põhisel. Hinna määramisel arvutatakse kulutusi kolmes põhilises kategoorias: materjali-, tööjõu- ja üldkulud. Vaatamata sellele, et iga toote või tooterühma jaoks on oma kindlad juhised, mis tüüpi kulutused tuleb ühte või teise kulukategooriasse lisada, on ettevõtetel küllalt suur vabadus toote liigi ja erinevate kuluartiklite määramiseks. Toote omahinna eesmärgiks on väljendada tootmises kasutatud ressursside maksumust, mille abil ettevõtte juhid saavad hinnata ja kujundada toote hinnapoliitikat. [55][58]

Esmalt arvutatakse välja tootmisele kuluv otsene toormaterjali hulk ja selle maksumus ( $C_M$ ) ühe toote kohta (hinnad esitatud koos käibemaksuga). 1000 vedru tootmiseks on vaja valmistada 20000 üksikut vedrutaldriku. Ühe vedrutaldriku lamineerimiseks on vaja 9 kihti süsinikkangast ehk kokku on vaja lõigata 243000 süsinikkanga tükki. Selleks on tarvis osta minimaalselt 1300 m<sup>2</sup> süsinikkangast, millest 33,1 % moodustavad ülejäägid. FS Team Tallinn meeskond ostab süsinikkangast hinnaga 15 €/m<sup>2</sup>, mis teeb kanga tellimuse maksumuseks 19500 € ja ühe kangatüki tükihinnaks koos jääkidega 0,81 €/tk.

Vaigu ideaalseks koguseks laminaadi maatriksis vastavalt kanga tüübile loetakse 38-42% [57]. Maatriksi täielikuks impregneerimiseks kasutatakse vaigu koguse määramiseks 1:1 suhet ehk kangaste kaalule vastavalt segatakse vaigu kogus. Üks süsinikkanga tükk kaalub 1,48 g, mis teeb vajalikuks vaigu koguseks 10 % varuga 360 kg ja kõvendi koguseks 108 kg, kui vaigu segamise kaaluvahekord on 100:30. Kvaliteetse epoksiidvaigu hind on 9,9 €/kg ja kõvendi hind 14,8 €/kg ehk tellimuse hinnaks oleks 3564 € eest vaiku ja 1598,4 € eest kõvendit. Vormivahasüsteem Frekote HMT-2, mis võimaldab ühe korraga ilma vahepealse vahatamiseta 5000 detaili, maksab 26 €.

Otsesele materjalikulule lisanduvad kaudsed materjalikulud, mis lisanduvad toote omahinna arvutamisel materjali maksumusele. Nendeks kuludeks on erinevad materjali töötlemistehnoloogiad, mille abil valmivad pooltooted või kliendile müüdav lõppdetail. Käesolevas lõputöös toodetava vedru puhul on nendeks süsinikkanga CNC lõikus, ja taldrükvedru toorikute CNC freesimine. CutExpert Ecocam lõikemasina maksimaalne lõikekiirus on 60 m/min [56]. 243000 tooriku lõikamise kogu joonpikkus on 53412 meetrit. Võttes lõikekiiruseks 45m/min, siis süsinikkangast toorikute lõikamine koos abiaegadega võtab aega 42,4 tundi. CNC lõikemasina tunnihinnaks võetakse 40 €/h, mis 243000 tooriku lõikamisel teeb tooriku tükihinnaks 0,0069 €/tk. CNC freesimisel freesitakse üks vedrutaldrik kahes paigutuses. Ühe vedrutaldriku operatsiooniajad ja abiajad kokku on 2,5 minutit. 20000 vedru CNC töötlemine võtab aega 834 tundi. Arvestades CNC freespingi tunnihinnaks 36 €/h on ühe vedrutaldriku freesimise hinnaks 1,5 €/tk.

Ostutoodetena on vaja soetada 24 vormi. Vorm koosneb 9. detailist, kus kahe üksikdetaili maksumus on 30 €/tk ja seitse identset detaili on maksumusega 18 €/tk. See teeb 17. vormi ostuhinnaks 4464 €, et toota viie kuuga 1000 süsinikkomposiit taldrükvedru. Vormide ostuhinnale lisanduvad poltide, mutrite ja seibide maksumus 207 €. Materjalide maksumus on näidatud hinnakalkulatsiooni kokkuvõtlikus tabelis Tabel 7.2.

Tööjõukuludena võetakse toote omahinna arvutamisel arvesse otsesed tööjõukulud ( $C_L$ ). Kõik kaudsed tööjõukulud lisatakse üldkulude ( $OH$ ) arvestusse. [54] Tootmisesse on vaja kahte lamineerijat, ühte freespingi operaatorit ning tehnikut kvaliteedi ja koormustesti teostamiseks. Nelja tootmistöötaja tööjõukulud tööandjale koos maksudega on ühes kuus 5615 €. Ühes kuus toodetakse 4011 vedrutaldrikut, mis teeb ühe vedrutaldriku otseseks tööjõukuluks 1,4 € ning ühe vedru koostu otseseks tööjõukuluks 28 €.

Vedru tootmisega seotud üldkulude hulka kuulub mitmeid erinevaid kuluallikaid, mis on defineeritud vastavalt ettevõtte kuluaruande ülesehitusele. Nendeks kuludeks võivad olla näiteks tehase hoone rent, tootmiseseadmete amortisatsioon, hoone valvurid, tootmise kvaliteedikontrolli ja müügi-osakonna töötajad, hooldustöötajate palgad, elektri-, gaasi- või telefoni arved ja seadmete ülevõlpidamise kulud, mis otseselt ei ole tootmisega seotud. Kuna enamus nendest on muutuvkulud ja nende suurust ei osata käesolevas töös hinnata, võetakse üldkuludeks 50 % eelpool arvatud tootmise materjalide ja tööjõu kuludest. [55][58]

Tabel 7.2. Reaalne tootmisomahind

Materjali maksumus	Rakendus	Vajalik kogus	Ühik	Ühiku hind	Kogu toormaterjali maksumus	Detailide hulk	Hind vedrule
Süsinikkiud	Kanga toorikud	1300	m <sup>2</sup>	15,00 €	19500,00 €	243000	2,17 €
Epoksiidvaik	Lamineerimine	360	kg	9,90 €	3564,00 €	20000	4,81 €
Kõvendi	Lamineerimine	108	kg	14,80 €	1598,40 €	20000	2,16 €
Vormivaha	Vahatamine	1	tk	26,00 €	26,00 €	20000	0,04 €
Tööprotsessi maksumus	Rakendus	Vajalik kogus	Ühik	Ühiku hind	Kogu operatsiooni maksumus	Detailide hulk	Hind vedrule
CNC lõikus	Kanga toorikud	42,4	h	40,00 €	1696,00 €	243000	0,75 €
Kõvenemine ahjus	Vedru laminaat	850	h	15,00 €	12750,00 €	20000	17,21 €
Freesimine	Taldrikvedru	834	h	36,00 €	30024,00 €	20000	40,53 €
Vormi maksumus	Rakendus	Vajalik kogus	Ühik	Ühiku hind	Kogu-maksumus	Detailide hulk	Hind vedrule
Lamineerimise vormid	Taldrikvedru	24	tk	225,4 €	45410,80 €	20000	6,03 €
Üldkulud	Rakendus	Ühik	Detailide hulk	Hind vedrule			
Toomine	50% tootmiskuludest	€	20000	49,70 €			
				<b>KOKKU 1 vedru omahind</b>			<b>123,39 €</b>

Formula Student kuluaruande põhjal on ühe süsinikkomposiit vedru maksumuseks 75 dollarit ehk 65,8 €, mis võrreldes reaalse toote omahinnaga on väikeseeria puhul umbes 47 % võrra väiksem. Siit saab järeldada, et võistluse kuluaruande tabelid soosivad meeskondi ning arvutuste tulemused ei muuda vormeli hinda kuluaruande koostamisel ja hilisemal kaitsmisel ülemäära kõrgeks.

## KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö ülesandeks oli Formula Student Team Tallinna poolt konstrueeritava väikevormeli amortisaatori vedru projekteerimine ja analüüs. Töö autori ja FS Team Tallinna juhendaja vahelise kokkuleppe tulemusena püstitati töö autori eesmärgiks valmistada meeskonnale vedrustuse seadistamise testperioodi alguseks alternatiivne vedruelement hetkel kasutusel olevale Cane Creek keerdvedrule. Prototüüpvedru testimise eeldusteks on detaili vastavus Formula SAE võistlusreeglitele ning meeskonna poolt esitatud tehnilised nõuded. Töö koostamisel keskenduti vedru projekteerimisel kolmele prioriteetsele kriteeriumile – kaalusääst võrreldes Cane Creek keerdvedruga, prototüübi sobivus vormelil kasutatavate amortisaatoritega ja vedru jäikuse reguleeritavus.

Lõputöös käsitletakse etappe, mis tootearenduse seisukohast on vajalikud alternatiivse vedru projekteerimiseks ning analüüside ja arvutuste läbiviimiseks. Esmalt antakse ülevaade Formula Student tootearendusvõistluse formaadist, saamaks aru vedrustuse valdkonna arendustöö vajadusest. Lühikokkuvõttele järgneb FS Team Tallinna poolt uuele vedrule esitatud vastavuskriteeriumide loetelu ning detaili projekteerimist otseselt mõjutavad Formula SAE võistlusreeglid.

Vedruelementide valimi piiramiseks kirjeldatakse lõputöö teises peatükis tudengivormeli meeskonna võistlusauto vedrustuse kontseptsiooni. Selle abil välistatakse mittedobilise elastsuse elementide kaasamine uurimisel objektidesse. Vedrustuse kinemaatikast lähtuvalt valiti uue vedru alternatiivide hulka neli potentsiaalset lahendusvarianti, millele järgneb ülevaatlik kirjeldus erinevatest vedruelementidest. Lõppotsuse langetamiseks vedru valimisel hinnati neljandas peatükis maatrikstabeliga vedrude mehaanilisi – ja tootmistehnoloogilisi omadusi ning arendustööd puudutavaid aspekte. Tulemus formuleeriti tabeliks ning enim punkte kogunud Belleville taldrikvedru valiti FS Team Tallinn võistlusauto jaoks parimaks võimalikuks lahenduseks edasise arendus- ja uurimistöö teostamisel.

Lõputöö neljandas peatükis esitatakse võrdleva tabelina ka Belleville taldrikvedrude tootmises kasutatavate materjalide mehaanilised omadused. Kuna tudengivormeli meeskonna sooviks on vormelile leida väiksema massiga vedrud, siis sobivaimaks lahenduseks valiti väikse erikaalu ning suure eritugevusega süsinikkomposiit materjalid, millest tulenevalt on võimalik toota sama jäikuse, kuid väiksema massiga vedrusid. Vedruelementide valmistamiseks saadaolevad materjalid anti töö autorile FS Team Tallinn komposiidi osakonna poolt.

Vedru elemendi geomeetria väljatöötamiseks ning hilisemaks LEM analüüsiks oli vaja määrata süsinikkiudkangast ja epoksiidvaigust moodustuva laminaadi mehaanilised omadused. Antud valdkonnaga tegeles FS Team Tallinn komposiitmaterjalide osakonna kapten, kelle ülesandeks oli seoses vormeli monokoki tootmisega välja selgitada kasutatavate anisotroopsete materjalide mehaanilised omadused. Sellest tulenevalt on lõputöös antud ülevaade katsete meetodikast ning selle käigus esineda võivatest probleemidest. Surve-, tõmbe- ja nihkekatsete tulemused olid analüüsikeskkonna Ansys 14.5 Composite PrepPost materjali kataloogi sisendandmeteks. Peatükk lõppeb ülevaatega süsinikkomposiitmaterjalide väsimusest ning temperatuuritaluvusest.

