



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Masinaehituse instituut  
Tootmistehnika õppetool

Kood MES70LT

*Argo Vooremaa*

## **Jääpurjeka masti tugevusarvutus ning täiustamine**

Autor taotleb  
Tehnikateaduse magistri  
Akadeemilist kraadi

Tallinn  
2013

## 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.

.....allkiti

TTÜ masinaehituse instituut

Tootmistehnika õppetool

## MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2013/2014 aasta 2 semester

Üliõpilane: Argo Vooremaa 104847  
Õppekava: MATM02/09 - Tootearendus ja tootmistehnika  
Eriala: Tootmistehnika  
Juhendaja: Henrik Herranen  
Konsultandid: Vaiko Vooremaa

### MAGISTRITÖÖ TEEMA:

*Jääpurjekate tugevusarvutus ning täiustamine*  
*Stength Calculation and Improvement of Iceboat Mast*

### Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülessande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Komposiitmaterjalide alane info otsing	10.05.14
2.	Materjali katsete sooritamine	20.03.14
3.	Tugevusarvutuste sooritamine ja parendamine	20.04.14
4.	Dokumenteerimine	22.05.14

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Olemasoleva masti analüüs, uue masti väljatöötamine vastavalt analüüsile ja materjali katsetele

Täiendavad märkused ja nõuded:

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada hiljemalt 12.05.14

Töö esitamise tähtaeg 27.05.14

**Üliõpilane** Argo Vooremaa /allkiri/ Kuupäev

**Juhendaja** Henrik Herranen /allikiri/ Kuupäev

# SISUKORD

Magistritöö ülesanne.....	3
sisukord.....	4
eessõna.....	6
1. sissejuhatus.....	7
1.1 Ettevõttest.....	7
1.2 DN mast.....	7
1.3 Tähistus.....	8
1.4 Komposiitmaterjalist toote projekteerimine.....	9
1.5 Katsetamine.....	10
1.6 Materjali katsetamise maatriksid.....	11
1.7 Tarkvara.....	12
1.8 Ülesanne.....	13
2. Masti valmistamine.....	14
2.1 Toote geomeetria.....	14
2.2 Tootmisprotsessi kirjeldus.....	14
3. Katsetamine.....	17
3.1 Materjalikatsetused.....	17
3.2 Materjaliomadused.....	19
3.3 Pikkeomadused.....	20
3.4 Nihkekatsed.....	24
3.5 Survekatsed.....	27
3.6 Muud materjaliomadused.....	31
4. Tugevusarvutused.....	34
4.1 Tugevusteooria valik.....	34

4.2	Masti mudeli kontrollimine .....	37
4.3	Masti tugevusanalüüs .....	44
4.4	Masti täiustamine .....	47
4.4.1	Mudel 1 .....	48
4.4.2	Mudel 2 .....	50
4.5	Mudelite võrdlus .....	56
5.	Edasine tegevuskava .....	58
	Kokkuvõte.....	59
	Summary .....	62
	Kirjanduse loetelu .....	65
	Lisa 1 .....	66
	Lisa 2.....	71
	Lisa 3.....	76

## EESSÕNA

Antud töö on välja kasvanud AS E. & V. Foils ettevõtte soovist konstrueerida uus mast. Ettevõtte juhataja Vaiko Vooremaa soovil sai kätte võetud ülesanne parendada olemasolevat jääpurjeka masti. Töös kasutatud materjali katsekehad on valmistatud kõik AS E. & V. Foils ettevõttes ja katsetatud Tallinna Tehnika Ülikooli mehaanika ja metroloogia laboris. Katsete sooritamisel oli abiks Henrik Herranen, kes tutvustas masinaid ja protseduure, kuidas valmistada katsed ette.

Autor soovib tänada juhendajat Henrik Herraneni ja VaikoVooremaad abi eest, mida nad osutasid töö valmistamisel.

# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1 Ettevõttest

AS E. & V. Foils on 1992. aastast tegutsev väike ettevõte, mis tegeleb purjepaatidele komponentide tootmisega. Ettevõtte toodang on suunatud põhiliselt põhja Euroopa turule, kuid samuti läheb osa toodangust Saksamaale, Hispaaniasse ja Hollandisse. Jääpurjetamise varustus on toodetud sama kaua, kuid alles viimastel aastatel on saanud selle tootmine suurema hoo sisse.

Põhilisteks kasutatavateks materjalideks on puit ning komposiidid. Aastate pikkuse kogemuse ja tuhandete toodete valmimise järel on välja töötatud sobivad tootmis võtted ning meetodid, et tagada konkurentsivõimeline hind. Suur osa tööst on käsitöö, mis on paljuski tingitud väike seeria tootmisest ning toodete keerukusest. Samuti mõjutab ka toodete suur hulk ja orienteeritus kliendi soovidele.

## 1.2 DN mast

DN paadiklass on maailma kõige populaarsem jääpurjekas. Tegu on ühele inimesele mõeldud väikese purjekaga, mille purje pindala on 7 m<sup>2</sup>. Purjeka suurus ning suhteline odavus teevad selle väga kättesaadavaks ning põnevaks. DN-i ajalugu algab 1950ndatest ning klass areneb siiaani, saades iga aasta määruste muudatusi, et teha paati kas kiiremaks või kasutaja sõbralikumaks. Alates 1990ndate algusest on lubatud kasutada täis komposiitmaterjalist maste. Sellest ajast saati on paadi kiirused kasvanud iga aasta ning alles nüüd on saavutatud stabiilne platoo, kus võib öelda, et arendus on pidama jäänud.

Mast on paadil mõeldud purje üleval hoidmiseks. Standardselt on paatide mastid vertikaalsed, kuid DN-i puhul on see natukene kallutatud paadi suhtes. See on tingitud purje kujust ning sellest, mis tundub sõitjale kõige parem. Mast on toetatud ühest otsast liigendiga, mis lubab sellel vabalt pöörelda. Masti hoiavad püsti kolm trossi, millest üks kinnitub paadi vööri ehk esi otsa ning teised kaks kummasegi külge, põiktala otstesse.



Sele 1.1.DN jääpurjekas

### 1.3 Tähistus

Antud lõputöös on kasutatud lühendatud märgistust komposiitmaterjalist kihis kiudude ning laminaatide kihtide paigutuse kohta. Nende kokkuleppeline tähistus töös on toodud alljärgnevalt. Laminaadi kordinaattelgede jaotus on kogu töö piires alati sama. Koordinaatsüsteemi x- ja y-telg on alati laminaadi tasandis ning kirjeldavad laminaadi kõige tugevamat telge (x-telg) ning sellega ristuvat telge (y-telge). Z-telg on alati elemendi pinna normaali suunaline vaadeldavas pinnapunktis.

Nurksulgudes asuv info kirjeldab kiudude orientatsiooni ning jaotust kihis:  $[0^\circ/90^\circ 70\%/30\%]$  – tähistab, et kogu kihtidest 70% on x-teljega  $0^\circ$  nurga all ning ülejäänud 30% on y-teljega  $0^\circ$  nurga



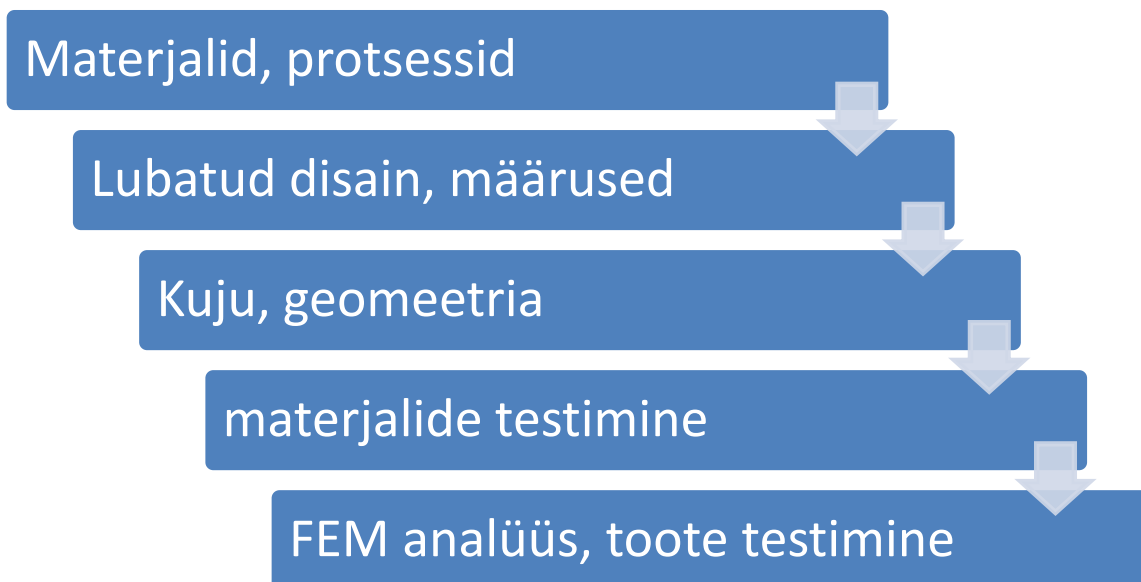
all. Kui protsendid on jäetud näitamata ja kiud jooksevad kahes sihis, siis on tegu võrdse kihiga, mille kiudude osakaal on 50/50 %.

Ümarsulgudes asuv info kirjeldab kihtide x-telje nurka toote x-telje suhtes. (45°/0°/45°) – tähistab, et laminaadi pealmine kiht on 45° nurga all toote x-telje suhtes, keskmine kiht on 0° ning alumine samuti 45° nurga all.

## 1.4 Komposiitmaterjalist toote projekteerimine

Komposiitmaterjalist toodete loomisel valmib materjal ning toode samaaegselt. Sellest tingitult on lõpptoote valmistaja otseselt materjali eest vastutav. Tootja tootmisprotsess ning selle kvaliteet defineerivad valmiva materjali kvaliteedi. Üldine komposiitmaterjalist toote väljaarendamise protsess on esitatud seel 1.2. Komposiitmaterjali projekteerimise juhised on pärit allikast [1], kasutades ploki meetodit.

Komposiitmaterjalist toote valmistamine algab materjali valikuga. Materjali valik on väga lai ning materjalid erinevad üksteisest radikaalselt. Toote disain lõpeb üldjuhul täis mõõtmetes toote katsetamisega.



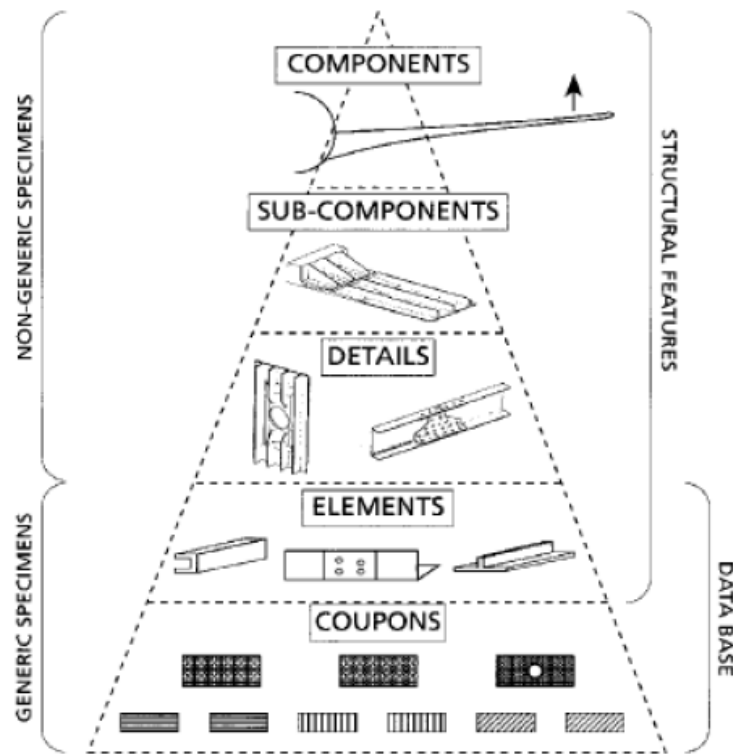
Sele1.2. Komposiitmaterjalist toote väljaarendamine

## 1.5 Katsetamine

Komposiitmaterjalide katsetamise meetoodika on pärit käsiraamatust [2]. Komposiitmaterjalidest toodete konstrueerimine puhtalt projekteerimise ja analüüsi alusel on väga riskantne. Konstrueerimisega paralleelselt tuleks katsetada tulemuste vastavust prognoosile. Paralleelne katsetamine on vajalik, sest erinevalt isotroopsetest materjalidest on komposiitmaterjalide tõrkumiseks väga palju rohkem allikaid.

Struktuuri tasemete alusel jaotatakse katsetamine järgnevalt:

1. Komponentid
2. Kiht
3. Laminaat
4. Struktuuriosa
5. Alamstruktuur



Sele1.3. Katsetamise püramiid

Selles töös optimeeritava masti katsetamine toimub kolme astmeliselt:

1. Laminaadi tasemel
2. Alamstruktuuri tasemel
3. Kogutoote tasemel

## 1.6 Materjali katsetamise maatriksid

Tabel 1.1 Tüüpiline komposiitmaterjali katsemaatriks [2]

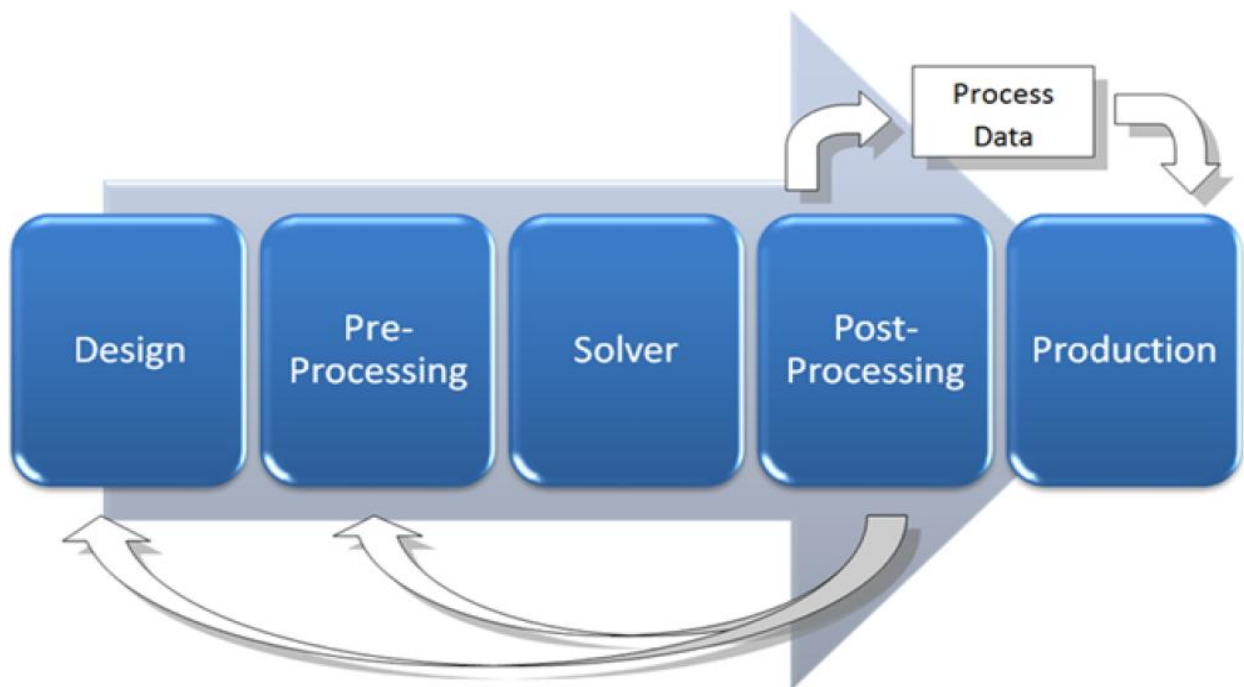
Test	Number of Specimens			Evaluation Emphasis
	CTD	RTA	ETW	
Lamina:				
0°Tension	3	3	3	Fiber
0°Compression		3		Fiber/matrix
±45°Tension		3		Fiber/matrix (0°/90°shear – lamina) (±45° - laminaate)
Laminate				
OpenHoleCompression		3	3	Stress riser
OpenHoleTension		3		Stress riser
BoltBearing		3		Bearing
CompressionafterImpact		3		Impactdamage

Katsemaatriksi mõtte on tuvastada võtme mehaanilised omadused või puudujäägid uue materjali süsteemi loomisel, samal ajal hoides katsetamise vajaduse miinimumi lähedal. Kihhi tasemel katsetades saadakse andmed, mida on võimalik kasutada klassikalise elastsusteooria meetoditega. Laminaadi tasemel katsed annavad info materjali mittepidevusega seotud

probleemide kohta. Selleks võivad olla avad, löögivigastused või muud. Keskkonna mõjusid hinnatakse kihi tõmbekatse ja avaga laminaadi survekatse põhjal. Tabelis 1.1 on toodud tüüpiline mehaaniliste katsete katsemaatriks [2].

## 1.7 Tarkvara

Töös on kasutatud kahte simulatsioonide sooritamiseks kahte tarkvara, ANSYS ja ACP. ACP on lisamoodul ANSYS Workbench tarkvarale, mis võimaldab lihtsustada komposiitidega töötamist. Üldine projekteerimise protsess on toodud seel 1.4. ACP ehk ANSYS CompositePrePost on oma ette moodul, mida kasutatakse eel- ja järel töötluseks. Simulatsiooni sooritamiseks on kasutatud ANSYS Workbench tarkvara.



Sele 1.4. Disaini protsess [9]

Eristatakse nii 2D kui 3D arvutusi. Üldiselt on 2D elemendid eelistatud ning 3D elemente kasutatakse juhul kui on vajalik kihtidevahelisi pingeid täpsemalt modeleerida. 3D elementide arvutusi kontrollitakse 2D elementidega sooritatud arvutustega. Masti simuleerimiseks piisab 2D

elementidest. Arvutuste kiirendamiseks ja liigse keerukuse vältimiseks on kasutatud 2D koorikelemente. ACP väga suureks eeliseks on see, et ta suudab arvutada kihtide vahelisi pingeid, kasutades 2D elemente. Sellega on võimalik vältida arvutuslikult mahukate 3D elementide kasutamist [9].

## 1.8 Ülesanne

Seoses paari masti purunemisega võistlus tingimustes on AS E. & V. Foils otsustanud üle vaadata oma masti laminaadi ning välja töötada vastupidavama. Jääpurjetamise tarvikute müük põhineb puhtalt emotsiooni peal ning üks kõik kui häid tulemusi mastiga sõidetakse, on seda raske müüa kui see puruneb.

Viimastel aastatel on hakanud levima Ameerika Ühendriikidest nii nimetatud 9 tolli katse, millega tootjad kinnitavad oma masti kvaliteeti. Sarnast asja on üritatud sisse viia ka Euroopas, kuid siin on see  $\frac{1}{4}$  meetri katse. Katse iseloom on täpselt kirjeldatud hiljem. Lihtsustatult on tegu painde katsega tootmises, mis peaks kinnitama masti vastu pidamise. Ettevõttes on proovitud ühte masti katsetada, mille käigus oli kuulda komposiidile iseloomulikke kiudude purunemist.

Sellest lähtuvalt on ettevõttel eesmärk luua uus laminaat, mis oleks samade painde omadustega, kuid peaks testi vastu. Sellele lisaks on soov suurendada süsinikku hulka mastis. See on vajalik selleks, et mast reageeriks kiiremini tuule tugevuse muutustele.

## 2. MASTI VALMISTAMINE

### 2.1 Toote geomeetria

Masti geomeetria on määratletud rahvusvaheliste ehitismäärustega, mis on toodud iga aasta ilmuvas aasta raamatus [4]. Antud töö seisukohalt on olulised masti lubatud ristlõike ja pikkusmõõtmed. Klassi määruised näevad ette nii nimetatud kasti reegli, see tähendab ristküliku kujulist ala, mille sisse peab mast ära mahtuma, kuju ei ole ette määratud.

Tabel 2.1. Masti mõõtmed [4]

	Maksimum, mm	Miimum, mm
Masti kogupikkus	4876,8	4724,4
Masti ulatus ette taha, allpool 3238,5 mm	101,6	88,9
Masti ulatus ette taha, ülevalpool 3238,5 mm	101,6	50,8
Külje peale ulatus, allpool 3238,5 mm	63,5	50,8
Küljepeale ulatus, ülevalpool 3238,5	63,5	28,5

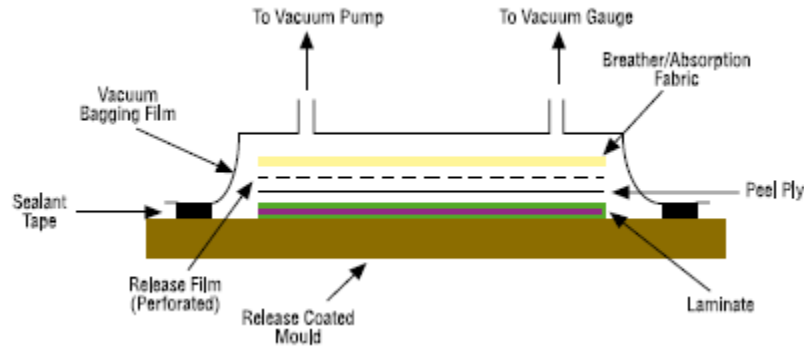
Tabelis 2.1 on toodud üldised masti mõõtmed. Määrused piiravad mõningaid asju veel, mis antud töö seisukohalt ei oma tähtsust nagu näiteks kaal ja masti raskuskese.

### 2.2 Tootmisprotsessi kirjeldus

Siiamaani on ettevõtte valmistanud maste vaakum koti meetodit, mis on käsitsi lamineerimise edasiarendus, kuid tihendamiseks kasutatakse survet. Laminaat märjatakse käsitsi ning asetatakse vormi, kus see sulgetakse kilega. Õhk imetakse vaakum pumba abil sealt välja ning kuni ühe atmosfäärine surve on saavutatav, et tihendada laminaati [5].

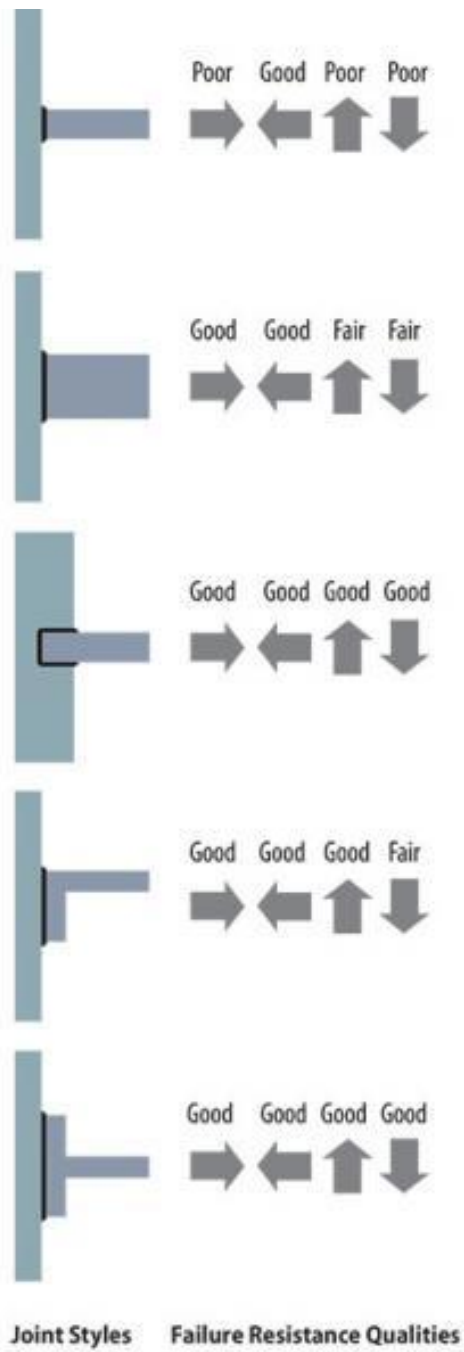
Põhilisteks eelisteks on:

- Kõrgem kiu sisaldus laminaadis kui käsitsi lamineerimisel
- Väiksem tühimike hulk
- Parem laminaadi läbiimbumine vaigust, seoses survega, millest üleliigne eraldatakse imavasse materjali



Sele 2.1. Vaakum koti meetod [5]

Mastid valmistatakse kahest poolest, esimesest ja tagumisest, mis peale vaigu kõvenemist liimitakse kokku, kasutades selleks eraldi ribasid. Peale kõvenemist liimimisel on vajalik silmas pidada mõningais asju, mis on kokkuvõtlikult toodud seel 5. Kuna puudub side erinevate kiudude vahel on vajalik, et kogu koormuse kannab üle vaik. Vaigu tugevus on otseses sõltuvuses liimitavast pindalast. Antud mastis on lisa ribade ja masti pinna vahel olev vaik põhiliselt nihke pinget all, üldiselt kannatab vaik nihke pinget hästi [11].



Sele 2.2. Sekundaarliite tugevus [11]



### 3. KATSETAMINE

#### 3.1 Materjalikatsetused

Materjali katsete läbiviimine on esitatud kokkuvõtlikult tabelis 3.2.  $[0^\circ/90^\circ]$  ja  $[\pm 45^\circ]$  kangad on valmistatud sedasi, et selle omadused kahe peatasandi suunas on võrdsed. Selle tõttu on võimalik selliseid materjale testida ainult ühes sihis. Surve katsed on sooritatud ainult ühes peatasandis selle tõttu, et ühetelgsetel materjalidel on teises sihis surve tugevus maatriksi survetugevus ja see on võetud kirjandusest [1].

Töös on katsetatud nelja erinevat materjali, mis on toodud tabelis 3.1, samas tabelis on toodud ka edaspidised nimetused materjalidele. Katsetatud materjalid on kõik, mida on seni kasutatud mastide tootmisel ning millega töötamise kogemus ja vilumus on saavutatud.

Tabel 3.1. Materjalide nimetused

$[0^\circ]$ 300g/m <sup>2</sup> süsinik	$[0^\circ]$ 200g/m <sup>2</sup> klaaskiud	$[0^\circ/90^\circ]$ 200g/m <sup>2</sup> süsinik	$[\pm 45^\circ]$ 300g/m <sup>2</sup> klaasriie
Materjal 1	Materjal 2	Materjal 3	Materjal 4

Kõik materjali katsetused on läbi viidud Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika katselaboris.

Tabel3.2. Sooritatud materjalikatsetused

Katsete tüüp	Katsete arv	Määratavad omadused
Materjal 1		
0° Tõmbekatse	7	$E_x, \nu_{xy}, \sigma_x$
90° Tõmbekatse	4	$E_y, \nu_{yx}, \sigma_y$
±45° Nihkekatse	6	$G_{xy}, \tau_{xy}$
0° Survekatse	10	$E^{\text{chord}}, \sigma_x^c$
Materjal 2		
0° Tõmbekatse	7	$E_x, \nu_{xy}, \sigma_x$
90° Tõmbekatse	6	$E_y, \nu_{xy}, \sigma_y$
±45° Nihkekatse	5	$G_{xy}, \tau_{xy}$
0° Survekatse	10	$E^{\text{chord}}, \sigma_x^c$
Materjal 3		
0° Tõmbekatse	7	$E_{x,y}, \nu_{xy}, \sigma_{x,y}$
±45° Nihkekatse	4	$G_{xy}, \tau_{xy}$
0° Survekatse	10	$E^{\text{chord}}, \sigma_{x,y}^c$
Materjal 4		
0° Tõmbekatse	6	$E_{x,y}, \nu_{xy}, \sigma_{x,y}$
±45° Nihkekatse	6	$G_{xy}, \tau_{xy}$
0° Survekatse	10	$E^{\text{chord}}, \sigma_{x,y}$

## 3.2 Materjaliomadused

Edaspidistes arvutustes on korduvalt kasutatud määramatuse komponentide hindamiseks valemeid 3.1 ja 3.2.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n x_i) \quad (3.1)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

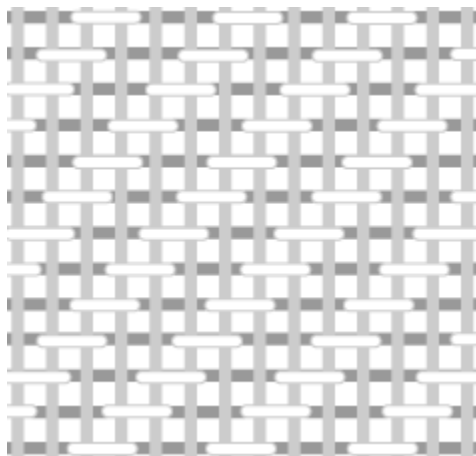
Kus  $s_{n-1}$  – omaduste standardhälve

$\bar{x}$  – standardhälve

$n$  – detailide arv

$x_i$  – mõõdetud väärtus.

