



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## SÜSINIKKOMPOSIIDIST KOKKUPÕRKELEEVENDI PROJEKTEERIMINE TUDENGIVORMELI AUTOLE FEST19

THE DESIGN OF A CFRP IMPACT ATTENUATOR FOR THE FORMULA STUDENT  
VEHICLE FEST19

### BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: .....  
/Markus Ilves /

Üliõpilaskood: 164603MAHB

Juhendaja: .....  
/Leo Teder, assistent/

Tallinn, 2019

(Tiitellehe pöördel)

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

**Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut**

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Markus Ilves, 164603MAHB  
**Õppekava, peeriala:** MAHB02/13 - Mehhatroonika  
**Juhendaja(d):** assistent Leo Teder

**Lõputöö teema:**

Süsinikkomposiidist kokkupõrkeleevendi projekteerimine tudengivormeli autole FEST19

The Design of a CFRP Impact Attenuator for the Formula Student Vehicle FEST19

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Projekteerida ilma core materjalita süsinikkomposiidist kokkupõrkeleevendi.
2. Konstruksiooni simuleerimiseks kasutada dünaamilisi analüüse.
3. Kokkupõrkeleevendi mass kergem kui alumiiniumlahendusel.

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Teoreetiliste materjalidega tutvumine	01.09.2018
2.	Projekteerimise ning analüüsimise lõpp, katsekehade tootmine	01.02.2019
3.	Lahenduste katsetamine	01.03.2019

**Töö keel:** eesti keel

**Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....." .....201....a

**Üliõpilane:** Markus Ilves

..... "....." .....201....a

/alkiri/

**Juhendaja:** Leo Teder

..... "....." .....201....a

/alkiri

*Kinnise kaitsmise ja/või avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel*

# SISUKORD

Tabelite ja illustratsioonide loetelu.....	6
EESSÖNA.....	9
Lühendite ja tähiste loetelu .....	10
SISSEJUHATUS .....	11
1. Kokkupõrkeleevendi olemus .....	13
2. Projekteerimist piiravad nõuded.....	14
3. Lahenduste võrdlus .....	18
3.1 Alumiiniumist kärg .....	18
3.2 Kokkupõrkenina .....	19
3.3 Süsinikkomposiidist kärg.....	20
4. Süsiniklaminaadi käitumine kokkupõrkel.....	21
4.1 Laminaadi purunemisviisid .....	22
4.2 Triggerid .....	24
5. Kokkupõrkekatse ülesehitus .....	26
6. Dünaamilise analüüsi ülesehitus ja parameetrid .....	28
7. Prepreg tootmistehnoloogiaga kokkupõrkenina .....	32
7.1 Kokkupõrkenina projekteerimine .....	32
7.2 Kokkupõrkenina tootmine .....	37
7.3 Kokkupõrkenina testimine .....	38
8. Süsinikkärjest kokkupõrkeleevendi geomeetria valik .....	41
8.1 Silinder .....	42
8.2 Korrügeeritud struktuur.....	43
9. Katmiku projekteerimine ning tootmine.....	44
10.Korrügeeritud katsekeha projekteerimine.....	45
11.Katsekehade tootmine .....	50

11.1 Katsekehade testimine .....	53
11.2 Teine kokkupõrkekatsetus .....	55
11.3 Järeldused ning edasine arendustöö .....	57
Kokkuvõte.....	59
Summary .....	60
KASUTATUD KIRJANDUS .....	61
LISAD .....	63
Lisa 2.....	65

## Tabelite ja illustratsioonide loetelu

Sele 1.1 Kokkupõrkeleevendi koost, vasakult: nina katmik, kargstruktuur ning AIP .....	13
Sele 2.1 Kokkupõrkeleevendi dimensioonide reeglite selgitus [2] .....	14
Sele 3.1 FEST 18 alumiiniumkärje katsekeha enne ja pärast testimist .....	18
Sele 3.2 Tiimi Revolve NTNU kokkupõrkenina [4].....	19
Sele 3.3 Tiimi FST Lisboa komposiidist kärje ja AIP lahendus [19] .....	20
Sele 4.1 Metallide plastse ning komposiitmaterjalide hapra deformatsiooni võrdlus [8].....	21
Sele 4.2 Maatriksi purunemismeetodid. (a) Survel (b) Tõmbel [9].....	22
Sele 4.3 Sele 4.2 Kiudude purunemismeetodid. (a) Survel (b) Tõmbel [8] .....	22
Sele 4.4 Energia neeldumine komposiitmaterjali purunemisel protsentuaalselt [9] .....	22
Sele 4.5 Erinevad purunemisviisid [11] .....	23
Sele 4.6 Kokkupõrkejõu ja liikumistee graafik [9] .....	24
Sele 4.7 Süsiniklaminaadi trigger, 45-kraadine faas [9] .....	25
Sele 5.1 Kukkumiskatse ülesehitus. 1- Katsekeha, 2- Kukkuv mass, 3- Arvuti, andurijuhtmega ühendatud kukkiva massi külge 4- Vints.....	26
Sele 6.1 Elemendi "liivakellastumine" [14] .....	29
Sele 6.2 Liivakellastumine. Characteristic Dimension - Opposing Faces, Hex Integration - 1 pt Gauss.....	31
Sele 6.3 Jäik sein liigub läbi laminaadi ilma seda mõjutamata. Static Damping 0,1. ....	31
Sele 6.4 Geometric strain 1,5 .....	31
Sele 7.1 Kokkupõrkenina CAD mudel koos kangakihtide tsoonidega .....	32
Sele 7.2 Problemaatiline meshi piirkond .....	33
Sele 7.3 Nina analüüs. Pildil on näha materjali purunemist nurkadest ning külgedelt .....	34
Sele 7.4 Laminaadi süsinikukihid. a) Nurkade tugevduslapid, b) Tsoon 1, c) Tsoon 2, d) Tsoon 3, e) Tsoon 4, f) Core .....	35
Sele 7.5 Laminaadi kogupaksus.....	36

Sele 7.6 Kokkupõrkenina laminaadi välimine kiht koos core materjaliga.....	37
Sele 7.7 Kokkupõrkenina pärast vormist eemaldamist.....	38
Sele 7.8 Kokkupõrkenina katse high speed kaamera kaadrid.....	39
Sele 7.9 Katsekeha pärast katsetust.....	39
Sele 7.10 Nina katse kiirendusgraafik .....	40
Sele 8.1 Süsiniksilindritest kokkupõrkeleevendi kontseptsioon .....	42
Sele 8.2 Esiseina (front bulkhead) ja kärje toetuspinna minimaalne jõuõlg.....	43
Sele 9.1 Katmiku projekteerimisel arvestatud varu kärje geomeetriaks .....	44
Sele 10.1 Erinevaid projekteeritud ning analüüsitud kärje geomeetriaid .....	45
Sele 10.2 Laminaadi purunemine pingekontsentratsioonide kohtades kokkupõrkehetkel .....	46
Sele 10.3 Sügavalt korrigeeritud profiil (süsiniklaminaadi nõtkumistestist) [15] .....	47
Sele 10.4 Analüüsimudel .....	47
Sele 10.5 Meshi kvaliteet .....	48
Sele 10.6 kangaste suuna valik.....	48
Sele 10.7 Kanga kiu suuna jooksmine lamineerimisel.....	49
Sele 10.8 Lõplik kokkupõrkeleevendi kuju .....	49
Sele 11.1 Liitekohtade paiknemine kihiti .....	50
Sele 11.2 Süsinikust AIP-d kokkupõrkekatse jaoks.....	51
Sele 11.3 Kärgede massid.....	51
Sele 11.4 Ahjutsükli käigus tekkinud tootmisviga .....	52
Sele 11.5 Valmis katsekeha .....	52
Sele 11.6 12-kihiline katsekeha (vasakul) ja 10-kihiline katsekeha (paremal) pärast kokkupõrkekatsetust.....	53
Sele 11.7 10-kihilise katsekeha graafikud .....	54
Sele 11.8 12-kihilise katsekeha graafikud .....	54

Sele 11.9 Sisselõigetega katsekeha (vasakul) ning erineva tugevusega tsoonidega katsekeha (paremal).....	55
Sele 11.10 Katsekehad pärast purunemist. Sisselõigetega (vasakul) ja tsoonidega (paremal) .....	56
Sele 11.11 Tsooniti lamineeritud katsekeha graafikud .....	57
Sele 0.1 Nina kõrvaltvaade ja pealtvaade .....	65
Sele 0.2 Katmiku positiivvorm .....	66
Sele 0.3 Katmik vormeli küljes.....	66



## EESSÕNA

Antud bakalaureusetöö valmis Formula Student Team Tallinna algatusest. Töö koostamine toimus Tallinna Tehnikaülikoolis, vajalikud katsed viidi läbi ettevõttes Optimus Tuning. Soovin tänada oma juhendajat, Leo Tederit ning kõiki Formula Student Team Tallinna liikmeid ning veterane. Lisaks soovin tänada ettevõtet Optimus Tuning võimaluse eest kokkupõrkekatsetusi läbi viia ning Joonas Eametsa vajalike vormide tootmise eest.

## Lühendite ja tähiste loetelu

AIP - Anti-Intrusion Plate

CAD - Computer Aided Design

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

FSAE - Formula Society of Automotive Engineers

FSG - Formula Student Germany

IA - Impact attenuator

IAD - Impact Attenuator Data

SEA -Specific Energy Absorption

## SISSEJUHATUS

Antud bakalaureusetöö ülesandeks on projekteerida Formula Student klassi võistlusautole FEST19 süsinikkomposiidist esikokkupõrkeleevendi. Formula Student on iga-aastane peamiselt inseneritudengitele suunatud tootearendusvõistlus. Selle raames projekteeritakse ning toodetakse hooaja jooksul üheistmeline vormelauto, millega võetakse osa ülemaailmsetest võistlusetappidest.

Valminud sõidukeid hinnatakse nii dünaamiliste kui ka staatiliste kriteeriumite alusel. Dünaamiliste alade käigus võrreldakse sõidukite otsest rajavõimekust kestvussõidus, kaheksasõidus, kiirenduses ja sprindis.

Staatiliste alade raames kaitstakse kogemustega inseneridele vormelauto kõikide elementide disainiotsuseid. Lisaks hinnatakse ka äriplaani loomist ning maksumusaruannet, kus on välja toodud ühe sõiduki eksemplari tootmismaksumus koos materjali- ja töökuludega.

Ühe ja sama vormeliga on võimalik võistlustel osaleda ainult ühel hooajal ning iga aasta võetakse korraldajate poolt vastu ka reeglitemuudatusi, mis tähendab, et uus hooaeg algab täiesti uue masina projekteerimisest. See tagab pideva progressi auto disainis ning pakub meeskonnaliikmetele rohkem õppimis- ning arenguvõimalusi.

Kokkupõrkeleevendi koosneb vormelauto esiotsa kinnituvast plaadist ning kokkupõrkel purunevast struktuurist. See on võistlussarja reeglite järgi üks vormeli kere kohustuslikest elementidest ning omab suurt tähtsust sõiduki turvalisuse tagamisel. Formula Student Team Tallinnas on 2009. aastast alates kasutatud standartseks kujunenud alumiiniumkärje ja -plaadi lahendust.

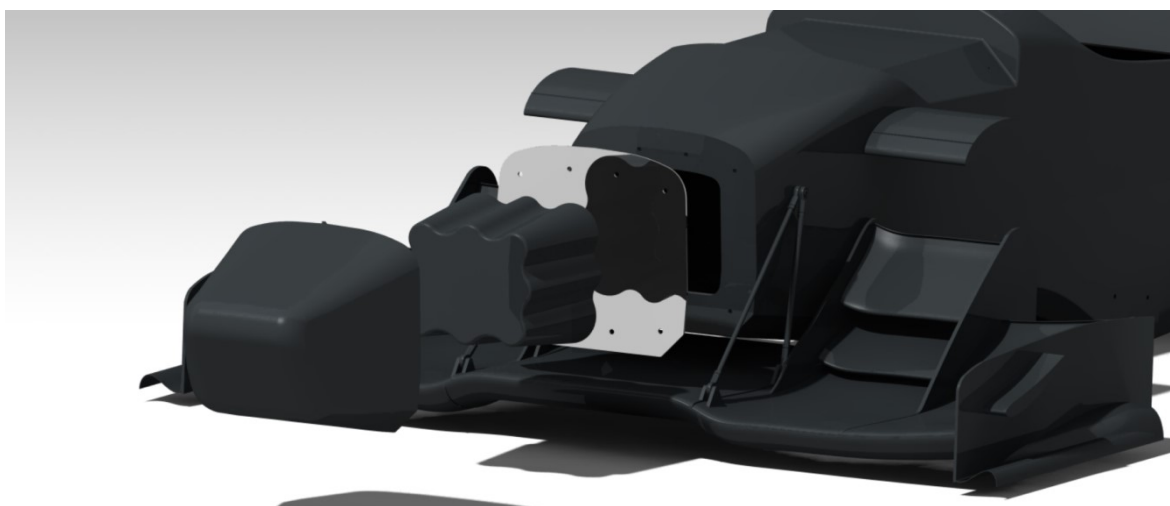
Metallist lahenduse asendamine süsinikkomposiidist detailiga võimaldaks lahenduse massi langetada, parandades seega sõiduki dünaamilisi omadusi ning tagades rohkem punkte disainikaitsmisel. Käesoleva töö peamiseks eesmärgiks on luua reeglitele vastav ning töökindel süsiniklaminaadist kokkupõrkeleevendi, mis oleks massilt kergem varem kasutatavast lahendusest.

Selle saavutamiseks modelleeritakse raalprojekteerimistarkvaras CATIA V5 erinevate geomeetriatega detaile, valitakse neist programmis Ansys 19.2 dünaamiliste tugevusanalüüside alusel parim ning valideeritakse dünaamilise katse alusel katsekehad, et tõestada lahenduse vastavust reeglitele.

## 1. Kokkupõrkeleevendi olemus

Kokkupõrkeleevendi kujutab endast tudengivormeli võistlusauto kere esiossa kinnituvat struktuuri, mille peamine ülesanne on kokkupõrke puhul vähendada kahju ülejäänud sõidukile ning juhile. Struktuur koosneb harilikult kolmest osast:

- Nina katmik, mille põhiroll on tagada võistlusauto ninale aerodünaamiline kuju.
- Kärghstruktuur, mille hävinemisel neeldub kokkupõrkeenergia
- Plaat (Anti - Intrusion Plate, edaspidi ka AIP), millele kärgh on fikseeritud. Plaat peab vastama kindlatele tugevusnõuetele, vältimaks, et kokkupõrkel osalevad välised kehad sõiduki kere sisemusse satuksid.



Sele 1.1 Kokkupõrkeleevendi koost, vasakult: nina katmik, kärghstruktuur ning AIP

## 2. Projekteerimist piiravad nõuded

Et kvalifitseeruda FSAE võistluste dünaamiliste sõitude starti, on sõidukiga vajalik eelnevalt läbida põhjalik tehniline kontroll, kus vaadatakse, kas kõik auto elemendid vastavad reeglites kehtestatud nõuetele. Puuduste esinemisel diskvalifitseeritakse vormel dünaamiliselt aladelt, eemaldades seega tiimi konkurentsist. Tehnilist kontrolli võidakse kohtunike poolt teostada ka kohe pärast dünaamilisel alal finišeerimist. Seega on tähtis, et kõik sõiduki elemendid oleksid reeglitepärased ning piisavalt töökindlad, et mistahes hetkel kontrollides ei ilmneks tehnilisi probleeme.

Euroopa võistlusetappidel on üldkasutuses peamiselt Formula Student Germany reeglistik, millele tuginedes on koostatud ka käesolev lõputöö. FSG reeglites on piirangud kokkupõrkeleevendi disainile määratud alljärgnevate punktidega [1]:

### T 3.17 Kokkupõrkeleevendi

T 3.17.1 Igal sõidukil peab olema kokkupõrkeleevendi.

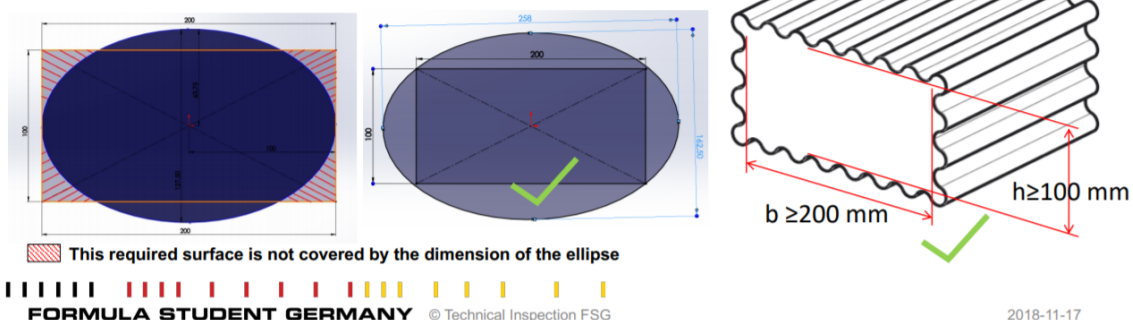
T 3.17.2 Kokkupõrkeleevendi nõuded:

- Paigaldatud autokere esiseina külge.
- Vähemalt 100 mm kõrge, 200 mm lai ning 200 mm pikk.

### Impact Attenuator Dimensions



- The dimensions of the IA are given by the rules in T3.17.2.
- These are fixed minimum dimensions and do not represent a minimum cross sectional area



Sele 2.1 Kokkupõrkeleevendi dimensioonide reeglite selgitus [2]

- Ei tohi tungida kokkupõrkel läbi autokere esiseina.
- Fikseeritud otse AIP külge.
- Ei tohi olla osa struktuursest kere geomeetriast.
- Projekteeritud kinnise esiosaga.
- Ei või olla laiem või kõrgem kui AIP.

**T 3.17.3** Kõikidel sõidukitel peab eksisteerima Anti-Intrusion Plate, mis on 1.5 mm paksune terasplaat või 4 mm paksune alumiiniumist plaat.

- Kui IA ja AIP (IA koost) on kinnitatud autokere esiseina külge poltliitega, peab AIP olema samade dimensioonidega, kui on esiseina välisdimensioonid.
- Kui IA koost on esiseina külge keevitatud, peab see igas suunas ulatuma vähemalt toruraami torude keskteljeni.
- AIP ei või ulatuda üle autokere esiseina äärte.

**T 3.17.4** Alternatiivsed AIP lahendused on lubatud siis, kui on tõestatud nende vastavus reeglile **T 3.17.3**, kas läbi füüsilise katse nagu kirjeldatud reeglis **T 3.19.2**, või läbi 3-punkti paindekatse ning perimeetri nihkepinge katse nagu reeglis **T 3.5**. Need testid peavad tõestama, et:

- AIP ei hävine, kui 150 mm pikkuse löigu peale jaotatakse ühtlaselt koormus 120 kN.
- Plaadi tugevus löikele on piisav, et iga kinnituspunkt peab vastu vähemalt 20 kN suurust jõudu igas suunas.

**T 3.17.5** Kui IA koost ei ole kerega ühes tükis (näiteks keevitatud), peab see olema kinnitatud kere esiseina külge minimaalselt kaheksa 8 mm 8.8 klassi poldiga. IA peab olema kinnitatud AIP külge minimaalselt nelja 8 mm 8.8 klassi poldiga. Neid polte loetakse kriitilise tähtsusega kinnitusvahenditeks ning need peavad vastama reeglite punktile **T 10**.

