



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

Tootearenduse õppetool

MES70LT

Mart Suurkivi

**LEHTVORMITAVUSDIAGRAMMI MÄÄRAMINE
TH550 TERASPLEKILE**
Magistritöö

Autor taotleb
tehnikateaduste magistri
akadeemilist kraadi

Tallinn
2016

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.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”201... a.

..... allkiri

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE

2016 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Mart Suurkivi, 132401MATM

Õppekava: MATM02/11 - Tootearendus ja tootmistehnika

Eriala: Tootearendus

Juhendaja: Henri Lend, Mehaanika ja tööstustehnika instituudi nooremteadur

Konsultandid:

.....

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

(eesti keeles) Lehtvormitavusdiagrammi määramine TH550 terasplekile

(inglise keeles) Determination of Forming Limit Curve for TH550 sheet metal

Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Rakiste projekteerimine ning valmistamine katsekehade freesimiseks.	15.03.2016
2.	Lehtvormitavusdiagrammi teooria kirjapanek.	30.03.2016
3.	Vormimiskatse ja tõmbekatse läbiviimine.	01.04.2016
4.	Andmete järeltöötlus. Lehtvormitavusdiagrammi konstrueerimine.	01.05.2016
5.	Seletuskirja ja jooniste vormistamine.	20.05.2016

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid: Katserakiste projekteerimine vormimiskatse ja tõmbekatse toorikute freesimiseks. Seejärel katsete läbiviimine ning andmete järeltöötlus, et leida materjalile lehtvormitavusdiagramm.

Töö keel: eesti keel

Kaitsmistaoetus esitada dekanaati hiljemalt 16.05.2016 **Töö esitamise tähtaeg** 20.05.2016

Üliõpilane Mart Suurkivi /allkiri/ kuupäev

Juhendaja Henri Lend /allkiri/ kuupäev

SISUKORD

MAGISTRITÖÖ ÜLESANNE	3
SELED	6
TABELID	7
EESSÕNA	8
SISSEJUHATUS	9
PÕHIOSA	11
1 Üldine informatsioon	11
1.1 Teraspleki TH550 lühiülevaade	11
1.2 Lehtvormitavusdiagrammi ülevaade ja teooria	12
1.3 FLC kasutamise näited	14
1.3.1 Volvo XC90 uksepaneel	15
1.3.2 Dynaform	16
1.4 FLC määramise protseduur	17
1.4.1 Nakajima katse olemus	17
1.4.2 Katsekehade valmistamine	18
1.4.3 Vormimiskatse ja andmete järeltöötlus	20
1.5 FLC määramise alternatiivid	21
1.5.1 Marciniak'i katse	21
1.5.2 FLC määramine stantsimistöökodades	22
1.5.3 Gaasijoaga vormimine	23
1.5.4 Teoreetiline FLC leidmine	24
1.5.5 FLC simuleerimine FEM abil	26
2 Freesimisrakiste projekteerimine	28
2.1 Ülevaade	28
2.2 Freespingi piirangud	29
2.3 Funktsiooni graafik	30
2.4 Ideede genereerimine	30
2.4.1 Variant nr. 1	31
2.4.2 Variant nr. 2	32
2.4.3 Variant nr. 3	33

2.4.4	Variant nr. 4.....	33
2.5	Kokkuvõte	34
2.6	Lõpliku variandi valik	35
2.7	Rakise sõlmede projekteerimine.....	36
2.7.1	Alusplaat.....	36
2.7.2	Tooriku täpne paigutus.....	37
2.7.3	Tooriku kinnitamine rakisesse	37
2.7.4	Üldkoost	41
2.8	Tõmbekatse kehade freesimisrakis	41
2.8.1	Ideede genereerimine	42
2.8.2	Rakise projekteerimine ning valmistamine	43
3	Katsete läbiviimine	45
3.1	Vormimiskatse.....	45
3.1.1	Katseseade ja rakistus.....	45
3.1.2	Katsekehade ettevalmistus	47
3.1.3	Deformatsioonide mõõtmine (ARAMIS).....	49
3.1.4	Vormimine	53
3.2	Tõmbekatse.....	54
3.2.1	Katseseade	54
4	Katseandmete järeltöötlus	57
4.1	Mõõtmistulemuste arvutamine	57
4.2	Ristlõigete eksportimine	58
4.3	Vormimiskõvera konstrueerimine	58
4.4	Tõmbekatse tulemused	59
	KOKKUVÕTE.....	62
	SUMMARY	63
	VIIDETE LOETELU	64
	LISAD	66
	Lisa 1	66
	Lisa 2	67
	Lisa 3	68

SELED

- Sele 1.1. Tinatatud plekist aerosoolpudelid
- Sele 1.2. Ellipsi peatelgede deformatsioonid
- Sele 1.3. FLC diagrammi üldskeem
- Sele 1.4. FLC erinevate piirkondade selgitav skeem
- Sele 1.5. Volvo XC90 uksepaneeli peamised defektid
- Sele 1.6 Simuleerimistulemuste võrdlus
- Sele 1.7. FLC kasutamise praktiline näide
- Sele 1.8. Nakajima katse tööriista läbilõige
- Sele 1.9. a – materjali valtsimissuund terasest katsekehade korral
- Sele 1.10. Vormimiskatse toorikud
- Sele 1.11. Tööriista ristlõige Marciniak'i katse korral
- Sele 1.12. Gaasijoaga vormimine
- Sele 1.13. Gaasijoa matriitsid
- Sele 1.14. M-K teooria matemaatiline mudel
- Sele 1.15. Katsetuse ning simulatsioonitulemuste võrdlusgraafik
- Sele 2.1. Freesi ning padrundi mõõtmed
- Sele 2.2. Rakise variant nr. 1
- Sele 2.3. Universaalne kinnituselement freespingile
- Sele 2.4. Rakise variant nr. 2
- Sele 2.5. Rakise variant nr. 3
- Sele 2.6. Rakise variant nr. 4
- Sele 2.7. Freesitud sooned
- Sele 2.8. Tooriku asendi piirajad
- Sele 2.9. Rakise kinnituselemendid
- Sele 2.10. Sulgur 37 6625-2
- Sele 2.11. Distantis sulguri ja aluspinna vahel
- Sele 2.12. Lisasulgur ja reguleeritav seadekrugi
- Sele 2.13. Koostatud rakis kinnitatuna freespink
- Sele 2.14. Freesimisrakise eskiis
- Sele 2.15. Tõmbekatse toorikute freesimisrakis
- Sele 3.1. Instron 8802
- Sele 3.2. Vormimiskatse rakis.

Sele 3.5. Tooriku fikseerimiselemendid.

Sele 3.6. a – talgiga kaetud katsekehad; b - stohhastiline muster katsekehadel

Sele 3.7. Kaamerate asendiskeem

Sele 3.8. Kaamerate asendiskeem

Sele 3.9. Kalibreerimispaneel

Sele 3.10. Kalibreerimisprotokoll

Sele 3.11. Vormitud katsekehad

Sele 3.12. Instron 8516

Sele 3.13. Tõmbekatse läbiviimine

Sele 3.14. Tõmbekatse purunenud katsekehad

Sele 4.1. Salvestatud katseandmed

Sele 4.2. a- terve katsekeha; b-praoga katsekeha

Sele 4.3. Teras TH550 lehtvormitavusdiagramm

Sele 4.4. Tõmbekatse tulemused

Sele 4.5. Katsetulemuste võrdlus

TABELID

Tabel 1.1. TH550 keemilise koostise nõuded

Tabel 1.2. Katsekehade toorikute valmistusmeetodid

Tabel 2.1. Nõuete loetelu

Tabel 2.2. Variantide eelised ja puudused

Tabel 2.3. Hindamismatriks

Tabel 3.1. ARAMIS 2M parameetrid

Tabel 4.1. Tõmbekatse tulemused

EESSÕNA

Käesolevas lõputöös käsitletud teema moodustab osa doktoritööst, mille autoriks on juhendaja Henri Lend. Teema on välja arenenud koostöös ettevõttega Metaprint AS, kelle soov on teada saada kõnealuse materjali vormimisomadusi toodete ning tootmisprotsesside optimeerimise eesmärgil.

SISSEJUHATUS

Antud töö eesmärgiks on konstrueerida lehtvormitavusdiagramm TH550 terasplekile. Nimetatud materjal on tööstuses kasutusel enamasti pakendite valmistamiseks – plekkpurgid (nii toidu kui jookide jaoks), aerosoolipudelid, värvipudelid jms. Eestis kasutab antud materjali ettevõtte Metaprint AS, kes toodab aerosoolpudelid ning nende komponente.

Töö esimeses osas on toodud lühiülevaade uurimise all olevast materjalist, selle omadustest ning levinuimatest kasutusalaadest. Samuti on pikemalt käsitletud lehtvormitavusdiagrammi (*Forming Limit Curve*) teoreetilist tausta. Vormimiskõvera konstrueerimine on standardiga reglementeeritud protseduur, mistõttu tuleb kõvera määramisel täpselt jälgida esitatud nõudeid. Samas aga on olemas ka alternatiivseid meetodeid, läbi mille hinnata materjali vormitavust ning koostada vormimiskõver.

Teises osas on pikemalt kirjeldatud katsekehade valmistamist. Standard kehtestab täpsed reeglid vormimiskatse toorikute valmistamiseks – vajalik on erineva geomeetriaga katsekehad, et tekitada erinevaid deformatsiooniolukordi ning seeläbi leida täielik materjali vormimiskõver. Samuti on standardiseeritud ka tõmbekatse tooriku geomeetria. Standard seab piirangud ka toorikute valmistusmeetoditele ning antud juhul on toorikud freesitud. Peatükis on kirjeldatud ka vajalike freesimisrakiste projekteerimist.

Kolmandas osas on kirjeldatud vormimiskatse läbiviimist. Katse käigus vormitakse erineva geomeetriaga toorikuid sfäärilise templiga ning optiliste kaamerate abil mõõdetakse vormitava katsekeha deformatsioone. Antud osas on täpsemalt kirjeldatud kasutatud seadmeid ning meetodeid, mille abil toimub tulemuste registreerimine. Samuti on kajastatud tõmbekatseks kasutatud seadmeid ning katse läbiviimisega seotud aspekte.

Neljandas osas toimub katseandmete järeltöötlus ning lehtvormitavusdiagrammi koostamine. Deformatsioonide mõõtmiseks on kasutusel spetsiaaltarkvara, mille andmete alusel on katsepunktid kantud graafikule ning seejärel lähendatud neile kõver, mis kujutabki lehtvormitavusdiagrammi. Samuti on selles peatükis käsitletud tõmbekatse tulemused ning teatud katsepunktide omavaheline võrdlus.

Käesoleva töö tulemuseks on vastavalt standardile määratud lehtvormitavusdiagramm, mida on praktikas võimalik kasutada vormimisoperatsioonide simuleerimiseks ning tulemuste hindamiseks. Samuti annab diagramm sisendi täieliku materjalimudeli koostamiseks. Töös on kasutatud CAD tarkvara SolidWorks 2012 ning deformatsioonide mõõtmise tarkvara GOM ARAMIS v6.1. Katsetulemuste töötlemiseks on kasutatud programmi MS Excel ning andmete visualiseerimiseks on kasutatud tarkvarapaketti MATLAB.

PÕHIOOSA

1 Üldine informatsioon

1.1 Teraspleki TH550 lühiülevaade

Teras TH550 on mitmekesiste kasutusvõimalustega ökoloogiliselt ja majanduslikult kasulik tinatatud plekk (*tinplate*), mida kasutatakse peamiselt pakendamiseks. Olemuselt on tinatatud plekk külmavaltsitud teras paksusega kuni 0,49 mm, mis on kaetud väga õhukese tinast kattega, mis annab materjalile valkja läike. Pind on elektrolüütiliselt kaetud ning kaitseb materjali korrosiooni eest. Tinatatud plekki kasutatakse üle maailma toidu-, joogi- ja olmepakendite (kemikaalid või tehnilised vahendid) tootmiseks [1].

Tinatatud pleki eelised pakendimaterjalina on mitmekesised [1]:

- Madal kaal ning suur tugevus – lihtne transportida ning ladustada.
- Optimaalne kaitse toiduainetele – mustuse, bakterite, niiskuse, valguse ja lõhna eest.
- Ületamatu ohutus keemiliste/tehniliste toodete pakendamisel.
- 100% mitmekordselt taaskasutatav.
- Võrreldes teiste analoogsete materjalidega majanduslikult otstarbekam.
- Suur turunduspotentsiaal tänu materjalile printimise ja markeerimise võimalustele.



Sele 1.1. Tinatatud plekist aerosoolpudelid

Teraspleki TH550 keemiline koostise nõuded on toodud tabelis 1.1.

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N	Al	Cu	As	Sn	Muu
0,04- 0,08	max 0,03	0,18- 0,35	max 0,08	max 0,02	max 0,02	max 0,08	max 0,02	max 0,008	0,02- 0,08	max 0,08	max 0,02	max 0,02	0,02

Tabel 1.1. TH550 keemilise koostise nõuded

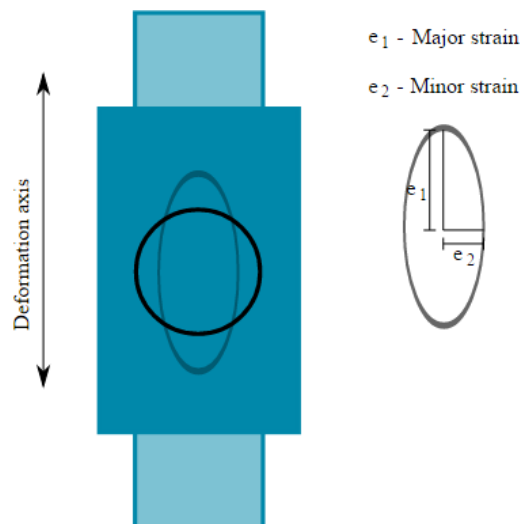
Materjali voolavuspiiriks on $R_{p0,2} = 550 \pm 50$ MPa ning tõmbetugevuseks $R_m = 570$ MPa.

Käesolevas töös uuritav materjal on paksusega 0,33 mm.

1.2 Lehtvormitavusdiagrammi ülevaade ja teooria

Lehtmaterjali vormitavust võib defineerida kui võimet saavutada soovitud geometria ilma materjali õhenemise või purunemiseta. Iga materjali võib purunemiseta vormida ainult teatud piirini, mida iseloomustabki lehtvormitavusdiagramm [2]. Inglisekeelses rahvusvahelises kirjanduses on lehtvormitavusdiagrammi vasteks *Forming Limit Curve*, mille üldtuntud ja kasutatavaks lühendiks on FLC, mida ka antud töös edaspidi kasutatakse.

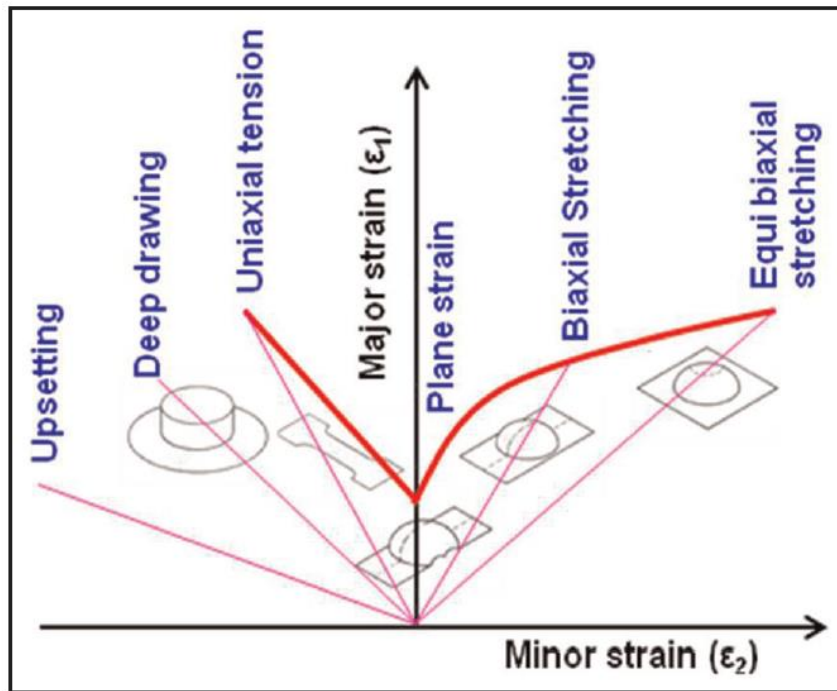
Lehtvormitavusdiagramm on katseliselt määratud kõver (Sele 1.3), mis konstrueeritakse teljestikus, kus horisontaalteljel (x-telg) on ellipsi lühema peatelje deformatsioon (*Minor strain*, ϵ_2) ning vertikaalteljel (y-telg) on ellipsi pikema peatelje deformatsioon (*Major strain*, ϵ_1). Deformatsioonide väärtused on teljestikus kujutatud logaritmilise deformatsioonina [3,4].



Sele 1.2. Ellipsi peatelgede deformatsioonid

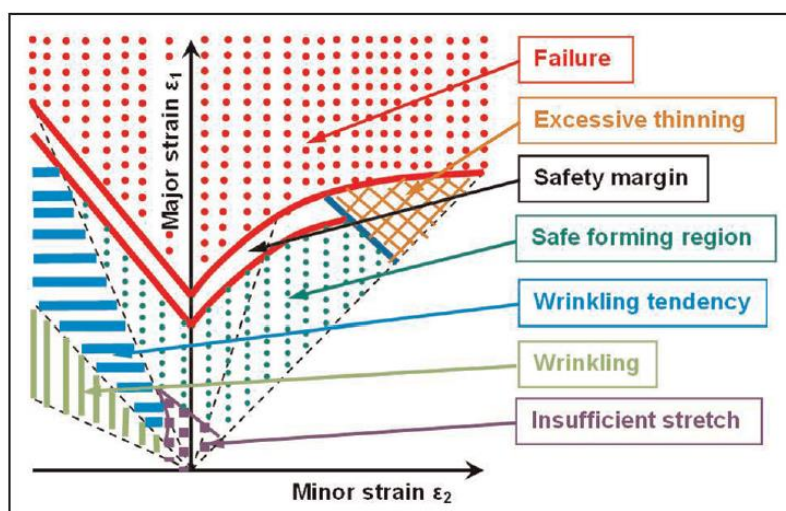
FLC kõvera võib tinglikult jagada kaheks osaks. Vasakpoolses osas on ellipsi pikema peatelje deformatsioon positiivne, kuid lühema peatelje deformatsioon negatiivne ($\epsilon_1 > 0$; $\epsilon_2 < 0$). Selle teooria on kirjeldanud Goodwin (1968). Vasakpoolne osa kujutab deformatsiooniolukordi

(*strain paths*), kus deformatsiooniteguri (*strain ratio*) ($\alpha = \epsilon_2 / \epsilon_1$) väärtused varieeruvad ühetelgsest tõmbest (*uniaxial tension*) ($\alpha = -0.5$) kuni tasandpinguseni (*plane strain*) ($\alpha = 0$). Teiseks on parempoolne osa, mis kehtib ellipsi peatelgede positiivsete deformatsioonide puhul ($\epsilon_1 > 0$; $\epsilon_2 > 0$). Selle poole teooria on kirjeldanud Keeler ja Backhofen (1965). Graafiku parempoolses osas varieeruvad deformatsiooniteguri väärtused tasandpingusest täieliku kahetelgse venituseni ($\alpha = 1$) [2,5].



Sele 1.3. FLC diagrammi üldskeem [2]

FLC kõver määrab kriitilise piiri, üle mille toimub materjali purunemine. Samas aga võib vormimise käigus probleeme tekkida ka olukorras, kus deformatsioonide väärtused jäävad allapoole FLC kõverat (Sele 1.4). Tavaliselt jäetakse katseliselt määratud FLC puhul ohutusvaru (*safety margin*), mis peaks veelgi kindlustama planeeritava detaili valmistamise võimalikkust ning stabiilsust. Enamasti on selle varu väärtuseks 10% ning graafiliselt on see identne algsele kõverale, kuid vertikaaltelje sihis allapoole nihutatud. Seel 1.4 on toodud illustreeriv skeem, kus on välja toodud erinevad probleemid ning nende esinemistsoonid, mis lisaks purunemisele võivad vormimisoperatsiooni käigus tekkida. Nendeks on ebapiisav venitus (*insufficient stretch*), kortsude teke (*wrinkling*) ja liigne õhenemine (*excessive thinning*). Seega on äärmiselt oluline, et detaili projekteerimisel ei lähtutaks selle valmistatavuse hindamisel ainult purunemise seisukohast vaid tuleb silmas pidada ka teisi võimalikke vigade liike, mida on samamoodi võimalik analüüsida deformatsioonide abil [2].