Antud lõputöö viiendas peatükis keskendutakse Belleville vedrutaldrikutest koosneva vedru üksiku elemendi geomeetria projekteerimisele. Eelnevalt analüüsitakse vedrustuse kinemaatikast tulenevat vedru käiguulatust, et selgitada välja projekteeritava vedru minimaalne ja maksimaalne nihe, kuna Belleville taldrikvedrude deformatsioon on lineaarse jäikus karakteristiku taotlemisel piiratud. Algpameetrite kogumiseks uuriti programmi MoTeC i2 Standard 1.1 abil võistluste andmelogisid. Vedrustuse käigu ekstreemumolukorrad tuvastati Formula Student Ungari betoonkattel sõidetava võistluse kestvussõidu pidurdusmaadel.

Edasi asuti kogutud lähteandmete põhjal koostama Ansys analüüsikeskkonna parameetrilist arvutusmoodulit. Automatiseeritud arvutuste teostamise eesmärgiks oli töö autori poolt määratud geomeetriliste sisendparameetrite ja detaili mudeli rajatingimuste alusel optimaalseima vedrutaldriku geomeetria ning laminaadi kihtide arvu defineerimine. Valiku tegemisel sai määravaks vedrutaldriku teoreetilise nihke ja laminaadi ristlõike paksuse suhe, mis määrab vedru jäikus karakteristiku teoreetilise lineaarsuse. Analüüs teostati koorikelemente kasutades, et vähendada võrgustiku elementide arvu ja sellest sõltuvat arvutuste ajalist kestust. Väljavalitud taldrikvedru geomeetria teostati ka kontaktisooni lokaalne analüüs.

Järgmisena sammuna liiguti edasi katsekehade valmistamise, testimise ja teoreetiliste analüüsiandmete ning reaalsete katsetulemuste võrdlemise juurde. Katsetulemuste hindamisel võrreldi mikroskoobi abil ka katsekehade laminaadi kvaliteeti. Prototüüp vedru elementide lamineerimise vorm ning lõikerakis testkeha lõiketöötlemiseks valmisid koostöös ettevõttega Wisefab OÜ. Testkehade vormimisel rakendati kahte erinevat meetodi: märglamineerimist ja VAP-tehnoloogial põhinevat vaakuminfusiooni. Täiendavalt kaasati tootmisplani kaks

erinevate mehaaniliste omadustega epoksiidvaiku. Laminaadi märgamisel eksperimenteeriti ka vaigu degaseerimisega ehk õhu eemaldamisega kokku segatud vaigust ja kõvendist ning vaigu geelistumisajaga enne vormipoolte sulgemist. Testkeha maksimaalsete mehaaniliste omaduste saavutamiseks teostati testkehadele peale 24 h pikkust toatemperatuuril kõvenemist täiendav järelkõvenemine ahjus vastavalt vaikude andmelehtedel nõutud tingimustele. Testkehade löiketöötlus teostati Prototuba OÜ freespingis Datron M7 HP. Peale vedrutaldrikute testimist Tallinna Tehnikaülikooli VB korpuse materjaliteaduste katselaboris valmistati vedruelementide ristlõigetest mikrolihvid ning laminaatide struktuure uuriti mikroskoobiga Zeiss AXIOVERT. Lõpphinnangu tulemusena valiti vedrude valmistamiseks sobivaim lamineerimismeetod ja võrreldi teoreetilist ning reaalselt vedruelemendi jäikusgraafikut.

Pärast vedrutaldrikute testimist ning laminaadi kvaliteedi hindamist tehti algust parima võimaliku lamineerimisvormi kontseptsiooni väljatöötamisega. Vedrude tootmise juures on oluliseks tootmisetapiks laminaadi järelkõvendamine, mille tulemusena tekkis vormide valimisse kolm potentsiaalset vormi lahendust. Majanduslikult otstarbekama vormi valimisel hinnati kolme kontseptsiooni tootmistehnoloogilisi omadusi. Enim plusspunkte kogunud vorm valiti FS Team Tallinna jaoks süsinikkomposiitmaterjalist vedrude tootmisel parimaks võimalikuks lamineerimisvormiks.

Lõputöö viimases peatükis analüüsiti Belleville taldrikvedrude maksumust vastavalt Formula Student võistlussarja kuluaruande (*Cost Report*) tabelitele ning ühe vedru hinda võrreldi taldrikvedu reaalse tootmisomahinna kalkulatsiooni tulemusega. Võrreldes ostutootena soetatava Cane Creek terasvedruga kasvas süsinikkomposiitmaterjalist valmistatava vedru hind meeskonna kuluaruande tabelis eurodesse arvestatuna 43 € võrra. Kuluaruande abitabelite põhjal kujunevat hinda ja reaalselt tootmisomahinda võrreldes selgub, et väikeseeria tootmise korral on reaalne vedru hind 47 % ehk ligi 58 € kallim, kui võistluse reeglitega määratud tootmise puhul. Meeskonnale tähendab see võistluste kuluaruannetes vedru tükihinna \$ 50 suurusel tõusu.

Käesoleva lõputöö tulemusena projekteeriti FS Team Tallinn vormelautole reguleeritava jäikusega vedru, mis koosneb koonilistest Belleville taldrikvedrudest. Testvedrude tootmisega tehakse algust peale lõputöö valmimist ning esimesed testsõidud prototüüpvedrudega viiakse läbi elektrivormeli FEST15 suvise testperioodi vältel.

Testsõitade eesmärgiks on välja selgitada vedru funktsionaalsus erinevatel sõiduladel ning hinnata lahenduse vastupidavust ning implementeerimise võimalusi 2016. aastal ehitatavale vormelautole FEST16.

Juhul, kui prototüüpvedru testimine kujuneb edukaks, siis edasise arendustööna peab lõputöö autor vajalikuks vedrutaldriku laminaadi optimeerimist ning vedru jäikusvahemike väljatöötamist vastavalt Formula Student dünaamilistele sõidukatsetele. Antud lõputöös teostatud reaalsete vedruelemendi survekatsete kohaselt on ühe vedruelemendi läbipainde 2 mm juures kogu vedru täielikul kokkusurumisel oht laminaadi pindmiste kihtide kiudude purunemisele, mis vähendab vedruelemendi jäikust ning väsimustugevust. Seetõttu on soovituslik teostada täiendavate katsekehade lamineerimine, kasutades materjalidena kõrgema elastsusmooduliga eelimpregneeritud süsinikkangaid ning läbi viia vedru elutsükli määramiseks vajalik väsimustest.

Autori seisukohast on lõputöö koostamisel saavutatud tulemus hea ning kasulikuks arendusplatvormiks uuendusliku vedrulahenduse kasutuselevõtuks. FS Team Tallinna jaoks arendatud süsinikkomposiitmaterjalist testvedrude mass on 25% võrra väiksem Cane Creek terasvedrust ning omab vedru jäikuse reguleerimise võimalust. Lõputöö tulemusena täideti kaheksast FS Team Tallinna poolt vedru kontseptsioonile esitatud nõudest seitse disainikriteeriumi.



## SUMMARY

The purpose of this master's thesis is to design and analyze a damper spring for a Formula Student racecar, which is being constructed by Formula Student Team Tallinn. The author of the thesis met with the director of Formula Student Team Tallinn and a mutual agreement was made which determined that the author would design and manufacture a spring for the suspension setup testing period as an alternative solution for the current Cane Creek coil spring. Prerequisites for the prototype before testing were the conformation of the detail with Formula SAE rules and technical requirements defined by the team. While composing the thesis the focus of the spring design was set on three criteria – weight reduction in comparison to Cane Creek coil spring, compatibility with the existing dampers and spring rate adjustability.

In this thesis all production stages are covered from the research and development point of view, which are necessary for designing the spring and performing all the analyses and calculations needed. At first an overview about Formula Student competition is given to understand the necessity of development in the field of suspension design. After a short summary a list of technical requirements for the new spring is brought out which is set by Formula Student Team Tallinn and also an overview of competition rules is given which directly limit the design of the spring.

In the second chapter of the thesis suspension design conception of Formula Student Team Tallinn's racecar is described to limit the choice of springs for final selection. This prevents adding unsuitable elastic elements into the analysis of spring selection. By virtue of suspension kinematics four potential solutions were selected as alternatives for the new spring design which is followed by descriptions of those elastic elements. Evaluating mechanical-, production technology- and development properties in fourth chapter a matrix evaluation was used to describe the pros and cons for each spring. The result was formulated into a matrix table and Belleville disc spring, which collected the most points, was selected as the best possible spring for Formula Student Team Tallinn's racecar. With the selected solution, further research and development was carried out.

In fourth chapter a comparative table about mechanical properties of different materials in Belleville disc spring production is presented. As the formula team wishes to find and implement springs with smaller weight, carbon fiber composite materials with small specific

gravity and –strength was selected as a suitable material for manufacturing new springs with the same spring rate, but with lower weight compared to Cane Creek coil springs. All available materials for manufacturing were given to the author of the thesis by Formula Student Team’s composite department.

For developing the spring geometry and for later FEM analysis, it was necessary to define mechanical properties for anisotropic carbon fiber and epoxy resin laminate. The given area was covered by the head of Formula Student Team Tallinn’s composite materials department, whose task with regard to monocoque manufacturing was to test the mechanical properties of the materials used during manufacturing process. With regard to this a short overview is given about testing methods and possible failures which may lead to inappropriate test results. Compression-, tension- and shear testing results were used as input parameters in Ansys 14.5 Composite PrepPost material catalogue. Chapter ends with a brief overview about the composite materials fatigue behavior and temperature resistance.

In chapter five the focus is set on designing the spring geometry for a single Belleville disc spring. Before that spring deflection distance, which depends on suspension geometry, is analyzed to sort out minimum and maximum deflections for new spring, because Belleville disc spring has limited deflection distance for achieving linear spring rates. For that reason MoTeC i2 Standard 1.1 program was used to analyze data logs from different competitions and collect reference parameters. Maximum suspension travels were identified during heavy breaking’s in Formula Student Hungary competition data log.

Based on the gathered information a parametric calculation model was designed for Annoys composite analysis ACP Prep Post workbench. The purpose of automatic calculations was to determine the best possible geometry and laminate layer numbers for given geometric input parameters, constraints and load conditions applied for disc spring model. Final geometry selection was decided by the relation between desired spring deflection and the thickness of the disc spring’s cross section, which determines the theoretical spring rate of the disc spring. The analysis was done using shell elements to reduce the number of mesh elements for quicker calculations. Additionally local contact zone analysis was carried out.

Analysis was followed by test sample manufacturing, testing and comparison of theoretical analysis and real testing data. Using a microscope, laminate structure quality was used to assist the evaluation of the test samples. For disc spring manufacturing a prototype lamination

mold and machining jig was designed and made with the help of local business Wisefab OÜ.

For lamination two different methods were used: wet lamination and resin infusion based on VAP-technology. Additionally two different epoxy resins were added to the manufacturing plan. Thesis author also experimented with resin degassing and gelation time before closing the mold. After a 24 h room temperature cure, test pieces were oven cured according to epoxy resin datasheets to obtain laminate's maximum mechanical properties. The machining of test samples was accomplished with the help of Prototuba OÜ using a milling machine Datron M7 HP. After testing the samples in Tallinn University of Technology's materials science testing laboratory, micro grinds of disc spring's cross-sections were prepared and the structures of laminates were investigated with Zeiss AXIOVERT microscope. As a result of final evaluation, suitable lamination process was selected and theoretical and real disc spring rate graphs were compared.

After testing and quality evaluation the development of the best possible lamination mold conception began. Laminate post curing is an essential phase during disc spring manufacturing and therefore three potential mold solutions were analyzed. Selecting the most efficient financial solutions from three concepts the selection was done by evaluating mold properties from manufacturing point of view. The mold with the most points was selected as the best possible lamination mold for Formula Student Team Tallinn.