**T 10.1.1** Kriitilise tähtsusega kinnitusvahendid on poldid, mutrid ja muud kinnitusvahendid, mida on kasutatud kas kere põhistruktuuris või veermiku ning turvavöö süsteemides või need, mille kohta on reeglites vastav märg.

**T 10.1.2** Kõik keermeetatud kriitilise tähtsusega kinnitusvahendid peavad kuuluma vähemalt klassi 8.8 või olema võrdväärselt tugevad.

**T 3.17.6** IA koostu kinnitus peab olema projekteeritud nii, et on tagatud vastupidavus nii külge- kui ka vertikaalkoormusele kokkupõrgetel, mis toimuvad nurga all. Vahtudest astmeliselt projekteeritud kokkupõrkeleevenditel peavad segmendid olema omavahel jäigalt kokku ühendatud.

**T 3.17.7** IA koostu kinnitus monokoki struktuuri külge peab olema kinnitatud „*Structural equivalency spreadsheet*“ punkti **T 3.6** alusel, mis tõestab vastavust minimaalselt kaheksale 8 mm 8.8 poldile.

**T 3.17.8** Kui meeskond kasutab „standartset“ FSAE kokkupõrkeleevendit ja esiseina välisserv ulatub IA koostust enam kui 25 mm kummalegi poole, peab esiseina tugevdama 25 mm x 1.5 mm terastorust või punkti **T 3.2** järgi võrdväärsest materjalist diagonaaliga.

**T 3.17.9** Kui on kasutatud standartset IA-d, aga struktuur ei vasta reeglile **T 3.17.8** ega ei ole tugevdatud diagonaaliga, peab läbi viima dünaamilise testi, et tõestada, et AIP ei deformeeru üle 25 mm.

**T 3.18.1** Kõik tiimid peavad võistlustele edastama IA aruande kasutades *Impact Attenuator Data* (IAD) vormi.

**T 3.19** Kokkupõrkeleevendi testi nõuded:

**T 3.19.1** Kui antud kokkupõrkeleevendiga 300 kg massiga auto sõidab vastu jäika seina kokkupõrkekiirusega 7 m/s, peab kokkupõrkeleevendi vastama alljärgnevatele tingimustele:

- Sõiduki keskmine aeglustus peab jääma alla 20 g, sealjuures ei tohi esineda üle 40 g kõrgemat tulemust.
- Neeldunud energia peab olema vähemalt 7350 J.
- Standardlahendusega ei ole tarvis testiandmeid IAD aruandesse kanda.

**T 3.19.2** IA testi käigus:

- IA peab olema fikseeritud AIP külge sama kinnitusmeetodiga kui sõidukil.
- IA peab olema kinnitatud struktuurselt sõiduki esiseinaga võrdse rakise külge.
- AIP ja testpingi vaheline kaugus peab olema vähemalt 50 mm.
- AIP mitte ükski osa ei või deformeeruda rohkem kui 25 mm.



**T 3.19.3** IA puhul mis on kinnitatud otse eesmise otsaseina külge ning mille puhul koormus kandub otse üle kere esiseinale (näiteks kokkupõrkeninad), peab läbi viima veel ühe testi, mis tõestab, et AIP peab vastu 120 kN suurusele jõule, mis on rakendatud minimaalse IA mõõtmetega alale. (100 mm x 200 mm).

**T 3.19.4** Kui sõidukil on eespool IA-d aerodünaamilised elemendid või sensorid, ei tohi detailide koguaeglustus ületada reeglis **T 3.19.1** määratud piire. Lubatud 120 kN piiridesse jäämise tõestamiseks on alljärgnevad variandid:

- IA koostu füüsiline testimine koos kõikide objektidega mis asuvad eespool AIP-d.
- IA dünaamilise testi käigus mõõdetud suurim jõud liita ülejäänud aerodünaamiliste esemete kinnituste purunemiseks vajalikule jõule. Kinnituste purunemise jõudu võib arvutada kinnitusviisi (nt poldi) lõikumisest või siis lüli nõtkumisest.
- „Standartse“ IA suurima jõu, 95 kN liitmine kinnituste purunemise jõule.

**T 3.19.6** Dünaamilisest katsest saadud kiirenduse andmeid analüüsid peab arvutused tegema filtreerimata andmetele toetudes. Kui andmetes eksisteerib kiirenduse väärtuseid üle 40 g, võib kasutada 100 Hz low pass Butterworth filtrit (-3 dB 100 Hz juures).

Lisaks eelnevalt välja toodud reeglitele piirab kokkupõrkeleevendi disaini ka vormeli nina katmiku geomeetria. Töö koordineerimise lihtsustamiseks on ka katmik projekteeritud töö autori poolt.

### 3. Lahenduste võrdlus

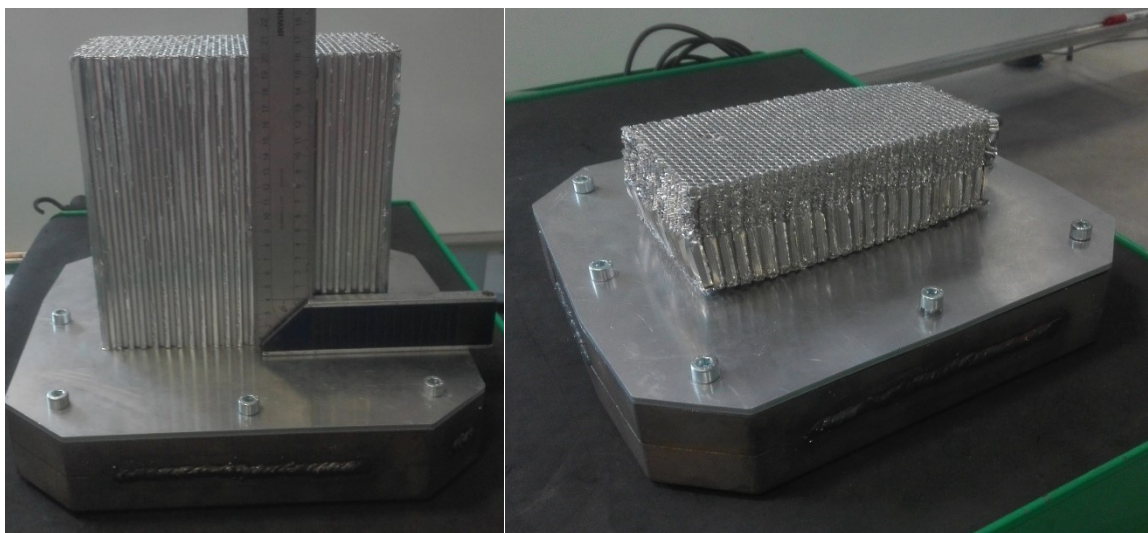
#### 3.1 Alumiiniumist kärj

Alumiiniumist kärje näol on tudengivormeli võistlussarjas tegemist tõenäoliselt ühe levinuima lahendusega. FS Team Tallinn on antud lahendust kasutanud seni igal vormelil alates aastast 2009. [3] Lahenduse plussiks on suur töökindlus ning lihtsus. Kärjega saadud katsetulemused on korduvalt reprodutseeritavad ning kuna tegemist on ostutootega, ei kaasne sellega peale AIP külge monteerimise muid töökulusid. Lisaks on alumiiniumkärj FSAE reeglites välja toodud standartsest vahust kokkupõrkeleevendist väiksema massi ning mõõtmetega, kuna seda on võimalik tellida täpselt reeglis T 3.17.2 kehtestatud minimaalsete dimensioonide järgi.

Suurim antud lahenduse puudus on, et seda ei ole võimalik optimeerida, kuna kärjel on fikseeritud mass ning geomeetria. Lisaks on seni kasutatud kärjed liialt suure varuteguriga, kuna osa struktuurist jääb katse käigus deformeerumata.

Alumiiniumkärjega enim kasutatav AIP variant on reeglis T 3.17.3 täpsustatud standartne alumiiniumplaat. Vähesed tiimid kasutavad alumiiniumkärjega ka komposiidist AIP-d.

FEST19 alumiiniumist IA mass on 1415 grammi.



Sele 3.1 FEST 18 alumiiniumkärje katsekeha enne ja pärast testimist

## 3.2 Kokkupõrkenina

Kokkupõrkenina on standardlahendusena kasutusel vormel 1 klassi autode puhul. [3] Antud lahendus oli varasemalt tudengivormeli sarja tipptiimide hulgas laialt levinud, kuna kokkupõrkeenergiat neelav struktuur on nina katmik ise ning kõrg AIP küljes puudub. Jõud kandub läbi nina struktuuri otse kere esiseinale ning AIP jääb koormamata. Sellisel juhul on AIP reeglitele vastavus tõestatud siis, kui plaadi laminaat peab vastu kolme punkti paindekatsese ning komposiitlaminaadi nihkepinge katsese (reegel T 3.17.4). Kuna IA elementidest on AIP suurima massiga, on seda optimeerides võimalik saavutada kõige suurem potentsiaalne kaaluvõit. See tähendab, et kokkupõrkenina võis massilt olla alumiiniumkärjest ja selle katmikust raskem, kuid kuna selle lahendusega oli võimalik kasutada palju nõrgemat AIP-d kui kärjega, võis siiski kokkuvõttes säästa ligi 50% lahenduse kogukaalust. Tudengivormeli tiim Revolve NTNU 2016 aasta võistlusauto kokkupõrkenina komposiidist AIP koosnes 14-st süsinikukihist ning oli massilt sama geomeetriaga alumiiniumplaadist ligi 700 grammi kergem. [4]

Kokkupõrkenina lahenduse negatiivseks pooleks on halvem sõitja turvalisus. AIP peamine roll on kokkupõrkel kaitsta juhi jalgu väliste kehade eest. Mida nõrgem on plaat, seda suurem on tõenäosus, et välised kehad seda suudavad penetreerida. Nendel kaalutlustel viidi 2017. aastal sisse reeglitemuudatus, mille kohaselt peab kokkupõrkenina lahendust kasutades tegema AIP-le lisakatse tõestamiseks, et see peab vastu 120 kN suurusele jõule (reegel T 3.19.3). [5] Sellele reeglile vastavat ning alumiiniumplaadist kergemat AIP-d projekteerida on keeruline, mistõttu kokkupõrkenina lahendust enam nii palju ei kasutata.



Sele 3.2 Tiimi Revolve NTNU kokkupõrkenina [4]

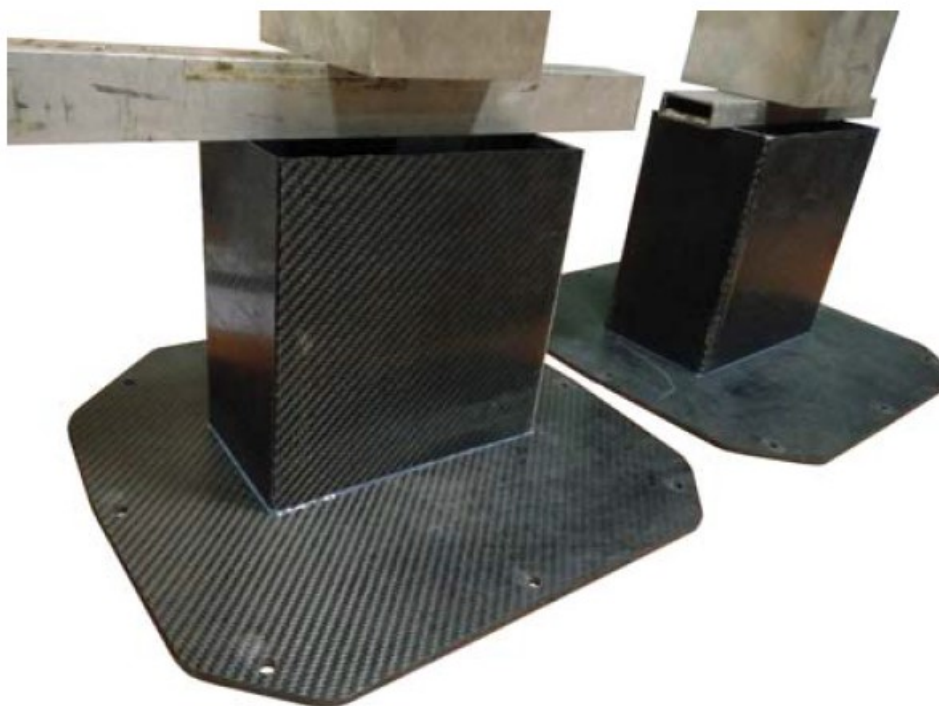
Kokkupõrkenina puhul on väga suure olulisusega sobiv nina geomeetria, mis seab piire ka üldisele keredisainile.

FS Team Tallinnas on kokkupõrkenina lahendust katsetatud Raiko Annaski poolt FEST 16 autole. Piisavaid eeliseid alumiiniumkärje lahenduse ees aga ei leitud. [6]

### 3.3 Süsinikkomposiidist kärj

Suurim potentsiaalne kaaluvõit on võimalik saavutada kasutades nii komposiidist plaati kui ka kärje, mistõttu valiti see variant ka käesoleva töö põhilahenduseks. Tegemist on kõige keerulisema lahendusega mida arendada ning testida, kuna süsiniku hävinemisprotsessid kokkupõrkel ei ole lihtsalt prognoositavad ning mõlema IA elemendi kooskõlas deformeerumine suurendab määramatusfaktorit veelgi.

Süsinikkomposiidist kärje ning plaadi lahenduse puhul on väga palju erinevaid võimalikke variante, lahenduste detailsem analüüs ning valik toimub peatükis 8.



Sele 3.3 Tiimi FST Lisboa komposiidist kärje ja AIP lahendus [19]

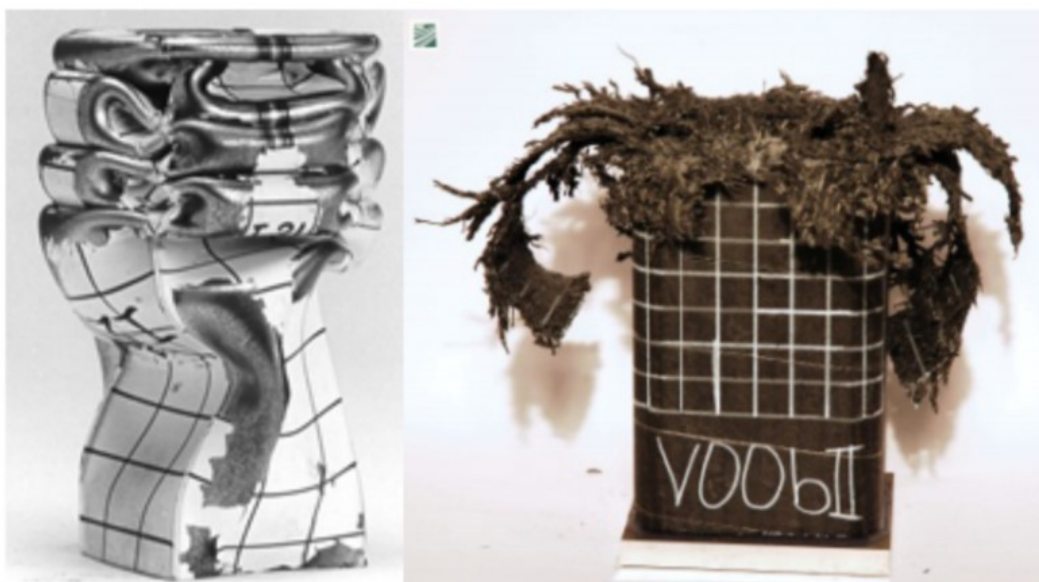
## 4. Süsiniklaminaadi käitumine kokkupõrkel

Komposiidist detaile kasutatakse autotööstuses järjest enam just nende heade mehaaniliste omaduste tõttu. Turvastruktuuride kokkupõrkele töötamise levinuimaks hinnanguks on SEA (Specific Energy Absorption) väärtus, mis näitab neelduva energia koguse ning hävineva struktuuri massi suhet. [7]

$$SEA = \frac{\text{Total Energy Absorbed}}{\text{Mass of Crushed Material}} \quad (4.1)$$

Võrreldes metallist kokkupõrkeleevenditega on võrdväärse massiga komposiididetaile võimalik projekteerida aksiaalsihis palju kõrgema SEA väärtusega, [8] mis tagab üldise massivõidu konstruktsiooni disainis, suurema kokkupõrketurvalisuse ning võimaldab laiemat valikut sobivaid kokkupõrkelemendi geomeetriaid.

Metallist kokkupõrkeleevendi puhul toimub energia neeldumine struktuuris peamiselt kontrollitud plastse deformatsiooni kaudu. Süsinikkomposiidist detailide puhul on tegemist aga haura materjali purunemisega. Seetõttu on metallist konstruktsiooni disainimisel elemendi dimensioonid suuremaks piiranguks, kuna peab arvestama deformeerunud materjali jäägiga. (Sele 4.1) Komposiidist detaile on aga võimalik projekteerida nii, et need hävinevad purunedes täielikult. Antud nähtust kinnitasid ka käesoleva töö katseandmed. [8]



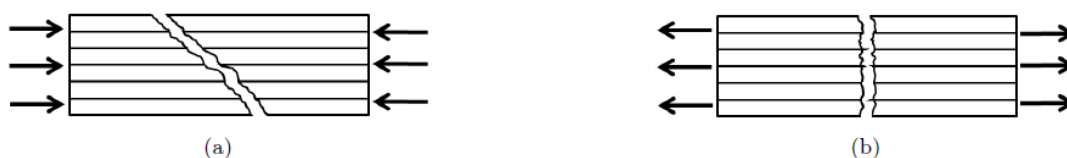
Sele 4.1 Metallide plastse ning komposiitmaterjalide haura deformatsiooni võrdlus [8]

## 4.1 Laminaadi purunemisviisid

Erinevalt metallidest, koosneb komposiitmaterjalide purunemine mitmest erinevast purunemisviisist. Eeldades, et laminaadi globaalne ning lokaalne kokkupõrketelje sihiline nõtkumine on välistatud, koosneb laminaadi purunemine materjalitehnilisest poolest maatriksi purunemisest, kihtidevahelisest delaminatsioonist ning kiudude purunemisest. [8]

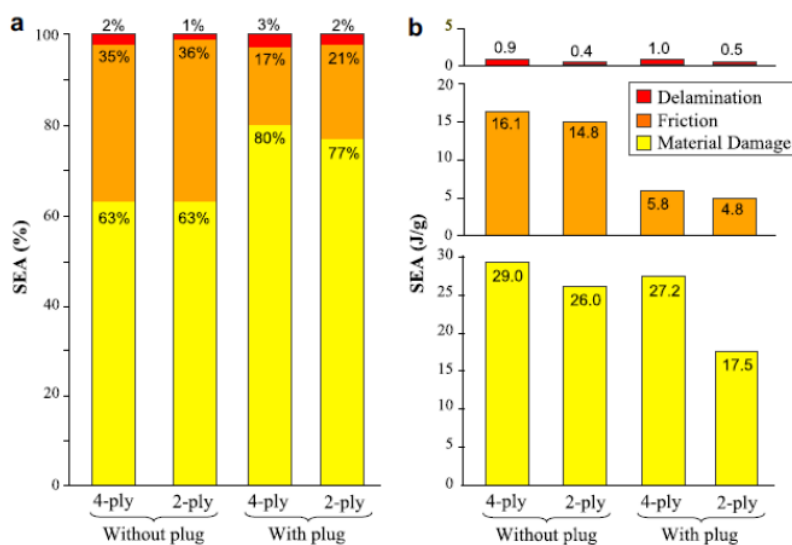


Sele 4.2 Maatriksi purunemismeetodid. (a) Survel (b) Tõmbel [9]



Sele 4.3 Sele 4.2 Kiudude purunemismeetodid. (a) Survel (b) Tõmbel [8]

Sele 4.2 järgi on näha, et suurim energiakogus neeldub kontrollitud kokkupõrkel materjali hävimisest, ehk maatriksi ning kiudude purunemisest.