Sele 1.4. FLC erinevate piirkondade selgitav skeem [2]

FLC positiivseks omaduseks on meetodi täpsus, mis kõvera korrektselt konstrueerimisel võimaldab hiljem väga edukat rakendamist praktikas. FLC abil saab võimalikke vormimisega seotud probleeme avastada ning ennetada juba detaili projekteerimise etapis, kus muudatuste sisseviimine on veel suhteliselt kiire ning odav. Katseliselt määratud lehtvormitavusdiagrammi saab kasutada ka teoreetiliselt arvutatud kõverate adekvaatsuse hindamiseks. Samas aga on katselisel teel FLC määramine väga ajamahukas ning seega ka majanduslikult kulukas protsess [2,5].

Lehtvormitavusdiagrammi miinuseks on asjaolu, et katseliselt määratud maksimalse lubatud deformatsiooni väärtus sõltub mitmetest füüsikalistest asjaoludest. Neist kõige olulisemad on materjali karestumine, deformatsiooniastme tundlikkus ning plastiline anisotropia, mis kõik tulenevad materjali külmvaltsimise protsessist. On tõestatud, et FLC on tundlik vormimisprotsessis tekkivate mittelineaarsete deformatsiooniolukordade suhtes, mistõttu on antud kõverat keeruline kasutada mitmeastmeliste vormimisoperatsioonide hindamise juures, mis aga on tööstuses keerulisema konstruktsioonide puhul üsna levinud [6].

1.3 FLC kasutamise näited

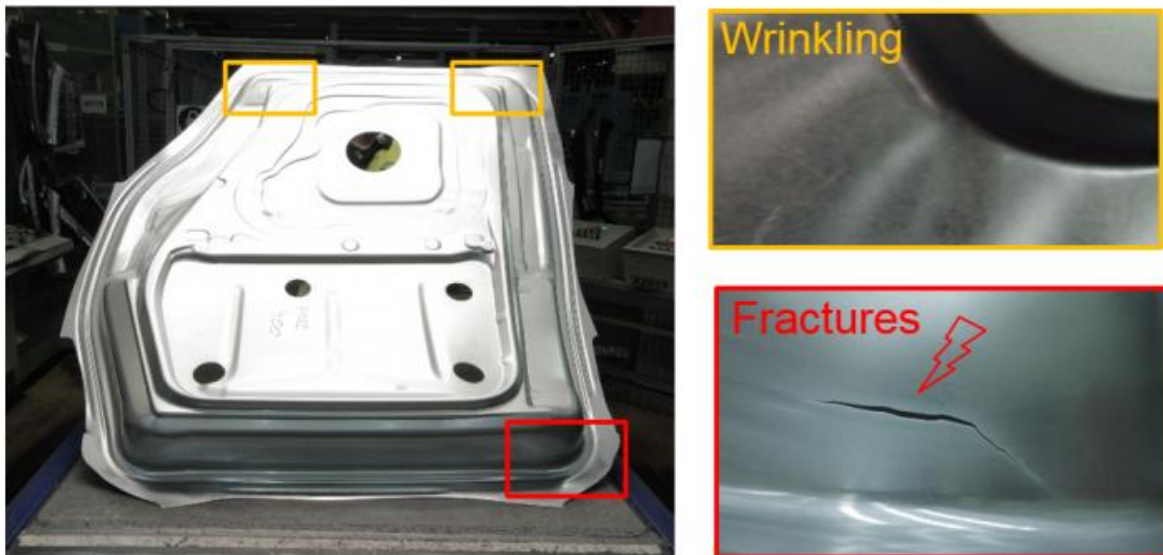
Praktikas leiab FLC kasutust erinevate lehtmetailide vormimisoperatsioonide tulemuste prognoosimiseks. FLC on stantsimissimulatsioonide läbiviimisel tavapäraselt kasutusel kui peamine tõrke kriteerium [7]. Oluline on märkida, et üks diagramm kehtib ainult kindla materjali ning paksuse kohta. Nende parameetrite muutumisel muutuvad ka

vormimiskõvera väärtused [8]. Seega on FLC spetsiifiline tööriist, mida ei saa kasutada universaalselt paljude erinevate materjalitüüpide ning paksuste jaoks.

Järgnevalt on toodud mõned veebist vabalt kättesaadavad näited, kus ja kuidas vormitavusdiagramme realselt praktiliste probleemide lahendamiseks kasutatakse.

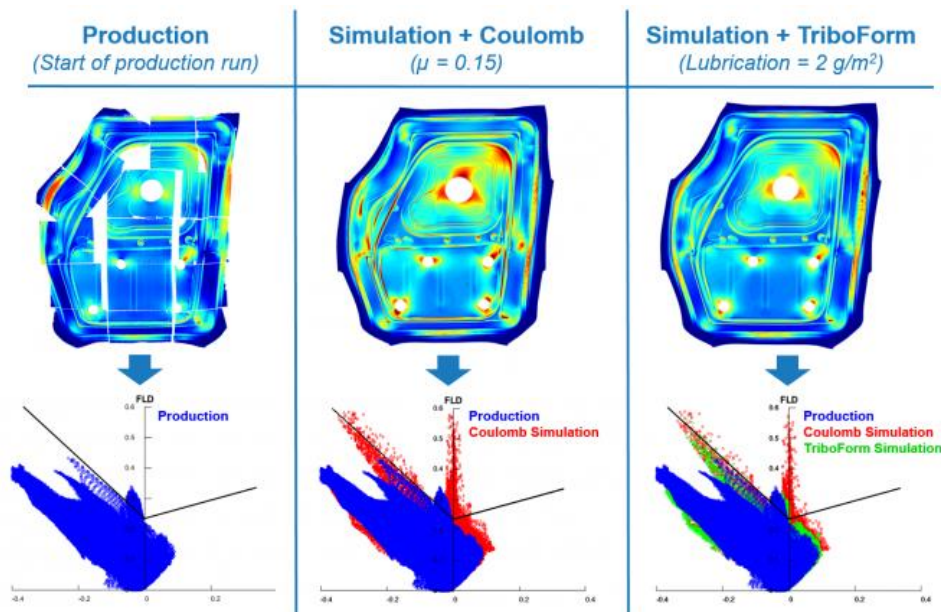
1.3.1 Volvo XC90 uksepaneel

Volvo XC90 uksepaneelide siseosa kvaliteet sõltub suuresti hõõrdumisest ja määrdeaine olukorrast, mis realses valmistusprotsessis aset leiavad. Valede parameetrite valikul võivad tootele tekkida kortsud (*wrinkling*) või toimuda purunemine (*fracture*) nagu näidatud Selet 1.5.



Sele 1.5. Volvo XC90 uksepaneeli peamised defektid

Tänapäeval levinuim standard stantsimisoperatsioonide simuleerimisel on kasutada konstantset hõõrdekoefitsenti (Coulomb), mis aga piirab üldist simulatsiooni täpsust. Realistlikemate tulemuste saavutamiseks on väga oluline arvesse võtta ka triboloogilisi nüansse [9].

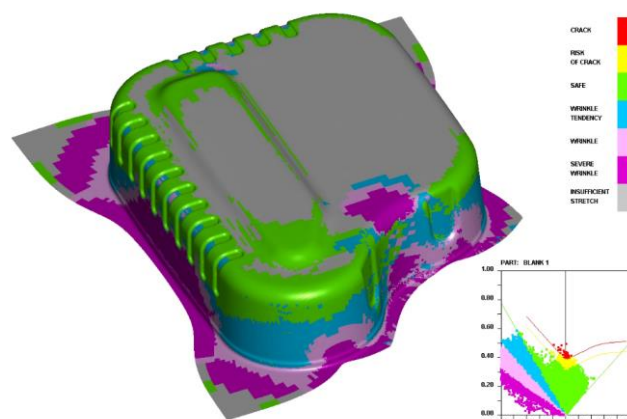


Sele 1.6 Simuleerimistulemuste võrdlus

Selel 1.6 on näha simulatsioonitulemused erinevate sisendparameetrite korral. Nagu näha kõige parempoolsemalt skeemilt annab triboloogia arvessevõtmine palju realistlikuma tulemuse kui konstantse hõõrdeteguriga simuleerimine. Olenemata kasutatavast simulatsioonimeetodist on antud kontekstis oluline välja tuua, et vormimistulemuste hindamiseks on kasutusel FLC kui peamine materjali vormitavust määrav karakteristik.

1.3.2 Dynaform

Antud juhul on tegemist ühe tarkvarapaketi, mis võimaldab läbi viia nii vormitavuse simuleerimist, tooriku suuruse ja kuju kindlakstegemist kui ka näiteks stantside töö simuleerimist [10]. Dynaform pole küll ainus pakett, kus taoliste analüüside jaoks kasutatakse lehtvormitavusdiagrammi, kuid on üheks heaks näiteks kuidas lehtmaterjali vormimisega tegelevad insenerid saavad oma igapäevast tööd lihtsustada ning kontrollida.

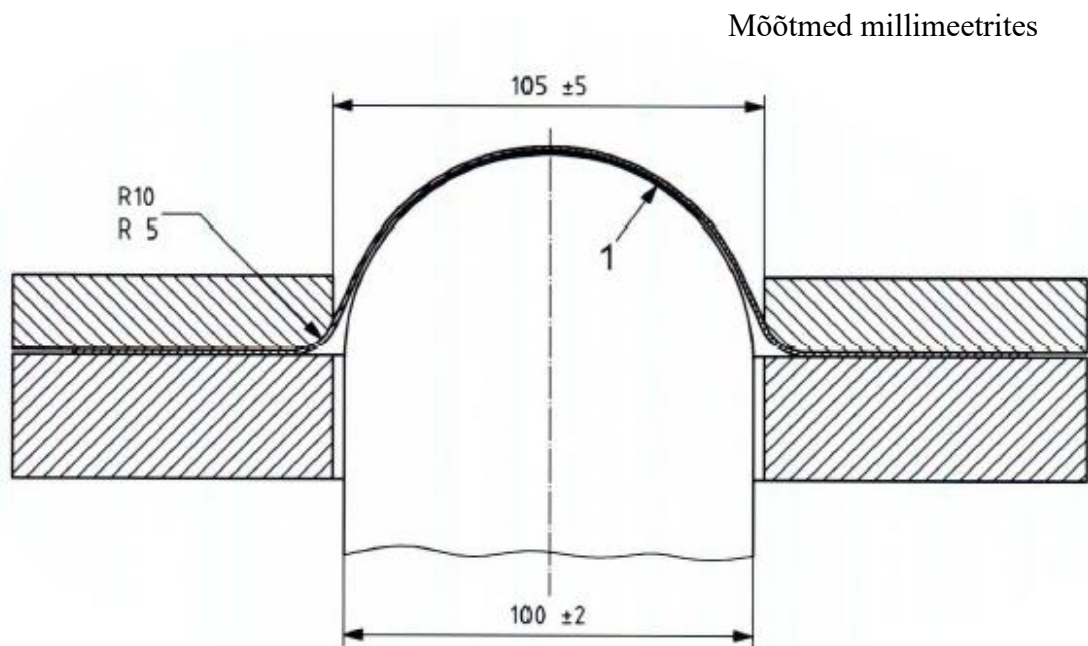


Sele 1.7. FLC kasutamise praktiline näide

1.4 FLC määramise protseduur

FLC eksperimentaalse määramise peamiseks ning levinuimaks meetodiks on Nakajima katse [11]. Protseduur on standardiseeritud ning kõik vajalikud etapid on kirjeldatud standardis EN ISO 12004-2. Järgnevalt on selles peatükis välja toodud nii olulisemad punktid nimetatud standardist ning samuti antud magistritöö läbi viidud katsega seotud täpsemad parameetrid.

1.4.1 Nakajima katse olemus



Sele 1.8. Nakajima katse tööriista läbilõige [12]

Nakajima katse käigus vormitakse lehtmetailist katsekehasid sfäärilise templiga (Sele 1.8) kuni purunemiseni. Katsetamise instrumendile on esitatud järgmised nõuded:

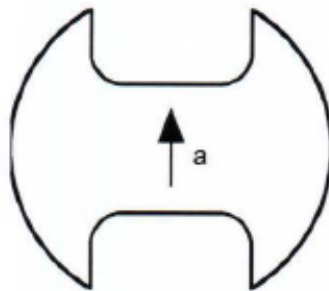
- Templi diameeter: 100 ± 2 mm.
- Matriitsi diameeter: eelistatud 105 mm ja suurem-võrdne kui templi diameeter + $2.5x$ materjali paksus.
- Matriitsi nurgaraadius: eelistatult 8 mm. Minimaalselt 5 mm või $2x$ materjali paksus.

Katse läbiviimisel peab järgima järgmisi standardis toodud nõudeid [12,13]:

- Templi kiirus: $1,5 \pm 0,5$ mm/s.
- Materjali kaasatõmbamise (*draw-in*) vältimine: materjali kaasatõmbamist vormimise käigus tuleb minimiseerida. Võimalikud meetodid selleks on: surveribide kasutamine, sobiliku tooriku fikseerimisjõu leidmine ning sakilise pinnaga tööriistad. Viimase kahe

meetodi puhul tuleb tagada, et ei tekiks deformatsioonide lokaliseerumist või materjali purunemist.

- c) Tooriku hoidja jõud, kN: pole arvuliselt määratud, aga tuleb tagada minimaalne materjali kaasatõmbamine.
- d) Temperatuur: 23 ± 5 °C.
- e) Materjali valtsimissuund katsekehadel: terase puhul peab valtsimissuund olema risti katsekeha kaelaosaga (Sele 1.9).



Sele 1.9. a – materjali valtsimissuund terasest katsekehade korral

- f) Kaamera salvestuskiirus 10 kaadrit sekundis.
- g) Minimaalselt 5 erineva geomeetriaga toorikut.
- h) Minimaalselt 3 katsekeha iga geomeetria kohta.

1.4.2 Katsekehade valmistamine

Katsekehade valmistamisel on lubatud kasutada meetodeid, mis [12]:

- a) Ei põhjusta pragusid.
- b) Ei too esile mikrostruktuuri muutust.
- c) Ei põhjusta materjali kalestumist (*work hardening*).

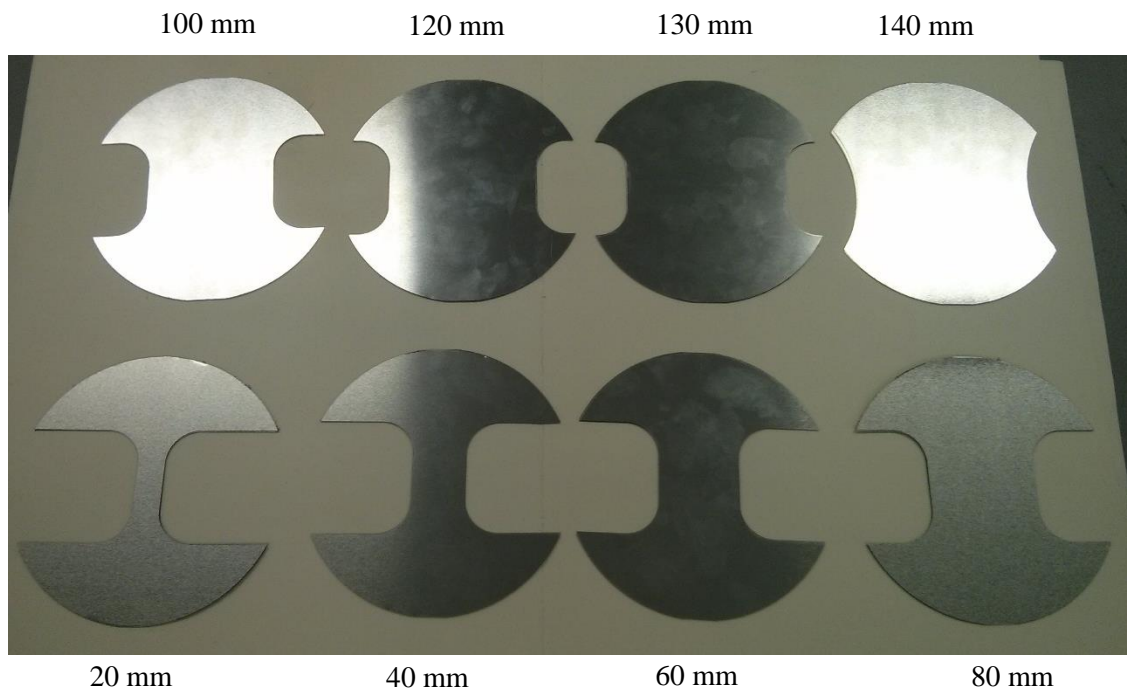
Samuti tuleb katsekehad valmistada selliselt, et pragu ei hakkaks kunagi arenema tooriku servast. Arvestades eelpool nimetatud nõudeid, jäävad valikusse vähesed meetodid, mis on toodud tabelis 1.2 koos konkreetse meetodi omaduste kirjeldusega. Arvestatud on ka meetodite kättesaadavust nii Tallinna Tehnikaülikoolis (edaspidi TTÜ) kui ka üldiselt.

Meetod	Positiivsed omadused	Negatiivsed omadused
Freesimine	<ul style="list-style-type: none"> • Lihtne muudatuste sisseviimine. • Võimalus valmistada igasuguse geomeetriaga katsekehasid. • Kättesaadav masinapark. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nõuab rakistuse valmistamist.
Vesilõikus	<ul style="list-style-type: none"> • Lihtne muudatuste sisseviimine. • Võimalus valmistada igasuguse geomeetriaga katsekehasid. • Kiire protsess. 	<ul style="list-style-type: none"> • Täpsus. • Detailide kättesaamine sõltub allhanke kiirusest.
Traaterosioon	<ul style="list-style-type: none"> • Täpne geomeetria. • Hea lõikekvaliteet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aeglane protsess. • Teenuse kättesaadavus.
Lõikestantsimine	<ul style="list-style-type: none"> • Täpne kontuur. • Kiire protsess. • Hea lõikekvaliteet. 	<ul style="list-style-type: none"> • Majanduslikult kallis. • Eeldab iga kontuuri kohta eraldi stantsi.

Tabel 1.2. Katsekehade toorikute valmistusmeetodid

Antud juhul on katsekehade valmistusviisiks valitud freesimine. Seda eelkõige lähtudes asjaolust, et TTÜ Mehaanikateaduskonnas on olemas kolmeteljeline CNC freespink, mida on võimalik kasutada. Samuti on teostatud katsefreesimine konkreetse materjaliga ning veendunud, et saavutatav kvaliteet on väga hea. Freesimine eeldab küll rakistuse valmistamist, kuid antud juhul on see projekteeritud nii, et võimaldab kõik erineva geomeetriaga toorikud freesida ühes rakises. Rakisega seonduvat on pikemalt kirjeldatud käesoleva töö 2. peatükis.

Täieliku FLC konstrueerimiseks on vaja minimaalselt 5 erineva geomeetriaga katsekehasid. Selliselt on kaetud erinevad pingeseisundid alates ühetelgsest tõmbest kuni kaheteljelise tõmbeni [11]. Antud magistritöö raames on valmistatud 9 erineva geomeetriaga katsekeha, et saada võimalikult täpne FLC. Katsekehad on tähistatud vastavalt kaela laiusele: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 130 ja 140 mm (Sele 1.10). Viimaseks on valmistatud ringikujulised katsekehad diameetriga 200 mm, mis on plekist šablooni järgi plekitangidega välja lõigatud.



Sele 1.10. Vormimiskatse toorikud

Sama geomeetriaga katsekehade dublikaatide arvu ülempiir pole paika pandud, kuid tuleb tagada adekvaatne tulemus minimaalselt kolme toorikuga [12].

1.4.3 Vormimiskatse ja andmete järeltöötlus

Pärast toorikute valmistamist on järgmiseks etapiks vormimiskatse läbiviimine, mille tulemusena saab vajalikud katseandmed edasiseks FLC koostamiseks. Vormimiskatseks vajalikele instrumentidele esitatud nõuded on juba käsitletud antud töö peatükis 1.4.1. Siinkohal on täpsemalt välja toodud vormimiskatse käigus deformatsioonide mõõtmisega seotud asjaolud.

Kaamera ning tarkvara, millega deformatsioone mõõdetakse, peavad tagama mõõtmistäpsuse, mis on parem kui 1%. Mõõtmiseks võib kasutada mitut erinevat analüüsimeetodit [12]:

- 1) Purunenud katsekeha analüüs. Uuritakse pilti, mis on tehtud pärast praoteket, kuid mitte otse vormimisseadmel.
- 2) Purunenud katsekeha analüüs võrgustikuga, mis on kalibreeritud algstaadiumis. Uuritakse pilti enne ning vahetult pärast purunemist, kuid mitte otse vormimisseadmel.
- 3) Olukorra analüüs vahetult enne praoteket. Kaamerad on fikseeritud otse vormimisseadmele ning salvestavad algstaadiumi ning viimased sammud enne praoteket.