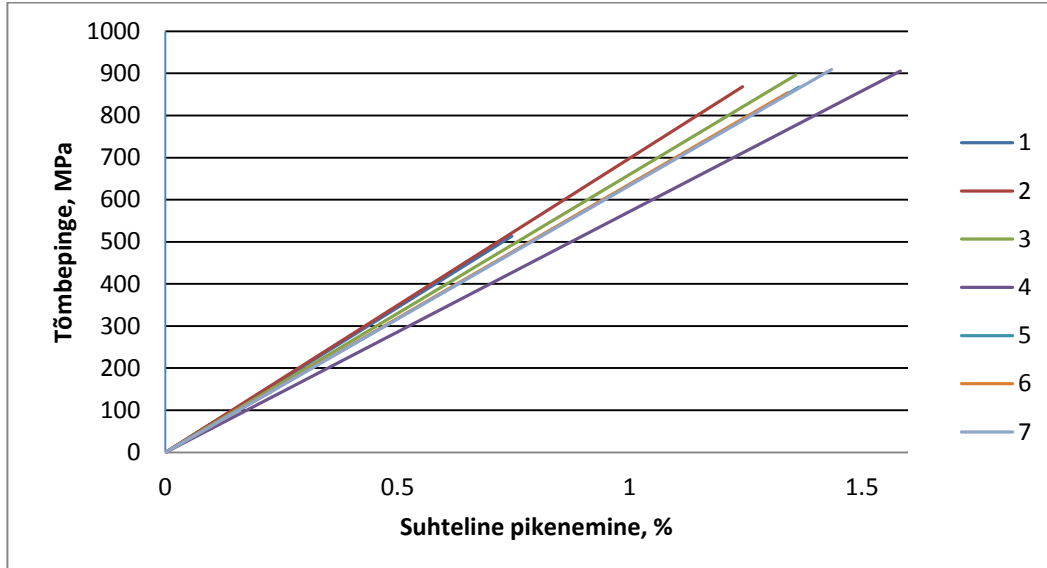
Materjal 3 on punutud nii (sele 3.1), et selle omadused on x ja y sihis võrdsed. Materjal 4 on valmistatud kahes ühetelgsest kangast, mis on õmmeldud kokku omavahel, sealjuures moodustavad õmmeldud kihid täisnurga.



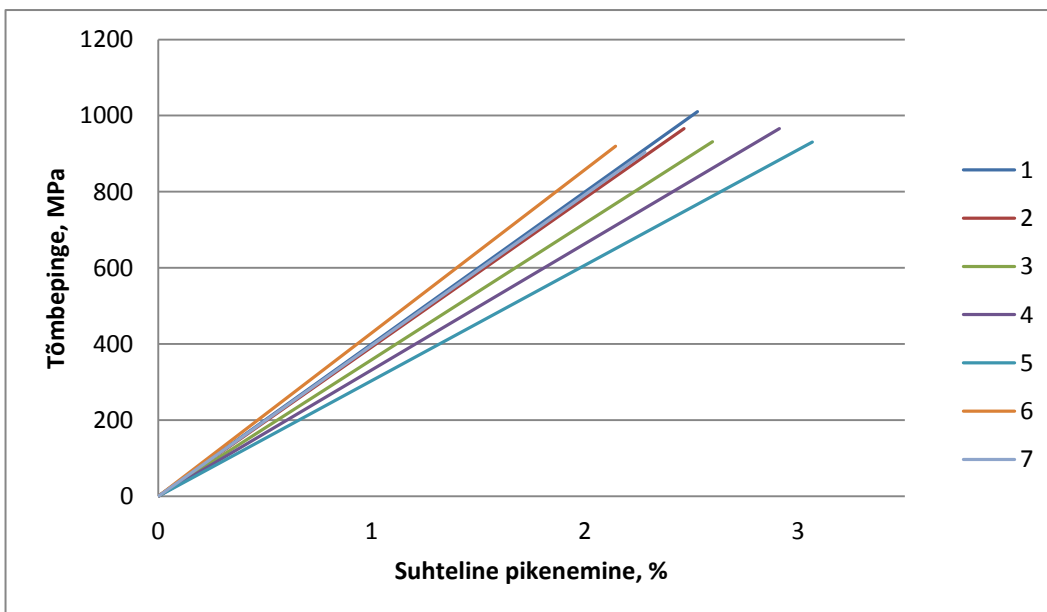
Sele 3.1. Materjal 3 kanga punumismuster

### 3.3 Pikkeomadused

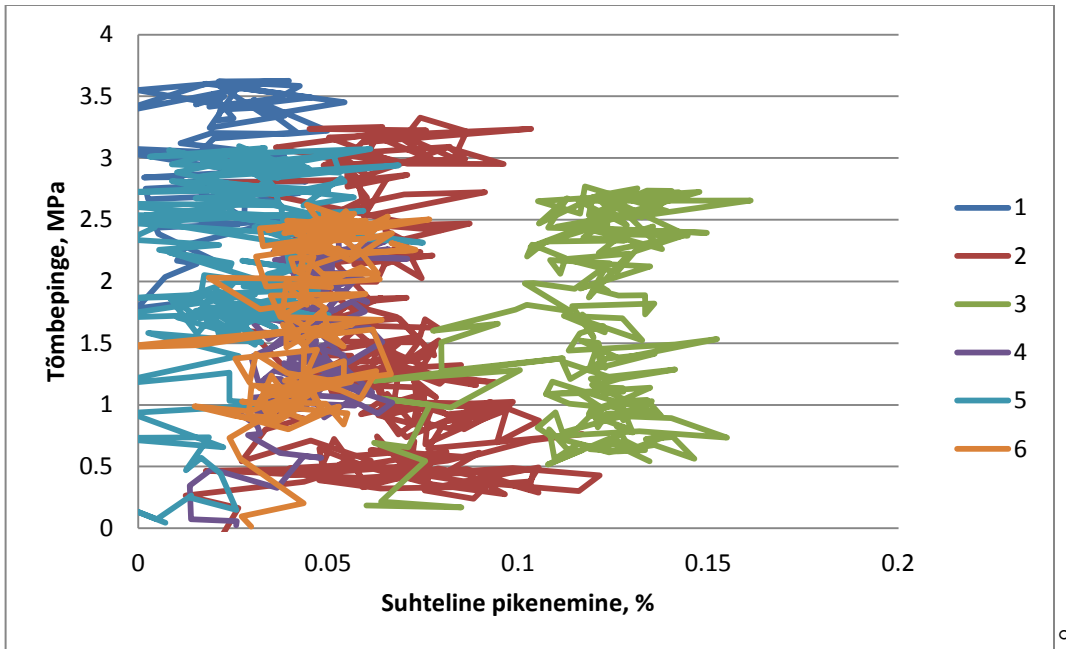
Tõmbekatsed on sooritatud standardi ASTM D3039 järgi. Tõmbamise kiiruseks oli 2 mm/min. Tõmbekatse põhjal arvutatakse materjali elastsusmoodul, Poissoni tegur ja maksimaalne pinge. Tõmbekatsete tulemused on toodud allpool seledel.



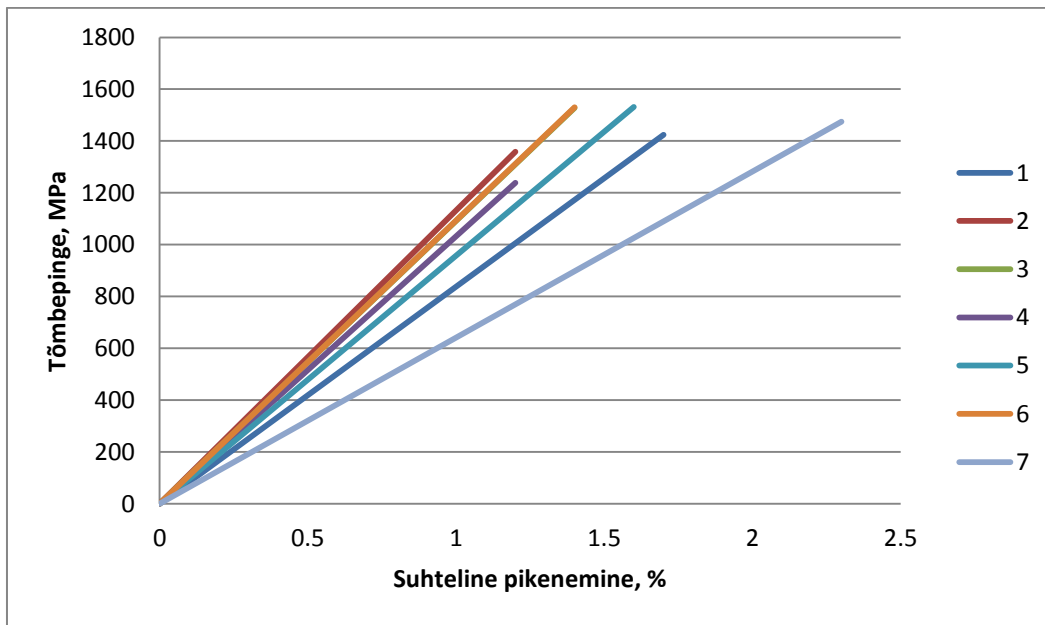
Sele 3.2. Materjal 1 tõmbediagramm



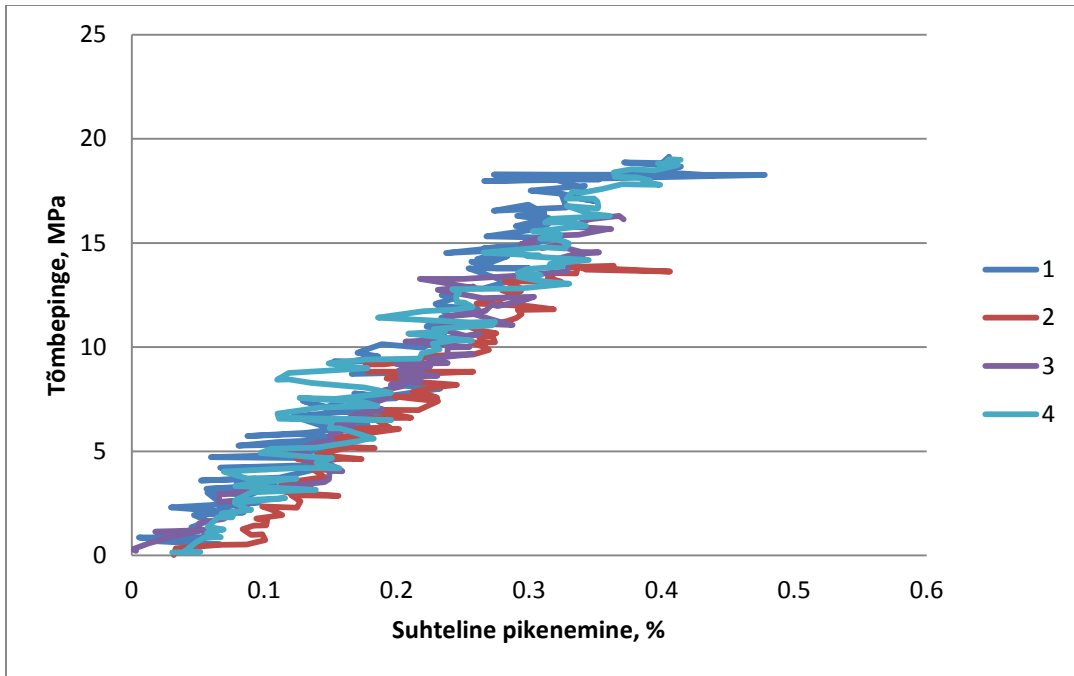
Sele 3.3. Materjal 2 tõmbediagramm 0



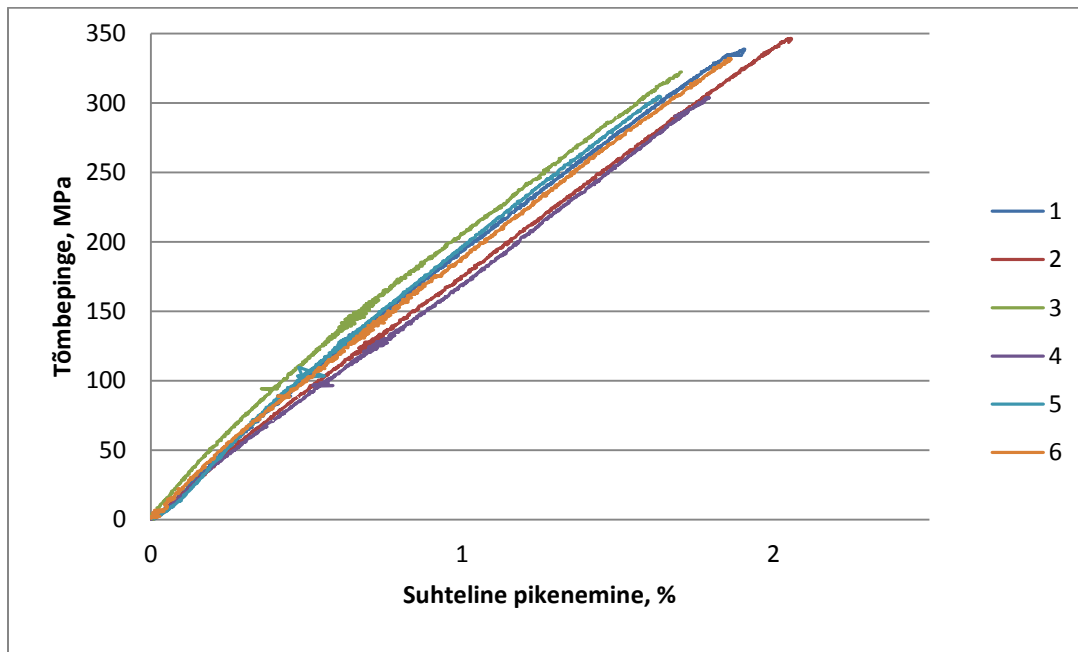
Sele 3.4. Materjal 2 tõmbediagramm 90° kiu sihi suhtes



Sele 3.5. Materjal 3 tõmbediagramm 0°



Sele 3.6. Materjal 3 tõmbediagramm 90° kiu sihi suhtes



Sele 3.7. Materjal 4 tõmbediagramm

Elastsusmooduli arvutamise valemid on järgmised:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.3)$$

Kus  $\Delta\sigma$  – tõmbepingete vahe,

$\Delta\epsilon$  – suhtelise deformatsioonide vahe,

E – elastsusmoodul.

Elastsusmooduli määramiseks on ASTM D3039 standardis ette nähtud vahemik  $\epsilon=(0,1\%;0,3\%)$ . Seda järgiti elastsusmooduli arvutamisel. Materjalide puhul, mis purunevad enne  $\epsilon=0,6\%$ , valiti vahemikuks 25%...50% maksimaalsest pikenemisest.  $[0^\circ]$ , mida tõmmati  $90^\circ$  all oli  $\epsilon=(0,1\%;0,2\%)$ .

Tõmbetugevus:

$$F = \frac{p^{max}}{A} \quad (3.4)$$

Tõmbepinge:

$$\sigma_i = \frac{p_i}{A} \quad (3.5)$$

Kus  $p^{max}$  – maksimaalne koormus, enne purunemist,

A – katsekehade keskmine ristlõike pindala,

$p_i$  – koormus i-nda punkti juures,

$\sigma_i$  – tõmbepinge i-nda punkti juures,

F – tõmbetugevus.

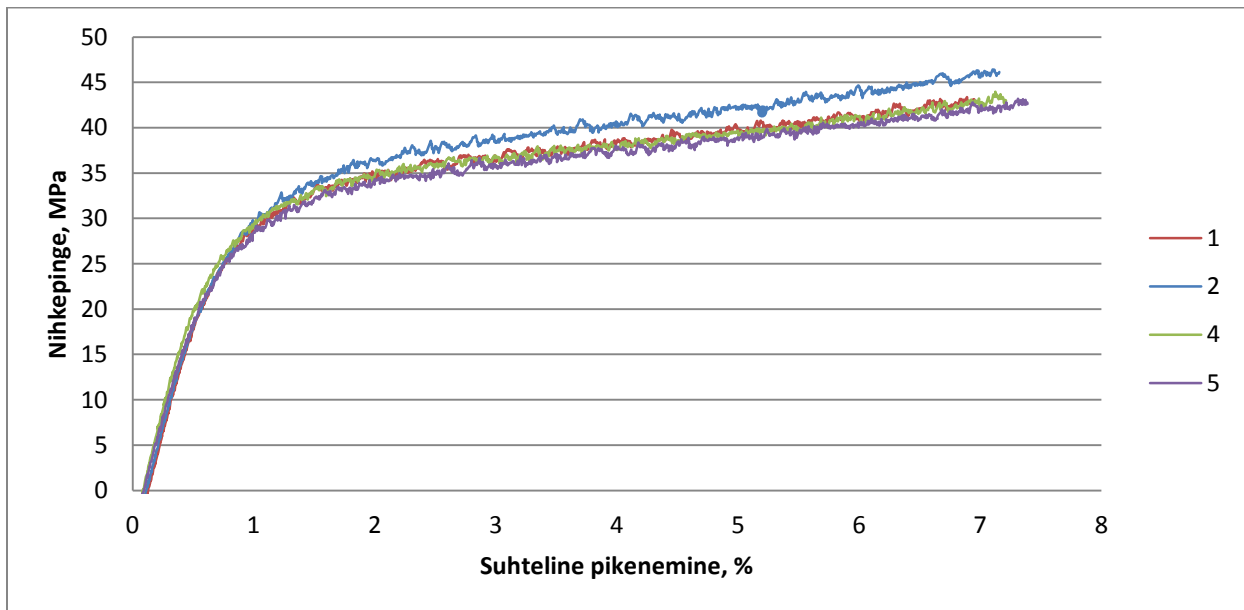
Tabelis 3.3 on toodud katsetatud materjalide elastsusmoodulid x ja y telje sihis ning tõmbetugevused x ja y telgede sihis. Arvutusteks kasutati MS Exceli tabelarvutus tarkvara.

Tabel 3.3. Tõmbekats tulemused

Materjal	$E_x$ , GPa	$\sigma_x$ , MPa	$E_y$ , GPa	$\sigma_y$ , MPa
Materjal 1	64,9±3,6	883,6±23,0	64,9±3,6	883,6±23,0
Materjal 2	43,5±4,2	946,7±36,3	3,0±0,3	3,0±0,5
Materjal 3	116,2±10,1	1447,2±96,9	4,99±0,45	17,3±2,2
Materjal 4	21,7±2,0	324,6±17,7	21,7±2,0	324,6±17,8

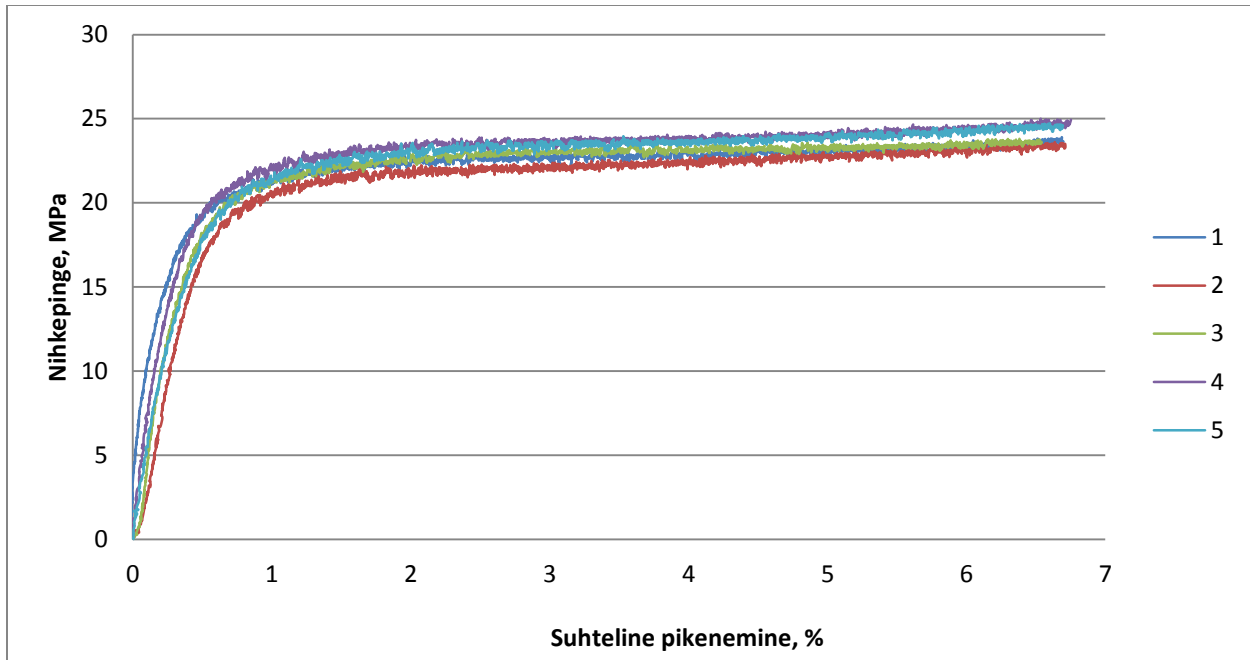
### 3.4 Nihkekatsed

Nihkeomaduste mõõtmiseks kasutati ASTM D3518 standardit. Nihkekatses tõmbamise kiirus on valitud ASTM D3039 standardi järgi 2 mm/min. Standard ASTM D3039 defineerib katsesamistingimused ASTM D3518 standardile.

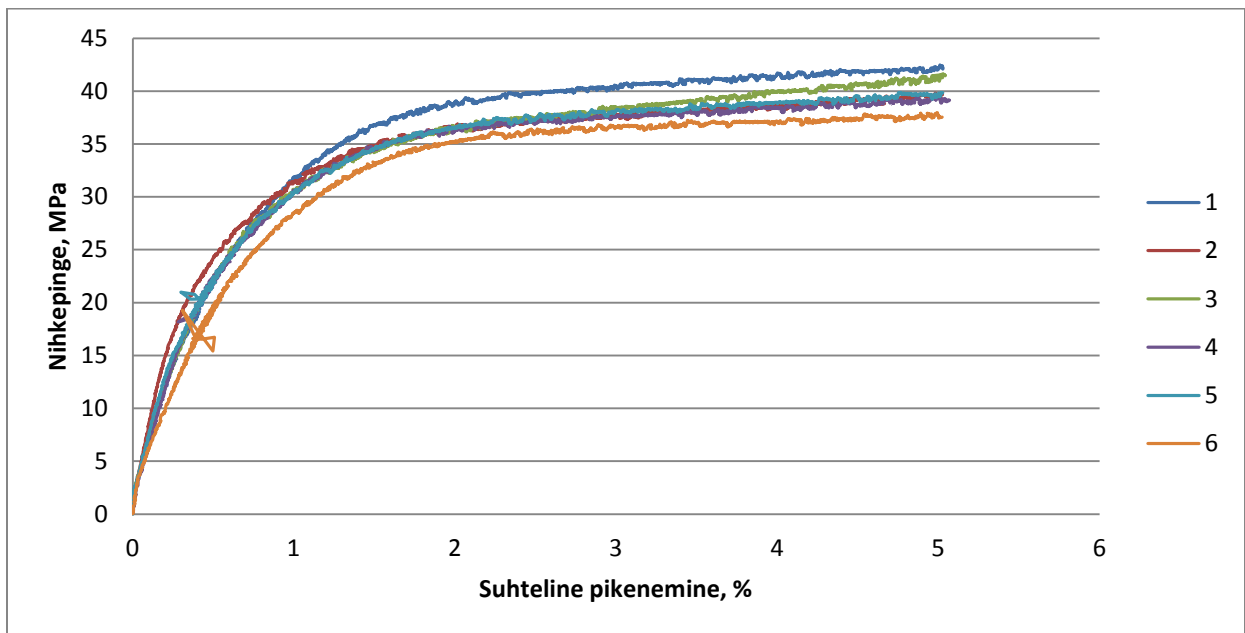


Sele 3.8 – Materjal 1 nihkediagramm

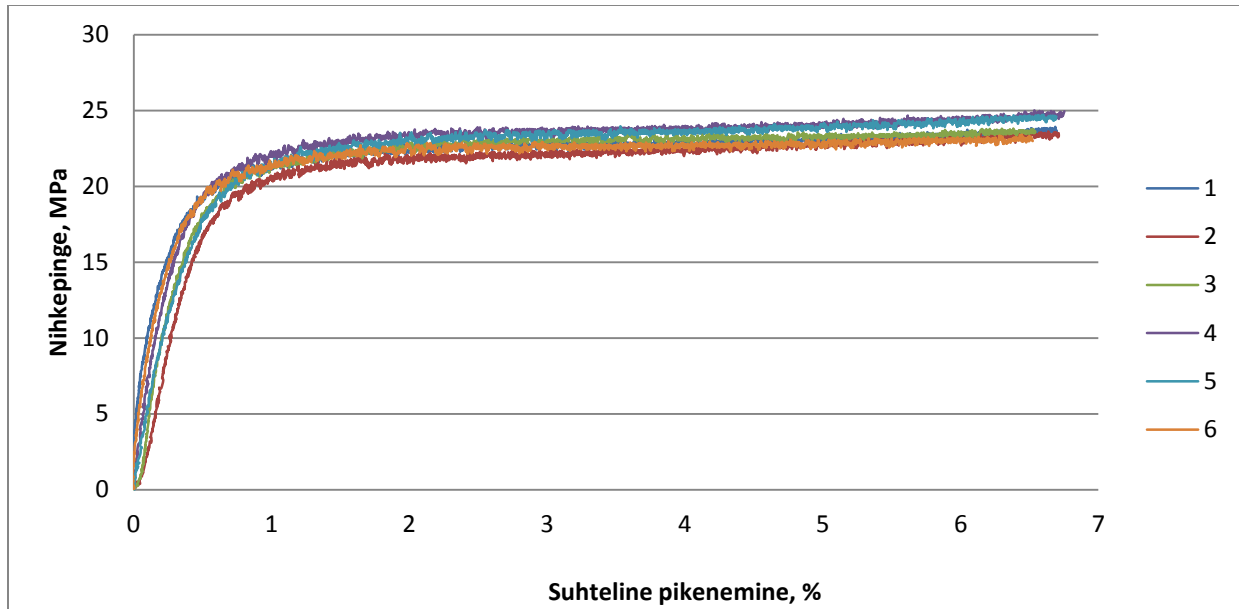




Sele 3.9. Materjal 2 nihkediagramm



Sele 3.10. Materjal 3 Nihkediagramm



Sele 3.11. Materjal 4 nihkediagramm

Maksimaalset nihkepinget mõõdetakse ASTM D3518 alusel maksimaalse jõu väärtuse juures, juhul, kui nihkepikenemine ei ületa 5 % väärtust. Kui ületatakse nihkepikenemine 5 % väärtus, tuleb katse lõpetada ja maksimaalseks jõuks lugeda 5 % pikenemise juures olev jõud.

Nihketugevus on arvatatud kasutades valemit 2.6

$$\tau_{xy} = \frac{F}{2 \cdot A} \quad (3.6)$$

Kus  $\tau_{xy}$  – maksimaalne nihkepinge,

F – maksimaalne jõud,

A – testitüki ristlõike pindala.

