



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut
Mehhatroonika õppetool

MHE70LT

Marek Lentsius

**FORMULA STUDENT KLASSI VORMELAUTO
MONOKOKK-KERE PROJEKTEERIMINE**

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

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2015 aasta II semester

Üliõpilane: Marek Lentsius 132226MAHM

Õppekava: MAHM 02/13

Eriala: Mehhatroonika

Juhendaja: Dotsent, Priit Põdra

Konsultandid: Teadur, Henrik Herranen, 55971573

MAGISTRITÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Formula Student klassi vormelauto monokokk-kere projekteerimine

(inglise keeles) Formula Student class racecar monocoque chassis development

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Materjali katsetuste väljatöötamine ja läbiviimine	23.01.15
2.	Simulatsiooni mudeli loomine	13.02.15
3.	LEM analüüs	03.04.15
4.	LEM analüüsi valideerimine	17.04.15
5.	Dokumenteerimine	08.05.15

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Töö käigus projekteeritakse ja analüüsitakse baltikumi esimene süsinik monokokk-kere vormel klassi autole. Süsinik monokokk-kerega vähendatakse vormelauto kere massi ning oluliselt tõstetakse raami väändejäikus.

Täiendavad märkused ja nõuded:.....

Töö keel: Eesti keel

Kaitsmistootlus esitada hiljemalt 18.05.2015

Töö esitamise tähtaeg 22.05.2015

Üliõpilane Marek Lentsius /alkiri/

kuupäev 27.03.2015

Juhendaja Priit Põdra /alkiri/

kuupäev 27.03.2015

SISUKORD

EESSÕNA.....	6
1. SISSEJUHATUS.....	7
1.2. Kirjanduse ülevaade	8
1.3. Sobiva tootmismeetodi valimine	14
1.4. Formula SAE reeglid	15
1.5. Ülesande püstitus	17
2. MATERJALI MEHAANILISTE OMADUSTE MÄÄRAMINE.....	20
2.1. Läbiviidud katsed	20
2.2. Kasutatud mõõteseadmed ning mõõtmisvahendid	22
2.3. Materjali tõmbeomaduste määramine	22
2.4. Materjalide surveomaduste määramine	25
2.5. Materjalide nihkeomaduste määramine.....	26
3. JUHI KÜLGKAITSE PANEEL.....	30
3.1. Külgakaitsepaneeli katserakise valideerimise katse.....	32
3.2. LEM mudel.....	33
3.3. LEM analüüsi tulemused	39
3.4. Kihtide paigutuse valik.....	42
3.5. Paneeli reaalsed katsetused.....	43
3.6. Järeldused ning LEM mudeli täiendamine	44
3.7. Reaalse katsekeha täiendamine	46
4. MONOKOKK KERE.....	49
4.1. Kere mudel ja tähtsamad mõõdud	49
4.2. Analüüsi alused.....	50
4.3. Kere koormamine	51
4.3.1. Raami väändejäikus.....	51

4.3.2.	Pidurdusjõud ning külgiirendus	53
4.3.3.	Nookuri ning amortisaatori kinnitusele rakenduvad jõud	55
4.3.4.	Modaalanalüüs	56
5.	MONOKOKK-KERE LEM ANALÜÜS	57
5.1.	Esiagne kihtide paigutus	57
5.2.	Kere väändejäikuse analüüs.....	61
5.3.	Optimeeritud kihtidega analüüs	65
5.4.	Pidurdusjõu ning külgiirendusjõu analüüs	70
5.5.	Nookuri ning amortisaatori kinnituste analüüs.....	72
5.6.	Modaalanalüüs.....	74
5.7.	Lõplik kihtide paigutus	75
	KOKKUVÕTE.....	78
	SUMMARY	82
	KASUTATUD KIRJANDUS	85
	LISAD	88

EESSÕNA

Antud töö on valminud Formula Student Team Tallinna algatusel. Töö koostamine ning katsete läbiviimine toimus Tallinna Tehnikaülikoolis. Soovin avaldada tänu oma juhendajale, dotsent Priit Põdrale, ja konsultandile, teadur Henrik Herranenile, kogu osutatud abi eest. Samuti soovin tänada ka Tallinna Tehnikaülikooli Materjalitehnika instituudi tehnikut Endel Esinurme suure abi eest katsete läbi viimisel laboris.

Lõpetuseks olen tänulik Formula Student Team Tallinna'le toetuse ja meeldiva koostöö eest.

1. SISSEJUHATUS

Formula Student (FS) on üliõpilastele suunatud tootearendusvõistlus, kus peamiseks eesmärgiks on õppimine läbi praktilise kogemuse. Projekti väljundiks on projekteerida ja ehitada üheistmeline vormel-klassi võidusõiduauto, millega hiljem võisteldakse teiste maailma ülikoolide võistkondade vastu. FS esimene võistlus peeti 1979. a. Ameerika Ühendriikides [10]. Tänapäevaks on üle maailma loodud ülikoolide võistkondi üle viie saja, kes võistlevad igal hooajal. Võistlused ei koosne üksnes võidusõitmise osast. Tudengitel tuleb ka oma projekteeritud ning valmistatud lahendusi kaitsta professionaalsetest inseneridest koosneva komisjoni ees.

2007. a. loodi Tallinna Tehnikaülikooli ning Tallinna Tehnikakõrgkooli ühismeeskond FS Team Tallinn. Meeskond on oma kaheksa tegutsemisaasta jooksul ehitanud seitse autot ning nendega saavutanud vägagi silmapaistvaid tulemusi. Säilitatud autod on illustreeritud Selet 1.1. 2013. a. võideti Ungaris esikoht sise põlemismootorite klassis ning 2013. a. saavutas FS Team Tallinn USA-s Michigani toimunud võistlusel 2. koha. 2013. a. otsustas meeskond vahetada jõuallikaks olnud sise põlemismootori elektrimootori vastu ning 2014. a. oli näha juba tehtud töö viljast. 2014. a. suvel saadi Itaalias toimunud võistlustelt üldarvestuses 1. koht ning sellega kindlustati ka maailma edetabelis elektriautode arvestuses 3. koht.



Sele 1.1. FS Team Tallinna autod [12]

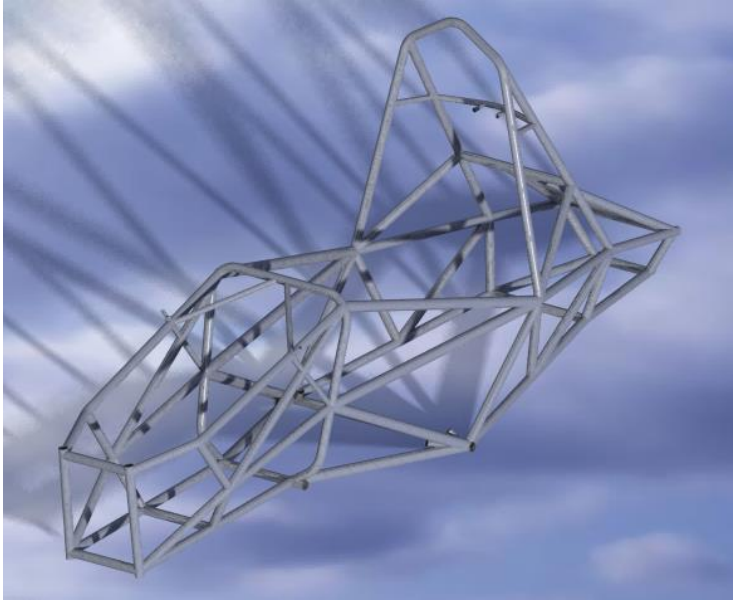
Selleks, et jõuda maailma absoluutsesse tippu oli vaja meeskonnal läbi viia radikaalseid uuendusi. Senised seitse autot on kõik ehitatud tagasillaveolistena ning metallist toruraamiga. Enamik maailma elektriauto tippmeeskondi kasutavad juba nelikvedu lahendust ning süsinikmonokokk raame. Tootearendusvõistlusel konkurentsipüsimeks otsustas meeskond 2015. a. autol just nimetatud muudatusi teha.

Kõigi eelneva seitsme auto metallist toruraamid on järjest rohkem optimeeritud, seda just massi vähendamise, raami väändejäikuse suurendamise ning juhi sõiduergonoomika puhul. Need kõik on andnud häid väljundeid, kuid progress ning pidev konkurentsi tihenemine nõuab meeskondadelt kiiret ning püsivat arengut. Võistlusautode puhul on oluliseks näitajaks auto mass. Eelnevate metallist toruraamide massid on jäänud vahemikku 27-35 kg. Süsinik monokokk-kere kasutusele võtmisel on võimalik see number viia alla vahemikku 16-22 kg. Samuti tõuseb võistlusauto jaoks vägagi tähtis näitaja – raami väändejäikus. Mida suurem on raami väändejäikus, seda parem on auto juhitavus ning seda vähem neeldub autot edasiviivat energiat raami.

Süsinik monokokk-kere kasutusele võtmine võimaldab ka paremat komponentide paigutust autos ning sellega parandab auto kaalujaotust. Kõigi nende näitajate koosmõjul on võimalik FS Team Tallinnas ehitada võimalikult kiire võistlusauto ning püsida maailma tippülikoolide meeskondadega konkurentsipüsimeks.

1.2. Kirjanduse ülevaade

Traditsiooniline võistlusauto raam ehitatakse metalltorudest. FS Team Tallinn on enda seitsme auto raami ehitamisel kasutanud kerget, kuid suure voolepiiriga metalli sulamit 25CrMo4. Nende ehitatud raamide mass on jäänud vahemikku 27-35kg. Sellest kergemat ei ole seni suudetud ehitada, kuna materjali paindetugevus ning reeglitega ette määratud piirangud ei võimalda seda. Meeskonna eelmise hooaja auto FEST 14 toruraam on näidatud Selet 1.2.



Sele 1.2. FEST 14 toruraam [21]

Antud toruraami miinusteks on tema mass – 27 kg, väike väändejäikus – 2560 Nm kraadi kohta. Kere suurem mass tähendab auto jaoks tugevamat vedrustust, suurema toru paksusega õõtshoobasid, tugevamaid käänmike. Kõikidele detailidele, mis kannavad kere konstruktsiooni, tähendab see massi lisa. Vedrustatud massi vähendamisega on võimalik optimeerida kõiki eelpool nimetatud detaile ning seeläbi valmistada kergem auto.

Kergema auto valmistamine on saavutatav monokokk raamiga. Monokokk on struktuur, kus koormust võtab vastu kere välispind ehk koorik. Monokokk-keresid on võimalik valmistada paljudest materjalidest, nagu näiteks alumiinium, klaasplast ning süsinikkiud plast. Alumiinium monokokk-keresid on valmistatud vormelitele Eestis ka varem. 2000. a. ehitatud vormel „Estonia 26-9“-l kasutati kokku needitud alumiiniumist monokokk raami (Sele 1.3) [8].



Sele 1.3. Vormel Estonia [2]

Komposiitmaterjalidest vormeli monokokk-kere Eestis veel ehitatud ei ole. Vähemalt mitte ühes tükis valmistatud terviklikku monoliitset struktuuri.

Komposiitmaterjalidest monokokk-kere ehitamisel on valmistamiseks peamiselt kolm varianti. Variantid erinevad üksteisest toormaterjali ning tootmismeetodi poolest. Järgnevalt antakse neist kolmest lühiülevaade.

Esimene variant komposiitmaterjalidest monokokk-kere valmistamisel on ilmselt ka kõige lihtsam. Kere valmistatakse kas süsinik- või klaaspalast materjalist. Vorm, millesse kere valmistatakse, on kahepoolne ning kere pooled liidetakse hiljem liimimise abil kokku. Antud meetod on kõige lihtsam, kuna võimaldab kasutada kere valmistamisel nii märglamineerimise, infusioonimise kui ka eelimmutatud kanga (ik *prepreg*) meetodit. See on ka antud meetodi üks suurimaid positiivseid pooli. Täitematerjali määrab valmistamise meetod. Märglamineerimisega ja eelimmutatud kangaga on võimalik kasutada kargstruktuure. Infusioonimisel on ainukeseks võimaluseks kasutada täitematerjalina polümeervahtu. Kargstruktuuri eelis vahu ees on väiksem mass ning suurem nihketugevus.

Samuti on lihtsustatud materjalide kereesse paigaldamine, kuna vorm on ühelt poolt tervenisti avatud ning puuduvad negatiivsed pinnad. Tootmismeetodi miinuseks on aga kere poolte hilisem liitmine. Kahe kere poole liitepunkt tuleb korralikult ühendada ning tugevdada lisa materjaliga. Vaatamata sellele jääb liitepunkt ikkagi kere kõige nõrgemaks kohaks. USA-Saksamaa võistkonna Global Formula Racing kaheosalise monokokk-kere ülemine pool ning vormi üks pool on näidatud Seel 1.4.



Sele 1.4. Kahest poolest valmistatud monokokk GFR 2012 [13]

Teine meetod komposiitmaterjalist monokokk-kere valmistamiseks on kahepoolse vormiga, kuid ühe monoliitse struktuurina (Sele 1.5). Sellise valmistamismeetodi puhul ei ole võimalik kasutada märglamineerimist. Kasutada saab ainult infusioonimise ning eelimmutatud kanga meetodit. Täitematerjalina on võimalik kasutada vastavalt kas siis vahtu või kargstruktuuri. Sellise valmistamismeetodi negatiivseks pooleks on keeruline valmistamise tehnika. Kuna vorm on materjalide sisse panekul kokku liidetud, on võimalik töid teostada ainult vormi sisse lõigatud avadest (Sele 1.5). See suurendab oluliselt valmistamise ajakulu. Meetodi positiivseks pooleks on kindlasti monoliitne struktuur ning liitepinna puudumine. Kõik materjali kihid on servadest omavahel kaetud, andes sellega juurde vajalikku tugevust.



Sele 1.5. FEST 15 kere vorm seest (vasakul) ja kokku panduna väljast (paremal)

Kolmandat meetodit on võimalik kasutada kõikide vormide puhul, nii kahepoolse kui ka kinnise vormiga. Tegemist on eelimmutatud kanga ehk *prepreg* kangast kasutava meetodiga. *Prepreg* kangas on materjal, kus on eelnevalt juba seotud kangas ja vaik ning vaik on pooltahkel kuju, mis võimaldab materjali hõlpsat käsitlemist. *Prepreg* tootmismeetodi kasutamisel ei ole täitematerjali osas samuti piiranguid. Kasutada saab nii vahtu kui ka kargstruktuuri. Antud meetodi positiivseks pooleks on veel materjalide suurem tugevus võrreldes teiste meetoditega. *Prepreg* kanga tugevus on keskmiselt 20%-30% suurem tavalisest süsinikkangast [16]. Suurem tugevus saavutatakse täpselt kontrollitud vaigu kogusega laminaadis.

Prepreg tootmismeetodil esineb ka miinuseid. Eelimmutatud kangast peab ladustama ning transportima -21°C temperatuuri juures. Vastasel juhul algab materjali aeglane tahenemisprotsess. Samuti on negatiivseks pooleks *prepreg* kanga täielik kuivatamine või tahendamine. *Prepreg* kanga kuivamiseks on olenevalt materjali tüübist vaja temperatuuri $(80-160)^{\circ}\text{C}$. Kusjuures ei piisa ainult stabiilsest temperatuurist. Sõltuvalt materjalist on tahenemiseks vaja temperatuuri, mis liigub vahemikus $(80-120)^{\circ}\text{C}$ ning sealjuures on äärmiselt oluline ühtlane soojenemine detaili pinnal ja temperatuuri tõusmise tempo. Sõltuvalt materjalist on see umbes $0.5-1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Samuti on enamuse *prepreg* kangaste tahendamiseks vaja lisaks vaakumi poolt tekitatud atmosfääri rõhule ka välisrõhku, mis võib olla 8-10 bar. [16] Selle kõige teostamiseks on vajalik autoklaav kuivatusahi (Sele 1.6), mis reguleerib temperatuuri ning lisarõhku vastavalt vajadusele. Nimetatud seade on aga äärmiselt

sihtotstarbeline ning kõrge hinnaga. Probleeme tekitab ka vormi valmistamise materjal. Nimelt peab vormi materjal olema samaväärse soojuspaisumisega kui on valmistatava kere soojuspaisumine, vastasel juhul autoklaav ahjus kõrgel temperatuuril kuivatades on vormil ning kerel erinev soojuspaisumine. Selle tulemusena tekivad kerele vormi jahtumisel suure tõenäosusega pinged ja koormused.



Sele 1.6. AMZ 2014 meeskonna auto kere autoklaav ahjus [3]

1.3. Sobiva tootmismeetodi valimine

Sobiva tootmismeetodi valimisel tuleb üle vaadata kõikide tootmismeetodite peamised plussid ja miinused, tootmismeetodite kohandamine ning kogemused meeskonnas FS Team Tallinn.

Tabel 1.1. Tootmismeetodite võrdlus

Tootmismeetod	Materjali hind €	Täite-materjal	Tootmis-võimalused	Valmistamis -kogemus	Positiivsed pooled	Negatiivsed pooled
Kahe tüki kere (infusioonimine, märglamineerimine)	3000-4000	Vaht, kärg	Olemas	Olemas	Lihtne valmistada, võimalik kasutada erinevaid täitematerjale	Kahe kere poole liitmine
Ühe tüki kere (infusioonimine)	3000-4000	Vaht	Olemas	Olemas	Puudub pindade liitmispunkt,	Keeruline valmistada, ajamahukas
Eelimmutatud kanga meetod	7000-8000	Vaht, kärg	Eestis puudub sobiv autoklaav ahi,	Kogemus puudub	Suurem materjalide tugevus, lihtne materjalide käsitlemine	Vajab autoklaav ahju

Võttes arvesse Tabelis 1.1 välja toodud tootmismeetodite erinevaid näitajaid võib eelimmutatud kanga meetodi võimalikest tootmismeetoditest välja arvata. Põhjuseks saab välja tuua asjaolu, et Eestis puudub piisava suuruse ning täpsusega autoklaav ahi. Lähim sobiv autoklaav ahi asub Soomes ning auto kere transportimine sinna oleks äärmiselt kulukas. Arvestada tuleb veel tingimusega, et transport peab toimuma -21°C temperatuuriga transpordivahendis [16].

Analüüsides kahte järele jäänud tootmismeetodit on neid peamiselt eristavateks näitajateks ühelt poolt kere poole liitmine ning teisalt meetodi ajamahukas töö. Arvestades, et meeskonnal on olemas kogemused nii märglamineerimise kui ka infusiooni valdkonnas, siis need faktorid valikut ei mõjuta. Kahepoolse kere ning märglamineerimisega on võimalik

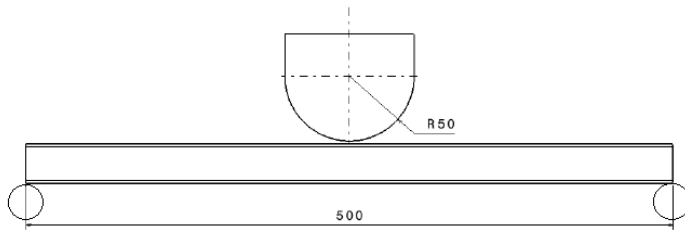
kasutada kergemat täitematerjali kärke, kuid see ei kaalu üles asjaolu, et kaks kere poolt tuleb hiljem liita omavahel kokku tugevaks struktuuriks. Just selle põhjuse tõttu on tootmismeetodiks valitud ühes tükis infusioonitud kere.

1.4. Formula SAE reeglid

Monokokk-kere ehitamisele on Formula SAE määranud kindlad reeglid. Reeglid põhinevad toruraami ehitamise ning tugevuse põhimõtetel. Monokokk-kere tugevuse vastavus nendele reeglitele tuleb tõestada struktuurse samaväärsuse lehel (i.k *Structural Equivalency Spreadsheet*, SES). Peamiselt võrreldakse materjalide EI-d (kus E-elastusmoodul, I-ristlõike inertsmoment). Reeglid määravad teatud alade tugevuse võrrelduna baas toruraami paigutusega. Monokokk-kere reeglid nõuavad järgnevate kere osade tõestamist toruraami baasil:

- esimene kokkupõrke vahesein
- esimese vaheseina toetus
- juhi külgkaitse ala
- õla turvavööde kinnituse ala
- aku kaitse ala
- kõrgepinge elektroonika komponentide kaitse ala

Kõigi monokokk-kere paneelide tugevus tuleb tõestada kolme punkti painde katsega. Katsepaneeli suuruseks on 500 mm*275 mm, tugevade vaheks 500 mm ning surutav objekt peab olema silindriline keha raadiusega 50 mm (Sele 1.7). Samalaadsed katsed tuleb läbi viia ka paneelidele vastavate metalltorudega. [25]



Sele 1.7. Kolme punkti painde skeem [25]

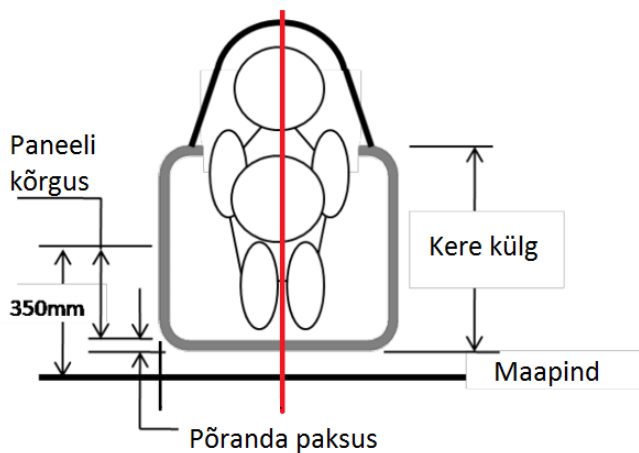
Kere paneelidega tuleb läbi viia ka nihkekatsed. Nihkekatsed on minimaalselt 100 mm*100 mm. Katse läbiviimiseks peab katsekeha olema alusel, milles on $d=32$ mm ava, mis asub aksiaalselt $d=25$ mm torni all. Katse käigus surutakse torniga läbi terve plaadi [9, Reegel T3.31].

Esimene kokkupõrke vahesein peab omama 1.5 mm paksuse terasplaadi nihketugevust [9, Reegel T3.32].

Külgkaitse kõrguseks on 350mm maapinnast mõõdetuna (Sele 1.8) [9, Reegel T3.34].

Esimese vaheseina toetus peab olema võrdne vähemalt kuue metallist toru EI-ga. Esimese vaheseina toetusala asub esimese vaheseina ja esimese turvakaare vahelisel alal (Sele 1.9, sinine viirutus) [9, Reegel T3.33].

Juhi külgkaitse ala peab olema võrdne vähemalt kahe metallist toru EI-ga. Juhi külgkaitse ala asub esimese turvakaare ja tagumise turvakaare vahelisel alal (Sele 1.9, punane viirutus).

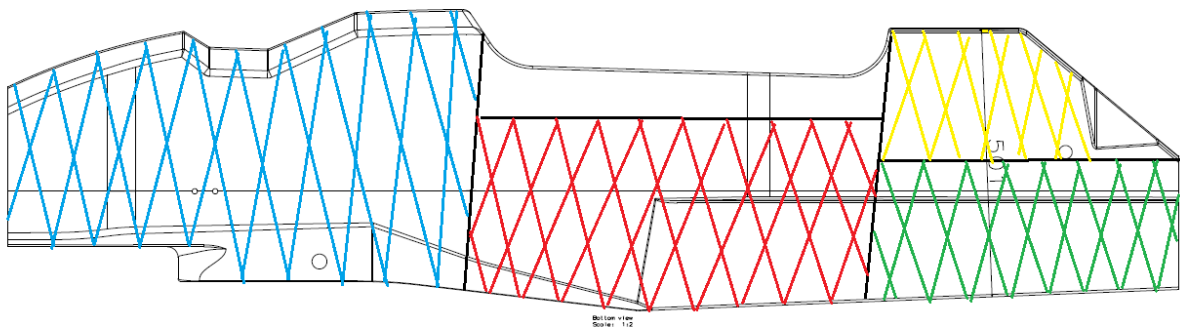


Sele 1.8. Juhi külgkaitse paneeli kõrgus [25]

Õla turvavööde kinnitus ala peab olema võrdne vähemalt ühe metallist toru EI-ga [9, Reegel T3.41].

Akude kaitse ala peab olema võrdne juhi külgakaitse ala tugevusega (Sele 1.9, roheline viirutus) [9, Reegel EV3.4.4].

Kõrgepinge elektroonika komponentide kaitse ala peab olema võrdne vähemalt kolme metallist toru EI-ga (Sele 1.9, kollane viirutus) [9, Reegel EV4.2.2].



Sele 1.9. Kere tugevusnõuete alade jaotus. Sinine- esimese vaheseina toetus, punane- juhi külgakaitse paneel, kollane- kõrgepinge elektroonikakomponentide kaitse ala, roheline- akude kaitse ala.

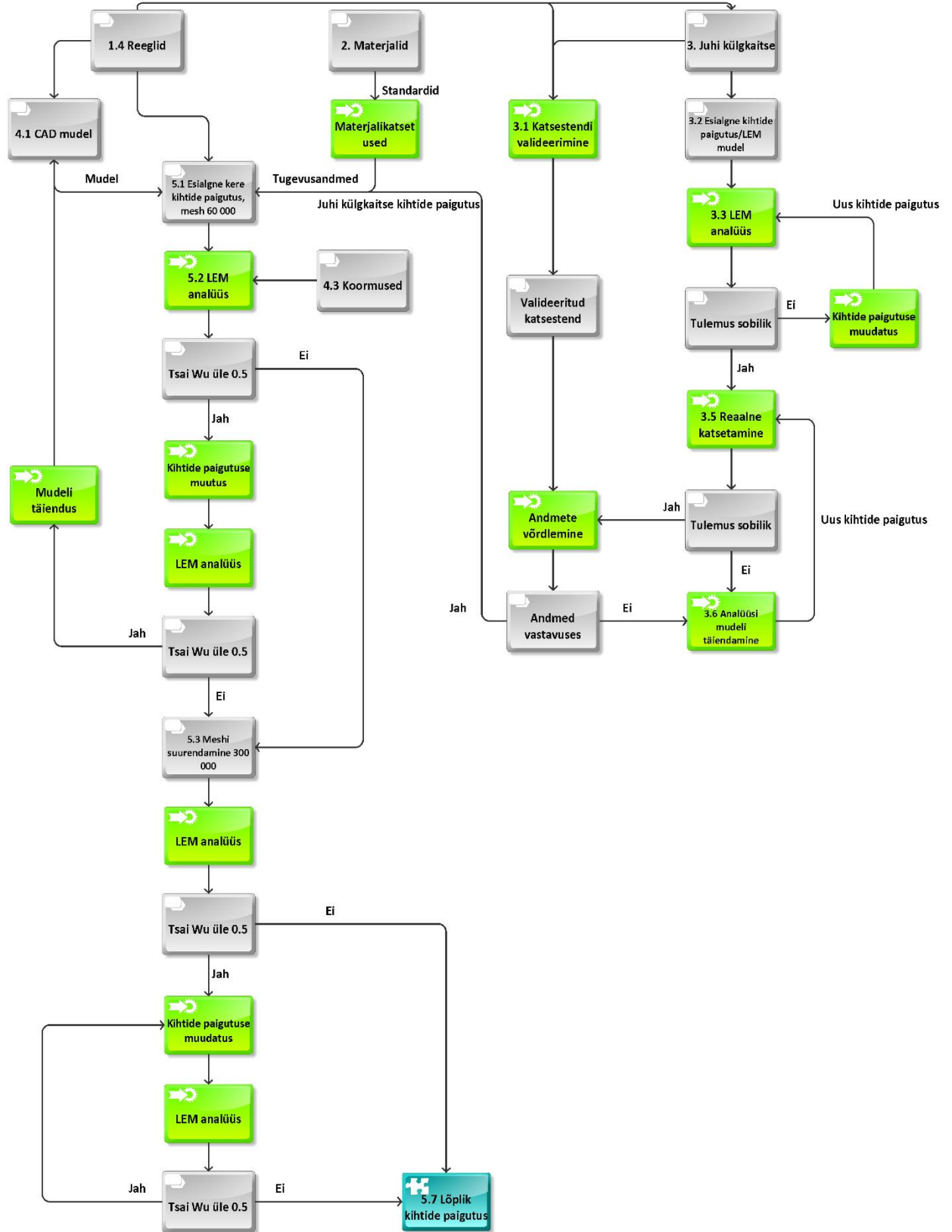
1.5. Ülesande püstitus

Tudengivormel on alati olnud progresseeruva loomuga projekt. Vaadates FS Team Tallinna poolt ehitatud seitset autot on võimalik märgata pidevat edasiminekut ning suurt arendustööd. Selle projekti loomuliku jätkuna on tarvilik võistlusauto puhul kasutusele võtta uudsed ning tänapäevased lahendused. Süsinikkomposiit monokokk-kere on üks parim näide tänapäevasest šassiist.