Edasine tegevus on ristlõigete analüüs, mille põhiidee on mõõdetud deformatsioonide analüüs mööda kindlaksmääratud ristlõiget. Olenevalt *Minor strain* (ϵ_2) väärtusest määratakse ristlõige erinevalt:

- 1) $\epsilon_2 \geq 0$ puhul peab ristlõige olema praoga nii risti kui võimalik (jäädes piiridesse $\pm 25\%$).
- 2) $\epsilon_2 \leq 0$ puhul peavad ristlõiked olema paralleelsed katsekeha kaelaosaga.

Ristlõikeid tuleb määrata minimaalselt kolm. Esimene ristlõige läbib praotsentrit, teised kaks ristlõiget jäävad kummalegi poole praotsentrit 2 mm kaugusel [12].

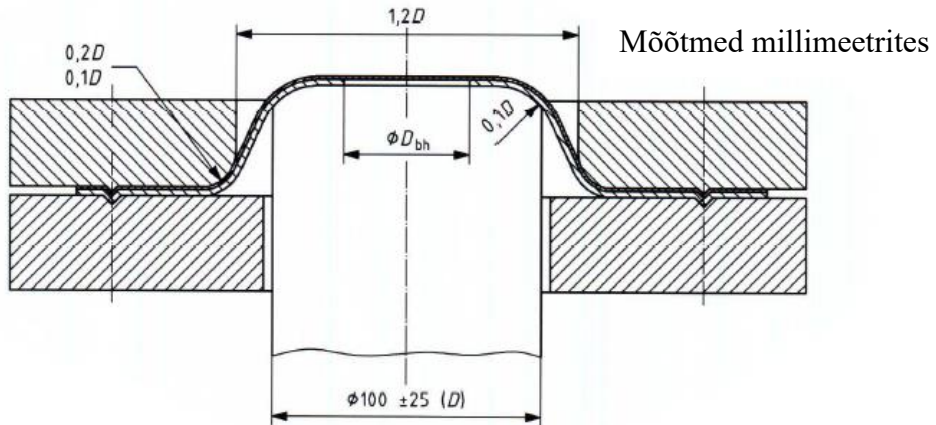
Konkreetselt antud töös kasutatavad seadmed, meetodikad ning vajalikud eelprotseduurid on põhjalikumalt kirjeldatud peatükis 3.1. Antud töö lehtvormitavusdiagrammi konstrueerimisega seotud etapid on käsitletud peatükis 4.

1.5 FLC määramise alternatiivid

Nagu juba eelpool mainitud, on Nakajima katse levinuim meetod FLC määramiseks, kuid lisaks sellele on ka vähemlevinud võtteid kõvera koostamiseks. Järgnevalt on toodud loetelu meetoditest, mille abil on samuti võimalik lehtvormitavusdiagrammi konstrueerida.

1.5.1 Marciniak'i katse

Katse sarnaneb oma ülesehituselt ning meetodikalt Nakajima katsele, kuid üheks suurimaks erinevuseks on, et katsekeha vormitakse lameda templiga (Sele 1.11). Marciniak'i katse on eksperimentaalse määramise peamine alternatiiv Nakajima katsele.



Sele 1.11. Tööriista ristlõige Marciniak'i katse korral [12]

Templi diameeter: 100 ± 25 mm.

Templi nurgaraadius: Soovituslikult 10 % templi diameetrist.

Matriitsi diameeter: Soovituslikult 120 % templi diameetrist.

Matriitsi nurgaraadius: 10 %...20 % templi diameetrist.

Nakajima katse puhul oli tempel otseses kontaktis katsetatava materjaliga, kuid Marciniak'i katse puhul peab templi ning katsekeha vahel olema toorikukandja (*carrier blank*). Toorikukandja tagab, et pragu tekiks õiges kohas ja tekiks homogeenne deformatsioonijaotus. Toorikukandjale on samuti esitatud konkreetsed nõuded, millest olulisim on selle materjal, mis peab olema vähemalt sama plastne kui katsetatav materjal. Samuti on erinevuseks võrreldes Nakajima katsega asjaolu, et Marciniak'i katse puhul on määride kasutamine vahetult tooriku vastas keelatud, kuid Nakajima katse puhul on see rangelt soovituslik [12].

Muus osas on kaks kirjeldatud katsemeetodit identsed ning tuleb järgida sama standardi (EN ISO 12004-2) nõudeid.

1.5.2 FLC määramine stantsimistöökodades

Standard EN ISO 12004 kirjeldab kaht erinevat meetodit vormimiskõverate konstrueerimiseks. Peamiseks viisiks on juba eespool kirjeldatud FLC määramine laboritingimustes. Teine meetod on mõeldud FLC määramiseks töökodades ning on nüüd järgnevalt põgusalt kirjeldatud.

Meetod seisneb mõõtskaala (soovituslikult vahemikus 1,5...5 mm) kandmises katsetamisele minevale detailile eeldatavalt kriitilistes kohtadesse. Toorikut vormitakse kuni

purunemiseni ning mõõdetakse skaala protsentuaalset muutust nii kõige enam deformeerunud suunas (*major strain*) kui ka sellega risti olevas suunas (*minor strain*). Adekvaatsete tulemuste saavutamiseks on otstarbekas mõõta kolme kõrvuti olevat skaalajoont ning nende erinevus ei tohiks olla rohkem kui $\pm 10\%$. Katset korratakse erinevate deformatsiooniseisundite puhul ning tulemuste kandmisel graafikule saadaksegi sel viisil määratud vormimiskõver [14].

Deformatsioonid leitakse käsiarvutuse teel järgnevaid valemeid kasutades [14]:

$$\varepsilon_1 = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{l_2 - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (1.2)$$

kus

ε_1 ja ε_2 – deformatsioonid kahes sihis;

l_1 ja l_2 – skaala väärtus pärast deformeerimist;

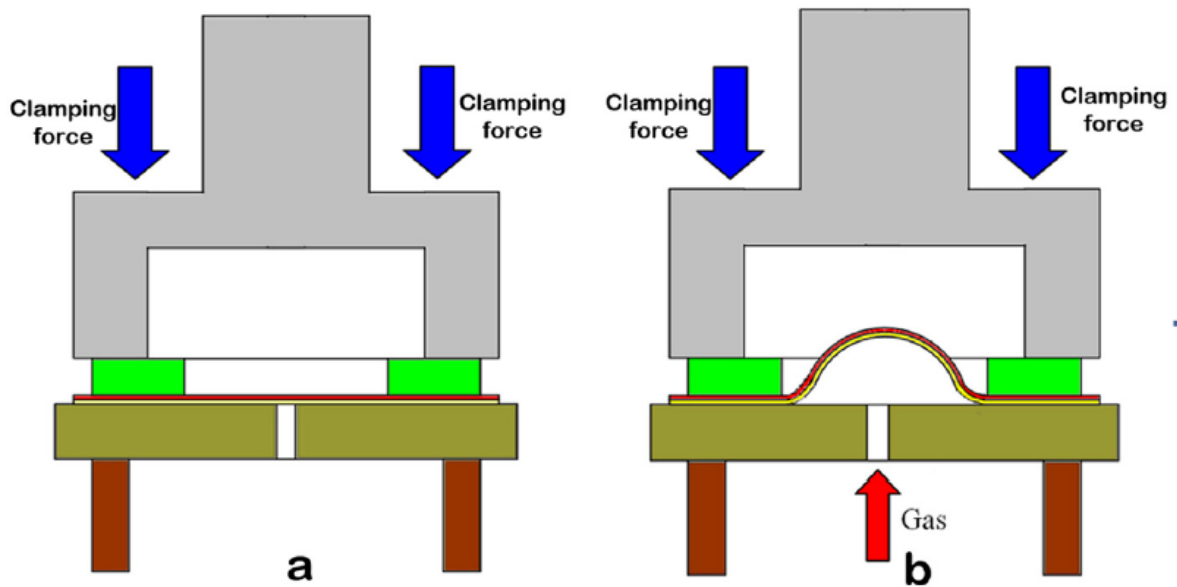
l_0 – skaala algväärtus.

Pärast piisava arvu katsete läbiviimist erineva geomeetriaga katsekehadega on võimalik sel moel konstrueerida lehtvormitavusdiagramm, kus deformatsioonide väärtused on teljestikus kujutatud protsentuaalselt.

1.5.3 Gaasijoaga vormimine

Gaasijoaga lehtmetaili vormimist on laialdaselt kasutatud lennunduses keerukate alumiiniumist või titaanist komponentide valmistamiseks. Samuti on antud tehnikat kasutatud vormitavuse hindamiseks kõrgematel temperatuuridel kahesuunalise tõmbe olukorras [15]. Viimasel ajal on aga antud meetodit arendatud, et võimaldada täieliku FLC konstrueerimist.

Meetod on analoogne Nakajima katsele, kuid lehtmetaili ei vormita mitte templi vaid kuuma gaasijoaga abil (Sele 1.12). Tekitamaks erinevaid deformatsiooniseisundeid, kasutatakse erineva kujuga matriitse (Sele 1.13), läbi mille gaasi puhutakse. Oluline on märkida, et gaasijoaga vormimist kasutatakse kõrgendatud temperatuuril, mistõttu saab selle meetodi abil määrata FLC'd materjalidele, mida ka praktikas vormitakse kõrgendatud temperatuuridel. Gaasina kasutatakse enamasti lämmastikku [15].



Sele 1.12. Gaasijoaga vormimine

Gaasijoaga vormimisel on ka teatud eelised võrreldes klassikalise Nakajima katse ees. Esiteks puudub antud meetodi puhul hõõrdumine templi ja katsekeha vahel. Teine eelis on seotud kõrgendatud temperatuuril FLC määramisega, kus ühtlane temperatuurijaotus kogu katsekeha ulatuses on kergesti saavutatav konvektiivse soojusülekande tõttu. Samuti puudub vajadus templit kuumutada. Suurimaks puuduseks on aga senimaani olnud suutmatus määrata FLC vasakpoolset osa ning tasandpinguse olukorda [15].

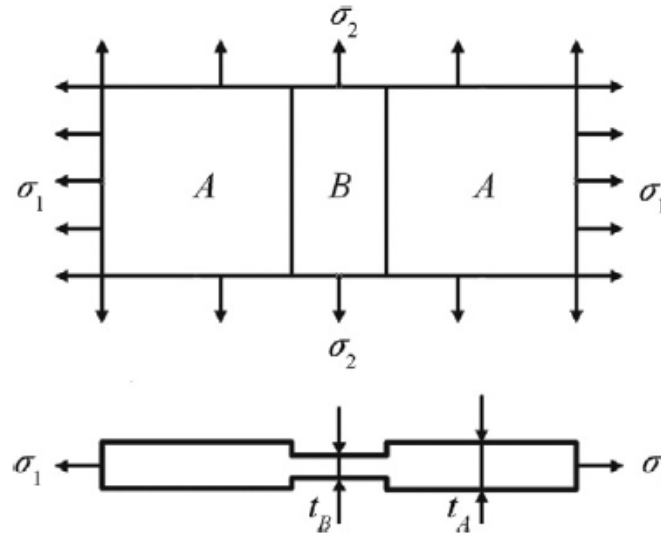


Sele 1.13. Gaasijoa matriitsid

1.5.4 Teoretiline FLC leidmine

Üheks levinuimaks ja efektiivseimaks teoreetiliseks meetodiks FLC leidmisel on nn. M-K meetod, mille on kirja pannud Marciniak ja Kuczynski 1967. aastal. Teooria põhiideeks on eeldus algsest mittehomoogeensuse faktorist: geomeetristest või füüsilistest põhjustest

tulenevalt on lehtmatali pinnal juba algselt mittehomoqeenne seisund suunal, mis on risti peamise deformatsioonisuunaga, kui on tegemist kaheteljelise tõmbega. Lihtsamalt öeldes tähendab see, et lehtmatali pinnal on juba enne deformatsiooni esinemist lineaarne soon ja deformatsioon tekib ja areneb sellest soonest. Selle eelduse kohaselt põhjustavad lokaalseid lehtmatali ebastabiilsuseid pinnadefektid [16,17].



Sele 1.14. M-K teooria matemaatiline mudel

Selel 1.14 on toodud M-K teooria matemaatiline mudel, kus osa B ebaühtlase deformatsiooni ala ehk soone ala ning osa A on ühtlane deformatsiooniala.

Järgnevalt on toodud ilma pikema seletuseta M-K teooria põhivalemid ja eeldused, mis on teoreetilise FLC määramise aluseks:

- 1) Materjali maht deformatsiooni suunas jääb muutumatuks.

$$d\varepsilon_1 + d\varepsilon_2 + d\varepsilon_3 = 0 \quad (1.3)$$

kus

$d\varepsilon_i$ – deformatsiooni samm.

1,2,3 – vastavalt rullimise, sellega ristiolev ning paksuse suund.

- 2) Peamised pinged kolmes suunas kasvavad proportsionaalselt.

$$\frac{d\varepsilon_{1A}}{\varepsilon_{1A}} = \frac{d\varepsilon_{2A}}{\varepsilon_{2A}} = \frac{d\varepsilon_{3A}}{\varepsilon_{3A}} \quad (1.4)$$

kus

ε_{iY} – osa A või B deformatsioon (Y tähistab osa, i suunda).

$d\varepsilon_{iY}$ – deformatsiooni samm.

Deformatsioonide suhe on koormamise protsessi vältel muutumatu:

$$\frac{d\varepsilon_{3A}}{d\varepsilon_{2A}} = \frac{\varepsilon_{3A}}{\varepsilon_{2A}} \quad (1.5)$$

3) Peatljega ristiolevas suunas (*minor strain*) oleva deformatsiooni samm on sama mõlema osa puhul (A ja B).

$$d_{\varepsilon 2A} = d_{\varepsilon 2B} = d_{\varepsilon 2} \quad (1.6)$$

4) Jõudude tasakaal peab olema deformeerimise käigus tagatud.

$$\sigma_{1A} t_A = \sigma_{1B} t_B \quad (1.7)$$

5) Algne mittehomogeensuse tegur.

$$f_0 = \frac{t_{B0}}{t_{A0}} \quad (1.8)$$

kus

t_{A0} ja t_{B0} – osa A ja B algne paksus.

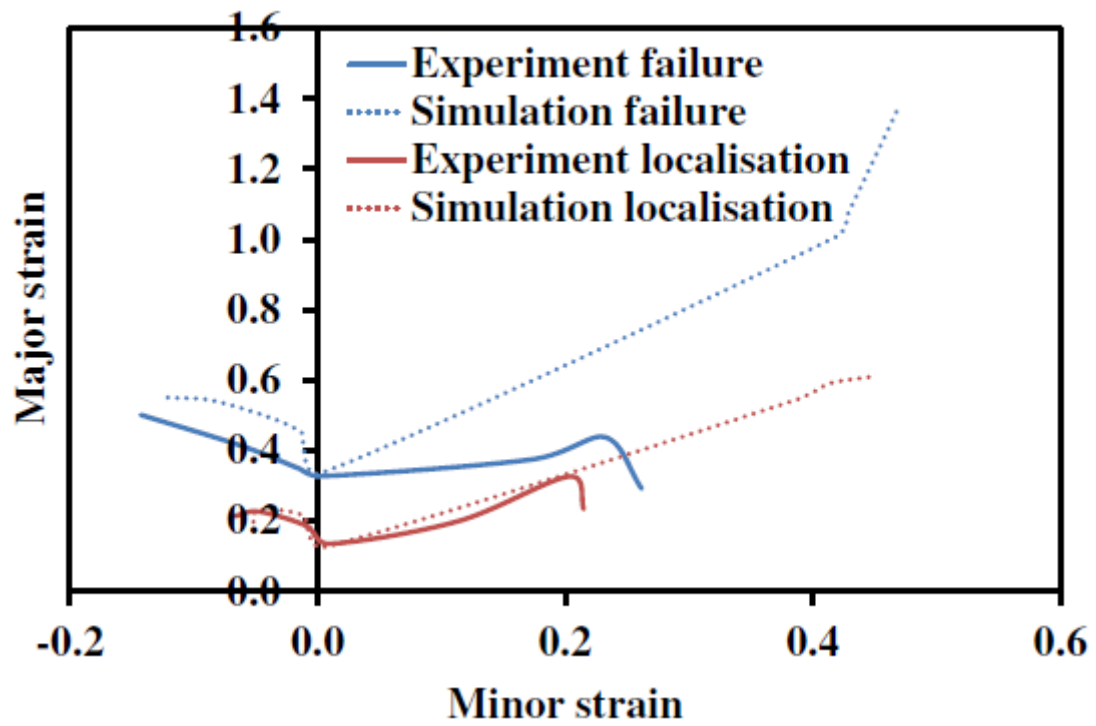
Eelnevalt on toodud ainult teooria põhivalemid, kuid kogu matemaatiline arvutus koosneb pikematest lahenduskäikudest ning võrranditest, mida antud töös pole kajastatud. Pekingi Lennunduse ja Astronautika ülikoolis läbi viidud uurimuse tulemusena selgus, et teoreetiline lehtvormitavusdiagrammi konstrueerimine, mis baseerus M-K teorial oli heas vastavuses eksperimentaalselt määratud tulemustega [16].

1.5.5 FLC simuleerimine FEM abil

Üks võimalus, mis on muutunud kättesaadavaks tänu FEA (*Finite Element Analysis*) tarkvarapakettide laialdasele levikule, on FLC simuleerimine virtuaalselt. Antud magistritöös on näiteks võetud India Tehnoloogiainstituudi Mehaanikaosakonnas läbi viidud uurimus, kus võrreldi katseliselt määratud ning simuleeritud FLC väärtusi. Kasutusel oli simuleerimistarkvara PAMSTAM 2G ning katserakistuse detailide mudelid olid koostatud SolidWorks tarkvarapaketi abil. CAD mudelid olid modelleeritud üheses vastavuses reaalse katsestendiga ning samuti olid simulatsioonid läbi viidud erineva geomeetriaga katsekehadega. Simulatsiooni ühe katsekehaga tehti senikaua kuni ühe või mitme elemendi venivusaste (*elongation rate*) kasvas hüppeliselt, enam kui 40-50% võrreldes eelmise tasemega. Seda taset loeti simulatsioonis materjali purunemiseks [18].

Eksperimendi tulemusena selgus, et simulatsiooni ja reaalse katsetuse tulemused on väga sarnased FLC vasakpoolses osas, kus on enamjaolt tegemist ühesuunalise venitamisega. Märkatavalt suuremad erinevused esinevad tasandpinguse ning täieliku kaheteljelise tõmbe

piirkondades. Mõlema poole simuleerimisel on kasutatud deformatsioonide lokaliseerumise purunemiskriteeriumit, kuid nagu selgus, siis FLC parempoolse osa jaoks see ei sobi [18].



Sele 1.15. Katsetuse ning simulatsioonitulemuste võrdlusgraafik

2 Freesimiskatiste projekteerimine

2.1 Ülevaade

Standardi EN ISO 12004-2:2008 peatükk 4.1.3 sätestab kindlad reeglid vormimiskatse toorikute valmistamiseks. Lubatud on freesimine, traaterosioon ning teised meetodid, mis ei põhjusta pragusid, tooriku termilist tugevnemist või mikrostruktuuri muutust. Samuti tuleb toorikute valmistamisel tagada, et pragu ei hakkaks katse jooksul kunagi arenema tooriku servast [12]. Vältimaks prao teket detaili servast, tuleb tagada hea lõikekontuur ka väliskontuuri ulatuses. Samuti tuleb jälgida, et toorikute valmistamise käigus ei kriimustaks metalli pinda, mis võib samuti kaasa tuua ebatäpsusi vormimiskatsel.

Tõmbekatseks vajalike toorikute geomeetria on fikseeritud standardis EN ISO 6892-1:2010. Analoogselt vormimiskatse toorikute valmistamisele on ka siin oluline jälgida, et toorikute valmistusmeetod ei muudaks materjali omadusi. Seega jälgides standardi EN ISO 12004-2:2008 võib samadel alustel valmistada ka tõmbekatseks vajalikud katsekehad.

Eelpool nimetatud standardite nõuete puudumisel oleks kõige lihtsam viis toorikute valmistamiseks laserlõikus, mis tagaks täpse kontuuri, hea lõikekvaliteedi ning oleks väga kiire protsess, mis eeldaks ainult lõikeprogrammi olemasolu. Laserlõikusega aga kaasneb lokaalne materjali kuumutamine, mis omakorda viib mikrostruktuuri muutuseni lõikekontuuri läheduses ja võib mõju avaldada katsetulemustele mistõttu antud juhul on laserlõikus välistatud.