In the final paragraph the cost of carbon fiber Belleville disc spring was calculated according to the Formula Student rules and cost report tables. The resulting price was then compared to realistic product manufacturing net value calculation. Compared to Cane Creek coil spring the price in cost report for carbon fiber disc spring rose \$50 which is approximately 43 €. In contrast with Formula Student Cost Report, the price in small series production for one spring is about 47% i.e. 58 € more expensive than in Formula Student production. For the team it means that the price for one spring will rise \$ 50 .

As a result of this thesis, the author designed a spring for Formula Student Team Tallinn which has adjustable spring rate and is assembled using conical Belleville disc springs. The production of springs will start after writing the thesis and first test runs with the new springs will be carried out in summer on an electric formula 4WD racecar FEST15. The purpose of testing is to find out the functionality of springs in different dynamic events and evaluate the possibility of implementing those springs into the design of Formula Student racecar FEST16.

In case of a successful test period the author of this thesis sees that it is necessary to carry out additional development and optimize the composite laminate of single disc spring and to work out precise spring rates of different spring stack-ups for Formula Student competition dynamic events. Thorough testing showed that in case of 2 mm of deflection for single disc spring, there is a risk of fracture in the upper layers of composite laminate, which reduces fatigue life and stiffness of the spring. Therefore it is recommended to perform additional test piece laminations, using prepreg carbon fibers which have higher elastic modulus and carry out fatigue test for entire spring to evaluate spring's fatigue life.

Author finds that the achieved result in this thesis is good and creates a great platform for implementing the new spring solution. The spring design developed for Formula Student Team Tallinn is 25% lighter than current Cane Creek coil spring and the spring possesses the ability of spring rate adjustability. As a result of the thesis eight out of nine goals set by Formula Student Team Tallinn were met.

## KASUTATUD KIRJANDUS

1. SAE International. 2015 Formula SAE rules [WWW]  
[http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16\\_fsae\\_rules.pdf](http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf) (08.03.2015)
2. FS Team Tallinn kodulehekülg [WWW] <http://formulastudent.ee> (15.04.2015)
3. Hioväin, I. Formula Student vormelauto FEST14 monokoki vormi projekteerimine. Bakalaureusetöö. Tallinn, 2013
4. Soomlais, S. Formula Student võistlusauto vedrustuse projekteerimine. Magistritöö. Tallinn, 2010
5. Kaz Technologies. FSAE Shocks [WWW]  
<http://www.kaztechnologies.com/fsae/shocks> (07.05.2015)
6. Cane creek. Steel Spring 3.00“ [WWW]  
[http://store.canecreek.com/p/steel-spring-3-00/shocks\\_springs?pp=25](http://store.canecreek.com/p/steel-spring-3-00/shocks_springs?pp=25) (07.05.2015)
7. Coil spring rate conversion [WWW]  
[http://people.physics.anu.edu.au/~amh110/coil\\_spring\\_rate\\_conversion.htm](http://people.physics.anu.edu.au/~amh110/coil_spring_rate_conversion.htm)  
(08.05.2015)
8. FS Team Tallinn meeskonna fotode erakogu
9. Vedrupakend. [WWW]  
[http://entsyklopeedia.ee/meedia/vedrustus1/nene8\\_page\\_0354](http://entsyklopeedia.ee/meedia/vedrustus1/nene8_page_0354) (28.03.2015)
10. Spring (device). [WWW]  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Spring\\_%28device%29](http://en.wikipedia.org/wiki/Spring_%28device%29) (20.05.2015)
11. Beitz, W, Küttner, K.-H., Davies, B.J. DUBBEL's Handbook of Mechanical Engineering. London: Springer-Verlag, 1994
12. Hillier, V.A.W, Coombes, P Hillier's Fundamentals of Motor Vehicle Technology. 5th edition. Cheltenham: Nelson Thornes, 2004
13. Hysteresis. [WWW] <http://en.wikipedia.org/wiki/Hysteresis> (20.04.15)
14. What are rubber springs?  
<http://www.initialdave.com/cars/tech/suspensionbasics06.htm> (21.04.15)
15. Rubber metal antivibration mounts [WWW]  
<http://www.mecanocaucho.com/en-NL/products/anti-vibration-mounting/elastomeric-springs/#plano-2> (22.04.15)
16. Belleville washer [WWW] [http://en.wikipedia.org/wiki/Belleville\\_washer](http://en.wikipedia.org/wiki/Belleville_washer) (23.04.15)
17. Disc springs [WWW] [http://www.international springs.com/disc\\_spring\\_intro.htm](http://www.international springs.com/disc_spring_intro.htm)  
(24.04.15)

18. Belleville washers: Stacking [WWW]  
<http://springipedia.com/belleville-washers-stacking.asp> (24.04.15)
19. What is a Ring Spring. [WWW]  
[http://www.ashbymfg.com/ring\\_springs.html](http://www.ashbymfg.com/ring_springs.html) (24.04.15)
20. Ring-springs. [WWW] <http://mdmetric.com/prod/rfn/springs.htm> (25.04.15)
21. Ring Springs. [WWW] <http://www.discspring.net/ring-springs.html> (25.04.15)
22. Gas spring dampers [WWW] <http://www.indgassprings.com/dampers.html> (26.04.15)
23. Why gas springs take more force to get moving [WWW]  
<http://www.indgassprings.com/hysteresis.html> (26.04.15)
24. Carlsson A. L, Adams F. Donald, Pipes Byron R. Experimental characterization of advanced composite materials. 4th edition. US: Taylor & Francis Group, 2014
25. AZO materials [WWW]  
<http://www.azom.com/properties.aspx?ArticleID=764> (27.04.15)
26. Make It From [WWW]  
<http://www.makeitfrom.com/material-properties/NEMA-Grade-G-10-GEE-Glass-Epoxy-Laminate/> (27.04.15)
27. Performance composites. [WWW]  
[http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties\\_2.asp](http://www.performance-composites.com/carbonfibre/mechanicalproperties_2.asp)  
(27.04.15)
28. Chait, R. Papirno, R. Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites. Baltimore: MD, 1983
29. FEA and Composites, Part 1. [WWW]  
<http://www.deskeng.com/de/fea-composites-part-1/> (28.04.15)
30. Lentsius, M. Formula Student klassi vormelauto monokokk-kere: komposiitmaterjalide meeskonna töödokument. FS Team Tallinn, Tallinn, 2015.
31. Pro-Set. [WWW] [http://prosetepoxy.com/PDF/INF-114\\_INF-210.pdf](http://prosetepoxy.com/PDF/INF-114_INF-210.pdf) (30.03.15)
32. Laminating resin MGS [WWW]  
[http://www.cozybuilders.org/ref\\_info/MGS\\_L285\\_properties.pdf](http://www.cozybuilders.org/ref_info/MGS_L285_properties.pdf) (01.05.15)
33. US Department of Defence. The Composite Materials Handbook MIL-HDBK-17-3F: Polymer Matrix Composites Material Properties, Volume 2. USA: US Department of Defence, 1999.
34. Tensile testin Composite ASTM D3039 [WWW]  
<http://www.intertek.com/polymers/tensile-testing/matrix-composite/> (15.05.2015)

35. Fatigue. [WWW]  
[http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/1\\_fatigue.pdf](http://www.oceanica.ufrj.br/ocean/cursosead/materiaiscompositos/compositomaterials/1_fatigue.pdf) (16.05.2015)
36. Tech tip 23. [WWW] <http://www.epotek.com/site/files/Techtips/pdfs/tip23.pdf> (16.05.2015)
37. Resin systems. [WWW] <http://www.netcomposites.com/guide/resin-systems/6> (07.05.2015)
38. FS Team Tallinn andmebaas
39. Back to elements. [WWW]  
<http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2004-Int-ANSYS-Conf-9.PDF> (20.05.2015)
40. Meshing help. [WWW]  
[http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/wb\\_msh.pdf](http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/wb_msh.pdf) (10.05.2015)
41. Thin-wall structure simulation. [WWW]  
<http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2006-Int-ANSYS-Conf-22.pdf> (10.05.2015)
42. Finite element modeling with Ansys. [WWW]  
[https://www1.ethz.ch/structures/education/bachelor/Strukturlabor/FS11PDFs/FEM\\_with\\_Ansys\\_-\\_Introduction.pdf](https://www1.ethz.ch/structures/education/bachelor/Strukturlabor/FS11PDFs/FEM_with_Ansys_-_Introduction.pdf) (10.05.2015)
43. Lõplike elementide meetod. [WWW]  
[http://et.wikipedia.org/wiki/L%C3%B5plike\\_elementide\\_meetod](http://et.wikipedia.org/wiki/L%C3%B5plike_elementide_meetod) (11.05.2015)
44. Polüetüleen. [WWW] <http://www.proplastik.ee/poluetuleen> (18.05.2015)
45. Composites world. [WWW]  
<http://www.compositesworld.com/articles/semipermeables-next-trend-in-infusion> (17.05.2015)
46. Jabro JC870 Diamond Cut Router. [WWW]  
<https://www.secotools.com/en/Global/Segment-Solutions/Aerospace/Aerospace-Tools/Composite/Composite-Tools/Jabro-JC870-Diamond-Cut-Router/#pageid=5871&workid=0> (25.05.2015)
47. Uddeholm Impax Supreme Stock Standard. [WWW]  
[http://www.uddeholm.ee/english/files/Impax\\_Supreme\\_Stock\\_Standard.pdf](http://www.uddeholm.ee/english/files/Impax_Supreme_Stock_Standard.pdf) (11.05.2015)
48. Water & oil mould temperature controllers. [WWW]  
<http://www.sise.fr/en/activities/water-oil-mould-temperature-controllers> (04.05.2015)

49. Water heaters-STM-W. [WWW]  
[http://www.shini.com/en/products\\_i\\_Water\\_Heaters-STM-W.html](http://www.shini.com/en/products_i_Water_Heaters-STM-W.html) (05.05.2015)
50. Heatex. Padrun küttekehad. [WWW] <http://heatex.ee/padrun-kuttekehad/> (07.05.2015)
51. Induction coil. [WWW]  
[http://www.alibaba.com/product-detail/Induction-Coil\\_124629013.html](http://www.alibaba.com/product-detail/Induction-Coil_124629013.html) (08.05.2015)
52. Thermal process technology. [WWW]  
[http://www.nabertherm.com/produkte/details/en/thermprozesstechnik\\_2-kammeroefen-umluftbetrieb](http://www.nabertherm.com/produkte/details/en/thermprozesstechnik_2-kammeroefen-umluftbetrieb) (09.05.2015)
53. Nõmme, S. Formula Student klassi vormelauto FEST14 velgede projekteerimine. Magistritöö. Tallinn, 2014
54. Karjust, K. MET0150 Production engineering, Cost engineering. Loengumaterjalid
55. Lianabel, O. The cost management toolbox: a manager's guide to controlling costs and boosting profits. New York: AMA Publications, 1999
56. What is the proper resin/fiber ratio for a laminate? [WWW]  
<http://www.ptm-w.com/index.asp?pgid=73> (17.05.2015)
57. Cutexpert ecocam. [WWW]  
<http://www.expertsystemtechnik.de/innovative-cutting-technologies/cnc-cutter/cutexpert-ecocam> (19.05.2015)
58. Accounting Coach. [WWW]  
<http://www.accountingcoach.com/blog/what-is-manufacturing-overhead-and-what-is-included> (19.05.2015)
59. Kulu, P. Mehhanotehnika ja metallide käsiraamat. Tallinn, TTÜ kirjastus, 2012.