Käesoleva magistritöö ülesandeks on projekteerida materjalide paigutus ning viia läbi vajalikud tugevusarvutused kere konstruktsioonide tugevuste valideerimiseks reeglitele vastavusele. Töö teostamiseks viiakse läbi materjali katsetused, saamaks teada vastava tootmismeetodiga tehtud laminaadi tugevusomadused. Vastavalt kere mudelile projekteeritakse materjalide paigutus monokokk-keres. Teostatakse tugevusarvutused kere konstruktsioonide vastupidavuse määramiseks.

Eesmärgini jõudmiseks kasutatakse raalprojekteerimistarkvara Dassault Systems CATIA V5. Lõplike elementide meetodit (LEM) kasutades teostatakse kere tugevusanalüüsid Ansys ACP PrePost keskkonnas.

Ülesande lahendamiseks loodi plokk diagramm, mis illustreeriks kõiki töö sisendeid, ülesande lahendamise vaheetappe ning lõpptulemust. Töökäiku iseloomustav plokkiagramm on esitatud Seel 1.10.



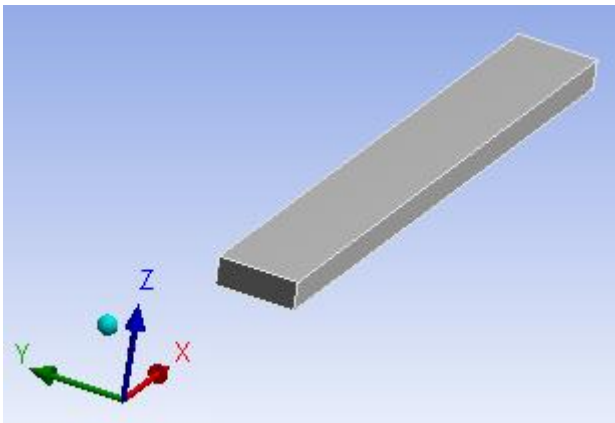
Sele 1.10. Ülesande lahenduskäigu plokk diagramm

2. MATERJALI MEHAANILISTE OMADUSTE MÄÄRAMINE

2.1. Läbiviidud katsed

Töös analüüsiti kolme erinevat materjali ning nende mehaanilisi omadusi. Materjali mehaaniliste omaduste määramine katseliselt oli vajalik, kuna komposiitmaterjalide puhul sõltuvad materjali mehaanilised omadused tootmismeetodist. Määrati tõmbe-, surve- ning nihkeomadused. Kõikide materjalidega viidi läbi kolme telje sihis katsed (Sele 2.1). Materjalideks on valitud:

- *twill* lõimega punutud süsinikkangas massiga 200 g/m^2 ,
- ühesuunaline ehk *unidirectional* (UD) süsinikkangas massiga 300 g/m^2
- põimimata kahesuunaline kangas ehk *biaxial* süsinikkangas massiga 400 g/m^2
- epoksiidvaik *Pro Set Inf 210*.



Sele 2.1. Materjali katsetuste telgede suunad

Materjalid, mis on punutud või laotud suundades 0° ja 90° ehk x ja y , omavad mõlemas suunas võrdseid omadusi ning seetõttu ei ole mõlema suuna jaoks eraldi katseid vaja sooritada. Katsetuste jaoks kasutati ASTM [4, 5, 6] standardites esitatud katsetusmeetodeid, kuid z -suuna tõmbeomaduste ning yz -suuna nihkeomaduste määramiseks oli vaja välja töötada uudne katsetusmeetod, kuna standardi kohast katsekeha tootmine oleks olnud liiga keeruline ning majanduslikult ebaotstarbekaks. Katsetused viidi läbi TTÜ Materjalitehnika instituudi tõmbestendil Instron 8516. Tugevusarvutuste teostamiseks vajalike materjalide andmete nimekiri on välja toodud Tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Ansys keskkonna jaoks vajalikud tugevusnäitajad

Katse tüüp	Suund	Standard
Youngi moodul / elastsumoodul (<i>E</i>) pikkeomadused	X	D 3039
	Y	D 3039
	Z	D 3039
Poissoni tegur (ν)	XY	D 3039
	YZ	D 3039
	XZ	D 3039
Nihkeelastsusmoodul (<i>G</i>) <i>Shear Modulus</i>	XY	D 5379
	YZ	D 5379
	XZ	D 5379
Tõmbetugevus <i>Tensile Stress</i>	X	D3039
	Y	D3039
	Z	D3039
Survetugevus <i>Compressive Stress</i>	X	D 6641
	Y	D 6641
	Z	D 6641
Nihketugevus <i>Shear Stress</i>	XY	D 5379
	YZ	D 5379
	XZ	D 5379
Tõmbedeformatsioon <i>Tensile Strain</i>	X	D3039
	Y	D3039
	Z	D3039
Survedeformatsioon <i>Compressive Strain</i>	X	D 6641
	Y	D 6641
	Z	D 6641
Nihkedeformatsioon <i>Shear Strain</i>	XY	D 5379
	YZ	D 5379
	XZ	D 5379

2.2. Kasutatud mõõteseadmed ning mõõtmisvahendid

Materjali mehaaniliste omaduste määramiseks kasutati ühte katsestendi (Sele 2.2) ning ühte mikromeetrit. Kasutatud vahendite näitajad on välja töötud Tabelis 2.2.

Tabel 2.2. Kasutatud mõõteseadmete andmed

Nimetus	Seeria nr	Liitmääramatus	Tunnistuse nr
Instron 8516			
Jõuandur	2518-165 (UK99)	$u(F) < 0,5\% \cdot F$ ($k = 2$)	E119631
Ekstensiomeeter	102	$u(\varepsilon) < 1\% \cdot \varepsilon$ ($k = 2$)	2640-118
Nihik		0.01mm	ATLL-15/0633



Sele 2.2. Instron 8516

2.3. Materjali tõmbeomaduste määramine

Kõikide materjalidega tehti tõmbekatsed ASTM 3039 [4] järgi v.a. materjalide z -suuna tõmbekatsed. Katsetel tõmbamise kiiruseks oli 2 mm/min. Tõmbekatsete abil määrati ära *Young*-i elastsusmoodul ning mõõdeti ka materjali suhtelist pikenemist. Kõikide materjalide omaduste koondtabel on esitatud Lisas 1.

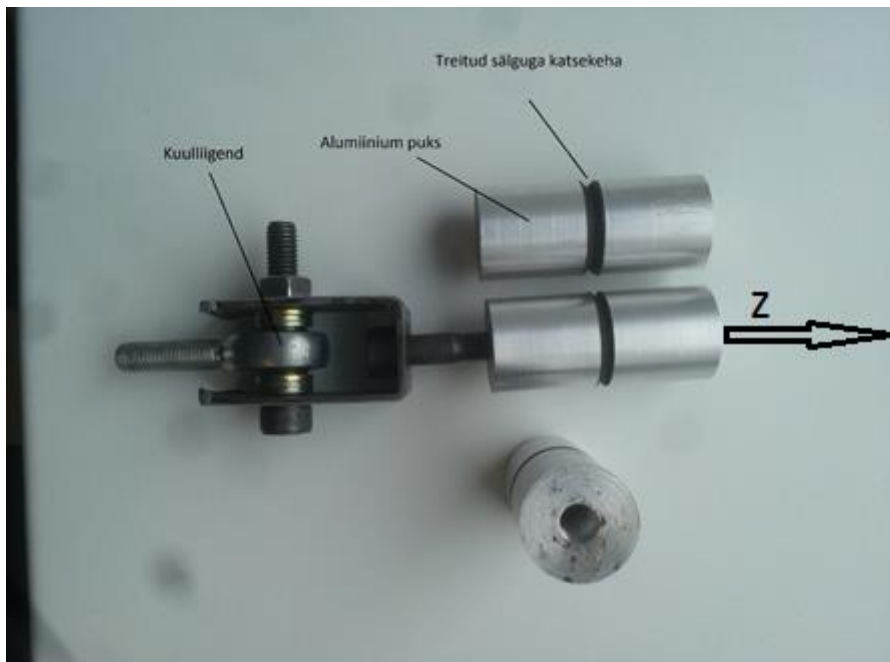
Materjali z -suuna tõmbeomaduste määramiseks kasutati katset, kus 25 mm läbimõõduga silindrilisele materjali tükile liimiti kahele poole alumiiniumist ümarlatid. Liimimiseks kasutati *Loctite* EA9466 epoksiid liimi. Ümarlattide vahel asuvat katsekeha töödeldi treimisega, et läbimõõdu vähendamise tekitada sinna pingekontsentratsioon (Sele 2.3) Alumiinium puksid keermetati M8 keermega ning varustati kuulliigenditega, et vältida vabadusastmete puudumise tõttu pindade lahti murdumist. Treimisel katsetati ka erinevaid keha pöörlemiskiiruseid. Katsekehadest esimesed kolm töödeldi pöörlemiskiirusel $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ning järgnevad neli pöörlemiskiirusel $n = 700 \text{ min}^{-1}$. Katsetuste tulemustes ei täheldatud otsest seost treimise pöörlemiskiiruse ning tõmbetugevuse vahel. Treitud läbimõõdu ahenduste juurest purunes kõige täpsemalt ning stabiilsemalt *twill* materjali katsekehad. Nende puhul toimus purunemine 90 % juhtudest täpselt väikseima ristlõike pindala juures. Seega saab järeldada, et antud materjali mõõtmisandmed on ka kõige täpsemad. Materjalide *biaxial* ja *UD* katsetulemusi nii täpselt ei saa lugeda, kuna purunemised ei toimunud kõige väiksema ristlõike pindala juures. 30 % katsekehadest purunes, kas ülal või allpool väikseimat ristlõiget või materjali *UD* puhul ka diagonaalselt läbi katsekeha. Siit tuleneb ka probleem materjali tõmbetugevuse määramisel, sest purunemise koha täpset ristlõike pindala on raske määrata. Erinevad katsekehade purunemise viisid on välja toodud Selet 2.4. Kõikide tõmbekatsete tulemused on materjalide kaupa ära toodud Tabelis 2.3. Materjali z -suuna tõmbekatsete tulemused arvutati valemi 1 järgi.

$$F^{tu} = \frac{P^{max}}{A} \quad [11], \quad (1)$$

kus F^{tu} = tõmbetugevus, MPa;

P^{max} = maksimaalne jõud enne purunemist, N;

A = ristlõike pindala, mm^2 .



Sele 2.3. Z- suuna katsekeha



1. Twill katsekeha
2. UD katsekeha
3. Biaxial katsekeha

Sele 2.4. Z- suuna katsekehade purunemised

Tabel 2.3. Materjalide tõmbeomadused

Materjali <i>twill</i> tõmbetugevus	X	766 Mpa
	Y	766 MPa
	Z	19 MPa
Materjali <i>UD</i> tõmbetugevus	X	1305,7 MPa
	Y	20,9 MPa
	Z	9 MPa
Materjali <i>biaxial</i> tõmbetugevus	X	758 MPa
	Y	758 MPa
	Z	11,3 MPa

2.4. Materjalide surveomaduste määramine

Materjalide survekatsetused viidi läbi tuginedes ASTM D6641 standardile. Vastavalt sellele määrati survekatse surumise kiiruseks määrati 1 mm/min. [6] Katsed viidi läbi kõigi kolme materjali kohta. Materjalide, mille x ja y suuna omadused on võrdsed, ei viidud läbi eraldi katseid vaid mõlema suuna andmed võeti samast katsest. Materjalide z -telje suunalisi survekatseid läbi ei viidud, sest see oleks osutunud majanduslikult ebaotstarbekaks. Materjalide z -suuna surveandmed võeti välisallikatest [26, 4-39-4-73]. Kuna täpset materjali marki ei leitud, valiti tulemus teiste telje sihiliste surveomaduste järgi. Katsete tulemused ning lisatud surveomadused on esitatud Tabelis 2.4. Kõikide materjalide omaduste koondtabel on esitatud Lisas 1.

Tabel 2.4. Materjalide survetugevused

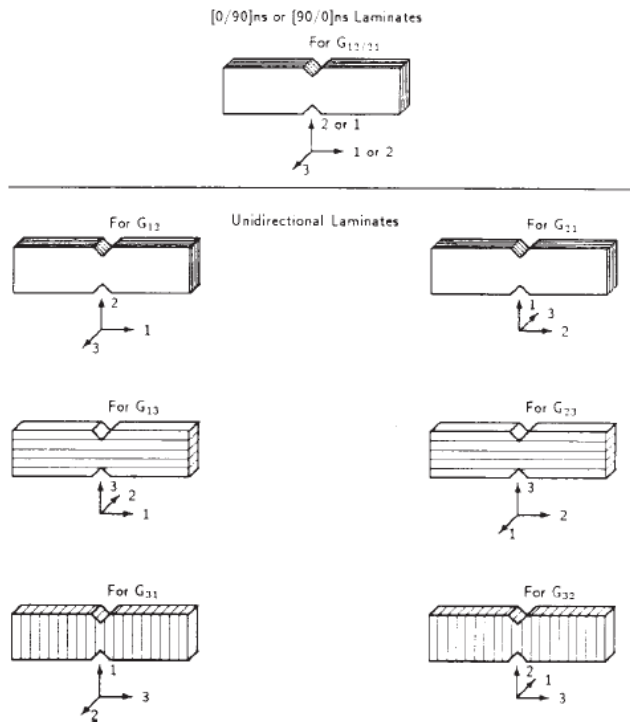
Materjali <i>twill</i> survetugevus	X	307,6 MPa
	Y	307,6 MPa
	Z	97,6 MPa
Materjali <i>UD</i> survetugevus	X	290,6 MPa
	Y	72 MPa
	Z	72 MPa
Materjali <i>biaxial</i> survetugevus	X	344,5 MPa
	Y	344,5 MPa
	Z	92 MPa

2.5. Materjalide nihkeomaduste määramine

Nihkeomaduste määramiseks kasutati ASTM 5379 standardit, kus nihkeomaduste määramine komposiitmaterjalidele käib *Iosipescu* katserakise abil [5]. *Iosipescu* katsetusviis osutus valituks, kuna see näitab kõige täpsemalt puhast nihestamist [17]. Katserakise miinuseks on aga *straini* ehk pikenemise mõõtmine, mida tuleb teha spetsiaalsete pikenemise anduritega. Projekti majanduslike ning ajaliste piirangute tõttu anduritest loobuti. Materjali pikenemise ning nihkeelastusmooduli andmed võeti välisallikatest [26, 4-39–4-73]. Katsetuste tarbeks konstrueeriti vastav katserakis FS Team Tallinn meeskonnaliikme Juhan Viigu poolt (Sele 2.5). Materjalide kõikide nihkeomaduste määramiseks tuli teha ebastandardseid katseid. Selle tingis asjaolu, et *Iosipescu* rakisega testimise jaoks katsekehade tootmine oleks kujunenud tehniliselt vägagi raskeks, kuna lamineeritava katsekeha paksus oleks olnud 76 mm. Samuti oleks sellise katsekeha valmistamine olnud äärmiselt kulukas. Katsekehade lamineerimise telgede suunad on esitatud Selet 2.6. Seetõttu valmistati materjalide *twill* ja *biaxial* yz - ja xz -pinna sihilise nihketugevuse ja materjali UD yz -pinna sihilise nihketugevuse määramiseks tõmbeteimid, millel materjalide servad on omavahel kaetud (Sele 2.7).



Sele 2.5. *Iosipescu* katserakis



Sele 2.6. Nihke katsekehade nihestamise suunad, ülemine – kahesuunaline kangas, alumised – ühesuunaline kangas [5]

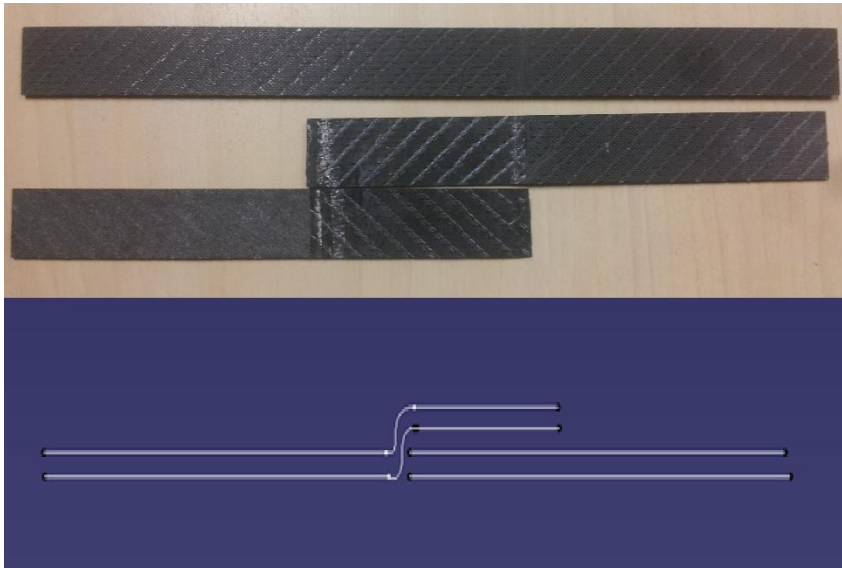
Katsekehade testimisel ning hilisemal tulemuste arvutamisel esines mitmeid probleeme. Nimelt materjalist *twill* tehtud katsekehad purunesid ülekatete nihkumise momendil, tingituna lööklainest, mis tekkis katsekehas pindade üksteisest eraldumisel (Sele 2.8). See muutis raskeks hilisema ülekatte pindala mõõtmise katsekehadel. Samuti oli raske kindlaks määrata, kas katsekeha purunes materjali maksimaalse tõmbetugevuse saavutamise tulemusena või pindade eraldumisel tekkinud lööklaine tulemusel. Sarnase katsemeetodi edasisel kasutamisel tuleks katsekeha lamineerida tunduvalt paksem kui antud juhul sai kasutatud, et ei saavutataks materjali maksimaalset tõmbetugevust enne ülekatte kihtide eraldumist. Soovituslik laminaadi paksus katsekehade lamineerimisel on 1 mm. Katse tulemustest arvutati nihketugevused valemi 2 alusel. Materjalide nihkeomadused on esitatud Tabelis 2.5. Kõikide materjalide omaduste koondtabel on esitatud Lisas 1.

$$F^u = \frac{P^{max}}{S} \quad [5], \quad (2)$$

kus F^u = nihketugevus, MPa;

P^{max} = maksimaalne jõud enne purunemist, N;

S = materjali ülekatte pindala, mm².



Sele 2.7. Ülekattega lamineeritud katsekeha

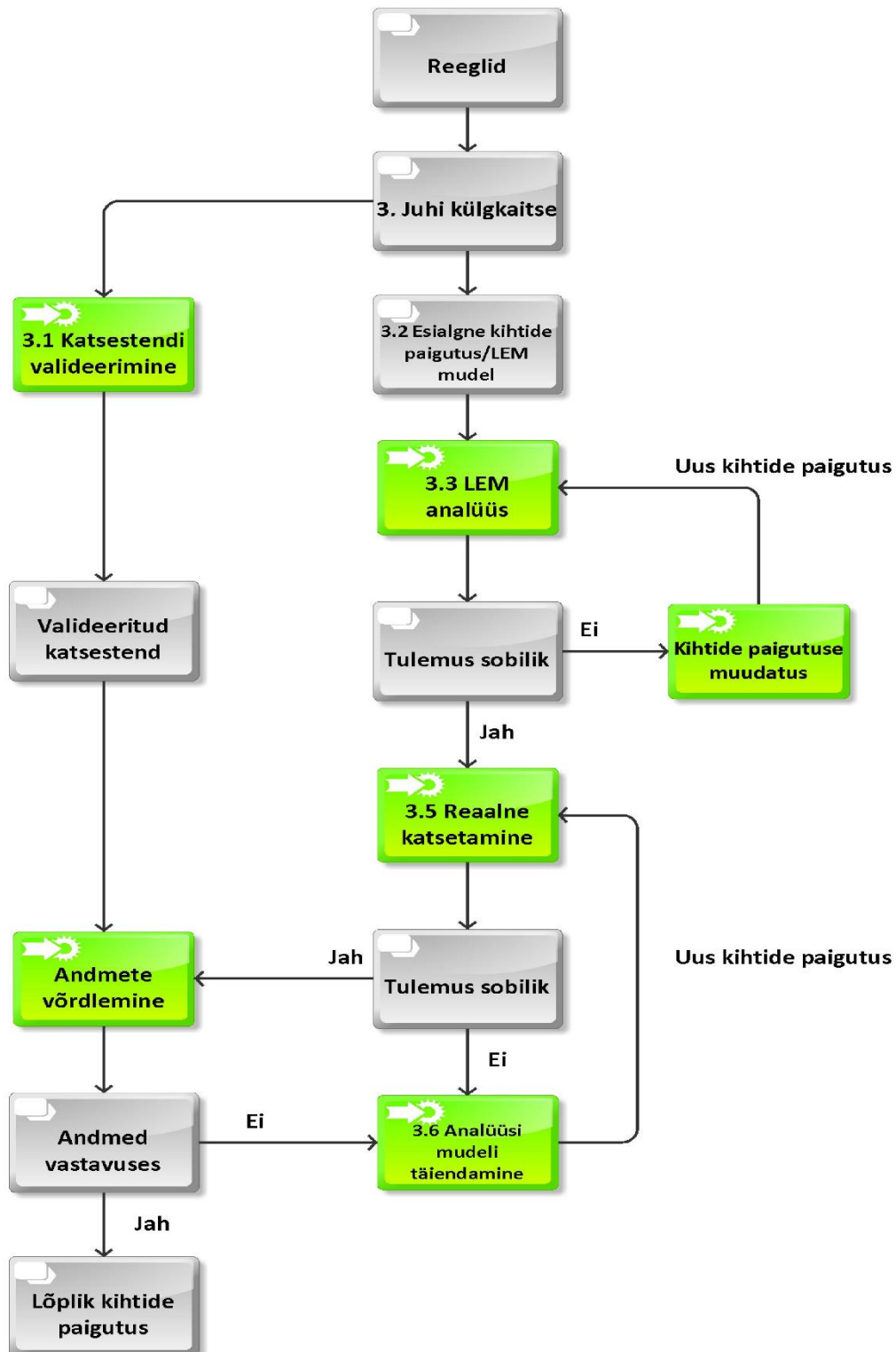


Sele 2.8. Materjali *twill* katsekeha purunemine

Tabel 2.5. Materjalide nihkeomadused

Materjali <i>twill</i> nihketugevus	<i>XY</i>	78,4 MPa
	<i>YZ</i>	7,9 MPa
	<i>XZ</i>	7,9 MPa
Materjali <i>UD</i> nihketugevus	<i>XY</i>	45,9 MPa
	<i>YZ</i>	6,2 MPa
	<i>XZ</i>	45,9 MPa
Materjali <i>biaxial</i> nihketugevus	<i>XY</i>	65,4 MPa
	<i>YZ</i>	7,6 MPa
	<i>XZ</i>	7,6 MPa

3. JUHI KÜLGKAITSE PANEEL



Sele 3.1. Juhi külgakaitse paneeli projekteerimise skeem

Juhi külgakaitse paneeli projekteerimise protsessi ülesehitus on illustreeritud Selel 3.1. Tulenevalt Formula SAE reeglitest on auto keres asuva juhi külgakaitse osa vaja eraldi testida ning reeglitele vastavalt valideerida. Reeglid näevad ette, et juhi külgakaitse osa asub keres esimese ning tagumise turvakaare vahelisel alal ning on maapinnast kuni 350 mm kõrgusel. Juhi külgakaitse paneeli tugevuse tõestamiseks tuleb konstrueerida süsinikkomposiidist paneel mõõtmetega 500 mm*275 mm. Paneeli tugevus tõestatakse kolme punkti painde testiga, kus paneel asetatakse tugedele, millede vahe on vähemalt 500 mm ning surutakse keskelt silindrilise kehaga, mille raadius on 50 mm. Katse tulemustena mõõdetakse jõudu (N), paneeli läbipainet (mm) ning paneeli deformeerumisel neeldunud energiat (J). Kuna võidusõidu autode raamide tugevusarvutused baseeruvad toruraamid, siis on vajalik katserakise valideerimine [9, Reegel T3.31.2]. Selle jaoks viidi sarnaselt eelnevalt kirjeldatud katsele läbi kolmepunkti painde katse, kus katsekehaks on kaks toruraami külgakaitse osas kasutatavat metalltoru. Võrreldi samuti eelnevalt nimetatud näitajaid. Katsetuste tõestamiseks on SES keskkonnas eraldi lehekülg (Sele 3.1). Lisaks tuli laminaadiga läbi viia ka nihketugevuse katse, seega pidi laminaadi koostamisel silmas pidama nihketugevuse säilimist. Laminaadi nihketugevuse määramiseks kasutatakse katset, kus laminaat asetatakse plaadile, millel on 32 mm läbimõõduga ava ning laminaati surutakse 25 mm läbimõõduga ümarlatiga [9, Reegel T3.31.5].

Laminaadi ülesehituseks kasutati pealmiste pindade loomiseks *twill*, klaasriide, *UD* ja *biaxial* materjale. Laminaadi sisu materjaliks kasutati Airex C70 80 vahtu.