Nihkemooduli arvutamisel on kasutatud suhtelise pikenemise vahemikku  $\epsilon = (0,2\%; 0,6\%)$ . Vastavalt standardile ASTM D3518, peab elastsusmooduli arvutamiseks pikenemise vahemik olema 0,4 % pikk ning algama vahemikus 0,15% kuni 0,25%. Lisa tingimuseks on veel, et materjali nihkegraafikul ei tohi olla selles vahemikus märgatavaid suunamuutusi, mida mitte ühelgi testitud materjalil ei esinenud.

Nihkemoodul:

$$G_{xy} = \frac{\Delta\tau_{xy}}{\Delta\gamma_{xy}} \quad (3.7)$$

Kus  $G_{xy}$  – nihkemoodul,

$\Delta\tau_{xy}$  – nihkepingete vahe,

$\Delta\gamma_{xy}$  – nihkedeformatsioonide vahe.

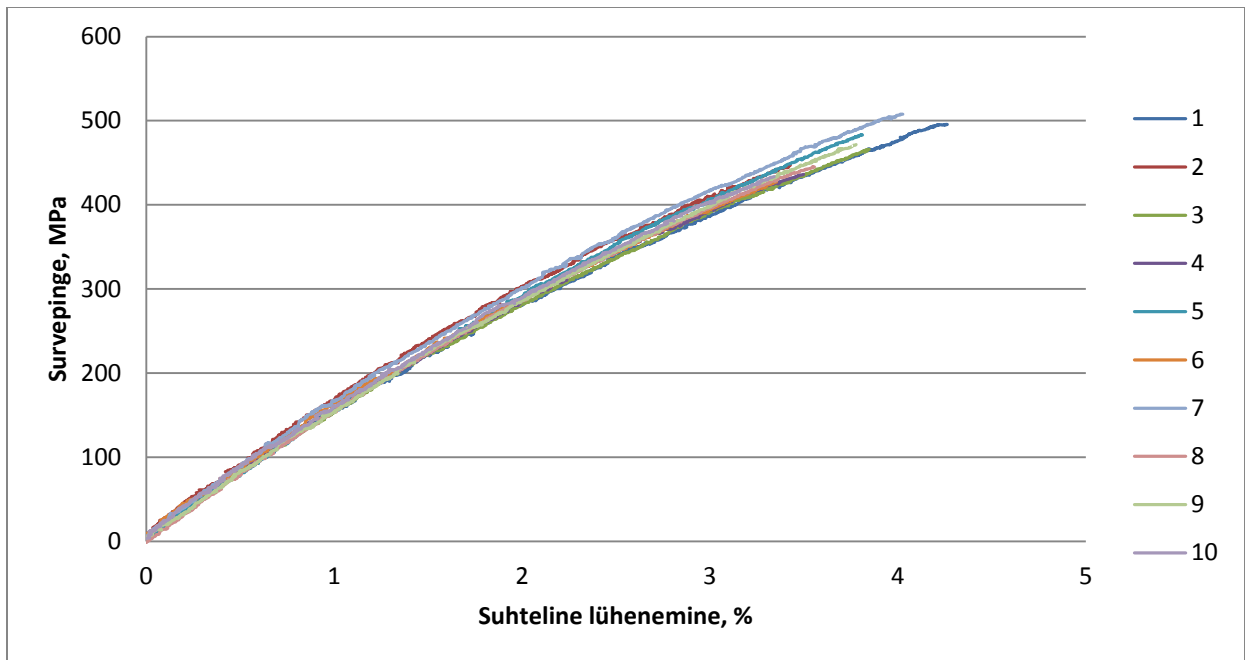
Tabelis 3.4 on toodud töös kasutatavad materjali andmed. Omadused võivad muutuda algmaterjali defektidest või tekkida tootmisprotsessides esinevatest puudujääkidest. Arvutusteks kasutati MS Exceli tabelarvutus tarkvara.

Tabel 3.4. Nihkekatse tulemused

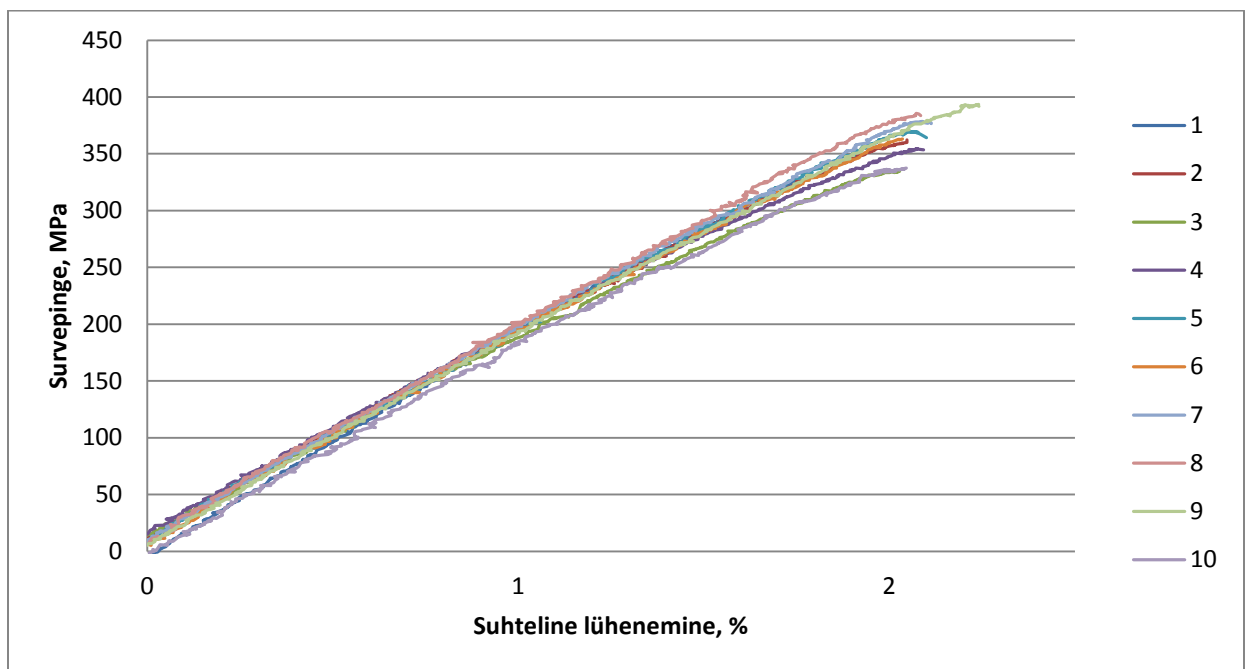
Materjal	$G_{xy}$ , GPa	$\tau_{xy}$ , MPa
Materjal 1	7,0±2,0	44,2±1,5
Materjal 2	3,4±0,7	23,8±0,8
Materjal 3	3,5±0,4	40,2±1,1
Materjal 4	3,4±0,9	24,1±0,6

### 3.5 Survekatsed

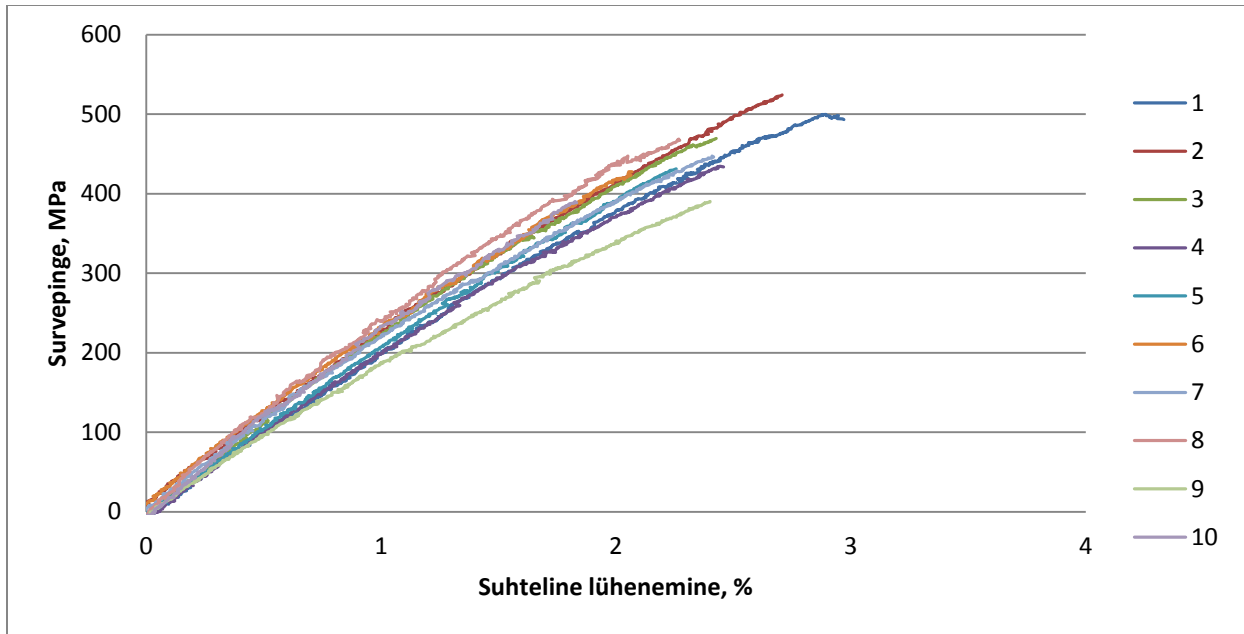
Surveomaduste mõõtmiseks kasutati ASTM D3410/D3410M standardit. Survekatse kiiruseks on valitud standardi järgi 1,5 mm/min. Standard ASTM D3039 defineerib katsetamistingimused ASTM D3410/D3210M standardile.



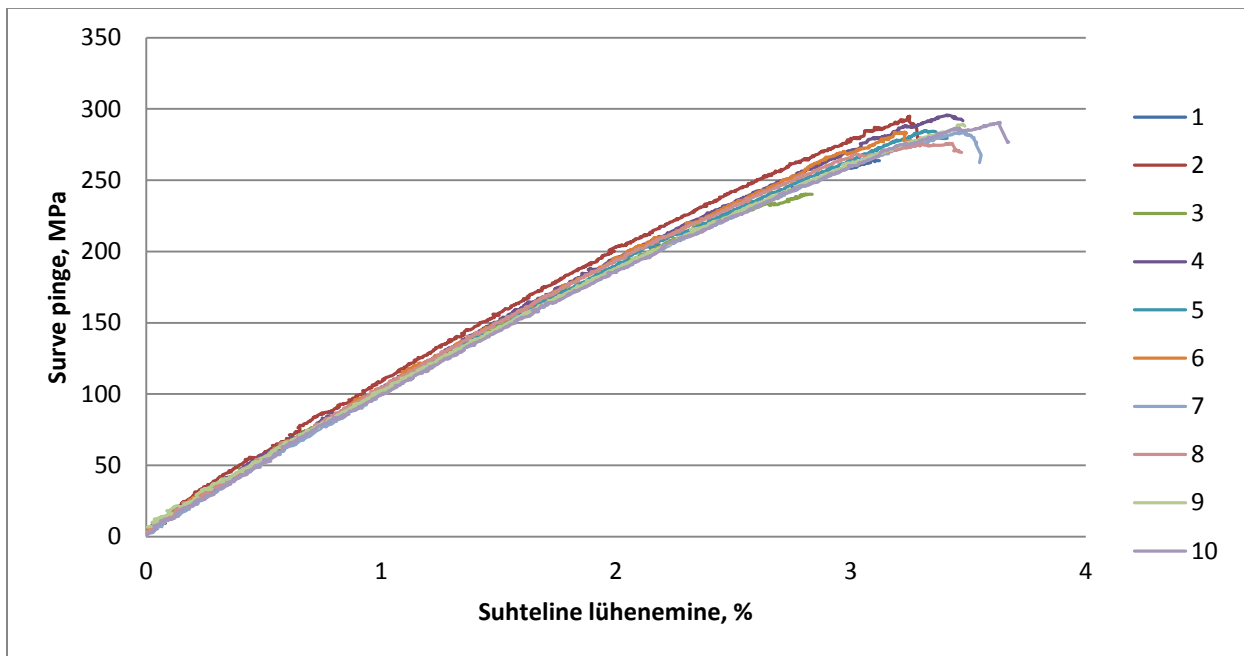
Sele 3.12. Materjal 1 survediaagramm



Sele 3.13. Materjal 2 survediaagramm 0°



Sele 3.14. Materjal 3 survediaagramm 0°



Sele 3.15. Materjal 4 survediaagramm

Elastsusmooduli arvutamise valem on järgmine:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (3.8)$$

Kus  $\Delta\sigma$  – survepingete vahe,

$\Delta\epsilon$  – suhtelise deformatsioonide vahe,

E – surveelastsusmoodul.

Elastsusmooduli määramiseks on ASTM D3410/D3410M standardis ette nähtud vahemik  $\epsilon=(0,1\%;0,3\%)$ . Seda järgiti elastsusmooduli arvutamisel.

Survetugevus:

$$F = \frac{p^{max}}{A} \quad (3.9)$$

Survepinge:

$$\sigma_i = \frac{p_i}{A} \quad (3.10)$$

Kus  $p^{max}$  – maksimaalne koormus, enne purunemist,

A – katsekehade keskmine ristlõike pindala,

$p_i$ – koormus i-nda punkti juures,

$\sigma_i$  – survepinge i-nda punkti juures,

F – survetugevus.

Tabelis 3.5 on toodud katsetatud materjalide elastsusmoodulid x telje sihis ning survetugevused x telje sihis. Arvutusteks kasutati MS Exceli tabelarvutus tarkvara.

Tabel 3.5. Survekatsete tulemused

Materjal	$E_x$ , GPa	$\sigma_x$ , MPa
Materjal 1	15,5±1,3	461,4±27,9
Materjal 2	19,3±1,4	360,6±22,3
Materjal 3	23,9±2,5	448,3±43,4
Materjal 4	10,6±0,8	280,3±16,9

### 3.6 Muud materjaliomadused

ANSYS tarkvara nõuab, et ortotroopsel materjalil defineeritakse ka xz ja yz tasapindadel omadused. Kuna ei olnud võimalik sooritada materjali katsetusi sellistes tasapindades, on need andmed otsitud erinevatest käsiraamatutest ja andmekogudest. Siinkohal on silmas peetud, et muud materjali omadused oleksid võimalikult sarnased või samad. Tabelis 3.6 toodud materjali andmed on võetud kirjandusest [3].

Tabel 3.6. Materjaliomadused

	Materjal 1	Materjal 2	Materjal 3	Materjal 4	Ühik
$E_z$	3000	3000	3000	3000	MPa
$\nu_{xy}$	0,27	0,3	0,04	0,12	
$\nu_{yz}$	0,42	0,4	0,3	0,4	
$\nu_{xz}$	0,27	0,3	0,3	0,12	
$G_{yz}$	2780	1000	2700	1000	MPa
$G_{xz}$	2780	1520	2700	1520	MPa
$\sigma_z$	50	50	50	50	MPa
$\sigma_{y,surve}$	50	50	883,6	280,3	MPa
$\sigma_{z,surve}$	50	50	50	50	MPa
$\sigma_{yz}$	30	20	25	20	MPa
$\sigma_{xz}$	37,9	22,8	25	22,8	MPa

Tabelis 8 toodud andmeid on kontrollitud kasutades segunemis reeglit (Rule of Mixture). Selleks on esmalt vaja leida kiudude mahu protsent, tootmises kasutatakse kiu ja vaigu massi protsenti, kuid arvutustes on vajalik mahu protsent.

$$V_f = \frac{\frac{W_f}{\rho_f}}{\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m}} \quad (3.11)$$

Kus  $V_f$  – kiudude mahu protsent

$W_f$  – kiudude kaal

$\rho_f$  – kiudude tihedus

$W_m$  – matriksi kaal

$\rho_m$  – matriksi tihedus

Segunemis reegel võimaldab arvutada ja ennustada elastsusmoodulit ning poissoni tegurit.

Kiu sihis elastsusmoodul:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.12)$$

Kus  $E_c$  – laminaadi elastsusmoodul

$E_f$  – kiudude elastsusmoodul

$V_f$  – kiudude mahu protsent

$E_m$  – matriksi elastsusmoodul

$V_m$  – matriksi mahu protsent

Valemid 2.11 ja 2.12 kehtivad ainult kiu sihis omaduste ennustamiseks. Et arvestada kiudude orientatsiooni on vaja kasutusele võtta efektiivsus faktor ehk Krencheli faktor



$$\eta_{\theta} = \sum a_n \cos^4 \theta \quad (3.13)$$

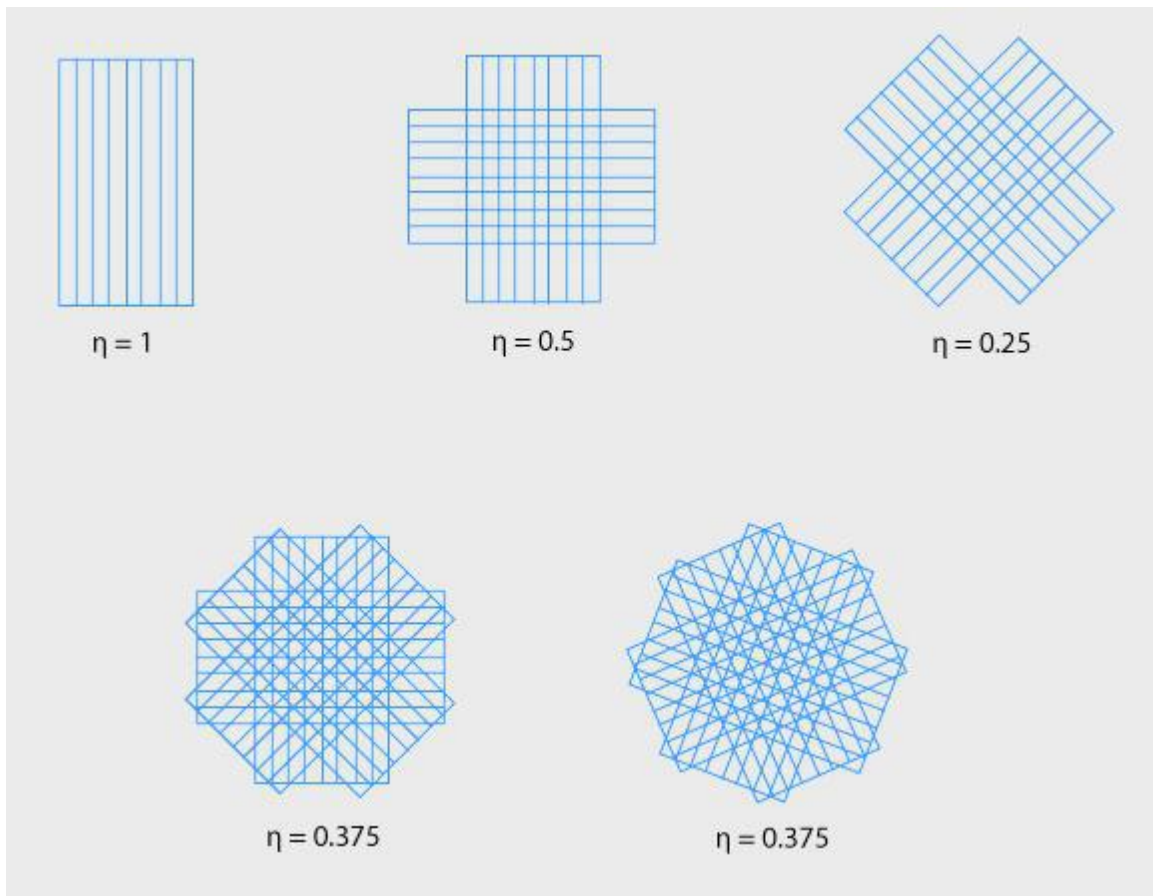
Kus  $\eta_{\theta}$  – komposiidi efektiivsus faktor (Krencheli faktor),

$a_n$  – proportsionaalne kiu kogus,

$\theta$  – kiudude nurk.

Seega segunemis reegli valem elastsusmooduli arvutamiseks muutub järgmiselt:

$$E_c = \eta_{\theta} E_f V_f + E_m V_m \quad (3.14)$$



Sele 3.16. Komposiidi efektiivsus faktor [10]

## 4. TUGEVUSARVUTUSED

### 4.1 Tugevusteooria valik

Ortotroopsete materjalide tugevust kontrollitakse analoogselt isotroopsetele materjalidele – kasutatakse tugevustingimusi, mis arvestavad liitkoormus seisunditega. Laminaatide arvutamiseks on kolm fundamentaalset tugevuse hindamise meetodit:

1. Esimese kihi purunemine
2. Täielik purunemine
3. Kihtidevaheline purunemine ehk delamineerumine

Täieliku laminaadi purunemiseks vaja minev jõud ei pruugi erineda esimese kihi purunemiseks vajaminevast jõust oluliselt või üldse, kui tegu on nurga all oleva laminaadiga. See ei pruugi olla tõsi teiste laminaadi tüüpide korral ja purunemis jõud võib olla oluliselt suurem. Täieliku laminaadi purunemist kasutatakse eriti vastutusrikaste materjalide arvutamiseks, kus on oluline, et kogu materjali jääktugevus oleks ära kasutatud. Selles töös on kasutatud esimese kihi purunemist.

Komposiit materjalide tugevuse arvutamiseks on välja pakutud väga palju erinevaid tugevusteooriaid. See on tingitud sellest, et komposiit võib puruneda väga palju rohkemate mehhanismide toimel kui metall. Ortotropsete materjalide puhul on vajalikud 9 tugevus näitajat, kuid mis alati ei ole piisavad. Nendeks on tõmbe- ja survetugevused kolme pea telje suhtes ja nihketugevused kolmes sihis. Lihtsalt öeldes võib jagada tugevusteooriad võib jagada kolme põhilisse gruppi:

- Pingest lähtuvad
- Deformatsioonist lähtuvad
- Iteratiivsed

Põhiliselt kasutatavad meetodid on:

- Maksimaalse pinge teooria
- Maksimaalse suhtelise deformatsiooni teooria

- Tsai-Hill (Deviatoorse deformatsiooni energia teooria anisotroopsete materjalide jaoks)
- Tsai-Wu (Interaktiivne tensorpolünoomne teooria)

Maksimaalse pingete teooriat kasutatakse üldiselt habraste materjalide korral või kui pinged on põhiliselt suunatud materjali peatelje sihis [7]. Maksimaalse pingete teooria seisukohalt puruneb komposiit materjal juhul kui:

- Maksimaalne pingete kiu sihis on võrdne ühetelgse katsekeha pingega, mis on koormatud kiu sihis, kui see puruneb.
- Maksimaalne pingete risti kiu sihiga on võrdne ühetelgse katsekeha pingega, mis on koormatud risti kiu sihiga, kui see puruneb
- Maksimaalne nihke pingete 1-2 tasapinnal on võrdne samast materjalist katsekehaga, mida on koormatud nihkele, kui see puruneb.

Maksimaalse pingete kriteeriumi võib välja kirjutada kujul:

$$f = \max \left( \left| \frac{\sigma_1}{X} \right|, \left| \frac{\sigma_2}{Y} \right|, \left| \frac{\sigma_3}{Z} \right|, \left| \frac{\tau_{12}}{S} \right|, \left| \frac{\tau_{13}}{R} \right|, \left| \frac{\tau_{23}}{Q} \right| \right) \quad (4.1)$$

Maksimaalse suhtelise deformatsiooni teooria seisukohast toimub materjali purunemine juhul, kui ühe peatelgede suunaline deformatsioon ületab kriitilise väärtuse.

Tsai-Hilli teooria on edasiarendus von Misesi kriteeriumitest anisotroopsetele materjalidele. Selle teooria seisukohalt puruneb materjal kui kombinatsioon pingetest  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  ja  $\tau_{xy}$  ületab kriitilise väärtuse. Selle teooria miinuseks on see, et see ei arvesta survepingetega.

Tsai-Wu purunemisteooria on kõige laialdasemalt kasutatav teooria anisotroopsete materjalide jaoks. Selle puuduseks on materjalikatsetuste sooritamise vajalikkus, selgitamiseks välja materjali konstandid. Konstandid määratakse kahetelgsete katsetega, mida on väga raske sooritada ja sellest tingituna on tõsine puudus nimetatud konstantidel kirjanduses. Tsai-Wu annab sarnasemad, kuid pisut konservatiivsemad tulemused kui Tsai-Hill teooria [9].

Tsai-Wu kriteeriumi koefitsiendid, F, võib välja kirjutada kujul:

$$F_{11} = \frac{1}{x_t x_c}; F_1 = \frac{1}{x_t} - \frac{1}{x_c} \quad (4.2)$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_C}; F_2 = \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_C} \quad (4.3)$$

$$F_{44} = \frac{1}{Q^2}; F_{55} = \frac{1}{R^2} \quad (4.4)$$

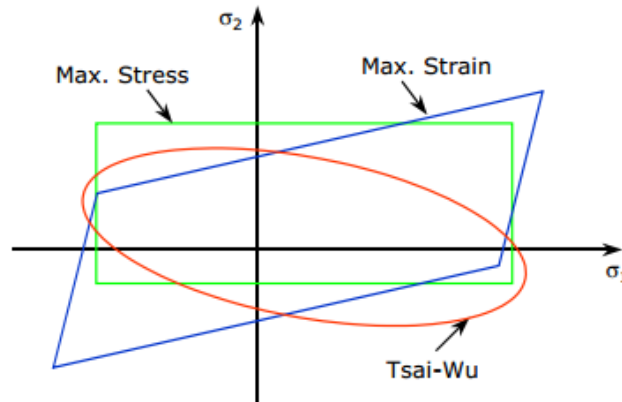
$$F_{66} = \frac{1}{S^2} \quad (4.5)$$

Sellest lähtuvalt võib kriteeriumi kirjutada kujul:

$$f = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_C} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_C} + \frac{\tau_{23}^2}{Q^2} + \frac{\tau_{13}^2}{R^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S^2} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_C}\right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_C}\right) \sigma_2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 \quad (4.6)$$

Seega Tsai-Wu 3D valem näeb välja järgmine:

$$f = \frac{\sigma_1^2}{X_t X_C} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_C} + \frac{\sigma_3^2}{Z_t Z_C} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{xy}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{yz}^2} - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sqrt{X_t X_C Y_t Y_C}} - 1.0 \frac{\sigma_2 \sigma_3}{\sqrt{Y_t Y_C Z_t Z_C}} - 1.0 \frac{\sigma_1 \sigma_3}{\sqrt{X_t X_C Z_t Z_C}} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_C}\right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_C}\right) \sigma_2 + \left(\frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_C}\right) \sigma_3 \quad (4.7)$$

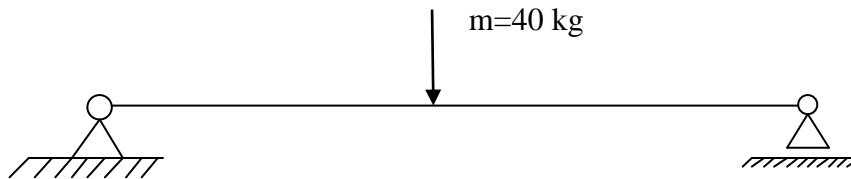


Joonis 4.1. Skemaatiline tugevuskriteeriumite võrdlus

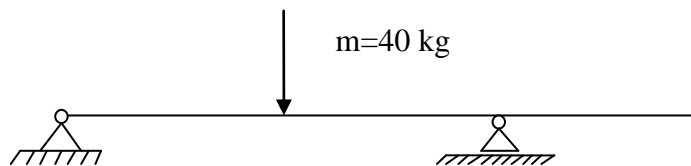
Selle töö raames on kasutatud nii maksimaalse pinge kui ka Tsai-Wu purunemisteooriat ning materjali konstandid  $F_{12}$ ,  $F_{13}$  ja  $F_{23}$  on võetud kõige konservatiivsemateks see tähendab võrdseks -1ga. Võimaluse kasutada maksimaalse pinge teooriat annab see, et pinged on suunatud materjali peatelje sihis. Otsustamisel, kas materjal peab vastu või mitte arvestatakse kõige halvemat juhtu.