Sele 4.4 Energia neeldumine komposiitmaterjali purunemisel protsentuaalselt [9]

Ideaalses olukorras on delaminatsiooni esinemine süsinikukihtide vahel viidud miinimumini, kuna kihi delamineerumisel kaob kogu selle kihi materjali potentsiaalne SEA. Samuti tuleks võimalusel vältida laminaadi nõtkumist, kuna selles olukorras jääb kogu nõtkumispunktist kokkupõrkepinnani paikneva laminaadi lõhkumiseks kuluv energia neeldumata. [10]

Suurima SEA väärtusega purunemisviis on seega selline, kus laminaadikihid on omavahel ideaalselt seotud, nõtkumise suhtes täielikult jäigad ning kogu energia kulub materjali fiibrite ning maatriksi lõhkumiseks. [7]

Konstruksiooni purunemine võib välja näha erinev sõltuvalt sellest, milline materjali purunemismeetod on valdavaim. Selel 4.5 võib näha vasakul üleval olukorda, kus peamine purunemismeetod on radiaalses suunas jooksvate süsinikukiudude lõikumine, paremal maatriksi purunemine, all vasakul maatriksi ning radiaalsete kiudude purunemine ning paremal maatriksi ning kiudude võrdne purunemine, mille tagajärjel jäävad alles vaid väikesed maatriksi ning kiudude killud.



Tearing mode



Socking mode



Splaying mode



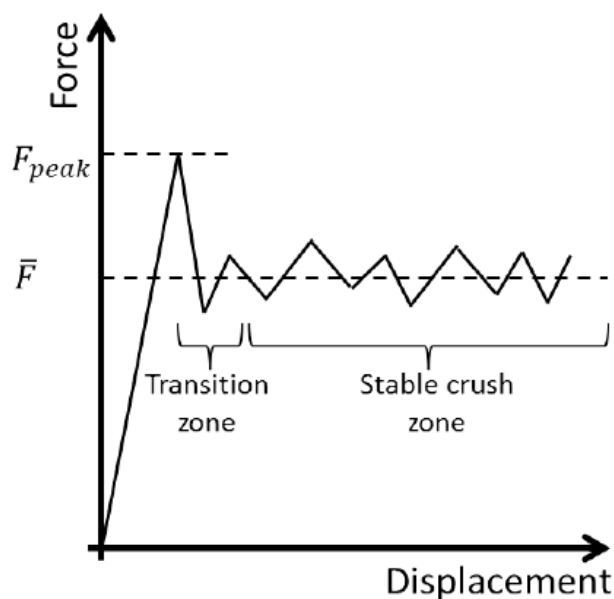
Microfragmentation mode

Sele 4.5 Erinevad purunemisviisid [11]

Purunemise viisi on äärmiselt keeruline ette diagnoosida ning analüüsida, kuna see sõltub nii süsinikku kui ka maatriksi omadustest, detaili geometriast ja ka väliste jõudude mõjumise suunast. Kuigi FEM analüüsiga on võimalik simuleerida jõudude ning deformatsiooni väärtuseid, puudub üldine rusikareegel või arvutuslik meetod, mille järgi purunemismeetodit enne katsekeha testimist täpselt hinnata. [3] Sellest tulenevalt on tähtis, et disaini töökindluse valideerimiseks läbiks laminaat mitu katset.

## 4.2 Triggerid

Kokkupõrkejõu graafikut analüüsidest tekib esmalt kokkupuute hetkel barjääriga kõrge jõuekstremum, seejärel jõud langeb ning kokkupõrkeleevendi deformatsiooni jõudmisel stabiilse purunemise tsooni, jõud ühtlustub, langedes lõpuks sõiduki seikudes nulli.



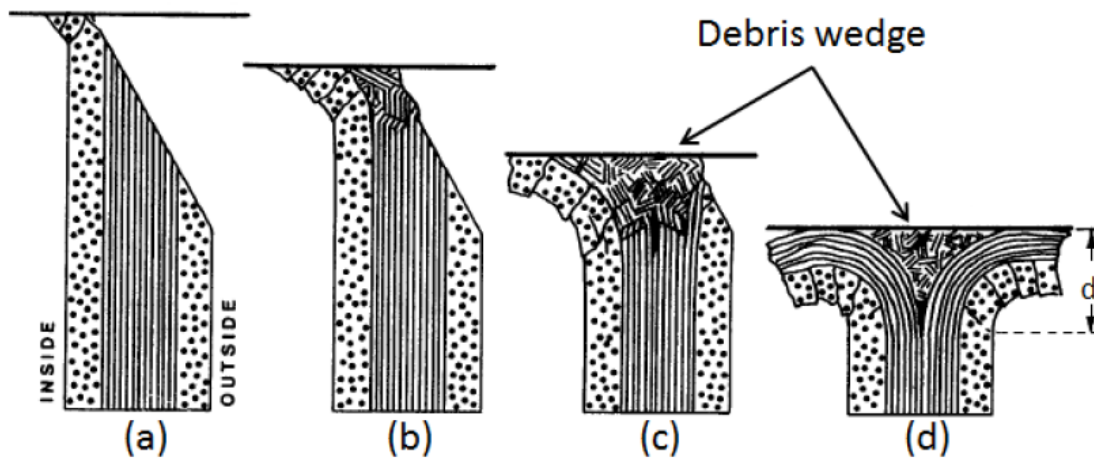
Sele 4.6 Kokkupõrkejõu ja liikumistee graafik [9]

Kuna suurim oht inimkehale kokkupõrkel on kiire lühiajaline aeglustumine, on põhirõhk turvalise kokkupõrkeleevendi projekteerimisel tagada esmase jõuekstremumi vähendamine ning funktsiooni aeglasem tõus. Organism ei ole ilma vigastusteta suuteline taluma suuremat lühiajalist aeglustust kui 30 g-d. [12] Käesoleva töö raames on reeglitega lubatud maksimaalne aeglustuse väärtus 40 g-d.



Sujuvama kokkupõrke tagamise tingimuseks on kokkupõrkeleevendi projekteerimine nii, et selle struktuur järjest tugevneks purunemisfrondi edenedes.

Antud tingimust on võimalik lahendada triggerit (kokkupõrget initsieerivat struktuuri) kasutades. Triggerid kujutavad oma olemuselt mehaanilisi ebatäiuslikkusi, mis nõrgestavad esmast kokkupuutepinda ning tagavad struktuuri kontrollitud purunemise. Metallidel seisneb see peamiselt geomeetrilises veas, näiteks alumiiniumist kärjel on triggeri-elementiks varasemalt mehhaaniliselt deformeeritud lõik kärje tipus. Komposiitmaterjalide eeliseks metallide ees on see, et lisaks geomeetrialet on võimalik triggeri efekti saavutada ka laminaadiomadustega, näiteks kasutades tipu poole järjest nõrgemat laminaati või vähendades tsooniti kokkupõrkesuunas ristikiudude arvu. [13]



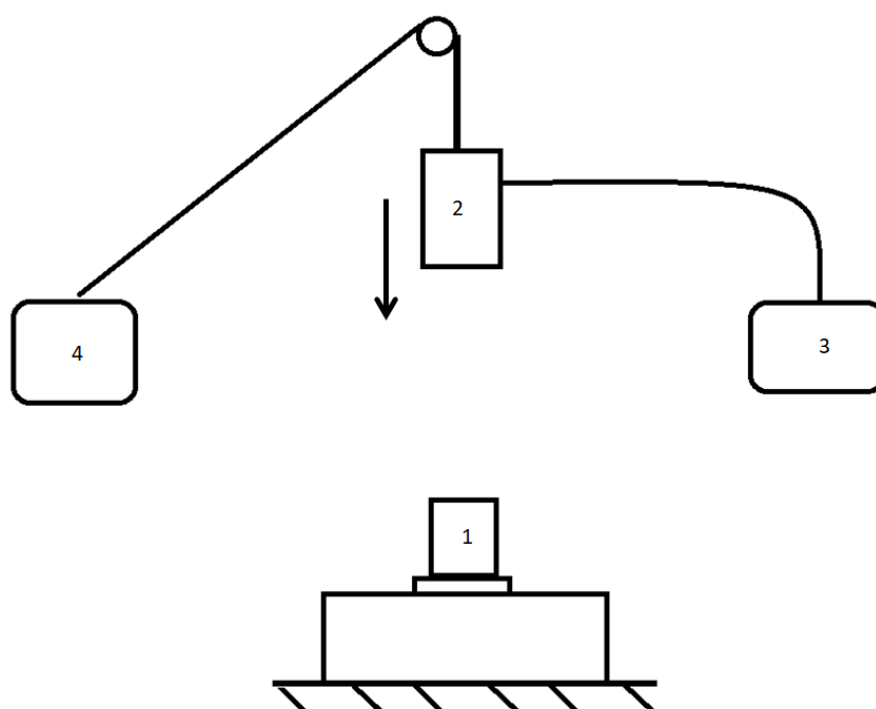
Sele 4.7 Süsiniklaminaadi trigger, 45-kraadine faas [9]

Seles 4.7 on välja toodud näide süsiniklaminaadi triggerist, mis initsieerib stabiilse purunemise 45-kraadise faasi näol.

## 5. Kokkupõrkekatses ülesehitus

Et kokkupõrkeleevendi reeglitele vastavust tõestada, on vaja lahendus katseliselt valideerida. Kõikide FSG reeglistiku järgi organiseeritud etappide poolt kus FS Team Tallinn osaleb, on nõutud lahenduse tõestamiseks dünaamilist testi, mis võib olla läbi viidud näiteks kokkupõrkestendil või valideeritud kukkumiskatses või pendliga. Eestis on võimalik sellist katset läbi viia ainult ettevõttes Optimus Tuning paikneval kukkumiskatses stendil.

Stendi ülesehitust illustreerib Sele 5.1.



Sele 5.1 Kukumiskatses ülesehitus. 1- Katsekeha, 2- Kukkuva mass, 3- Arvuti, andurijuhtmega ühendatud kukkuma massi külge 4- Vints

Kukkumiskatses stend koosneb jäigast betoonplokist, millele asetatakse rakisele kinnitatud katsekeha (1). Vintsiga tõstetakse 337 kg massiga raskus (2) 2,23 m kõrgusele ning lastakse vabalangemisse, purustades katsekeha. Raskusele on kinnitatud akseleromeetri andur, mis on ühendatud arvutiga (3).

FSG reeglite punkti T 3.19.1 järgi peab antud katse olema üles seatud nii, et see imiteeriks olukorda, kus 300 kg massiga auto sõidab vastu jäika seina kiirusega 7 m/s. [1]

Kukutatava massi vajaliku kõrguse leidmine: kuna reeglite järgi peab katse käigus neelduma vähemalt 7350 J energiat, on vaja leida kõrgus, mille juures keha omab vastavat potentsiaalset energiat.

Potentsiaalse energia valem:

$$E_p = m * g * h, \quad (6.1)$$

kus  $E_p$  - potentsiaalne energia,

$m$  - mass,

$g$  - raskuskiirendus,

$h$  - kõrgus

$$h = \frac{E_p}{g * m}$$

$$h = \frac{7350 J}{9,81 \frac{m}{s^2} * 337 kg} \approx 2,223 m$$

Varutegurit arvestades peab katsekeha tõstma vähemalt 2,23 meetri kõrgusele.

Akseleromeetri andmeid on analüüsitud ning graafiliselt kujutatud programmi MATLAB keskkonnas. Algne andmete töötlemise kood on kirjutatud FS team Tallinna vilistlase Sander Tomsoni poolt, mida on töö autor vastavalt vajadusele kohendanud. Kasutatud kood on välja toodud lisa 1.

## 6. Dünaamilise analüüsi ülesehitus ja parameetrid

Kuna keerulise geomeetriaga komposiidist detaili tootmine on väga kallis protsess, mis hõlmab ka vormi tootmist ja töötlemist, ei olnud erineva geomeetriaga katsekehade testimine majanduslikult võimalik. Sobiva geomeetriaga kokkupõrkeleevendi analüüsimiseks on antud töös kasutatud FEM analüüside tarkvara Ansys Explicit Dynamics keskkonda. Simulatsioonideks kasutatavad materjalide sisendandmed on saadud FS Team Tallinna liikme Rait Läänemetsa tehtud materjalikatsetustest.

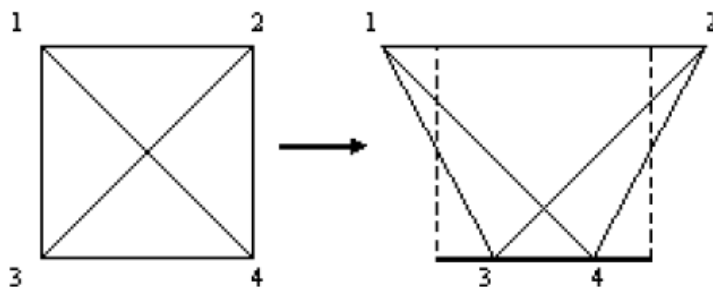
Explicit Dynamics on loodud suurte deformatsioonide, energiakoguste ning liikuvate simulatsioonide analüüsimiseks. Analüüsi koostamine hõlmab geomeetria meshimist (võrgustiku loomist, mille punktides arvutatakse materjalile mõjuvaid efekte), komposiitlaminaadi kihtide paiknemise ning järjestuse määramist, rajatingimuste seadmist ning analüüsiseadistuse määramist.

Analüüsi arvutusmeetod kujutab endast korduvat arvutustsüklit kuni analüüs jõuab simulatsioonis kasutaja poolt määratud ajahetkeni. Harilikult modelleeritakse antud analüüsidega kuni sekundi pikkuseid nähtuseid. [14] Iga tsükkel arvutab süsteemi oleku mingi ajasammu (timestep) tagant.

Ajasamm on programmi poolt seatud piisavalt väikeseks, et jõulaine ei jõuaks mõjuda kaugemale, kui kõige väiksema meshi punkti distants. Seetõttu on hea meshi kvaliteet dünaamiliste analüüside puhul eriti oluline. Analüüsi kvaliteedi ja töökindluse jaoks on väga tähtis, et mesh oleks võimalikult ühtlane, elemendid oleks üksteisega sama suured ning et oleks kasutatud nelinurkseid elemente.

Käesolevas töös on meshi kvaliteedi tagamiseks kasutatud programmis Ansys olevaid tööriistu *Face meshing* ja *Face sizing*. Antud töös kasutati peamiselt 3 mm suurust meshi, kuna see andis parima tasakaalu analüüsiaja ning kvaliteedi vahel.

Meshi kvaliteet on ka oluline, et vältida elementide „liivakellastumist“ (hourglassing). See kujutab endast olukorda, kus elemendid deformeeruvad, kuid kuna nende külgede või diagonaalide suhe (vastavalt kuidas on analüüsiseadistuses arvutusmeetod määratud) ei muutu, ei muutu ka nende energia. Sellises olukorras ei anna analüüs reaalselt füüsikalist tulemust. [14] Hourglassimise vältimine ning kontrollimine osutus käesoleva töö raames analüüsimisel peamiseks katsumuseks.



Sele 6.1 Elemendi "liivakellastumine" [14]

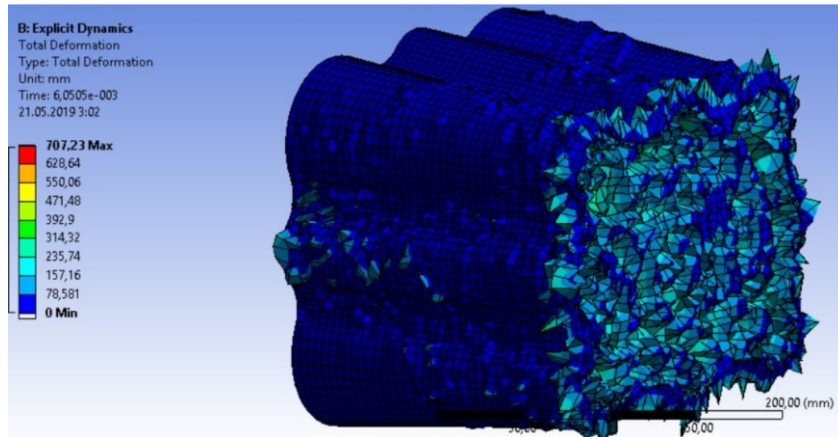
Tähtis osa dünaamiliste analüüside ülesehitusest on analüüsideadistus.