Standardite poolt sobivateks ning ka kättesaadavateks meetoditeks on vesilõikus, traaterosioon ning freesimine. Vesilõikus on analoogne protsess laserlõikusele, kuid sobib sellepoolest, et vesilõikusega ei kaasne materjali kuumutamist. Samas aga on õhukese materjali puhul vesilõikuse korral probleemiks kindel fikseerimine, et tagada lõigatava lehe liikumatus lõikuse jooksul. Samuti kahjustab vesilõikus materjali pinda, kui lisaks veele kasutatakse abrasiivseid osakesi. Traaterosioon tagab täpse lõikekontuuri, kuid on kõige ajamahukam protsess. Samuti on seda teenust pakkuvaid ettevõtteid vähem, mistõttu on antud meetod valikus olevatest kõige halvemini kättesaadav.

Antud magistritöö raames on toorikute valmistamise meetodiks valitud freesimine. Freesimine on valitud eelkõige sellepärast, et vajalik masinapark on TTÜ's olemas ning on proovitud, et korraliku rakistuse puhul töötab meetod väga hästi. Tänu sellele, et freespink on TTÜ's pidevalt kättesaadav, võimaldab see meetod vajadusel kiiresti ka katsekehi juurde valmistada.

Vormimiskatseks on kokku vaja valmistada minimaalselt 24 katsekeha (8 erinevat kontuuri, minimaalselt 3 tk igaüht), mistõttu on rakistuse olemasolu protsessi stabiilsuse saavutamiseks oluline. Lisaks pidevalt ühesele tooriku paigutamisele rakisesse on korraliku konstruktsiooni korral detaili vahetus ka kiirem.

Tõmbekatseks on vaja valmistada minimaalselt 3 katsekeha iga järgnevalt nimetatud konfiguratsiooni kohta. Katsekehad tuleb valmistada kolmes erinevas variandis:

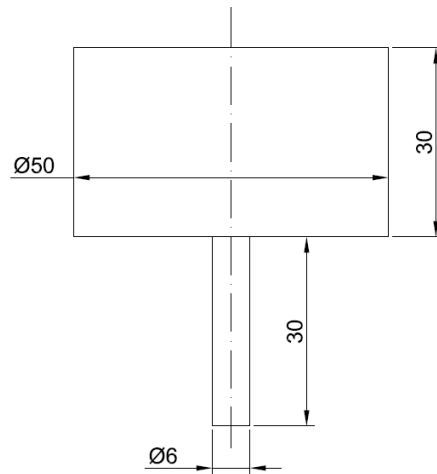
- 1) Materjali valtsimissuund on paralleelne (0°) katsekeha kaelaosaga.
- 2) Materjali valtsimissuund on risti (90°) katsekeha kaelaosaga.
- 3) Materjali valtsimissuund on 45° nurga all.

Kuna tõmbekatse toorikuid on koguseliselt vaja vähem valmistada ning geomeetrilisi erinevusi samuti pole, on rakis projekteeritud väga lihtsana ning võimalikult vähese ajakuluga. Samas aga on projekteeritud rakis konstrueeritud nii, et võimaldab lihtsalt ning veatult vajalikud toorikud valmistada. Järgnevates peatükkides on põhjalikumalt kirjeldatud vormimiskatseks vajalike toorikute freesimise rakisega seonduvat alates erinevate lahendusvariantide genereerimisest kuni spetsiifiliselt erinevate sõlmede projekteerimise. Tõmbekatseks vajalike toorikute rakistusega seonduvat on väga põgusalt kajastatud peatükis 2.8.

2.2 Freespingi piirangud

Rakise projekteerimisel on oluline jälgida freespingi poolt tulenevaid võimalusi ning piiranguid. Freesimiseks kasutatakse TTÜ Mehhaanikateaduskonna lõiketöötuse laboris (ruum U05-109) asuvat freespinkki Avemax EH-610 [19].

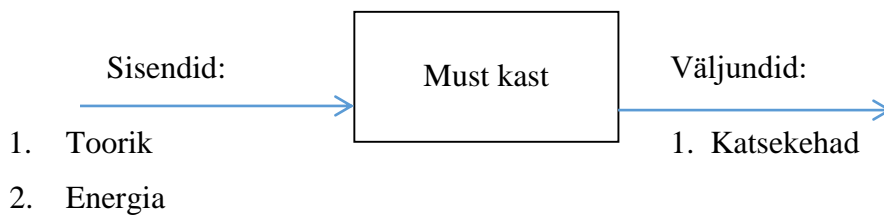
Kontuuri freesimine teostatakse $\varnothing 6$ mm silinderfreesiga. Freesi ning kinnituspadruni mõõtmed, mis on olulised rakise projekteerimise seisukohast, on toodud Seel 2.1.



Sele 2.1. Freesi ning padruni mõõtmed

Freespingi töölaud on mõõtmetega 350 x 710 mm, mida on samuti oluline silmas pidada erinevate variantide genereerimisel. Töölaual on T-sooned, mille abil saab erinevaid komponente sinna kinnitada.

2.3 Funktsiooni graafik



Funktsiooni graafiku skeemil on lihtsalt edasi antud rakise poolt vajalik funktsioon. Sisenditeks on töödeldav materjal ning energia ning väljundiks vajalikud geomeetriaga katsekehad. Rakise ülesandeks on fikseerida materjal töötuse ajaks. Funktsiooni struktuur on analoogne nii vormimiskatse kui ka tõmbekatse toorikute puhul.

2.4 Ideede genereerimine

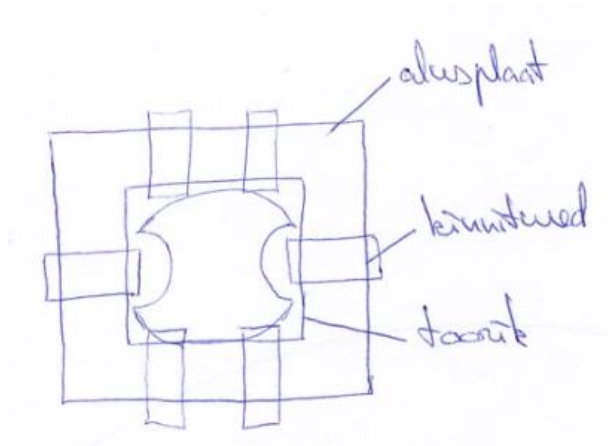
Enne ideede genereerimist koostati nõuete loetelu, millele rakis peab vastama. Eraldi on välja toodud kohustuslikud ning soovituslikud nõuded, mistõttu on erinevate funktsioonide prioriteetsuse omavaheline hindamine lihtsam.

Spetsifikatsioon	Kohustuslik	Soovitav
Täpne tooriku asetus rakisesse	+	
Stabiilne tooriku nullpunkt rakises	+	
Kiire detaili vahetus	+	
Universaalsus (võimaldab ühes rakises freesida kõik erinevad geomeetriad)	+	
Võimaldab lõigata täisringi		+
Majanduslikult odav		+
Tooriku pind peab jääma kahjustamata	+	
Valmistamise lihtsus		+
Võimaldab freesida ka suuremaid toorikuid kui $200^{+5} \times 200^{+5}$ mm		+

Tabel 2.1. Nõuete loetelu

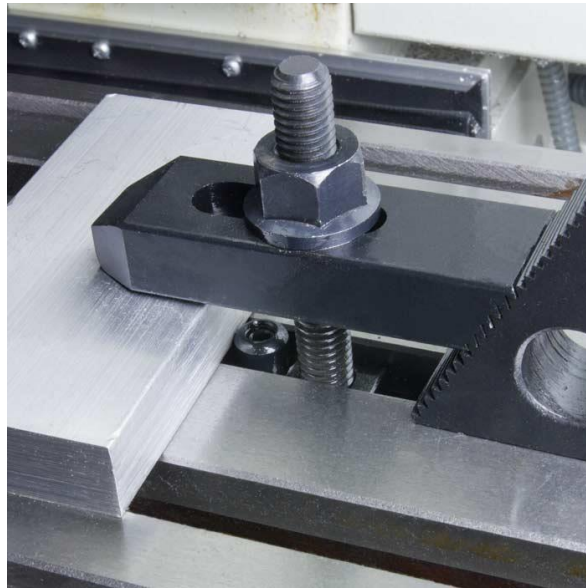
Pärast nõuete formuleerimist genereeriti erinevaid rakise lahendusvariante lehtmetailist toorikute freesimiseks. Variantide all on lühidalt toodud nende kirjeldus ning tööpõhimõte. Kirjeldatud pole spetsiifilisemaid aspekte vaid ainult konkreetse variandi üldidee. Kõikide ideede eelised ning puudused on koondatud loetelu lõpus tabelis 2.2.

2.4.1 Variant nr. 1



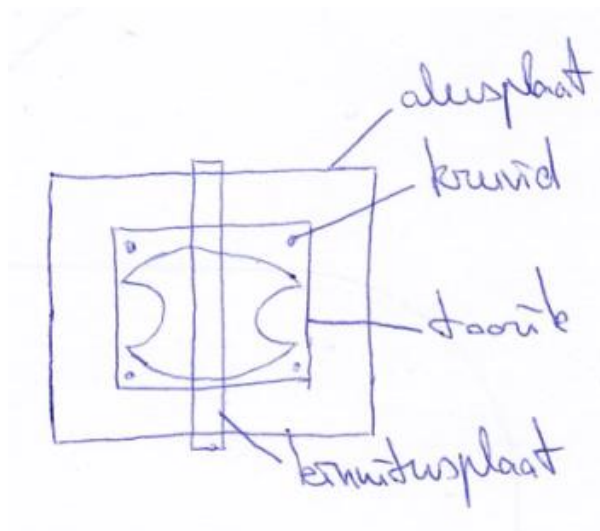
Sele 2.2. Rakise variant nr. 1

Antud variandi puhul on lehtmetailist toorik alusplaadile kinnitatud kasutades standardseid kinnitusvahendeid, mis samaaegselt fikseerivad ka alusplaadi töölaua suhtes. Universaalsete kinnituselementide põhimõtteskeemi seletav pilt on toodud seel 2.3.



Sele 2.3. Universaalne kinnituselement freespingile

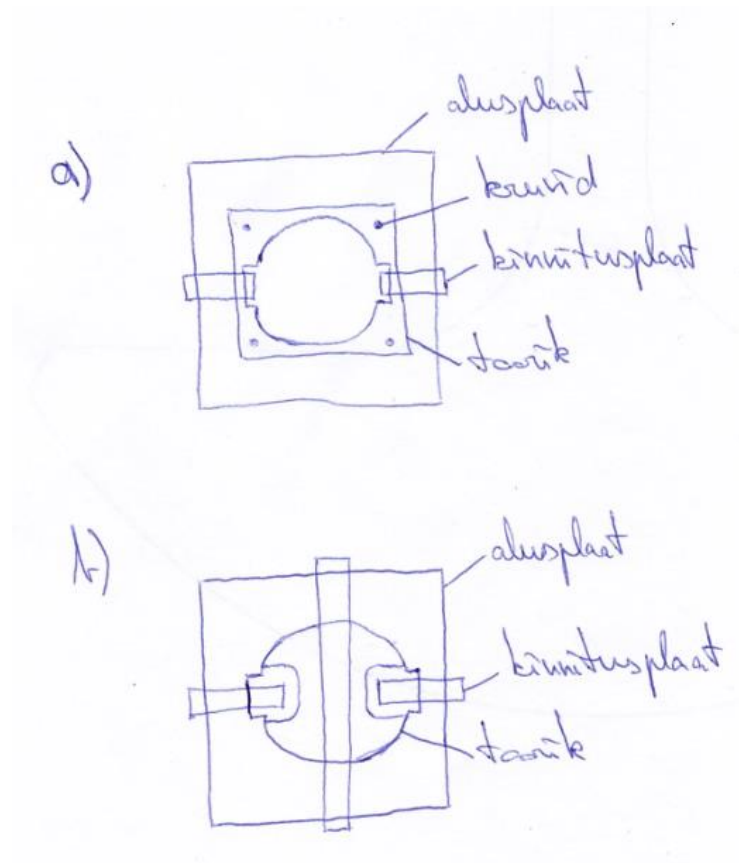
2.4.2 Variant nr. 2



Sele 2.4. Rakise variant nr. 2

Antud lahenduse puhul on toorik keskosast kinnitatud kitsa metallplaadiga, mis kahest otsast on kinnitatud freesitöölaua külge kasutades juba esimese variandi juures välja toodud universaalset kinnitust (Sele 2.3). Neljast nurgast on toorik alusplaadi külge fikseeritud kruvidega.

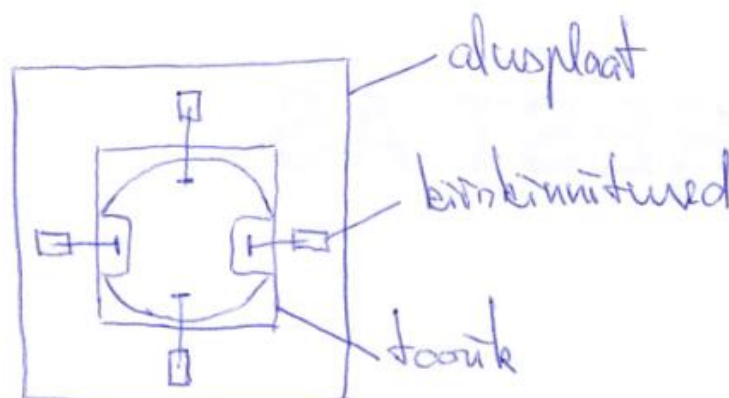
2.4.3 Variant nr. 3



Sele 2.5. Rakise variant nr. 3

Selle variandi puhul toimub toorikute freesimine kahe operatsiooniga. Esimese operatsiooni käigus (Sele 2.5, a) freesitakse toorikust ringikujuline väliskontuur, kus kahele vastasküljele jäävad nelinurksed hambad. Esimese operatsiooni käigus on toorik kinnitatud universaalsete kinnituselementidega ning kruvidega. Teise operatsiooni käigus freesitakse detailile süvendid ning selle töötamise ajal on kasutusel universaalsed kinnituselemendid.

2.4.4 Variant nr. 4



Sele 2.6. Rakise variant nr. 4

Antud variandi puhul on toorik alusplaadile kinnitatud kasutades kiirkinnitusi, mis on levinud nii lõiketöötlusel kui ka näiteks erinevate keevitusrakiste puhul. Alusplaat omakorda on freesi töölauale kinnitatud universaalkinnitusete abil. Tooriku kinnitused on sõltumatud alusplaadi kinnitustest.

2.5 Kokkuvõte

Järgnevas tabelis on välja toodud erinevate väljapakutud rakise lahendusvariantide eelised ning puudused.

Variant	Eelised	Puudused
1	<ul style="list-style-type: none"> • Väga lihtne. • On vaja ainult standardkinnitusi. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tülikas/aeglane tooriku vahetus. • Oluline jälgida kinnituste asukohta. • Detaili vahetades võib alusplaat nihkuda. • Üsna suur osa kontuurist jääb freesimata ning vajab hilisemat töötlust. • Freesitava tooriku keskosa halvasti fikseeritud.
2	<ul style="list-style-type: none"> • Saab freesida peaaegu terve kontuuri. • On vaja ainult standardkinnitusi. • Fikseeritud nii tooriku keskosa kui ka välimine osa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Detaili vahetades võib alusplaat nihkuda. • Tülikas tooriku vahetus. • Kiireks tooriku vahetuseks vajalik akutrell.
3	<ul style="list-style-type: none"> • Saab freesida kogu vajaliku kontuuri. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kaks operatsiooni – aeglasem protsess. • Detaili vahetades võib alusplaat nihkuda.

		<ul style="list-style-type: none"> • Esimese operatsiooni puhul tooriku keskosa fikseerimata.
4	<ul style="list-style-type: none"> • Kiire tooriku vahetus. • Fikseeritud nii tooriku keskosa kui ka välimine osa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eeldab spetsiaalsete sulgurite kasutamist. • Keerukam rakise koostamine. • Kiirkinnituste fikseerimisjõud ei pruugi olla piisav.

Tabel 2.2. Variantide eelised ja puudused

2.6 Lõpliku variandi valik

Parima lahenduse leidmiseks on variantide omavaheliseks hindamiseks koostatud maatriks, kus ridades on toodud erinevad omadused ning veergudes on genereeritud ideed. Tabeli viimases tulbas on toodud iga omaduse osatähtsus konkreetses rakenduses. Kuna variante ei ole väga palju, siis on iga omadust hinnatud ning osatähtsus toodu 5 palli skaalal.

Omadus	Variant				Osatähtsus
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	
Tooriku vahetus (kiire)	2	3	3	5	5
Tooriku paigutus (täpne)	5	5	4	5	5
Tooriku fikseeritus (hea)	2	3	3	4	5
Valmistamise lihtsus (lihtne)	5	5	5	3	3
Freesimise ulatus (suur)	2	4	5	4	4
Kokku:	68	86	85	95	

Tabel 2.3. Hindamismaatriks

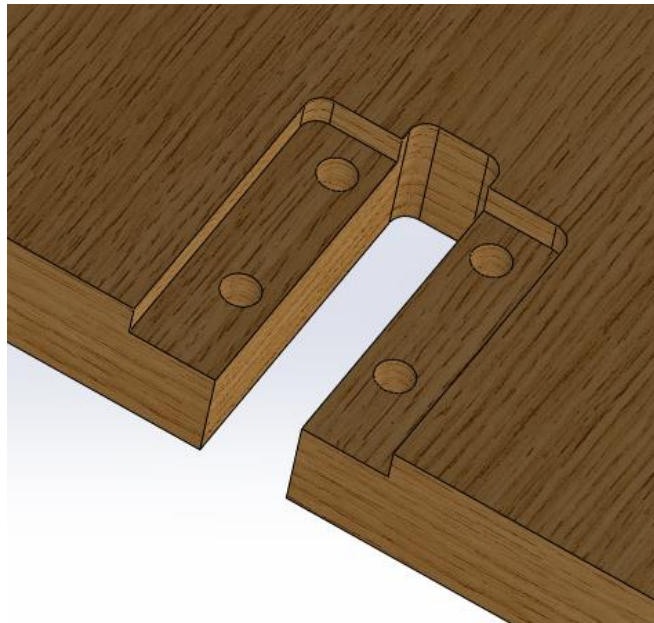
Hindamismaatriksi tulemustest selgub, et antud juhul on parimaks rakise lahenduseks variant nr. 4, mistõttu hakkame sellega edasi tegelema ning spetsiifilisemalt erinevatele sõlmedele parimaid lahenduskäike valima.

2.7 Rakise sõlmede projekteerimine

2.7.1 Alusplaat

Rakise alusplaadina on kasutatud 20 mm paksust vineeri. Vineer on valitud põhjusel, et kontuuri freesimisel lõikab frees ka teatud ulatuses (ca 0,2 mm) alusesse, mistõttu peab see olema pehmemast materjalist. Seega sobib vineer hästi nii oma omadustelt kui ka kättesaadavuselt. Alusplaadi mõõtmeteks on valitud 400 x 400 mm, et tagada piisavalt ruumi sulgurite paigutamiseks. Samuti ei tekita freesi töölaust laiem alusplaat pinki kinnitamisel probleeme, sest plaadi saab fikseerida kahest vastastküljest kokku nelja klambriga.

Alusplaadile on freesitud sooned ning pesad sulgurite jaoks, et viia sulgurite tasapind võimalikult vineeri pealispinna lähedale. Selliselt on freesi spindlil rohkem ruumi ning elimineeritud on võimalikud olukorrad, kus toimub kokkupõrge freesi ning kinnituselementide vahel.



Sele 2.7. Freesitud sooned

Lisasulgurid on kruvidega paigaldatud vineeri pealispinnale. Nende puhul ei ole oluline sulguri tasapinna allapoole viimine, sest asuvad lõikekontuurist kaugemal ning pole ohtu spindli ning sulguri kokkupõrkeks.