Figure 2: Load Deflection Curve

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region.
Gradient must be \geq that of two baseline steel tubes

x_1 (mm)	1	y_1 (N)	1000	Gradient (N/mm)	1900
x_2 (mm)	8,5	y_2 (N)	12000		

Enter value for force at panel failure or maximum tested force.
 Y_{max} (N) 12650 (\geq bending strength of two baseline side impact tubes)

Enter value of absorbed energy, must be \geq that of two baseline tubes
Energy (J) 56

Enter details of test setup, panel core and skin thicknesses below

I (mm)	500	Panel Support Span
h (mm)	275	Panel Height (should be 275mm, alternative sizes must be agreed in advance)
b (mm)	25	Core Thickness (from T3.25/T3.34 Side Impact Structure tab)
t_1 (mm)	0,7	Inner Skin Thickness (from T3.25/T3.34 Side Impact Structure tab)
t_2 (mm)	0,7	Outer Skin Thickness (from T3.25/T3.34 Side Impact Structure tab)
I (mm ⁴)	63588	Second moment of area
E (GPa)	77,8	Skin modulus of elasticity
σ_{UTS} (MPa)	328	UTS of skins

Figure 4: Load Deflection Curve - Steel Tube(s)

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region

x_1 (mm)	1	y_1 (N)	2000	Gradient (N/mm)	1667
x_2 (mm)	7	y_2 (N)	12000		

Enter value of absorbed energy upto 12.7mm of deflection
Energy (J) 123,79

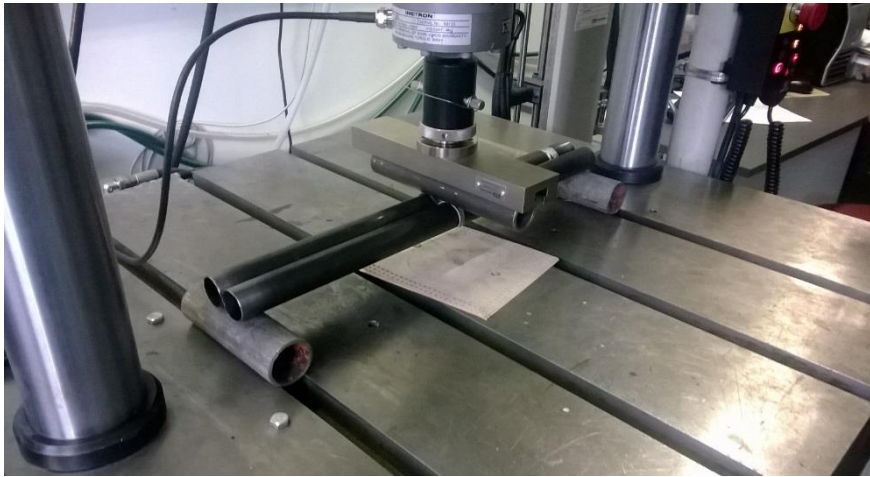
Enter details of tube(s) tested

I (mm)	500	Tube Support Span	Theoretical EI (N.mm ²)	5,47E+09
n	2	Number of Tubes	Tested EI (N.mm ²)	4,34E+09
D_o (mm)	30	Tube Outer Diameter	Rig Compliance (N/mm)	434
D_i (mm)	27	Tube Inner Diameter		

Sele 3.1. SES keskkonnas asuv külgakaitse paneeli tõestamine [11]

3.1. Külgkaitsepaneeli katserakise valideerimise katse

Formula SAE reeglistiku järgi tuleb külgkaitsepaneeli katserakis valideerida metalltorude kolmpunkti painde katsetusega. Reeglite kohaselt peab külgkaitse paneel omama samasuguseid nõtkemooduli, voolavuspiiri, tõmbetugevuse ja neeldunud energia näitajaid, mis on kahel toruraami baastorul [9, Reegel T3.31.1]. Neeldunud energiat mõõdetakse kuni toru paindeni 12.7 mm. Katse valideerimiseks valiti kaks toru järgmiste mõõtudega: välisdiameeter $D1 = 30$ mm ja sisediameeter $D2 = 27$ mm. Torud on valmistatud kõrge voolepiiriga 25CrMo4 terasest. Torud liideti omavahel otstest punktkeevituse abil ning teostati kolme punkti painde katse. SES keskkonna jaoks vajalikud katseandmed on esitatud Tabelis 3.1. Katserakis on esitatud 3.2.



Sele 3.2. Toru painde katserakis

Tabel 3.1. SES keskkonna jaoks vajalikud toru katse andmed

Läbipaine mm	Jõud N	Neeldunud energia J
1	2000	123,79
7	13000	

3.2. LEM mudel

Kere konstrueerimiseks vajaliku külgkaitse paneeli projekteerimine algab LEM mudeliga. Mudeli loomiseks kasutati Ansys ACP PrePost keskkonda. LEM mudeli abiga määratakse läbipainde ning materjali koormatuse piiri abil esialgsed materjalikihid ning orientatsioon. Materjali koormamist hinnatakse Tsai Wu tugevuskriteeriumi järgi [15].

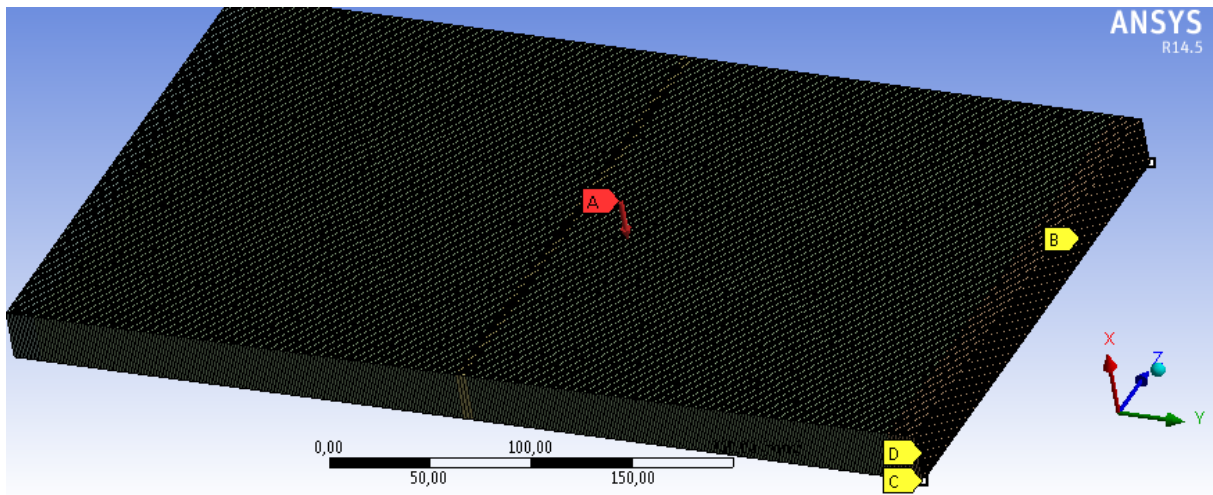
Tsai Wu kriteeriumi kasutatakse 2D ortotroopsete materjalide tugevuse hindamiseks. Erinevalt Tsai Hill kriteeriumist arvestab Tsai Wu tugevusvaru arvutamisel nii surve- kui ka tõmbepingeid. Tsai Wu kriteerium võimaldab ennustada materjali purunemist kihtide kaupa. Selline moodus on täpsem kui terve laminaadi vaatlemine ühtse struktuurina. [15]

LEM mudeli loomisel üritati lähtuda maksimaalselt reaalsest katsemudelist. Mudeli loomisel oli oluline keskmise surutava toetuspinna määramine. Kuna suruvaks objektiks on ümar keha raadiusega 50 mm, siis paneeli läbi paindumisel keha kokkupuute pindala paneeliga suureneb. LEM analüüsi tegemisel võeti aluseks kindla suurusega toetuspind.

Külgkaitse paneeli mudeli rajatingimused olid järgmised:

- pinnale A, mille laius on 10mm rakendati jõud 12 kN,
- otsmistel pindadel (B) piirati liikumine x -telje sihis,
- punktist C ning samal küljel olevast teisest nurga punktist piirati liikumine y -telje sihis,
- punktist D piirati liikumine z -telje sihis.

Paneeli simuleerimisel kasutatud elementide arv oli 72400, minimaalne elemendi serva pikkus 4 mm, elemendi tüübina kasutati nelinurkset elementi. Rajatingimused ning elementide võrgustik on illustreeritud Seel 3.3.



Sele 3.3. Külgakaitse paneeli võrgustik ja rajatingimused

Paneeli kihtide koostamise kontseptsioon on järgmine: pinnakattekihid, täitematerjal, pinnakattekihid. Laminaadi kihtide asetuse valimisel tuli lähtuda kahest asjaolust. Esiteks peab laminaat olema tugev kolme punkti painde katses ning teiseks omama nihketugevust vähemalt 7,5kN [9, Reegel T3.34.4]. Kihtide jaotamisel tuli arvestada materjalide eraldiseisvaid omadusi. Pindmisteks kihtideks on kõige otstarbekam kasutada põimitud materjale, kuna need omavad tunduvalt suuremat nihketugevust ühesuunaliste materjalidega võrreldes. Seda iseloomustavad väga hästi töös eespool kirjeldatud materjalikatsetused, kus on selgelt näha, et materjal *twill* omab kõige suuremat nihketugevust – 78,4 MPa, kui materjalil *UD* on see 45,92 MPa. Materjal *biaxial* omab materjalile *twill* ligilähedast nihketugevust – 65,4 MPa, kuid see ei ole pinnakihi jaoks sobilik. Sobimatuse tingib asjaolu, et põimitud materjalide löögisitkus on suurem kui põimimata kangastel [22]. Seega on pinnakihi kõige sobivamaks materjaliks *twill*.

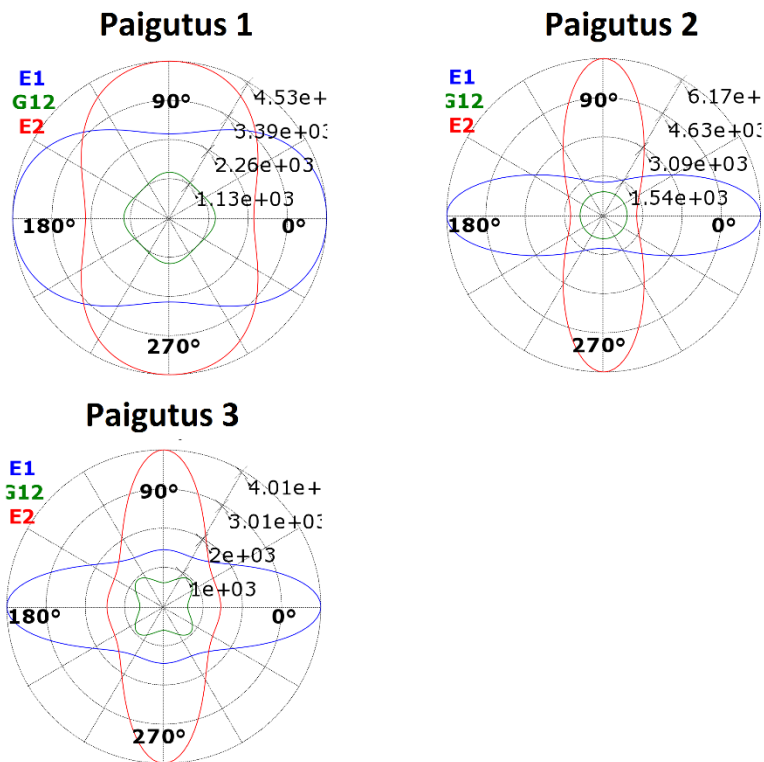
Pinnakattekihi keskmiseks kihiks sobib kõige paremini materjal *UD*, sest materjali tõmbetugevus on teistest 40 % suurem. Kuna materjal omab kiudusid ainult ühes sihis on, paneeli massi arvestades, tegemist vägagi otstarbekama materjaliga. Kui kiud on ainult ühes suunas, siis puudub lisamass paneeli koormamisel mitte töötavate kiudude kujul. Laminaadi nihketugevuse säilimiseks ei saa ainult ühesuunalist kangast kasutada. Et säilitada nihketugevust, on soovitatav ühesuunalise kanga kihtide vahele asetada kas põimitud või kahesuunalist kangast [7]. Pinnakihti ja sisu materjalide ülemineku kihtide valimisel tuleb arvestada asjaoluga, et materjalide tõmbeelastsusmoodulite vahe oleks võimalikult väike. Antud projektis kasutatavate süsinikmaterjalide tõmbe-elastsusmoodul jääb vahemikku 48-125 GPa, kuigi täitematerjali Airex C 70.80 elastsusmoodul on kõigest 0,066 GPa [1].

Niivõrd suur tõmbe-elastsusmoodulite erinevus tekitab koormamisel olukorra, kus telje sihis siirete erinevuse tagajärjel sitkem materjal (süsinikkiud) delamineerub täitematerjali küljest. Seda erinevust vähendab epoksiidvaik omades tõmbeelastsusmoodulit 3,61 GPa [23]. Süsinikmaterjalidest kõige sobivam täitematerjaliga kontaktiks on materjal *twill* omades elastsusmoodulit 48,78 GPa. Vaatamata sellele on epoksiidvaigu ja materjali *twill* elastsusmoodulite vahe endiselt vägagi suur, ligikaudu 13,5 korda. Selle vahe vähendamiseks ning elastsusmoodulite sujuvamaks üleminekuks saaks kasutada pinnakihtide ning täitematerjali vahel põimitud klaaskiud materjali, mille tõmbeelastsusmoodul on 35 GPa [26, 4-89-4-99]. Paneeli täitematerjali paksus valiti mitmete eelnevate analüüside tulemusena optimaalseim –25 mm. Sellest lähtuvalt koostati erinevad kihtide jaotused, mis on välja toodud Tabelis 3.2.

Tabel 3.2. Külgakaitse paneeli kihtide erinevad jaotused

Jrk nr	Paigutus 1		Paigutus 2		Paigutus 3	
	Materjal	Kiudude suund (deg)	Materjal	Kiudude suund (deg)	Materjal	Kiudude suund (deg)
3	Twil	0/90	Twil	45/45	Twil	0/90
4	UD	0	UD	0	UD	0
5	Biaxial	45/45	UD	0	Twil	45/45
6	Twil	45/45	Twil	45/45	Vaht 25mm	
7	Klaasriie	0/90	Klaasriie	45/45	Twil	45/45
	Vaht 25mm		Vaht 25mm		UD	0
8	Klaasriie	0/90	Twil	45/45	Twil	0/90
9	Twil	45/45	UD	0		
10	Biaxial	45/45	UD	0		
11	UD	0	Twil	45/45		
12	Twil	0/90				

Materjalide kihtide paigutust simuleeriti ning analüüsi vastavalt nihke- ja tõmbeelastusmoodulitele Ansys ACP Pre keskkonnas. Paigutuste analüüsi graafikud on esitatud Selet 3.4. Paigutusi iseloomustavateks näitajateks on elastsusmoodul x -telje suunal $E1$, y -telje suunal $E2$ ning nihkeelastusmoodul xy -telje suunal $G12$. Välja arutati paigutuste kohta erinevad tugevusnäitajad, mis on esitletud Tabelis 3.3.



Sele 3.4. Erinevate materjali paigutuste polaargraafikud

Tabel 3.3. Erinevate kihtide paigutuste tugevusnäitajad

Näitaja	Paigutus 1	Paigutus 2	Paigutus 3
Laminaadi paindesitkus E1	12660 MPa	17040 MPa	11285 MPa
Laminaadi paindesitkus E2	6617 MPa	3453 MPa	3992 MPa
Laminaadi nihketugevus G12	1319 MPa	924 MPa	609 MPa
Laminaadi tõmbetugevus E1	4525 MPa	6173 MPa	4009 MPa
Laminaadi tõmbetugevus E2	2426 MPa	1298 MPa	1452 MPa

Paigutuste polaargraafikutelt on näha, et paigutus 1, kus 45° all olevaid kangaid on võrdselt 0° all olevate kangastega, on erinevatele tõmbe suundadele ühtlasema jaotusega ning ei oma väga suuri tõmbetugevuse langusi kui jõu suund peaks muutuma. Paigutuse 1 nihkeomadused jagunevad ruudukujuliselt, omades tugevamaid näitajaid 0° ja 180°, 90° ja 360° suundades.

Paigutuse 2 polaargraafikult on näha, et tõmbetugevus on kontsentreeritud kõige rohkem suundadele 0° ja 180°, 90° ja 360°. Vahepealsed suunad on märgatavalt nõrgemad ning võrreldes paigutusega 1 on 45° jõudude suhtes oluliselt nõrgemad. Nihkegraafik G12 on seevastu ühtlane kõikides suundades.

Paigutuse 3 polaargraafikul on sarnaselt paigutusele 2 põhilised tõmbetugevuse suunad 0° ja 180° , 90° ja 360° , kuid erinevalt eelnevast paigutusest on suurem vastupidavus 45° koormuste suhtes. Nihkegraafikult G12 saab välja lugeda, et nihke tugevamad suunad on 45° , 135° , 225° ja 315° .

Laminaadi kihtide paigutuste tugevusandmete Tabeli 3.3 väärtusi analüüsidest saab järeldada, et kuigi paigutuse 2 tõmbetugevus E1 ning paindesitkus E1 on kolmest suurim, jääb paigutusel 2 puudu nihketugevusest G12. Paigutus 1 ja 2 tõmbetugevuse ja paindesitkuse näitajad E1 on vägagi väiksed võrreldes paigutuste kihtide arvuga. Nihketugevuselt on paigutus 1 u 50% tugevam kui paigutus 3 ning tõmbetugevuselt ja paindesitkuselt u 30% tugevam.

Sele 3.4 graafikuid ning tabelit analüüsidest võib järeldada, et kõige sobivamaks laminaadi kihtide paigutuseks on paigutus 1, kuid kuna tegemist on võistlusspordi auto projekteerimisega siis on paneeli mass väga oluline näitaja. Paneelide erinevate kihtide paigutuste massid on välja toodud Tabelis 3.4. Paneeli massi arvutamisel ei ole arvestatud vaigust lisanduvad massi.

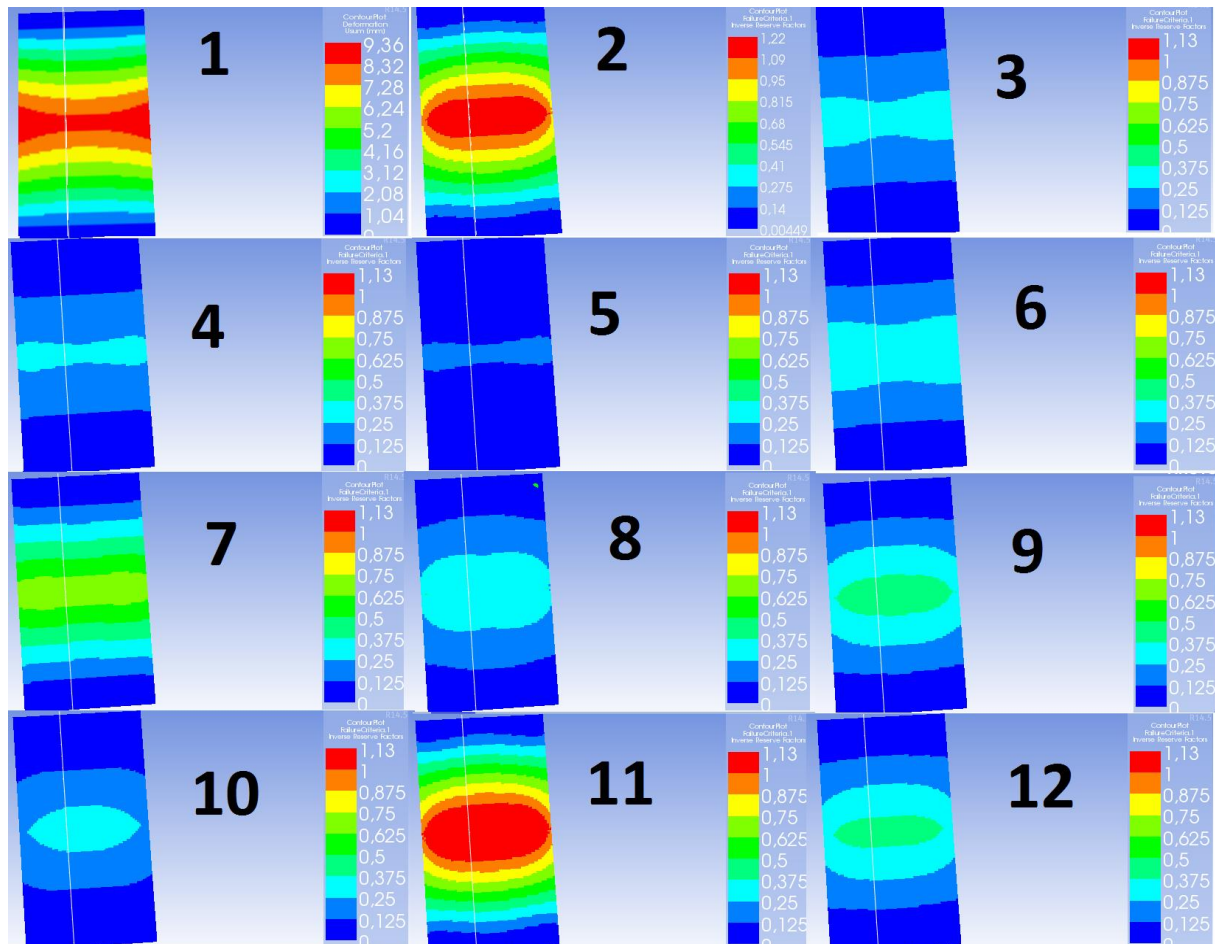
Tabel 3.4 Laminaadi kihtide paigutuste masside võrdlus

Paigutus 1	Paigutus 2	Paigutus 3
302,77g	275,27g	192,77g

Tabelist 3.4 on selgelt näha, et paigutus 3 on paigutus 2- st 30% kergem ning paigutus 1-st 37% kergem. Kihtide lõpliku paigutuse ning selle sobivuse saab määrata alles LEM analüüsi läbipainde ning koormatuse tulemuste järgi.

3.3. LEM analüüsi tulemused

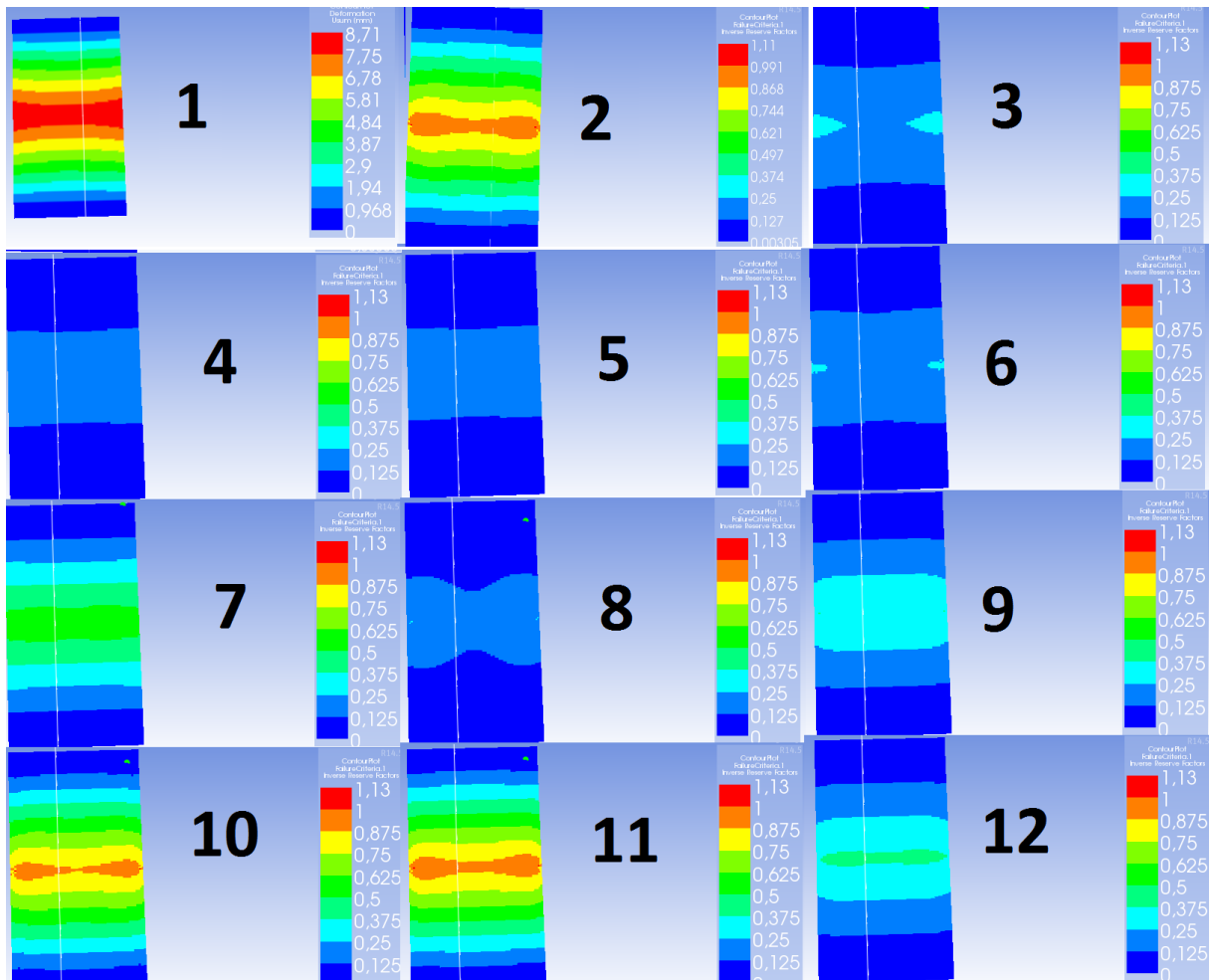
LEM analüüsiga hinnati süsinikkomposiit paneeli läbipainet ning koormamist Tsai Wu kriteeriumi abil. Tsai Wu kriteeriumi hinnatakse kogusummana ning kihtide kaupa eraldi. Esmalt vaatleme laminaati kihtide paigutusega 1. Seel 3.5 on näha paigutus 1 deformatsioon ning koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi.



Sele 3.5, Laminaadi paigutus 1 deformatsioon ning koormamine, kihtide paigutus Tabeli 3.2 järjekorra numbri järgi

Seel 3.5. on näha terve paneeli deformatsioon pildil 1, mis on 9.36 mm. Pildil nr 2 on näha kogu paneeli koormatus Tsai Wu kriteeriumi järgi, mille maksimum on 1.22. Pildid 3-12 on erinevate kihtide koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi. Kihtide lõikes on näha, tõmbele töötava poole (3-7) kihid on vähe koormatud, kuni 0.6, ning seega omavad pea kahekordset tugevusvaru. Paneeli surve poolsetel kihtidel on näha, et kõige suuremat koormust võtab vastu kiht nr 11 ehk materjali UD kiht. Tsai Wu kriteeriumi järgi koormus 1.13, mis tähendab juba

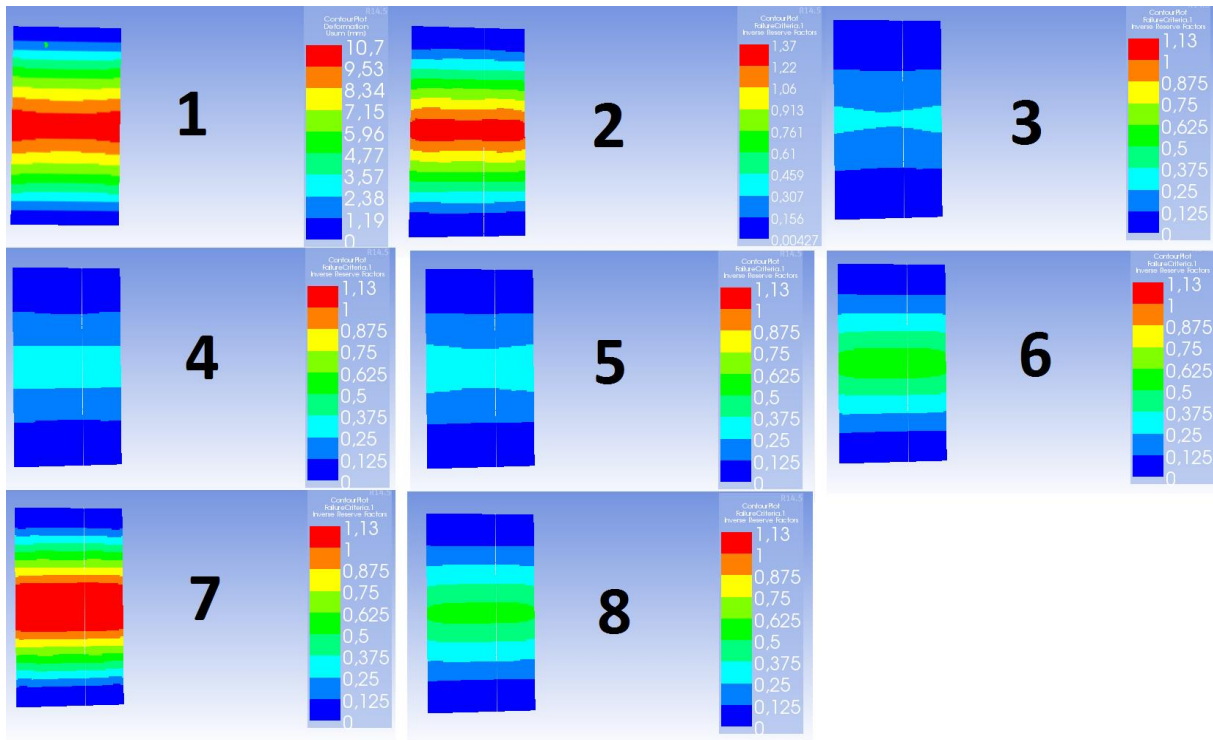
materjali purunemist. Seega antud laminaadi puhul on 10 kN jõu ning 9,36 mm läbipainde juures juba tegemist kihtide purunemisega.