## 4.2 Masti mudeli kontrollimine

Et veenduda mudelis oli vaja seda kontrollida mõõdetud andmetega. Selleks sai loodud kaks erinevat koormamisskeem, mida kasutatakse ka valmis toote mõõtmisel. Koormusskeem 1 on toodud selel 4.2 ja koormusskeem 2 selel 4.3. Et veenduda mudeli korrektsuses, kontrolliti kahte koormusolukorda. Mast, millega kontrolliti on standard mudel ning kõige suuremate mõõtmis tulemustega tootmises.



Sele 4.2. Koormus skeem 1



Sele 4.3. Koormus skeem 2

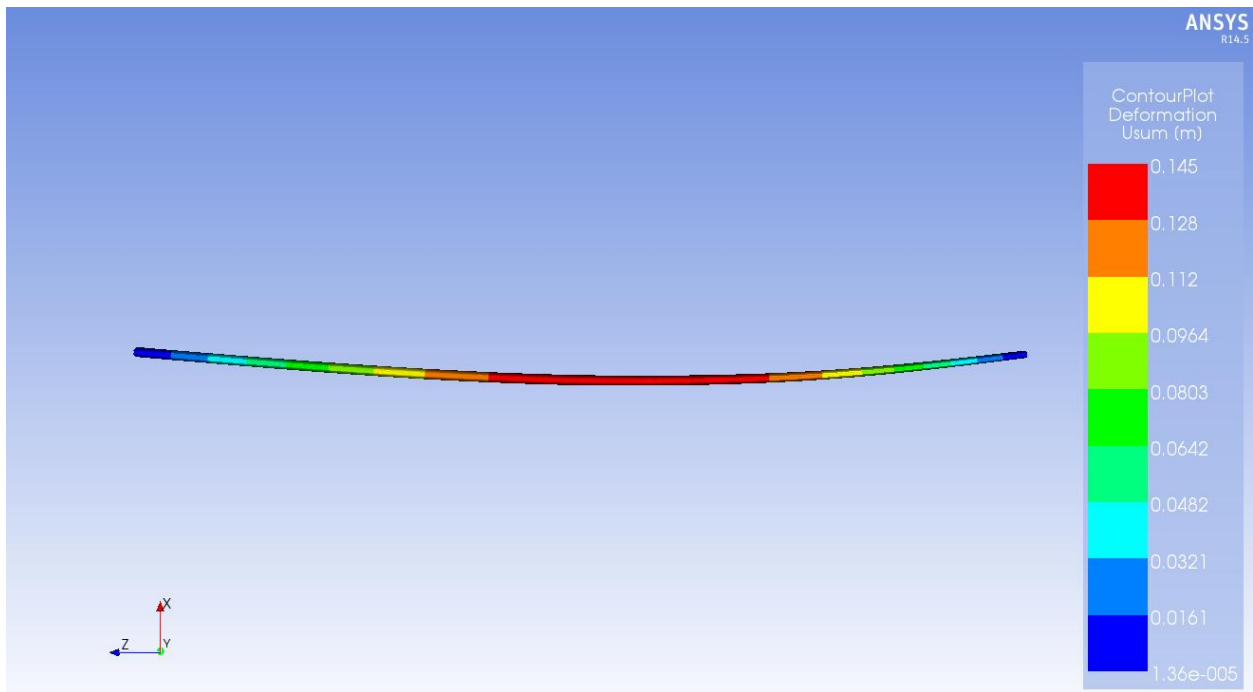
Koormusskeemi 1 korral on mast toetatud kahes otsast kus masti kannal otsas on takistatud kõik siirded ja pöörlemine ümber masti piki telje. Teises otsas on mastil piiratud kaks siiret, lubatud on siire masti piki sihis ja pöörlemine on takistatud masti piki telje ümber. Teises koormus olukorras on mast toetatud samuti kahest otsast, kuid tugede vahe on lühem. Kinnitused on

samasugused nagu skeemi 1 korral. Koormusskeemi 1 korral on tugede vahe 4700 mm ja koormusskeem 2 korral on tugede vahe 3580 mm.

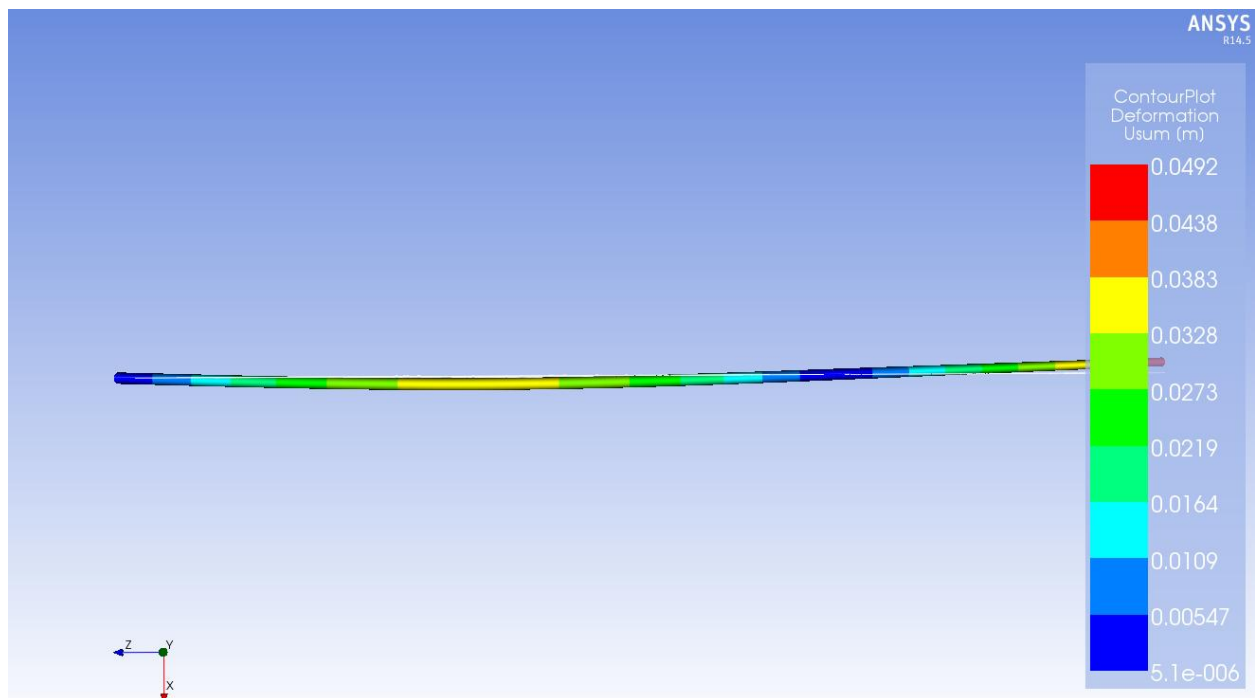
Mõõdetud tulemused on toodud koondatult tabelis 4.1. Läbipainded on näha seledel 4.4 ja 4.5.

Tabel 4.1.Masti läbipainded

Koormusskeem	Mõõdetud (mm)	ANSYS mudel (mm)	Erinevus %
1	146±2	145	0,68
2	36±1	35	2,78



Sele 4.4. Koormus skeem 1 deformatsioon



Sele 4.5. Koormus skeem 2 deformatsioon

Tabelist 4.2 on näha, et ANSYS mudeli painded jäävad lubatud vahemikku ning see annab kindlust mudeli õigsuses. Kasutatud materjali elastsusomadused xy-tasandis on võetud materjali katsetustest. Ülejäänud kahe tasandi omad pärinevad punktist 2.6.

Tabel 4.2. Kasutatud materjali elastsusomadused

Omadus	Materjal				Väärtus
	1	2	3	4	
$E_x$	116200	43500	64900	21700	MPa
$E_y$	4990	3000	64900	21700	MPa
$E_z$	3000	3000	3000	3000	MPa
$\nu_{xy}$	0,27	0,3	0,04	0,12	
$\nu_{yz}$	0,42	0,4	0,3	0,4	
$\nu_{xz}$	0,27	0,3	0,3	0,12	
$G_{xy}$	3500	3400	7000	3400	MPa
$G_{xz}$	2780	1000	2700	1000	MPa
$G_{yz}$	2780	1520	2700	1520	MPa

Materjali tugevusomadused on võetud materjali katsetustest ning nende väärtused on võetud minimaalsed, arvestades mõõtmisest tulenevat liitmääramatust. Tugevusomaduste minimaalne väärtus on arvatud kasutades valmit 4.8.

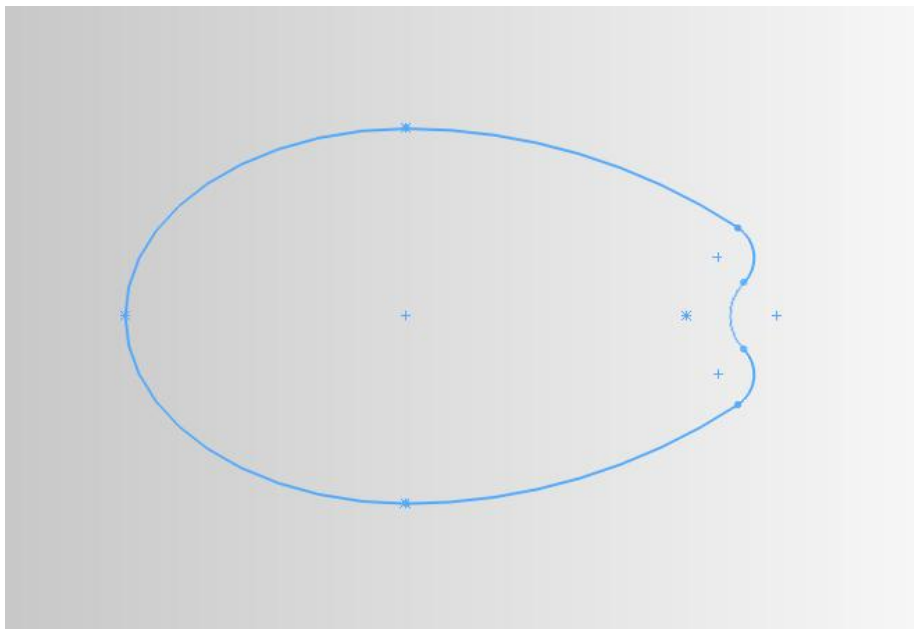
$$x = \bar{x} - u(x) \quad (4.8)$$

Kus  $x$  – määratav tugevusomadus,

$\bar{x}$  – määratava tugevusomaduse kesk väärtus,

$u(x)$  – määratava tugevusomaduse liitmääramatus.

ANSYS mudel on tehtud koorikelementidest ning mudelit on lihtsustatud, mis eristab seda tegelikust mastist. Seel 4.6 on toodud ANSYS-is kasutatud mudeli ristlõige vahemikus 0...3,58 m ning seel 4.7 tegeliku masti ristlõige samas vahemikus. Seelt 4.6 on näha, et lihtsustuse mõttes on ära jäetud soone osa. Selle lihtsustuse võis teha, kuna materjal, millest soon on valmistatud ei panusta paindel töötamisel ja seega ei mõjuta mudeli usaldusväärsust. Masti soone elastsusmoodul on üle 20 korra väiksem kui ühetelgsetel kihtidel, samuti asub soon nulltelje läheduses.

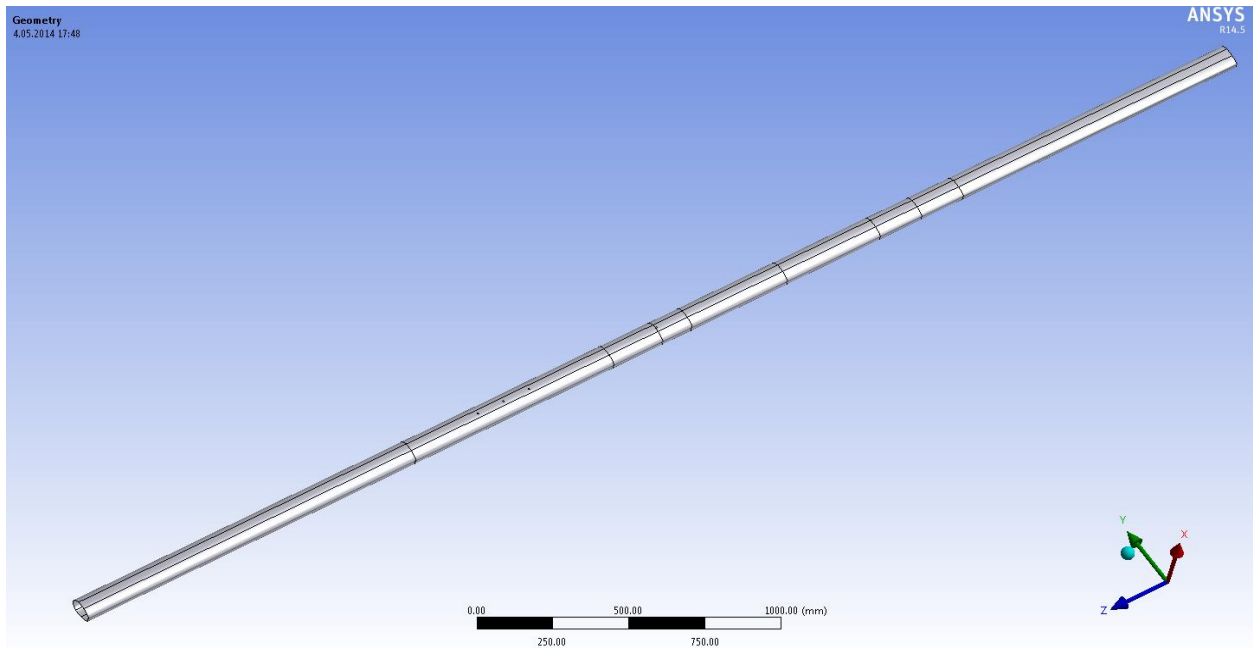


Sele4.6.Mudeli ristlõige



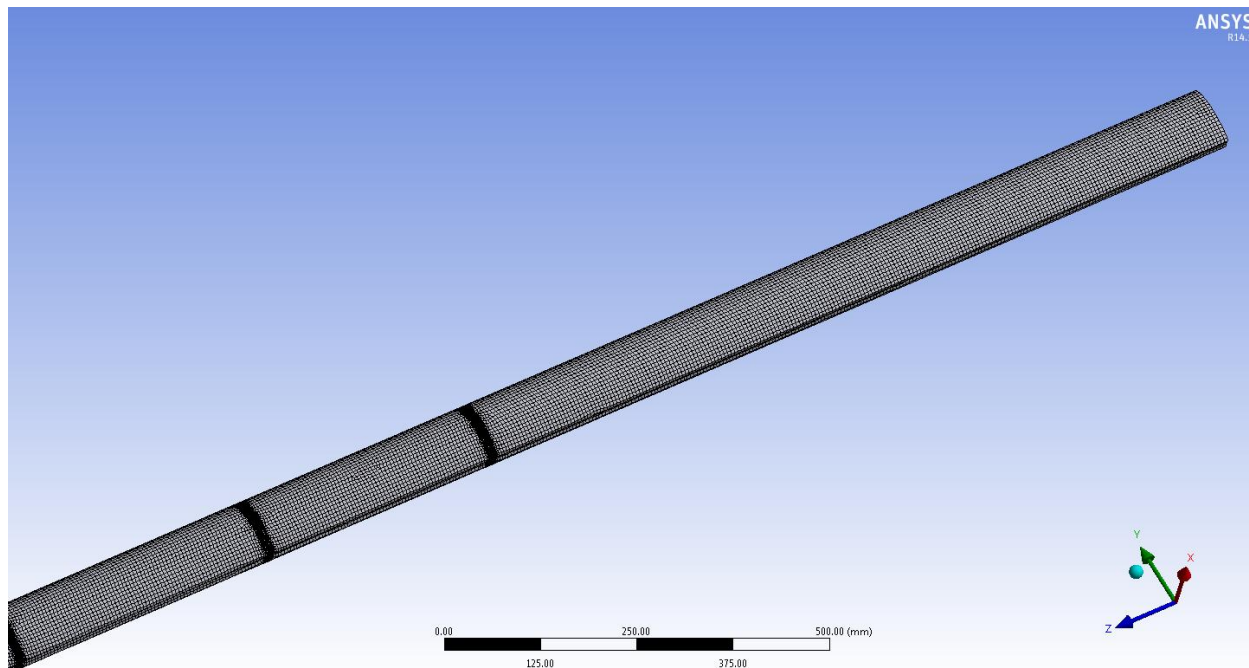


Sele 4.7.Masti ristlõige

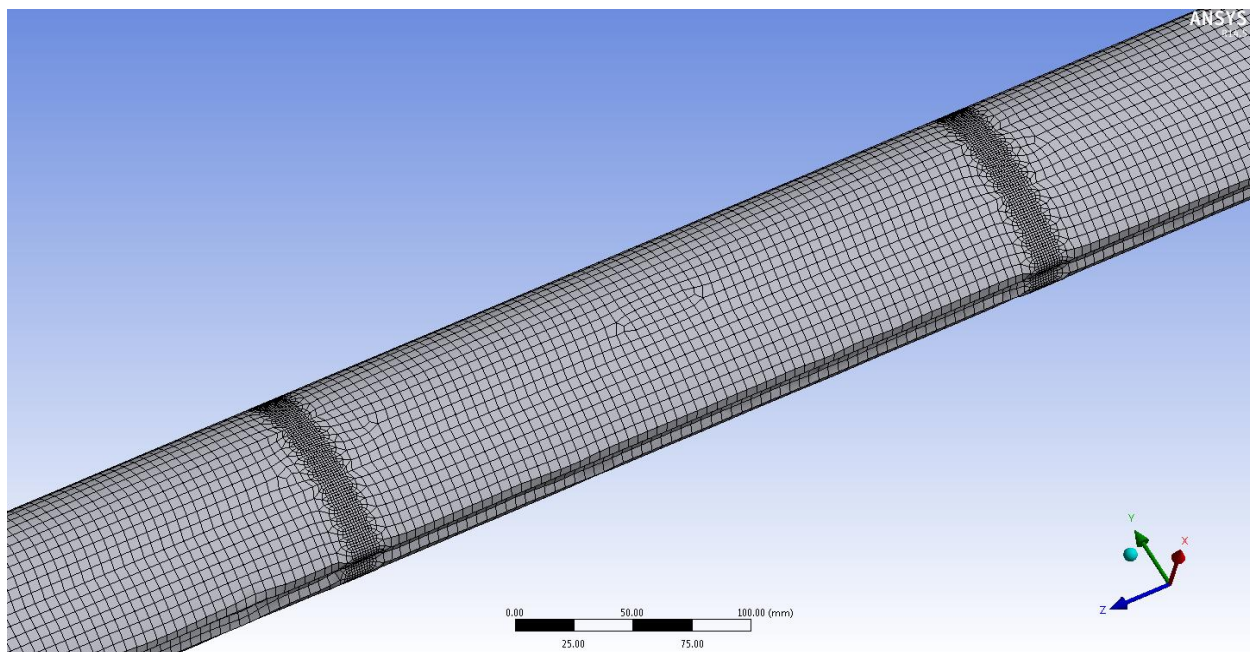


Sele 4.8. CAD koorikkeha

Mast on jagatud osa lõikudeks selle tõttu, et oleks võimalik ACP-s näidata kus lõppevad kihid. Elementide jaotuse tihendamise vajalikkus on tingitud nihkepingete kontsentreerumisest kihi otstes. CAD koorikkeha on toodud seel 4.8 ja elementide jaotus seel 4.9.



Sele 4.9. CAD mudeli elementide jaotus

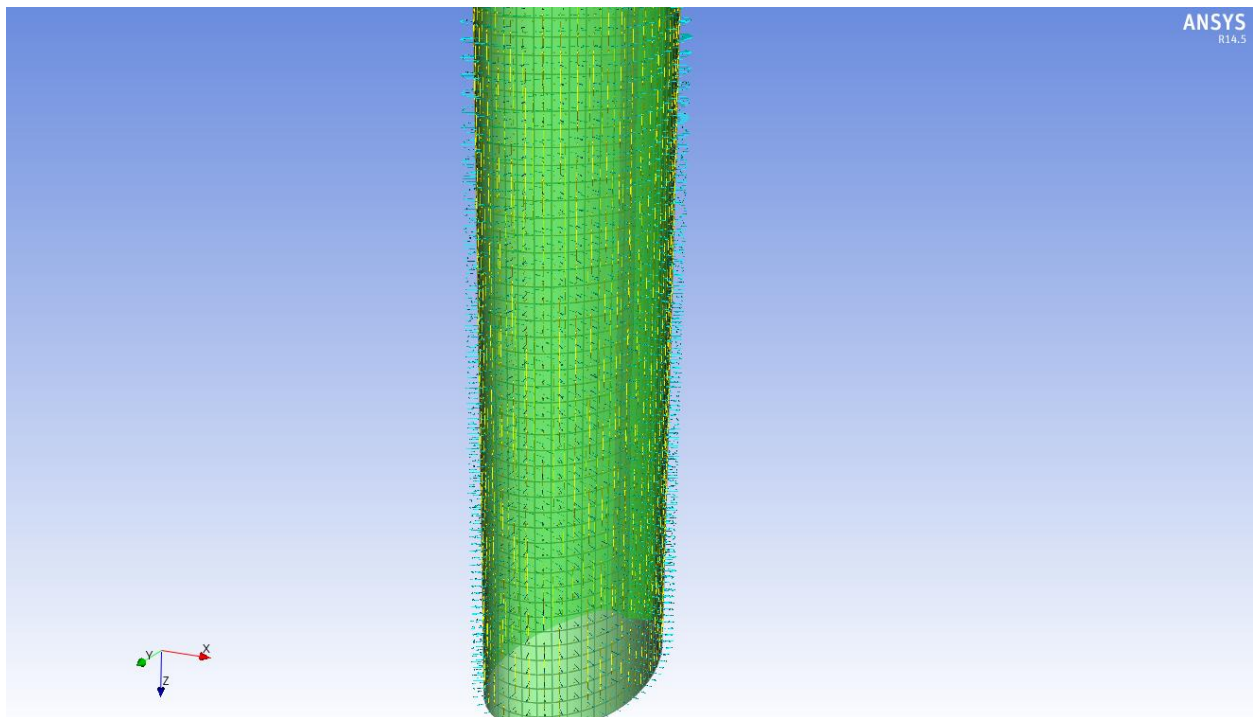


Sele 4.10. Elementide lokaalne tihendamine

Mudeli elementide arv on 60695. Kõik laminaadi kihid on defineeritud ACP tarkvaras. ACP tarkvara võimaldab lihtsustatult sisestada vajaminevad materjalid ning nende paiknemise tootel. Seel 4.10 on näha elementide lokaalne tihendamine, mis on vajalik, et vältida nihkepingete kontsentratsiooni kihtide otstes. Elementidele defineeritud individuaalsed koordinaatsüsteemid on järgmised:

- X-telg on vertikaalsuunaline
- Y-telg on elemendi pinna tangentsiaalsuunaline
- Z-telg on elemendi normaali suunaline

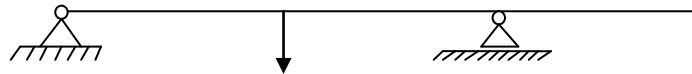
Elementide lokaalsed koordinaatsüsteemid on näha seel 4.11.



Sele 4.11. Elementide lokaalsed koordinaatsüsteemid

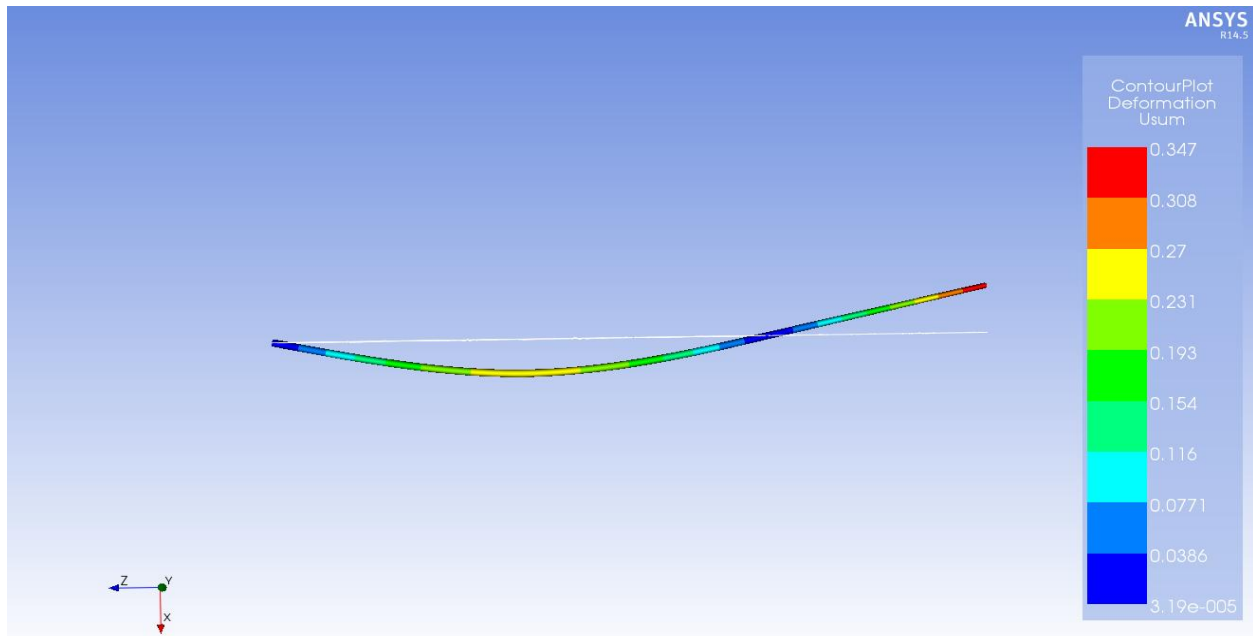
### 4.3 Masti tugevusanalüüs

Jääpurjetamine ning sellega kaasnevate toodete müümine on väga emotsioonide peale üles ehitatud ja paljud siin rakendatavad müügi ning projekteerimismeetodid ei ole kõige paremad. Aastaid on olnud probleeme, et mastid purunevad purjetamise ajal. Viimastel aastatel on hakanud USAst levima katse, millega USA tarnijad on võitnud endale väga palju kliente. Katse on „9 tolli katse“, mis saab oma nime 9 tollise painde tekitamisest mastile. Mast on toetatud kahest kohast nagu seel 4.12 näidatud ning kahe toe vahe pealt rakendatakse koormust kuni masti läbipaine on  $\frac{3}{4}$  jalga ehk 9 tolli, mis on 228,6 mm. Euroopas on saanud tavapäraseks testida 250 mm läbipaindega.



Sele 4.12. Masti koormuskatse skeem

Otsast on mastil takistatud kõik siirded ja lubatud rotatsioonid välja arvatud masti piki telje ümber. Teises toetus punktis, mis asub 3,58 meetri kaugusel on lubatud siire masti piki sihis, kuid kinni teistes ning rotatsioonid on samamoodi nagu esimesel. Seel 4.13 on näha, milline on läbipaine.