Alljärgnevalt on põhjendatud mõningate töös kasutatud seadistuste valikuid. Kõiki valikuid on võimalik leida Ansysi explicit dynamics analüüsiraamatust. [14]

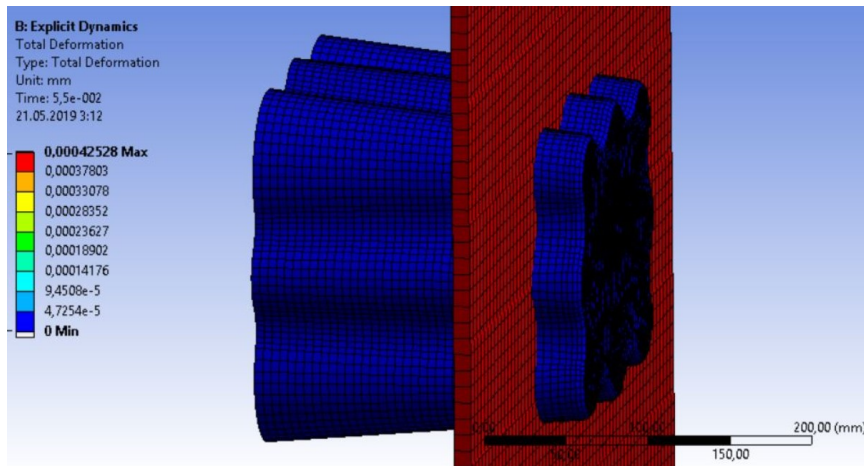
Tabel 6.1 Kasutatud analüüsisettingud

<p><b>Characteristic Dimension</b></p>	<p>Diagonals</p>	<p>Kontrollib mille järgi arvutatakse ajasammu minimaalne väärtus. Diagonaalid on valitud, kuna võrreldes teiste valikutega, töötavad need kõige paremini olukordades, kus tekivad meshi ebastabiilsused ning elementide hourglassing.</p>
<p><b>Automatic mass scaling</b></p>	<p>On/Off</p>	<p>Antud varianti kasutati mõõdukalt. Mass scaling võimaldab väikestele elementidele kunstlikult massi lisades analüüsiaegu vähendada. Paraku muudab see ka analüüsi palju ebastabiilsemaks ning antud settinguga analüüsid lõppesid sageli arvutusveaga.</p>

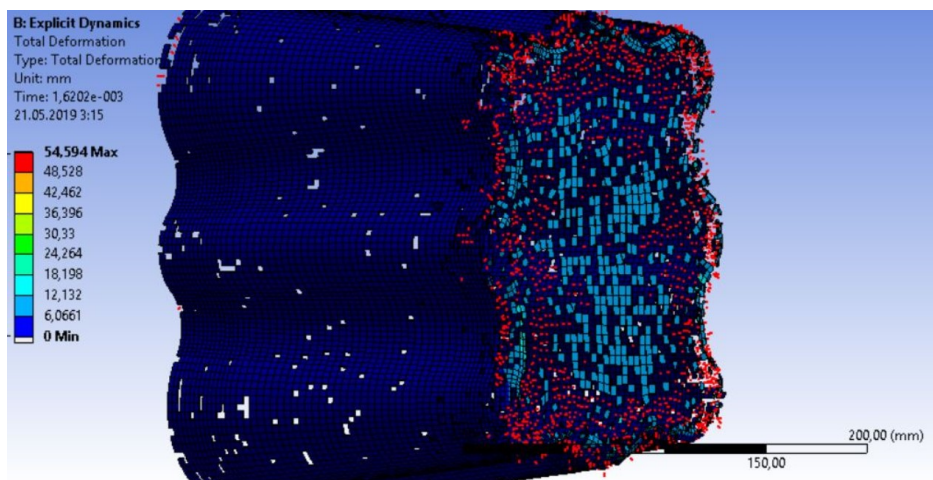
<b>Beam Solution Type</b>	Bending	Täpsem.
<b>Hex Integration Type</b>	Exact	Suurema arvutusliku koormusega, kuid ilma selle valikuta toimus osades analüüsides täielik meshi liivakellastumine, nagu demonstreeritud Seel 6.2.
<b>Shell Sublayers</b>	3	Piisava analüüsitäpsuse tagamiseks.
<b>Tet Integration</b>	Average Nodal Pressure	Kõige stabiilsem valik.
<b>Shell Inertia Update</b>	Recompute	Tagamaks analüüsi stabiilsus.
<b>Hourglass Damping Stiffness Coefficient</b>	Flanagan Belytschko 0,1	Et saaks määrata Stiffness Coefficienti, mis lisab meshi elementidele kunstlikku jäikust, et likvideerida meshi liivakellastumist.
<b>Static Damping</b>	0	Muu väärtuse peale nulli katsetamisel ei tekkinud analüüsis deformatsiooni ning jäik keha jäi keset materjali pidama (Sele 6.3).
<b>Erosion</b>	On Material Failure	Kõige realistlikumad tulemused saavutati ainult "On Material Failure" valikut kasutades. Geometric Strain Limit väärtus hakkas ebaloogilistes kohtades keset meshi elemente kustutama.



Sele 6.2 Liivakellastumine. Characteristic Dimension - Opposing Faces, Hex Integration - 1 pt Gauss



Sele 6.3 Jäik sein liigub läbi laminaadi ilma seda mõjutamata. Static Damping 0,1.



Sele 6.4 Geometric strain 1,5

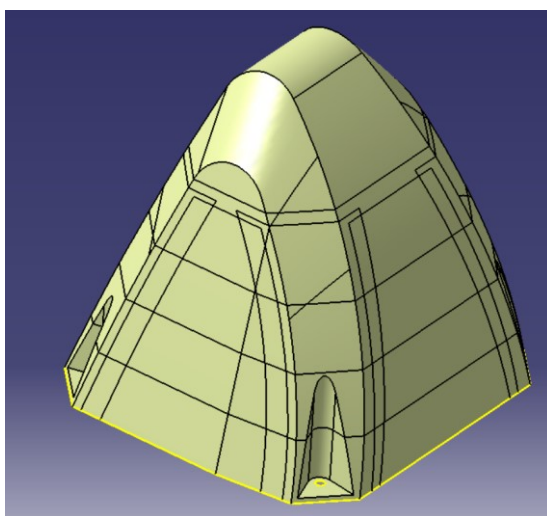
## 7. Prepreg tootmistehnoloogiaga kokkupõrkenina

Kuna FS Team Tallinnal puudus varasemast nii eelimmutatud süsinikkanga (prepreg) kui ka dünaamiliste analüüside koostamise kogemus, otsustati enne süsinikkomposiidist kärje lahenduse arendama hakkamist luua prepregist kokkupõrkenina analüüsid ning katsekeha, et oleks võrdlusmoment infusioonimise ning prepreg tootmistehnoloogiate vahel ning et oleks võimalik dünaamilist analüüsi valideerida ilma, et peaks eelnevalt uut vormi tootma. Kokkupõrkenina lamineerimiseks kasutati eelnevast hooajast alles olevat FEST18 vormeli nina vormi. Seetõttu ei olnud võimalik lahenduse geomeetriat muuta ning ainus viis kokkupõrkeleevendi omaduste mõjutamiseks oli läbi laminaadiomaduste.

Projekteerimisel lähtuti nii FS Team Tallinna varasematest katsetustest kokkupõrkenina tootmisel kui ka konkurentide lahendustest. [4] [6]

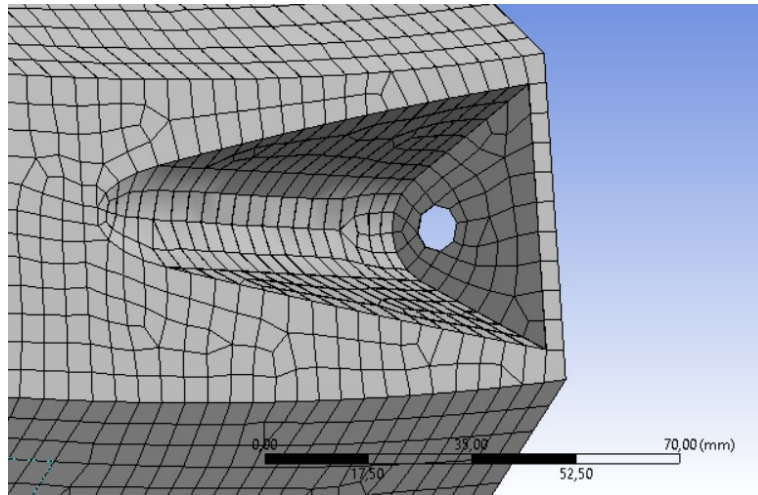
### 7.1 Kokkupõrkenina projekteerimine

Analüüsi üles ehitamine algas esmalt komposiidimeeskonna liikme Villu Sarve poolt disainitud FEST 18 vormeli nina CAD mudeli lihtsustamisest. Analüüsi sisendmudeliks oli pindadega modelleeritud nina geomeetiline mudel. Lisaks oli tarvis CAD programmis lõigata pinnad sektoriteks, mille abil oleks hiljem võimalik analüüsiprogrammis määrata süsiniku kangaste kuju ning paiknemist laminaadis.



Sele 7.1 Kokkupõrkenina CAD mudel koos kangakihtide tsoonidega

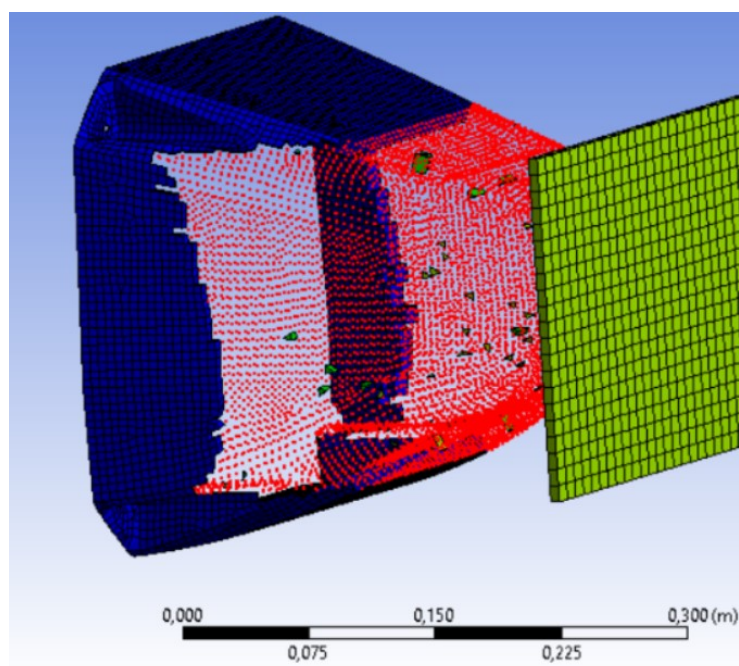




Sele 7.2 Problemaatiline meshi piirkond

Kokkupõrkenina analüüsi üles ehitamine osutus küllaltki problemaatiliseks. Kuna dünaamilise analüüsi näol on tegemist arvutile väga nõudliku simuleerimismeetodiga, esines suuri probleeme analüüside jooksmisaegade vähendamisega. Kuna kokkupõrkenina mudel oli küllaltki suurte dimensioonidega ning seega oli loodavas meshis 11 056 elementi, võisid analüüside kestvused ulatuda pikemaks kui üks ööpäev. Kuna ka niivõrd lühikeseks analüüsimisajaks oli tarvis teha analüüsi täpsuses järelandmisi kasutades mass scaling valikut ning ebatäpsemaid arvutusmeetodeid, tekkisid simulatsioonide käigus sageli mitmed vead, mille tõttu oli programm sunnitud arvutamise katkestama. Mass scaling valiku kasutamise tagajärjel tekkisid analüüsis mitterealistlikud tulemused ning esines ka meshi liivakellastumist. Seega oli analüüsi usaldusväärsus ning tulemuste realistlikkus suuresti kaheldav.

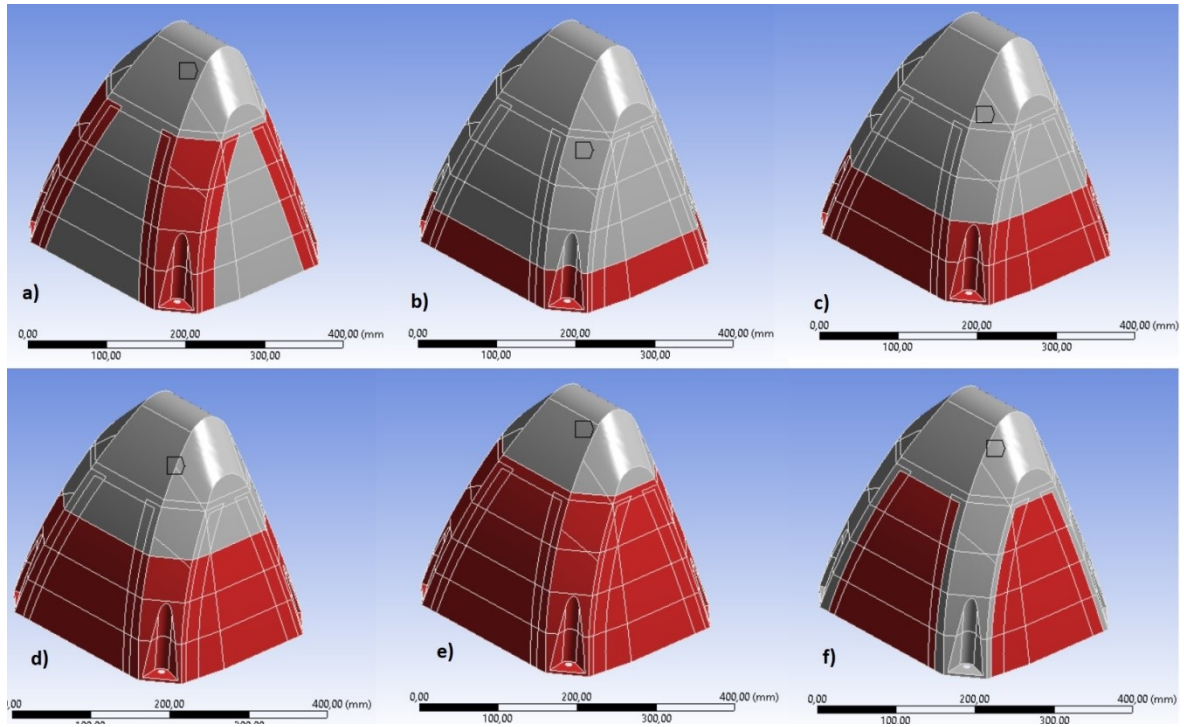
Esimeste analüüside käigus selgus, et programmil oli raskusi meshi koostamisega mudeli väiksemates nurkades. Kuna dünaamilise analüüsi täpsuse ning töökindluse jaoks on väga suure tähtsusega, et mesh oleks võimalikult ühtlane ning ühesuurune, ei olnud võimalik antud piirkondades meshi suurust vähendada, sellest tulenes suur analüüsi ebastabiilsus ning liivakellastumine. Kuna analüüsi ajasamm on määratud meshi kõige väiksema elemendi järgi, muutusid analüüsiajad meshi elementide vähendamisest tulenevalt võimatult pikaks. Selle probleemi lahendamiseks eemaldati CAD mudelist faasid, et geomeetriat veelgi lihtsustada. Analüüsi tulemusi hinnates on tarvis arvestada, et kuna mudeli nurkadesse tekivad niimoodi suuremad pingekontsentraatorid, on tarvis tulemuste tõepärasusse kriitiliselt suhtuda. Kuna see muutus suurendas aga analüüsi töökindlust ning visuaalsel hinnangul meshi kvaliteet antud piirkondades tõusis, otsustati, et tegemist on vajaliku järelandmisega.



Sele 7.3 Nina analüüs. Pildil on näha materjali purunemist nurkadest ning külgedelt

Analüüsimise käigus ei suudetud ühegi simulatsiooniga saavutada rahulolevat tulemust. Kõik simulatsioonid ennustasid nina kohest purunemist nurkades paiknevatest pingekontsentraatoritest, vaatamata laminaadi järjestusele, paksusele ning nurkades tugevuslappide kasutamisele. See tulemus vastas eeldustele, kuna olemasolev nina geomeetria ei olnud kokkupõrkeleevendi otstarbeks disainitud. Samuti oli riistvaralistest piirangutest tingituna analüüsi kvaliteet puudulik. Kuna ei suudetud leida sobivat laminaati, mille puhul oleks kokkupõrkekatse õnnestunud, otsustati et ei ole võimalik antud katsekeha kasutades ka analüüsi valideerida. Vaatamata sellele otsustati siiski katsekeha valmis toota, et oleks võimalik vähemalt prepregist kokkupõrkeleevendi tootmismeetodit katsetada.

Kokkupõrkenina analüüsi kangakihtide paigutust on võimalik näha Selel 7.4.



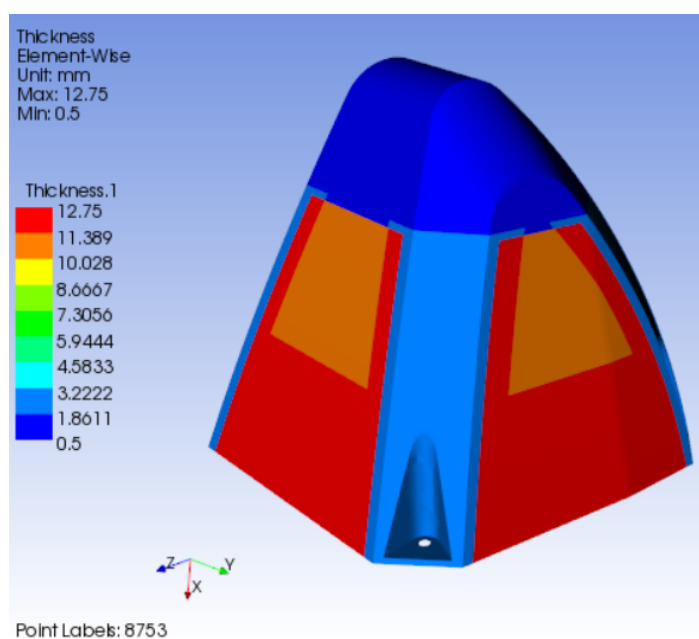
Sele 7.4 Laminaadi süsinikukihid. a) Nurkade tugevduslapid, b) Tsoon 1, c) Tsoon 2, d) Tsoon 3, e) Tsoon 4, f) Core

Peamine kokkupõrkele töötav struktuur on nina kerepoolne laminaat deformatsioonipikkusega 200 mm. Tuginedes kirjandusele, analüüsidele ning varasematele FS Team Tallinna poolt läbi viidud katsetustele, määrati tõenäoliseks töötavaks laminaadiks tabelis 7.1 välja toodud kangaste järjestus. Põhjendust fiibrisuuna valikuks leiab alapeatükis 10.

Tabel 7.1 Nina katsekeha kangakihtide järjestus

Kihi nr	Kanga tsoon	Kangaste arv	Kangas
1	Kogu nina	2	Twill 0/90
2	e)	1	Twill 0/90
3	f)	1	Rohacell foam
4	e)	1	Twill 0/90
5	a)	2	Twill 0/90

6	d)	1	Twill 0/90
7	c)	1	Twill 0/90
8	b)	1	Twill 0/90
9	a)	2	Twill 0/90



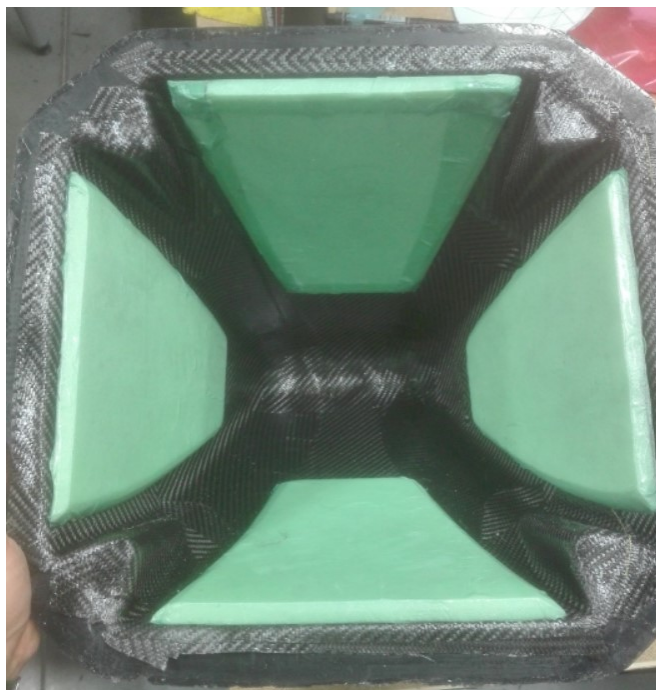
Sele 7.5 Laminaadi kogupaksus

Nina tipp koosneb kahest kihist kangastest, mille eesmärk on tagada ninale aerodünaamiline kuju ning vastavus reeglile T 3.17.2, mille järgi peab olema kokkupõrkeleevendi disainitud kinnise esiosaga. Kokkupõrketriiger on tagatud kere poolse laminaadi progressiivse tugevnemisega. Kuna geomeetriliselt ei olnud nina küljetahkudelt piisavalt jäik, et ennast ise toetada, oli tarvis kasutada core materjali. Kuigi konkurendid on valdavalt kasutanud prepregist kokkupõrkenina tootmisel core materjalina kargstruktuure [4] ning vastav materjal oli tiimil olemas, puudusid varasemad kogemused kargstruktuuride kasutamisest ning selle töökindlust ei olnud tiimis varem laiemalt testitud. Seega otsustati core materjalina kasutada 10 mm paksust vahtu. Vahu eeliseks on ka selle isotroopsed omadused, mis lihtsustavad mõningal määral tootmisprotsessi.