2.7.2 Tooriku täpne paigutus

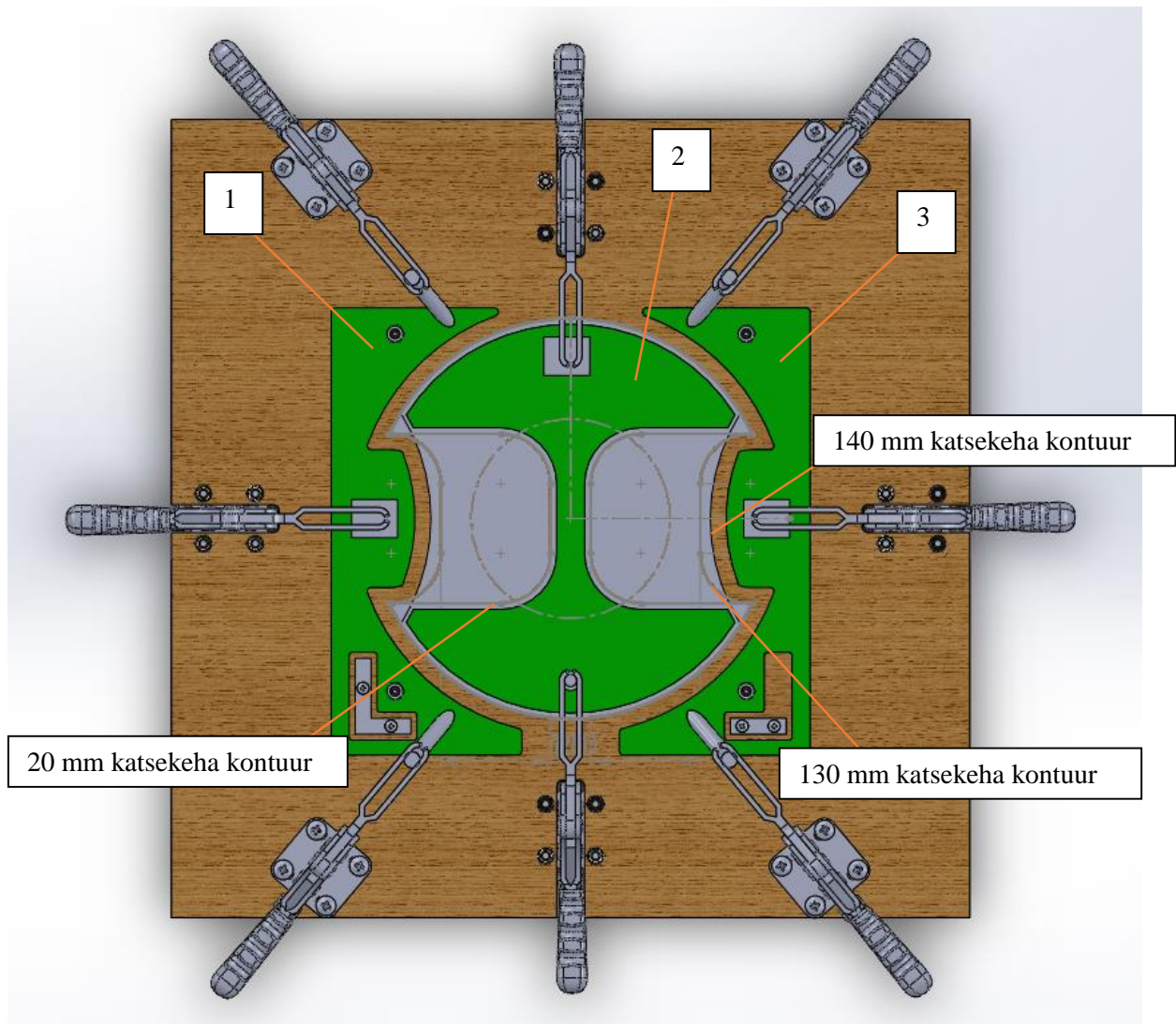
Toorikute paigutus rakisesse peab olema täpne ning seda iga detaili vahetuse korral, et kiirendada freesimise protsessi ning tagada korrektsete toorikute saamine. Ebatäpse paigutuse tulemusena erineb tooriku nullpunkt programmeeritust ning seetõttu on pidevalt vaja korrigeerida NC koodi, mis aga on väga ajamahukas ning pikendab üldist freesimise aega. Tagamaks alati üheselt täpset tooriku paigutust rakisesse, on alusplaadile kinnitatud üks nurk ning üks tugiplaat, mis fikseerivad alati ära tooriku ühe nurga (kust on määratud ka programmi nullpunkt) ning määravad alumise horisontaalse serva sihi.



Sele 2.8. Tooriku asendi piirajad

2.7.3 Tooriku kinnitamine rakisesse

Pärast tooriku asetamist rakisesse asendipiirajatega tuleb freesimise ajaks toorik kinnitada. Fikseerimine toimub plaatide abil (Selel 2.9 märgitud rohelisega), mille kontuur on valitud erinevate katsekehade geomeetria analüüsi põhjal, et oleks võimalik kõik vormimiskatse toorikud välja freesida ühes rakises kinnituselemente muutmata. Kinnitusplaatide valmistamisel on arvestatud ka võimalikku viga rakise ning programmi koostamisel, seega on mõlemale poole löikejoont jäetud freesile varu 2 mm. Algselt oli planeeritud tooriku fikseerimine ainult sulgurite abil, kuid kinnitusplaatide kasutamine tagab suurema kontaktpinna ning seega ka parema fikseerituse.



Sele 2.9. Rakise kinnituselemendid

Plaadid koosnevad kahest kihist:

- 1) Pealmise kihi materjaliks on 2 mm paksune aluminiseeritud terasleht DX53D + AS120 ning see on valmistatud laserlõikuse teel. Konkreetne materjal on valitud eelkõige kättesaadavuse tõttu. Materjali valikul ei esitatud muid nõudeid, kui et peab olema keevitav, seega sobib õhuke lehtmetsall väga hästi.
- 2) Alumine kiht, mis on kokkupuutes freesitava materjaliga, on valmistatud 3 mm paksusest plastist PE-300 ning on freesitud. Ka see materjal on valitud kättesaadavuse tõttu ning plast on metallist kinnituselemendi alla kinnitatud seetõttu, et vältida freesitava materjali pinna kahjustumist. Alternatiivina plastile oli kaalumisel ka kumm, kuid lehtkummi puhul võib probleemiks olla, et freesimisel tekkivad laastud lähevad materjali sisse ning kriimustavad seeläbi ikkagi freesitava materjali pinda. Samas aga oleks kumm olnud paremate vibratsiooni summutavate omadustega ning oleks efektiivsemalt ka toorikut paigal hoidnud. Küll aga ei tekkinud probleeme

materjali nihkumisega freesimise ajal, seetõttu täitis plastist alusplaat oma funktsiooni ning materjali valiku võib lugeda põhjendatuks.

Kihid on omavahel ühendatud tugeva kahepoolse teibi abil, sest kaubandusvõrgus kättesaadavad liimid ei sobi PE plastiku liimimiseks. Kinnitusplaadid 1 ja 3 (Sele 2.9) on identsed ning fikseerivad tooriku väliskontuuri ja lõikamisel tekkiva jäägi. Kinnitusplaat 2 fikseerib tooriku keskosa.

Kinnitusplaatide fikseerimine ning avamine toimub universaalsete sulgurite (*toggle clamp*) abil. Valitud on Hoffmann Group poolt toodetud mudel 37 6625-2, mille fikseerimisjõud on kuni 1200 N (Lisa 1), mis antud olukorras on igati rahuldav.

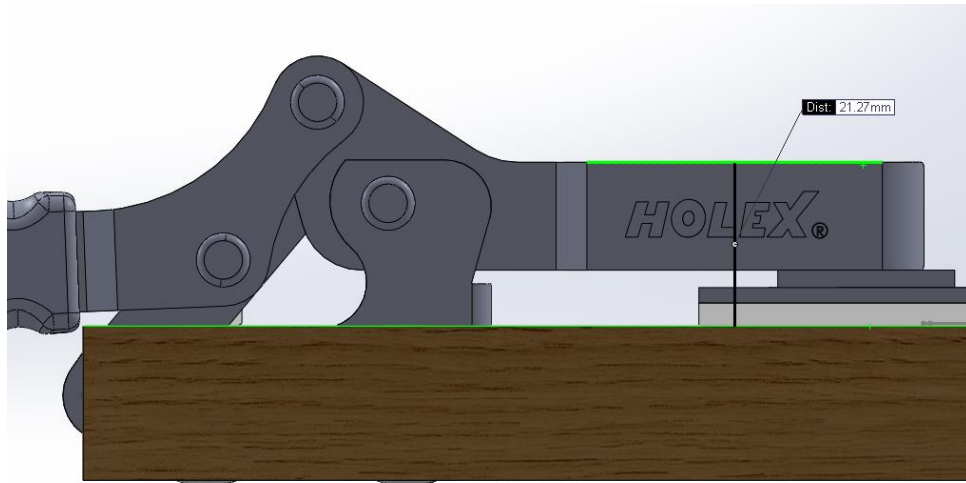


Sele 2.10. Sulgur 37 6625-2

Sulgurid on vineerist alusplaadi külge kinnitatud poltliitega ning kuna fikseerimisplaatidega on need ühendatud jäigalt keevisõmbluse abil, siis fikseerimisjõu suurendamiseks saab vajadusel poltliitele lisada seibe. Antud sulgureid kasutades on fikseeritud asendis rakise üldkõrgus väga madal, mis on soositud, sest freesi kõrgus spindlini on kõigest 30 mm (Sele 2.1). Antud juhul on aga distants vineeri pealispinna ning sulguri ülemise tasapinna vahel 21,27 mm (Sele 2.11). Seega saab sulgurite fikseeriva osa viia lõikekontuuri vahetuslähedusse, et kinnisurumisjõud oleks maksimaalne.

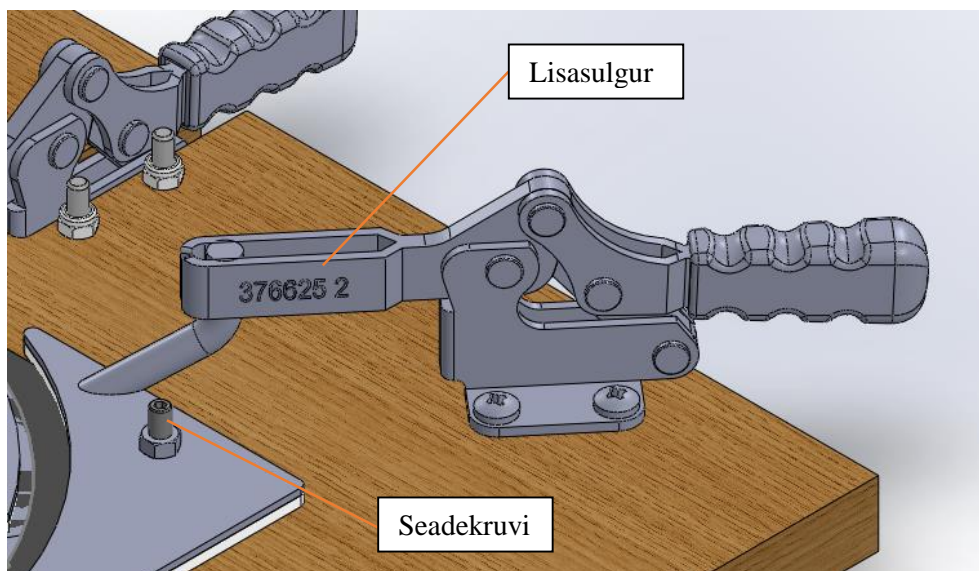
Sulgurid on fikseerimisplaatide 1 ja 3 külge jäigalt fikseeritud ning plaadid avanevad koos sulguri liigutamisega. Fikseerimisplaat 2 on Selet 2.9 vaadatuna ülemise sulguri külge fikseeritud ning alumine sulgur täidab nii fikseerimise kui ka positsioneerimise funktsiooni. Nimelt on sulgurile paigutatud silindriline varras, mis kinnisurumisel paigutub

fikseerimisplaadil olevasse rõngasse ning tagab seeläbi fikseerimisplaadi täpse asetuse ning minimiseerib sulguri kinnituse lõtkudest tuleneva vea tekke tõenäosuse.



Sele 2.11. Distantis sulguri ja aluspinna vahel

Kontaktpinge suurendamiseks ning freesitava materjali kindlamaks fikseerimiseks on nelja nurka paigutatud teravatipulised seadekruvid (DIN 914 45H), mis deformeerivad materjali pinda ning suruvad selle tugevamini alusplaadi külge (Sele 2.12). Samuti on kinnitusplaatide nurkade tugevamaks fikseerimiseks paigaldatud lisasulgurid, et tagada parem löikekvaliteet piirkondades, kus toimuvad freesi sisse- ja väljasõidud.

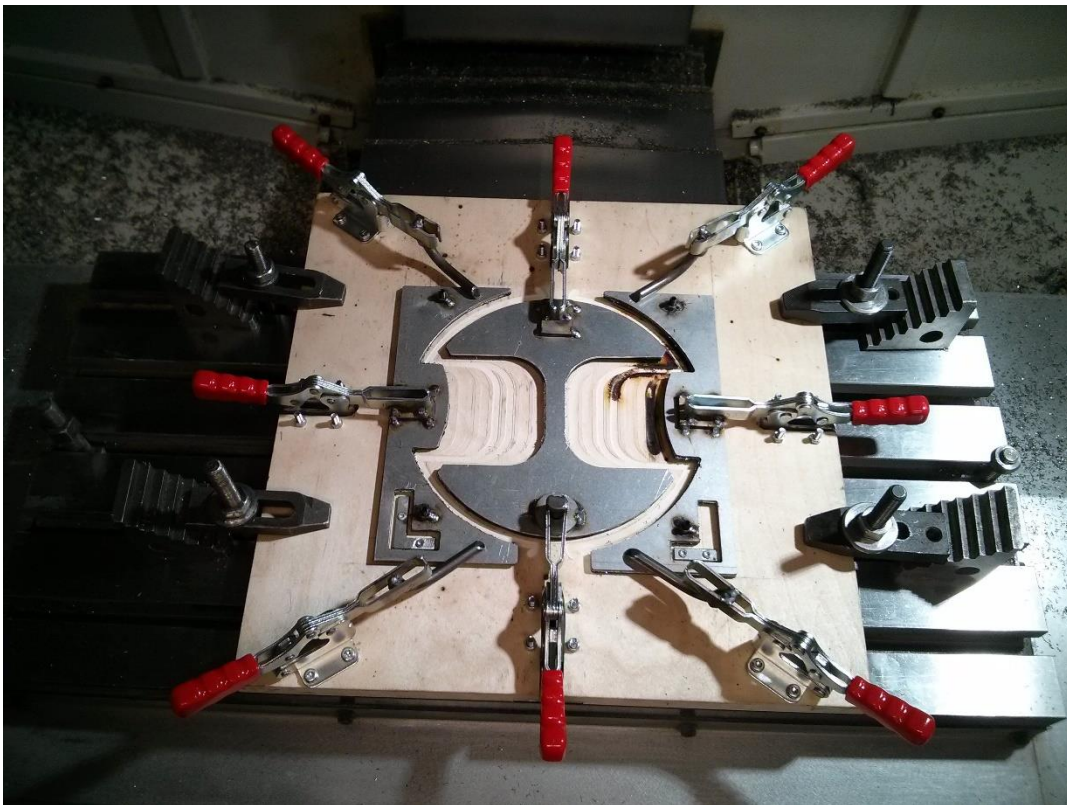


Sele 2.12. Lisasulgur ja reguleeritav seadekruvi

2.7.4 Üldkoost

Reaalselt koostatud rakis kinnitatuna freespinki on toodud Selet 2.13. Lõplik lahendus on väga kompaktne ning lihtsasti pinki paigaldatav. Kõik toorikud said selles rakises edukalt ning probleemideta freesitud, mistõttu võib lahendust lugeda õnnestunuks.

Lisasulgurite ning seadkruidude kasutamine õigustas end, sest nendeta oleks võinud probleeme tekkida freesi sisse- ja väljasõitudel. Samuti oli nimetatud löikekohtades oluline spindli kiiruse vähendamine.



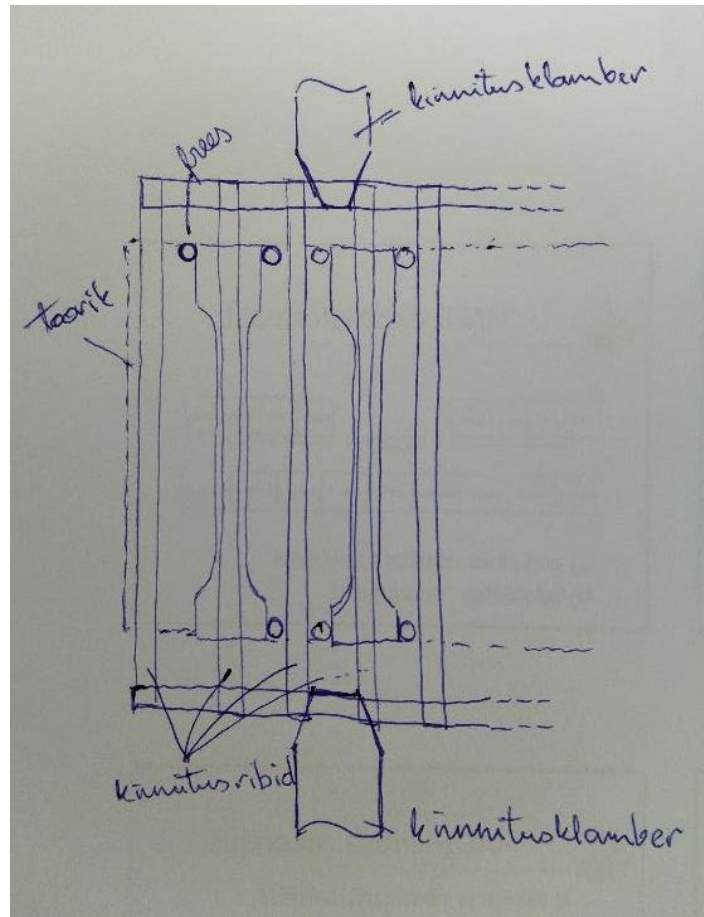
Sele 2.13. Koostatud rakis kinnitatuna freespinki

2.8 Tõmbekatse kehade freesimise rakis

Antud rakises freesitakse tõmbekatseks vajalikud katsekehad, mille geometria on vastavuses standardile EN ISO 6892-1:2010 ning katsekeha joonis on toodud ka antud töö graafilises osas. Käesoleva magistritöö raames on olulisem osa vormimiskatsel, seega on tõmbekatsele osutatud vähem tähelepanu ning ka katserakise projekteerimist pole nii põhjalikult käsitletud. Järgnevalt on lühidalt toodud rakise valmistamisega seotud põhilised etapid.

2.8.1 Ideede genereerimine

Kuna freesitavaid detaile on vähe ning geomeetrised erinevused puuduvad, siis on põhiliseks valikuobjektis kas korraga ühe või mitme tooriku freesimine. Selel 2.14 on toodud eskiis rakise lahendusvariandist, mida saaks kasutada nii üksiku detaili kui ka mitme tooriku korraga freesimiseks.



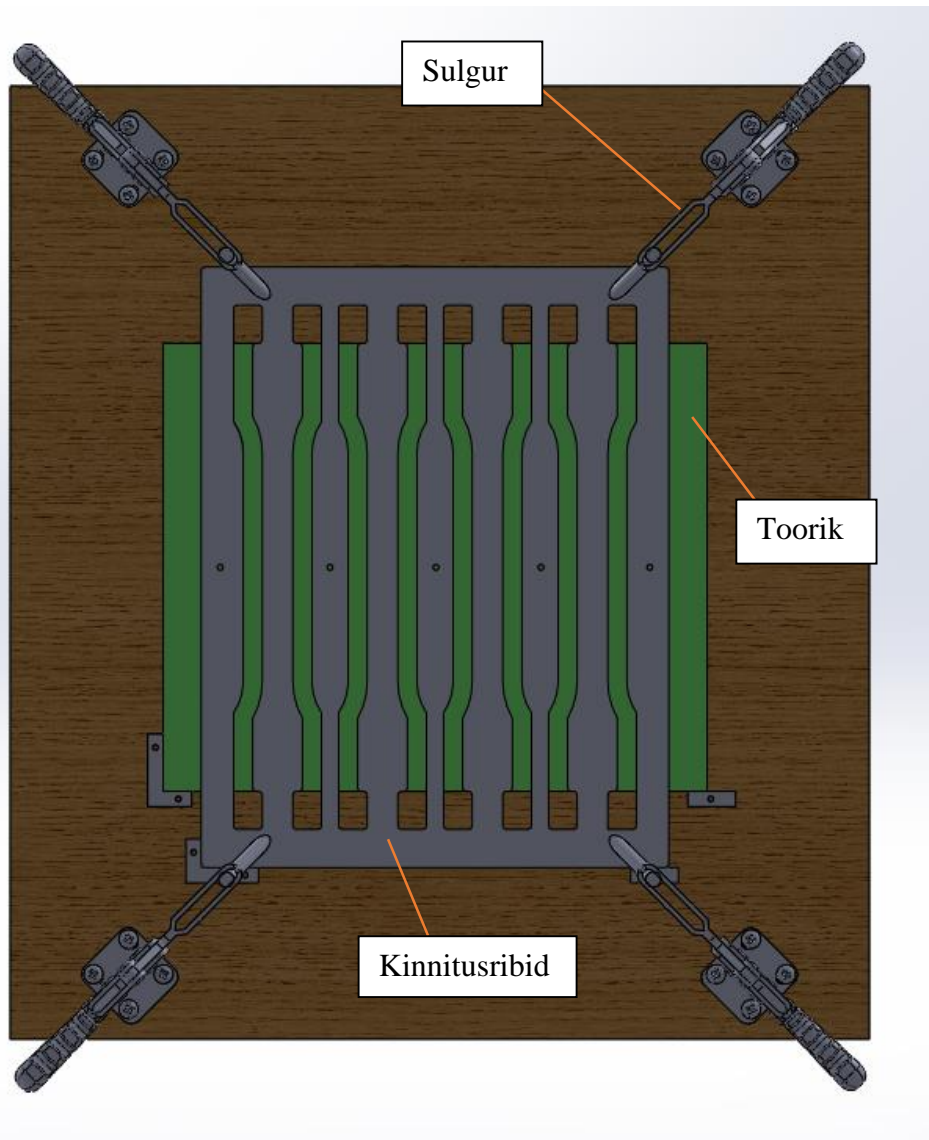
Sele 2.14. Freesimise eskiis

Rakise idee seisneb kinnitusribide võrgustikus, mis on kinnitatud vineerist alusplaadi külge. Eskiisil näidatud vertikaalsed ribad suruvad kinni nii detaili kui ka materjali jäägi ning horisontaalsed ribad fikseerivad materjali serva. Ribid koos freesitava materjaliga on alusplaadi külge kinnitatud universaalsete kinnitusklambrite abil.