Sele 3.6. Laminaadi paigutus 2 deformatsioon ning koormamine, kihtide paigutus Tabel 3.2 järjekorra numbri järgi

Selel 3.6 on kujutatud laminaadi paigutus 2 järgi paneeli deformatsioon, üldine koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi ning koormamine kihtide kaupa. Paigutus 2 korral on paneeli deformatsioon 8.71 mm, mis on 0.65 mm võrra väiksem kui paigutus 1 puhul. Samuti on paneeli üldine koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi väiksem 0.3 võrra, jäädes alla kriitilise 1 piiri maksimaalse väärtusega 0.92. Kihtide järgses koormamises on näha taaskord, et tõmbele töötavad kihid (3-7) ei ole suurelt koormatud omades väärtust 0.1-0.6. Maksimaalne väärtus 0.6 esineb klaasriide kihil, mis asetseb täpselt enne vahukihti. See võib tuleneda materjali äärmiselt õhukesest kihist, kõigest 0.1 mm, ning asjaolust, et materjal asetseb kahe väga suure tõmbeelastusmooduli vahega kehade vahel. Survele töötavatest kihtidest on sellelgi paigutusel koormatud kõige rohkem ühesuunaline materjal UD. Materjali UD suur

koormamine tuleneb sellest, et materjali *UD* tõmbeelastsusmoodul on umbes 40 % suurem kui teisel laminaadi materjalidel. Suure tõmbeelastsusmooduli tõttu võtab kangas ka koormused kõige esimesena vastu. Antud paigutuse puhul jääb Tsai Wu kriteeriumi koormamise väärtus siiski alla kriitilise 1, nii et kihtide purunemist ei toimu. Seega võib järeldada, et laminaat saavutaks suurema deformatsiooni kui tehtud simulatsioonis, ilma kihtide purunemiseta.



Sele 3.7. Laminaadi paigutus 3 deformatsioon ja koormamine, kihtide paigutus Tabel 3.2 järjekorra numbri järgi

Selel 3.7. on näidatud, sarnaselt eelmiste paigutustega, paneeli läbipaine kihtide paigutus 3 korral, üldine koormamine ning kihtide kaupa koormamine. Paneeli maksimaalne läbipaine on 10.7 mm, mis on 13 % suurem kui paigutus 1 ning 19 % suurem kui paigutus 2 paneelil. Kuna antud paigutusel ei ole klaasriide kihte süsinikkiud laminaadi ning vahust täitematerjali vahel on vahu vastu olev kiht (6) survele rohkem koormatud kui teiste paigutuste korral. Kõige rohkem koormust võtab vastu kiht 7, ehk materjal *UD*, mille koormus on viidud üle purunemise piiri. Eeldatavasti sellise jõu juures juba paneel puruneb, kuna ühe kihi purunemisest tekkiv lööklaine tekitab teistes kihtides pingete tõusu üle kriitilise piiri.

3.4. Kihtide paigutuse valik

Paneeli kihtide paigutuse valikul lähtuti kolmest näitajast. Paneeli läbipaine, kihiline koormamine ning mass. SES keskkond vajab paneeli valideerimiseks läbipainde alguspunkti ning lõpp-punkti enne paneeli purunemist, maksimaalset katsetatud jõudu ja neeldunud energiat. Esimesed kaks näitajat on võimalik simuleerida ANSYS ACP keskkonnas. Neeldunud energiat ei ole võimalik antud süsteemis simuleerida. Järelikult tuleb paneeli esialgne kihtide paigutus valida vastavalt läbipainde punktidele ning paneeli purunemisele. Kõigi kolme paneeli kihtide paigutuse variandi simulatsioonide andmed sisestati SES keskkonnas valideerimaks nende sobivust reeglite järgi kehtestatud kahe külgkaitse metalltoru katsega. Et saada vajalikud läbipainde graafiku punktid, simuleeriti kõikide paigutuste läbipainded jõududega 1000 N ning 12000 N. Kolmanda paigutuse simulatsiooni tulemused SES keskkonda sisestatuna on esitatud Selet 3.8 [11].

Figure 2: Load Deflection Curve

Enter values for minimum and maximum load/deflection in linear-elastic region.
Gradient must be \geq that of two baseline steel tubes

x_1 (mm)	0,89	y_1 (N)	1000	Gradient (N/mm)	1555
x_2 (mm)	10,7	y_2 (N)	12000		

Enter value for force at panel failure or maximum tested force.
 y_{max} (N) 12000 (\geq bending strength of two baseline side impact tubes)

Enter value of absorbed energy, must be \geq that of two baseline tubes
Energy (J)

Enter details of test setup, panel core and skin thicknesses below

l (mm)	500	Panel Support Span
h (mm)	275	Panel Height (should be 275mm, alternative sizes must be agreed in advance)
b (mm)	25	Core Thickness (from T3.25/T3.34 Side Impact Structure tab)
t_1 (mm)	1,25	Inner Skin Thickness (from T3.25/T3.34 Side Impact Structure tab)
t_2 (mm)	1,25	Outer Skin Thickness (from T3.25/T3.34 Side Impact Structure tab)
I (mm ⁴)	118522	Second moment of area
E (GPa)	34,2	Skin modulus of elasticity
σ_{UTS} (MPa)	174	UTS of skins

Sele 3.8. Paigutus 3 paneeli simulatsiooni andmed SES keskkonnas [11]

Selet 3.8 on paneeli kihtide paigutus 3 simuleeritud tugevusnäitajad vastavuses reeglitega ette nähtud kriteeriumitele. Kuna paigutused 1 ja 2 on 12 kN juurest paremate tugevusnäitajatega, siis ei ole neid töös eraldi välja toodud. Arvestades keskmiselt 33.5 % suurust massi säästu paigutus 3 juures võrreldes teiste kihtide paigutustega ning tugevusnäitajate sobivust SES keskkonnas, valmistati füüsiline katsekeha kihtide paigutusega 3.

3.5. Paneeli reaalsed katsetused

Kolme punkti painde katsekeha valmistamise tehnoloogiaks valiti infusioonimise meetod. Paneel valmistati ühe infusioonimise tõmbega, et säästa kulumaterjale. Infusioonimisel kasutati vaigu ja õhu liikumise abistamiseks VAP membraani (Sele 3.9).

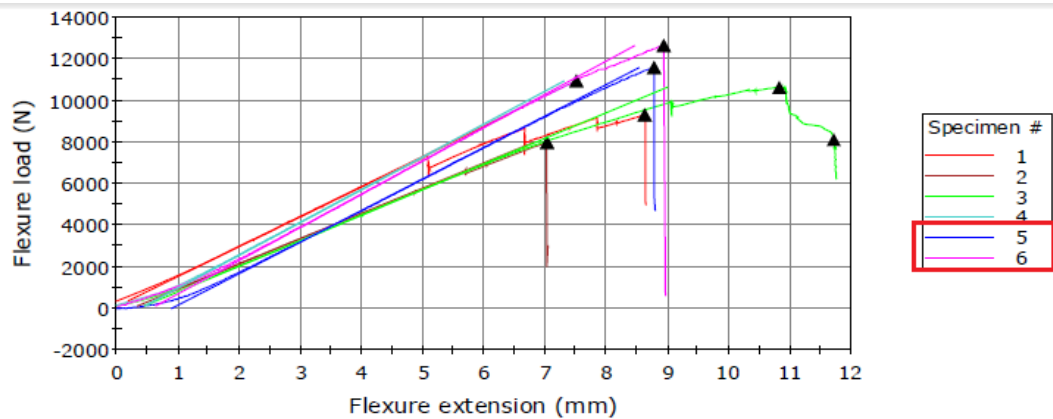


Sele 3.9. Paneeli katsekehad VAP membraaniga enne infusioonimist

Paneeli katsekehad purustati kolme punkti painde katses. Katsete läbiviimiseks kasutati stendi Instron 8802. Katserakis on kujutatud Seel 3.10. Katsete tulemused ning graafik on esitatud Seel 3.11.



Sele 3.10. Kolme punkti painde katsestend



	Specimen label	Flexure load at max (kN)	Flexure extension at Break (mm)	Modulus (Automatic) (GPa)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	1	9,31	8,62	7,96	26,2	275,0
2	2	7,99	7,03	6,72	26,2	275,0
3	3	10,65	11,71	6,81	26,2	275,0
4	4	10,96	7,51	8,73	26,2	275,0
5	4	11,59	8,78	8,38	26,2	275,0
6	5	12,65	8,93	8,84	26,2	275,0

	Specimen note 1	Energy at Break (Standard) (J)	Energy at Tensile Strength (J)
1	Jõuandur 100kN	48,52	48,52
2		27,91	27,91
3		72,04	63,93
4		40,14	40,14
5	Jõuanduri vahetus 250kN	47,14	47,14
6		55,98	55,98

Sele 3.11. Kihtide paigutus 3 katse graafik ja tulemused, punasega märgitud paigutus 3 katsekehad

3.6. Järeldused ning LEM mudeli täiendamine

Paigutuse 3 LEM mudeli analüüsi ning reaalse kolme punkti painde katse läbipainde tulemused erinevad 12 kN juures u 20 %. Ühe põhjusena, miks LEM mudeliga analüüsitud paneel on suurema läbipaindega kui reaalne katsetus, on reaalse paneeli külgedel asuv laminaadi ülekate, mis liidab kaks laminaadi poolt. Sealhulgas muudab vertikaalne laminaadi osa paneeli küljel, seda paindele jäigemaks. Selleks, et simulatsiooni erinevust reaalse katsega vähendada, tuleb LEM mudel muuta võimalikult sarnaseks reaalse katsekehaga.

Katse andmetest on veel näha, et paneeli energianeelduvus ei ole võistlussarja reeglite kohaselt piisav. Paneel peab neelama sama palju või rohkem energiat kui kahe külgkaitse metalltoru kolme punkti paindes. Torude katse tulemusena saadud energia neeldumine oli

123 J. Antud katse parima laminaadi energianeelduvus oli 55.98 J. Järelikult on paneeli energianeelduvus umbes 2,2 korda väiksem kui vajalik. Paneeli kihtide paigutust tuleb muuta ning vajadusel lisada materjali kihte.

LEM mudeli täiendamiseks tuleb tekitada pealmise laminaadiga ülekate, mis ühendab alumise ning pealmise laminaadi kihi ning lisab vertikaalse tugevdusserva. Mudeli muud rajatingimused jäävad samaks. LEM mudeli muudatused lõikes on esitatud Seel 3.12.



Sele 3.12. LEM mudeli kihtide paigutus enne (ülemine) ja pärast (alumine)

Võrdluseks reaalse katse tulemustega on valitud LEM mudeli simuleerimiseks kolm graafiku punkti valideerimaks LEM mudelit edaspidisteks arvutuseks. LEM mudelile rakendatavad kolm jõudu on 4 kN, 8 kN ja 11 kN. Täiendatud LEM mudeli analüüsi tulemused võrrelduna reaalse katse tulemustega on esitatud Tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Reaalse katse ja LEM analüüsi võrdlus

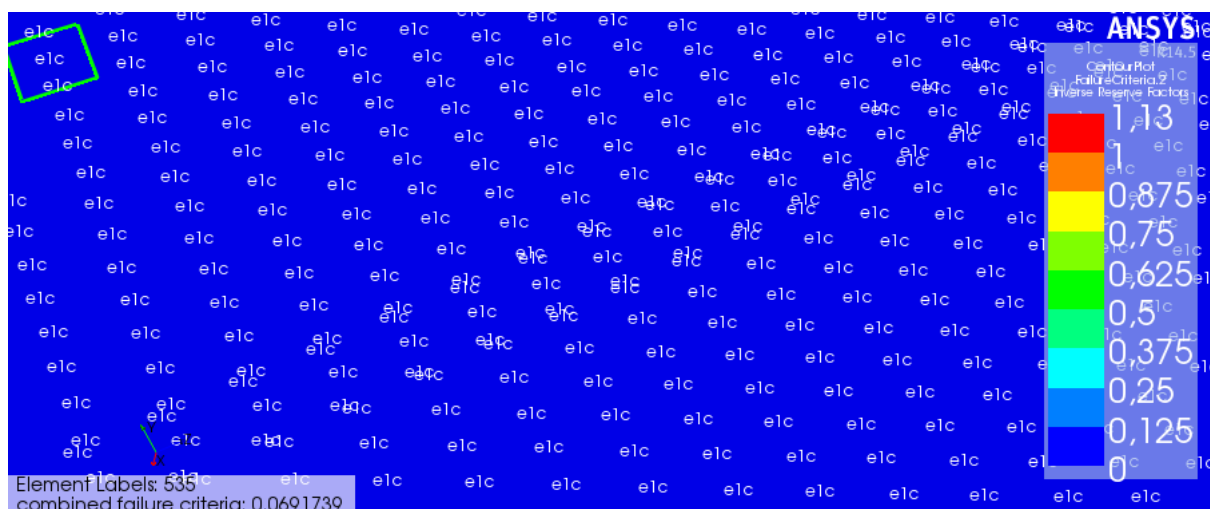
Katsetatud jõud N	Reaalse katse läbipaine mm	LEM simulatsiooni läbipaine mm	Protsentuaalne vahe
4000	3	2.9	3.4 %
8000	5.5	5.7	3.5 %
11000	7.5	7.9	5.3 %
Keskmine:			4.1 %

3.7. Reaalse katsekeha täiendamine

Kuna Ansys ACP PrePost keskkonnas ei ole võimalik simuleerida paneeli energia neelduvust, tuleb paneeli kihtide paigutuse aluseks võtta kahe külgkaitse metalltoru katse graafik ning läbipained kindlate jõuväärtuste juures. Kuna neeldunud energia võrdub pinge ja pikenemise graafiku pindala integraaliga on paneeli disainimisel kolm varianti. Paneelil on suure jõu korral väike läbipaine, väikse jõu korral suur läbipaine või kolmanda variandina nende kahe keskmine. Esimeseks simulatsiooni katsetuseks koostati paneel kihtide paigutusega 4 (Tabel 3.6) ning simuleeriti jõududega vastavalt kahe toru paindegraafikule. Materjalide kihtide paigutuse määramisel võeti arvesse eelnevaid simulatsioone. Nendest on näha, et survele töötav külg on umbes kaks korda rohkem koormatud Tsai Wu kriteeriumi järgi kui tõmbele töötav külg. Seda, kas materjali kiht töötab survele või tõmbele, määrati *max strain fibre failure e1* kriteeriumi järgi, e1c tähistab survele töötavad kihti (Sele 3.13), e1t tõmbele töötavat kihti.

Tabel 3.6. Paneeli kihtide paigutus 4

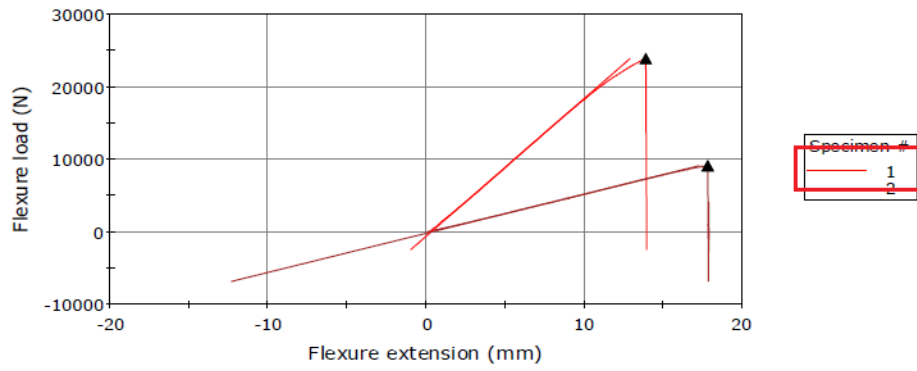
Jrk nr	Kihi nimetus	Materjali suund kraadides
1	Twill	0°
2	UD	0°
3	UD	0°
4	Twill	45°
5	Vaht	0°
6	Twill	45°
7	UD	0°
8	Twill	0°
9	Twill	0°



Sele 3.13. Survele töötav *UD* kiht

Paneeli kihtide paigutusega 4 koormamisel Ansys ACP keskkonnas jõuga 12 kN tekkis läbipaine 7.66 mm. Võrdlusena kahe toru painde katsega, kus 12 kN juures oli läbipaindeks 7 mm, on erinevus 0.66 mm ehk 9.5 %. Maksimaalne kihtide koormamine toimus survele töötaval laminaadil. Peamised koormusi võtsid vastu kihid nr 2 ja 3 omades keskmist Tsai Wu kriteeriumi 0.37, mis tähendab, et paneelil on veel rohkem kui kahekordne tugevusvaru. Järelikult saab paneelile rakendada suuremat jõudu kui 12 kN enne purunemist ning selle tulemusena suureneb ka paneeli läbipaine. Nende faktorite tulemuseks on suurem energia neelduvus. Selliseid näitajaid võib pidada rahuldavaks, et valmistada reaalne katsekeha kihtide paigutusega 4 ning teostada sellel 3 punkti painde katsetus.

Laminaadi katsetuse tulemused on esitatud Seel 3.14. Tulemustest saab välja lugeda, et 23.93 kN ning 13.87 mm läbipainde juures oli paneeli energianeelduvus 172.43 J. Võrreldes seda kahe külgakitse toru kolme punkti painde katsega, kus energia neelduvus oli 123 J, on tulemus 43.43 J võrra suurem ning seega rahuldab Formula SAE reeglite poolt ette kehtestatud kriteeriumi [9, reegel T3.31.1] kus paneeli energia neelduvus peab olema suurem kui kahe külgakitse toru energia neelduvus.



Specimen label	Flexure load at max (kN)	Flexure extension at Break (mm)	Modulus (Automatic) (GPa)	Thickness (mm)	Width (mm)
1	23,93	13,87	12,45	27,5	200,0
2	9,18	17,82	36,81	12,6	200,0

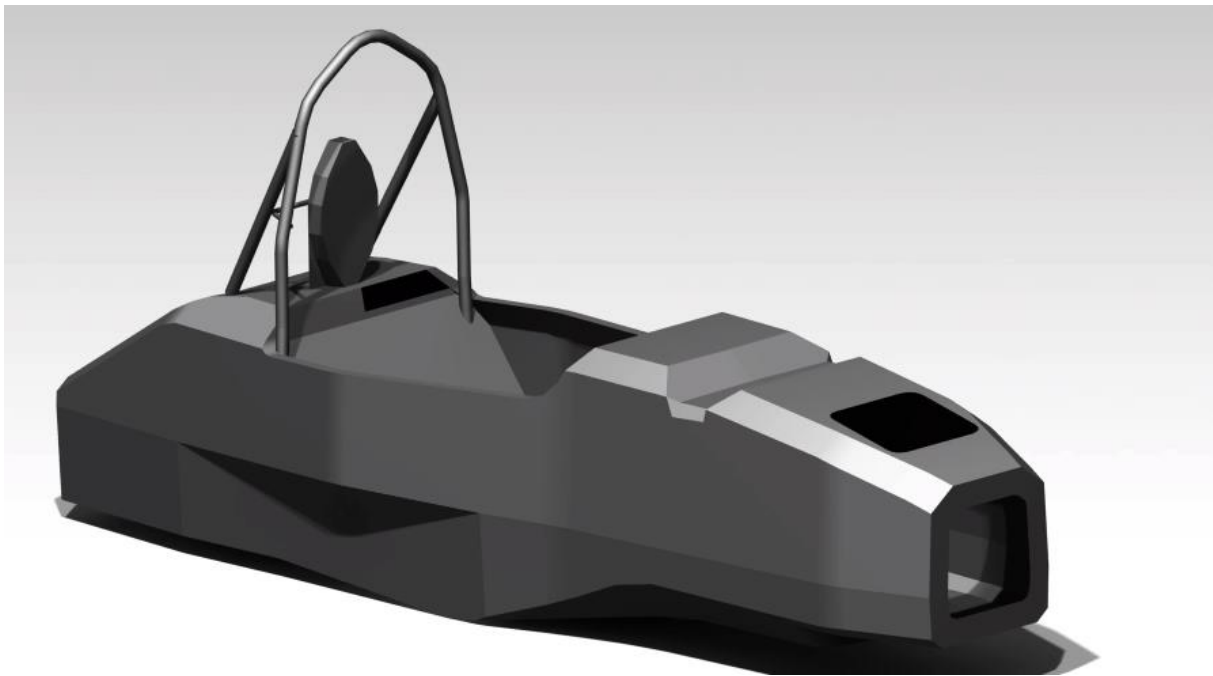
Specimen note 1	Energy at Break (Standard) (J)	Energy at Tensile Strength (J)
1	172,43	172,43
2	83,12	82,63

Sele 3.14. Laminaadi katsetuse tulemused

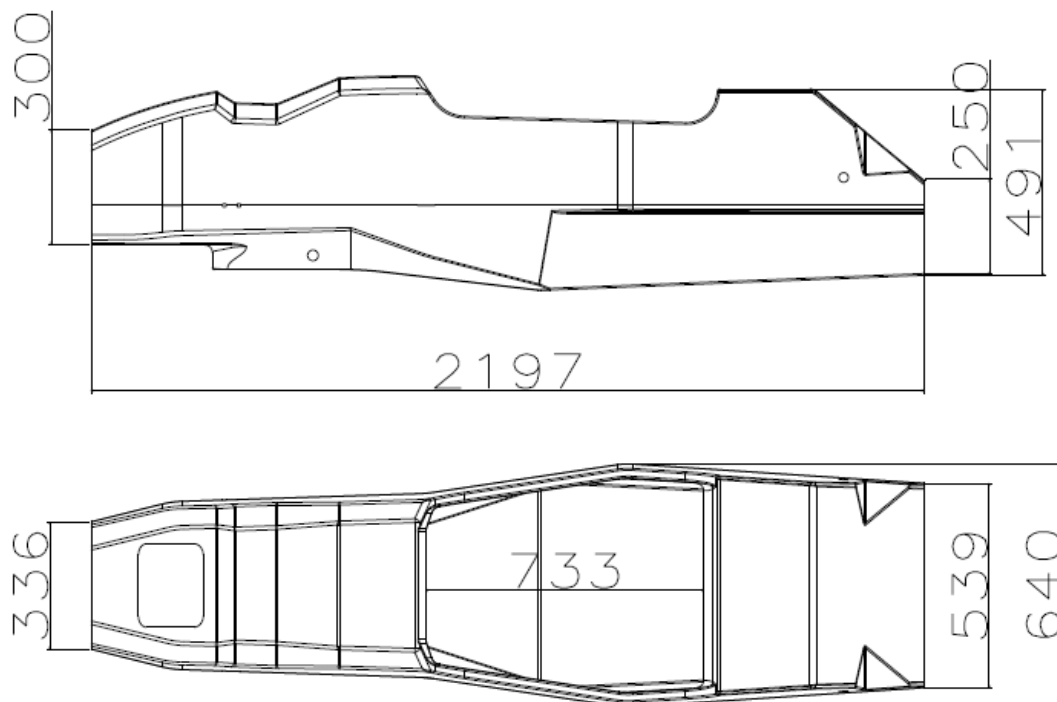
4. MONOKOKK KERE

4.1. Kere mudel ja tähtsamad mõõdud

Kere mudeli arendusel lähtuti peamiselt auto vedrustuse kinemaatikast ning komponentide paigutusest. Monokokk-kere CAD mudeli disainil võeti arvesse ka raami koormamisel tekkivad pingekontsentratsioonid teatud kohtades. Tulenevalt nendest faktoritest disainiti monokokk-kere mudel, mis on kujutatud Selet 4.1, kere gabariitmõõdud on esitatud Selet 4.2. Kere CAD mudeli autoriks on FS Team Tallinna liige Joonas Eamets.



Sele 4.1. Kere mudel [9]

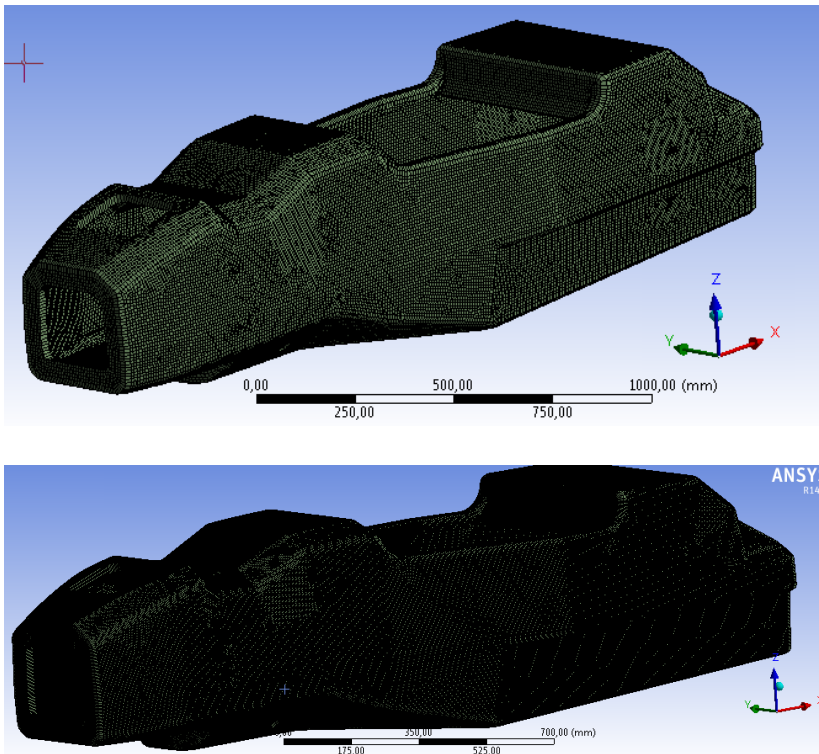


Sele 4.2. Kere gabariitmõõdud millimeetrites

4.2. Analüüsi alused

Keres tekkivate pingete mõõtmiseks on mitmeid variante, kuid vähesed neist sobivad just komposiitstruktuuride arvutamiseks. Peamine põhjus seisneb selles, et komposiitmaterjalide puhul ei ole tegu isotroopsete materjalidega ning seetõttu ei ole võimalik teha arvutusi käsitsi ning lihtsustatult, nagu külgakaitsepaneeli korral. Seetõttu on kere analüüsimiseks ja arvutamiseks kasutatud keskkonda ANSYS Acp PrePost ning LEM arvutusmeetodit. Esialgsete arvutuse läbiviimisel kasutatud elementide arv oli 60000, lõpliku analüüsi korral 300000 elementi (Sele 4.3). Analüüsiks kasutati nelinurkset elementi. Kere mudel analüüsiti koorikmudelina kuna ruumilise kujundina (ik *solid model*) analüüsimiseks puudus raudvaraline võimekus. Kere analüüsimisel teostati esmalt staatiline väändejäikuse analüüs ning samuti arvestati dünaamilisi koormusi, mis tekivad autol pidurdades ning kurvi läbides. Läbi viidi ka modaalanalüüs, testimaks kere vastupidavust erinevatele sagedustele. Tulemuste

hindamiseks kasutati kolme näitajat: raami läbipaine kraadides, maksimaalne deformatsioon ning Tsai Wu tugevuskriteerium.