## 7.2 Kokkupõrkenina tootmine

Prepregi toomisprotsessi eelis infusioonimeetodi ees on see, et süsinikukangastes on juba õige kogus vaiku, mistõttu on need tarvis ainult vormile lamineerida, vorm vaakumisse tõmmata ning ahjus lasta vaigul kõveneda. Infusioonimisel on tegemist kuivade kangastega, mis tähendab, et vaik on vaja eraldi vaakumis läbi kangakihtide tõmmata. Samuti võtab infusioonimeetod märgatavalt rohkem aega ning vaigu kõvenemist ei saa ahjus kuumutamise kiirendada.

Esmalt lamineeriti välimised kaks süsinikukihti. Seejärel tõmmati laminaat kümneks minutiks vaakumisse, et tagada, et kangad on korralikult vastu vormi ning et kihtide ja vormi vahele ei tekiks õhutühimikke. Seejärel lisati core struktuur (sele 7.6 ) ning sisemised kihid.



Sele 7.6 Kokkupõrkenina laminaadi välimine kiht koos core materjaliga.

Lamineerides osutus suurimaks katsumuseks poldiavade piisav tugevdamine. Tulenevalt geomeetria keerukusest, oli vaja kangad lõigata väikestest osadest. Selle tagajärjel sattusid aga iga kangakihi liitekohad üksteisele väga lähedale, mis tähendab, et antud kohas oli laminaat nõrgestatud. Kuna tegemist oli ka geomeetrilise pingekontsentraatoriga, tähendas, et efekt omas eeldatavasti veelgi suuremat mõju laminaadi tugevusele. Seda üritati kompenseerida rohkete tugevduslappidega poltimisnurkadel.



Sele 7.7 Kokkupõrkenina pärast vormist eemaldamist.

Samuti osutus keeruliseks saada core materjal alumise äärega võimalikult ühtlasele tasapinnale. Pärast vormist eemaldamist oli ka näha, et alumine nina pind ei olnud täielikult loodis, mistõttu tuli seda tasasemaks lihvida, lõigates läbi osadest kangastest. Kuna kinnituspinnal olles need kangad aga struktuurset tugevust ei andnud, ei peetud seda kokkupõrkeleevendi tugevusomadusi rikkuvaks teguriks. Lisaks ei toetunud nina ülemise pinna core materjal vastu rakise kinnituspinda, mis omab teoreetiliselt mõju laminaadi käitumisele kokkupõrkel, suurendades ohtu, et süsinikukihi delamineeruvad core küljest.

Kokkupõrkenina kogumassiks oli 1,4 kg. Kuna sellise lahendusega oleks tarvis ka alumiiniumlahendusest tugevama AIP kasutusele võtmine, võib lugeda metallkärje lahendusega võrreldes saavutatava kaaluvõidu olematuks.

### 7.3 Kokkupõrkenina testimine

Kokkupõrkenina katsetust võib lugeda suures osas läbikukkunuks. High speed kaamera videot ning järel jäänud süsinikukihte hinnates on näha, et deformatsiooni jõudmisel triggeri pinnani tekkis liialt suur jõuekstremum, mille tagajärjel sisemised süsinikukihi delamineerusid core küljest ilma energiat neelamata. Samuti purunesid koheselt poltimisnurkade ümbrused. Seega jäi katsekeha SEA väärtus minimaalseks.



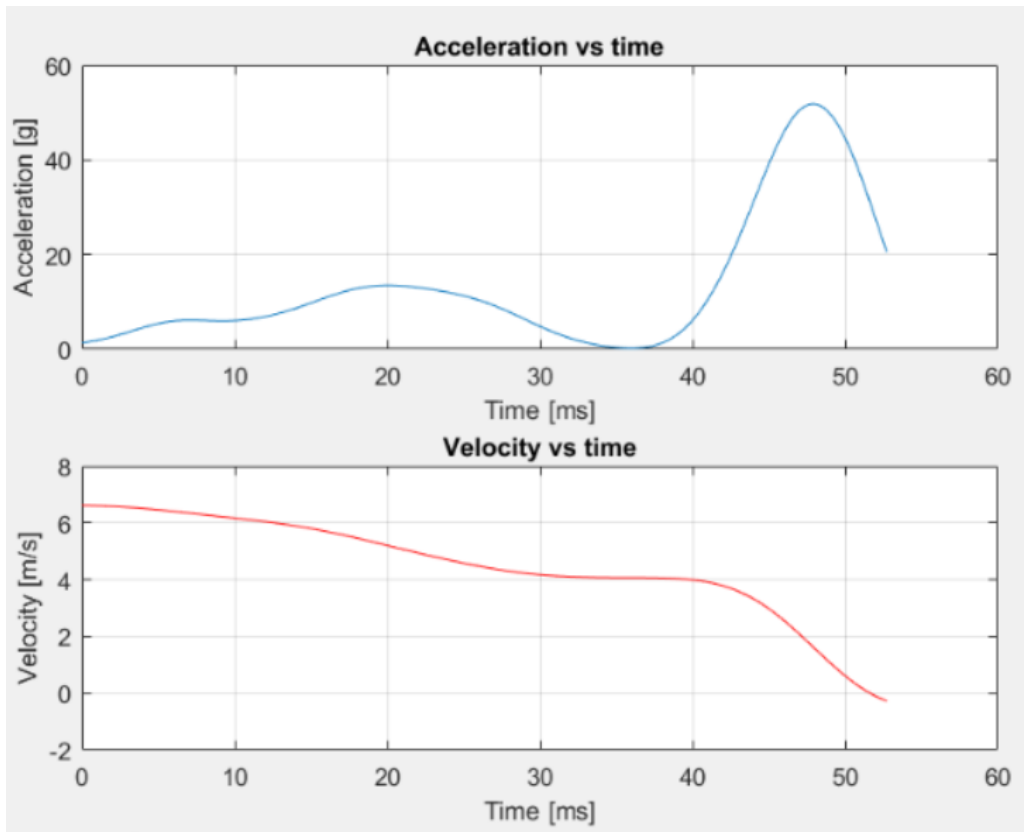


Sele 7.8 Kokkupõrkenina katse high speed kaamera kaadrid

Selelt 7.9 võib näha, kuidas pealmine ning alumine osa kõige jäigemast laminaadist on jäänud täiesti terveks. Küljed seevastu on täiesti hävinenud. See tuleneb tõenäoliselt fakist, et kuna küljed olid kokkupõrke telje suhtes järsema nurga all, pidid nad kandma suuremat osa kokkupõrkejõust ning seega purunesid varem. Lahendus sellele probleemile oleks külgede laminaadi tugevdamine. Vaatamata sellele, et igas nurgas oli lisaks ülekattele ka 4 tugevduslappi, purunesid nurgad siiski esimesena. Sellest võib järeldada, et antud geomeetria on sobimatu kokkupõrkenina loomiseks.



Sele 7.9 Katsekeha pärast katsetust



Sele 7.10 Nina katse kiirendusgraafik

Võrreldes katseandmeid anaüüsipildiga (Sele 7.3) võis järeldada, et üldjoontes deformeerus katsekeha sarnaselt eeldustele. Graafikutelt on näha, et katsekeha ei täitnud reeglites kehtestatud nõudeid ning võib järeldada, et projekteeritud trigger ei töötanud vastavalt ootustele. Tõenäoliselt oleks pidanud nina tipu poole kangaste kiht veel väiksem olema, et ei oleks tekkinud niivõrd järsku üleminekut core piirkonnas.



## 8. Süsinikkärjest kokkupõrkeleevendi geometria valik

Nina katsekeha testitulemustest lähtuvalt tehti süsinikkärje geometria valikuks järgnevad järeldused:

Core materjali kasutamine kokkupõrkeleevendi disainimisel ei ole hea lähenemine. Core materjal annab tasapinnalisele laminaadile kordades suurema paindejäikuse kui on ainult puhtast süsinikust plaadil. Staatiliste koormuste puhul on seega tegemist optimaalse viisiga laminaadi jäikuse tagamiseks. Dünaamilistes olukordades aga mitte. Kuna tiimis kasutatavate core materjalide vastupidavus nihkepingele on väiksem, kui süsinikukihtide kiusuunaline vastupidavus survele, tekib kokkupõrkel delaminatsioon core materjali ja süsiniku vahel enne süsinikukihtide purunemist. Seetõttu lähtutakse kärje disainimisel põhimõttest, et jäikus teljesuunalisele nõtkumisele on tarvis tagada kärje geometriaga. Järeldusi kinnitab fakt, et ka vormel 1 sarjas ning autotööstuses kasutatakse süsinikkomposiidist kokkupõrkeleevendite disainil ilma coreta puhtast süsinikust struktuure. [3]

Lisaks eelnevale tuleb tähelepanelikumalt jälgida, et laminaadikihtide liitekohad ei satuks üksteisele liialt lähestikku. Nina katsekeha puhul tekkisid nendesse kohtadesse pingekontsentraatorid ning kõige suurem delamineerumine toimus just laminaadi liitekohtades.

Kuna nina toodeti negatiivvormiga, jäi katsekeha alumine pind ebatasane ning ei toetunud täielikult rakise pinnale. See tekitas ebaühtlase jõudude leviku laminaadis ning pingete kogunemise kokkupuutepindadele. Kuna kärje geometria on auto küljes olles nagunii katmiku poolt kaetud, ei ole selle välimus oluline. See tähendab, et kärje tootmisel on võimalik kasutada positiivvormi, mille puhul jääb kontaktpind ühtlane tasapind.

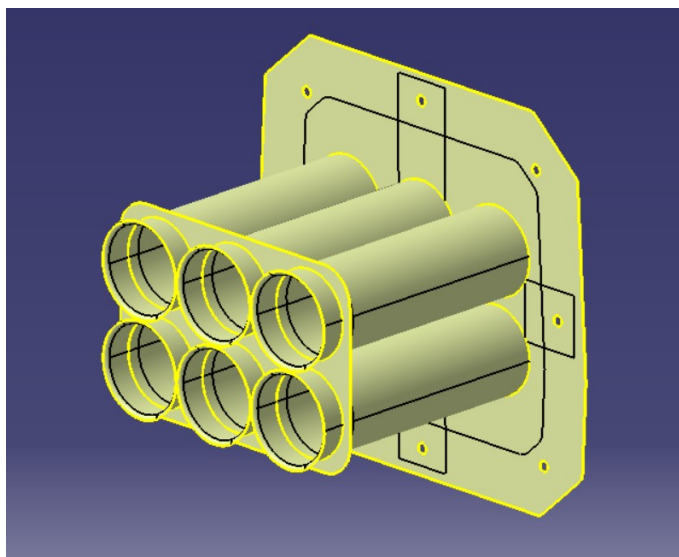
Tuleb ka jälgida, et kõik kokkupõrkeleevendi seinad oleksid ligilähedaselt sama nurga all. Vastasel juhul kannavad osad seinad rohkem koormust, mis lisab laminaadi ülesehitusele tarbetut keerukust.

Alljärgnevas peatükis on käsitletud erinevaid geometriaid, mida oleks võimalik kärgstruktuuri disainimiseks kasutada.

## 8.1 Silinder

Levinuim ning uurituim aksiaalsihis iseennast toestav geomeetria on silinder.

Kokkupõrkeleevendina oleks võimalik antud lahendust kasutada kas ühe suure või mitme väikese silindri patareina. Kuna komposiitsilindrite omadusi kokkupõrkel on väga palju uuritud, oleks antud lahendust võrreldes teistega teooriateadmiste rohkuse poolest lihtsam projekteerida.



Sele 8.1 Süsiniksilindritest kokkupõrkeleevendi kontseptsioon

Mitme silindri kasutamisel on eeliseks suurem kontaktpind AIP ja silindrite vahel, mis vähendab koormust AIP-le. Samas on antud lahendust palju keerulisem toota ning antud lahenduse analüüsid on palju ressursinõudlikumad. Lahenduseks oleks koostada analüüs vaid ühele silindrile ning seejärel korrutada selle SEA silindrite arvuga. Lahenduse negatiivseks pooleks on suur võimalus tootmisvigade tekkimiseks ning teadmatus, kuidas mitme silindri ning AIP deformatsioonid koos töötaksid. Samuti on lahenduse töötamiseks vaja küllaltki tugevat AIP-d, nii et suurim potentsiaalne kaaluvõit tuleks ainult alumiiniumkärje arvelt.

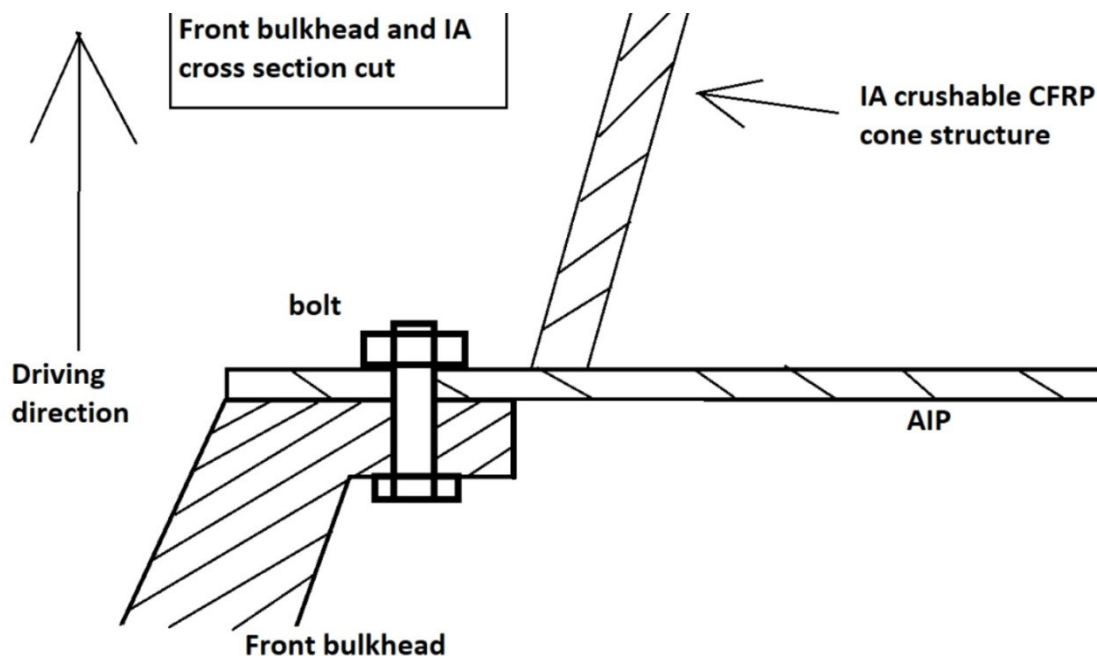
Tootmise poolest oleks lihtsam lahendus kasutada ühte suurt koonust. Antud disainiga säilib aga probleem, et esiseina sisemise ääre ja kärje vaheline kaugus jääks siiski kohati küllaltki suureks, kärje kontaktpinnale tekiks suur jõuõlg ning oleks keerulisem AIP-d optimeerida.

## 8.2 Korrigeeritud struktuur

Parem variant on kasutada korrigeeritud seinadega nelinurkse kärje geometriat. Antud lahendust ei ole küll sama palju uuritud, kuid sellise disainiga on võimalik kärje toetuspind projekteerida niivõrd lähedale monokoki esiseina sisemisele äärele kui võimalik, et vältida suure jõuõla tekkimist. Sellisel juhul peab AIP olema tugev ainult nihkejõule ning ei pea olema küllaltki jäik. See tähendab, et on võimalik lamineerida täissüsinikust õhuke AIP, ilma core materjalita.

Kuna jõud ei liiguks kärjest otse esiseina struktuurile, vaid ainult selle vahetusse lähedusse, ei peaks reeglis T 3.19.3 nõutud lisakatset teostama. Kuna reeglis T 3.17.4 on öeldud, et kui kärje lahendusega AIP elab kokkupõrkekatses üle ning vastab muudele reeglitele (ei ületa nõutud deformatsioonipiiri ning ei ole vigastatud), ei pea ka tegema lisanduvaid staatilisi kolme punkti painde ning nihkepinge katseid, et tõestada võrdvärsust terasele või alumiiniumile.

Sellise lahendusega oleks võimalik seega tõestada AIP reeglitele vastavust ainult läbi dünaamilise kokkupõrkekatses, mis tähendab, et oleks võimalik projekteerida potentsiaalselt alumiiniumplaadist nõrgemate omadustega ning seega ka massilt kergem AIP. Kuna AIP moodustab IA koostu massist 2/3, oleks tegemist suurema potentsiaalse kaaluvõiduga kui seda on võimalik saavutada ainult kärge optimeerides.



Sele 8.2 Esiseina (front bulkhead) ja kärje toetuspinna minimaalne jõuõlg

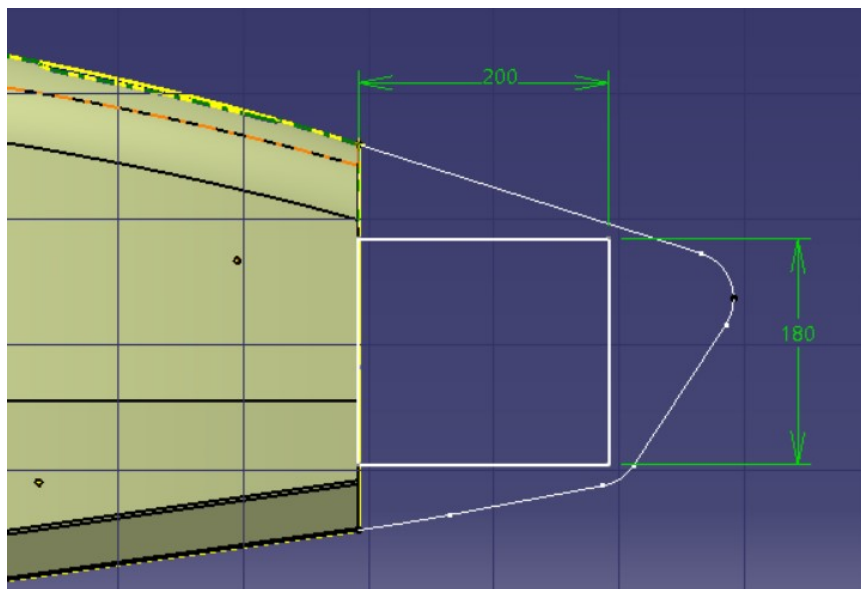
## 9. Katmiku projekteerimine ning tootmine

Kuna nina katmiku geometria on üheks IA kärje projekteerimist piiravaks teguriks, käsitleme kõigepealt katmiku disainiprotsessi.

Katmiku disainieesmärkidest peamine oli üldine atraktiivne välimus. Lisaks jälgiti projekteerimisel ka aerodünaamilisi omadusi. Mida suurem on IA deformeeruva struktuuri pikkus, seda pikem on purunemistekond ning seda sujuvam on sõiduki aeglustus. Liialt suurt IAd ei saa aga projekteerida, kuna sellisel juhul suurenevad katmiku dimensioonid üleliia, katmiku mass muutub liiga suureks ning vormeli üldine välimus kannatab. Seetõttu oli katmiku projekteerimisel keerulisim katsumus leida tasakaal IA ning katmiku dimensioonide vahel.