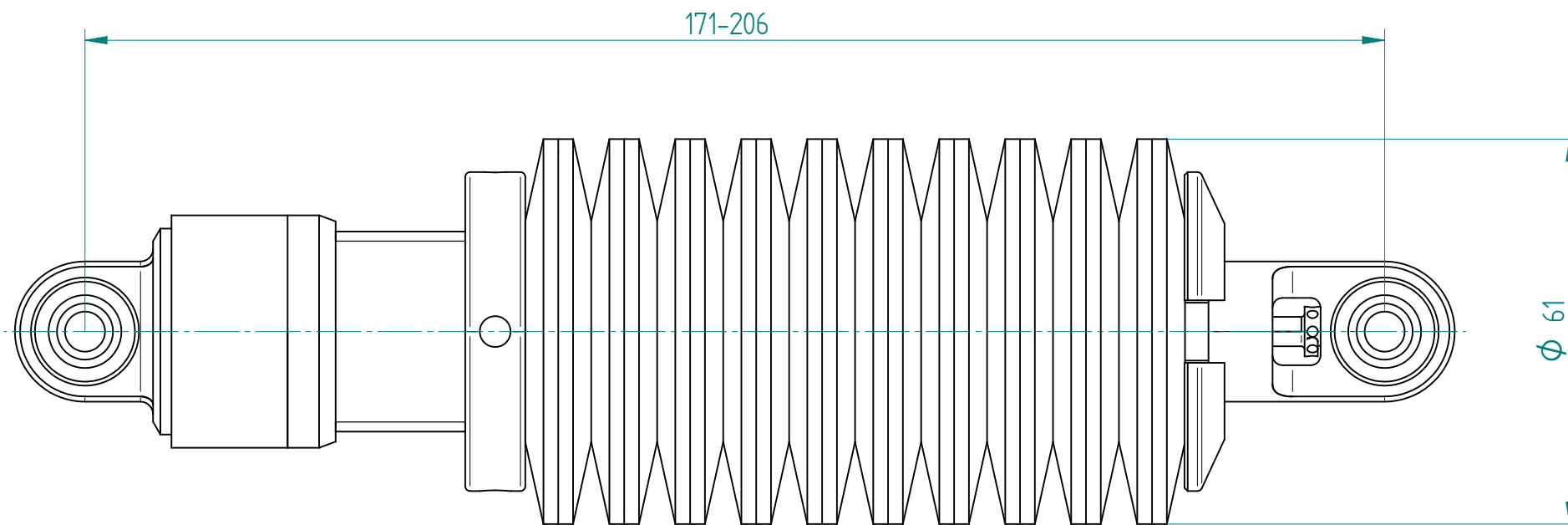
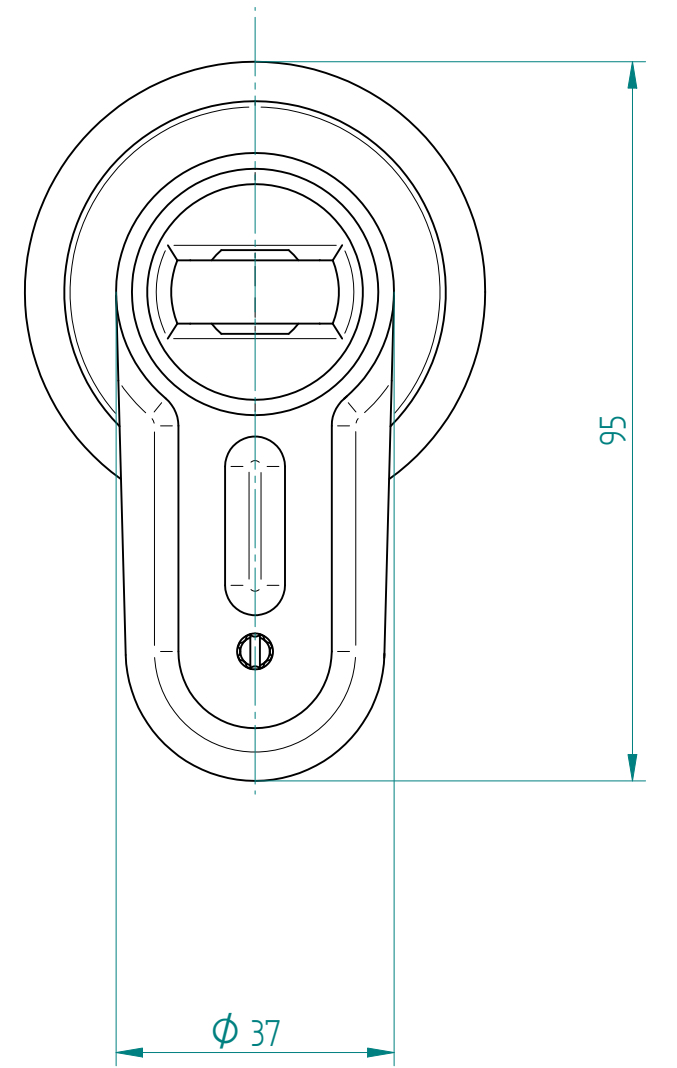
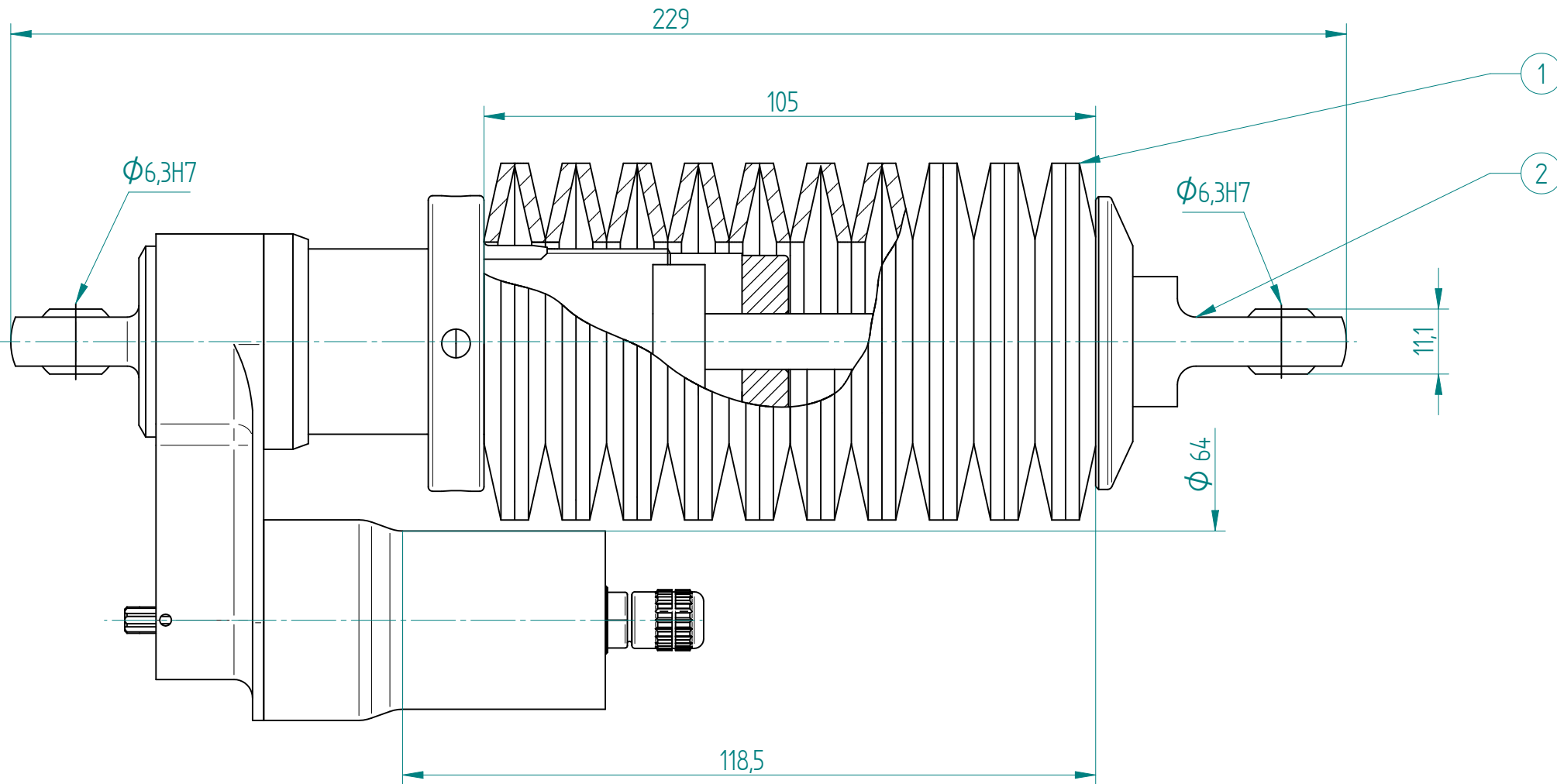


<b>Kaalu ümberjaotumise arvutus</b>													
Tallivähe	1.53 m	Ees	47.77%	Kaalijaotus	Ees	75	75	160	kg	Vedrustatud massi ümberjaotumine	Ees	12.656776	kg
Rööpmed	1.21 m	Ees	75	Ratsete vertikaalkoormus	Ees	82	82	164	kg	Vedrustatud massi geomeetrisine ümberjaotumine	Ees	7.837497603	kg
Massikeskme kõrgus	0.3 m	Ees	0.3	Vedrustatud massid	Ees	17	17	34	kg	Summaarne elastne kaalu ümberjaotumine	Ees	112.7035123	kg
Rehvi koormamata raadius	0.23241 m	Ees	0.45432	Vedrustatud massid	Ees	10.17	10.17	20.34	kg	Küljekaalumijätkus	Ees	2.145337105	25.153
Rehvi vertikaalne jätkus	103 N/mm	Ees	103	Vedrustatud massid	Ees	17	17	34	kg	Stabiilsustori jätkus rattas	Ees	3.939595023	H-Z
RC kõrgus	25.23 mm	Ees	0.05523	Vedrustatud massid	Ees	58	58	116	kg	Roll gradient	Ees	0.516647414	kraad/°G
Vedru liiklus	43.88955 N/mm	Ees	250	Rehvide koormatud raadius	Ees	0.225267	0.225267	450.534	m	Roll angle	Ees	1.003294829	kraad/°
Vedru ülevanditegur	0.9	Ees	0.9	Massikeskme kaugus	Ees	0.79910328	0.79910328	1.59820656	m	Stabiilsustori ja vedru suhe	Ees	0.572633333	m
Stabiilsustovarraste liiklus	0	Ees	0	Tasakaalust b	Ees	0.73093172	0.73093172	1.46186344	m	Magic Number (kaalu ümberjaotumise suhe)	Ees	46.60%	Ülejuhitav
Pehme	55	Ees	55	Nimm	Ees	144.5329271	144.5329271	289.0658542	N/mm	Kasuu erinevuste suhe esi- ja tagatelle vahel	Ees	46.60%	Ülejuhitav
Keskmise	90	Ees	90	Nimm	Ees	161.6924571	161.6924571	323.3849142	N/mm	Juhitavuse kaarduvus	Ees	1.17%	Ülejuhitav
Jäik	113	Ees	113	Nimm	Ees	0.3	0.3	0.6	N/mm	Kasuu erinevuste suhe esi- ja tagatelle vahel	Ees	46.60%	Ülejuhitav
Stabiilsustovarraste ülevanditegur	0.304	Ees	0.304	Nimm	Ees	0.304	0.304	0.608	N/mm	Juhitavuse kaarduvus	Ees	1.17%	Ülejuhitav
Ees	0.304	Ees	0.304	Nimm	Ees	0.304	0.304	0.608	N/mm	Kasuu erinevuste suhe esi- ja tagatelle vahel	Ees	46.60%	Ülejuhitav
Taga	0.306	Ees	0.306	Nimm	Ees	0.306	0.306	0.612	N/mm	Juhitavuse kaarduvus	Ees	1.17%	Ülejuhitav