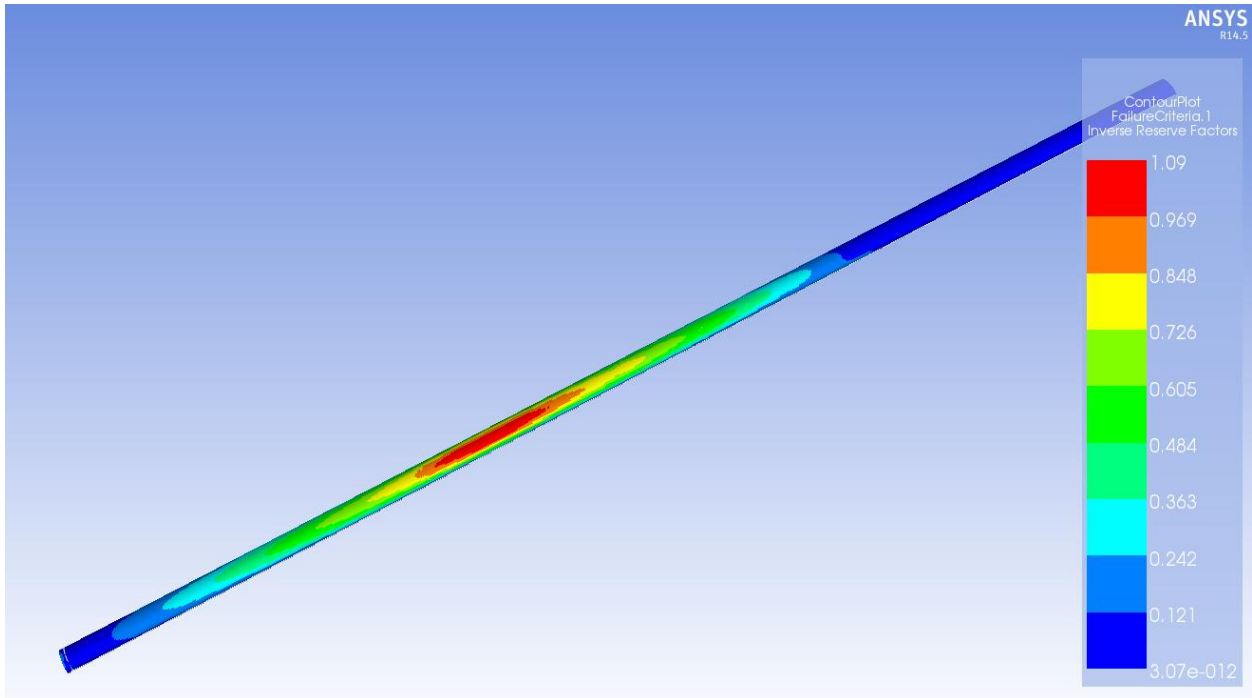


Sele 4.13. Mast koormus olukorras

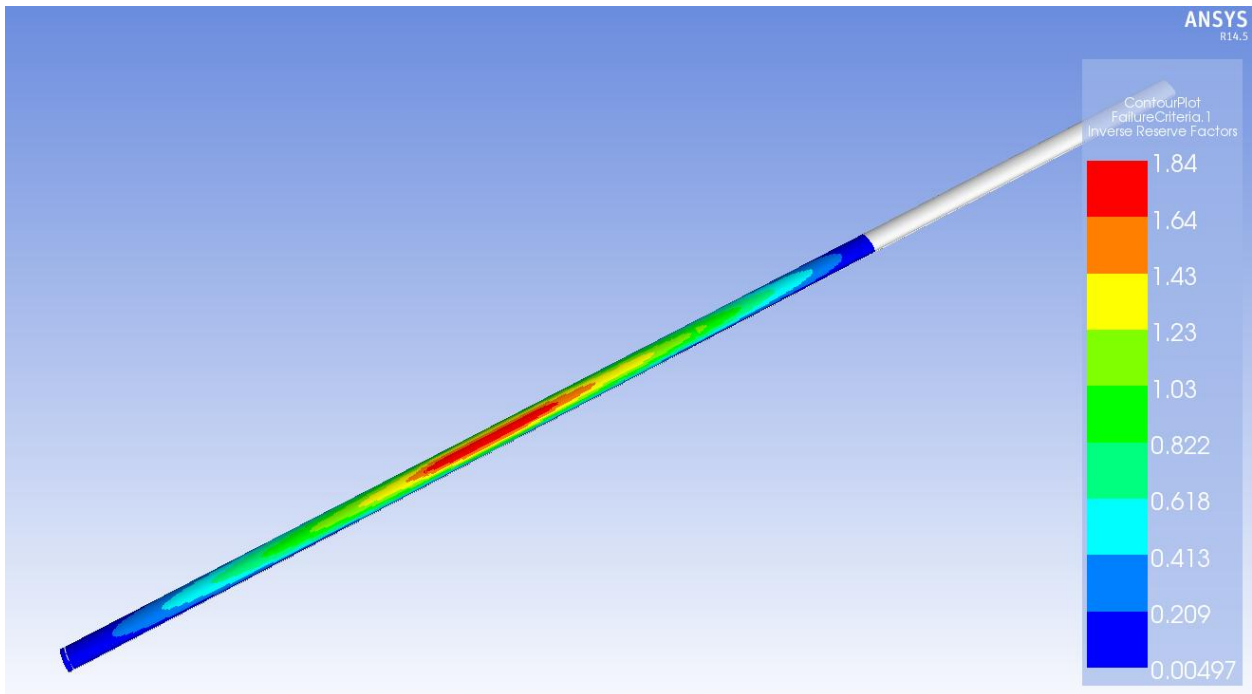
ACP võimaldab vaadelda varutegureid iga kihi kohta eraldi. Kuna antud töös käsitletakse toote purunemist, kui esimene kiht puruneb, siis on lihtne välja selgitada nõrgim kiht ja selle põhjal teha otsus kogu toote kohta.

Komposiitide juures kasutatakse varuteguri poord väärtust, seda põhjusel, kuna varuteguri korral on kõik üle ühe väärtused head ning see viib skaala väga suureks. Pööratud varuteguri korral on väärtused vahemikus 0...1 head, seega ei ole materjali purunemist ja kõik väärtused, mis on suuremad kui 1 tähendavad varuteguri ületamist. Lisaks sellele on pööratud varutegur efektiivsusnäitaja, näidates kui suures osas kasutatakse ära materjali tugevust, kui maksimum koormus on 0,9, siis on materjal koormatud 90% tema tugevusest.

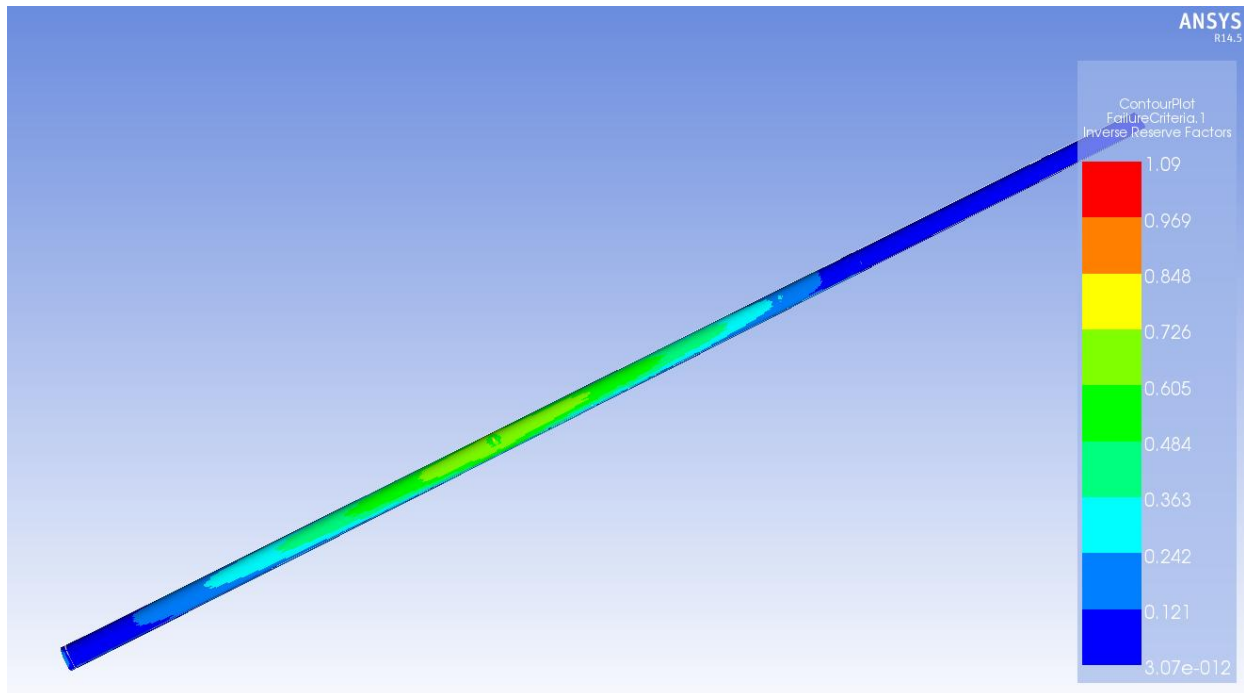
Allpool toodud seledel 4.14, 4.15 on toodud kõige kriitilisemad kihid survele ning selel 4.16 materjali 1 kihi tõmbe pool.



Sele 4.14. Materjal 3, survele töötav pool



Sele 4.15. Materjal 1, survele töötav pool



Sele 4.16. Materjal 3, tõmbele töötav pool

Nagu ka materjali katsetustest tuli välja on komposiidid survele nõrgemad kui tõmbele, see on tingitud mikro nõtkumisest. See on kiudude nõtkumine vaigu sees, mikrotasandil [8]. Sama seaduspära on ka näha juures olevatelt seledelt. Selle põhimõtte järgi on ka välja töötatud uus mudel. Sealjuures tuleb silmas pidada, et paindeomadused ei tohi muutuda. Selet 4.15 on näha, et materjal 1 puhul on varutegur ületatud ning seega sellist laminaati ei saa kasutada. Siinkohal ei ole vajalik eraldi välja tuua maksimaalse pingeteooria tulemusi, kuna on selge, et ühe kihi tugevusvaru on ületatud väga suures osas ja kuna käsitleda tuleb kõige ekstreemsemat olukorda, siis ei ole see vajalik.

#### 4.4 Masti täiustamine

Masti täiustamisel on vaja jälgida kolme põhimõtet:

- Masti paindegraafik koormusolukorras 1 peab olema sama, mis standard mudelil

- Masti paindegraafik koormusolukorras 2 peab olema sama, mis standard mudelil
- Masti ehitamisel on vaja suurendada süsiniku sisaldust

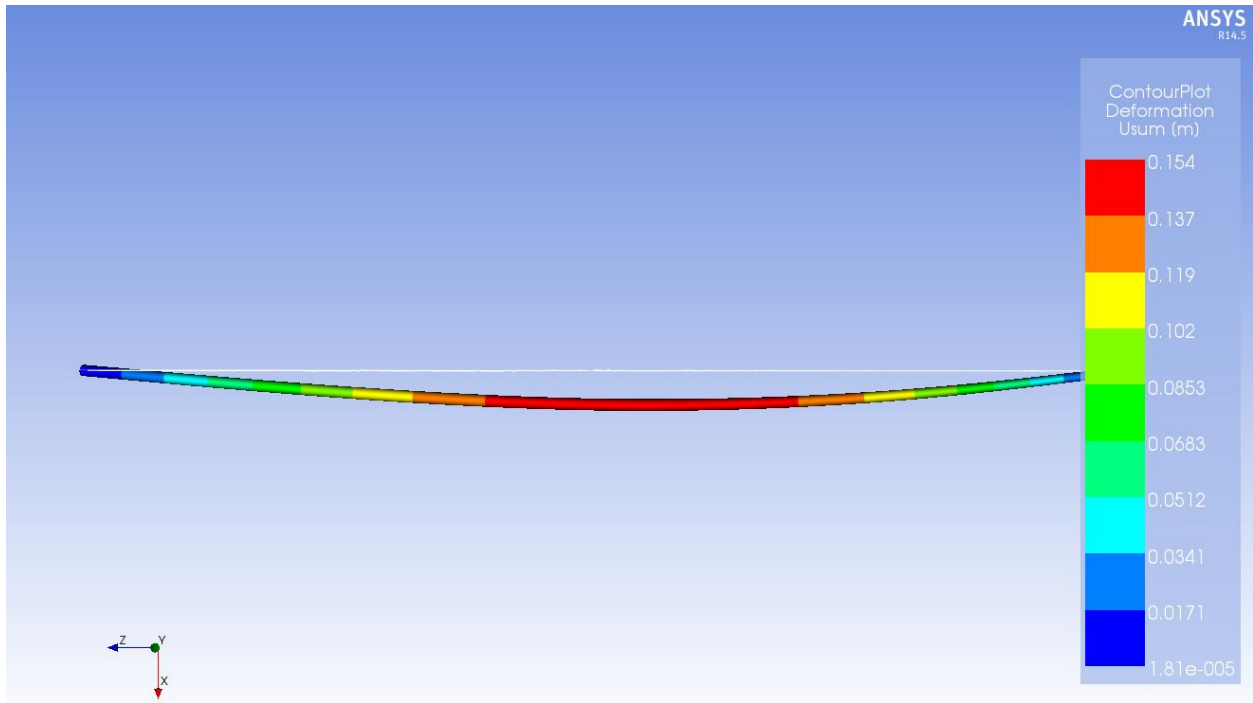
Uuringud on näidanud, et hübriid komposiit laminaadil, mille süsiniku sisaldus on 50 %, kus süsinik on välis kihtides, omab parimaid painde omadusi. Kui vahelduvad süsiniku ja klaas kiu kihid, siis on paremad survetugevused [6]. Töö püstitusest on selge, et soov on lisada rohkem süsinikkiudu masti. Selle põhjuseks on sõita eelistused ja pikaajaline kogemus. Süsiniku lisamine ja klaaskiu vähendamine vähendab mastis jääk paindeid ja „uimasust“, sellega kiirendades masti reaktsiooni tuule tugevuse muutumisele. Sellest lähtuvalt on proovitud luua laminaat, kus süsinikkiu ja klaaskiu kihid vahelduks. Peatükist 2 on näha, et probleemiks on materjali 1 väga kõrge elastsusmoodul võrreldes teiste materjalidega. Selle tõttu on kasutatud ainult kahte erinevat materjali, millede elastsusmoodulid on sarnasemad.

#### 4.4.1 Mudel 1

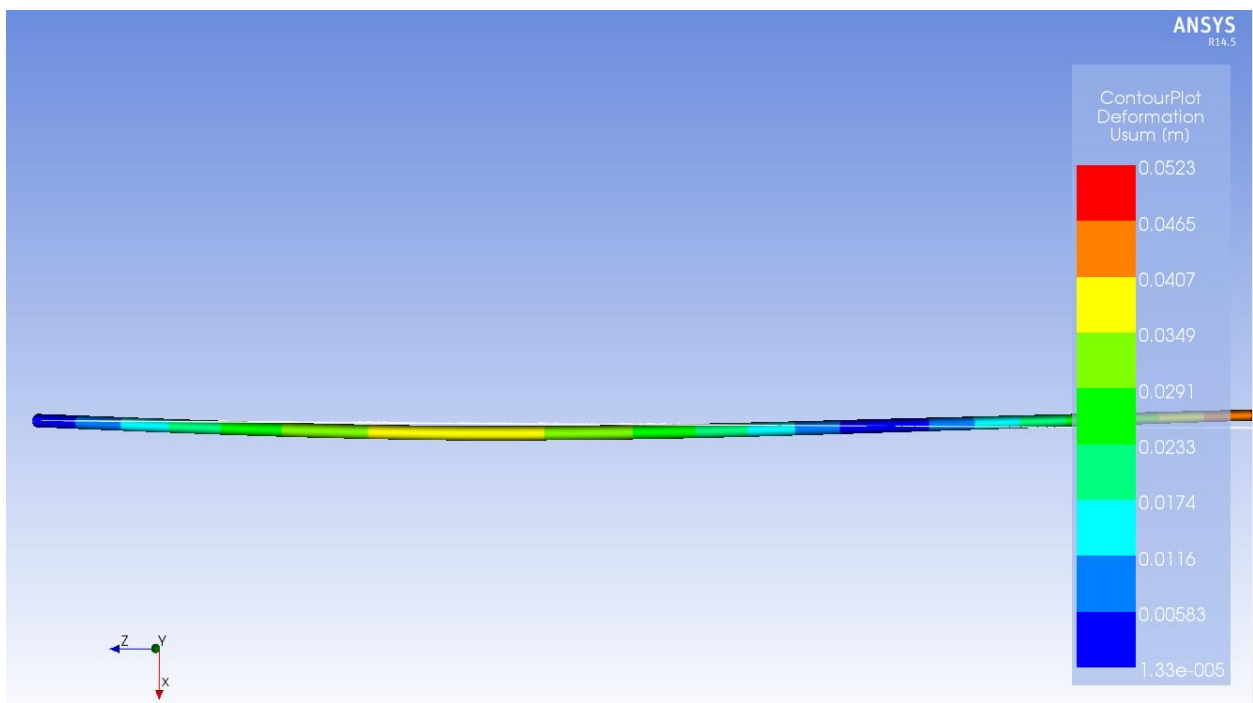
Esimese variandina on kasutatud laminaati, mis koosneb materjalidest 2 ja 3. Laminaadi ülesehitus on  $(0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ})$ . Materjali 2 ja 3 kihid vahelduvad, alustades materjalist 3. Masti kokku paneku ribade laminaat on tehtud materjalist 4 ja on ülesehitusega  $(45^{\circ}/45^{\circ}/45^{\circ})$ .

Selel 4.17 on näha esimene koormusolukord ning masti läbipaine on 154 mm, erinevus 5 %. Selel 4.18 on näha teine koormusolukord ja masti läbipaine koormuse kinnitus kohas on 40 mm, erinevus 10 %. Masti täiustamise kriteeriumitest ei ole täidetud mitte kumbki läbipainde nõue. Arvestades mudeli 1 tulemusi on projekteeritud teine mudel.





Sele 4.17. Mudel 1, koormusolukord 1

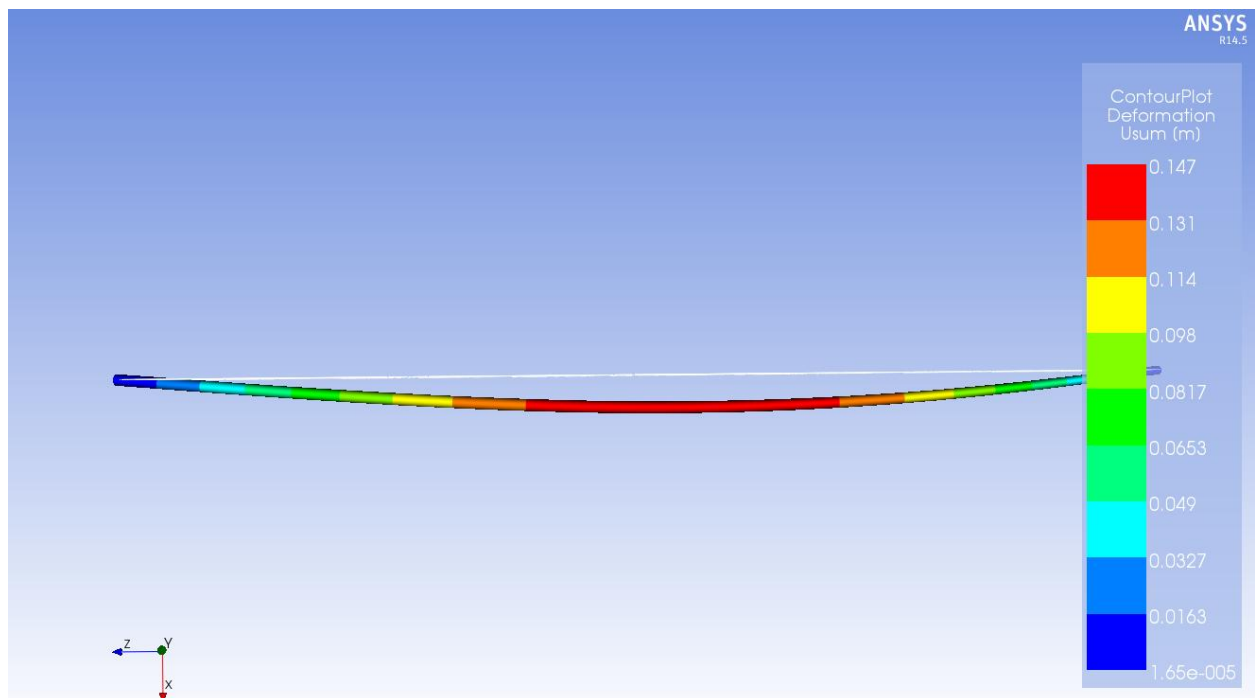


Sele 4.18. Mudel 1, koormusolukord 2

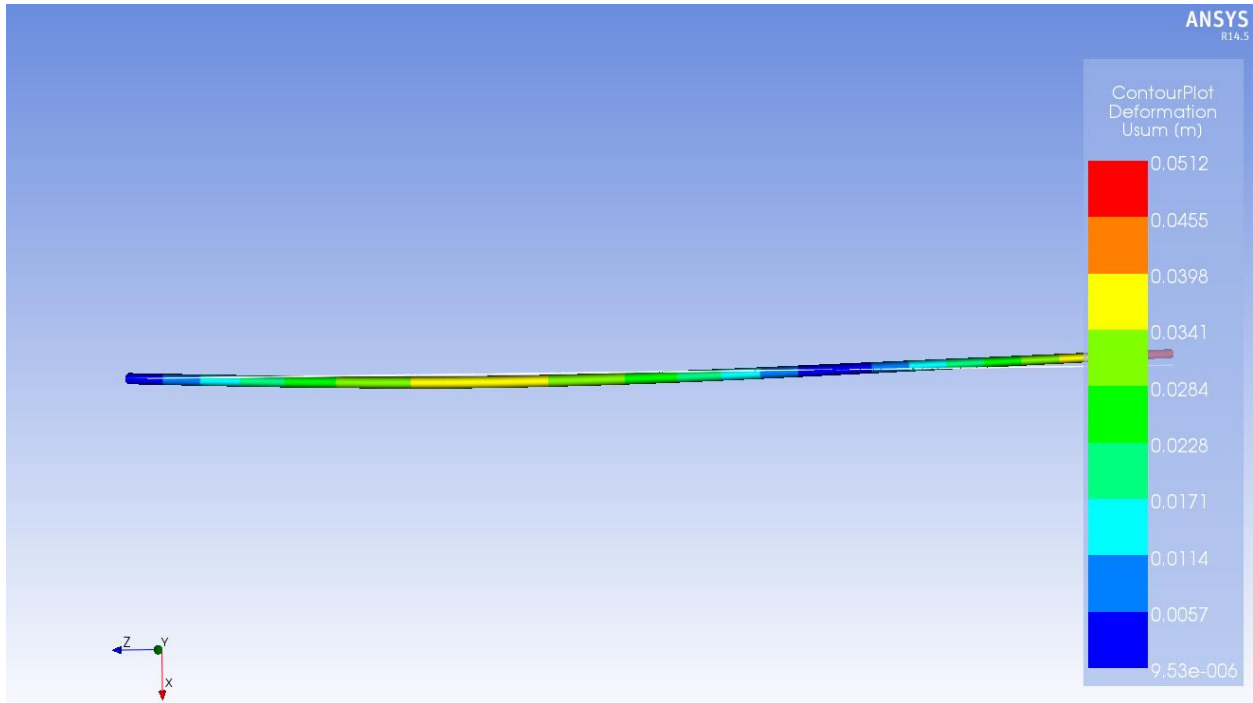
## 4.4.2 Mudel 2

Eelneva testi põhjal on näha, et väljapakutud laminaat on väga lähedal soovitud tulemusele ning vaja oleks lisada väikese elastsusmooduliga materjal. Standardmudelites on lisatud 4 kihti materjali 4, mis paikneb  $45^\circ$  nurga all masti piki telje suhtes. See materjal sobib antud olukorda väga hästi, olles madala elastsusmooduliga ning lisades mastile väändetugevust, mis eelneval variandil oli puudulik. Uus laminaat on koostatud materjalidest 2, 3 ja 4. Materjal 4 on lisatud esimeseks kihiks ning ülejäänud laminaat on sama, mis eelmisel variandil ( $45^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$ ), kokkupaneku ribad on valmistatud materjalist 4 ja on ülesehitusega ( $0^\circ/0^\circ/0^\circ$ ).

Mudel 2 läbipaine koormusolukorras 1 on 147 mm, erinevus 0,7 %, ja koormusolukorras 2 on 36 mm. Edasi on uuritud mudel 2 vastupidavust. Seledel 4.19 ja 4.20 on toodud läbipainded kahes koormusolukorras.



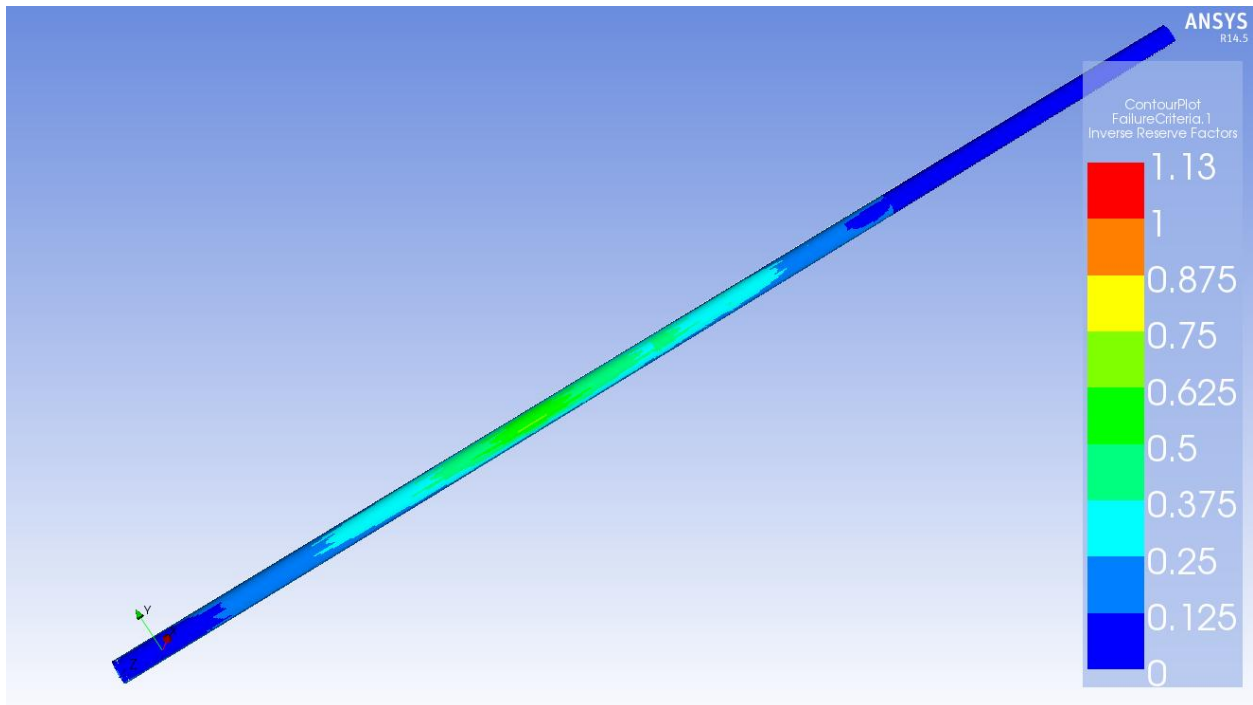
Sele 4.19. Mudel 2, koormusolukord 1



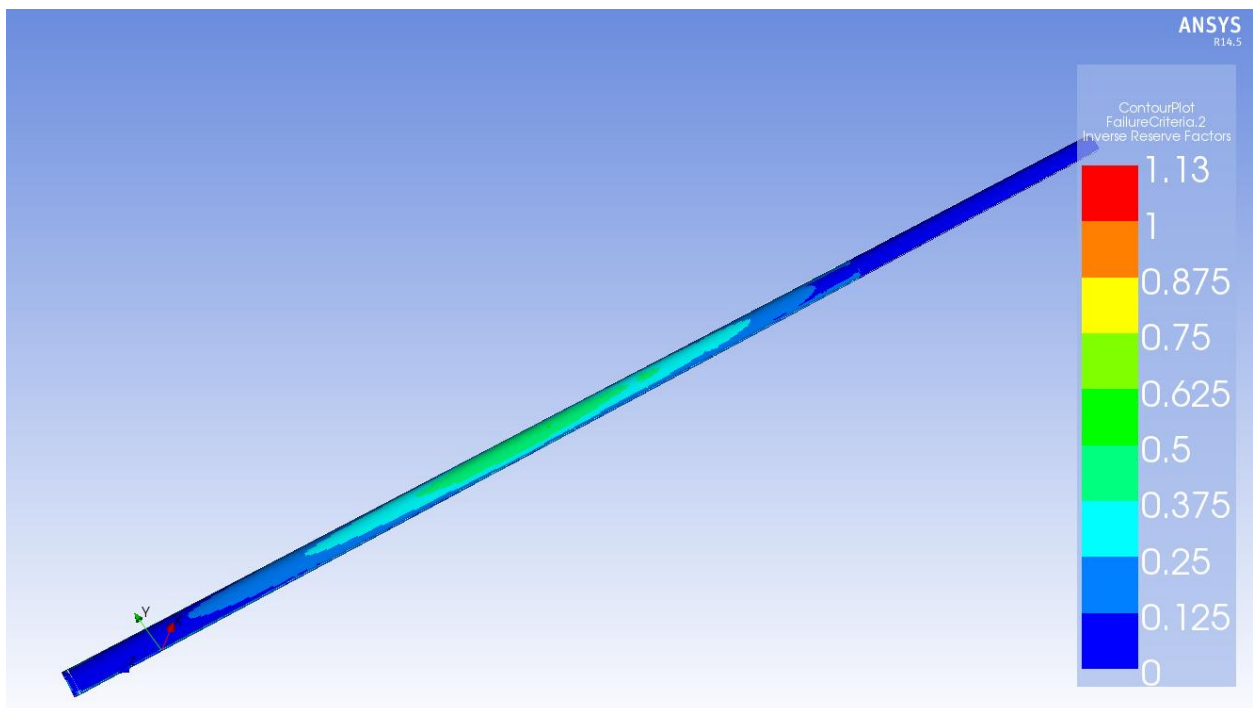
Sele 4.20. Mudel 2, koormusolukord 2

Järgnevatel seledel on välja toodud kõige rohkem koormatud kihid. Materjal 3 survele töötav pool on koormatud peaaegu 100 % ulatuses. Veel ilmneb, et materjal 2 töötab ainult natukene madalamal protsendi tasemel, jäädes 80 % juurde. Erinevalt standard masti variandist, kus süsiniku kihid olid väga palju rohkem koormatud on siinkohal saavutatud parem tasakaal koormuse jaotumise osas.