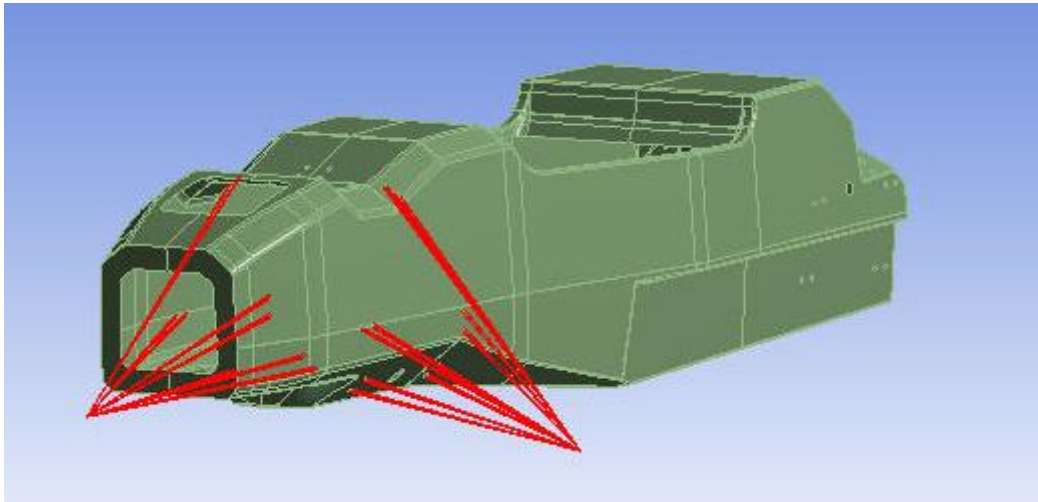


Sele 4.3. Kere mudeli võrgustik (ülemine 60 000 elementi, alumine 300 000 elementi)

4.3. Kere koormamine

4.3.1. Raami väändejäikus

Raami väändejäikus on kere puhul üks kõige määravamaid näitajaid, sest kurvi sisenedes toimub autos kaalude ümberjaotamine ning sellest tulenev külgiirendusel tekkiv moment üritab auto keret väänata. Väändejäikuse mõõtmiseks koormati esivedrustuse punkte samal ajal kui tagavedrustus oli jäigalt kinnitatud. Seda katsetamisemeetodit teatakse ka kui „*Hub to hub*“ katsena. Esivedrustuse punktidele määrati distantsjõud kasutades *remote force* rakendust. Amortisaatorite asemele arvestati jäiku liiteid. Jõu rakendumise punktiks kasutati ratta kontaktpunkti maaga. Tagumistel vedrustuse punktidel kasutati jäika kinnitust (*fixed support*) (Sele 4.4).



Sele 4.4. Esivedrustuse koormamine rehvi kontaktpinnast

Raami väändejäikust arvutatakse järgmiste valemitega.

$$M = F \times c \quad (3)$$

$$Tk = \frac{M}{\alpha} \quad [20],$$

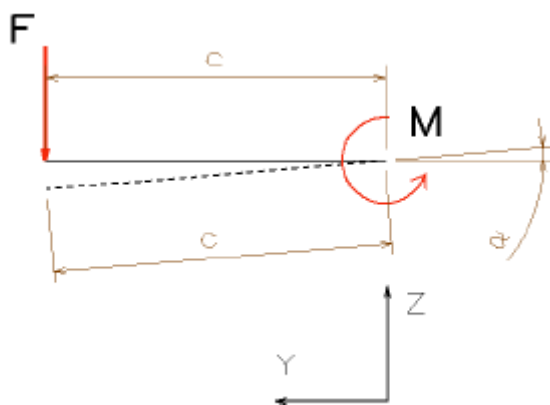
kus: M – moment (Nm);

F – jõud (N);

c – õlg (m);

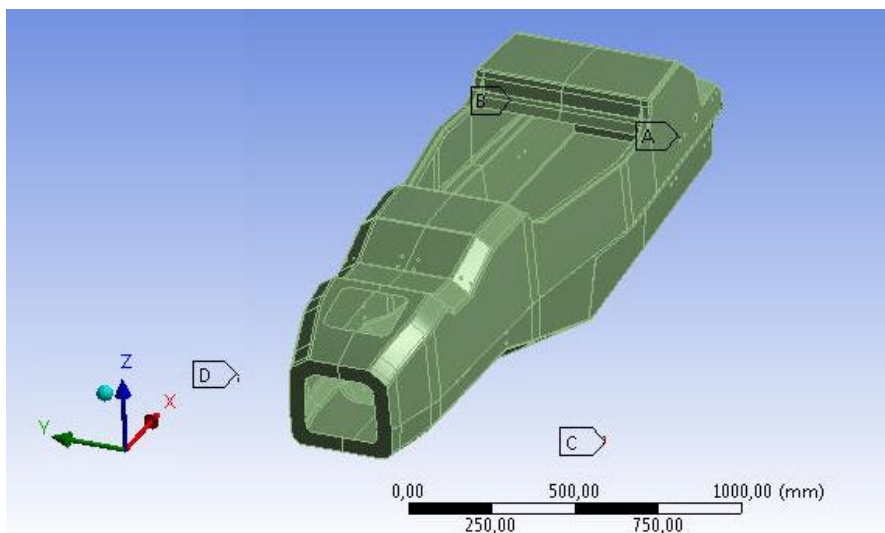
Tk – raami väändejäikus (Nm/kraad);

α – väände nurk (kraadi);



Sele 4.5. Raami väändejäikuse arvutamise skeem [20]

Selel 4.5 kujutatud skeem kirjeldab olukorda, kus ühele poolele kere vedrustusest rakendatakse jõudu. Selel 4.4 esitatud skeemi järgi rakendatakse aga kerele kahelt poolt võrdne, kuid vastassuunaline jõud. Soovitud raami väändejäikusel leidmiseks on FS Team Tallinna vedrustuse kinemaatika meeskond loonud Exceli süsteemi, kus arvestades parameetreid, nagu auto nurgakaalud, rööbe ees ning taga, teljevahe, massikeskme asukohad ja rehvi sidesus. Neid kõiki arvestades on loodud arvutusmodel, mille kohaselt minimaalne raami väändejäikus võiks olla 4000 Nm kraadi kohta. Vastava raami väändejäikuse mõõtmiseks rakendatakse rehvi kontaktpunkti jõud 2000 N, tulenedes sellest, et maksimaalne z-telje suunaline jõud, mis autot mõjutab on 1678 N. Kere koormamise rajatingimused on esitatud Selel 4.6.



Sele 4.6. Kere väändejäikuse mõõtmise skeem. Punktid A ja B tähistavad kere tagumiste vedrustuse punktide jäika kinnikust. Punkt C – vasaku poole rehvi kontaktpinnast esivedrustuse punktidele z telje suunas rakendatav jõud 2000 N. Punkt D – parema poole rehvi kontaktpinnast esivedrustuse punktidele z telje suunas rakendatav jõud – 2000 N

4.3.2. Pidurdusjõud ning külgiirendus

Teise variandina koormati kere jõududega, mis tekivad pidurdamisel. Sel juhul rakendati jõud nii esi- kui ka tagavedrustuse punktidele. Jõudude väärtused on välja toodud Tabelis 4.1.

Tabel 4.1. Vedrustuspunktidele mõjuvad jõud pidurdamisel [19]

Telg	Jõud ees N	Jõud taga N
<i>x</i>	-2095	-438
<i>y</i>	0	0
<i>z</i>	-1310	-274

Tabelis 4.1 välja toodud jõud mõjuvad autole otse pidurdades. Et analüüsida kõiki maksimaalseid olukordi, tuleb lisada pidurdusjõududele ka *y*-komponent, mille tekitab kurvi pidurdamine. Kurvi pidurdamise jõudude analüüsimiseks rakendatakse kerele jõud, mis mõjutavad seda 45° nurgaga, arvestades seda sirgelt pidurdamise ning külgsuunalise kiirenduse vahel. Analüüsid viidi läbi kõikide variantidega, otse pidurdades, kurvi pidurdades ning külgsuunalise jõu korral. Maksimaalsed kurvi pidurdamise jõud on esitatud Tabelis 4.2 ja külgsuunalised jõud on esitatud Tabelis 4.3.

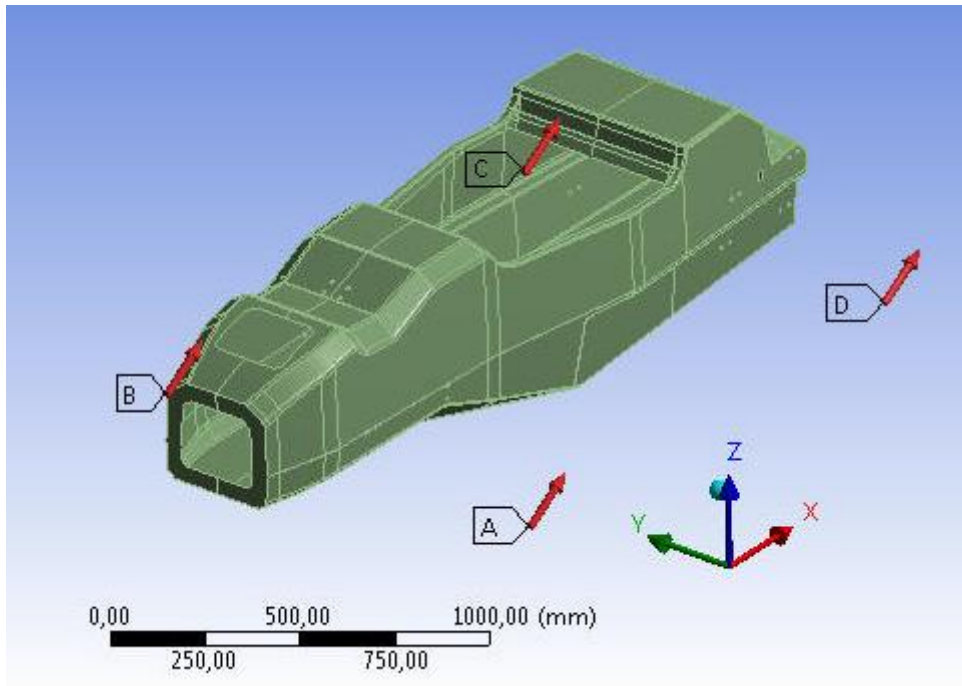
Tabel 4.2. Maksimaalsed kurvi pidurdamise jõud [19]

Telg	Jõud ees N	Jõud taga N
<i>x</i>	-2103	-1205
<i>y</i>	-2204	1263
<i>z</i>	-1715	-983

Tabel 4.3. Maksimaalsed külgsuunalised jõud [19]

Telg	Jõud ees N	Jõud taga N
<i>x</i>	-468	-450
<i>y</i>	3306	3317
<i>z</i>	-1678	-1613

Jõudude rakendamiseks kasutati distantisjõudu ehk *remote force*, kus jõu rakenduspunkt asub rehvi kontaktpunktis maapinnaga. Otse pidurdamisel tekkivat jõudude jaotust illustreerib Sele 4.7.



Sele 4.7. Otse pidurdamisel tekkivad jõud. Punktides A, B, C, D rakendatud jõud on lisatud komponentidena Tabelist 4.1

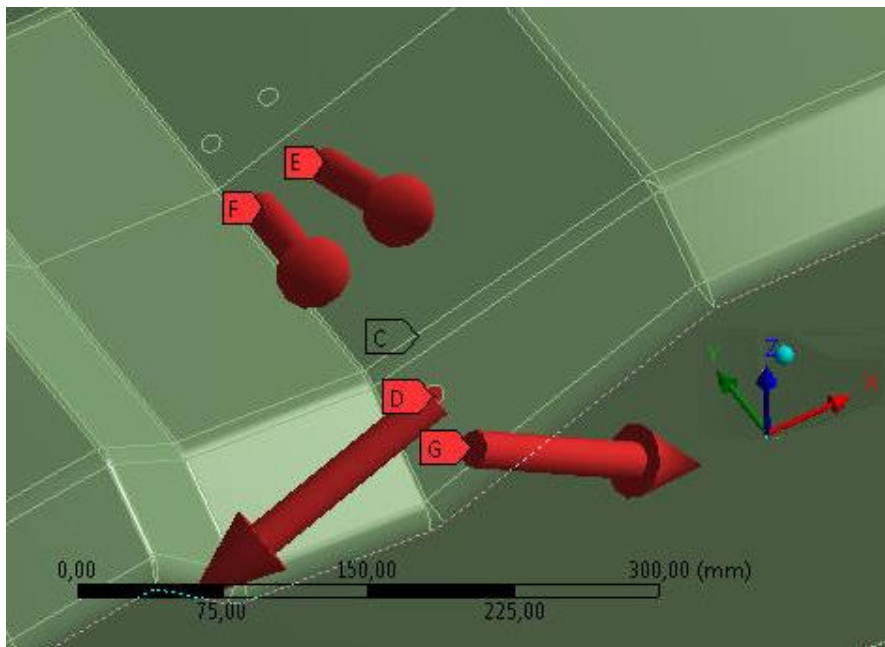
Kurvi pidurdamisel ning külgsuuna kiirendustel tekkivad jõud rakendatakse kerele samalaadselt nagu otse pidurdamisel tekkivad jõud. Jõudude rakenduspunktid asuvad samadel koordinaatidel ning jõudude väärtused komponentidena võetakse vastavalt Tabelitest 4.2 ja 4.3.

4.3.3. Nookuri ning amortisaatori kinnitusele rakenduvad jõud

Nookuri ning amortisaatori kinnitusele rakenduvaid jõude tuleb eraldi vaadelda, kuna raami väändejäikuse ning erinevate kiirenduste analüüsimisel ei rakendata nendele punktidele jõudusid õige suunaga ning õigete väärtustega. Nimetatud punktidele rakenduvad jõud leitakse juba eelpool nimetatud vedrustus mudelite abil. Kere analüüsimisel rakendatakse jõudusid ainult ühele poolele kerest, teist poolt kinnitatakse jäigalt vedrustuspunktidest. Tabelis 4.4 on esitatud amortisaatori ning nookuri kinnitustele rakenduvad maksimaalsed jõud.

Tabel 4.4. Amortisaatori ning nookuri kinnitustele mõjuvad maksimaalsed jõud [24]

Nimetus	Telg	Jõud ees N		Jõud taga N	
		Esimene kinnitus	Tagumine kinnitus	Esimene kinnitus	Tagumine kinnitus
Amortisaator	x	150	327	-337	-338
	y	-1140	-1227	226	-227
	z	-750	-728	781	781
Nookur	x	1506	-1924	441	435
	y	14	26	-3034	-2439
	z	-1006	-949	-1975	-2076



Sele 4.8. Jõudude rakendumine esimese amortisaatori ning nookuri kinnituspunktides

4.3.4. Modaalanalüüs

Veendumaks, et kere konstruktsioon peab vastu ka elektrimootorite tööle ning sõitmise tagajärjel tekkivatele vibratsioonidele viidi kerele läbi modaalanalüüs. Analüüsi käigus katsetati kuut esimest omavõnkesagedust, kuna need on kõige tundlikumad välistele teguritele [18]. Analüüsi tulemusena vaadeldi kere maksimaalseid siirdeid.

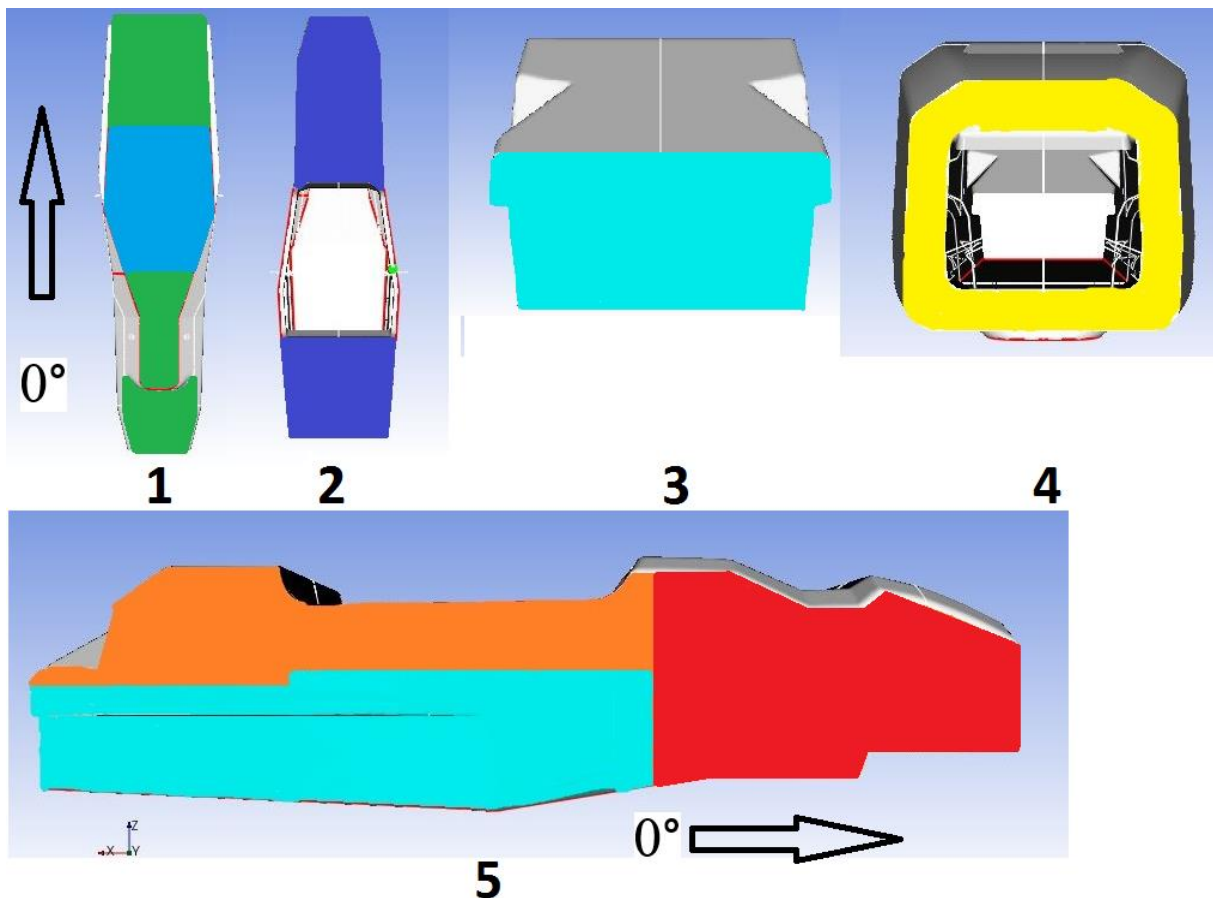
5. MONOKOKK-KERE LEM ANALÜÜS

5.1. Esialgne kihtide paigutus

Kerele esialgse kihtide paigutuse loomisel tuleb lähtuda esmalt töös eespool katsetatud ning simuleeritud juhi külgkaitse paneeli kihtide paigutusest. FSAE reegli T3.34 järgi [25] peab juhi külgkaitse osa asuma esimese ning tagumise torukaare vahelisel alal, kõrgusega 350 mm maapinnast. Reegel EV4.2.2 [25] ütleb, et auto akumulaator peab olema kaitstud küljelt ning tagant külgkaitsele samaväärse paneeli poolt. See juba määratleb osa auto kihtide paigutuse. Ülejäänud puhul võiks silmas pidada järgmisi põhimõtteid:

- materjali kihid peaks olema võimalikult ühtsed terve auto ulatuses,
- materjalide üleminekul peaks arvestama elastsusmoodulite vahet,
- väändelevat kere kohtades kasutada 45° all olevaid kangaid.

Vastavalt reeglitest tulenevatele piirangutele ning kere kujule, jaotati kere kihtide paigutuse jaoks seitsmeks erinevaks alaks (Sele 5.1).



Sele 5.1. Kihtide paigutuse alad kerel

Sele 5.1 järgi jagunevad alad järgmiselt:

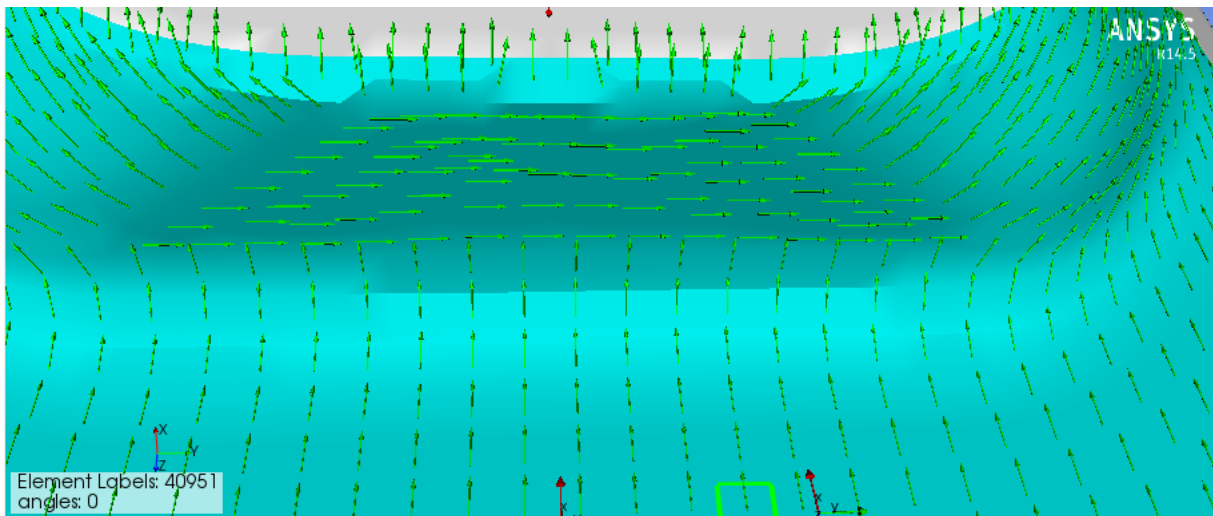
- nr 1 põhjaalune ala, kus sinise värviga on märgitud juhi külgkaitse osana määratletud ala ning rohelise värviga põhi üldiselt,
- nr 2 pealmine ala, kus asuvad nookurite, amortisaatorite, ning aerodünaamiliste elementide kinnitused,
- nr 3 tagumine sein, mis on määratletud juhi külgkaitse paigutuse järgi,
- nr 4 esimene tugisein, mille kihtide paigutuse määrab nihke katsetus,
- nr 5 külgmine ala, kus türkiissinine on juhi külgkaitse ala ja akumulaatori kaitse ning pruun ja punane on üldine külg.

Auto kerele jäikuse andmiseks paigutati külgedele ning põhjale terves pikkuses materjal *UD*, kuna nimetatud materjali tõmbetugevus on ligi kaks korda suurem teistest kasutatavatest materjalidest. Samas on materjali survetugevus väiksem teistest ning samuti ei oma *UD* nii häid nihkeomadusi kui materjal *twill* või *biaxial*. Seega tuleb materjal *UD* siduda teiste materjalide kihtide vahele, et säiliksid omadused kõikides näitajates. Nagu juhi külgkaitse paneeli projekteerimisel selgus, siis sobivaim materjal pinnakihtidele on *twill* oma löögisitkuse tõttu. Neid asjaolusid arvesse võttes koostati materjalide kihtide paigutus, mis on välja toodud Tabelis 5.1.

Tabel 5.1. Esialgne kihtide paigutus keres värvide järgi

	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 10mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 10mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Vaht 25mm, Biaxial 45°/45°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Biaxial 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Vaht 25mm, Biaxial 45°/45°, Biaxial 0°/90°, Biaxial 45°/45°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Biaxial 45°/45°, Vaht 25mm, Biaxial 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°

Ansys Acp keskkonnas on võimalik määrata kanga kiu suund, kuid tulenevalt kere mudeli geometriast ei ole automaatselt paigutatud materjali kanga suund alati reaalsusega vastavuses. Saavutamaks reaalse kerega ligilähedane mudel, tuleb kanga kiudude suunad paigutada õigesti. Sellest tulenevalt võib tekkida tugevusarvutuse viga. Eelpool kirjeldatud olukord on illustreeritud Selel 5.2, kus on kujutatud kere alumist esimest osa ning selle sfäärilist pinda. Roheliste nooltega on näidatud kanga kiu suund.

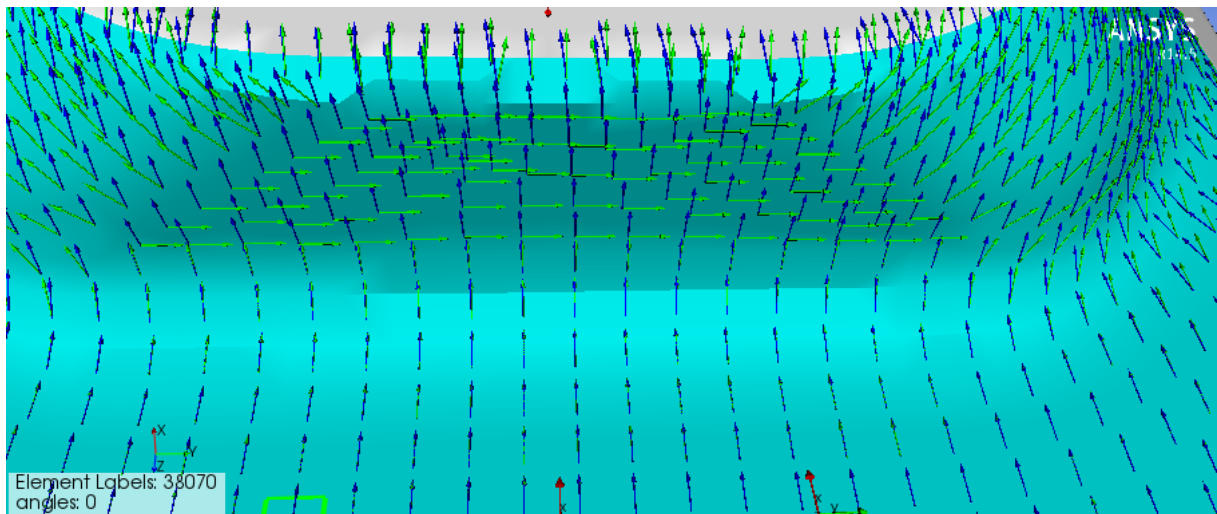


Sele 5.2. Materjali kiudude suundade ebakõlad

Selel 5.2 on situatsioon, kus sfäärilise pinna tagajärjel on kiu suund pinna keskel ebaühtlane. Seda põhjustab asjaolu, et simuleerimise keskkond ei suuda kõikide pindade ja ette antud kiudude suundadega arvestada ning seetõttu tekivad taolised häiringud. Reaalse mudeli ehitamisel tekiksid samuti häiringud sfäärilistele pindadele materjali asetamisel, kuid sellisel kujul need ei esineks. Aktsepteeritav on kiudude suuna muutus nagu on kujutatud Sele 5.2 paremal ning vasakul ääres.