Koostöös juhendajaga sai otsustatud, et antud lahendus on väheste katsekehade valmistamiseks sobilik ning ajaressursi puuduse tõttu pole otstarbekas uute ideede väljamõtmisele lisaega panustada.

2.8.2 Rakise projekteerimine ning valmistamine

Rakise koostamisel sai sõlmede projekteerimisel kasutatud analoogseid lahendusi nagu vormimiskatse toorikute freesimise rakisel. Tooriku paigutamiseks alusplaadile on samuti kasutusel kaks piirajat, mis fikseerivad ühe nurga ning määravad ühe külje sihi. Kinnitusribid on valmistatud 3mm paksusest teraslehest laserlõikuse teel ning kõik on seotud üheks detailiks, mis alusplaadile surutakse sulgurite abil, mis on identsed lisasulguritega, mis on kasutusel ka teisel rakisel (Sele 2.12).



Sele 2.15. Tõmbekatse toorikute freesimise rakis

Selel 2.15 on toodud lõpliku freesimise rakise pilt. Erinevalt esimesest rakisest ei ole siin kinnitusribid jäigalt sulgurite külge ühendatud, mistõttu on ka selle detaili täpseks asetamiseks lisatud analoogsed piirajad, mida kasutatakse ka tooriku täpseks paigutamiseks ning

nullpunkti fikseerimiseks. Kinnitusribi nendesse osadesse, mis hoiavad kinni materjali jääke, on lõigatud ka avad, et vajadusel sealt freesitav materjal alusplaadi külge kruvidega kinnitada. Rakis on koostatud selliselt, et korraga on võimalik freesida neli katsekeha – kolm on vajalikud tõmbekatse läbiviimiseks ning üks on varuks juhul, kui üks katse peaks ebaõnnestuma.

3 Katsete läbiviimine

Järgnevalt on kirjeldatud nii vormimis- kui ka tõmbekatse läbiviimist, kasutatud metoodikat ning kirjeldatud seadmeid ning rakistust.

3.1 Vormimiskatse

Materjali FLC määramise olulisemaks etapiks on vormimiskatsete sooritamine, mis antud töö raames on läbi viidud TTÜ mehaanika- ja metroloogia katselaboris. Vormimiskatse parameetrid on valitud vastavuses standardile EN ISO 12004-2:

- 1) Templi kiirus: 1,5 mm/s.
- 2) Kaamera salvestuskiirus: 10 kaadrit sekundis.

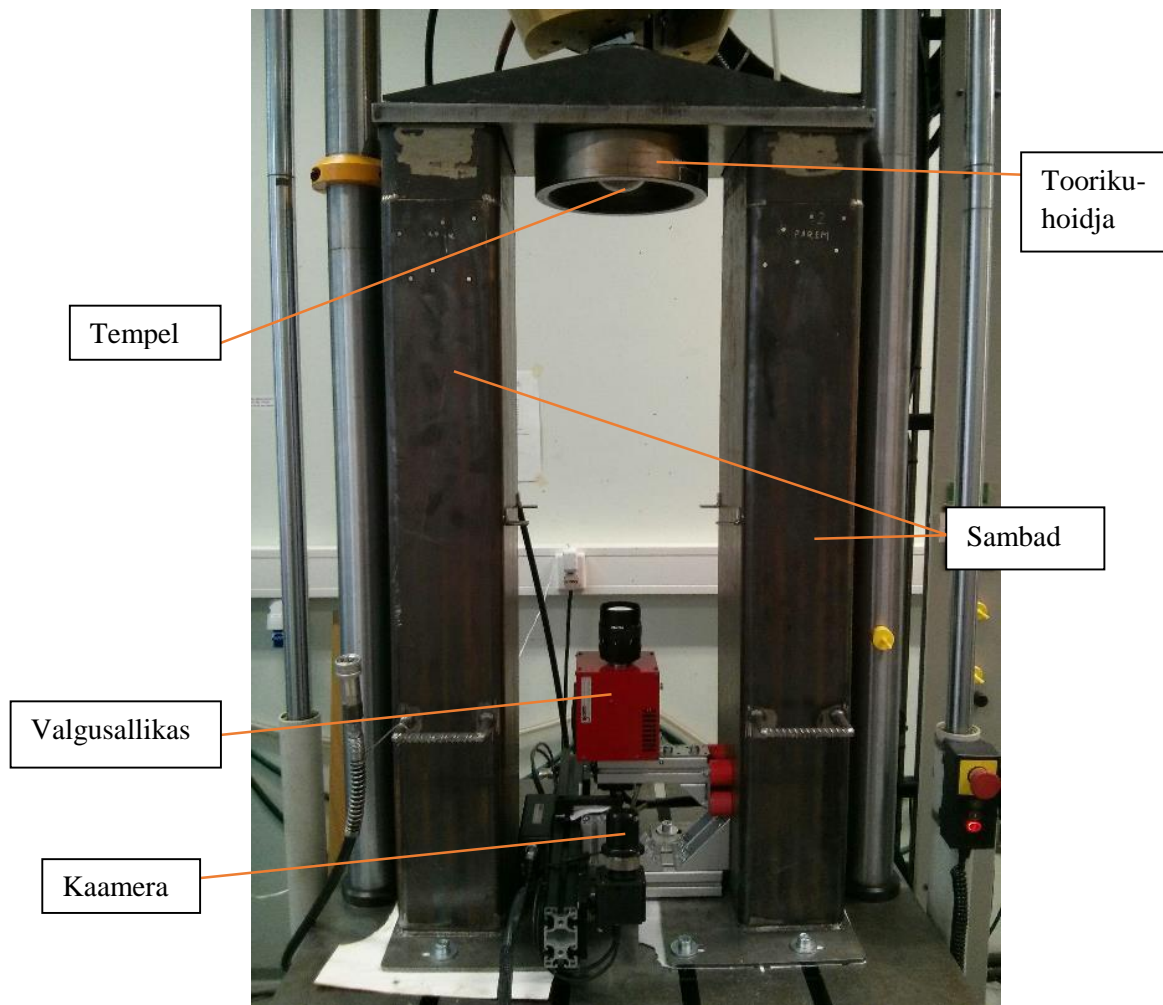
3.1.1 Katseseade ja rakistus

Katsed on läbi viidud Instron 8802 katsesendis (Sele 3.1), mis on mõeldud toodete ja materjalide staatiliseks ja dünaamiliseks katsetamiseks. Täpsemad andmed katseseadme kohta on toodud Lisas 2.



Sele 3.1. Instron 8802 [20]

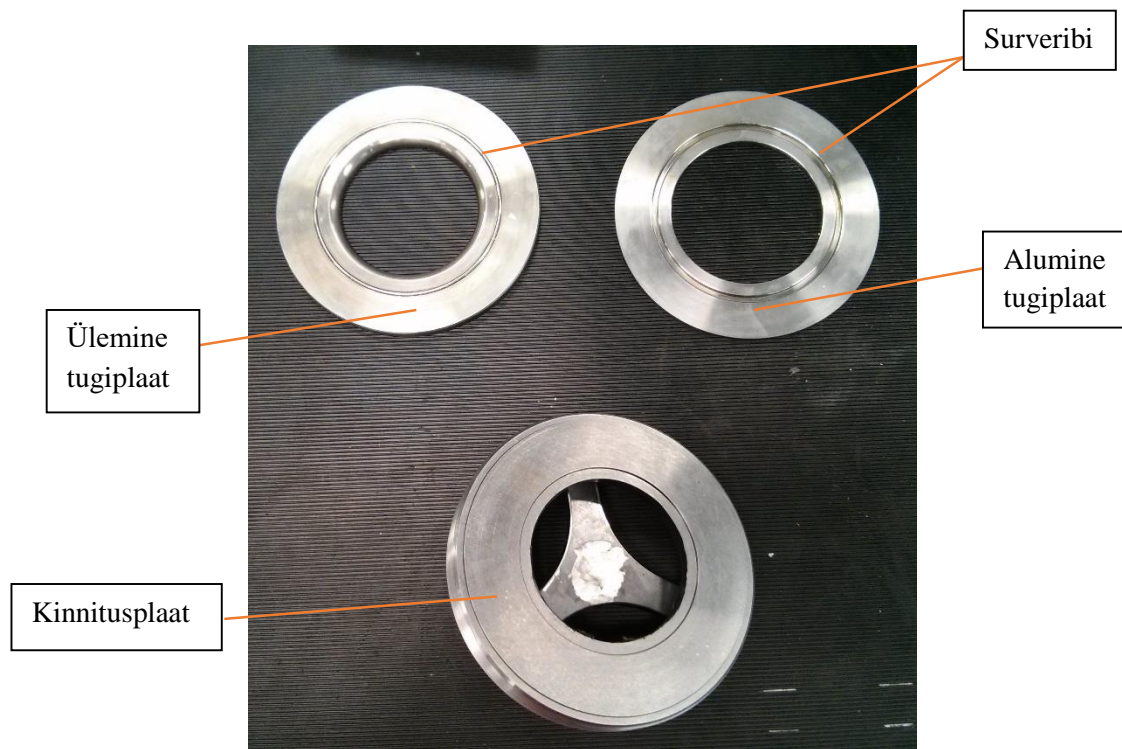
Katserakise, mis paigaldatakse seadme töölauale ning mille abil toimub toorikute fikseerimine, on projekteerinud juhendaja Henri Lend.



Sele 3.2. Vormimiskatse rakis

Rakis (Sele 3.2) koosneb kahest nelikanttorust valmistatud sambast, mille kõrgus tuleneb kasutatava kaamerasüsteemi parameetritest (mõõtemahust), katsestendi mõõtmetest ning stendi töösilindri käiguulatusest.

Katsetusele minev toorik kinnitatakse sammaste peale toetuva horisontaalse tugiplaadi küljes olevasse toorikuhooidjasse. Tooriku fikseerimiseks vajalikud elemendid on toodud Selel 3.5.



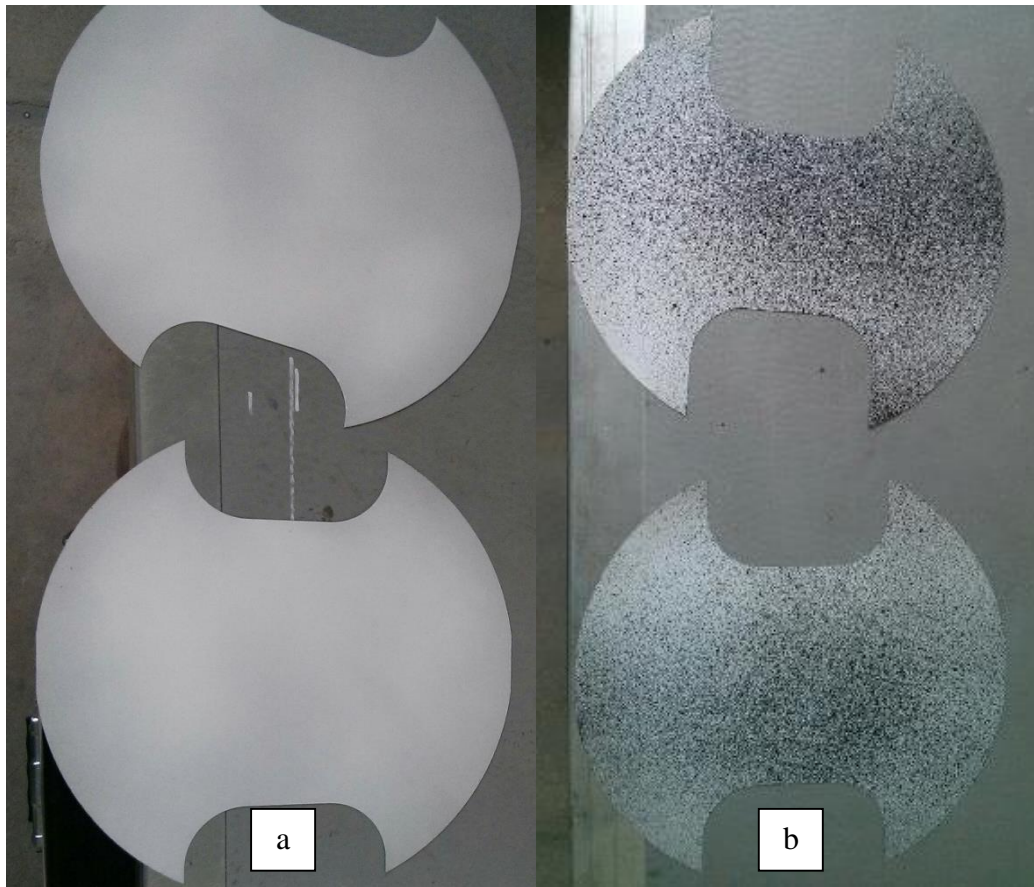
Sele 3.5. Tooriku fikseerimiselemendid

Toorik asetatakse kahe tugiplaadi vahele ning need paigutatakse kinnitusplaadile. Seejärel paigutatakse kõik komponendid rakisesse ning fikseerimine toimub kinnitusplaadi ja toorikuhoidja vahelise keerme abil. Pärast keermega fikseerimist pumbatakse käsi hüdropumba abil süsteemi rõhk 20...25 bari, mille toimele surutakse toorik tugiplaatide vahele kinni ning tugiplaatidele freesitud surveribi takistab materjali kaasatõmbamist. Fikseerimiseks vajalik rõhk süsteemis on katseliselt määratud proovides erinevaid rõhkusid ning seeläbi leitud optimaalne suurus.

3.1.2 Katsekehade ettevalmistus

Võimaldamaks katsekeha deformatsioonide mõõtmist on vaja igale toorikule peale kanda võrgustik [12]. Antud töö raames on kasutatud stohhastilist mustrit. Esmalt on toorikud kaetud pihustatava valge talgiga (Ardrox 9D1B), mis matistab katsekehade pinna ning seeläbi väldib valguse peegeldumist (Sele 3.6, a). Talk osutus valituks katsetamise teel. Esmalt kasutati talgi asemel valget aerosoolvärvi, kuid selle pealekandmine oli mitmes aspektis kriitilisem. Väga oluline oli kihi paksus ning kuivamisaeg, vastasel juhul hakkas värv vormimise käigus suurte tükkidena kooruma ning tekkisid värviga katmata alad, mis kaamerapildile tekitasid palju peegeldusi ning seeläbi halvendasid tulemuste kvaliteeti. Talk kuivab hetkega ning on oma olemuselt pulbriline, mistõttu ei hakka see suurte tükkidena kooruma. Pärast matistamist kantakse toorikutele stohhastiliselt musta aerosoolvärvi täpid

(Sele 3.6, b). Musta värvi pihustamisel tuleb tagada, et värvi täpid ei tuleks liiga suured ning et need kataksid pinna võimalikult ühtlaselt. Samuti tuleb musta värvi pihustada pigem tihedamalt kui hõredalt, et tagada parem ning täpsem tulemus deformatsioonide mõõtmisel.



Sele 3.6. a – talgiga kaetud katsekehad; b - stohhastiline muster katsekehadel

Pärast mustri peale kandmist tuleb värvil lasta veidi kuivada, kuid täielik kuivamine ei ole soovitatud, sest seljuhul kaotab värv oma plastsuse ning hakkab murenema, mis võib viia ebatäpsete tulemusteni või anomaaliateni pikslite asetusel kaamerapildil.

Lisaks mustri ole teiseks oluliseks faktoriks katsekehade ettevalmistusel korrekse hõõrdeteguri tagamine templi ning tooriku vahel. Standardi EN ISO 12004-2 poolt on soovituslikeks meetoditeks [12]:

- a) Õli või määrde kasutamine
- b) Ringikujulised PE või PTFE kiletükid (nt. paksusega 0,05 mm)

Antud juhul on toorik enne vormimisrakisesse asetamist templiga kokkupuutesse minevas piirkonnas kaetud universaalse immutusõliga (*penetrating oil*). Määrde kasutamine tagab, et hõõrdetegur ei oleks liiga suur ning pragu tekiks soovitud asukohas, milleks on distants templi tipust, mis jääb väiksemaks kui kuni 15 % templi diameetrist [12].

3.1.3 Deformatsioonide mõõtmine (ARAMIS)

FLC määramiseks on oluline mõõta detaili deformatsioone vormimise käigus erinevate katsekehade puhul. Selleks on antud magistritöö raames kasutatud GOM ARAMIS v6.1 tarkvara koos ARAMIS 2M riistvaraga, mille lühiülevaade on järgnevalt toodud.

ARAMIS on kontaktivaba optiline 3D deformatsioonide mõõtmise süsteem mis analüüsib, arvutab ning dokumenteerib tulemused. Mõõtmistulemuste graafiline esitus võimaldab optimaalse arusaamise mõõdetava objekti käitumisest. ARAMIS tuvastab objekti pinnastruktuuri digitaalkaamera pildidel ja määrab pikslitele koordinaadid. Objekti esimene pilt määrab deformeerimata oleku. Pärast deformatsiooni või selle jooksul salvestab tarkvara pidevalt uusi pilte ning hiljem võrdleb neid ja arvutab deformatsiooni ning nihkumise [21].

ARAMIS'e peamised kasutusvaldkonnad [21]:

- Materjalide testimine.
- Tugevuse hindamine.
- Komponentide dimensioneerimine.
- Mittelineaarse käitumise uurimine.
- FLC määramine.
- FE mudelite kinnitamine.
- Materjali omaduste määramine.
- Homogeensete ja mittehomogeensete materjalide käitumise uurimine deformeerimise jooksul.
- Deformatsioonide arvutamine.

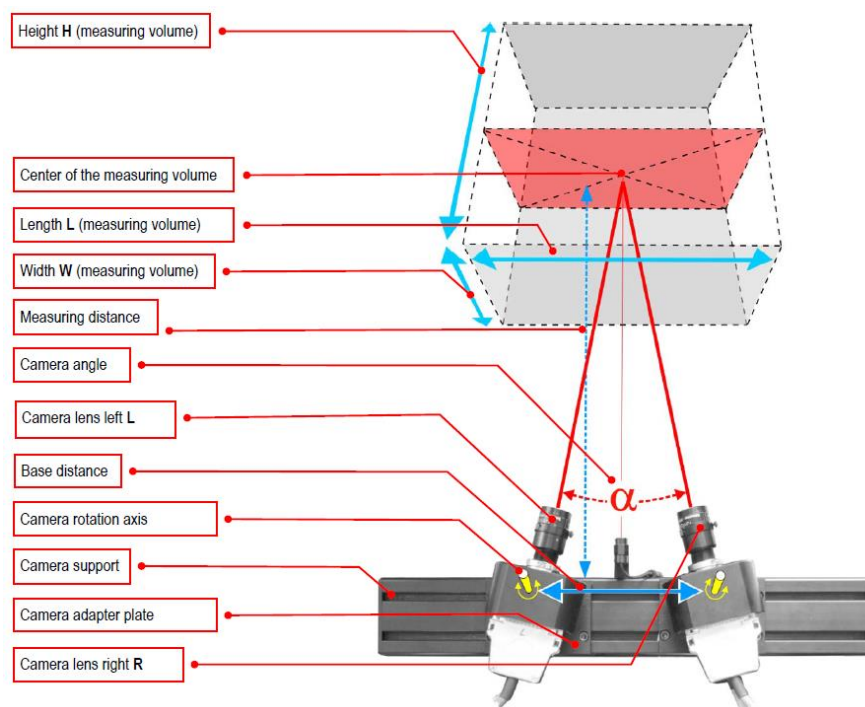
ARAMIS salvestab kaadrid katse käigus vastavalt etteantud salvestuskiirusele ning hiljemalt arvutab deformatsioonid igal ajahetkel ning visualiseerib tulemused, mida hiljem kasutatakse FLC jaoks vajalike andmete töötlemiseks.