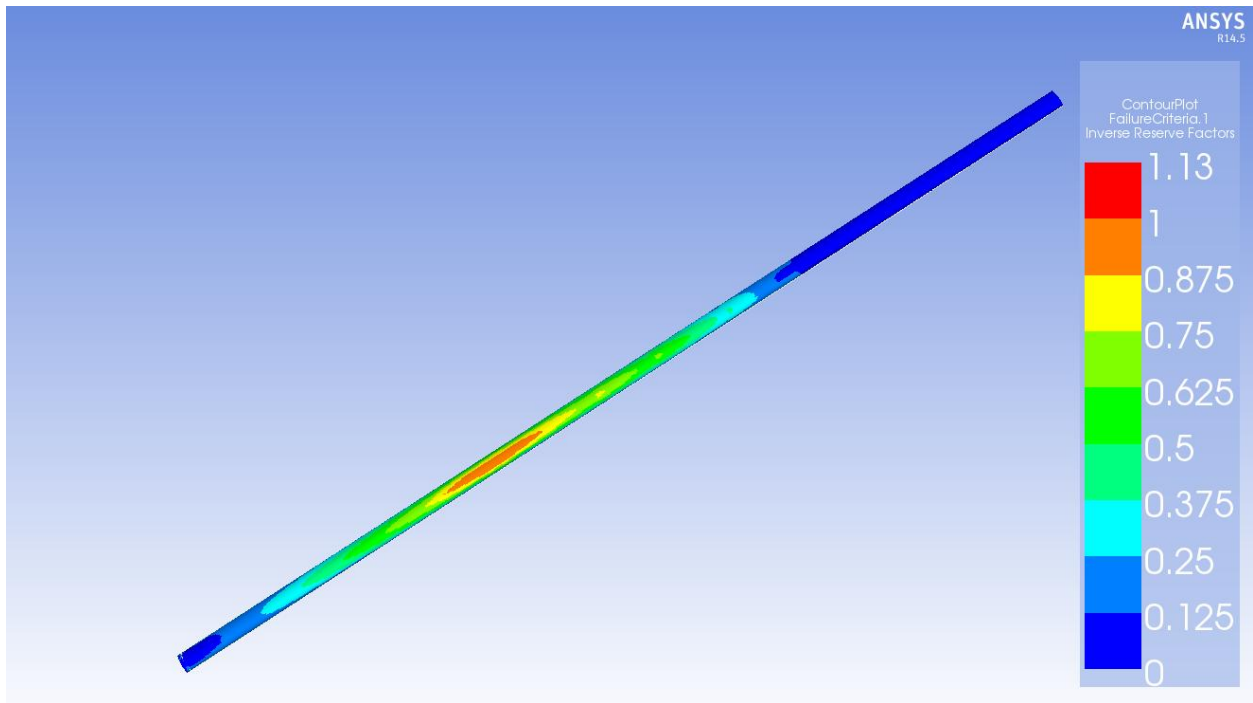
Tõmbele töötavatest pooltest on näidatud ainult üks kiht. Kuna komposiitide tugevus survele on väga palju nõrgem, siis tõmbe poole pealt tugevusvaru on kontrollitud kõige rohkem koormatud kihi järgi. Kõigi kihtide kohta on toodud kaks erinevat tugeuskriteeriumi –Tsai-Wu tugeuskriteerium on toodud seledel 4.21, 4.23 ja 4.25, maksimaalse pinge kriteerium on toodud seledel 4.22, 4.24 ja 4.26.



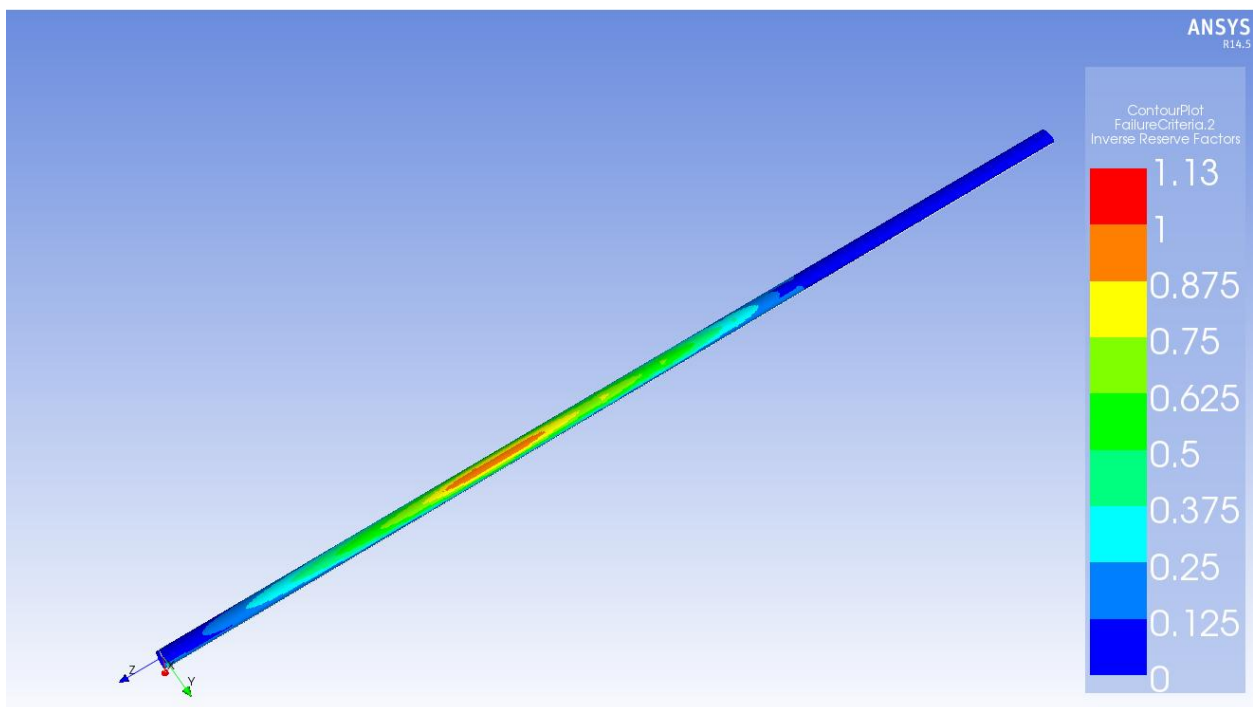
Sele 4.21. Materjal 3 tõmbele töötav pool, Tsai-Wu kriteerium



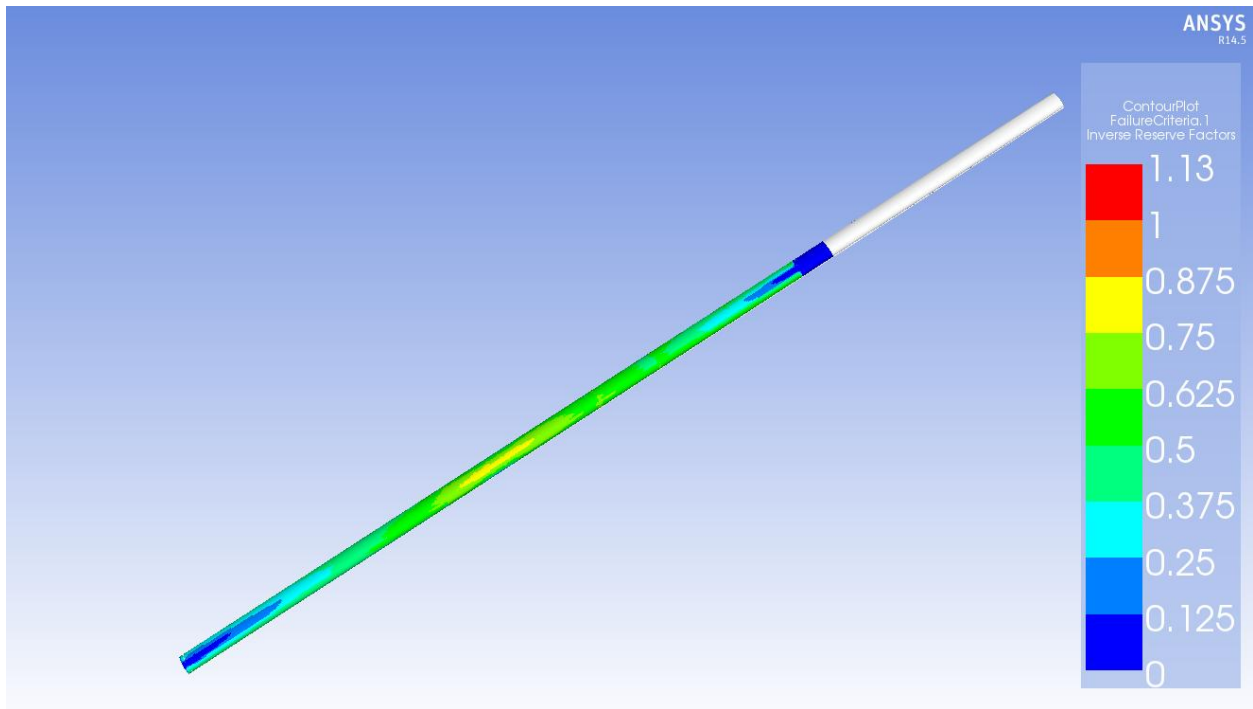
Sele 4.22. Materjal 3 tõmbele töötav pool, maksimaalse pinge teooria



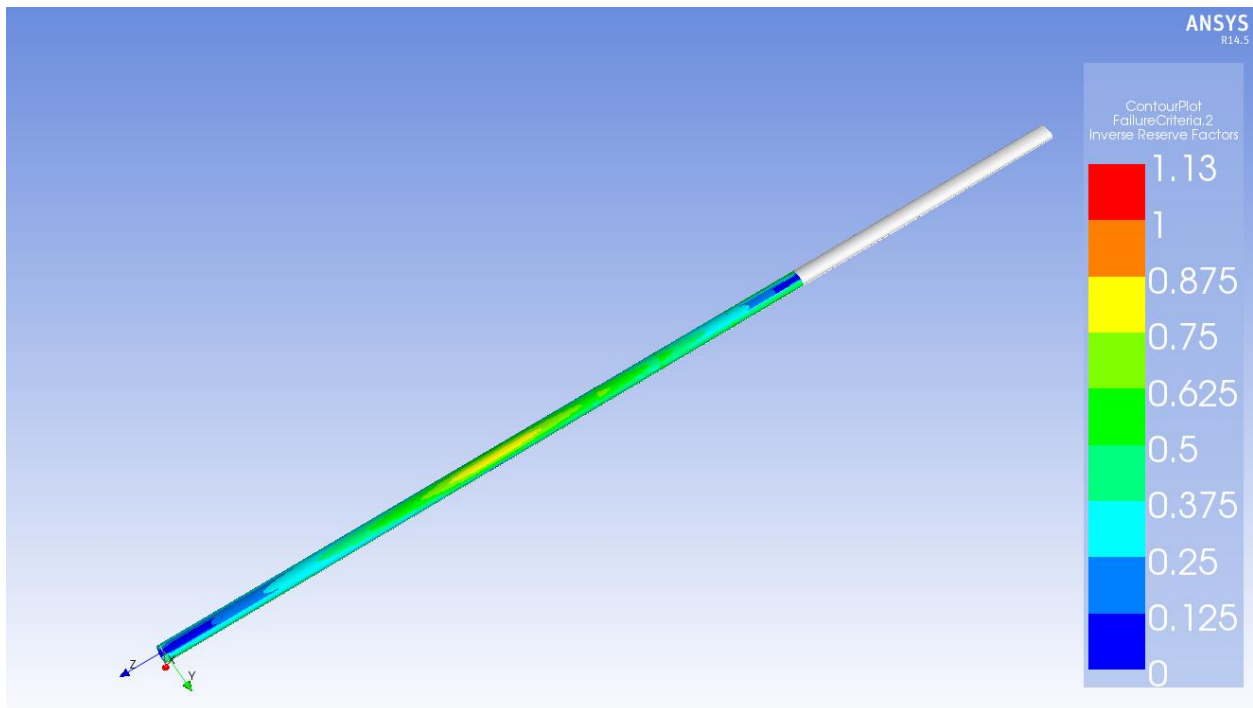
Sele 4.23. Materjal 3 survele töötav pool, Tsai-Wu kriteerium



Sele 4.24. Materjal 3 survele töötav pool, maksimaalse pinge kriteerium



Sele 4.25. Materjal 2 survele töötav pool, Tsai-Wu kriteerium



Sele 4.26. Materjal 2 survele töötav pool, maksimaalse pinge kriteerium

Ülevalpool toodud seledelt on näha, et Tsai-Wu ja maksimaalse pinge kriteeriumi tulemused erinevad antud olukorras väga vähe. Samuti on näha, et mõlema kriteeriumiga on kõige enam koormatud kihi koormus allpool kriitilist ja selle tõttu võib väita, et mudel 2 on edukas. Seledel lähemal uurimisel tuleb välja, et Tsai-Wu kriteerium on konservatiivsem ja sellest lähtuvalt on rakendatud seda masti kontrolliks. Lisas 1 on toodud ülejäänud kihtide tugevus vastavalt Tsai-Wu kriteeriumile. Lisas 2 on toodud ülejäänud kihtide tugevus vastavalt Tsai-Wu kriteeriumile. Lisas 3 on toodud kõige suuremate survepingete ala pingete jaotus.

## 4.5 Mudelite võrdlus

Standard mudelil ja mudelil 2 on väga lähedased painde tulemused, erinedes vähem kui 1 %. Vaadates tugevusanalüüsi on selge, et eelistatud on mudel 2, mis peab vastu testis tekkivad pinged. Tabelis 4.3 on toodud lihtsustatult materjali kulu võrdlus. Tabeli koostamisel on arvestatud, et kui tootmis meetodid jäävad samaks, siis on abi materjalide ja aja kulu sama. Selle tõttu on võimalik teha lihtsustatud kulude võrdlus kahe masti vahel.

Tabel 4.3. Mudelite materjalikogus

Mudel	Materjal 1		Materjal 2		Materjal 3		Materjal 4	
	Pindala, m <sup>2</sup>	Kaal, kg	Pindala, m <sup>2</sup>	Kaal, kg	Pindala, m <sup>2</sup>	Kaal, kg	Pindala, m <sup>2</sup>	Kaal, kg
Standard	1,03	0,309	5,13	1,026	1,41	0,282	5,64	1,692
2	-	-	3,14	0,628	5,4	1,08	1,41	0,423

Lihtsustatult võib vaigu koguse võtta võrdseks materjali kaaluga. Standard mudeli materjali kaal on 3,309 kg, seega vaigu koguse võib võtta võrdseks 3,309 kg-ga. Mudeli 2 materjali kaal on 2,131 kg ning vaigu kaal seega 2,131 kg. On näha, et vaigu koguses on võit suur, 36 %, kuid samas tuleb märkida, et materjali 3 kogus on suurenenud peaaegu neli korda. Sama palju on vähenenud materjali 4 osakaal. Materjal 3 on aga palju kallim kui materjal 4.

Tabel 4.4. Materjalide hinnad

Materjal	Hind	Ühik
Materjal 1	14	€/m <sup>2</sup>
Materjal 2	4	€/m <sup>2</sup>
Materjal 3	20	€/m <sup>2</sup>
Materjal 4	3	€/m <sup>2</sup>
Vaik	12	€/kg



Tabelist 4.4 on näha materjalide kulud ning on võimalik välja arvutada materjali hinnad ühe toote kohta. Standard mudeli materjalide maksumuseks tuleb ligikaudu 120 €. Mudeli 2 materjalide maksumus on ligikaudu 150 €. See teeb kahe mudeli materjalide hindade vaheks 20 %. Siinkohal ei ole taotletud täpset hinna kalkulatsiooni. Selle kalkulatsiooniga on soovitud näha, kas toode on majanduslikult mõeldav. Kahekümne protsendiline materjali hinna vahe ei ole väga suur, sest materjali hinna osakaal kogu tootmisest on väikene.

## 5. EDASINE TEGEVUSKAVA

Edasine tegevuskava näeb ette järgmiseid tegevuspunkte:

- Rohkemate materjalide katsetamine
- Mudeli loomine, mis vastaks masti koormusolukorrale purjetamise ajal
- Väsimus analüüs



Sele 5.1. DN paadid

## KOKKUVÕTE

AS E. & V. Foils on väike ettevõte, mis valmistab purjepaatidele erinevaid komponente. Põhiliselt valmistatakse tooteid väikestele Olümpia klassidele ja ka suurtele jahtidele. Viimastel aastatel on kiirelt suurenenud jääpurjekate varuosade valmistamine, põhiliselt DN klassi jääpurjekatele. DN on maailma kõige populaarsem jääpurjekas, mis on mõeldud sõitmiseks ühele inimesele. Kuigi DN klass on väga vana, on aastatega reeglid muutunud ning tootmiseks on lubatud kasutada erinevaid materjale. Kõige rohkem on need muudatused mõjutanud mastide ehitust, algselt olid need puidust, seejärel toodeti neid alumiiniumist ning nüüd kasutatakse eelkõige komposiitmaterjale. See muudatus on teinud paadi väga palju kiiremaks ning lihtsamaks sõita. Sellega aga kaasnesid alguses väga suured mured – mastid kippusid purunema suurte painete tõttu. Ka AS E. & V. Foilsilt poolt toodetud mastid on paaril korral võistlusolukorras purunenud. Antud töö ülesandeks oli uurida, mis olid mastide purunemise põhjused ja välja pakkuda uus mudel, mis oleks eelmisest vastupidavam. Samal ajal sooviti klientide ja ka ettevõtte poolt suurendada süsiniku hulka mastis ning vähendada klaasriide kogust.

Töö esimeses etapis teostati põhjalik uurimus komposiitmaterjalidest toodete projekteerimise ning kasutamise kohta. Komposiitide puhul valmib materjal ja toode sama aegselt ja see paneb tootjale väga suured kohustused. Komposiidid on ortotroopsed materjalid, omades erinevaid omadusi eri suundades. Sellest tulenevalt on väga oluliseks valmistamise kvaliteedi jälgimine, millest tulenevalt ei ole usaldusväärne võtta tugevusarvutustesse tarnijapoolseid materjali näitajaid.

Materjali omaduste leidmiseks lasti valmistada neljast erinevast materjalist, mida ettevõtte kasutab, katsekehad. Kõiki materjale testiti materjali peatelgede sihis tõmbele, survele ja nihkele. Kuigi ortotroopsetel materjalidel on vajalik sisestada ka xz ja yz tasapindade omadused, siis neid katseid ei sooritatud ning andmed võeti käsiraamatust. Kõik materjali katsetused viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja metroloogia katselaboris. Enamik katseid tehti viie katsekehaga, kuid survekatsetes, mis on komposiitide puhul väga kriitilised, tehti kümne katsekehaga. Survekatsetes kasutati rohkem katsekehasid, sest need tulemused võivad erineda kõige rohkem, kuna on tundlikumad materjali valmistamiskvaliteedile. Materjali katsetustest saadi vajalikud elastsusmoodulid, maksimaalsed pinged ja Poissoni tegurid. Peatasandi välised

omadused on võetud käsiraamatust, sest nende mõõtmiseks puudusid rakised ning nende mõju tulemustele on väike.

Toote geomeetria on paika pandud klassi määruste poolt ning selle muutmine ei olnud selle töö raames vajalik. Sellele lisaks ei ole käsitletud ka erinevaid tootmis meetodeid, sest ettevõttes on väga tugevalt juurutatud vaakumkoti meetod. Vaakumkoti meetod on lihtne ning väga efektiivne käsitsi lamineerimise edasiarendus, andes tootele paremad mehaanilised omadused. Vaakumiga on võimalik tihendada laminaati palju enam, kui käsitsi lamineerides. Samuti on sellega võimalik vähendada vaigu osakaalu, mis omakorda tugevdab laminaati.

Tugevusarvutuste sooritamiseks loodi CAD mudel, mille peale oli võimalik ehitada laminaat. Mudelile tehti mitmed lihtsustusi, et kiirendada ja hõlbustada arvutusi. Mudel erineb tegelikkusest palju ja selle tõttu oli vaja seda kontrollida, selleks võrreldi seda kahes erinevas koormusolukorras ning kõrvutati ka saadud tulemusi tootmises mõõdetud andmetega.

Laminaatide tugevuse hindamiseks on olemas kolm fundamentaalset meetodit:

- Esimese kihi purunemine
- Täielik purunemine
- Kihtidevaheline purunemine ehk delamineerimine

Antud töös on käsitletud ainult esimese kihi purunemist, kuigi see ei pruugi tähendada kogu laminaadi purunemist on see antud töös piisav. Komposiitide tugevuse arvutamiseks on välja pakutud väga palju erinevaid tugevusteooriaid, milledest selles töös on lähemalt vaadeldud kahte – maksimaalse pinge teooria ja Tsai-Wu kriteerium. Kõige laialdasemalt on kasutatav teooria anisotroopsete materjalide jaoks on Tsai-Wu. Selle meetodi puuduseks on materjalikatsetuste sooritamise vajalikkus, selgitamaks välja materjali konstandid. Selles töös on kasutatud kõige konservatiivsemaid konstante.

Masti tugevusanalüüsiks kasutatakse USAst levima hakanud niinimetatud üheksa tolli katset, mis on Euroopas kohandatud ¼ meetri katseks. Selle katse eesmärgiks on simuleerida võistluskorda, mida on väga lihtne tootmises teostada. Analüüside sooritamiseks kasutatakse ANSYS ja ACP tarkvara.

Komposiitide puhul on põhiliseks purunemise põhjuseks vähene survetugevus, mis tuleb välja ka käesolevas lõputöös. Standardse masti mudeli korral on kõige enam koormatud kihtides ületatud survetugevus peaaegu kahekordselt, kui tõmbetugevus jääb allapoole kriitilist. Arvestades saadud tulemusi on koostatud uued laminaadi skeemid. Kõige suuremaks väljakutseks skeemide koostamisel oli materjalide väga suur jäikuse vahe. Täiustamise juures oli vajalik jälgida et masti paindegraafik jääks samaks, mis standard mastil. Samuti tuli süsinikku hulka suurendada ja klaasriide hulka vähendada. Tugevusanalüüsist ilmnnes, et mudel 2 vastas kõigile ettekirjutustele.

Töö käigus tutvuti komposiidist toote projekteerimisega ja erinevate meetoditega laminaatide tugevuse arvutamiseks. Arvutuslike mudeli kokku sobivusest reaalse tulemustega võib järeldada, et mudel on koostatud korrektselt ning tulemused on usaldusväärsed. Pärast lõputöö valmimist jätkub projekt erinevate materjali katsetustega ning uue ANSYS mudeli loomisega, et uurida reaalselt purjetamis olukorda.

## SUMMARY

Ltd. E. & V. Foils is a small company that produces different components for boat, mostly for small Olympic classes and bigger yachts. Recently production for DN ice yachts has seen big growth. DN is the world's most popular ice yacht that is for single-handed racing. The DN is a very old design but has seen constant improvements in rules to make the class safer and faster. The biggest change has been in masts that were once built out of wood, then aluminum and now composites. This change has made the boat much faster and simpler to sail. This change has also brought with it problems of masts braking during sailing. The same problem has plagued some of the company's masts. The aim of this paper is to investigate the reason for these breakages and develop a new laminate that is more durable. Clients and the company also wanted to increase the amount of carbon fiber and reduce glass fiber inside the mast.

In the first part of the thesis, materials about composite design and testing were gathered. With composites, material and product are formed at the same time and this puts big responsibility on the manufacturer. Composites are orthotropic materials and have different properties depending on loading direction, this makes production quality very important. For that reason fiber and composite datasheets are not very reliable for strength calculations.

To find out material properties a number of laminate test specimens were made, these were tested for tension, compression and shear. Orthotropic materials need properties defined in xz and yz planes, these tests were not done, and the data was gathered from datasheets. All the material tests were conducted in Tallinn University of Technology. Most tests had five specimens apart from compressive test specimens, that had ten. The reason behind this was that compressive test results are more inclined to differences due to production quality. From material tests Young's modulus, maximum stresses and Poisson ratios were obtained. Off plane data was taken from datasheets, because there are no jigs for testing.

Mast geometry is roughly defined by the class rules and the company is happy with their current design and is not planning to change this. Also different production methods were not discussed in this paper for the same reason, company has been using vacuum bagging method for so long and has perfect the use. Vacuum bagging is very simple but effective development for hand lay-

up, giving better mechanical properties to laminate. Vacuum enables better consolidation than hand lay-up, this reduces the amount of epoxy, thus strengthening the laminate.

CAD model was created for strength calculations, on top of that model the laminate was built. A number of simplifications was made to have simpler and faster calculations. Because the model is different from the actual mast it had to be tested, for that mast bends with two different loading scenarios were compared to actual bends.

There are three fundamental methods to determine laminate strength:

- First layer failure
- Complete failure
- Delamination

In this work only first layer failure was used, although this might not mean that the whole laminate fails it is enough for this case. A number of theories have been proposed for laminate failure criteria, in this paper two were considered more closely – maximum stress theory and Tsai-Wu theory. The most widely used failure criteria for isotropic materials is Tsai-Wu. The biggest downside to this method is that it needs out of plane material tests to determine material constants. The most conservative constants have been used in this work.

The analyse masts in production a so called nine inch test has started from USA a further modification in Europe is the ¼ meter test. The goal of these tests is to simulate sailing conditions in production and it is very easy to set up. To perform the analysis ANSYS and ACP software were used.

Composites have the tendency to break under compression and this was also obvious from this work. In the standard model the most used layers stresses were double of that of the breaking stress, whereas the stress on tension side were well below critical. Having taken into consideration the results a new laminate layup was developed. The biggest obstacle was very different Young's modulus in materials. Besides that there were a number of things to consider, the masts bend characteristics had to remain the same and the amount of carbon fibre had to be increased in the mast, as well as the amount of glass fibre had to reduce. From the simulations it was obvious that the best solution was model 2.