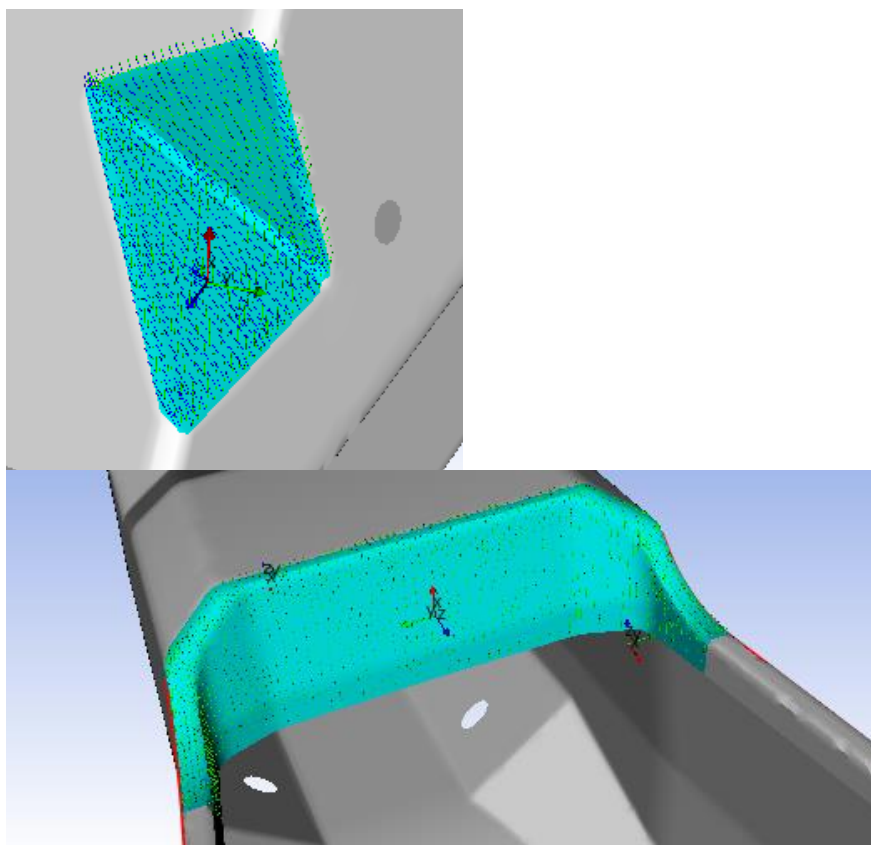
Eelpool kirjeldatud probleemide eemaldamiseks kasutatakse materjali drapeerimist (inglise keeles *draping*). Ansys Acp keskkonnas on seda võimalik teha kahel viisil. Kas kanga drapeerimise koefitsientide arvestamisega tabelist või geometria kujundit arvestades. Antud töös kasutati viimast varianti. Drapeerimiseks tuleb määrata esiteks kasutatav pinna geometria, teiseks kas kasutatakse sisemist või välimist pinda, ning kolmandaks drapeerimise lähtepunkt, mille suhtes arvestatakse kanga suunda. Käesolevas töös kasutati sisemisi pindu drapeerimiseks, kuna loodud mudel on tehtud välispindadena ning materjali kihte arvestatakse väljast

sissepoole. Drapeeritud kanga kiu suunad võrrelduna automaatselt paigutatud kiu suundadega on illustreeritud Selet 5.3.



Sele 5.3. Drapeeritud kanga kiu suunad (sinised nooled) ja automaatselt paigutatud kiu suunad (rohelised nooled)

Sarnaseid geometriast tulenevaid kiu suuna probleemidega alasid esineb kerel veel. Raske geometriaga on tagumised nookuri kinnituse avad ning armatuurlaud osa (Sele 5.4).

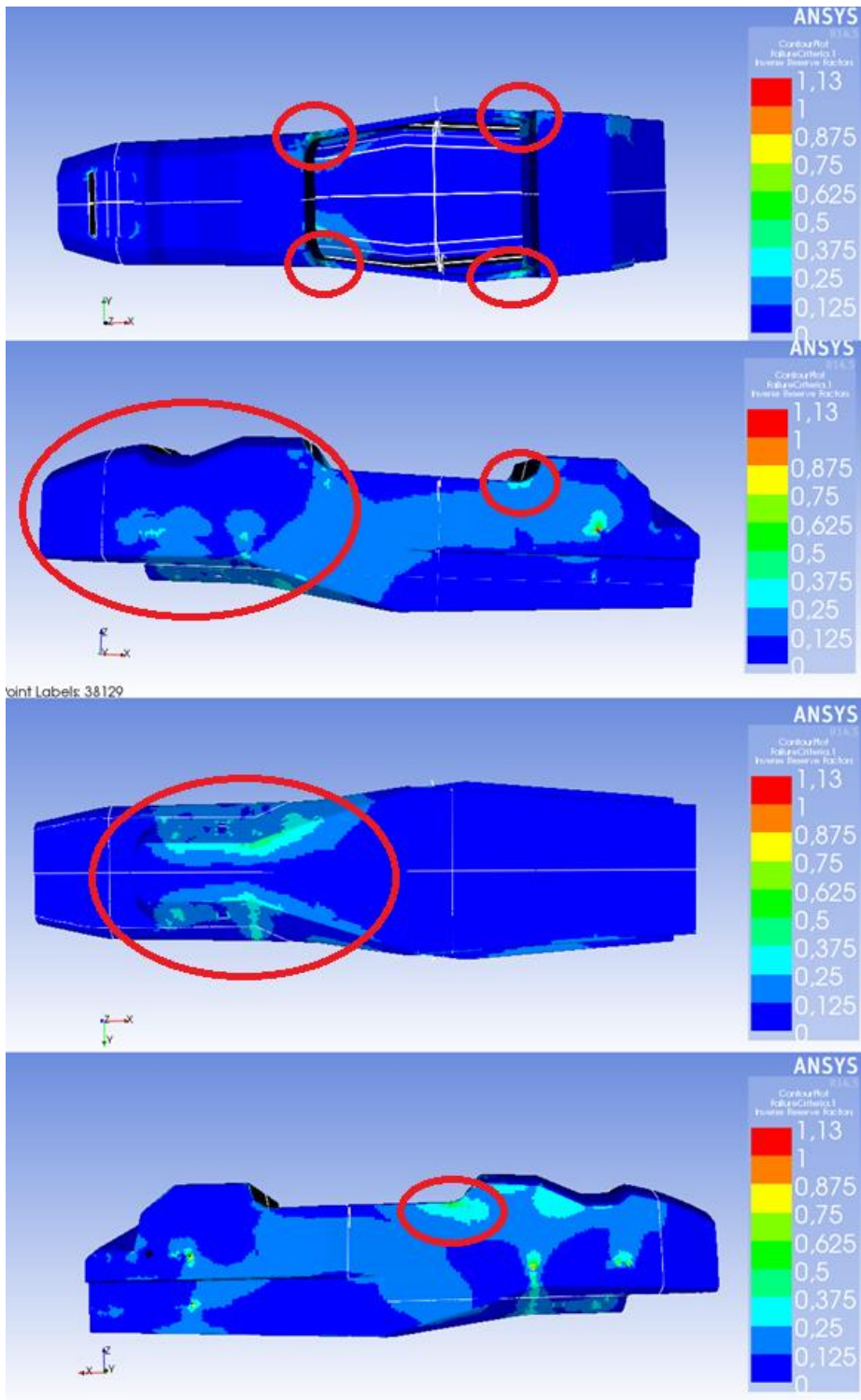


Sele 5.4. Tagumise nookuri kinnitus ning armatuurlaud

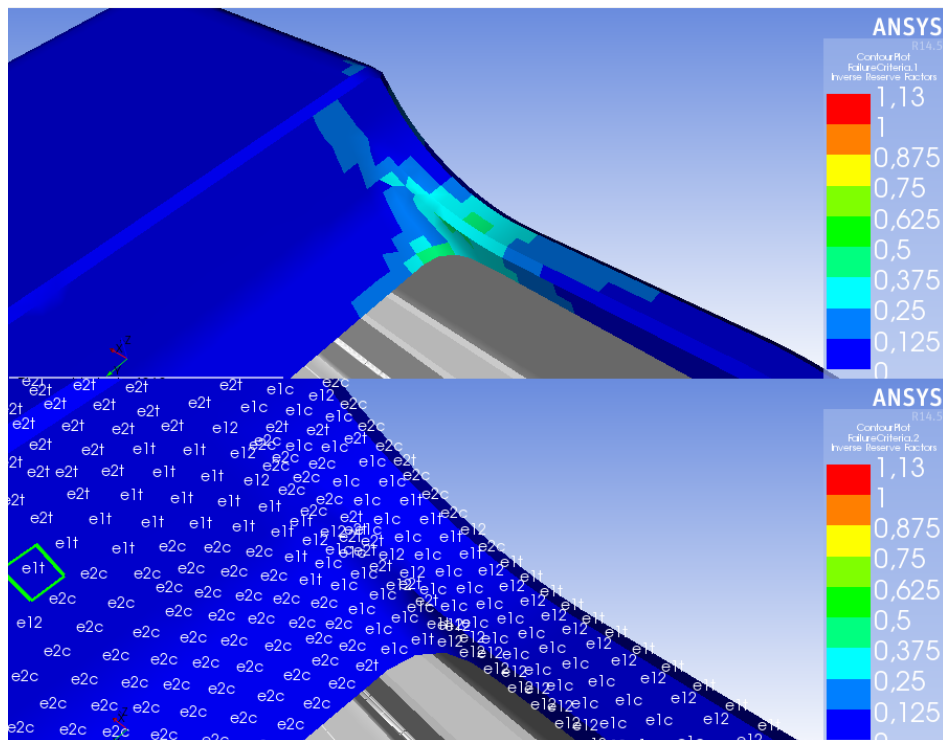
5.2. Kere väändejäikuse analüüs

Kere väändejäikuse analüüs teostati eelpool Tabelis 5.1 kirjeldatud kihtide paigutusega. Kere väändejäikuse analüüsimine näitab ära ka kere nõrgad kohad ning suurimad pingekontsentratsioonid. Analüüsi tulemustena hinnati järgnevaid näitajaid: raami pöörlemine x -telje ümber, mõõdetuna suurima deformatsiooniga punktist, maksimaalsed siirded ning kihtide koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi.

Selel 5.4 on näha esialgse analüüsi graafilist tulemust. Pilditel on kujutatud kere koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi. Tulemustest saab näha, et kere ülemine pool on suuresti üle dimensioneeritud raami väändejäikust silmas pidades. Arvestades, et ülemistel pindadel on kihtide paigutuses materjalid *twill* ja *biaxial*, siis võib raskema kanga ehk 400 g/m^2 kaaluva *biaxiali* vahetada 200 g/m^2 kaaluva *twill* kanga vastu, jättes peamise osa kihtide paigutuseks *twill* $0^\circ/90^\circ$ ja *twill* $45^\circ/45^\circ$. Kere pealt vaatest on ka näha, et koormuse kontsentratsioonid tekivad kokpiti avade nurkades. Seda võis osati ette näha, kuna nimetatud kohas on tervikliku koorikstruktuuri katkemine ning seetõttu ka väändejäikuse vähenemine. Antud alasid tuleks tugevdada kohtlappidega. Kohtlappide materjali määramisel tuleb kindlaks teha, kas koormatud materjalikihid töötavad survele või tõmbele ning mis telje sihis koormus esineb. Seda on võimalik Ansys Acp Post keskkonnas hinnata maksimaalsete siirete (*Max Strain*) hinnata kasutades numbri ja tähe tähistusi. Materjale hinnatakse kihtide kaupa, et kindlaks teha kõige suurema koormusega materjali kiht. Selel 5.5 on esile toodud kere kokpiti tagumine vasak nurk ning selle koormamise liik ning suund. Nimetatud kohas on esineb kõige suurem koormus pealmises *twill* $0^\circ/90^\circ$ pinnakihis. Sealt 5.5 saab välja lugeda, et enim koormatud materjalikiht töötab tõmbele suundadel x , y ning samuti survele suundadel x , y . Antud kohta tugevduse loomiseks ning pealmise *twill* kihi koormatuse alandamiseks oleks parim variant *biaxial* kangas, kuna see omab survele 12 % suuremat tugevust kui materjal *twill*. Tõmbeomadused on materjalidel samaväärsed. Kohttugevdus paigutatakse kerele 45° kiu nurgaga. Arvestades kere koormatust väände, kasutatakse nii ära materjali maksimaalseid tõmbe ja surve omadusi. Tugevduslapi suurus on $d = 150 \text{ mm}$. Kere teistesse kokpiti nurkadesse paigaldati samuti 45° kiu suunaga *biaxial* lapp.



Sele 5.4. Kere koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi

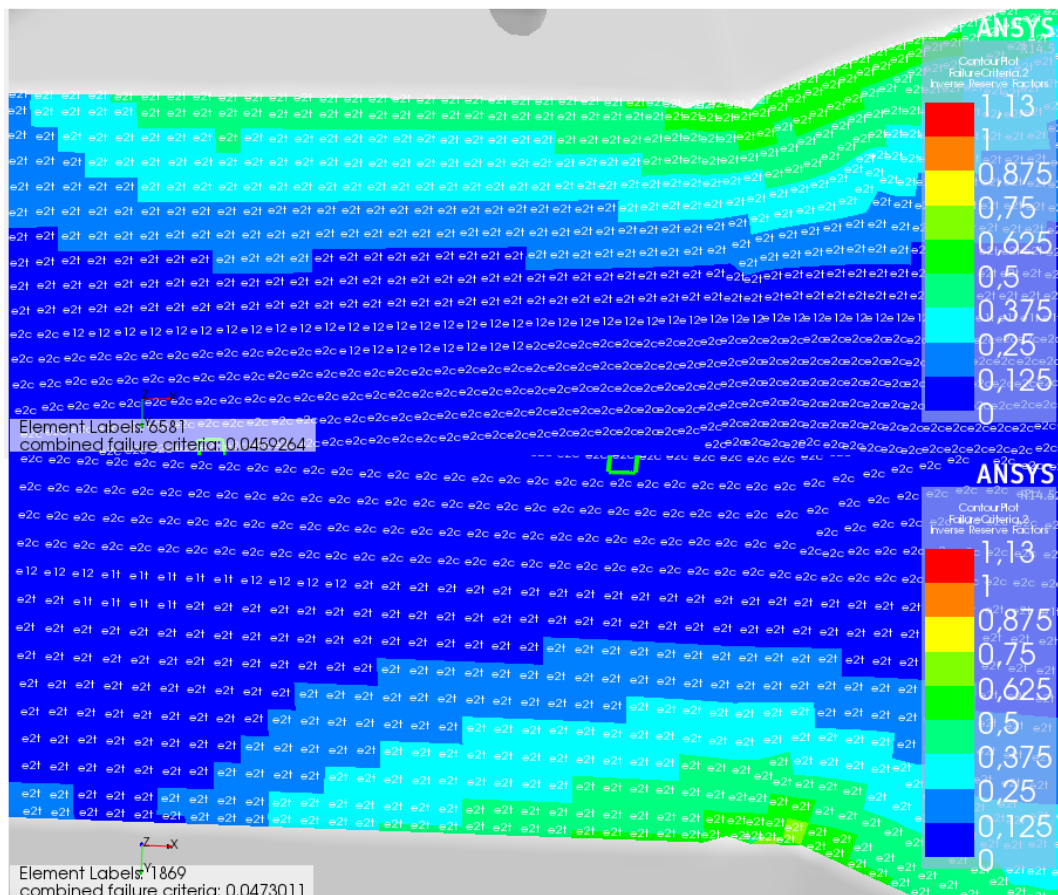


Sele 5.5. Koormused kokpiti nurgas

Vaadeldes kere vasakut külge on samuti võimalik märgata materjalide liigsust. Suurimates koormuse kontsentratsiooni punktides ja õõtshoobade kinnituspunktides on materjali koormatus Tsai Wu kriteeriumi järgi 0.3. Selle järgi omab laminaat veel kolmekordset tugevusvaru enne purunemist. Arvestades lisaks, et kõikidele kinnituskohadele tulevad FS Team Tallinn meeskonnaliikme Taavi Pärtin-i poolt analüüsitud koht tugevduslapid võib järeldada, et kere massi silmas pidades on mõistlik esimesel osal materjalikihte vähendada või muuta. Arvestades Selet 5.1 punasega kujutatud ala kihtide paigutust – *twill* 0°/90°, *UD* 0°, *biaxial* 45°/45°, vaht 25 mm, *biaxial* 45°/45°, *UD* 0°, *twill* 0°/90° – võib siinkohal samuti teha materjalide seas vahetuse ning vahetada raskema *biaxial* materjali kergema *twill* vastu. Materjali kiudude suunad jääksid samaks, kuna 45°/45° kiu suunaga täitematerjaliga kontaktis olev materjal annab laminaadile juurde nihketugevust. Samuti on materjali *twill* tõmbeelastusmoodul väiksem materjali *biaxial* omast, seega on täitematerjali ning kattekihtide elastsusmoodulite üleminek sujuvam ning on väiksem oht delaminatsioonile täitematerjalist [14]. Kui materjal *biaxial* asendada materjali *twilliga*, on kere küljel vähem materjalide vahelisi üleminekuid ning sellega kaasnevaid pingekontsentratooreid. Materjal *biaxial* paigutati algselt eelnimetatud alasse, sest esimestel õõtshoobadel rakendub suurem koormus võrreldes tagumiste õõtshoobadega (Tabel 4.4).

Kere paremat külge vaadeldes (Sele 5.4) on näha, et materjalikihtide koormatus on suurem võrreldes vasaku poolega. See tuleneb kerele rakendatud jõudude suunast. Siin on juba näha rohkem koormatud alasid esimeste õõtshoobade kinnituspunktides. Hetkel jäetakse need kõrvale kuna puuduvad tugevduslapid. Näha on ka, et suurem koormamine kuni 0.75 Tsai Wu kriteeriumi järgi on kokpiti avause nurgas ning samuti esiosa ülemises servas, kus toimub materjalikihtide üleminek. Analüüsides materjale kihtide kaupa saab välja lugeda, et kokpiti ülemises serval materjal *UD* sisemine kiht on enim koormatud, maksimaalselt 0.8 Tsai Wu kriteeriumi järgi. Maksimaalseid siirdeid analüüsides on tulemuseks e1c ehk materjali töötamine survele *x*-telje sihis. Kere ülemise serva tugevdamiseks kasutatakse materjali *UD* kohttugevduslappi, kuna siirded on ainult ühesuunalised. Tugevduslapi suurus on $d = 200 \text{ mm}$.

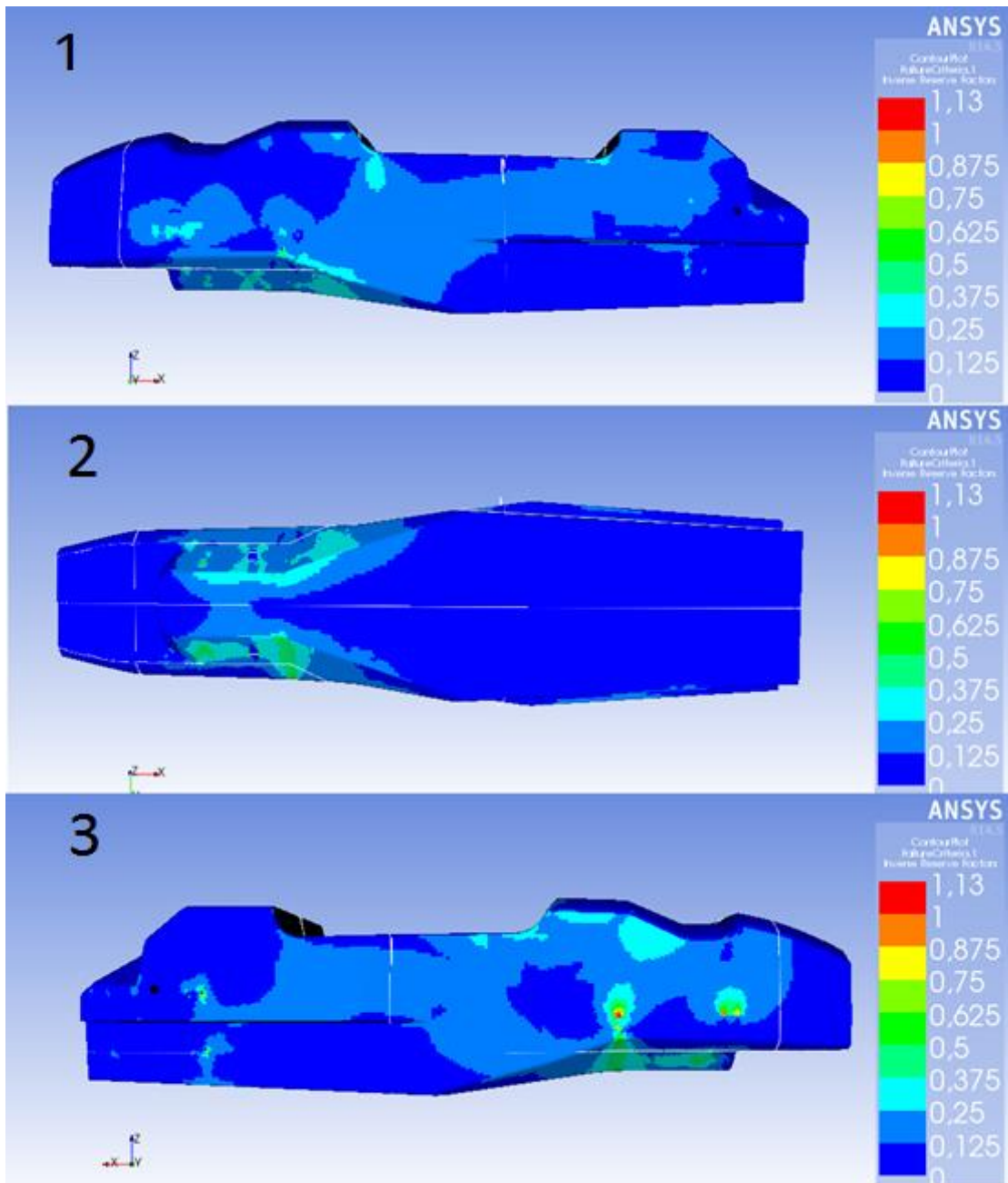
Tugevdamist vajab kindlasti veel kere esimene alumine osa, kus külgede peale kinnituvad alumised õõtshoovad (Sele 5.4). Materjali kihte analüüsides on tulemuseks *y*-telje sihis tõmbele töötavad materjali *UD* kihid (Sele 5.6). Materjalikihtide koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi ulatub kuni 0.65. Arvestades, et materjali *UD* omab *y*-telje sihis tõmbetugevust ainult 20.96 MPa, oleks ala vaja kindlasti tugevdada, kas materjali *UD* *y*-telje suunaliste kiududega või *x*-, *y*-telje suunas samaväärset tõmbetugevust omava materjaliga. Autor otsustas eelpool käsitletud ala tugevdada *x*-telje suunas $0^\circ/90^\circ$ kraadi kiu suunda omava materjaliga *biaxial*, kuna materjalil on samaväärne tõmbetugevus kui materjalil *twill*, kuid esimesel on paremad surveomadused, mis on olulisem, sest pool alumisest esimesest osast töötab survele, teine pool tõmbele. Tugevduslapid paigutatakse mõlema materjali *UD* sisemiseks kihiks.



Sele 5.6. Alumise esimese ala siirded

5.3. Optimeeritud kihtidega analüüs

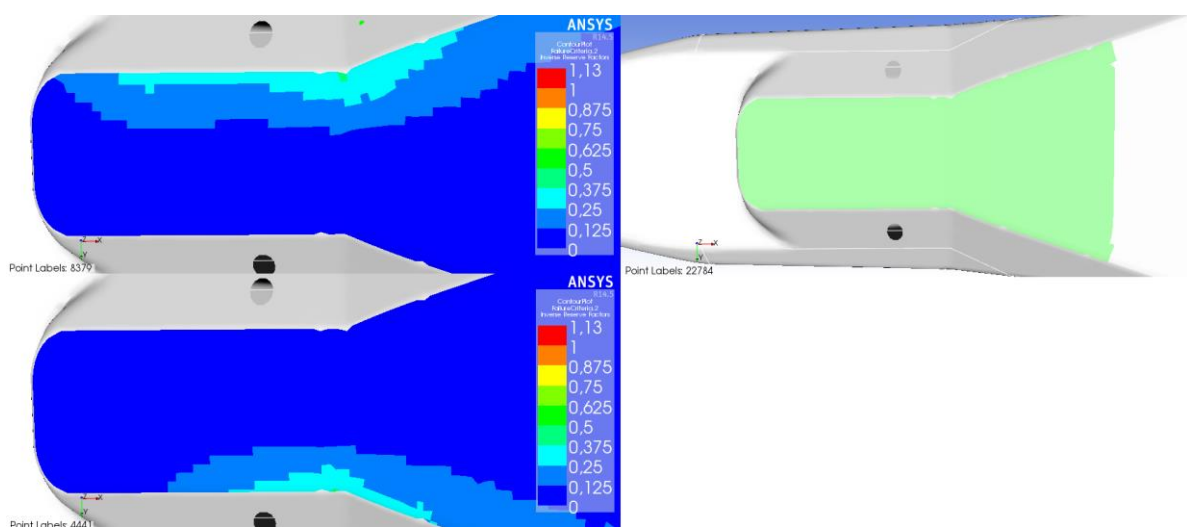
Järgneva analüüsi käigus vahetati materjale ning lisatud tugevdusi nagu eespool kirjeldatud. LEM mudeli võrgustiku elementide arvu suurendati 300 000. Sealhulgas sai lisatud FS Team meeskonnaliikme Taavi Pärtini poolt määratud kinnituspunktide tugevduslapid ainult vasakule poolele, et võrrelda laminaati tugevduslappidega ning ilma. Jõu suundade kompenseerimiseks teostati kere väändejäikuse katset kahes suunas. Tugevduslappide suurused oli vastavalt 100 mm, 130 mm, 160 mm, 190 mm. Kere nurkadesse, kus toimub materjalide üleminek, lisati 5 cm ülekate ühes suunas, kasutades „tube rule“ meetodit.



Sele 5.7. Optimeeritud kihtidega kere

Selel 5.7 on näha, et materjalikihtide vahetamine kere esiosas ei ole suurendanud materjalide koormamist kui võrrelda eelneva analüüsiga, mis on illustreeritud Selel 5.4. Säilinud on kontsentratsioonid kokpiti nurkades, mis on kere väänamisel ka kõige nõrgemateks ning enim koormatud aladeks. Nende parandamiseks lisati eelnevale analüüsi mudelile 45° kiu suunaga materjali *biaxial* ringikujulised tugevduslapid $d = 150$ mm. Vaadeldes analüüsi tulemusi Selel 5.7 pildil 1 ja 3 on näha, et tugevdused ei olnud piisavad ning ei hajuta pindmiste materjalide koormusi. Arvestades kere väändel tekkivaid koormusi, ei ole mõistlik eemaldada 45° kiu suunaga *biaxial* materjali. Sellele tuleks pigem lisada materjali *twill* kiu suunaga $0^\circ/90^\circ$

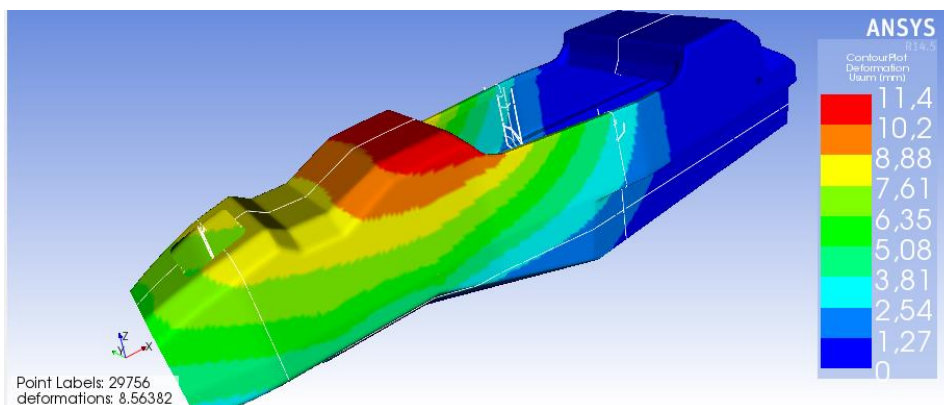
tugevduslapid. Võttes arvesse koormuste jaotust ees ning tagapool, tulevad lappide suurused tahapoole, kus koormatav ala on väiksem, ringikujulised suurusega $d = 100$ mm ning esimestele kokpiti nurkadele, kus koormatav ala on märkimisväärselt suurem, ringikujulised suurusega $d = 200$ mm. Vedrustuse kinnituspunktide tugevduslappide olemasolu ning tulemust saab näha Seel 5.7 esimest ja kolmandat pilti võrreldes. Esimesel pildil on kere vasak kül, kus vedrustuse kinnituspunktid on tugevdatud ümarate lappidega, ning kolmandal pildil on kere parem kül, kus tugevduslapid puuduvad ning vedrustuse punkte toetab ainult külje laminaat. Vasakul küljel on vedrustuse kinnituspunktide juures materjalikihtide koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi maksimaalselt 0.3, mis jätab laminaadile enam kui kolmekordse tugevusvaru. Paremäl küljel on selgelt näha, et kihtide koormatus ületab kriitilise 1 piiri omades maksimaalset väärtust 1.3 Tsai Wu kriteeriumi järgi. See tähendab materjali purunemist ning näitab, et tugevduslapid antud kohtades on vajalikud. Tagumised vedrustuse kinnituspunktid on selgelt vähem koormatud tugevduslappide tulemusena, kui võrrelda tulemusi Seel 5.4 (teine ja neljas pilt) ning Seel 5.7 (esimene pilt.) On näha, et koormuse kontsentratsioonid on rohkem laiali jaotunud. Kui võrrelda optimeeritud paigutusega kere vasakut ning paremat külge (Sele 5.7) on selgelt näha, et ilma tugevduslappideta (parem kül) on koormused kontsentreeritud väikse ala peale ning omades Tsai Wu kriteeriumi väärtust 0.7, kui vastasküljel on koormused jaotatud suure ala peale ning maksimaalne Tsai Wu väärtus on 0.2. Seega saab järeldada, et vasakul poole paigutatud kinnituste tugevduslapid on vajalikud ning praeguste koormamistingimuste juures piisavad.