Katmiku projekteerimisel pidi ka arvestama FSG reeglite alljärgneva punktiga:

**T 2.2.3** Kõik kere ääred mis võivad jalakäijaga kontakti sattuda peavad olema minimaalselt 1 mm raadiusega. Esiratatest eespool olevad kereelemendid peavad olema vähemalt 38 mm raadiusega, ulatudes vähemalt 45° sõidusuunast nii horisontaal- kui ka vertikaalsihis.



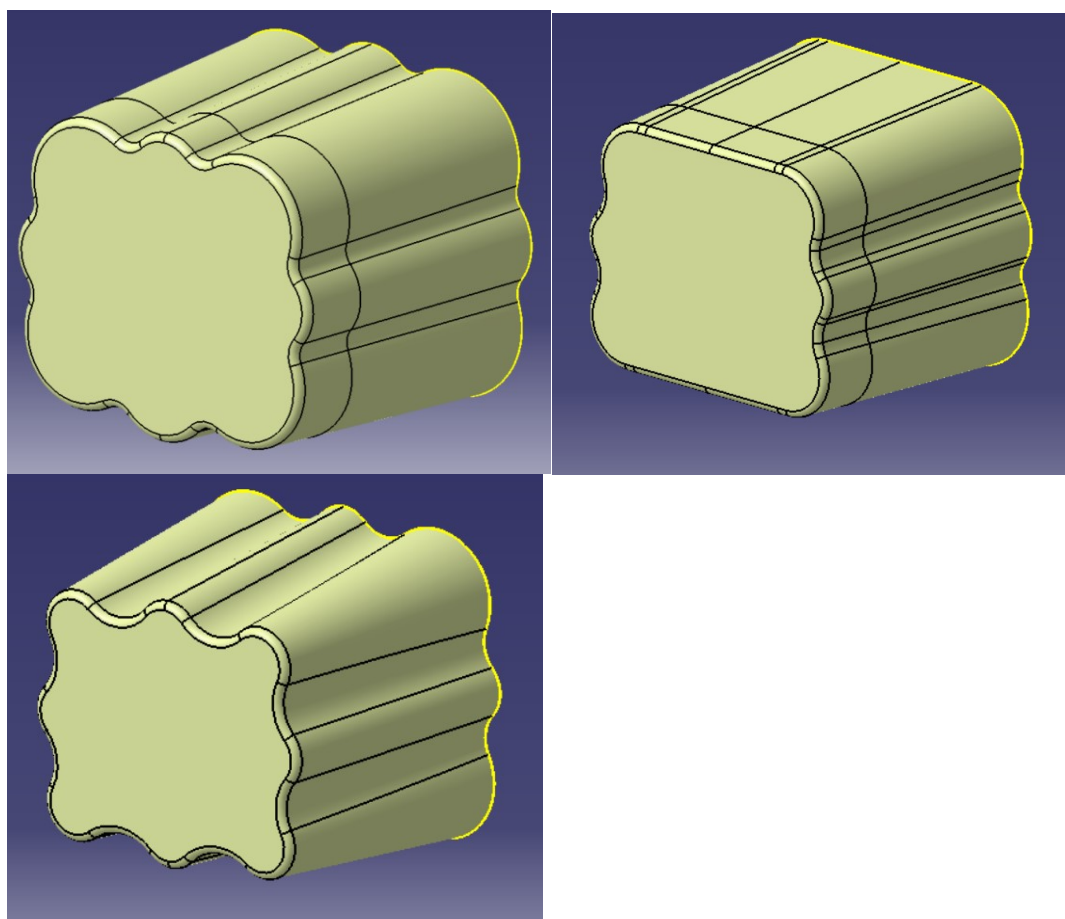
Sele 9.1 Katmiku projekteerimisel arvestatud varu kärje geometriaks

Katmiku vormi freesis FS Team Tallinna vilistlane Joonas Eamets. Kuna tegemist ei ole jõudu kandva struktuuriga koosnes katmiku laminaat kahest kihist süsinikust. Katmiku tootmise pilte võib näha lisas 2.

## 10. Korrügeeritud katsekeha projekteerimine

Kärje geomeetria põhilised disainieesmärgid olid:

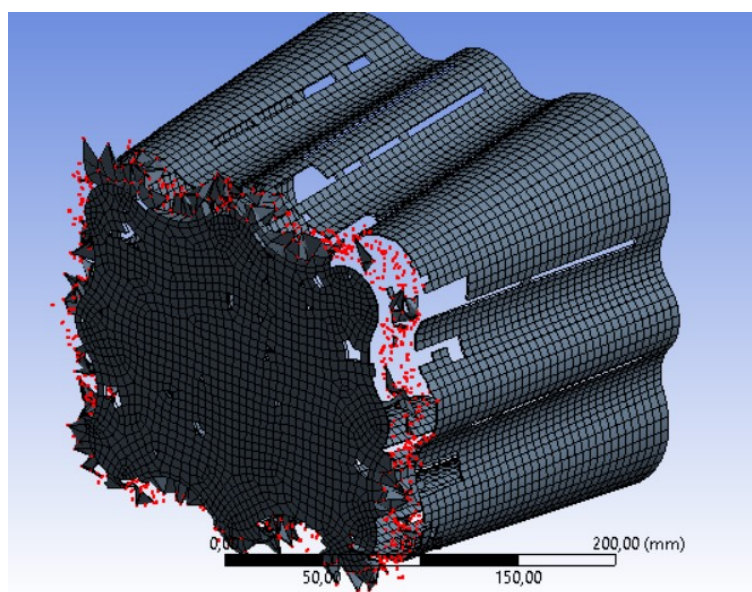
- Maksimaalne pikkus, et tagada pikem deformatsiooniteekond ning seeläbi madalam keskmine  $g$  väärtus.
- Minimaalne läbilõige mis vastab reeglile T 3.17.2.
- Alumine toetuspinna äär võimalikult lähedal esiseina sisemisele äärele, et tagada väiksem jõuõlg.
- Piisavalt suur korrügeeritus, et tagada külgede jäikus nõtkumisele.



Sele 10.1 Erinevaid projekteeritud ning analüüsitud kärje geomeetriaid

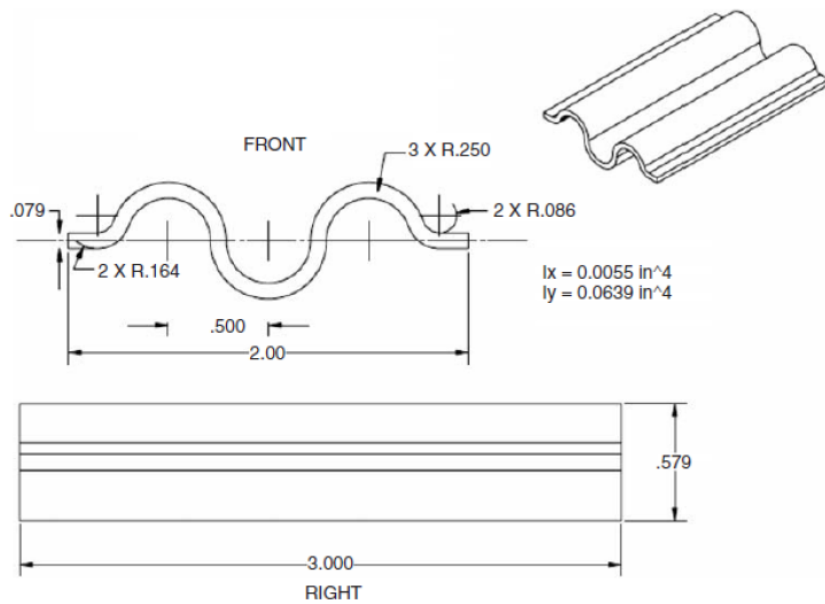
Kuna dünaamilise analüüsi keerukuse kasvades muutub selle lahendamise aeg ebapraktiliselt pikaks, ei osutunud kogu IA koostu dünaamiline analüüsimine otstarbekaks. Seetõttu otsustati projekteerimisprotsess ette võtta kahes osas: esmalt valmis projekteerida ning dünaamiliste analüüsidega tõestada nõuetele vastav kärg ning seda katsetada. Olles leidnud sobiva kärje struktuuri, on võimalik katse käigus tekkinud kõrgeima jõu väärtust kasutada AIP disainiparameetrina ning AIP analüüsida staatiliselt. Pärast seda, et kogu IA koostu reeglitele vastavust valideerida, on vajalik sooritada veel üks kokkupõrkekatsed nii, et kärg on fikseeritud AIP külge.

Kärje struktuuri disain tulenes täielikult analüüsitulemustest. Analüüside põhiohk oli struktuuri pingekontsentraatorite vältimises ning piisava jäikuse saavutamises. Jälgiti, mis kohtadest laminaat esmalt hävineb ning sellest lähtudes muudeti geometriat, et saavutada vastavas kohas suuremat jäikust.



Sele 10.2 Laminaadi purunemine pingekontsentraatorite kohtades kokkupõrkehetkel

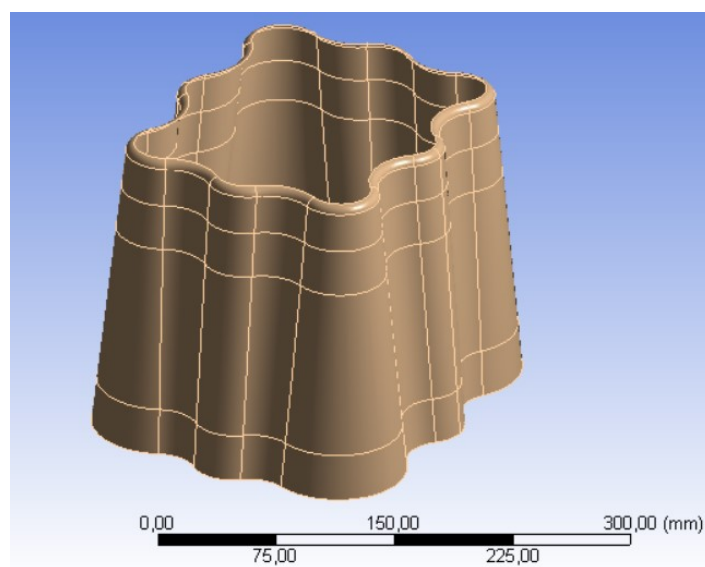
Analüüside käigus ning artiklitele toetudes [15] [13] selgus, et mida sügavamate raadiustega geometria on, seda parem on selle jäikus ning SEA väärtus.



Sele 10.3 Sügavalt korrigeeritud profiil (süsiniklaminaadi nõtkumistestist) [15]

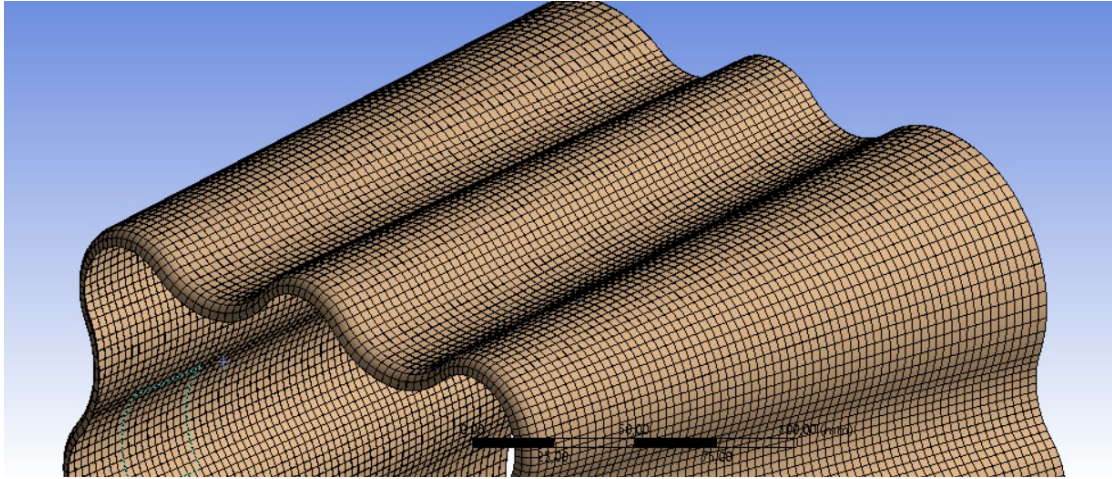
Trigger struktuurina otsustati esimeste katsekehade puhul kasutada kirjandusele tuginedes kärje tipus paiknevat 5,5 mm suurust raadiust selle suurima teoreetilise SEA väärtuse tõttu. [16]

Analüüs oli koostatud tingimusi võimalikult lihtsustades. Kärje geometria oli modelleeritud ühe terve pinnana. Elementide vähendamise jaoks oli tipus olev pind eemaldatud, kuna see ei oma kokkupõrkel struktuurset tähtsust. Kokkupõrkeelemendina oli määratud lõpmatu jäik 300 kg massiga sein, kokkupõrkekiiruseks 7 m/s. Kärge oli fikseeritud alumisest servast „fixed support“ tingimusega, mis kujutab endast lõputult jäika kinnitust.



Sele 10.4 Analüüsimudel

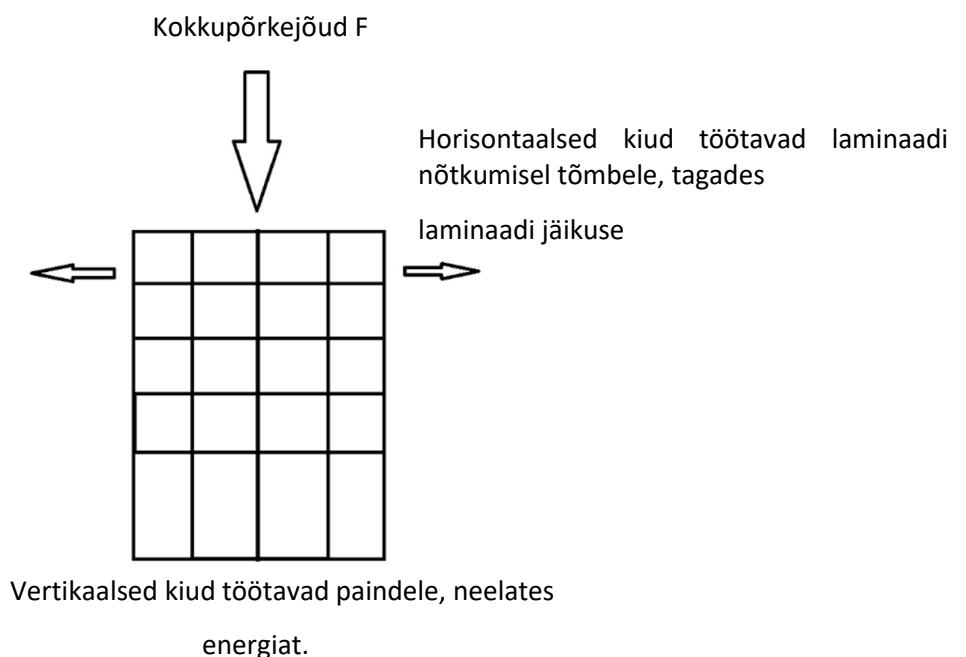




Sele 10.5 Meshi kvaliteet

Parima meshi kvaliteedi saavutamiseks kasutati Mesh control valikute alt Face meshing ning Face sizing tööriistu. Rahuldava analüüsi stabiilsuse ning täpsuse saavutamiseks koosnes mesh 17 680st läbinisti nelinurksest elemendist. Ühe elemendi suuruseks valiti 3 mm, defeature size 2,5 mm. Nende väärtustega jooksis üks analüüs keskmiselt 10 tundi ning meshi kvaliteet oli piisav, et hinnata geomeetria muudatuste efekti kokkupõrkeleevendi deformeerumisele.

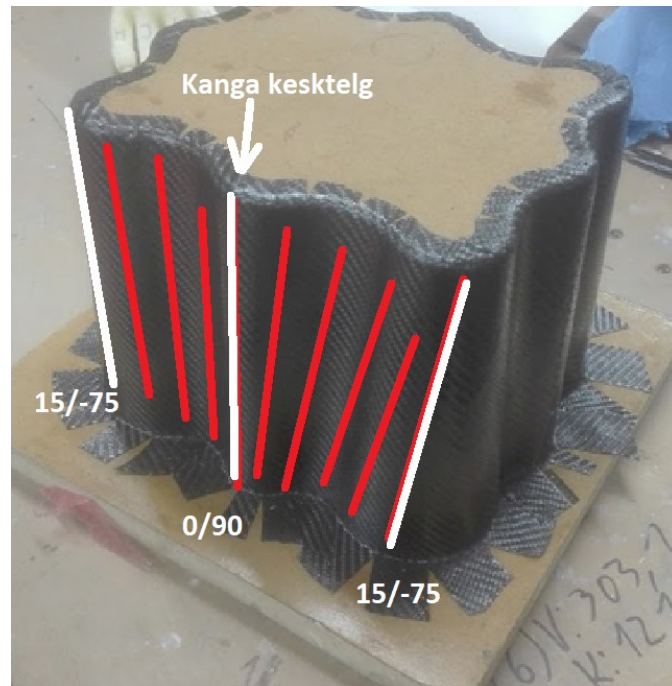
Laminaadi suunda valides arvestati, et kokkupõrkel on tarvis ligikaudu võrdväärset kiudude arvu nii aksiaalsihis, et otseselt kokkupõrget leevendada kui ka radiaalsihis, et tagada struktuuri jäikus ning vältida nõtkumist ja pikkade pragude tekkimist, mis vähendavad SEA väärtust. Seetõttu koosneb laminaat täies ulatuses 0/90 twill kangastest.



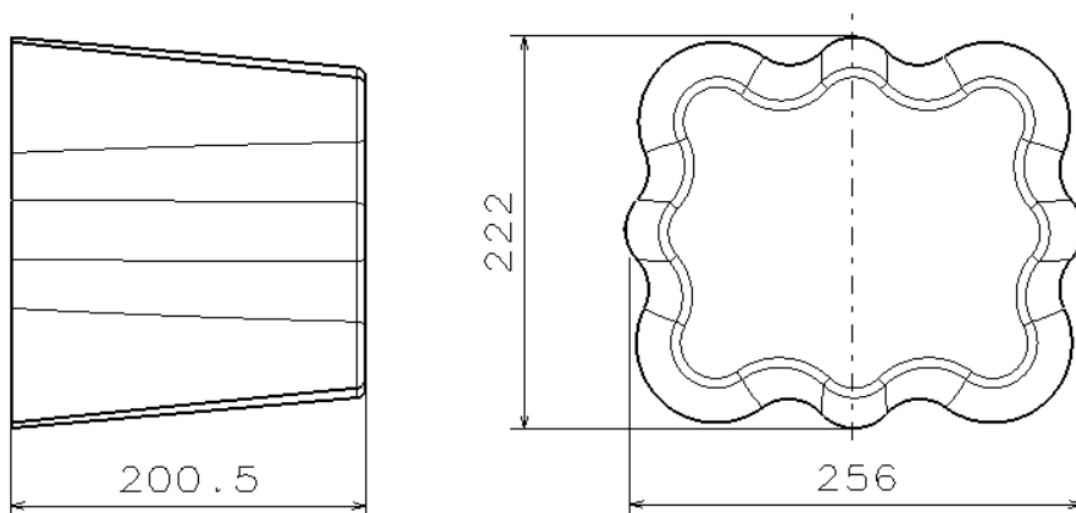
Sele 10.6 kangaste suuna valik



Vastavalt kirjanduse andmetele on silindritel optimaalse SEA väärtusega laminaadikihtide nurk 15/-75 kraadi. [17] Kuna üks laminaadi kiht koosneb kahest pikast süsinikkanga lõigust ning karg on 4 kraadise nurga all, et seda oleks parem vormist eemaldada, jookseb ligikaudu pool ühe kihi kiududest 0/90 suunal ning mööda külge edasi minnes läheneb vormi kalde tõttu 15/-75 suunale, tagades parima võimaliku laminaadi SEA väärtuse.