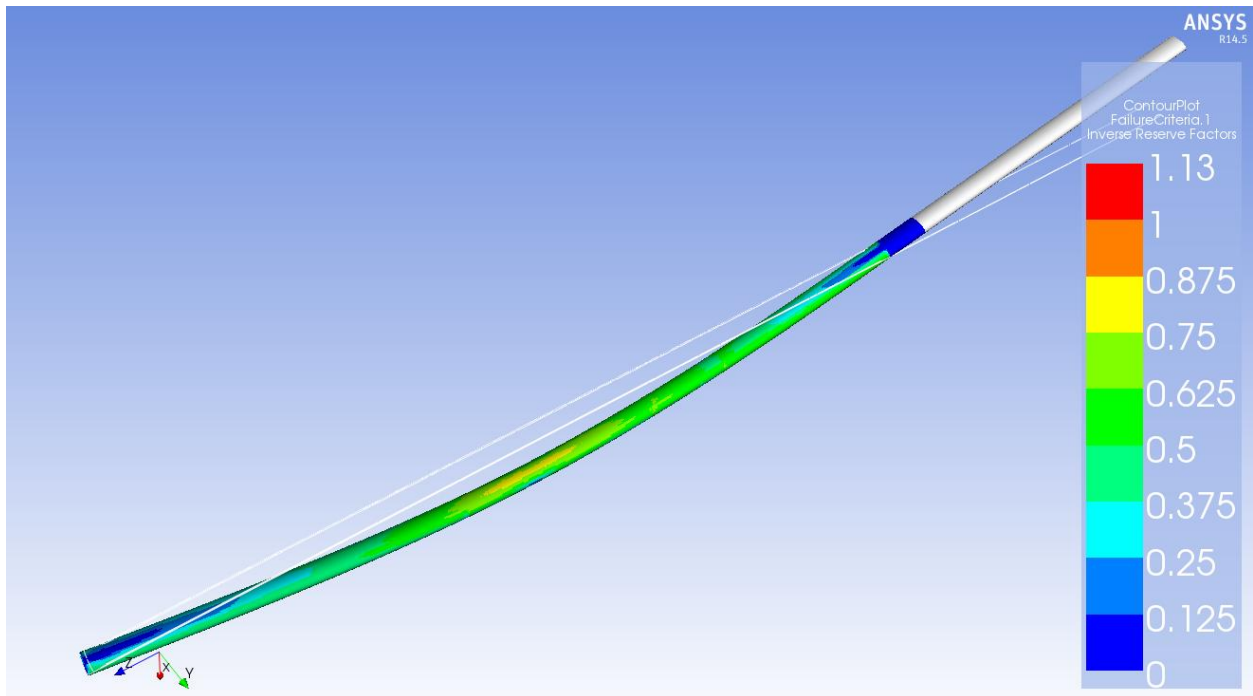
The author acquainted himself with composite product design and the various methods for calculating the strength of laminates. Reliability of the results can be concluded from the computational models compatibility with the actual results. After completion of this thesis the project will continue experimenting with different materials and creation of a new ANSYS model to study real sailing conditions.



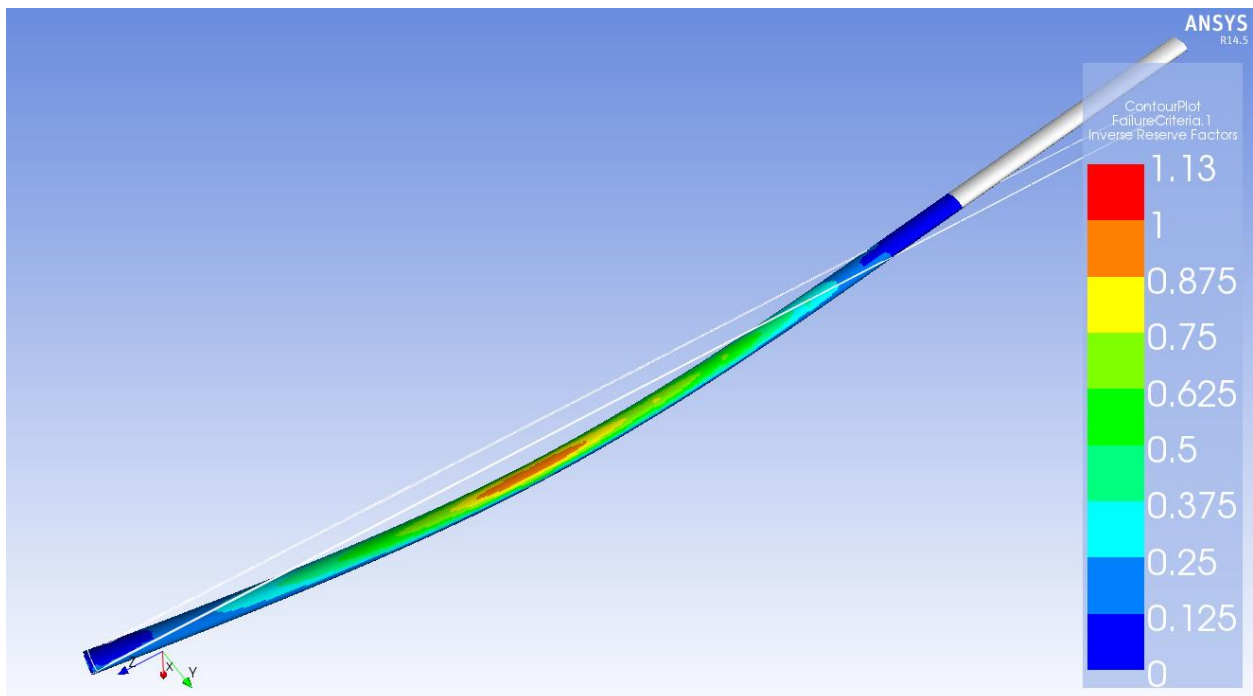
## KIRJANDUSE LOETELU

1. MIL-HDBK-17-3F, CompositeMaterialsHandbookVolume 3 – PolymerMatrixCompositesMaterialsUsage, Design, and Analysis, US Department ofDefence, 17 juuni 2002
2. MIL-HDBK-17-1F, CompositeMaterialsHandbookVolume 1 – PolymerMatrixCompositesGuidelinesforCharacterization of StructuralMaterials, US Department of Defence, 17 juuni 2002
3. MIL-HDBK-17-2F. CompositeMaterialsHandbookVolume 2 – PolymerMatrixCompositesMaterialsProperties, US Depratment of Defence, 17 juuni 2002
4. IDNYRA 2014 YEARBOOK, International DN IceYachtRacingAssociation, 2013
5. GuritGuidetoComposites v5, 2013
6. Glass/CarbonFibreHybridCompositeLaminatesforStructuralApplications in AutomotiveVehicles, J. Zhang, K. Chaisombat, S.he, C.H. Wang
7. CompositeStructuralMembersforShortSpanHighwayBridges, F.V. Ulloa, T.J. Fowler, ReasearchReport 1773-1, 2002
8. CompressiveFailure of FibreComposites, N. A. Fleck, Advances in AppliedMechanics, Volume 33, 1997
9. ANSYS CompositePrepPostUser’sGuide,Release 15.0, ANSYS inc, November 2013
10. TheFundamentalPrinciples of CompositeMterialStiffnessPredictions, D. Richardson, University of theWest of England
11. Wright, J. (2012). AdhesiveBondedStructures. – Epoxyworld (34), 1-3