Kaamerasüsteemiks on antud juhul ARAMIS 2M koos 65mm läätsedega. Süsteemi peamised parameetrid on toodud tabelis 3.1 [22].

Standard mõõtemaht	10x7,5 mm kuni 2000x1500 mm
Kaamera resolutsioon	1600x1200 pikslit
Max. salvestuskiirus	12 Hz
Deformatsioonide mõõteulatus	0,01% kuni >100%
Mõõtetäpsus	Kuni 0,01%
Mõõtetulemused	2D või 3D deformatsioonid

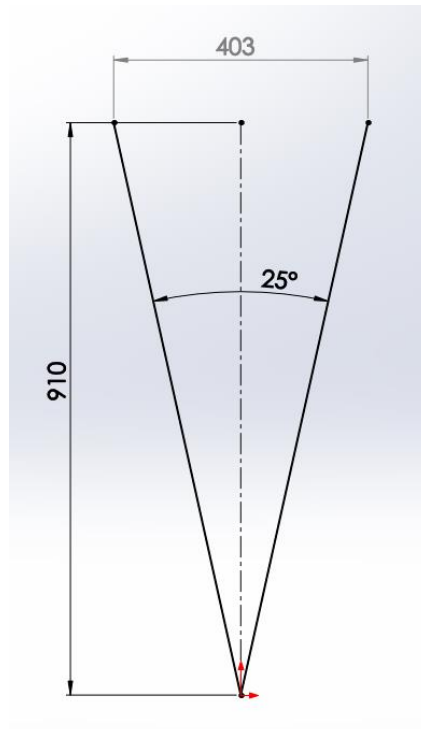
Tabel 3.1. ARAMIS 2M parameetrid

ARAMIS süsteemi paigaldamiseks on tootja koostanud informatiivse tabeli, kus vastavalt vajalikule mõõtemahule on toodud kaamerata omavaheline nõutud distants, nurk ning kaamerate kaugus mõõdetavast pinnast (Sele 3.3).



Sele 3.7. Kaamerate asendiskeem

Kaamerate omavaheline nurk (Sele 3.7, α) peab olema 25° ning maksimaalne distants mõõtepinnani tulenevalt katserakise ülesehitusest ning katsestendi piirangutest on 910 mm. Seega peab kaamerate omavaheline kaugus (*base distance*) olema 403 mm (Sele 3.8).



Sele 3.8. Kaamerate asendiskeem

Pärast kaamerate omavahelise kauguse ning nurga määramist ja fikseerimist alusplaadil tuleb läbi viia süsteemi kalibreerimine ning alles seejärel saab kaamerad asetada katsestendil oma õigele positsioonile. Kalibreerimiseks kasutatakse spetsiaalselt kodeeritud paneeli (Sele 3.9) ning tootja poolt etteantud kalibreerimisjuhendit.



Sele 3.9. Kalibreerimispaneel

Süsteem on kalibreeritud, kui kõrvalekalde väärtus (*calibration deviation*) on alla 0,03 piksli. Antud töö puhul oli kalibreerimise tulemusena kõrvalekalle 0,025 pikslit (Sele 3.10).

Actual Calibration Info

General	
Calibration date	Tue Apr 26 22:13:12 2016
Calibration object	
Object type	Panel (coded)
Name	CP20/90/D06539
Calibration scale	Distance 1: 83.161 mm Distance 2: 83.157 mm
Certification temperature	20.0 °C
Expansion coefficient	4.00 x 10 ⁻⁶ 1/K
Measurement Temperature	24.0 °C
Calibration settings	
Camera lenses	65.00 mm
Results	
Calibration deviation	0.025 pixels
Scale deviation	0.000 mm
Camera angle	24.4°
Angle variance	-44.7 / 47.0°
Height variance	45 mm
Measuring volume	85 / 65 / 45 mm

Sele 3.10. Kalibreerimisprotokoll

Katsetuste läbiviimise algfaasis tulid esile kaks väga olulist faktorit, mida on antud süsteemi puhul oluline jälgida. Esmalt on äärmiselt vajalik korrektselt ning täpselt läbi viia kaamerate kalibreerimisprotsess. Korrekse tulemuse saavutamiseks on süsteem kalibreerida enne katsestendile asetamist. Selliselt on oluliselt lihtsam täita kalibreerimisjuhendis etteantud nõudeid (nt. paneeli kauguse ning nurga muutmine kaamera(te) suhtes). Kalibreerimisjärgselt kaamerate stendi asetades on aga oluline jälgida, et kaamerate kinnitusi liigselt ei raputaks ega toimuks kokkupuuteid rakisega, mis võivad juba enne katsetuste algust süsteemi kalibreerimise nurjata.

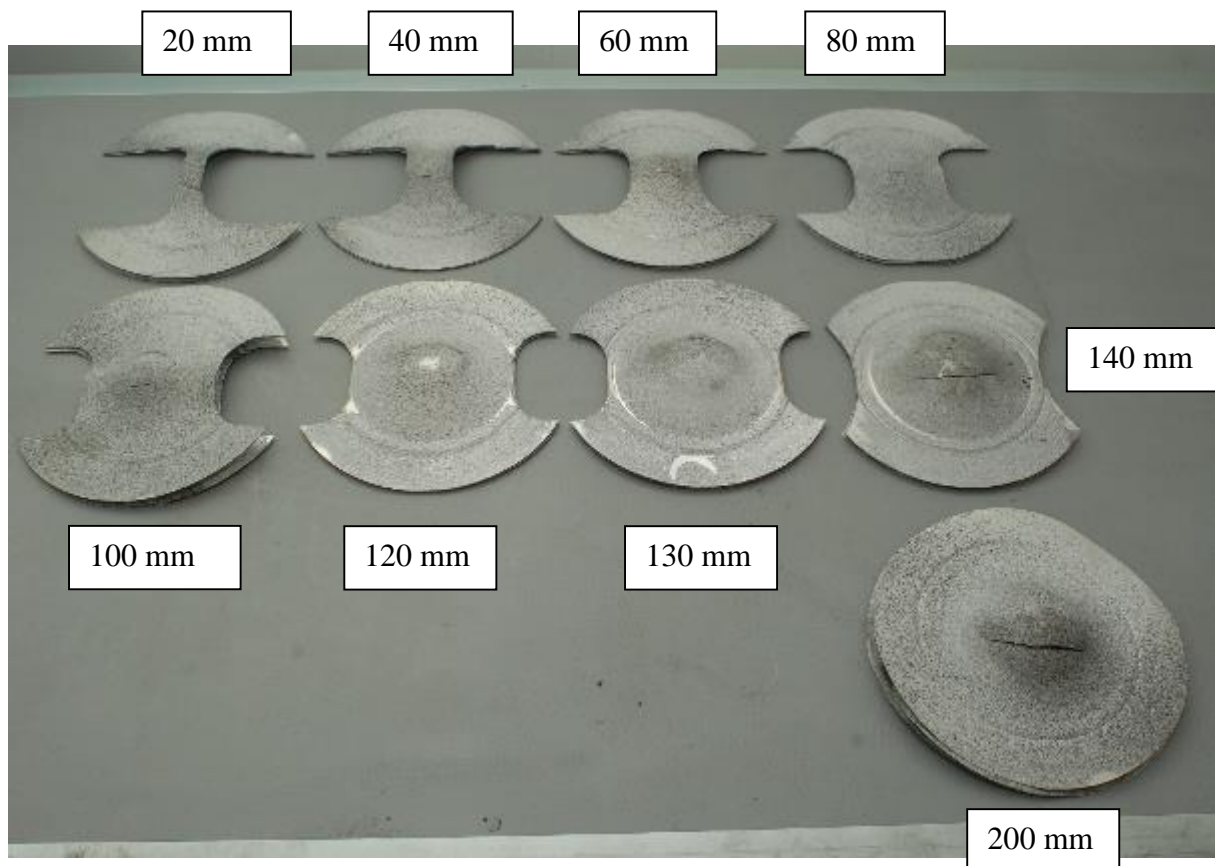
Teiseks oluliseks faktoriks oli kaamerate jäik ühendus alusraami külge. Katsete algfaasiks oli probleemiks süsteemi dekalibreerumine pärast katsestendile asetamist. Kalibreerimine toimus kaamerate horisontaalses asendis, kuid katsestendis paiknevad need vertikaalselt. Hilisema uurimise tulemusena selgus, et kinnitustele jäikust lisades asendi muutmisega seotud probleemid kadusid. Seega on analoogsete katsete läbiviimisel kinnituste jäikusel väga suur roll, et tagada süsteemi kalibreeritus ning adekvaatsed katsetulemused. Samuti on süsteem tundlik kõrgsagedusliku vibratsiooni suhtes, mistõttu on oluline, et töötasapinnale ei kukuks raskeid elemente, mis võivad samuti viia süsteemi dekalibreerumiseni.

3.1.4 Vormimine

Vormimine toimub juba eelpool kirjeldatud katsestendi, rakise ning deformatsioonide mõõtmise seadmetega. Katsestend on seadistatud nii, et vormimine toimub kuni prao tekkeni ning seejärel katse seisatakse. Seejärel saab purunenud katsekeha rakisest eemaldada ning paigaldada uue. Vormimiskatse protseduur näeb välja järgmine:

- 1) Tooriku paigaldamine katserakisesse koos templi õlitamisega
- 2) Fikseerimisjõu rakendamine käsi hüdropumba abil
- 3) Vormimiskatse läbiviimine koos deformatsioonide mõõtmisega
- 4) Vormitud katsekeha rakisest eemaldamine ning uue paigaldamine

Sellisel tuleb antud samme korrata kuni kõik katsekehad on vormitud ning tulemused salvestatud. Sellega katsetuste etapp lõpeb ning järgneb andmete järeltöötlus, mida on kajastatud järgmises peatükis.



Sele 3.11. Vormitud katsekehad

3.2 Tõmbekatse

Tõmbekatse on lädi viidud materjali anisotroopia määramiseks ning peamiste materjali iseloomustavate parameetride (voolepiir, tõmbetugevus, suhteline pikenemine) määratlemiseks. Samuti saab võrrelda tõmbekatse tulemusi vormimiskatse kitsaste katsekehadega sooritatud katsetega, mis oma olemuselt on analoogsed tõmbekatsega.

3.2.1 Katseseade

Tõmbekatsed on samuti läbi viidud TTÜ mehaanika- ja metroloogia katselaboris Instron 8516 katsestendis. Selal 3.12 toodud seadme peamised parameetrid on järgmised [23]:

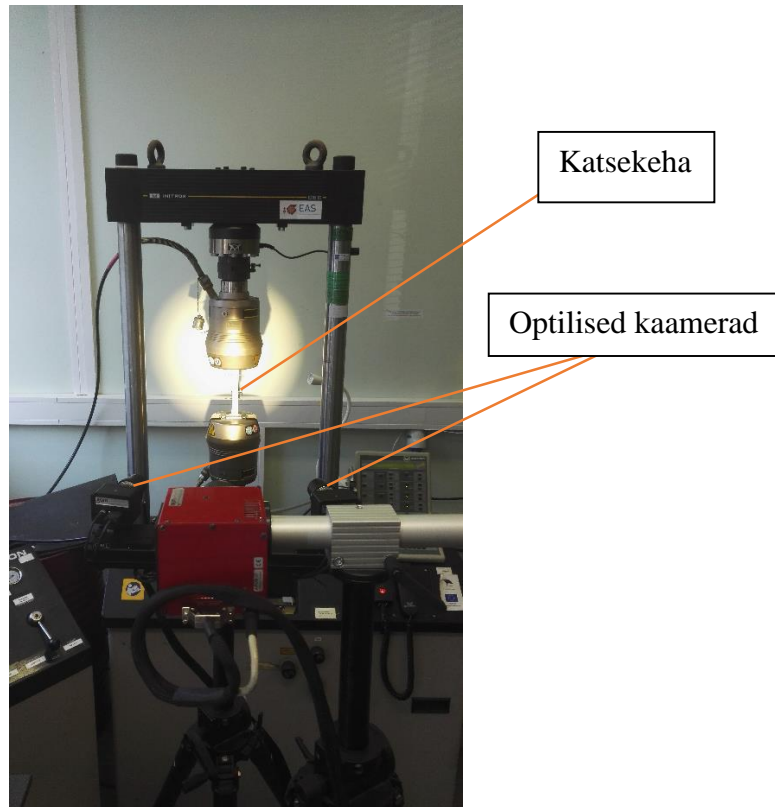
- Maksimaalne jõud: 100 kN
- Dünaamiline katsetus
- Käik: 75 mm



Sele 3.12. Instron 8516

Katsekehad on valmistatud identsest materjalist, kuid kolmes erinevas sihis valtsimissuuna suhtes (0° , 45° ja 90°). 90° katsekeha puhul on tegemist analoogse olukorra vormimiskatsele 20mm tooriku puhul, seega on huvitav neid tulemusi omavahel võrrelda ning teoreetiliselt peaksid need sarnased olema. Kolmes erinevas sihis aga on katsekehad valmistatud materjali anisotroopia määramiseks, et leida omaduste muutust olenevalt valtsimissuunast.

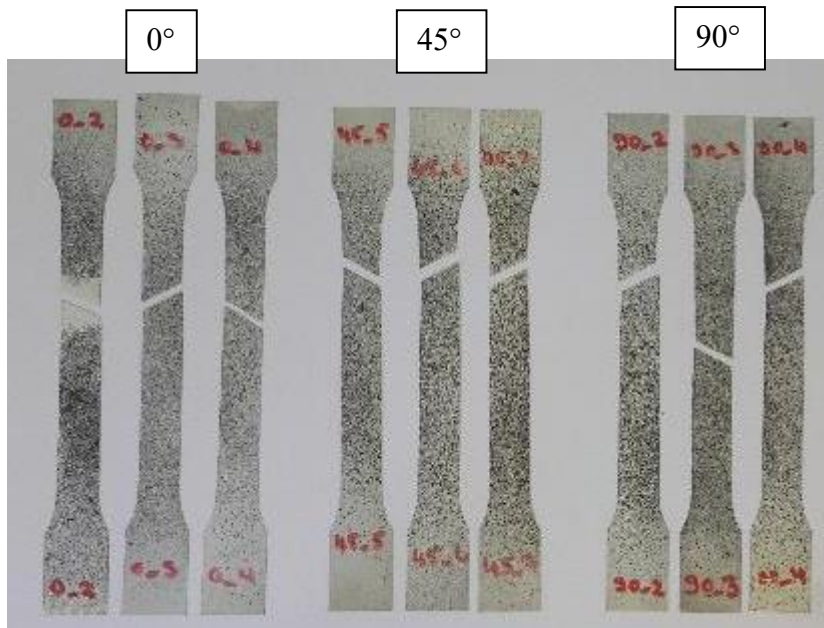
Katsekeha pikenemist mõõdetakse katsestendiga ühendatud ekstensiomeetriga. Üheks tõmbekatse eesmärgiks on aga võrrelda tõmbekatse käigus tekkivaid deformatsioone vormimiskatse 20 mm katsekeha deformatsioonidega, seetõttu on ka need toorikud kaetud stohhastilise mustriega ning katseid salvestatakse ka optiliste kaameratega (Sele 3.13).



Sele 3.13. Tõmbekatse läbiviimine

Katsed viidi läbi senimaani, kui oli saadud kolm adekvaatset katsetulemust iga erineva valtsimissuunaga tooriku kohta. Kuigi katsekehad olid valmistatud nõ. kondi kujuliselt vastavalt standardile, oli siis raske ennustada täpset purunemise asukohta, mistõttu nii mõnegi katse puhul toimus purunemine väljaspool ekstensiomeetri paigaldusala ning kaamerapilti. Selline katse jäeti kõrvale, sest polnud võimalik adekvaatseid tulemusi saada.

Selel 3.14 on toodud andmete järeltöötamiseks kasutatud katsekehad, mille puhul purunemine toimus sobivas asukohas ning oli võimalik vajalikud katseandmed registreerida.



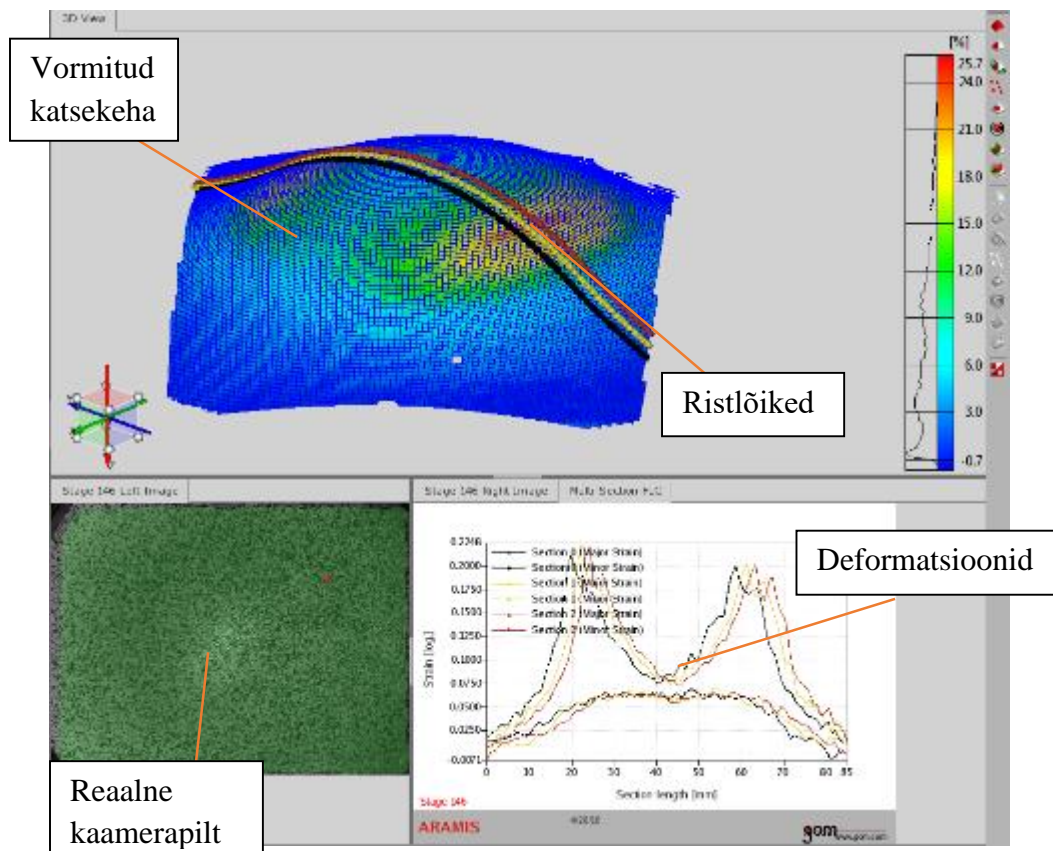
Sele 3.14. Tõmbekatse purunenud katsekehad

4 Katseandmete järeltöötlus

Antud peatükis on põhjalikumalt kirjeldatud FLC konstrueerimisega seotud etappe, mille lõpptulemuseks on korrektne materjali vormimiskõver. Järeltöötuse eelduseks on katse käigus salvestatud kaamerapildid, mille põhjal toimub deformatsioonide mõõtmine ning hilisemalt ka kogu vormimiskõvera konstrueerimine.