Sele 5.8. Alumine esimene tugevus, paremal rohelisega tugevduslapi suurus

Selel 5.8 on võimalik vaadelda kere alumist esimest osa. Eelnevas analüüsis olid materjali *UD* kihid suuresti koormatud *y*-telje sihis. Kahesuunalise materjali *biaxial* lisamisel tugevduseks suunaga $0^\circ/90^\circ$ mõlema *UD* kihi juurde vähendati *UD* koormamist 0.65-lt 0.3-ni. Seega võib järeldada, et laminaat omab piisavat tugevusvaru antud koormamistingimuste juures.

Kere analüüsimisel mõõdeti ka deformatsiooni (Sele 5.9) ning kere pöörlemist selle tulemusena ümber *x*-telje. Nagu näha Selel 5.9, on kere suurima deformatsiooniga alaks pealne kokpiti poolne pind. Kere rotatsiooni mõõtmiseks vajalik mõõtepunkt asetati maksimaalse deformatsiooniga alasse. Koordinaatteljestik, mille suhtes punkti liikumist mõõdeti, paigutati kere tagumisse osasse, kust kere ka kinnitatud on. Kere maksimaalne roteerumine ümber *x*-telje on 0.297° , mis teeb kere väändejäikuseks 10151 Nm kraadi kohta. Tulemuste arvutamiseks kasutati valemit 3. Võrreldes toruraami väändejäikusega, mis oli FS Team Tallinn eelmise hooaja autol FEST 14-1 2560 Nm kraadi kohta analüüsituna, on süsinik komposiitraami väändejäikus 3.96 korda suurem. Tegemist on aga analüüsi põhise tulemusega ning selle valideerimine toimub kere valmimisel.

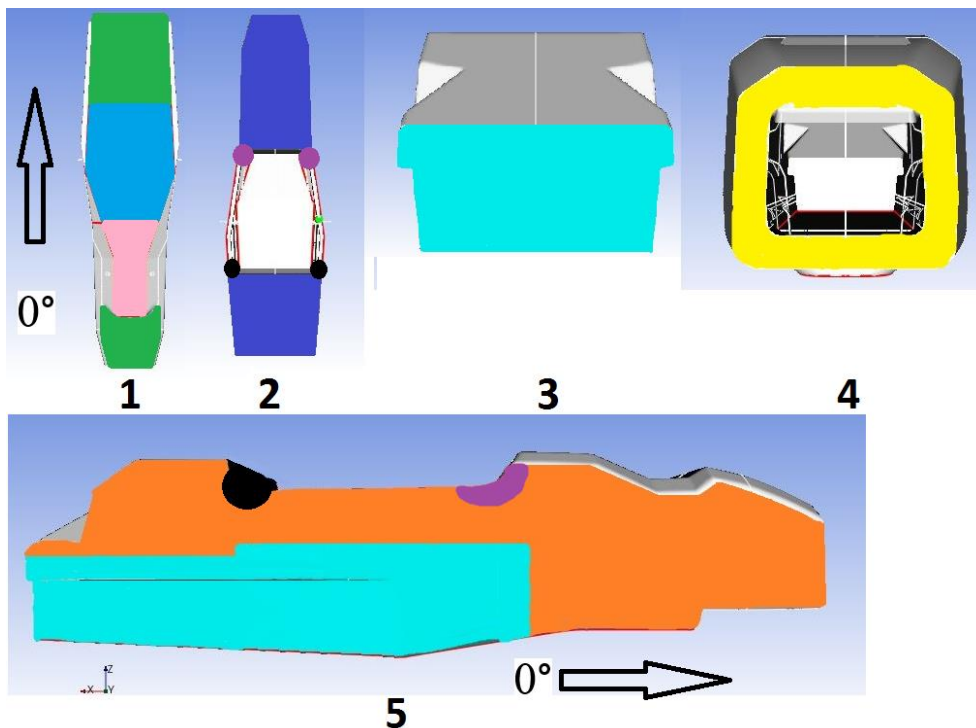


Sele 5.9. Kere deformatsioon väändejäikuse mõõtmisel

Eelnevad analüüsid ning optimeerimised tulemusena on kihtide paigutus toodud Tabelis 5.2.

Tabel 5.2. Optimeeritud kere kihtide paigutus värvide järgi (Sele 5.10)

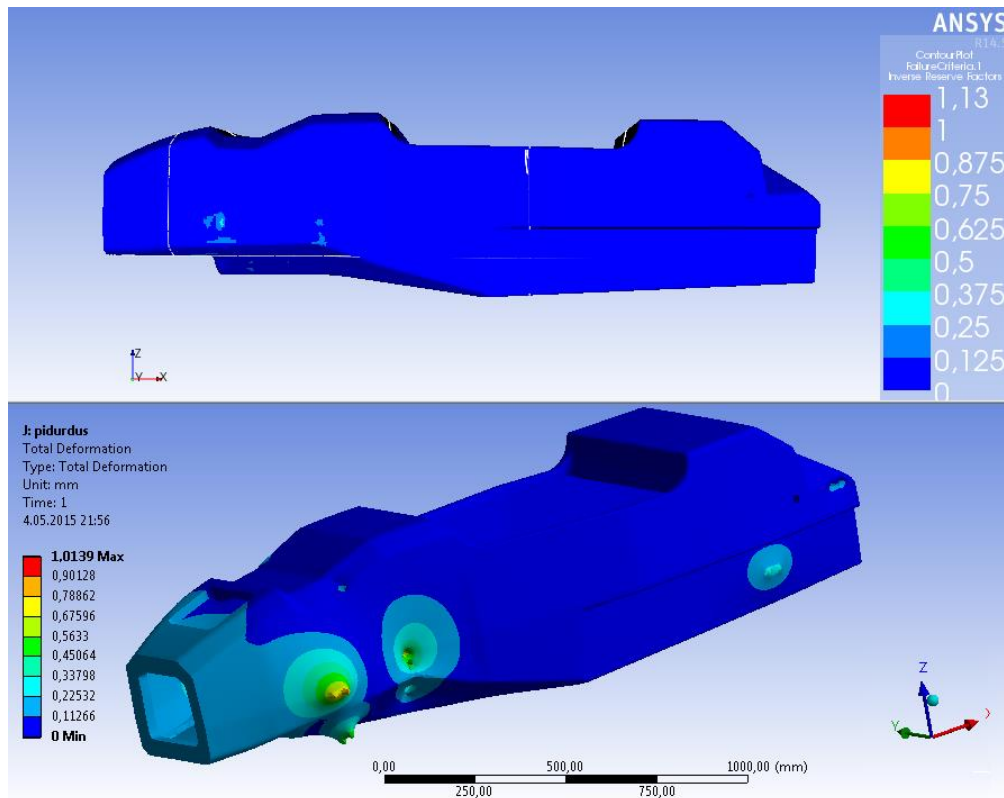
	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 10 mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 10mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Vaht 25mm, Biaxial 45°/45°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Biaxial 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Vaht 25mm, Biaxial 45°/45°, Biaxial 0°/90°, Biaxial 45°/45°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, UD 0°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Biaxial 0°/90°, Twill 45°/45°, Vaht 10mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°



Sele 5.10. Optimeeritud kere kihtide paigutuse värvide skeem

5.4. Pidurdusjõu ning külgsuunatud pidurdusjõu analüüs

Pidurdusjõududest analüüsiti esmalt otse pidurdamisel mõjuvaid jõude. Jõudude väärtused (Tabel 4.1) ja rajatingimused (Sele 4.7) on esitatud peatükis 4.3. Seel 5.11 on näidatud materjalikihtide koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi ning pidurdusjõudude poolt tekitatud kere deformatsioon.

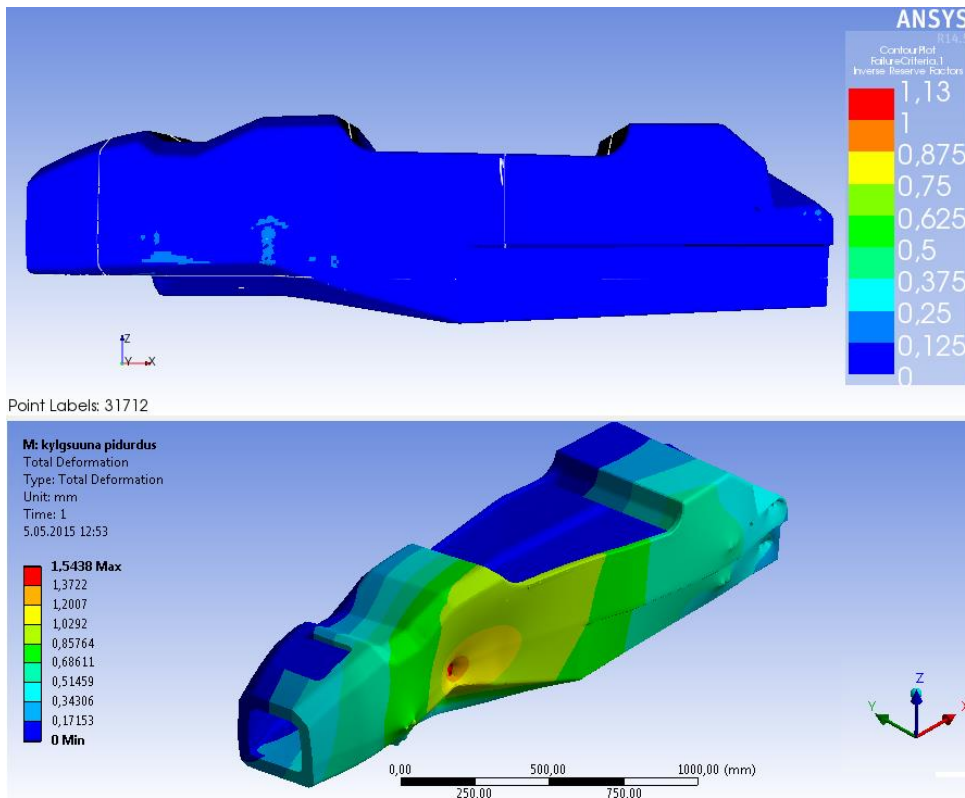


Sele 5.11. Kere koormamine (ülemine) ning deformatsioon (alumine) otse pidurdades

Seel 7.4.1 ülemisel pildil on näha, et otse pidurdades ei ole märkimisväärseid koormusi materjalikihtides. Tsai Wu väärtus jääb vahemikku 0.25-0.33. Vaadeldes gradiente materjalikihtide järgi puudub koormuse tõus. Maksimaalne deformatsioon 1 mm on täiesti normi piires kuna eelnevaid kolme punkti painde katsete tulemusi vaadeldes ei toimu 1 mm deformatsiooni korral materjalikihtide purunemist.

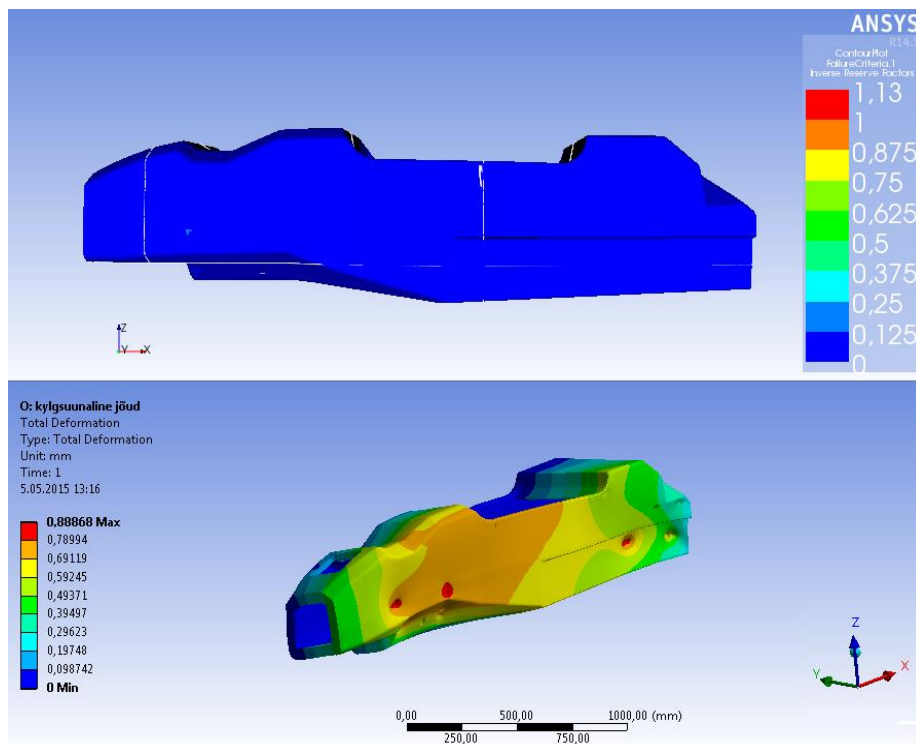
Sama võrdselt koormab kere külgsuunas pidurdamine, kus auto vedrustuspunktidele rakendatakse jõud ratta kontaktpinnast 45° nurga all. Nagu on näha Seel 5.12, on nurga all pidurdades kere koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi madalam kui otse pidurdades. Tsai Wu väärtus jääb vahemikku 0.15-0.2. Kere deformatsioon seevastu on aga suurem külgsuunalisel pidurdamisel. Maksimaalne kere deformatsioon esineb esimese ülemise

tagumise õõtsuova kinnituspunktis, kus deformatsioon on 1,54 mm. Taaskord on tegu piiridesse jääva deformatsiooniga ning materjali purustusi ei teki.



Sele 5.12. Külgsuunalise pidurdamise koormused ja deformatsioon

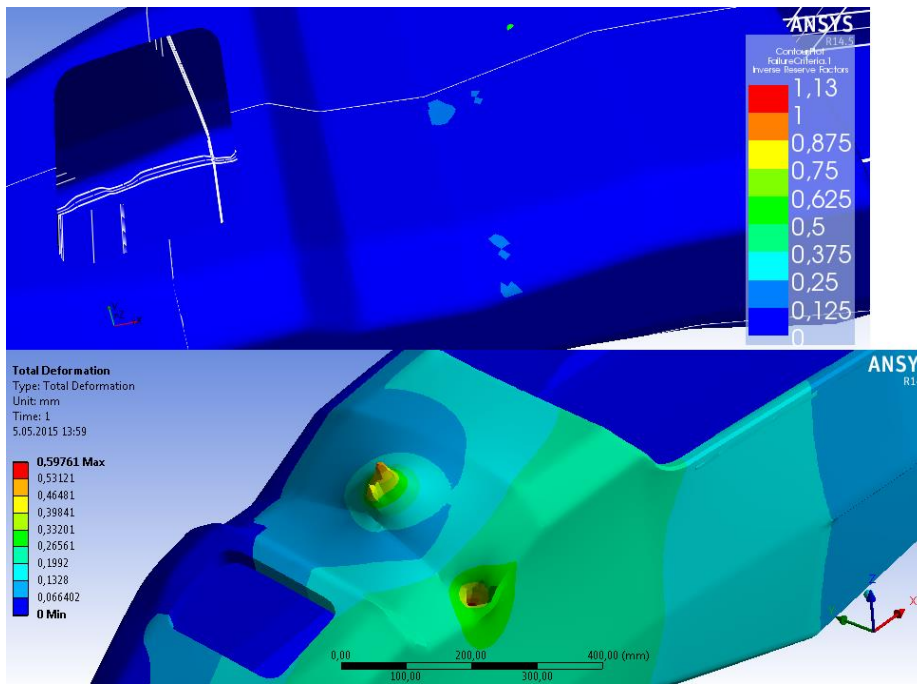
Neljas ning viimane vedrustuse kinnituspunktide analüüs on külgi kiirenduse ehk kurvi läbimisel tekkivate jõudude analüüs, mida on täpsemalt selgitatud peatükis 4.3. Kuna maksimaalne jõud rakendub kurvis ainult välimistel ratastel ja nende kinnitustel, siis sisemiste rataste analüüsi eraldi ei tehtud. Sele 5.13 on selgelt näha, et märgatavat koormust kere materjalikihtidele ei teki. Tsai Wu kriteeriumi maksimaalne väärtus on 0.15 ning maksimaalne deformatsioon on 0.88 mm.



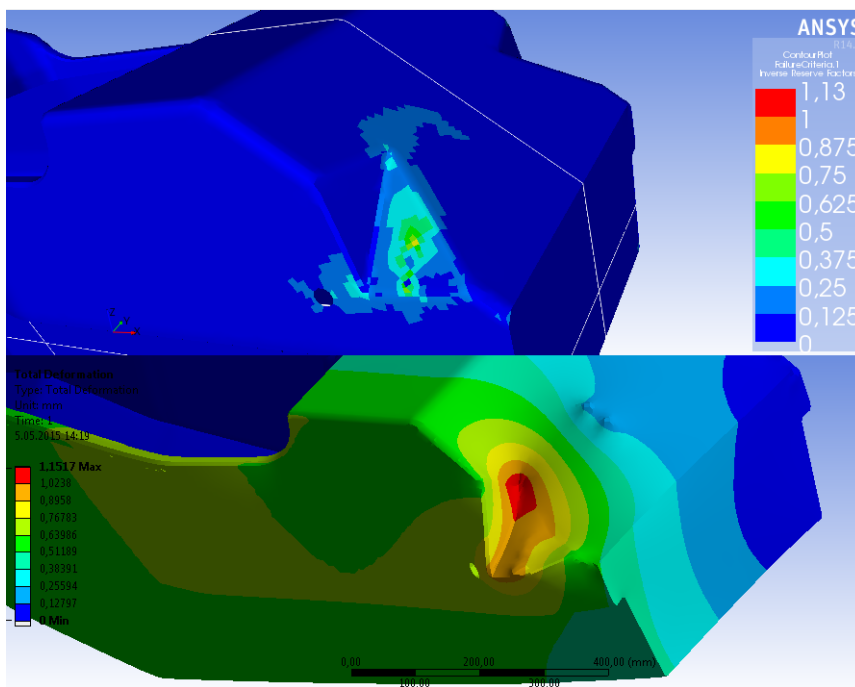
Sele 5.13. Kurvi läbimise koormused ja deformatsioon

5.5. Nookuri ning amortisaatori kinnituste analüüs

Nookuri ja amortisaatori kinnituspunktide analüüs kerel viidi läbi vastavalt peatükis 4.3 esitatud tingimustele. Sele 5.14 on ära näidatud kinnituspunktide koormamine Tsai Wu kriteeriumi järgi ning maksimaalne deformatsioon. Tsai Wu väärtus jääb nende kinnituste juures maksimaalselt 0.16 väärtuse juurde, mis on materjalile üpriski väike koormus. Deformatsioon 0.6 mm ei ole samuti kahjustusi tekitav, seega on esimesed kinnituspunktid maksimaalsetele jõududele vastupidavad.



Sele 5.14. Esimese nookuri ning amortisaatori kinnituspunktide koormamine ning deformatsioon

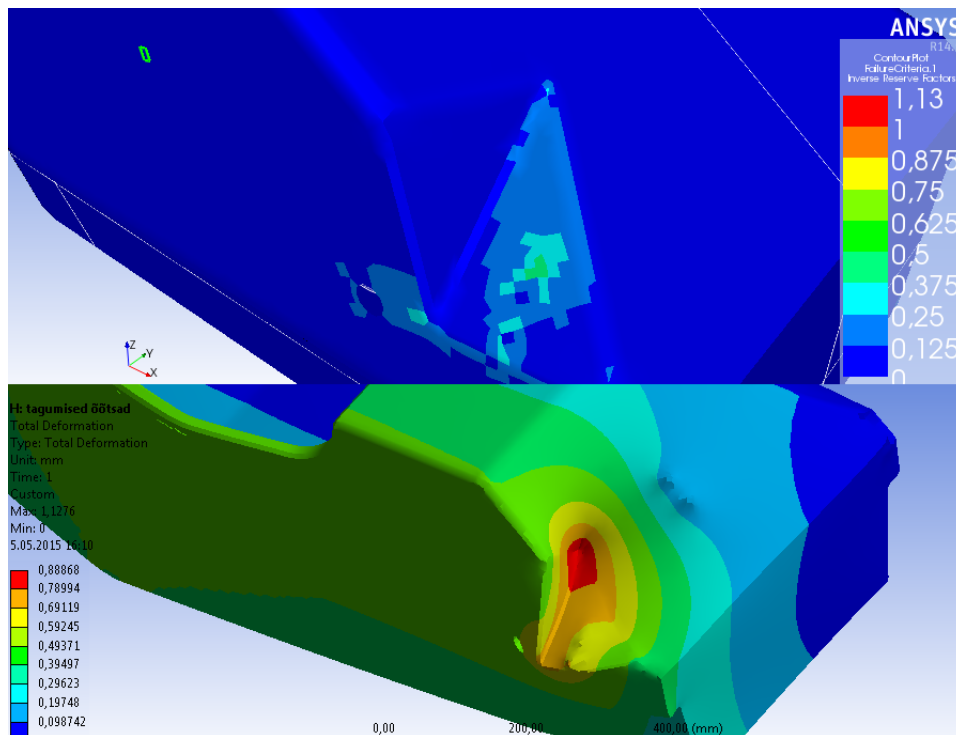


Sele 5.15. Tagumise nookuri ning amortisaatori kinnituse koormamine ning deformatsioon

Tagumise nookuri ning amortisaatori kinnituspunktide analüüsi tulemused on esitatud Selet 5.15. Joonisel esitatud koormamise ning deformatsiooni visualiseeringult on näha, et ilma tugevdusteta on tagumine nookuri kinnituspunkt liialt koormatud (Tsai Wu kriteeriumi järgi 0.76), mis jätab materjalile ainult kolmandiku tugevusvaru. Punktide, mis töötab peale

staatilise koormuse ka väsimusele, on seda liialt vähe. Samuti tekib nurga konstruktsiooni deformatsioon 1.15 mm, mis sirge laminaadi puhul oleks aktsepteeritav, kuid nurgas võib tekitada delaminatsiooni. Seega tuleb nurga konstruktsiooni tugevdada materjali lisamisega.

Analüüsi tulemusena on kõige rohkem koormatud pealmise kooriku kihid. Selle vähendamiseks lisatakse materjali kihte pindmisele koorikule. Peale tugevduste lisamist pealmisele koorikule kõikide kihtide kahekordistamise kujul, on Seel 5.16 näha, et koormus materjali kihtides on vähenenud ning liikunud keskmise 0.7 pealt 0.4 peale. See jätab laminaadile rohkem kui kahekordse tugevusvaru, mis antud punktis on piisav. Nookuri kinnitusnurga deformatsiooni vähendati 1.15 mm-lt 0.88 mm-ni. See vähendab oluliselt delaminatsiooni ohtu väsimusele koormatud nookuri kinnitusnurgas.

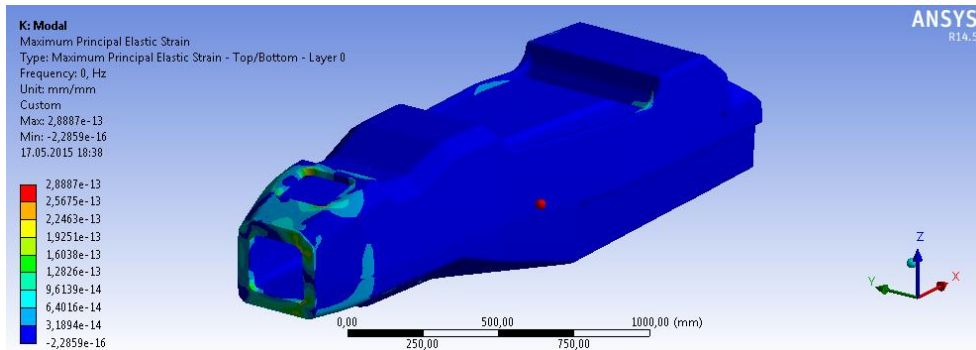


Sele 5.16. Tagumine nookuri kinnitus

5.6. Modaalanalüüs

Kerele viidi läbi modaalanalüüs, kus katsetati kuut esimest omavõnkesagedust. Analüüsi tulemused on esitatud Seel 5.17. Tulemustena hinnati maksimaalseid siirdeid, kuna kasutatav tarkvara ei võimaldanud Tsai Wu tugevuskriteeriumi hindamist modaalanalüüsi korral. Analüüsi tulemustest on näha, et maksimaalsed siirded jäävad märkimisväärselt alla materjalide purunemise piiri. Modaalanalüüsi tulemusena tekkinud maksimaalne siire oli

2,88E-13 mm, kolmest materjalist kõige väiksem siire purunemisel oli materjal UD nihkel mille väärtuseks oli 0,007 mm.