**Lisa 2 [30]**

Parameeter	Telg	Katsete arv	Valem	Katse liik	Standard
Elastsusmoodul (E)	X		$E = \text{stress/strain}$	Tõmbekatse, 0°	D 3039
	Y		$E = \sigma/\epsilon$ ; kus	Tõmbekatse, 90°	D 3039
	Z		$\epsilon = (L_n - L_0)/L_0$ ja $\sigma = F/A$	Tõmbekatse silindrilisest kettast	C297, C633, D2096
Poissoni tegur (ν)	XY		$\nu = \epsilon_y/\epsilon_x$	Tõmbekatse, 0°	D 3039
	YZ			Tõmbekatse, 90°	D 3039
	XZ			Tõmbekatse silindrilisest kettast	C297, C633, D2096
Nihkeelastsusmoodul (G)	XY		$G = F \cdot L / (A \cdot \Delta x)$	Nihkekatse	D 5379
	YZ			Nihkekatse	D 5379
	XZ			Nihkekatse	D 5379
Tõmbetugevus	X	8	Max tulemus	Tõmbekatse, 0°	D 3039
	Y	8	Max tulemus, $\sigma_i = P_i/A$	Tõmbekatse, 90°	D 3039
	Z	9	Max tulemus	Tõmbekatse silindrilisest kettast	
Survetugevus	X	9	Max tulemus	Survekatse, 0°	D6641
	Y	9	Max tulemus	Survekatse, 90°	D6641
	Z			Survekatse	D6641
Nihketugevus	XY	9	Max tulemus, $\tau = P_m/2A$	Nihkekatse arvutus	D5379
	YZ	9	Max tulemus	Nihkekatse arvutus	
	XZ	9	Max tulemus	Nihkekatse arvutus	D5381
Tõmbedeformatsioon	X	8	Max tulemus	Tõmbekatse, 0°	D 3039
	Y	8	Max tulemus	Tõmbekatse, 90°	D 3039
	Z	9	Max tulemus	Tõmbekatse silindrilisest kettast	
Surve deformatsioon	X	9	Max tulemus	Survekatse, 0°	D6641
	Y	9	Max tulemus	Survekatse, 90°	D6641
	Z		Max tulemus	Survekatse	D6641
Nihke deformatsioon	XY	9	Max tulemus		D 5379
	YZ	9	Max tulemus		
	XZ	9	Max tulemus		D5381

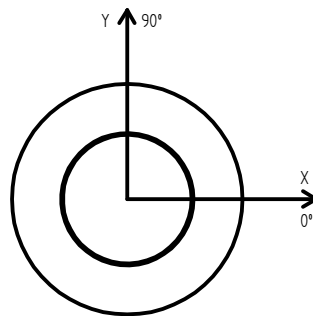
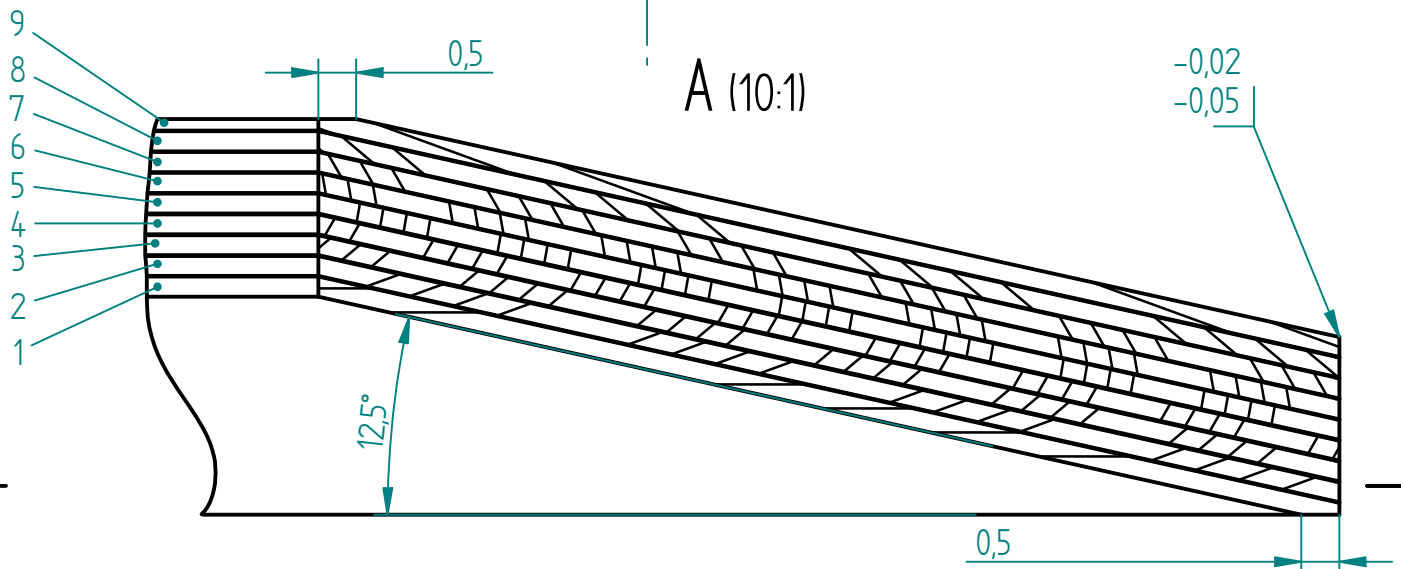
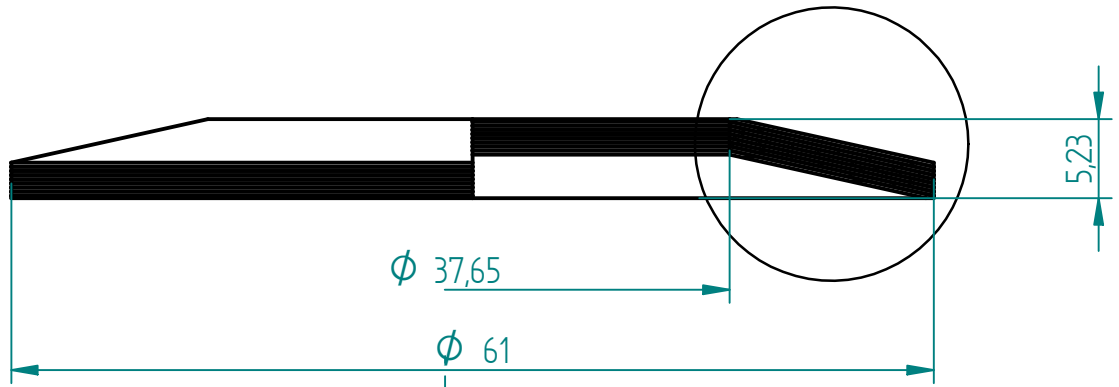
Materjal		<i>UD</i>	<i>Biaxial</i>
	Telg	Väärtus	Väärtus
Youngi moodul	<i>X</i>	124,73GPa	68,47 GPa
	<i>Y</i>	7000 MPa	68,47 GPa
	<i>Z</i>	10678 MPa	11644 MPa
Poissoni tegur	<i>XY</i>	0,34	0,32
	<i>YZ</i>	0,5	0,03
	<i>XZ</i>	0,34	0,03
Nihkeelastsusmoodul	<i>XY</i>	4000 MPa	2850 MPa
	<i>YZ</i>	3000 MPa	2500 MPa
	<i>XZ</i>	4000 MPa	2500 MPa
Tõmbetugevus	<i>X</i>	1305,7 MPa	758 MPa
	<i>Y</i>	20,9 MPa	758 MPa
	<i>Z</i>	9 MPa	11,3 MPa
Survetugevus	<i>X</i>	290,6 MPa	344,5 MPa
	<i>Y</i>	72 MPa	344,5 MPa
	<i>Z</i>	72 MPa	150 MPa
Nihketugevus	<i>XY</i>	45,9 MPa	65,4 MPa
	<i>YZ</i>	6,2 MPa	7,7 MPa
	<i>XZ</i>	45,9 MPa	7,7 MPa
Tõmbe deformatsioon	<i>X</i>	0,11	0,0113
	<i>Y</i>	0,003	0,0113
	<i>Z</i>	0,003	0,0038
Surve deformatsioon	<i>X</i>	0,0122	0,0232
	<i>Y</i>	0,0163	0,0232
	<i>Z</i>	0,0163	0,0129
Nihke deformatsioon	<i>XY</i>	0,1	0,12
	<i>YZ</i>	0,0428	0,007
	<i>XZ</i>	0,1	0,007



2	7800 FSAE Piggyback amortisaator		1	
1	CFRP Belleville vedrutaladrik	BV 03.01.00	20	
Osa	Väli	Materjal, nimetus	Tahis	Hulk
		Materjal	Märkimata pindalbed	Mass
				Moot
Teostas	I. Hioväin	Nimetus:		
Kontrollis	H. Herranen	Amortisaator ja vedru_koost		
Kinnitas		Leht:	Tahis:	
	Formula Student	1	BV 03.A.00	
				2:1

# Lisa 4.1

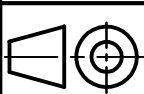
A



Kihtide asetuse laminaadis	
Kiht	Nurk
1. HPT410	0
2. HPT410	20
3. HPT410	40
4. HPT410	60
5. HPT410	80
6. HPT410	100
7. HPT410	120
8. HPT410	140
9. HPT410	160

Märkus 1: Sarruse ja maatriksi suhe 60/40

Märkus 2: kõvendada toatemperatuuril 24 h ja järelkõvendada maksimaalsete mehaaniliste omadusteni vastavalt vaigu andmelehele



Materjal:  
SGL HPT410 C45 410G ±45°biaksiaal +  
Pro-Set 114 epoksiidvaik /112 kõvendi

Märkimata piirhälbed:

ISO 2768-m

Mass:

0,09 kg

Moot:

2:1

Teostas I. Hioväin

Nimetus:

Kontrollis H. Herranen

CFRP Belleville taldrikvedru

Kinnitas

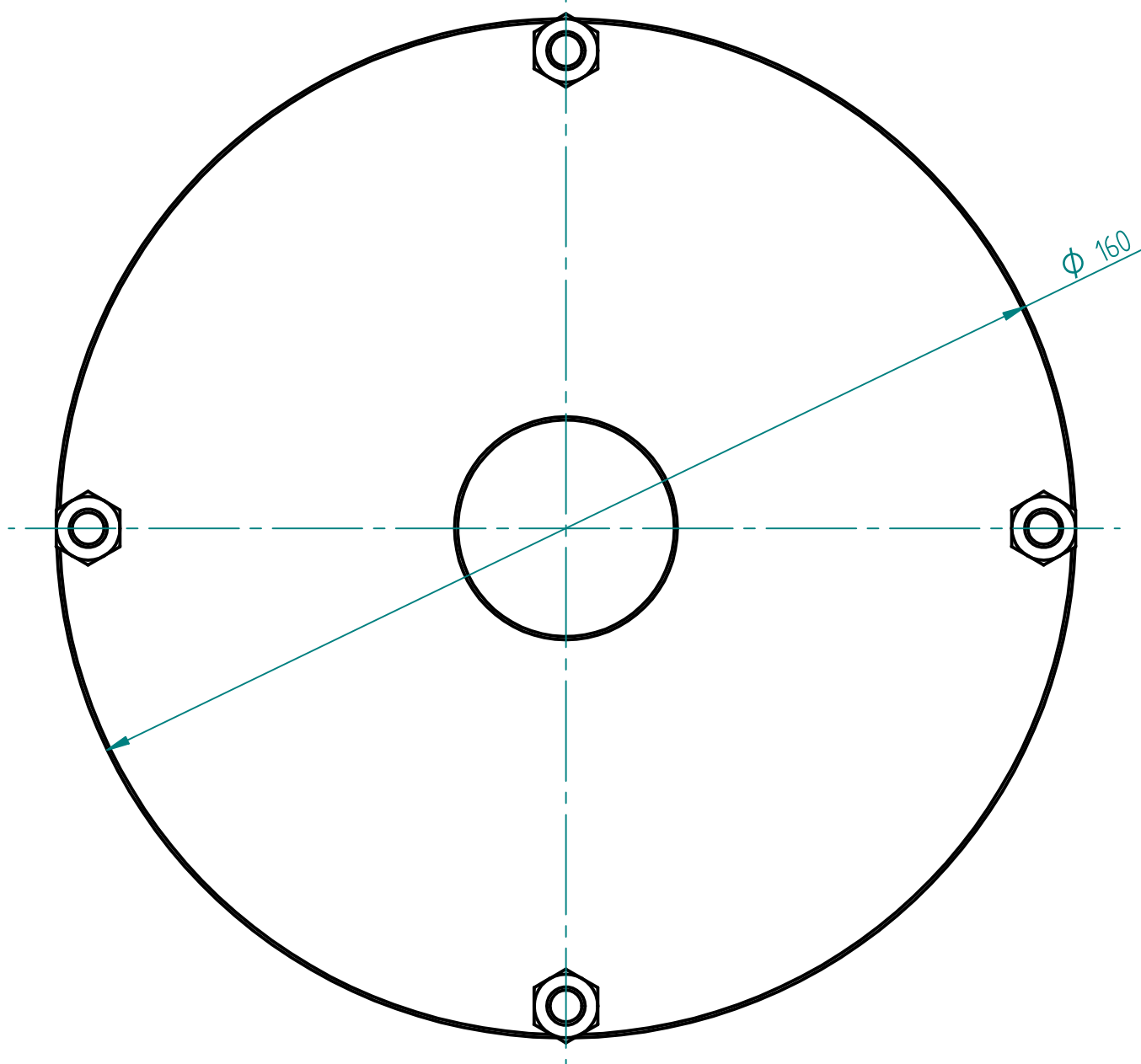
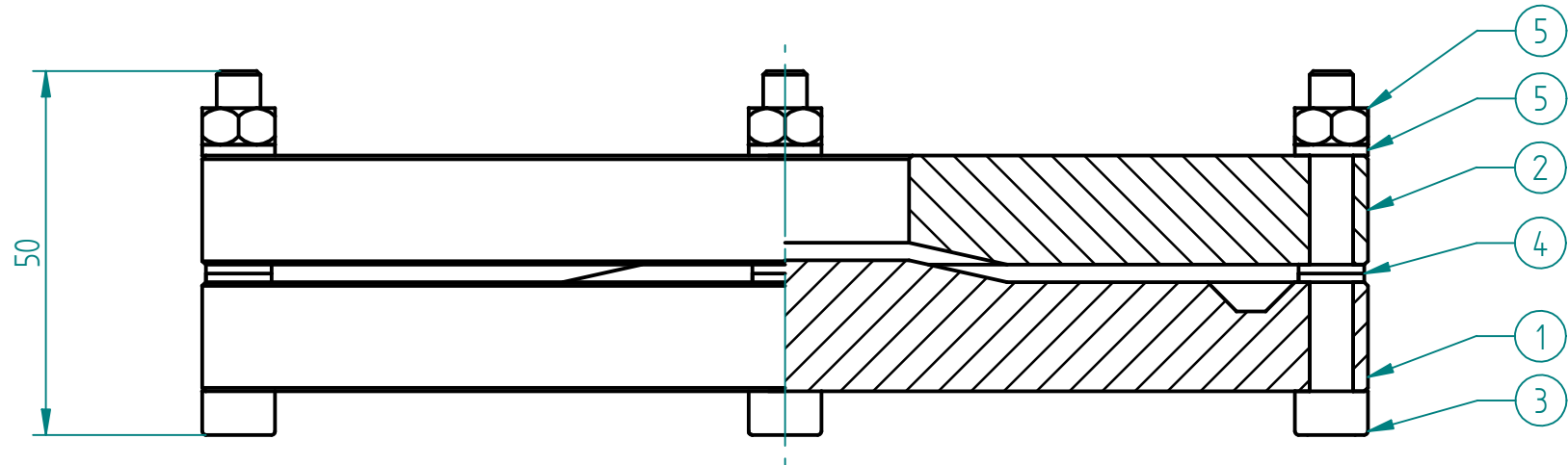
Leht:

2

Tähis:

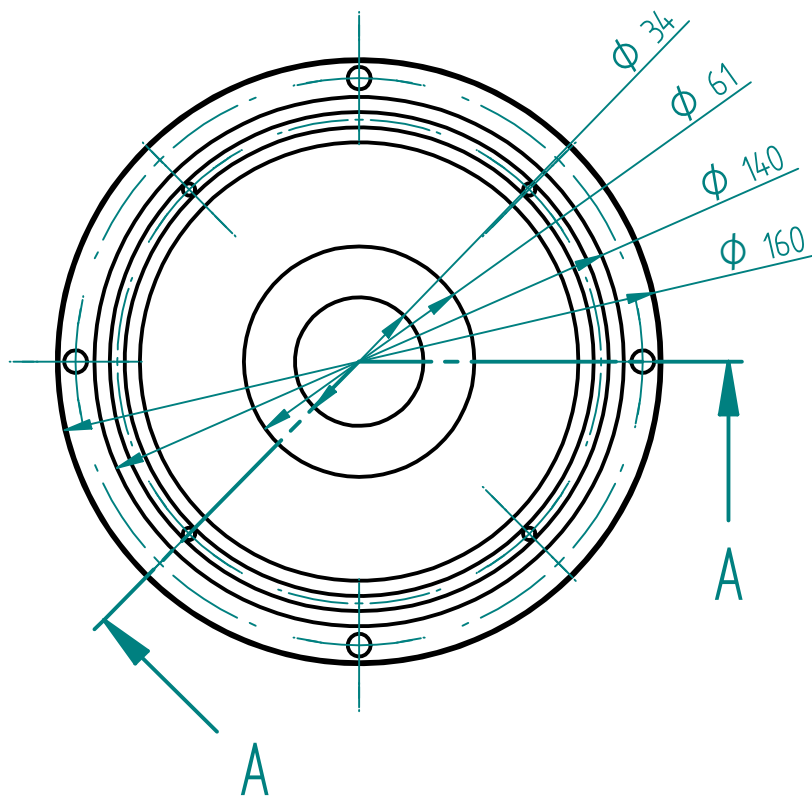
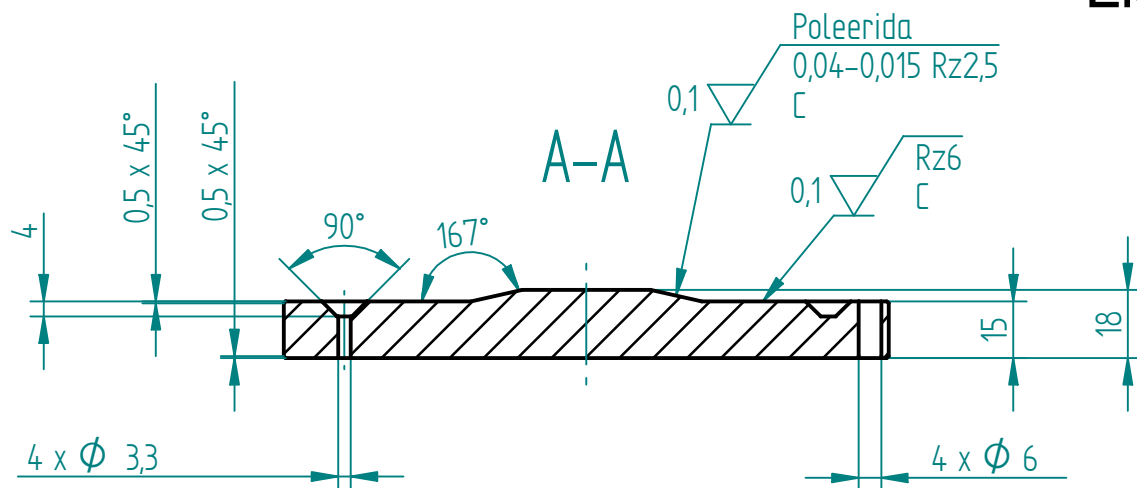
BV 03.01.00

Formula Student



6		Mutter M6 DIN 934-8		4	
5		Seib M6 DIN 9021		4	
4		Seib M5 DIN 9021		8	Puur. D6
3		Polt M6x45 DIN 912		4	
2		Teras 25CrMo4	BC 02.02.00	1	
1		Teras 25CrMo4	BV 02.01.00	1	
Osa	Väli	Materjal, nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Märkimata piirhälbed:	Mass:	Moot:
					1:1
Teostas	I. Hioväin		Nimetus:		
Kontrollis	H. Herranen		Prototüüpvorm_1_koost		
Kinnitas					
Formula Student			Leht:	1	Tähis: BV 02.A.00

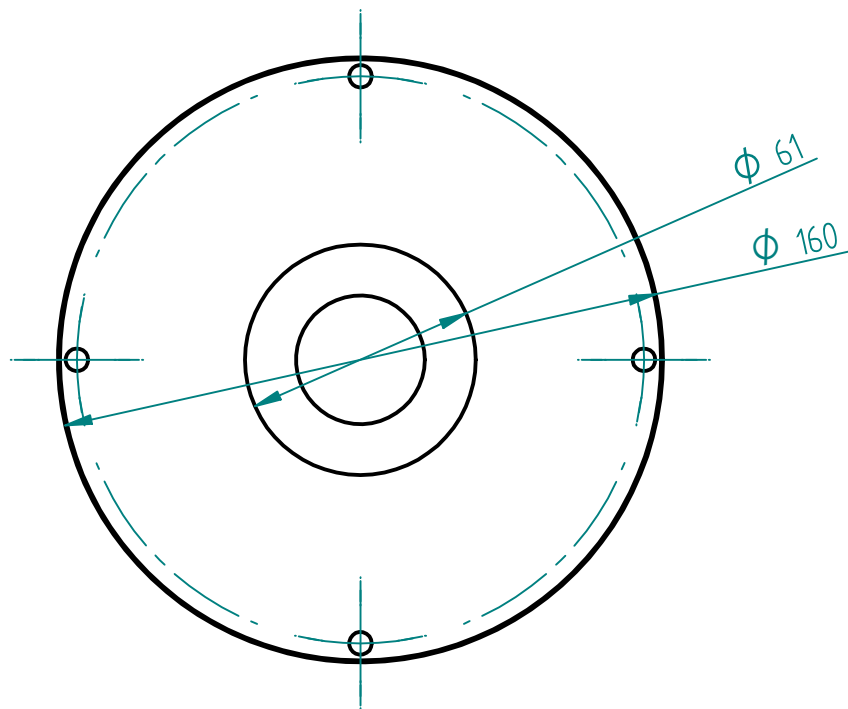
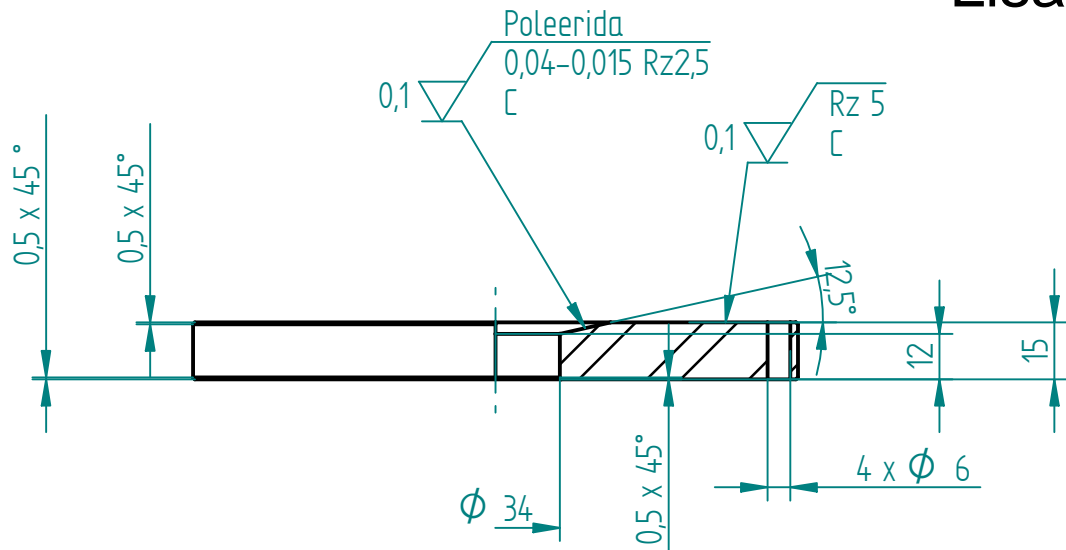
# Lisa 5.1