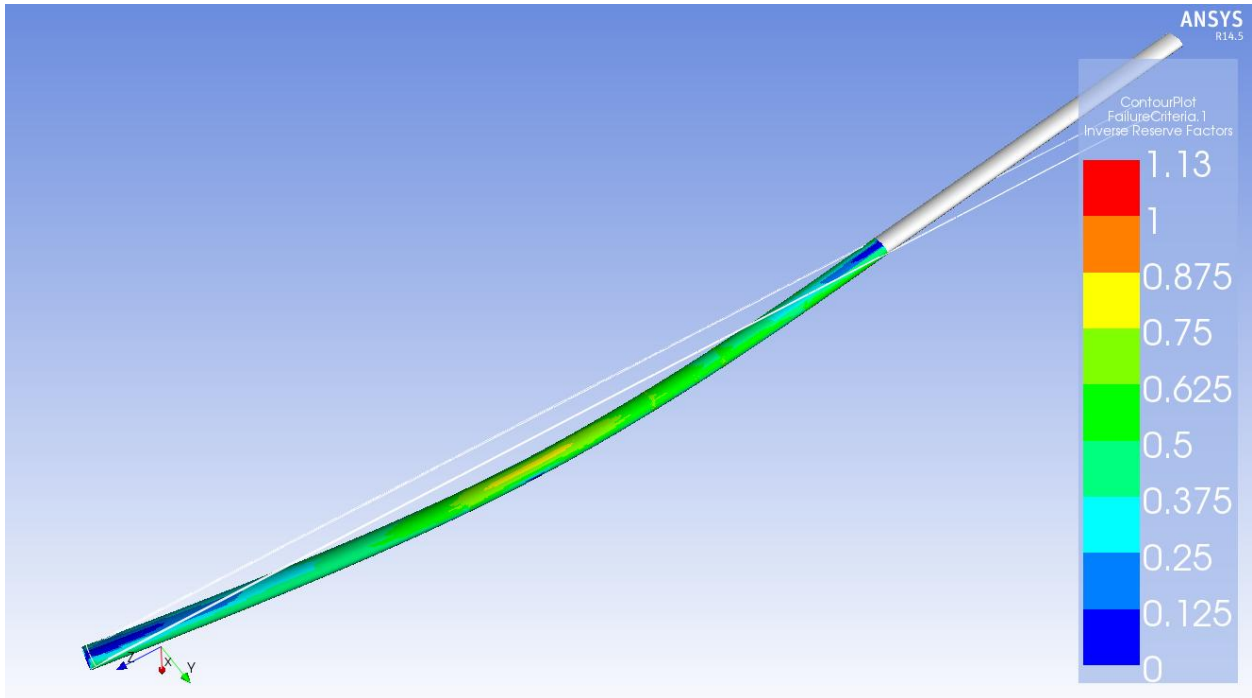
# LISA1



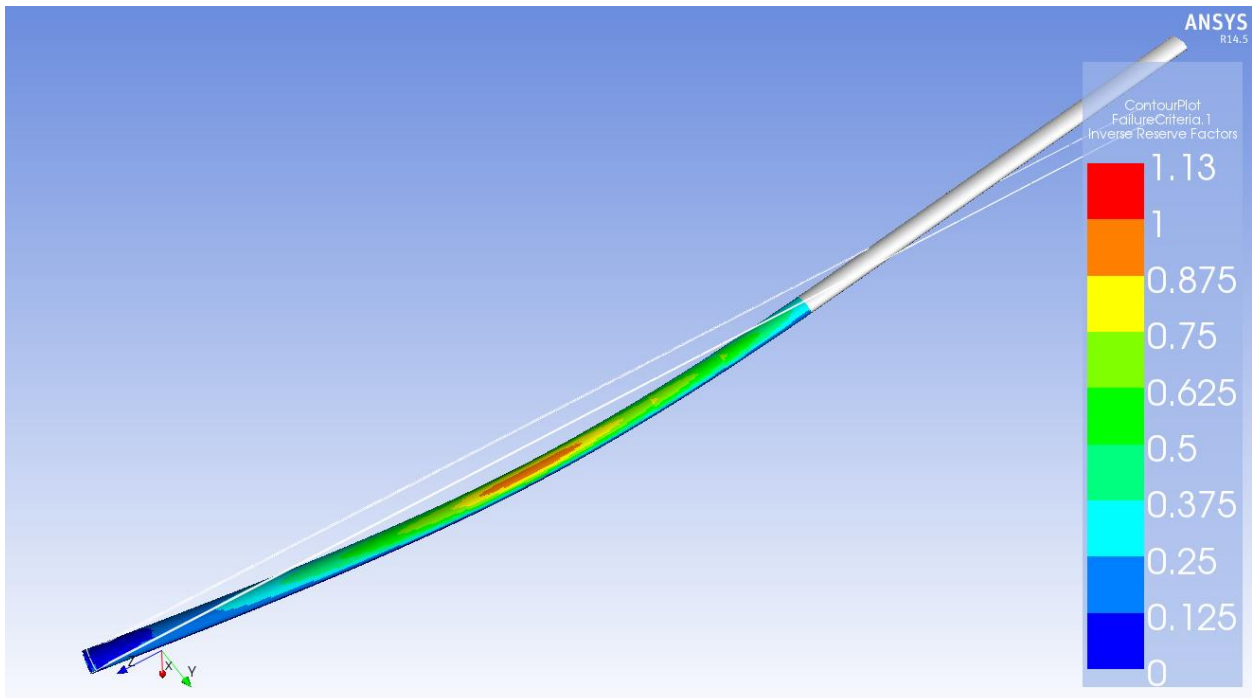
Sele 5.1. Kiht 3, survele töötav pool



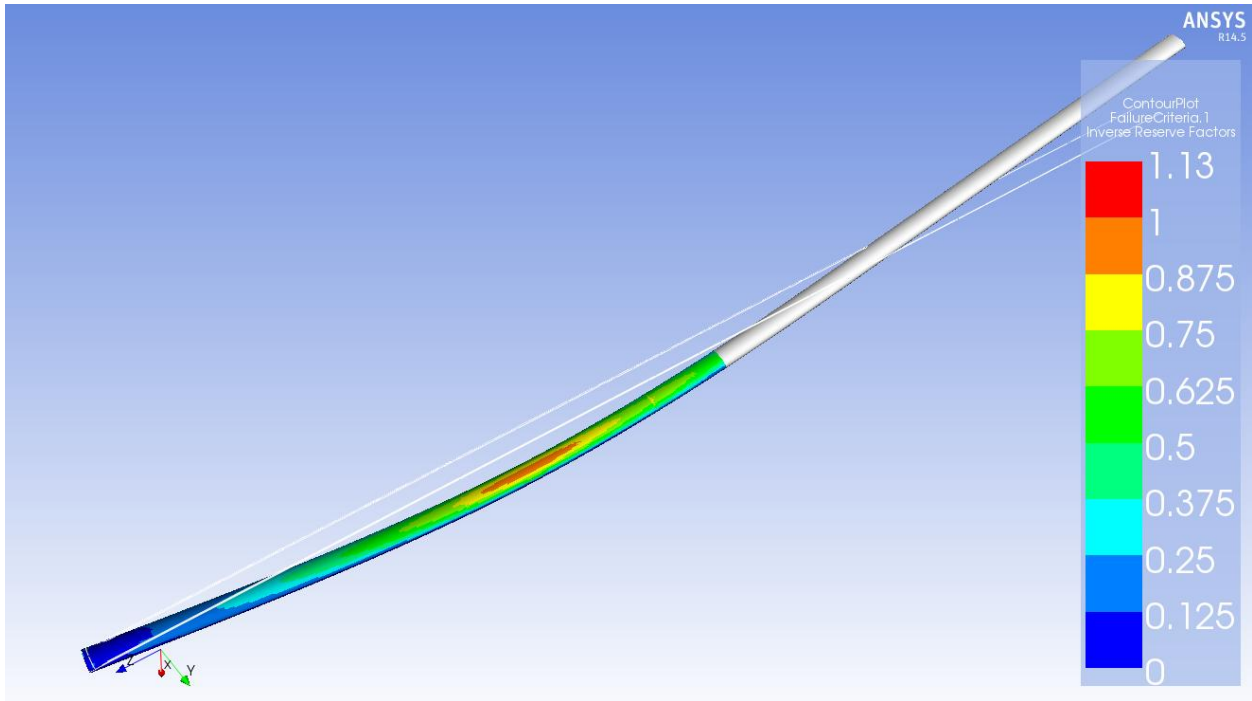
Sele 5.2. Kiht 4, survele töötav pool



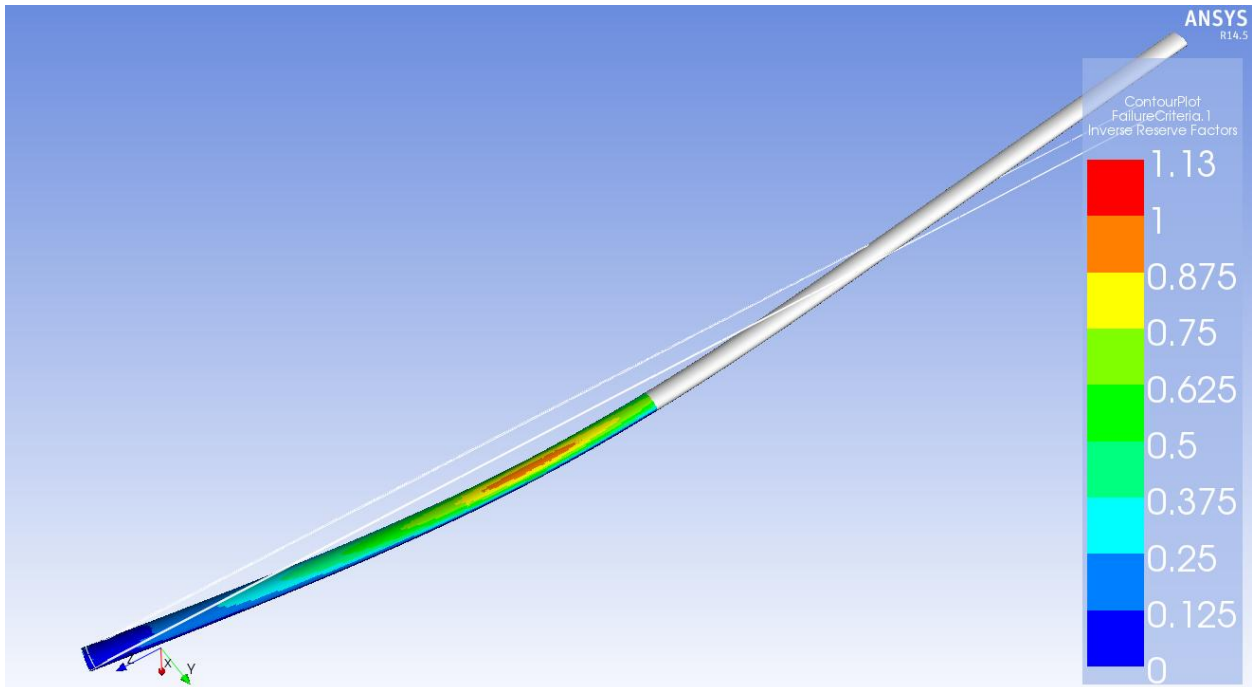
Sele 5.3 Kiht 5, survele töötav pool



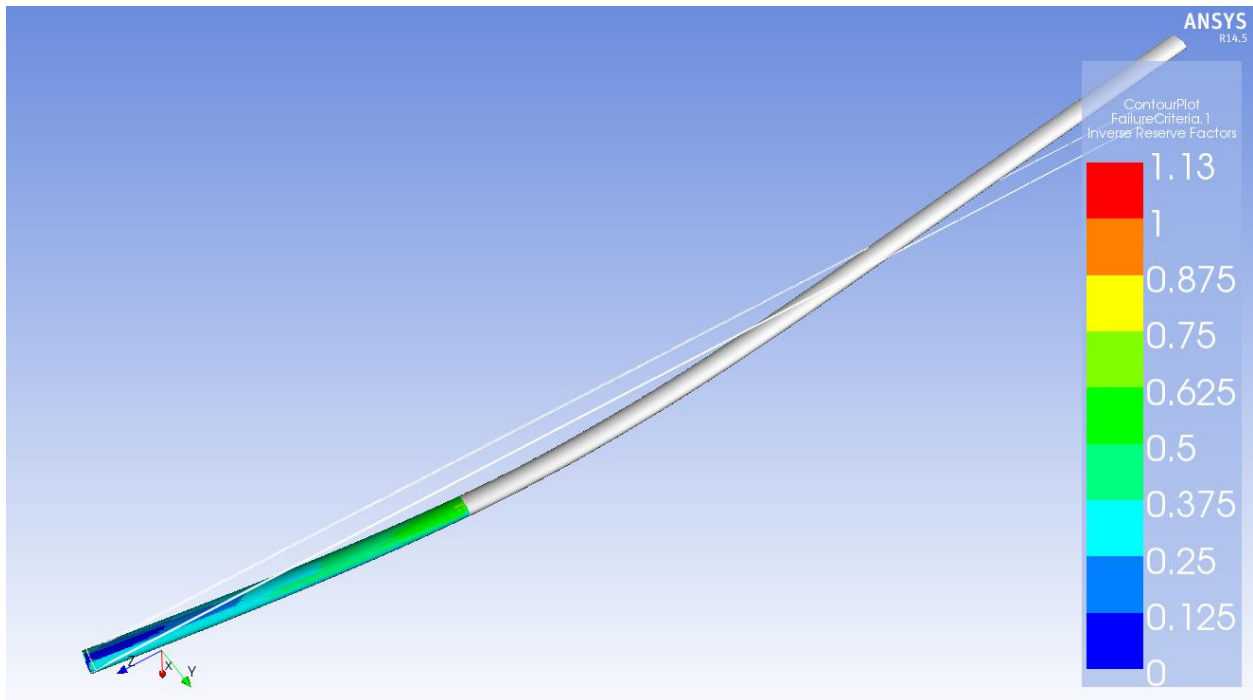
Sele 5.4. Kiht 6, survele töötav pool



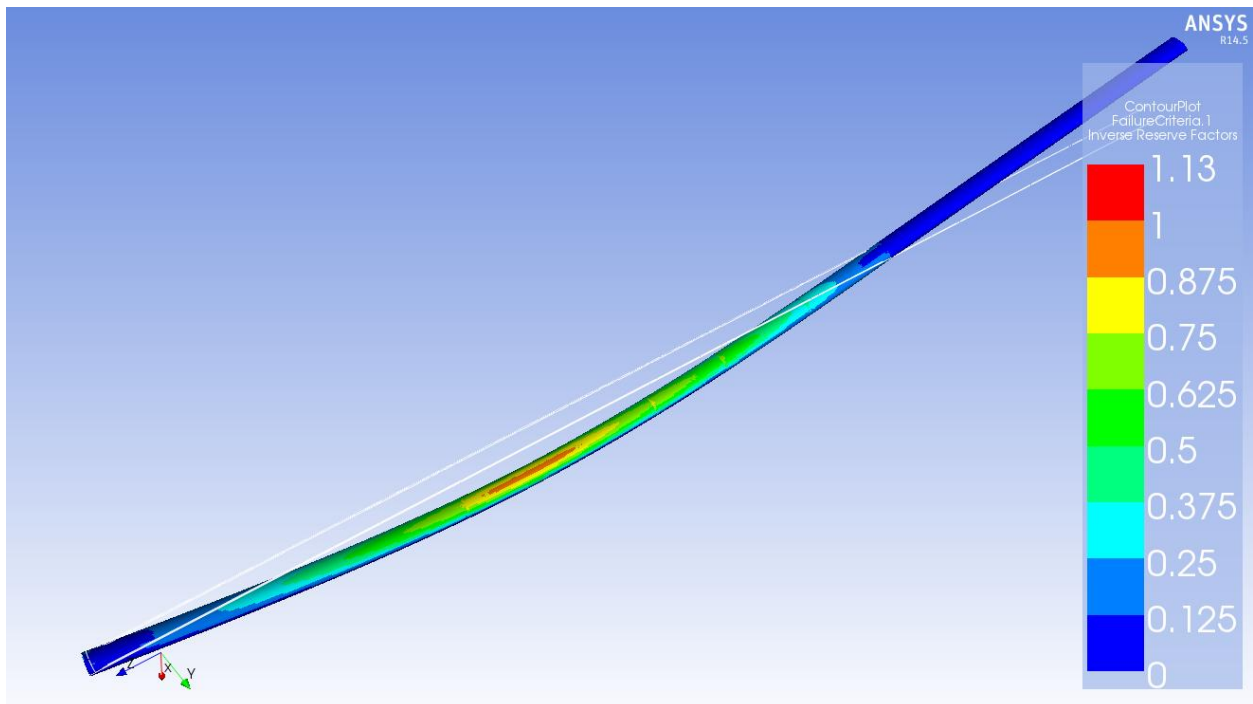
Sele 5.5. Kiht 7, survele töötav pool



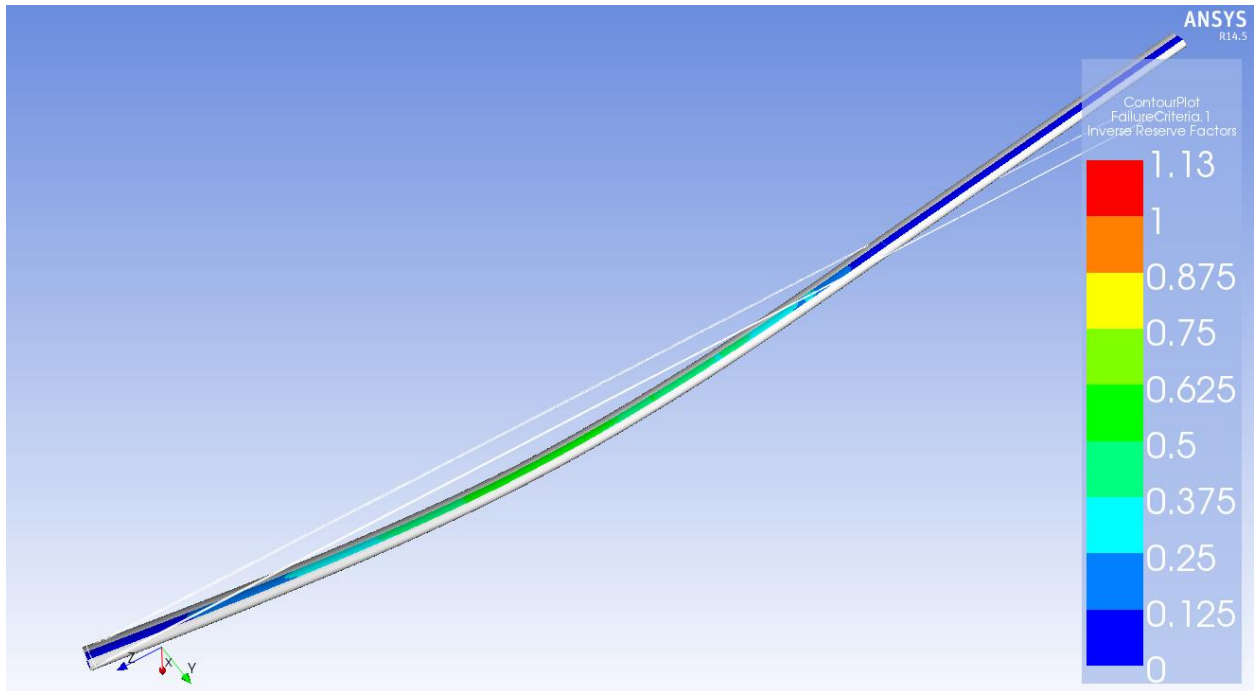
Sele 5.6. Kiht 8, survele töötav pool



Sele 5.7. Kiht 9, survele töötav pool

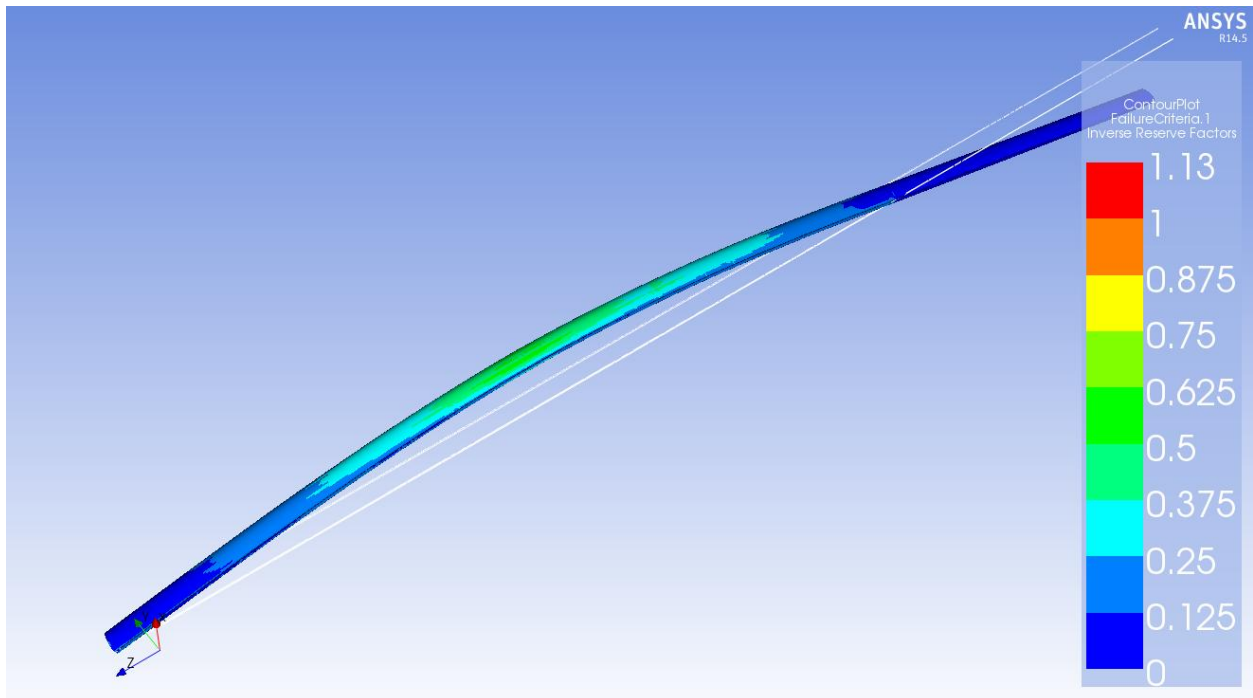


Sele 5.8. Kiht 10, survele töötav pool

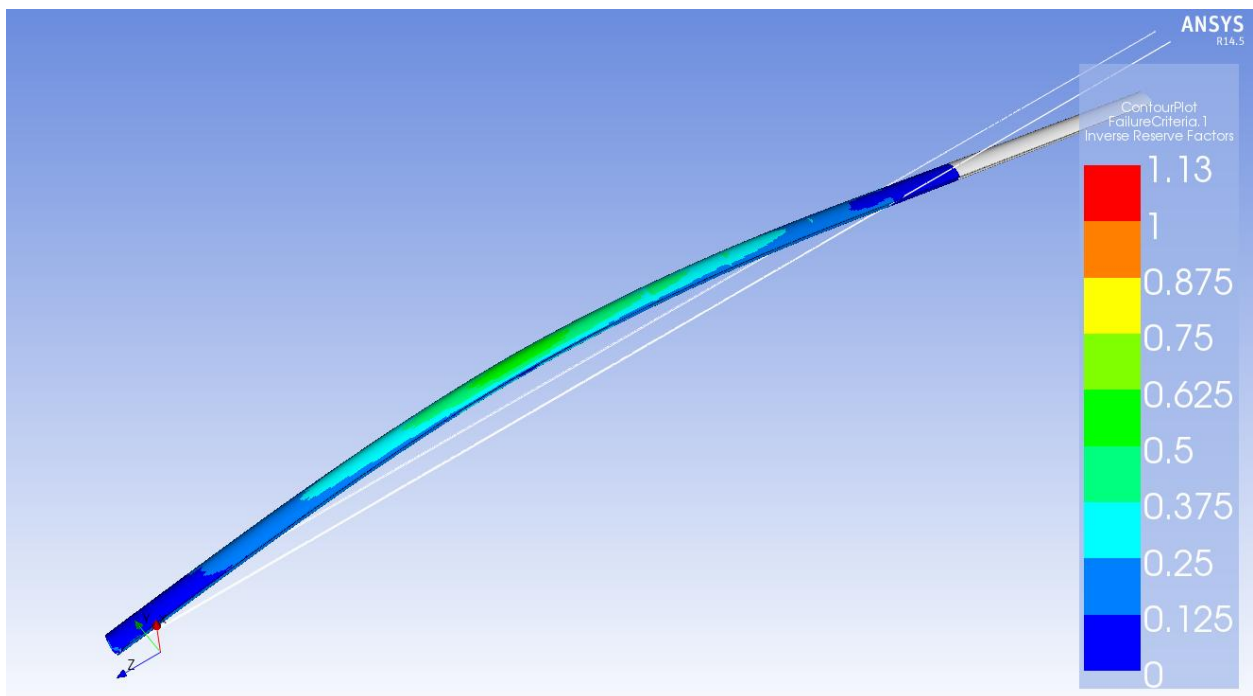


Sele 5.9. Survele töötav kokkupaneku riba

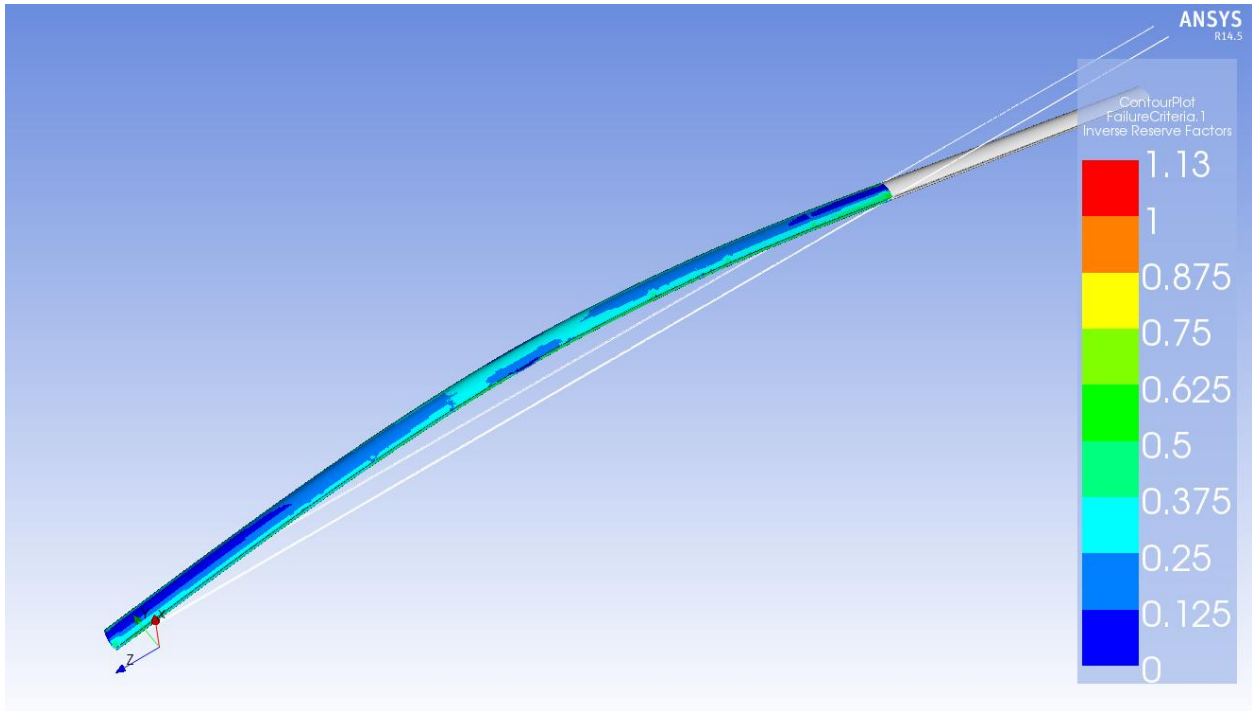
## LISA 2



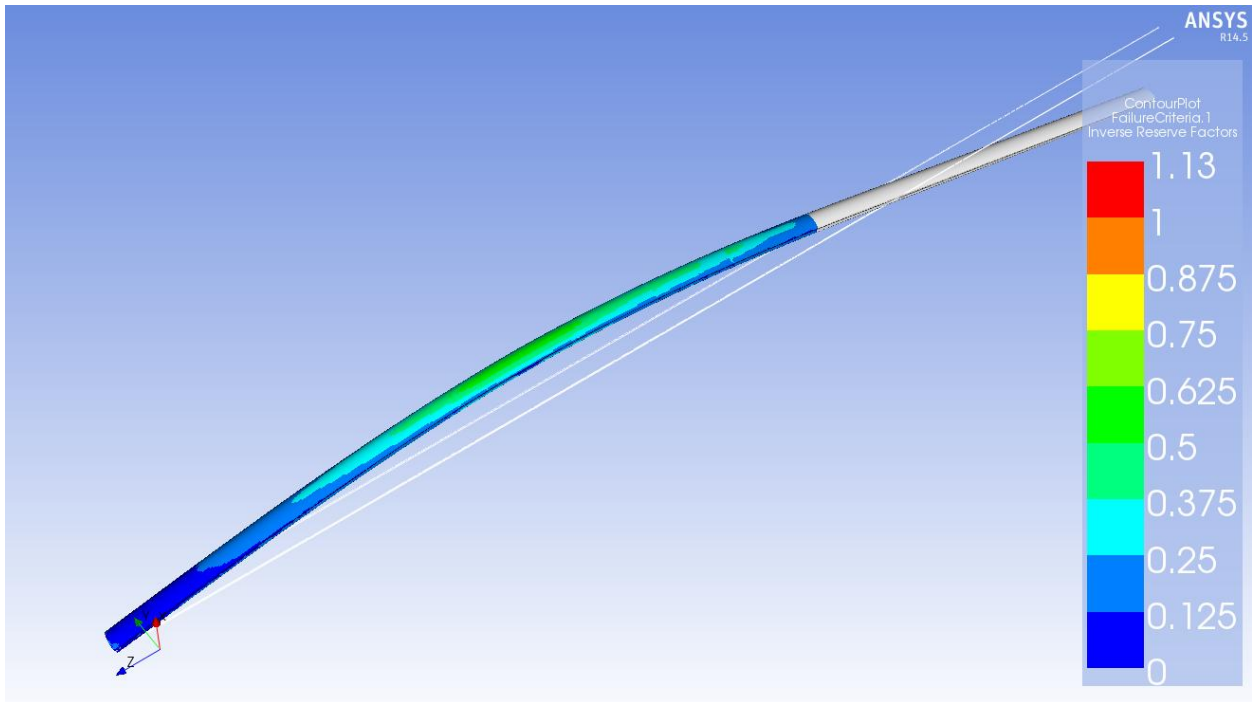
Sele 6.1. Kiht 1, tõmbele töötav pool



Sele 6.2. Kiht 4, tõmbele töötav pool

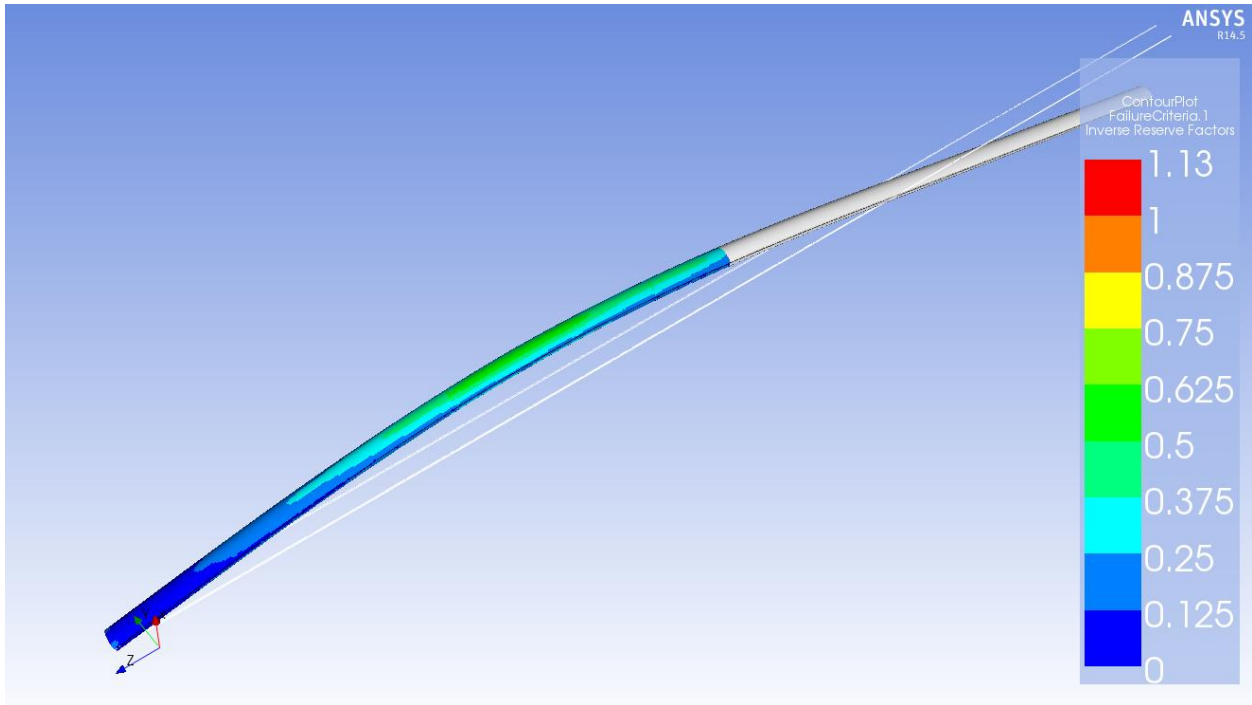


Sele 6.3. Kiht 5, tõmbele töötav pool

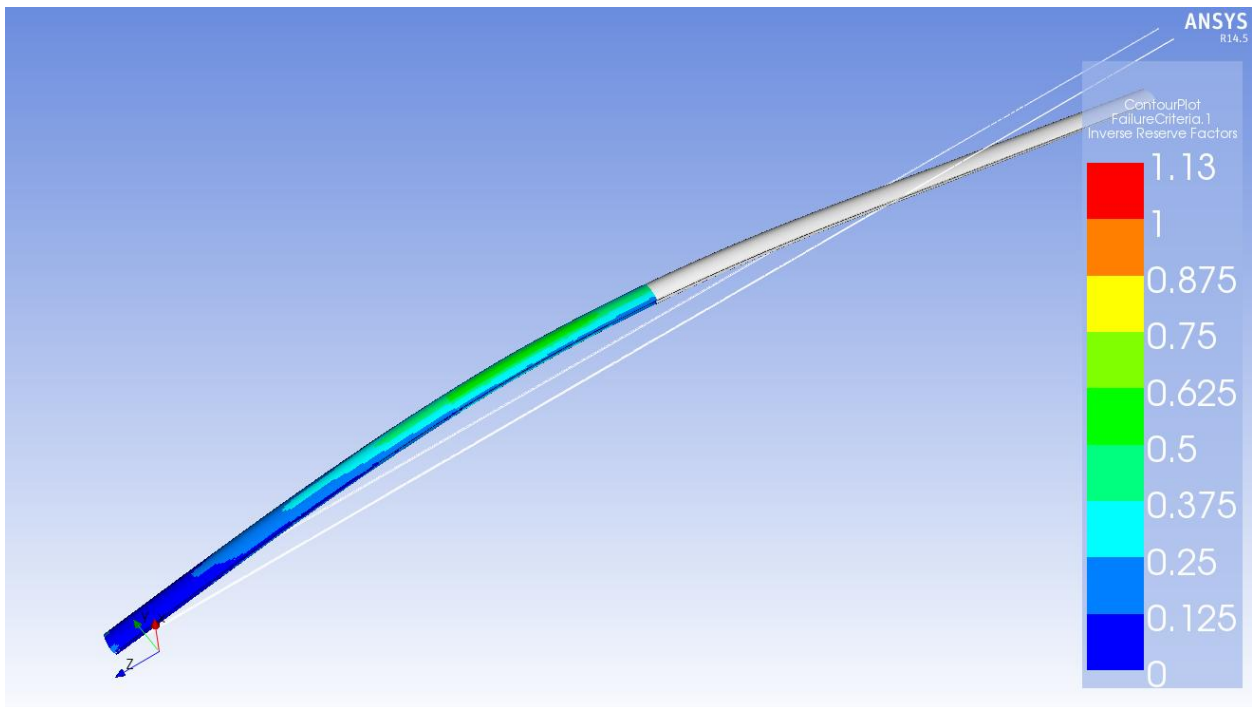


Sele 6.4. Kiht 6, tõmbele töötav pool

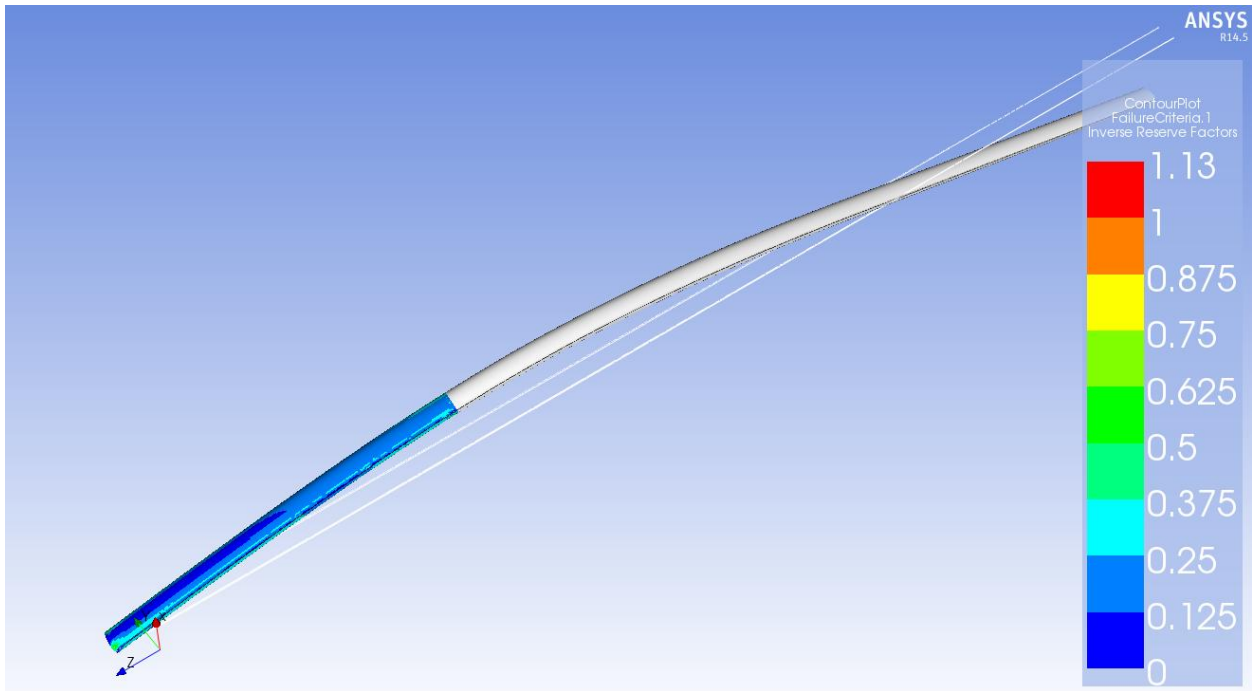




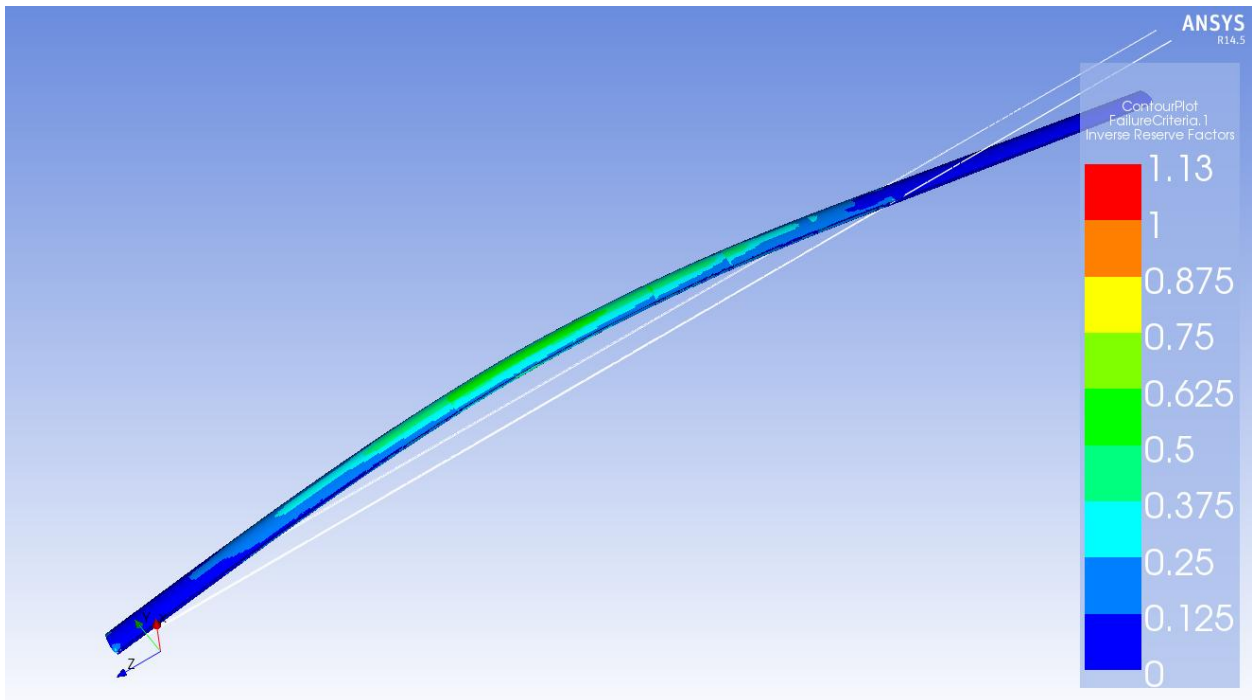
Sele 6.5. Kiht 7, tõmbele töötav pool



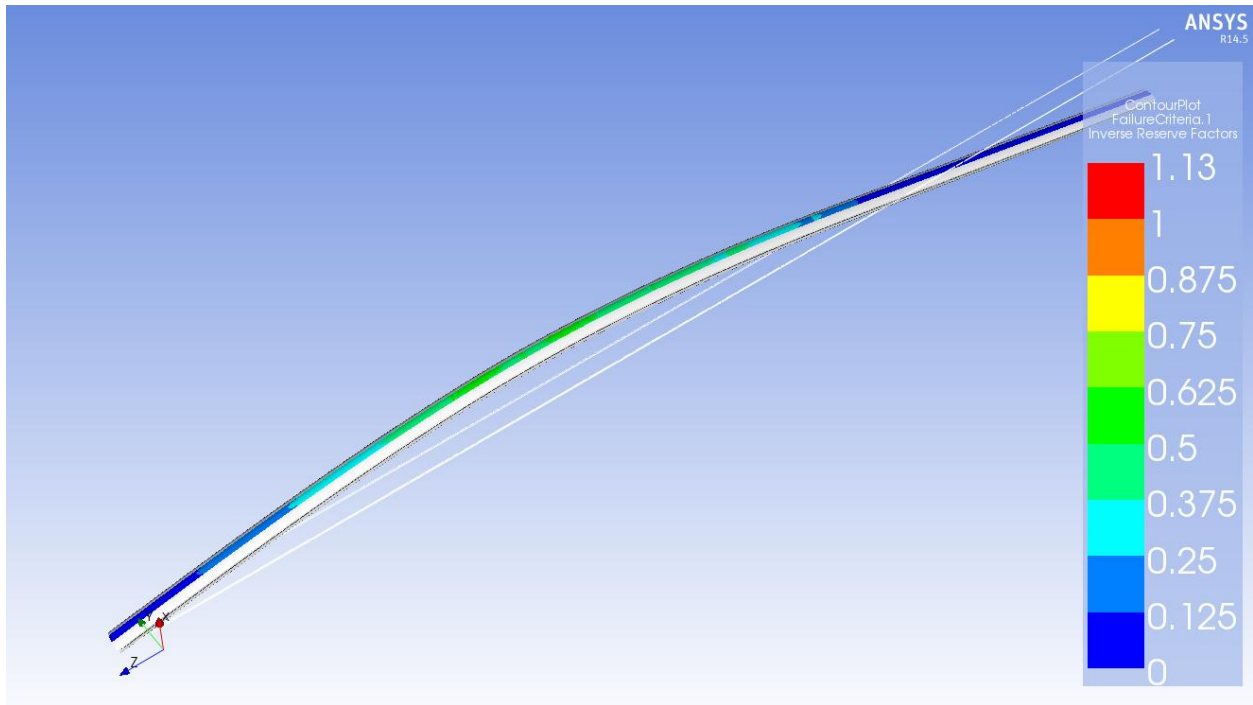
Sele 6.6. Kiht 8, tõmbele töötav pool



Sele 6.7. Kiht 9, tõmbele töötav pool

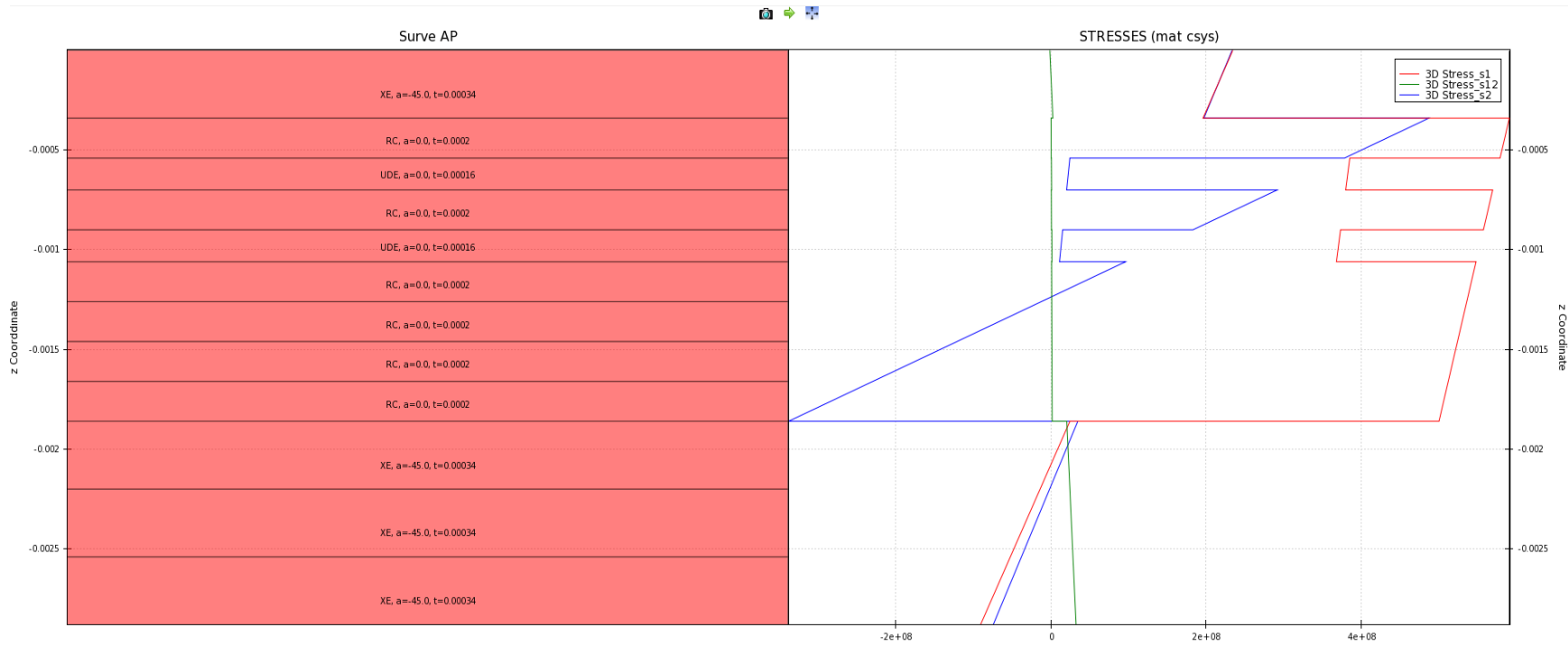


Sele 6.8. Kiht 10, tõmbele töötav pool



Sele 6.9. Tõmbele töötav kokkupaneku riba

# LISA 3



Sele 7.1. Pingete jaotus survele töötaval poolel