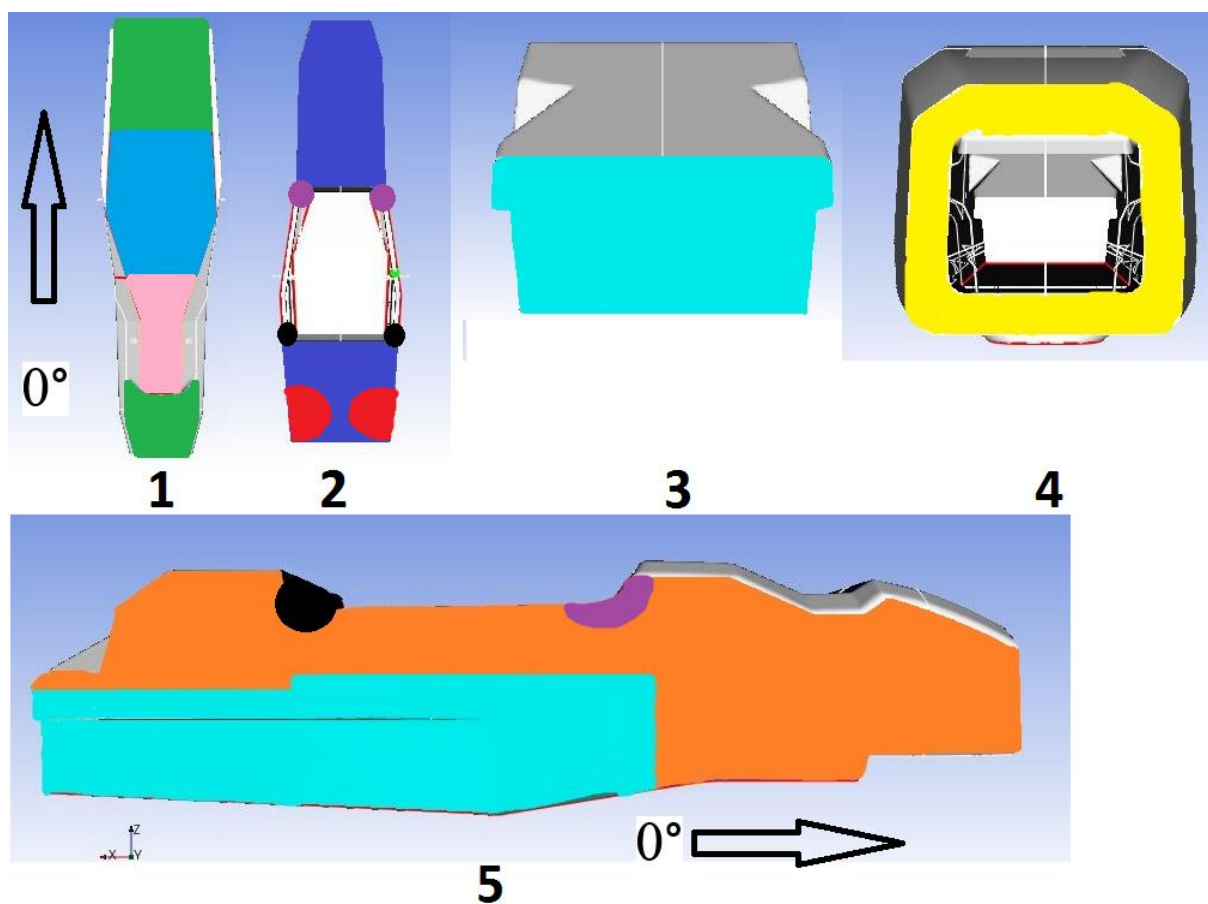
Sele 5.17. Maksimaalsed siirded kere modaalanalüüsis

5.7. Lõplik kihtide paigutus

LEM analüüsi tulemusena saadud monokokk-kere lõplik materjalikihtide paigutus on esitatud Tabelis 5.3 ning graafiliselt Seel 5.18. Lõpliku kihtide paigutuse järgi on auto monokokk-kere laminaadi ning täitematerjali mass Ansys ACP PrePost keskkonnas arvatuna 16 kg. Lisades monokokk-kere materjalide massile esimese (2 kg), tagumise (3 kg) turvakaare massi ning alumiinium kinnitusankrute massi (1,5 kg) tuleb kere kogukaaluks 22,5 kg.

Tabel 5.3. Lõplik kihtide paigutus

	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 10mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 10mm, Twill 45°/45°, UD 0° Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Vaht 25mm, Biaxial 45°/45°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Biaxial 0°/90°, Biaxial 45°/45°, Vaht 25mm, Biaxial 45°/45°, Biaxial 0°/90°, Biaxial 45°/45°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, Biaxial 45°/45°, UD 0°, UD 0°, Twill 45°/45°, Vaht 25mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0°/90°, UD 0°, Biaxial 0°/90°, Twill 45°/45°, Vaht 10mm, Twill 45°/45°, UD 0°, Twill 0°/90°
	Twill 0/90, Twill 0/90, Biaxial 45/45, Biaxial 45/45, Vaht 25mm, Biaxial 45/45, Twill 0/90



Sele 5.18. Lõpliku kihtide paigutuse skeem

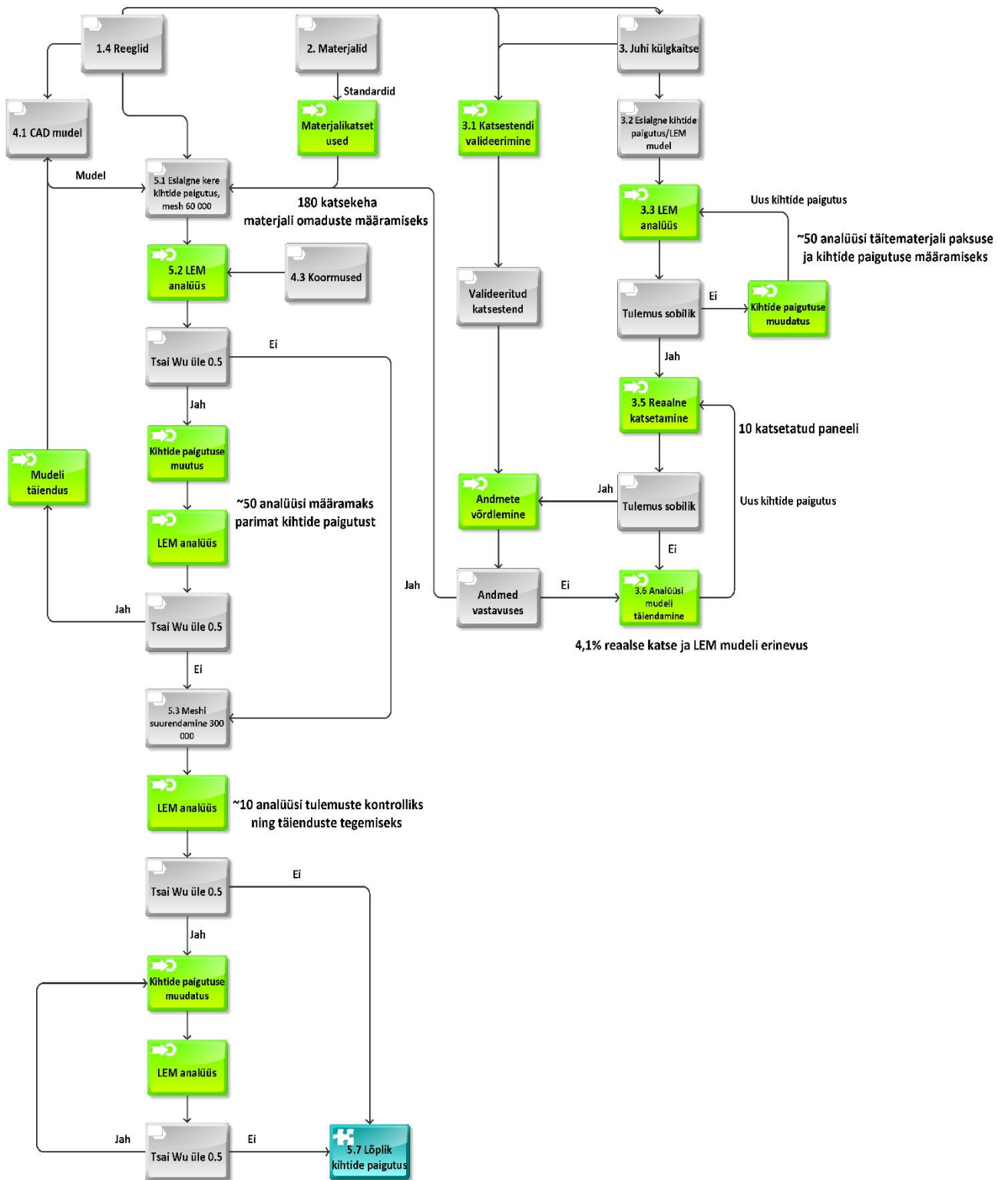
Lisaks antud lõputöös käsitletud materjali paigutusele ning kohttugevdustele, lisanduvad kerele veel vedrustuspunktide ning suuremate komponentide kinnituspunktide tugevduslapid. Materjali tugevduslappide paigutuse monokokk-kere on välja töötanud FS Team Tallinn komposiidimeeskonna liige Taavi Pärtin ning see on esitatud Tabelis 5.4.

Tabel 5.4. Monokokk-kere kinnituspunktide tugevduslapid [24]

Koht	Lapp	Mõõt, mm	Mass, g	Koht	Lapp	Mõõt, mm	Mass, g
Alumised õõtshoovad	Bi0	d190	11,1	Ülemised õõtshoovad	tw0	d130	3,1
Turvakaare kinnitused	bi45	d160	8,6	Turvavööd	tw45	d100	2,1
Akukast	tw0	d130	3,1	Stabilisaatori kinnitus	klaas00	150x150	4,8
Nookurid	tw45	d100	2,1	Roolisüsteem	vaht		
Amordid	klaas00	150x150	4,8	Monokokk-kere tagasein	klaas00	150x150	4,8
	vaht				tw45	d100	2,1
	klaas00	150x150	4,8		tw0	d130	3,1
	tw45	d100	2,1		Kokku		20
	tw0	d130	3,1				
	bi45	d160	8,6				
	bi0	d190	11,1				
	Kokku		59,4				

Koht	Lapp	Mõõt, mm	Kaal, g	Koht	Lapp	Mõõt, mm	Kaal, g
Muud kohad	Klaas00	150x150	4,8	Pedalbox	twill00	360x360	30,4
	vaht				twill450	310x300	21,8
	klaas00	150x150	4,8		klaas00	260x250	13,9
	Kokku		9,6		vaht		
					klaas00	260x250	13,9
					lapptwill45	310x300	21,8
					lapptwill45	360x300	30,4
					Kokku		132,2

KOKKUVÕTE



Sele 6.1. Projekti teostamise plokk diagramm

Käesoleva lõputöö ülesandeks oli projekteerida ning analüüsida FS Team Tallinna 2015.a hooaja autole süsinik monokokk-kere. Selle läbiviimiseks koostati esmalt plokkskeem mille abil kirjeldati graafiliselt töö erinevate etappide kulgu (Sele 6.1). Erinevate tootmismeetodite läbitöötamisel otsustati kasutada ühes tükis vormi ning infusioonimise tootmismeetodit. Protsess algas reeglite läbi töötamisega. FS-sarja reeglite läbi töötamisel ilmnnes, et komposiitstruktuuri ehitamine on tihedalt seostatud ning selle tugevused baseeruvad metallist toruraamil. Kõikide reeglites nõutud kere osade tugevus tuli tõestada võrdluses toruraami baastorudega. Järgnevas töö asendamatuks osaks oli materjalikatsetuste teostamine, läbi mille saadi materjalide tugevusandmed Ansys ACP PrePost keskkonnas simulatsioonide läbi viimiseks. Kuna materjalide tugevusandmed sõltuvad suuresti tootmismeetodist ning tootmistingimustest, siis on materjali tugevuskatsetuste tegemine oluline osa tööst. Materjalidega viidi läbi tõmbe, surve kui ka nihke katseid. Mõningate katsetuste teostamine standardi järgselt oleks osutunud projekti eelarvet silmas pidades majanduslikult ebaotstarbekaks. Sellised katsed oli näiteks materjalide z -telje sihiline tõmbe katse ning *twill* ja *biaxial* yz - ja xz -pinna sihilise nihketugevuse ja materjali *UD* yz -pinna sihilise nihketugevuse määramise katse. Mitte standardijärgsete katsete tulemused loeti rahuldavaks ning arvestati tugevusarvutuste teostamisel. Kokku teostati 180 materjali katsetust.

Kere erinevate alade materjalikihtide paigutuse projekteerimisel tuli esmalt tähelepanu pöörata juhi külgakaitse osale, kuna see moodustab suure osa kere struktuurist, kattes juhi külgakaitse ala ning akumulaatori kaitse ala. Antud paigutuse projekteerimiseks tuli esmalt luua LEM mudel ning esialgsed materjalikihtide paigutused. Katse nägi ette 500 mm*275 mm komposiitpaneeli koormamist kolme punkti painde katsega. Tulemustena hinnati paneeli läbipainet ning materjalide koormamist Tsai Wu tugevuskriteeriumi järgi. Materjali kihtide paigutuse ning täitematerjali paksuse optimeerimiseks teostati ligikaudu 50 tugevusanalüüsi. Läbi katsetati erinevaid kihtide paigutusi ning täitematerjali paksusi määramaks optimaalseimat paneeli ülesehitust. Peale LEM mudeliga sobivate materjalikihtide paigutuse leidmist, teostati reaalsed kolme punkti painde katsetused. Terve projekti vältel teostati katsetusi 10 paneeliga, leidmaks optimaalseim kihtide paigutus ning valideerimaks LEM mudelit. LEM mudeli täiendustega suudeti saavutada reaalse katse ning simulatsiooni summaarseks vaheks erinevate läbipainete punktide juures 4.1%. Täiendatud LEM mudeli abil loodi juhi külgakaitse paneelil kihtide paigutus, mis vastaks reeglites kehtestatud nõuetele. Paneelile teostati ka kolme punkti painde katse ning tulemused rahuldasiid ette määratud

tingimusi täielikult. Antud katsetused tõestasid piisavat LEM mudeli õigsust, et jätkata monokokk-kere tugevusarvutustega.

Monokokk-kere tugevusarvutuste teostamiseks tuli esmalt luua esialgne kihtide paigutus. See põhines suuresti juhi külgkaitse paneeli kihtide paigutuste katsetustel. Kere nõrkade kohtade välja selgitamiseks ning kere väändejäikuse arvutamiseks kasutati „Hub to hub“ meetodit, kus tagumised vedrustuse punktid on jäigalt kinnitatud ning esimestest teostatakse kere väänamist (ik *roll*). Selline meetod näitab hästi ära ka pingete ning koormuste kontsentratsioonid. Materjali koormuste hindamiseks kasutati sarnaselt juhi külgkaitsepaneelile Tsai Wu tugevuskriteeriumit. Materjalide koormusi vaadati algselt ühtse laminaadina ning täpsema tulemuse saamiseks hinnati materjale kihtide kaupa. Sealhulgas määrati ära kas materjali kiht on koormatud tõmbele, survele või nihkele ning mis telje sihis koormus esineb. See võimaldas määrata täpsemalt ning optimeeritumalt tugevduslappide suurust, hulka ning materjali tüüpi.

Kere üle koormatud kohtade avastamisel teostati materjalikihtide ümberpaigutus või lisati üle koormatud materjali tugevdamiseks kihte juurde. Tugevduste lisamine toimus ümarate kohttugevduslappide kujul. Järk-järgult kere materjalikihtides esinevaid ülekoormusi vähendades teostas autor ligikaudu 50 tugevusanalüüsi, enne kui saavutati kere tugevusvarusid rahuldavad tulemused. Veendumaks, et monokokk-kere konstruktsioon peab vastu ka sõidu ajal ning pidurdusel tekkivatele jõududele, rakendati distantsjõu abil kerele vastavad koormused ning teostati tugevusanalüüsid. Analüüsi tulemustest järeldati, et kere üldine laminaat on piisavalt tugev, et vastu pidada kurvi läbimisel ning sõidu ajal tekkivatele koormustele. Kere nõrkkohtadeks jäid vedrustuse kinnituse punktid, mis tavalise kihtide paigutuse korral osutusid ülekoormatuks. Nende jaoks tuli eraldi tugevdused projekteerida ning FS Team Tallinna liikme Taavi Pärtini poolt see ka teostati. Projekteeritud tugevduslappide asetus lisati monokokk-kere analüüsi mudelisse ning tulemusena vähenesid vedrustuse kinnituse punktides materjalide ülekoormused tugevusvaru piiridesse. Amortisaatori ning nookuri kinnituspunktide jaoks teostati eraldi analüüsid, kuna raami väändejäikuse analüüsi tehes on eelnimetatud punktidele mõjuvad jõud vales sihis ning väärtusega. Analüüsi tulemused olid mitte rahuldavad ainult tagumise nookuri kinnituse juures. Seda oli ka oodata, kuna antud kohas on tegu keerulise geomeetriaga, mis on tingitud vedrustuse kinemaatikast. Tagumise nookuri kinnituspunkti deformatsioon algselt ületas hinnatava turvalisuse piiri, kuna tegu oli keeruka geomeetriaga. Sirge laminaadi korral ei oleks sellise deformatsiooni väärtuse juures probleemi esinenud. Riskide vähendamiseks,

väsimusele töötavas punktis, otsustas autor lisada tagumisele nookuri kinnituspunktile tugevduslapid. Need vähendasid deformatsiooni antud punktis 25%.

Kerele teostati ka modaalanalüüs määramaks kindlaks kere vastupidavust vibratsioonile. Analüüsi käigus vaadeldi kere vastupidavust esimesele kuuele omavõnkesagedusele. Modaalanalüüsi tulemusena hinnati maksimaalseid siirdeid keres, mis jäid kõik märkimisväärselt alla materjali purunemise piiri.

Lõputöö tulemusena projekteeriti FS Team Tallinna 2015. a. hooaja vormelautole süsinik monokokk-kere materjalide paigutus. Teostatud tugevusanalüüside tulemusena saadi kere „Hub to hub“ väändejäikuseks 10151 Nm kraadi kohta, mis on võrreldes meeskonna eelmise hooaja FEST14 auto toruraamiga 3,94 korda suurem. Saavutatud väändejäikus on piisav vormelauto hea juhitavuse saavutamiseks. Kere projekteerimise tulemusena saadi monokokk-kere arvutuslikuks massiks 22,5 kg, mis on võrreldes FEST 14 toruraamiga 4,5 kg võrra väiksem. Seega saab järeldada, et antud lõputöös püstitatud ülesanne projekteerida formula student klassi vormelauto monokokk-kere sai täidetud.

Pärast lõputöö valmimist teostatakse kere reaalse väändejäikuse test ning vastavalt tulemustele väändejäikuse analüüsimise mudeli täiendamine.

SUMMARY

The topic of this thesis was to develop and analyse FS Team Tallinn's 2015 season racing car carbon fibre monocoque chassis. In order to do that, first a flow chart was composed which illustrates the development path. After comparing different production methods, it was decided to use the method which incorporates laminating a single piece monocoque with resin infusion method. The first step of the process was to go through the rules. The FSAE rules state that composite structures strength must not be less, than that of steel baseline tubular frame. All parts of the chassis, which were stated in the rulebook, were to be tested for strength and the results verified against baseline steel tubes. The next crucial part of the process was the material testing, in order to get proper material data for Ansys ACP PrePost simulation and analysis environment. Material testing is essential because the strength properties are highly dependent on the production method and conditions. Tensile, compressive and shear properties of the material were derived from these tests. If the majority of materials tests were made in accordance with ASTM standard then some of the test were conducted without using ASTM because of the financial limitations of the project. Such non-standard tests for example included tensile tests in z -axis and shear tests for materials twill and biaxial (yz, xz -axis) and material UD shear test in yz -axis were conducted without following the ASTM standard. However, these tests were considered authentic enough to be used later on in calculations. There were about 180 tests made for the material properties determination.

The first part of the layup design was the side impact protection area, because it constitutes a large part of the structure covering the driver's area and the battery, as it is also used for its protection. The first step, when designing a layup for carbon fibre panel, was to create a Finite Element Analysis (FEA) model and a preliminary layup for the panel. The test in the FEA model involved a three point bending test of a 500mm*275mm test panel. The results were evaluated by deformation and Tsai Wu criteria. There were nearly 50 iterations made to analyse the optimum layup for both the skin materials and the core. The panels tensile compressive and also shear features had to remain irrespective to the material.

When the FEA models results were acceptable, real life tests were made on the panel. About 10 panels were tested in order to find the optimum layup for the side impact area. With the real life test results, it was possible to improve the FEA model and the difference between the model and the real test reduced to 4.1%. The improved FEA model was used to create the

final layup for the side impact area, which would meet the requirements set by the FSae rules. The panel with the final layup was also subjected to three point bending and the results were sufficient. The tests showed that the FEA model was accurate enough to continue with the monocoque chassis analysis.

To analyse the monocoque chassis, the basic layup had to be made first. It was mainly based on the side impact protection layup. “Hub to Hub” test method was used in order to see the weak spots and to calculate the torsional stiffness. In the “Hub to Hub” method the rear pickup points are fixed in position and the force is applied on the front pickup points in order to roll the chassis. This method is also good for discovering weak spots in the chassis, for example the corners of the cockpit opening. Tsai Wu criteria was used to assess the structural properties of the laminate. The structural properties were at first assessed as a whole for the laminate and then ply by ply in order to get a more accurate result. Also, it was pointed out whether the laminate was subjected to tensile, compressive or shear loads, and in which direction. It enabled to define the size, amount and material type of the reinforcement patch precisely. In the areas where the laminate was overloaded, the layup was either repositioned or extra plies were added. These reinforcement patches were mainly round shaped. About 50 analysis iterations were conducted to pin out and eliminate overloads and weak spots in the monocoque chassis before the correct structural factor of safety was achieved. Another part of the analysis was to ensure that the chassis performs as required when braking and cornering. To test this, the chassis was subjected to loads that would affect the pickup points when braking and cornering. From the results it was concluded that the monocoque chassis was stiff enough to withstand the forces whilst driving. The only weak spots were the pickup points of the suspension. In order to stiffen them up FS Team Tallinn’s member Taavi Pärtin designed reinforcement patches. The designed patches were also included in the monocoque FEA model and as a result they reduced the stresses of the pickup points to an acceptable safety margin.

A separate analysis was made for the shock absorber and rocker attachments because the torsional stiffness analysis does not affect the attachment points with the correct force. Based on the results of the analysis reinforcement patches were added to the rear rocker area. These patches reduced the deformation by 25%, to a level, that it was acceptable in means of safety factors, also considering possible fatigue of materials.

A modal vibration analysis was also carried out to assess the chassis durability to vibration. The monocoque was influenced by the first six frequencies of oscillation. The first six were

chosen because these are most affected by external factors. Maximum principal strain was evaluated as a result and all of the strain values were remarkably under the breaking point value.

As an end result of this thesis, a layup for FS Team Tallinn's 2015 season car's material layup was designed. The result of "Hub to Hub" torsional stiffness analysis is the value of 10151 Nm/° which is 3.94 times more when compared to team's last season car FEST14. Greater torsional stiffness means enhanced manoeuvrability. The calculated mass of the monocoque chassis was 22.5 kg which is 4.5kg less, compared to the steel tube space frame. Therefore it can be concluded, that the task of this thesis was fulfilled.

The project continues outside this thesis to measure the real torsional stiffness of the chassis and to improve the analysis model of the monocoque chassis.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. Airex Baltek Banova. Airex C70.80 materjali tehnilised andmed [WWW] <http://www.3accorematerials.com/products/airex/airexreg-c70.html> (22.03.2015).
2. Amperracing. Tehtud tööd. [WWW] http://www.amperracing.ee/?page_id=28 04.04.2015.
3. AMZ Racing- Facebook-i leht [WWW] https://www.facebook.com/amzracing/photos_stream (03.03.2015).
4. ASTM D3039/D3039M-14. (2014) Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. DOI: 10.1520/D3039_D3039M-14. USA, Pennsylvania: ASTM International.
5. ASTM D5379/D5379M-12. (2012) Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. DOI: 10.1520/D5379_D5379M-12. USA, Pennsylvania: ASTM International.
6. ASTM D6641/D6641M-14. (2014) Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture. DOI: 10.1520/D6641_D6641M-14. USA, Pennsylvania: ASTM International.
7. Bradley, L.R., Bowen, C.R., Mcnaney, B., Johnson, D.C. Shear Properties of a Carbon/Carbon Composite With Non-Woven Felt and Continuous Fibre Reinforcement layers. – *Carbon*. 2007, (45), 2178-2187. [Online] Science Direct (15.02.2015).
8. Delfi. Täna esitletakse uut vormelit Estonia 26-9. [WWW] <http://www.delfi.ee/news/paevauudised/eesti/tana-esitletakse-uut-vormelit-estonia-26-9pildialbum?id=270409> (22.04.2015).
9. Eamets, J. FEST15 monokokk-kere CAD mudel: komposiitmaterjalide meeskonna töödokument. FS Team Tallinn, Tallinn, 2015.
10. Formula SAE seeria kodulehekülg. [WWW] <http://students.sae.org/cds/formulaseries/> (01.05.2015).

11. Formula SAE. 2015 Structural Equivalency Spreadsheet [WWW]
http://www.fsaeonline.com/content/2015_FS_AE_Structural_Equivalency_Spreadsheet_V1.2.xlsm (22.01.2015).
12. FS Team Tallinn kodulehekül. [WWW] <http://www.formulastudent.ee> (02.05.2015).
13. Global Formula Racing. Facebook-i lehekül. [WWW]
https://www.facebook.com/TeamGFR/photos_stream (05.04.2015).
14. Goswami, S., Becker, W. The Effect of Facesheet/Core Delamination in Sandwich Structures Under Transverse Loading. – *Composite Structures*. 2001, (54), 515-521. [Online] Science Direct (12.02.2015).
15. Groenwold, A.A., Haftka, R.T. Optimization With Non-Homogeneous Failure Criteria Like Tsai-Wu for Composite Laminates. – *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2006, (32), 183-190. [Online] Springer Link (02.02.15).
16. Gurit. SE84LV preperg materjali tehnilised andmed. [WWW]
<http://www.gurit.com/files/documents/se-84lvv18pdf.pdf> (02.03.2015).
17. Han, L., Piggot, M.R. Tension-Compressoin and Iosipescu Tests on Laminates. – *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2002, (33), 35-42. [Online] Science Direct (14.12.2014).
18. Hearn, G., Testa, R. Modal Analysis for Damage Detection in Structures – *Journal of Structural Engineering*. 1991, (117), 3042-3063. [Online] Asce Library (22.04.2015).
19. Jürisson, A. FEST15 vedrustuse jõud: vedrustuse meeskonna töödokument. FS Team Tallinn, Tallinn, 2015.
20. Lend, R. FEST10 Formula Student klassi võistlusauto raami projekteerimine: magistritöö. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2010.
21. Parts, S. FEST14 raami CAD mudel: šassii meeskonna töödokument FS Team Tallinn, Tallinn, 2014.
22. Pichett, A. Modelling Damage and Failure in Carbon/Epoxy Non Crimp Fabric Composites Including Effects of Fabric Pre-Shear. – *Composites Part A: Applied*

Science and Manufacturing. 2006, (37), 1983-2001. [*Online*] Science Direct (03.02.2015).

23. Pro Set. Pro Set INF 211 materjali tehniline info. [WWW]
http://www.prosetepoxy.com/PDF/INF-114_INF-211.pdf (26.02.2015).
24. Pärtin, T. FEST15 vedrustuse reaktsiooni jõu ning tugevduslappide analüüs: komposiitmaterjalide meeskonna töödokument. FS Team Tallinn, Tallinn, 2015.
25. SAE International. 2015 Formula SAE Rules. [WWW]
http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf (02.02.2015).
26. 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. Lk 4-39—4-73; 4-89—4-99.

LISAD

Lisa 1 Materjali omaduste tabel [26, 4-39–4-73].

Materjal		<i>Twill</i>	<i>UD</i>	<i>Biaxial</i>
	Telg	Väärtus	Väärtus	Väärtus
Youngi moodul	X	48,78 GPa	124,73GPa	68,47 GPa
	Y	48,78 GPa	7000 MPa	68,47 GPa
	Z	12627 MPa	10678 MPa	11644 MPa
Poissoni tegur	XY	0,04	0,34	0,32
	YZ	0,3	0,5	0,03
	XZ	0,29	0,34	0,03
Nihkeelastsusmoodul	XY	8000 MPa	4000 MPa	2850 MPa
	YZ	2700 MPa	3000 MPa	2500 MPa
	XZ	2700 MPa	4000 MPa	2500 MPa
Tõmbetugevus	X	766 Mpa	1305,7 MPa	758 MPa
	Y	766 MPa	20,9 MPa	758 MPa
	Z	19 MPa	9 MPa	11,3 MPa
Survetugevus	X	307,6 MPa	290,6 MPa	344,5 MPa
	Y	307,6 MPa	72 MPa	344,5 MPa
	Z	150 MPa	72 MPa	150 MPa
Nihketugevus	XY	78,4 MPa	45,9 MPa	65,4 MPa
	YZ	7,9 MPa	6,2 MPa	7,7 MPa
	XZ	7,9 MPa	45,9 MPa	7,7 MPa
Tõmbe deformatsioon	X	0,0135	0,11	0,0113
	Y	0,0135	0,003	0,0113
	Z	0,001	0,003	0,0038
Surve deformatsioon	X	0,0208	0,0122	0,0232
	Y	0,0208	0,0163	0,0232
	Z	0,0134	0,0163	0,0129
Nihke deformatsioon	XY	0,136	0,1	0,12
	YZ	0,012	0,0428	0,007
	XZ	0,012	0,1	0,007