Märkus: tähistamata pinnad töödeldavahemikku Rz 6 – Rz 10

	Materjal: Teras 25CrMo4	Märkimata piirhälbed: ISO 2768-m	Mass: 2,29 kg	Mõõt: 1:2
Teostas	I. Hioväin	Nimetus: Vormi alumine pool		
Kontrollis	H. Herranen			
Kinnitas				
Formula Student		Leht: 2	Tähis: BV 02.01.00	

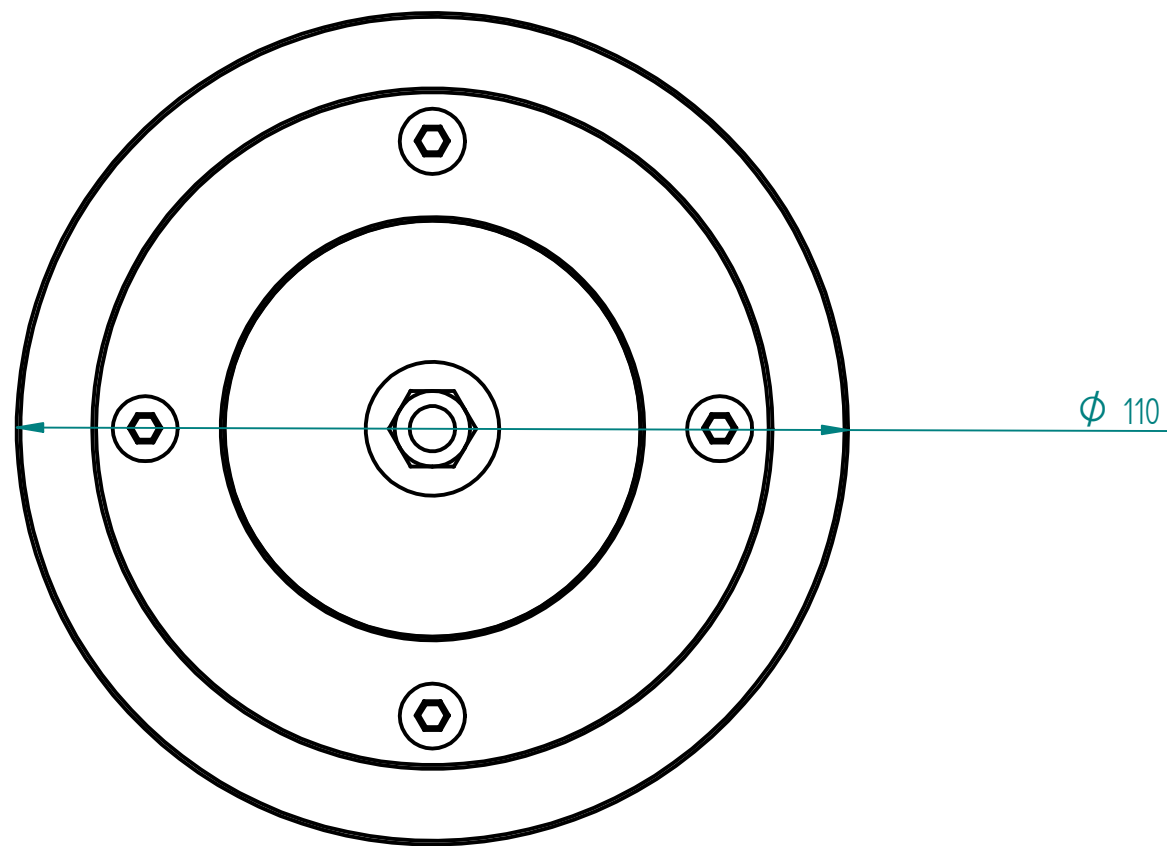
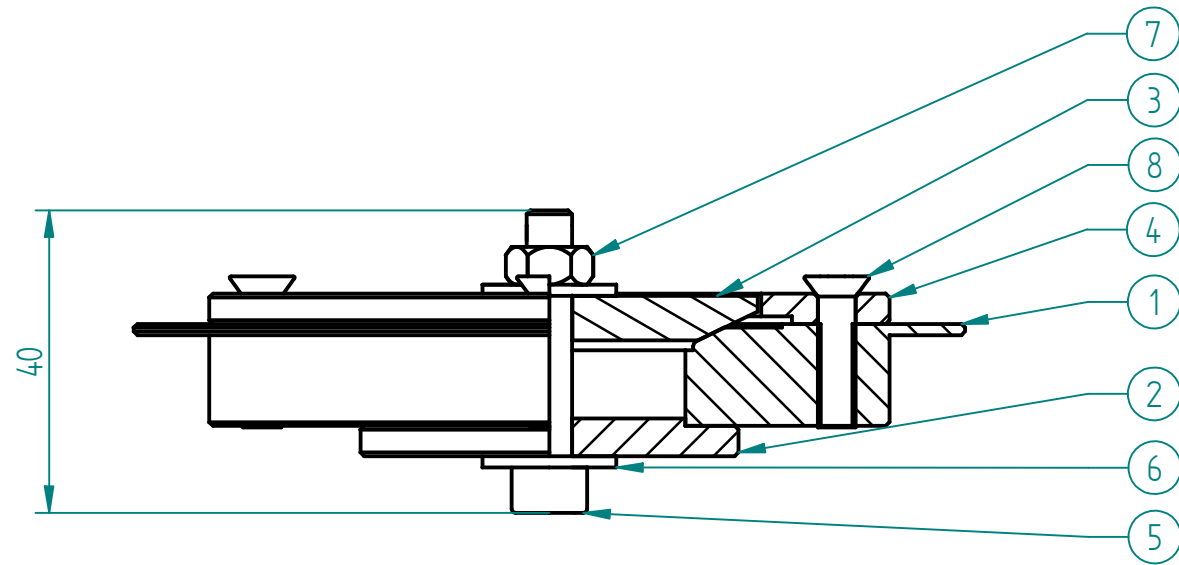
# Lisa 5.2

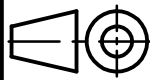


Märkus: tähistamata pinnad töödeldavahemikku Rz 6 - Rz 10

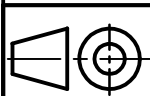
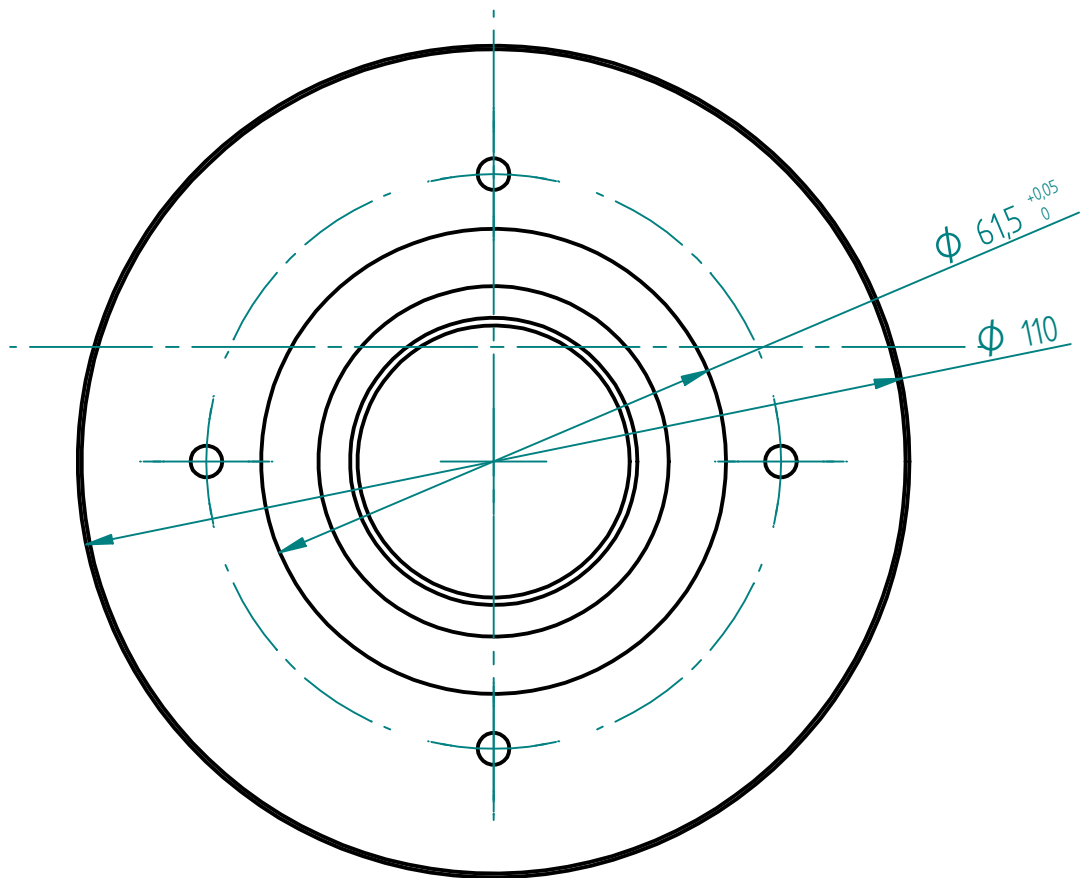
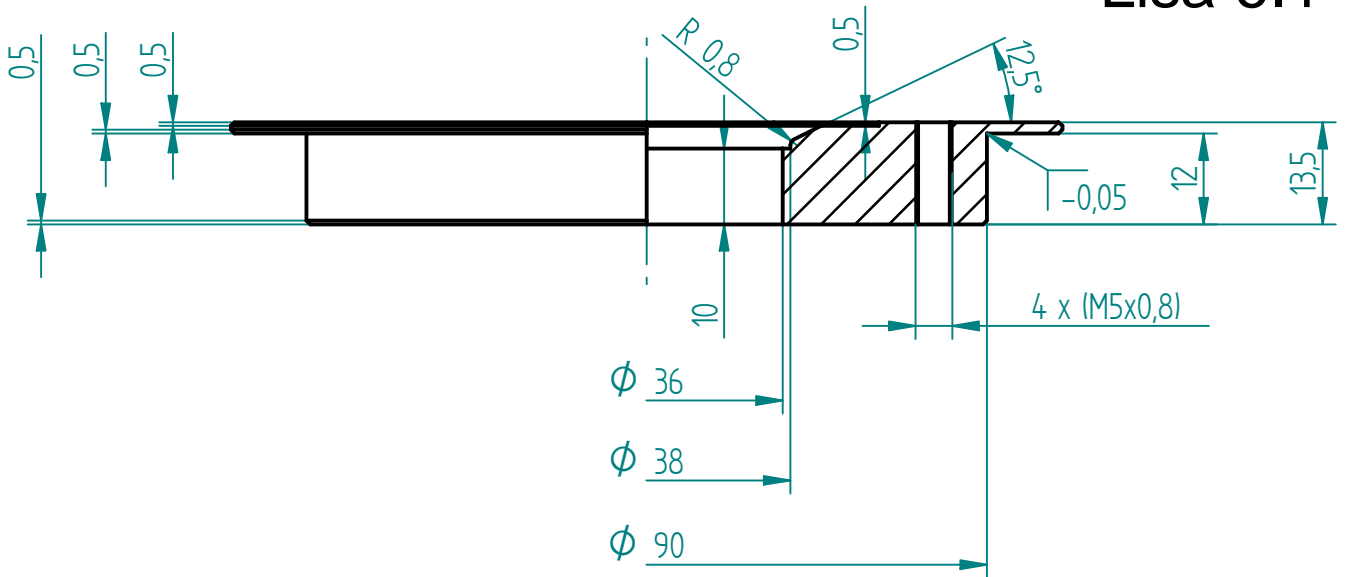
	<i>Materjal:</i> Teras 25CrMo4		<i>Märkimata piirhälbed:</i> ISO 2768-m		<i>Mass:</i> 2,22 kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
	<i>Teostas</i> I. Hioväin	<i>Nimetus:</i> Vormi ülemine pool				
<i>Kontrollis</i> H. Herranen						
<i>Kinnitas</i>						
Formula Student		<i>Leht:</i> 3	<i>Tähis:</i> BV 02.02.00			