Sele 10.7 Kanga kiu suuna jooksmine lamineerimisel



Sele 10.8 Lõplik kokkupõrkelevendi kuju

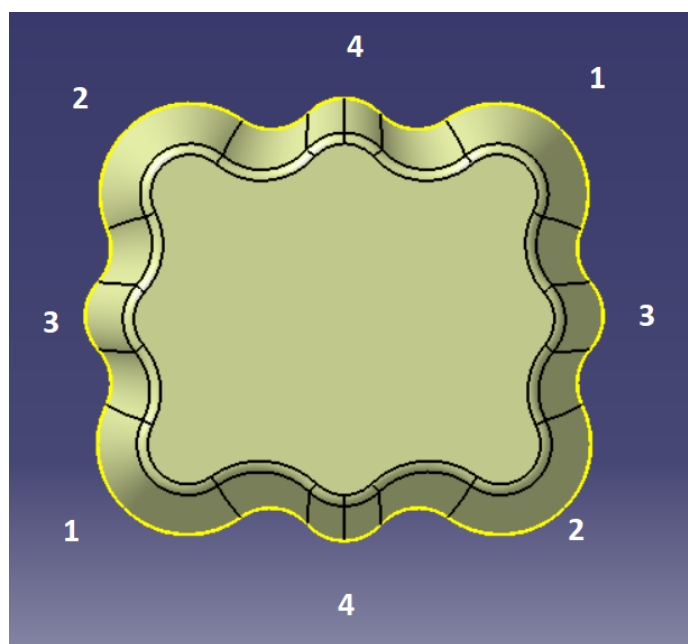
## 11. Katsekehade tootmine

Kuna kokkupõrkenina analüüs oli liiga halva kvaliteediga ning katsekeha dünaamiline katse ebaõnnestus, ei olnud võimalik katseandmete põhjal analüüsi valideerida. Nendel kaalutlustel otsustati esimese kokkupõrkekatssetuse jaoks lamineerida kolm katsekeha, et isegi kui analüüsi tulemused osutuvad puudulikeks või olemasolevad materjaliandmed ebatäpseteks, on katsetulemuste põhjal võimalik luua korrelatsioon süsinikukihtide arvu ning neeldunud energia vahel.

Et olla kindel, et katse igal juhul õnnestub ning et tulemuste põhjal oleks võimalik järeldusi teha, otsustati esimesed kolm katsekeha toota vähemalt pooleteisekordse varuteguriga.

Seega valiti laminaatide paksusteks 8, 10 ja 12 kihti. Pealmine kiht on katsekehal vaid reeglite läbimise tõttu ning ei oma mingit struktuurset funktsiooni, seega on selle paksus 1 süsinikukiht.

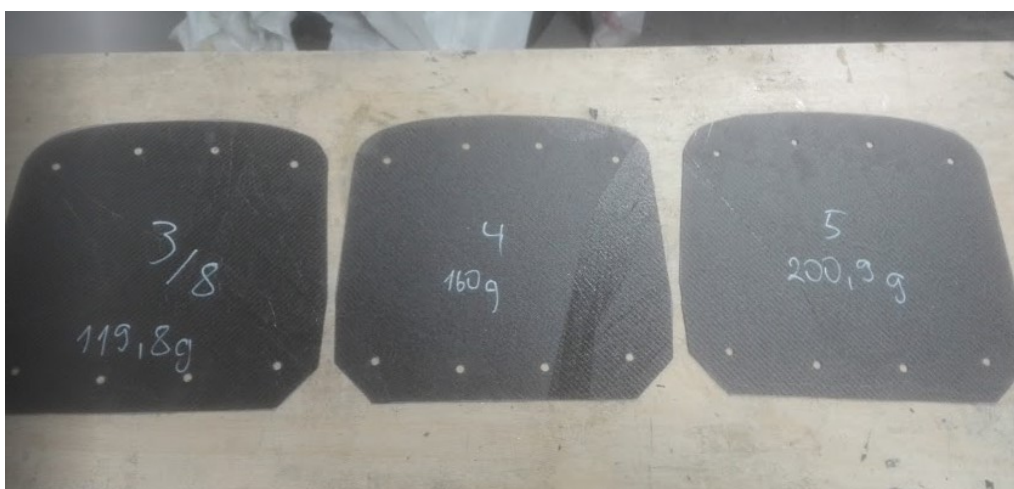
Liitekohad jäeti kõige suurema raadiusega pindadele, kus analüüsi järgi olid kõige väiksemad pinged. Samuti jälgiti lamineerimisel, et kihiti jääksid liitekohad üksteisest maksimaalsele võimalikule kaugusele. See tähendab, et sele 11.1 järgi tehti esimese kihi liitekoht joonele 1-1. Teine kihi liitekoht joonele 2-2 jne. Sellega üritati vältida samasugust olukorda nagu kokkupõrkenina katsekehal, kus laminaadi purunemine tekkis kohtadesse, kus kahe kihi liitekohad olid üksteisele liiga lähedal.



Sele 11.1 Liitekohtade paiknemine kihiti

Katsekehad lamineeriti MDF vormile, mis oli freesitud Joonas Eametsa poolt. Kuna MDF-i kasutades peab ahjutsükli käigus arvestama ka vormi soojuspaisumisega, kasutati katsekehade kuumutamisel temperatuuri 80 kraadi, et vähendada paisumise mõju laminaadile.

Lisaks toodeti kokkupõrkekatses jaoks süsinikust AIP-d, et oleks võimalik kargasid rakise külge kinnitada. Antud AIP-de puhul ei olnud tugevusomadused olulised, kuna kasutataval rakisel toetus kärje pind jäigale esiseina pinnale.



Sele 11.2 Süsinikust AIP-d kokkupõrkekatses jaoks

Kärgede AIP külge fikseerimiseks kasutati liimi Teroson 5055. [18] Liimi kiiremaks kõvenemiseks asetati katsekehad uuesti ahju 60 kraadi juures. Katsekehi ahjust eemaldades selgus, et kaheksakihiline katsekeha oli kuumuse käes deformeerunud.

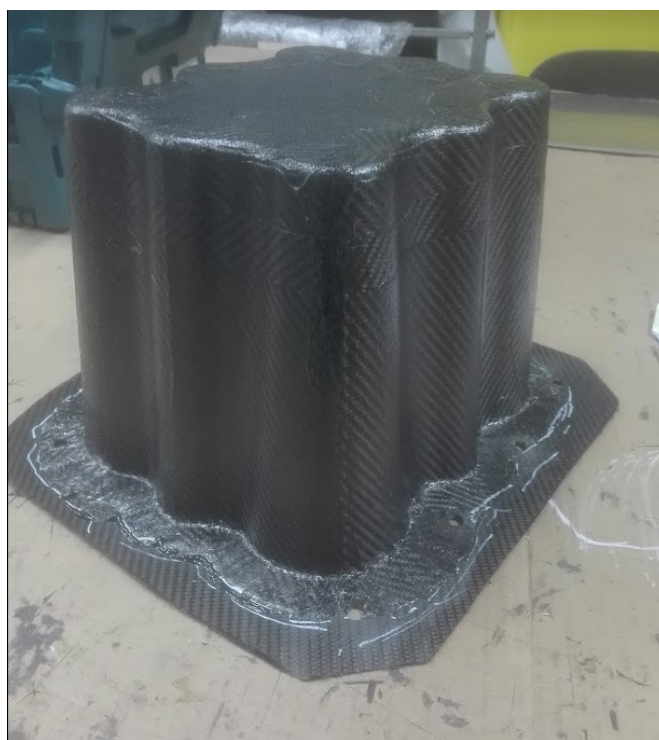


Sele 11.3 Kärgede massid



Sele 11.4 Ahjutsükli käigus tekkinud tootmisviga

Deformatsiooni põhjust ei osatud diagnoosida, kuna komposiidimeeskonnas polnud sellist nähtust varem ühegi detailiga ette tulnud ning teised katsekehad olid kõik korras. See aga tähendas, et kaheksandat katsekeha polnud enam võimalik andmete saamiseks testida. 10-kihilise katsekeha mass oli 744,3 g, 12-kihilise katsekeha oma 921 g. Mõlemad katsekehad olid massilt raskemad kui alumiiniumkärg.



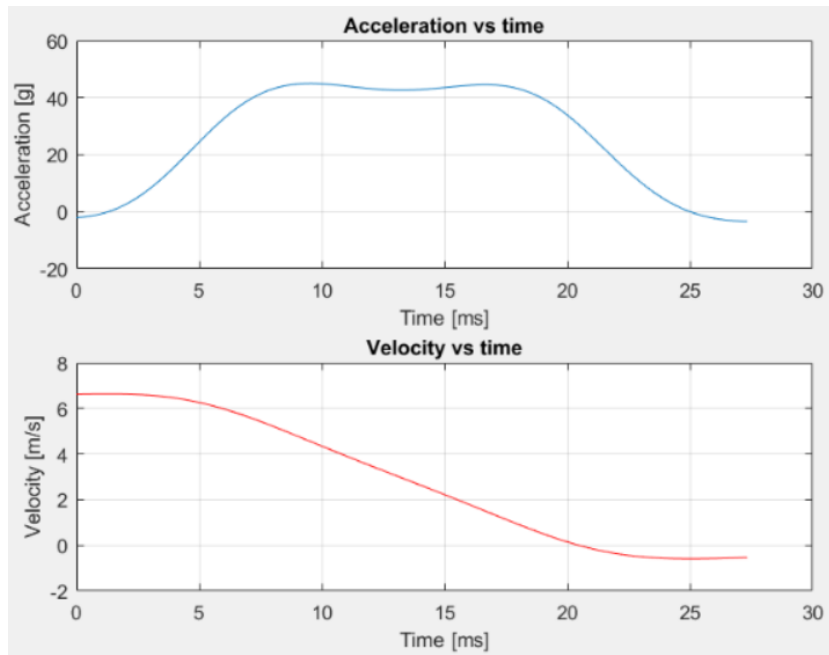
Sele 11.5 Valmis katsekeha

## 11.1 Katsekehade testimine

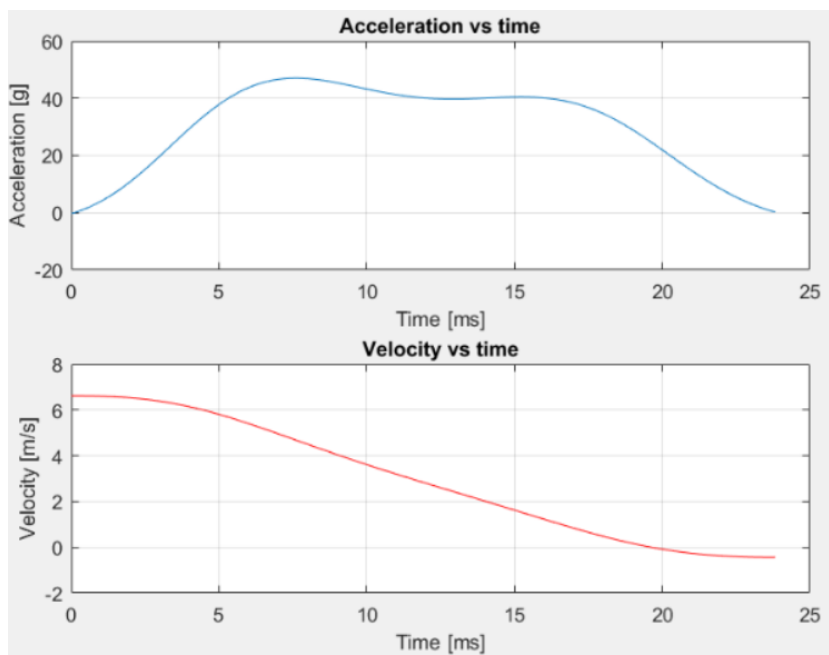
Nii 12- kui ka 10-kihilise katsekeha testimine õnnestus edukalt. Katsekehad deformeerusid vastavalt ootustele ning kinnitasid analüüsipilti. 12-kihiline katsekeha purunes rohkem delamineerudes, 10-kihiline mikrofragmenteerudes. Katsekehi analüüsides võis näha, et mõlemad katsekehad olid jäänud üle 10 cm ulatuses deformeerumata, mis tähendab, et laminaat oli üledimensioneeritud. Kiirenduse väärtuste poolest olid mõlemad katsekehad liiga jäigad. Lisaks oli näha, et raadiuse trigger ei olnud töötanud vastavalt eeldustele. Kokkupõrke alghetkel oli mõlema katsekeha laminaat raadiuse koha pealt lõikunud, mis sisuliselt tähendab, et katsekehal puudus trigger täielikult. Seda võis järeldada ka kiirendusgraafiku järsust esmasest tõusust ning täiesti stabiilsest kõrgest aeglustusest kogu deformatsiooni vältel.



Sele 11.6 12-kihiline katsekeha (vasakul) ja 10-kihiline katsekeha (paremal) pärast kokkupõrkekatsetust



Sele 11.7 10-kihilise katsekeha graafikud



Sele 11.8 12-kihilise katsekeha graafikud

Graafikutelt on näha, et kiirenduse maksimumil ei ole katsekehade puhul suurt erinevust, kuid 12-kihilise katsekeha deformatsioon kestis ligikaudu 3 ms vähem. Seda, et katsekehad sisuliselt ei erinevad üksteisest üldse, ei osatud ette oodata ning see fakt muutis kihtide arvu ning kokkupõrkeomaduste korrelatsiooni uurimise võimatuks. Küll aga järeldus, et lisaks raadiusele on tarvis kasutusele võtta ka teist tüüpi trigger.



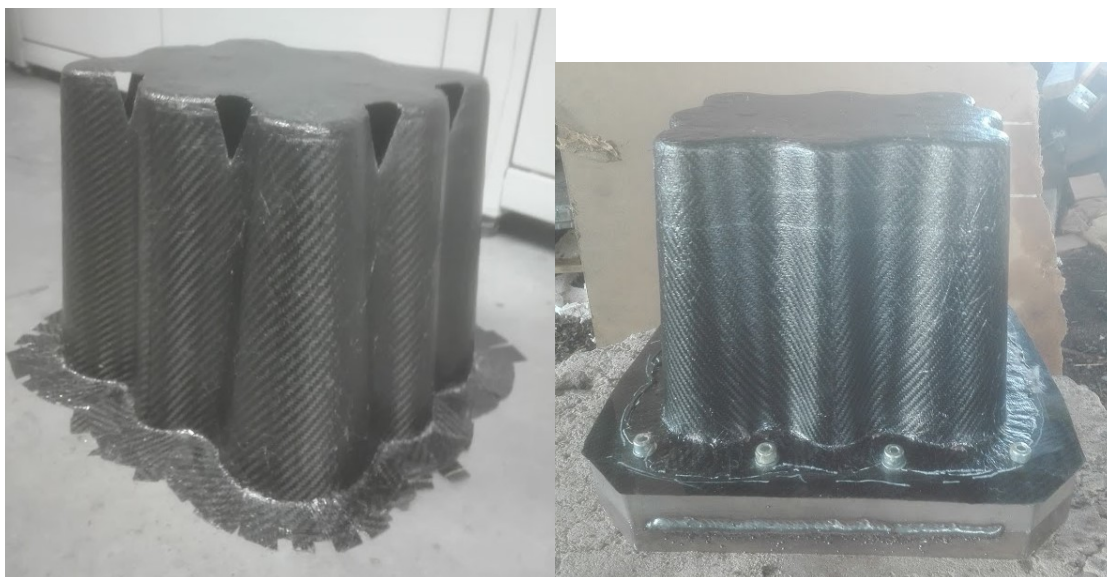
## 11.2 Teine kokkupõrkekatsetus

Esimese testi tulemusi analüüses otsustati järgnevate katsekehade laminaadi planeerimisel lähtuda faktist, et pool esimestest katsekehadest jäi deformeerumata. Seega otsustati teise seeria katsekehade laminaadi paksust vähendada kahekordselt ning lamineerida kaks 5-kihilist kokkupõrkekärge.

Kokkupõrke purunemise initsieerimiseks otsustati triggeritena katsetada ühel katsekehal tsooniti tugevemat laminaati ning teise puhul sisselõikeid.

Sisselõiked tehti lamineerimise ajal 30 mm sügavusele, 30 kraadise nurga alla. Tsoonide kõrgusteks olid vastavalt 14 cm kõrguseni 5 kihti, 17 cm kõrguseni 4 kihti ning 20 cm kõrguseni 3 kihti.

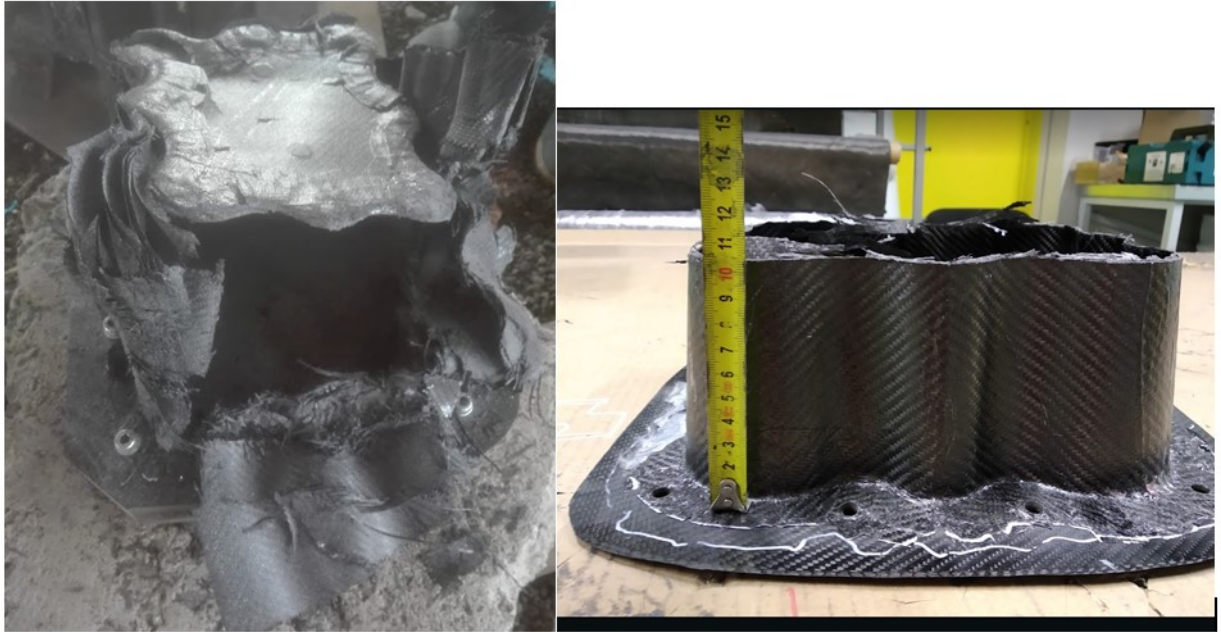
Sisselõigetega katsekeha mass oli 385 grammi, tsoonidega katsekeha mass oli 365 grammi. Seega olid mõlemad katsekehad massilt kergemad, kui alumiiniumkärge (400 grammi).