8		Polt M4x20 DIN 7991		4	
7		Mutter M6 DIN 934-8		1	
6		Seib M6 DIN 125		2	
5		Polt M6x40 DIN 912		1	
4		Teras 25CrMo4	BV 01.04.00	1	
3		Teras 25CrMo4	BV 01.03.00	1	
2		Teras 25CrMo4	BV 01.02.00	1	
1		Teras 25CrMo4	BV 01.01.00	1	
Osa	Väli	Materjal, nimetus	Tähis	Hulk	Märkus
		Materjal:	Märkimata piirhälbed:	Mass:	Moot:
					1:1
Teostas	I. Hioväin		Nimetus:		
Kontrollis	H. Herranen		Lõikerakise koost		
Kinnitas					
Formula Student			Leht:	Tähis:	
			1	BV 01.A.00	

# Lisa 6.1



Materjal:

Teras 25CrMo4

Märkimata piirhälbed:

ISO 2768-m

Mass:

0,58 kg

Moot:

1:1

Teostas I. Hioväin

Nimetus:

Kontrollis H. Herranen

Löikerakis\_1

Kinnitas

Formula Student

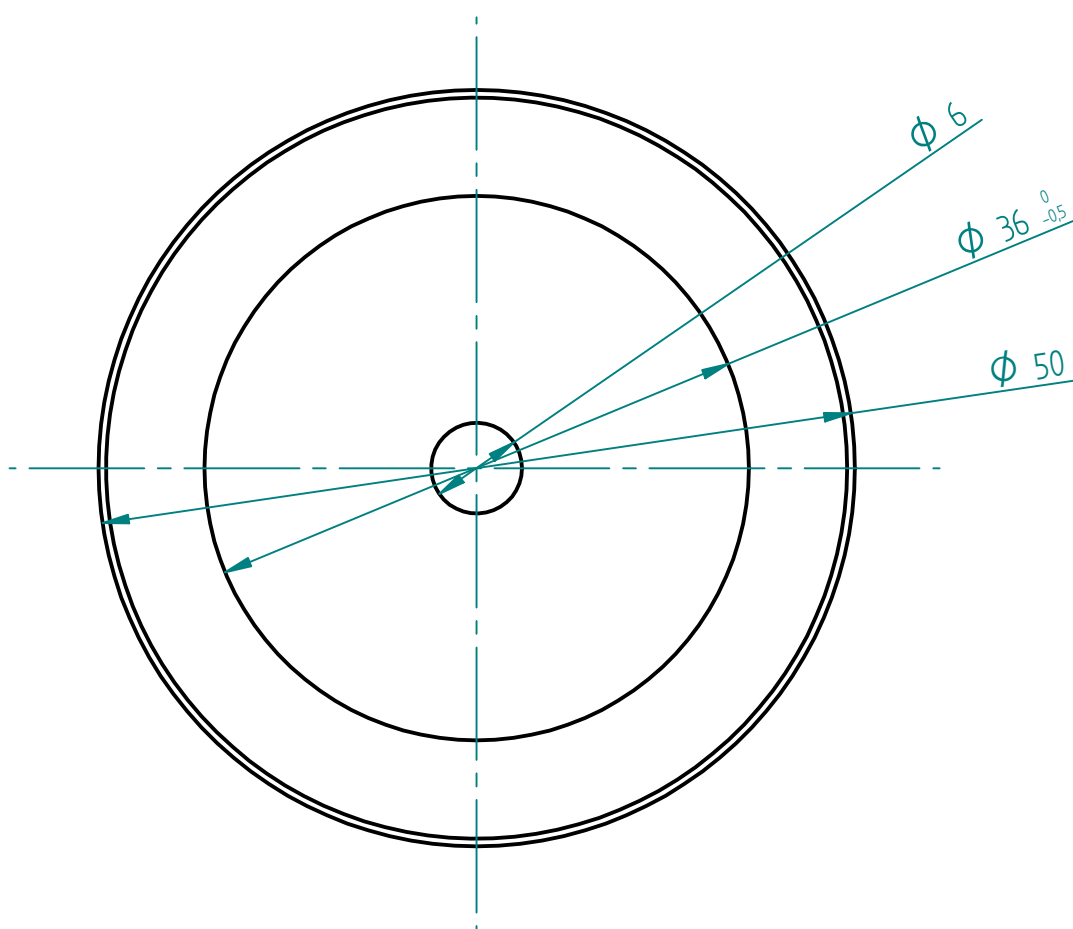
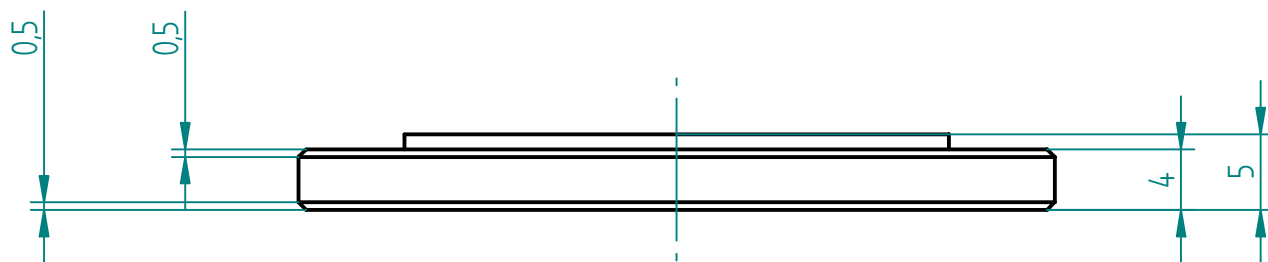
Leht:

2

Tähis:

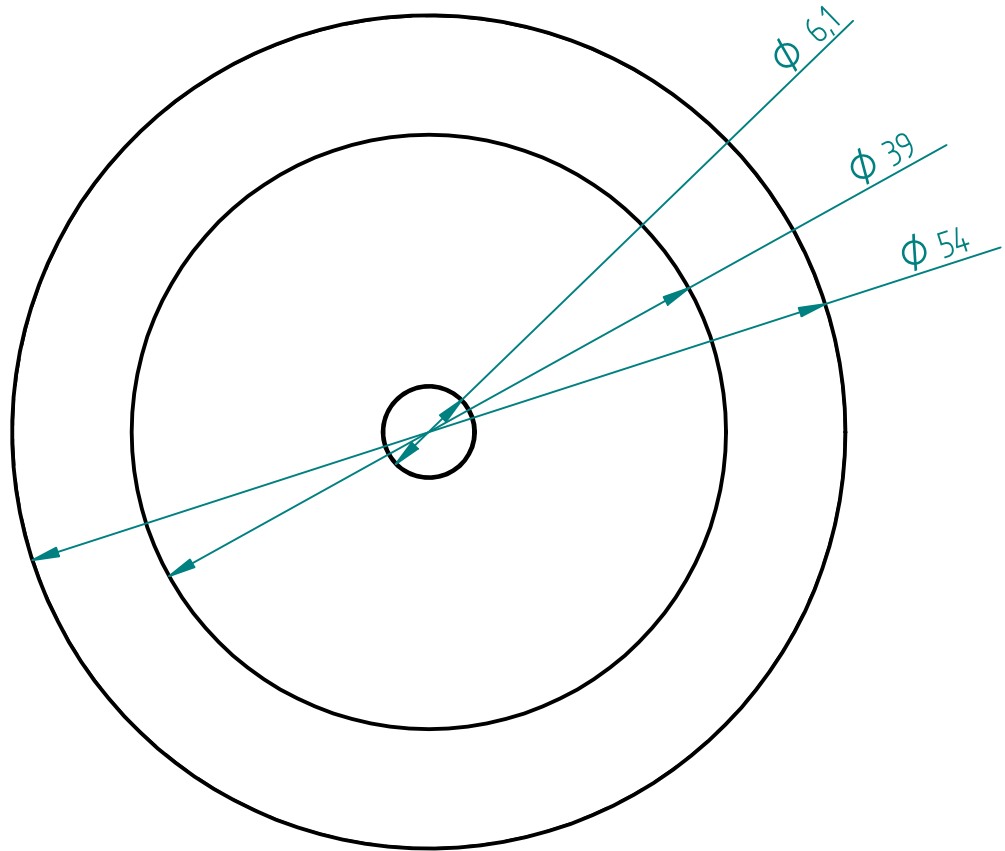
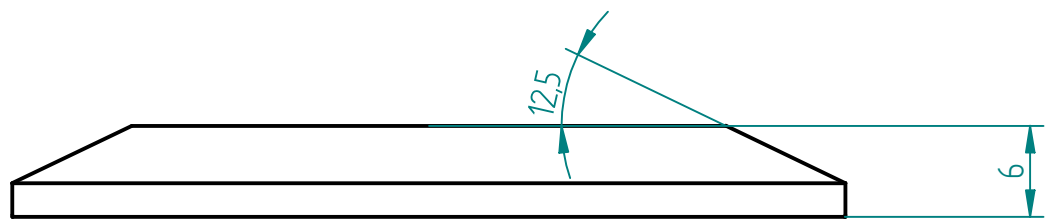
BV 01.01.00

# Lisa 6.2



	Materjal: Teras 25CrMo4		Märkimata piirhälbed: ISO 2768-m		Mass: 0,07 kg	Moot: 2:1
	Teostas I. Hioväin	Nimetus: Alumine seib				
Kontrollis H. Herranen						
Kinnitas						
Formula Student		Leht: 3	Tähis: BV 01.02.00			

# Lisa 6.3



	<i>Materjal:</i> Teras 25CrMo4		<i>Märkimata piirhälbed:</i> ISO 2768-m		<i>Mass:</i> 0,09 kg	<i>Mõõt:</i> 2:1
	<i>Teostas</i> I. Hioväin	<i>Nimetus:</i> Ülemine seib				
<i>Kontrollis</i> H. Herranen						
<i>Kinnitas</i>	<i>Leht:</i> 4		<i>Tähis:</i> BV 01.03.00			
Formula Student						