Sele 11.9 Sisselõigetega katsekeha (vasakul) ning erineva tugevusega tsoonidega katsekeha (paremal)

Teine kokkupõrkekatsetus osutus õnnestunuks. Tsoonidega katsekeha kõrgeim aeglustuse väärtus oli 29 g-d ning keskmine aeglustus 18 g-d. Sisselõigetega kokkupõrkeleevendi katse ebaõnnestus. Katsekeha jäänustest on näha, et lõiked tekitasid laminaadis jõudude ebaühtlase jaotumise ning

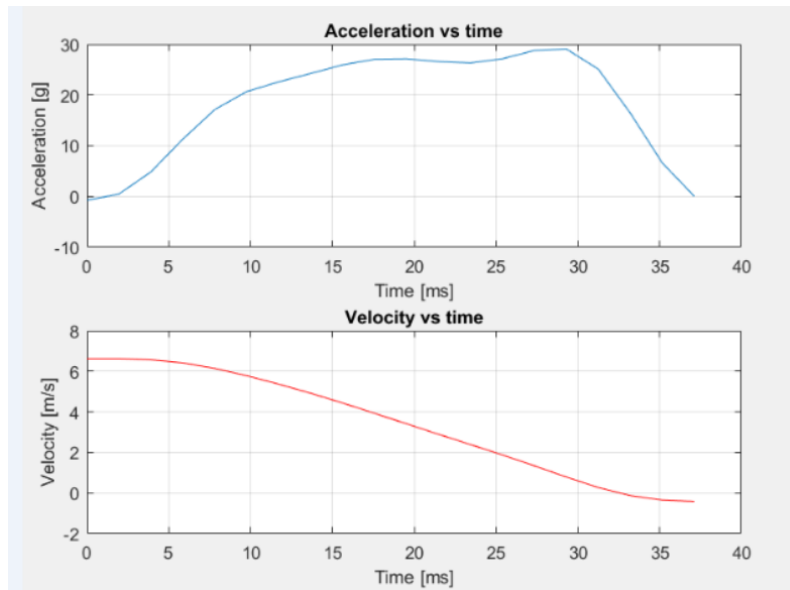
katsekeha ei purunenud sujuvalt, millega kaasnes katastroofiline laminaadi purunemine. Seega võib sisselõigetega triggerit pidada ebasobivaks meetodiks katsekeha purunemise initsieerimiseks.



Sele 11.10 Katsekehad pärast purunemist. Sisselõigetega (vasakul) ja tsoonidega (paremal)

Ootamatu oli, et tsoonidega katsekeha puhul jäi siiski täpselt pool katsekehast purunemata. See tähendab, et antud kõrge on võimalik veelgi optimeerida. Katsekeha graafikut analüüvides on tegemist peaaegu ideaalse sujuva tõusuga. See tähendab, et tsooniti lamineeritud triggeri puhul on tegemist väga funktsionaalse ning lihtsa lahendusega. Kuna graafikult on näha, et kiirenduse väärtus oli juba hakanud langema ning tõusis veelkord just sel hetkel, kui deformatsioon jõudis alumise, viiekihilise tsoonini, võib oletada, et kärje omadusi on võimalik veelgi parandada, kui alumise tsooni kõrgust vähendada veel enam, või see koguni ära kaotada, jättes maksimaalseks laminaadi paksuseks 4 kihti.





Sele 11.11 Tsooniti lamineeritud katsekeha graafikud

### 11.3 Järeldused ning edasine arendustöö

Teise katsekeha tulemustest võib järeldada, et tsooniti lamineeritud triggeri näol on tegemist väga hea lahendusega. Kuna laminaadist jäi veel 10 cm purunemata, on võimalik antud kärje laminaati veelgi optimeerida.

Et kogu IA disain valmis saada, oleks järgnevalt vaja koostada staatilised analüüsid komposiitplaadile, seades rajatingimusteks teise katsekeha purunemisel tekkinud maksimaalne jõud, milleks on 98 kN. Seejärel oleks vaja koostada uus kokkupõrkekatse koos terve kokkupõrkeleevendi koostuga.

Võrreldes alumiiniumkärjega on komposiidist kärj 40 g kergema massiga ning viib kokkupõrkejõud AIP keskkoha asemel monokoki esiseina ligidale. See võimaldab võrreldes alumiiniumkärjega AIP-d palju enam optimeerida, vähendades massi veelgi.

Alumiiniumkärje keskmine ning maksimaalne aeglustus olid süsinikust kärjest madalamad, mis tähendab, et alumiiniumlahenduse näol on tegemist sõitjale turvalisema elemendiga.

Katsekehade tulemusi dünaamiliste analüüsidega võrreldes võib järeldada, et analüüs alahindab struktuuri tugevust. Kui saavutada piisavalt täpne dünaamiliste analüüsise tase, on võimalik ka laminaadi järjestust analüüsis simuleerida, kuid töö koostamisel kasutatud materjaliandmete alusel ei olnud antud variant võimalik, kuna analüüsides ei ilmnunud piisavalt realistlikke tulemusi.

Probleemi lahendamiseks oleks võimalik sobiv laminaat teoreetiliselt käsitsi arvutada, leides katsekehadel kasutatud süsiniku keskmise SEA väärtuse. Seda oleks võimalik teha jagades lõhutud katsekehade laminaadid väikesteks osadeks ning arvutades välja süsiniku massi igas lõigus. Seejärel on võimalik leida katseandmete energia neelduvuse graafikult antud lõigul neeldunud energia hulk. Jagades kindlal lõigul neeldunud energia samal lõigul olnud süsiniku massiga, saab tulemuseks antud lõigu SEA väärtuse (neeldunud energia massiühiku kohta, ühik J/kg). leides kõikide lõikude SEA väärtuste aritmeetilise keskmise, oleks võimalik antud tulemusega hinnata, kui suure kogumassiga süsinikust kärke on vaja, et selles neelduks minimaalselt soovitatav hulk energiat. Antud lõputöö raames ei olnud piisavalt aega sellise statistika tegemiseks, kuid see on kindlasti midagi, mida hiljem tiimis edasi uurida.

## Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö ülesandeks oli projekteerida FS Team Tallinna 2018/2019 aasta hooaja vormelautole FEST19 esikokkupõrkeleevendi. Peamisteks eesmärkideks olid kokkupõrkeleevendi disainimine ilma core struktuurita, dünaamiliste analüüside koostamine programmis Ansys ning massivõidu saavutamine võrreldes eelneva kokkupõrkeleevendi lahendusega.

Enne projekteerimist koguti taustinfot konkurentide lahenduste, komposiiditeooria ja dünaamiliste analüüside koostamise kohta.

Projekteerimisel lähtuti tudengivormeli võistlussarjas kehtivate FSG reeglite poolt seatud piirangutest. Algfaasis oli põhiliseks katsumuseks selgitamine, mis lahendus tagaks antud raamistikus optimaalsed tulemused. Analüüsiti erineva geomeetriaga kokkupõrkeleevendeid ning nende positiivseid ja negatiivseid külgesid.

Esmalt loodi kokkupõrkenina lahenduse dünaamiline analüüs, katsetati erinevaid materjalikihtide paigutusi ning teooriale ja analüüsitulemustele tuginedes toodeti analüüsi valideerimiseks katsekeha. Antud katsekeha osutus reeglite mõttes ebasobivaks, kuid sellelt saadud katseandmed olid edasiseks tegevuseks suure väärtusega.

Lähtudes katse käigus selgunud infost projekteeriti dünaamiliste analüüside alusel kolm süsinikkärje katsekeha. Nende testimise käigus ilmnenu vigadest toodeti kohandatud disainiga kaks uut kokkupõrkeleevendit, millest üks vastas kõikidele FSG reeglites püstitatud nõuetele.

Antud süsinikust struktuur on 40 grammi kergem kui eesmärgiks seatud alumiiniumkärge ning võimaldab varianti komposiitmaterjalidest Anti Intrusion Plate toota, mille arvelt väheneb lahenduse kaal veelgi. Lisaks mõeldi välja variante, kuidas komposiidist kokkupõrkeleevendeid oleks tulevikus võimalik ka käsitsi arvutades dimensioneerida. Kuna varasemalt ei ole FS Team Tallinna komposiidimeeskonnas dünaamilisi analüüse kasutatud, on lõputöö käigus omandatud kogemused ja teadmised tiimile järgnevateks hooegadeks suure väärtusega.

Kõik lõputöö jaoks püstitatud eesmärgid said täidetud, seega võib lõputöö tulemustega rahule jääda.

## Summary

The aim of this bachelors thesis was to design and verify a carbon fibre impact attenuator for the 2018/2019 season Formula Student car FEST19. The main design goals were to use a coreless design for the crash cone, simulating the different geometry structures using Explicit Dynamics analysis tools in Ansys and to reduce the weight of the design compared to the previous years impact attenuator system.

In order to prepare for the design phase, a large amount of material was gathered and analyzed about the previously existing solutions, the general impact theory of composites and the conducting of explicit dynamic analysis.

The main design parameters for the impact attenuator were the requirements set by the Formula Student Germany ruleset. Initially the main challenge turned out to be to deduce the optimal design still allowed by the rules. Different geometry impact attenuators were analyzed and their pros and cons weighed, before settling on the final design.

Firstly, the crash nose concept dynamic analysis was developed. Different composite layups were tested and finally a test piece produced. During impact testing it was concluded that the initial design didn't meet all the requirements, but the experience and knowledge gained was of great use when designing the crash cone geometry.

Based on the first test piece data, three crash cone structures were designed and verified using explicit analysis. They were then tested and improved based on the errors that appeared during testing. The second batch of two crash cones passed all the requirements set by the FSG ruleset.

The result of the thesis was a coreless dynamically analyzed impact structure that weighed 40 grams less than the set goal of the aluminum design. The resulting structure also permits the use of a composite Anti Intrusion Plate, which decreases the weight of the design dramatically. Additionally, alternative methods to dimensioning the impact attenuator were developed.

Since dynamic analysis hasn't previously been used in FS Team Tallinn, the resulting info and test data of this thesis is very valuable for the following seasons of the competition.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] Formula Student Germany reeglistik. [Võrgumaterjal]. [Tsiteeritud: 19. mai 2019. a.] <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/>.
- [2] Formula Student Germany reeglite täpsustavad küsimused [Võrgumaterjal]. [Tsiteeritud: 19. mai 2019. a.] <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/faq/>.
- [3] Feraboli, Paolo & Norris, Chris & Mclarty, Doug. (2007). Design and certification of a composite thin-walled structure for energy absorption. *Int. J. Vehicle Design*. 44. 10.1504/IJVD.2007.013642.
- [4] Browne, E. K. (2016). Optimized carbon fiber energy absorber for high performance Formula student racecar : magistritöö. Norwegian University of Science and Technology : Trondheim
- [5] Formula Student Germany aasta 2017 reeglistik. [Võrgumaterjal]. [Tsiteeritud: 19. mai 2019. a.] <https://www.formulastudent.de/fsg/rules/2017/>.
- [6] Annask, R. (2016). Tudengivormeli võistlusautole FEST16 süsinik kokkupõrkeleevendi projekteerimine : magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool : Tallinn.
- [7] Roberts, M. L. (2014). Development of a Finite Element Model for Predicting the Impact Energy Absorbing Performance of a Composite Structure : magistritöö . California Polytechnic State University.
- [8] Lukaszewicz, Dirk. (2013). Automotive composite structures for crashworthiness. *Advanced Composite Materials for Automotive Applications: Structural Integrity and Crashworthiness*. 99-127.
- [9] Andersson, M, Liedberg, P. (2014) Crash behavior of composite structures: A CAE benchmarking study : magistritöö. Chalmers University of Technology : Göteborg
- [10] J. Carruthers, J & P. Kettle, A & M. Robinson, A. (1998). Energy Absorption Capability and Crashworthiness of Composite Material Structures: A Review. *Applied Mechanics Reviews*. 51. 10.1115/1.3100758.
- [11] Bisagni, C. "Experimental Investigation of the Collapse Modes and Energy Absorption Characteristics of Composite Tubes," *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 14, No. 4,

2009, pp. 365–378.

- [12] Kosky, Philip Balmer, Robert Keat, William Wise, George. (2010). Exploring Engineering - An Introduction to Engineering and Design (2nd Edition) - 14.6 Criteria for Predicting Effects of Potential Accidents.
- [13] Troiani, Enrico & Donati, Lorenzo & Molinari, Gianluca & Di Sante, Raffaella. (2014). Influence of Plying Strategies and Trigger Type on Crashworthiness Properties of Carbon Fiber Laminates Cured through Autoclave Processing. *Strojniski Vestnik*. 60. 375-381. 10.5545/sv-jme.2013.1506.
- [14] ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide. (2017) Release 18.2
- [15] Feraboli, Paolo & Wade, Bonnie. (2016). Crushing Behavior of Laminated Composite Structural Elements: Experiment and LS-DYNA Simulation. Federal aviation administration technical report.
- [16] N Nasir Hussain, Srinivasa Prakash Regalla, Yendluri V Daseswara Rao, Comparative Study of Trigger Configuration for Enhancement of Crashworthiness of Automobile Crash Box Subjected to Axial Impact Loading, *Procedia Engineering*, Volume 173, 2017, Pages 1390-1398, ISSN 1877-7058.
- [17] E. Mahdi, A.M.S. Hamouda, T.A. Sebaey, The effect of fiber orientation on the energy absorption capability of axially crushed composite tubes, *Materials & Design (1980-2015)*, Volume 56, 2014, Pages 923-928, ISSN 0261-3069.
- [18] Liimi Teroson 5055 andmed. [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud: 19. mai 2019. a.] [https://www.henkel-adhesives.com/ee/en/product/structural-adhesives/teroson\\_ep\\_5055.html](https://www.henkel-adhesives.com/ee/en/product/structural-adhesives/teroson_ep_5055.html)
- [19] Miguel A, Santos A. (2017) Dynamic analysis and design of impact attenuator structures for a Formula Student prototype : magistratöö. Técnico Lisboa : Lissabon.

# LISAD

## Lisa 1

Matlabi kood andmefailide analüüsimiseks.

```
load filename.mat % reads the
data file

Fs = VCAP_SAMPLERATE; % discretization
freq
Ts = 1/Fs; % timestep
y = -(VCAP_DATA*1000*9.81/10.13); % acceleration
m/s^2, 10.13 is a constant for the sensor
cutoff_freq = 100; % cutoff
frequency for the filter(-3 dB)

aligus=36800;
lopp=37100;

m = 337; % mass kg
dH = 2.2315; % height of the
fall
t = sqrt(2*dH/9.81) % time of the
fall
v0 = t*9.81
x = 0:Ts:Ts*(length(y)-1);
height =dH

[b,a] = butter(3, 2*cutoff_freq/Fs);
y_filt = filtfilt(b,a,y);

accel_avg = mean(y(aligus:lopp))/9.81
accel_pk = min(y_filt(aligus:lopp))/9.81

y_filt = -transpose(y_filt);
accel = y_filt(aligus:lopp); % the moment of
crushing the IA for the acceleration
time = x(aligus:lopp); % the moment of
crushing the IA for time1
time = (time - min(time)); % converts time to
ms
time_ms = time*1000;
```

```

v = v0-cumtrapz (time,accel);           % integrates speed
from acceleration
s = cumtrapz(time, v);                 % integrates
displacement from speed
disp_mm = s*1000;
deformation = max(disp_mm)
E = m*v.*v/2;
energy_absorbed = max(E)

subplot (3,2,1)
plot (time_ms, accel/9.81)
xlabel('Time [ms]')
ylabel('Acceleration [g]')
title('Acceleration vs time');
grid on

subplot (3,2,2)
plot (time_ms, disp_mm, 'g')
xlabel('Time [ms]')
ylabel('Displacement [mm]')
title('Displacement vs time');
grid on

force = m*accel;
subplot (3,2,5)
plot (disp_mm, force, 'r')
xlabel('Displacement [mm]')
ylabel('Force [N]')
title('Force vs displacement');
grid on

subplot (3,2,4)
plot (disp_mm, E, 'r')
min_v = find(abs(min(v)));
xlabel('Displacement [mm]')
ylabel('Energy [J]')
title('Energy vs displacement');
grid on

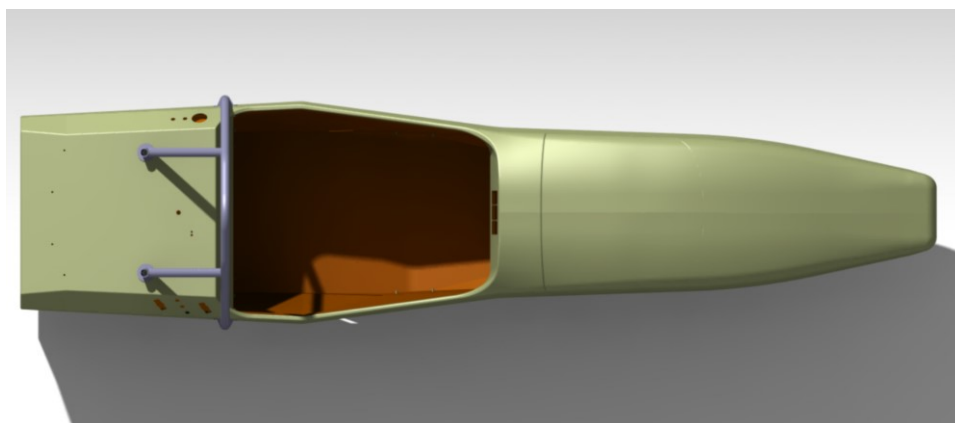
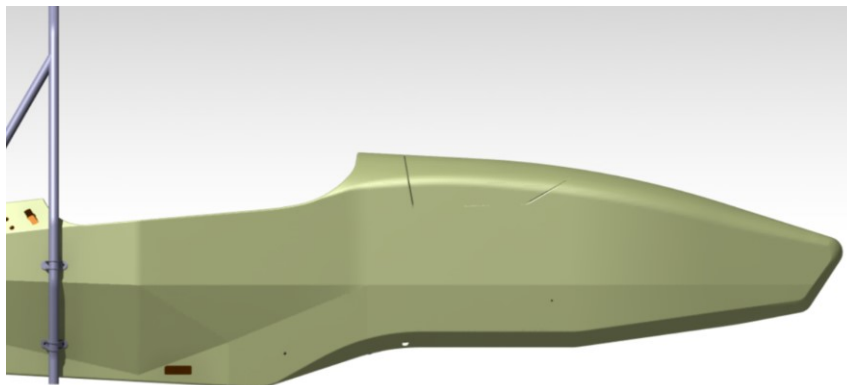
subplot (3,2,3)
plot (time_ms, (v), 'r')
xlabel('Time [ms]')
ylabel('Velocity [m/s]')
title('Velocity vs time');
grid on

```



## Lisa 2

Katmiku tootmine.



Sele 0.1 Nina kõrvaltvaade ja pealtvaade



Sele 0.2 Katmiku positiivvorm



Sele 0.3 Katmik vormeli küljes