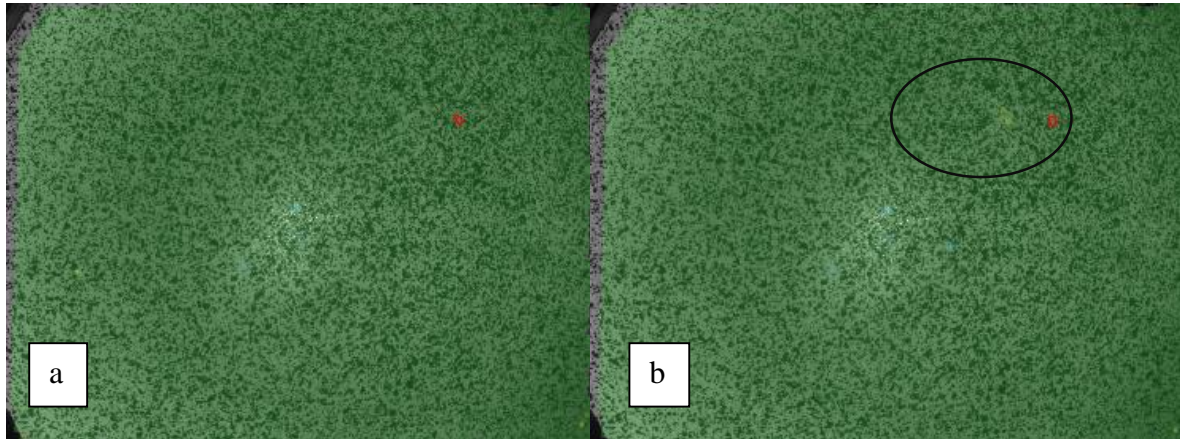
4.1 Mõõtmistulemuste arvutamine

Esmalt on vaja iga katsekehaga teostatud vormimiskatse tulemused arvutada (*compute project*), mille käigus mõõdab tarkvara salvestatud kaamerapildi pealt iga punkti deformatsioonid. Selle tulemusena saab iga kaadrit eraldi vaadelda ning visuaalselt ka deformatsioone näha (Sele 4.1).



Sele 4.1. Salvestatud katseandmed

Edasise töötuse ning vormimiskõvera konstrueerimise osas huvitab meid ainult viimane samm enne prao teket, mis kujutab maksimaalset piiri, milleni on võimalik antud materjali vormida. Seel 4.2 on toodud kaader, kus on näha nii tekkinud pragu (Sele 4.2, b) kui ka sellele eelnev etapp (Sele 4.2, a), mida üldiselt ning ka antud töös kasutatakse FLC konstrueerimiseks.



Sele 4.2. a- terve katsekeha; b- praoga katsekeha

4.2 Ristlõigete eksportimine

Vormimiskõvera koostamiseks on vajalik iga katsekeha kohta koostada ristlõiked, millele on esitatud järgmised nõudmised [12]:

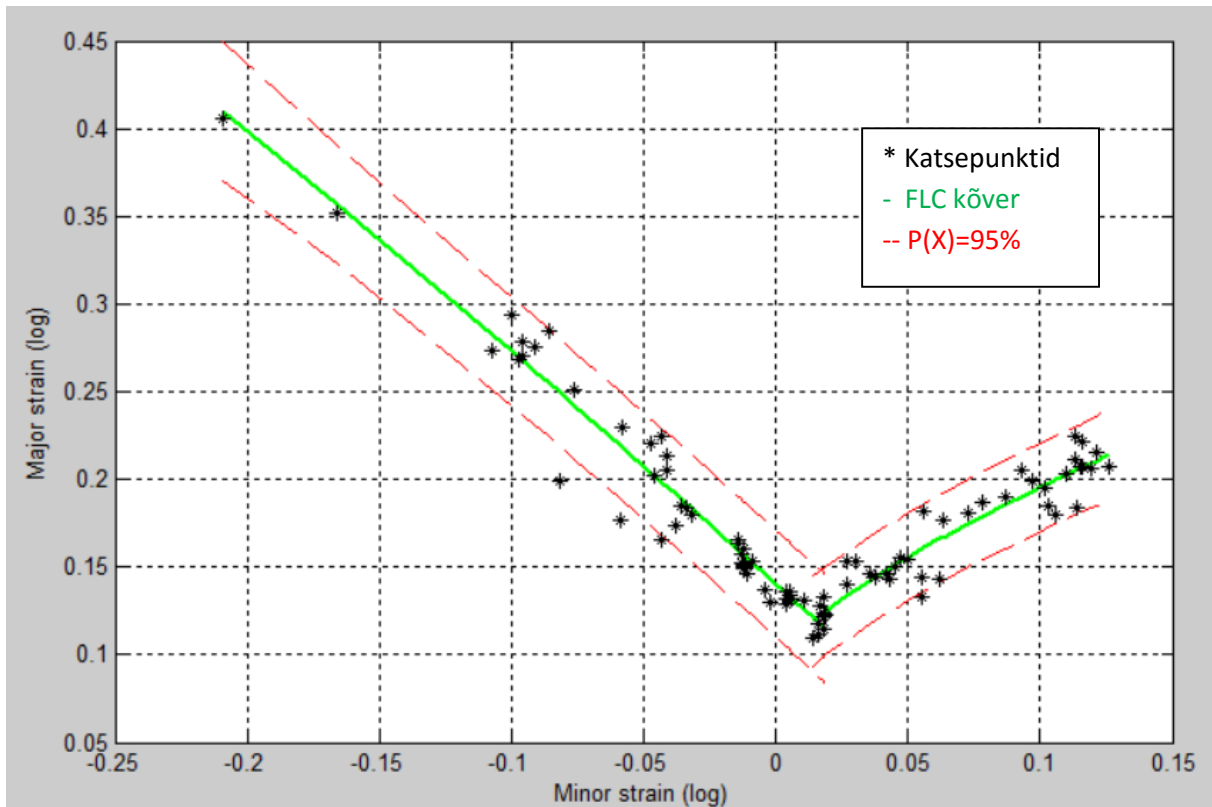
- 3-5 ristlõiget, vahekaugus 2 mm.
- Ristlõike asukoht katsekehadel, kus *minor strain* ≥ 0 : risti praoga (kõrvalekalle kuni 25° on lubatud).
- Ristlõike asukoht katsekehadel, kus *minor strain* < 0 : võimalikult paralleelne katsekeha kaela servaga (*major strain* sihis).

Ristlõigete alusel arvutab Aramis tarkvara deformatsioonide väärtused logaritmilisel skaalal valitud tasapindadel ning andmete eksportimise tulemusel on neid hiljem võimalik vormimiskõvera konstrueerimiseks kasutada. Enne eksportimist on toodud üldine deformatsioon genereeritud tasapinnal (Sele 4.1), kuid hilisemas FLC konstrueerimise faasis arvutab tarkvarapakett eraldi *Major strain* ja *Minor strain* väärtuse iga sektsiooni kohta. Antud töös on graafiku koostamiseks 81 punkti.

4.3 Vormimiskõvera konstrueerimine

Vormimiskõvera konstrueerimiseks on Aramis tarkvaras kasutusel spetsiaalne moodul „FLC Mode“, kuhu saab sisestada eelpool kirjeldatud ristlõigete failid, mille alusel arvutatakse deformatsioonide väärtuses kahes sihis iga ristlõike kohta. Olemasoleva Aramis programmi versiooniga tekkisid komplikatsioonid kõvera lähendamisel, mistõttu sai saadud deformatsioonide arväärtused sisestatud MS Excel keskkonda, kus andmed korrastati. Graafiku konstrueerimiseks sisestati andmed MATLAB keskkonda.

Lehtvormitavusdiagramm on koostatud kahes osas. Vasakpoolse osa ($\epsilon_2 < 0$) punktid on lähendatud teise astme polünoomiga ($R^2=0,953$) ning parempoolse osa ($\epsilon_2 > 0$) punktidele on lähendatud kolmanda astme polünoom ($R^2=0,892$). Samuti on graafikul (Sele 4.3) punase katkendjoonega tähistatud 95% usaldusvahemiku ülemine ja alumine piir. Nagu näha, on suurem osa katsepunkte selles piirkonnas, seega on hajuvus väike ning katseid võib lugeda hästi õnnestunuks. Graafiku konstrueerimise MATLAB kood on toodud töö lõpus Lisas 3.



Sele 4.3. Teraspleki TH550 lehtvormitavusdiagramm

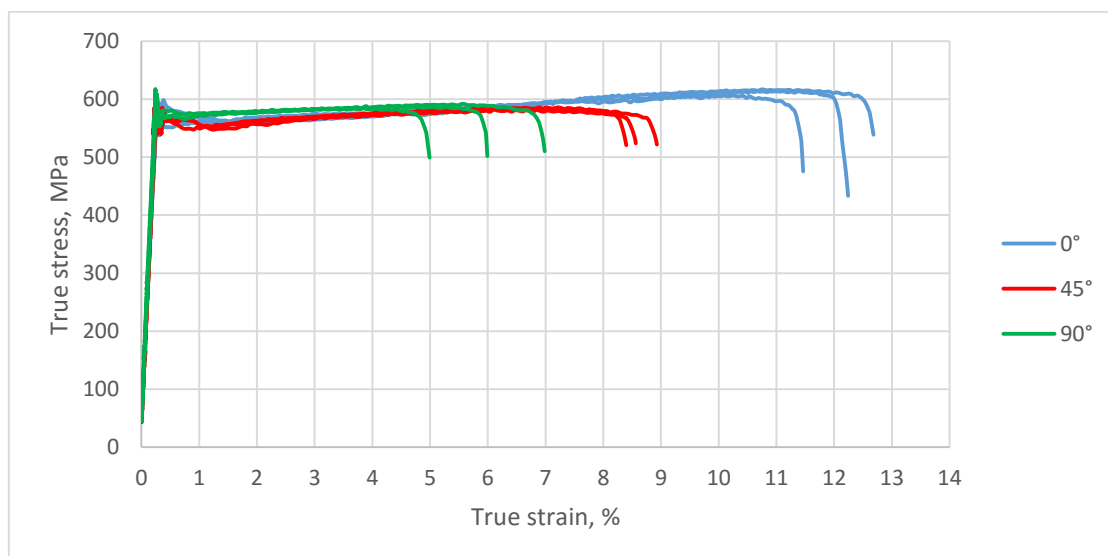
4.4 Tõmbekatse tulemused

Tõmbekatse läbiviimise üheks eesmärgiks oli peamiste materjali parameetrite määramine, mis on hilisemalt vajalikud juhendaja doktoritöös leidmaks täielikku materjalimudelit. Antud töös on välja toodud otseselt katsetusest leitavad väärtused.

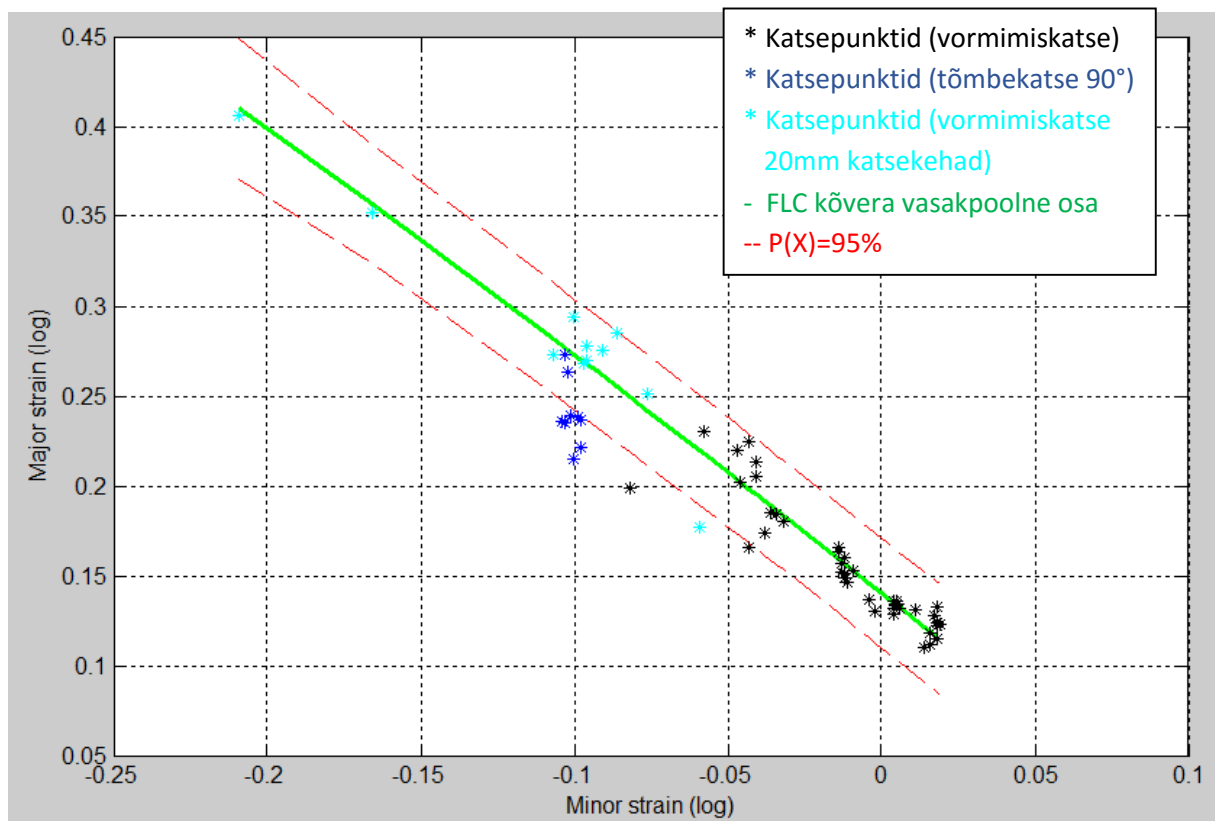
Katsekeha valtsimissuund	Tinglik voolavuspiir Rp0,2, MPa	Tõmbetugevus Rm, MPa	Katkevenivus Ag, %
0° (1)	549	554	11,9
0° (2)	561	593	13,2
0° (3)	584	583	12,6
Keskmine (0°)	564,7	576,7	12,6
45° (1)	559	552	9,1
45° (2)	568	594	8,5
45° (3)	560	578	8,7
Keskmine (45°)	562,3	574,7	8,8
90° (1)	568	569	4,8
90° (2)	577	602	7,0
90° (3)	569	566	5,9
Keskmine (90°)	571,3	579	5,9

Tabel 4.1. Tõmbekatse tulemused

Tabelist 4.1 on näha, et katseliselt vääratud voolavuspiiri ja tõmbetugevuse väärtused ühtivad tootja poolt etteantud väärtusega ($R_{p0,2} = 550 \pm 50$ MPa ja $R_m = 570$ MPa). Samuti on katkevenivuse väärtused omavahel loogilises seoses, kus enim pikenesid katsekehad, mille valtsimissuund oli paralleelne koormuse rakendamise suunaga ning vähim katsekehad, kus koormust rakendati risti materjali valtsimissuunaga.



Sele 4.4. Tõmbekatse tulemused



Sele 4.5. Katsetulemuste võrdlus

Selel 4.5 on toodud katsetulemuste võrdlus vormimiskatse 20 mm ning tõmbekatse 90° toorikute vahel. Tõmbekatsete tulemuste *Minor strain* on samas suurusjärgus enamuse vormimiskatse tulemustega, kui *Major strain* väärtused on väiksemad, mistõttu enam kui pooled tõmbekatse katsepunktid langevad väljapoole 95% usaldusvahemiku alumist piiri. Seega toimub tõmbekatse puhul tooriku purunemine varem – väiksemate deformatsioonide väärtuste juures. Katsepunktide koondumine ühte piirkonda kinnitab esimeses peatükis käsitletud teooriaosa väiteid, et FLC kõvera vasakpoolne osa kirjeldab üheteljelise tõmbe olukorda.

KOKKUVÕTE

Antud töö eesmärgiks oli määrata lehtvormitavusdiagramm TH550 terasplekile. Teema sai alguse ettevõtte Metaprint AS soovist teada saada nimetatud materjali vormimisomadusi, et seeläbi optimeerida tootmist. Käesolev töö moodustab ühe osa materjali täielikust kirjeldamisest, olles samas ka osa juhendaja Henri Lend'i doktoritööst.

Töö käigus tutvuti põhjalikult lehtvormitavusdiagrammi (FLC) teooriaga ning kõvera määramiseks vajaliku protseduuriga, mis on määratud standardis EN ISO 12004:2. Samuti kajastati erinevaid alternatiive antud meetodile, mida vähemal või rohkemal määral ka praktikas kasutatakse. Lehtvormitavusdiagramm on kasutusel töövahendina, mille abil saab hinnata vormimisoperatsioonide tulemusi ning ennetada võimalikke probleeme.

Lehtvormitavusdiagrammi koostamiseks on vaja läbi viia materjali vormimiskatsed vastavalt standardile. Katsekehade valmistamisele esitatud nõuete tõttu oli esmaseks ülesandes freesimisrakise projekteerimine ning valmistamine. Vajalik oli freesida 8 erineva geomeetriaga katsekeha. Pärast freesimist kaeti katsekehad stohhastilise mustriaga, mis võimaldab GOM Aramis tarkvaral deformatsioone mõõta. Vormimiskatse käigus deformeeriti iga katsekeha kuni purunemiseni, misjärel katse peatati.

Katsele järgnes andmete järeltöötlus, mis hõlmas purunenud katsekehale ristlõigete määramist, mis olid aluseks deformatsioonide arvutamisele. Tulemuste seisukohalt oli oluline katse samm, mis vahetult eelnes purunemisele, sest sel hetkel esinenud deformatsioonid määrasid maksimaalse piiri, milleni materjali on võimalik vormida. Katsepunktid kanti graafikule ning läbi nende lähendati kõverad, mis moodustasidki otsitud lehtvormitavusdiagrammi.

SUMMARY

The aim of this Master's thesis is to determine the Forming Limit Curve (FLC) for TH550 sheet metal. The subject was brought out by Metaprint AS in order to gain knowledge of the forming properties of the material and optimize the production process. Current thesis is part of the overall material properties and also part of Doctoral thesis of Henri Lend, supervisor of this thesis.

The theory and determination of FLC, which is described in standard EN ISO 12004:2, was studied during this project. In addition alternative methods, which are also used for determination were briefly discussed. FLC is practically used to evaluate the results of forming operations. It can also prevent possible problems in the design phase.

Forming tests have to be carried out in order to determine the complete FLC of a material. As there are also specific rules for blank preparation, milling jig was designed and manufactured. Blanks with eight different geometries are necessary for testing. After milling blanks were covered with stochastic pattern which is used to measure deformations by Aramis software. During the testing blanks were formed until fracture occurred.

Data analysis was necessary after testing. The process included section creation, which are the basis for deformation calculation. From the results side the important step is the last step before fracture as this describes the maximum limit up to where the material can be formed. Experimental data points were marked on the chart and curves were fitted along the points, which created the Forming Limit Curve.

VIIDETE LOETELU

1. ThyssenKrupp Rasselstein [WWW] <http://www.thyssenkrupp-rasselstein.com/index.php?id=45&L=1> (15.05.2016)
2. Paul S. K. (2013). Theoretical analysis of strain- and stress-based forming limit diagrams. – *Journal of Strain Analysis*, 48(3). 177-188. [Online] Academia.edu (27.03.2016)
3. Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves: ASTM E2218-15. ASTM International.
4. Metallmaterjalid. Katusekatted ja sise- ja välisseina kattematerjalid. Statsimiskõvera määramine. Osa 2: Stantsimiskõverate määramine laboris: EVS-EN ISO 12004-2:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
5. Chen, J., Zhou, X. (2005). A New Curve Fitting Method for Forming Limit Experimental Data. – *J. Mater. Sci. Technol.*, 21(4). 521-525. [Online] Journal of Materials Science & Technology (03.04.2016)
6. Panich, S., Barlat, F., Uthaisangsk, V., Suranuntchai, S., Jirathearanat, S. (2013). Experimental and theoretical formability analysis using strain and stress based forming limit diagram for advanced high strength steels. – *Materials and Design*, 51. 756-766. [Online] ScienceDirect.com (15.05.2016)
7. Hernandez, R., Llober, A., Gomez, X., Riera, M.D. FLSD as a good choice in sheet forming of AHSS. A: SIMULIA Customer Conference. „2011 SIMULIA Customer Conference“. Barcelona: Dassault Systemes, 2011, p. 238-246.
8. Valberg, H. S. Applied Metal Forming: including FEM analysis. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
9. TriboForm virtual tribology [WWW] <http://www.triboform.com/ref/volvo/> (15.05.2016)
10. Dynaform [WWW] <http://www.eta.com/inventium/dynaform> (15.05.2016)
11. Schwindt, C. D., Stout, M., Iurman, L., Signorelli, J. W. (2015). Forming Limit Curve Determination of a DP-780 Steel Sheet. – *Procedia Materials Science*, 8. 978-985. [Online] ScienceDirect (20.03.2016).
12. Metallmaterjalid. Katusekatted ja sise- ja välisseina kattematerjalid. Statsimiskõvera määramine. Osa 2: Stantsimiskõverate määramine laboris: EVS-EN ISO 12004-2:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus.

13. Aramis User Manual – Software. FLC Computation v6. Braunschweig: GOM mbH (2007)
14. Metallmaterjalid. Katusekatted ja sise- ja välisseina kattematerjalid. Statsimiskõvera määramine. Osa 1: Stantsimisdiagrammide koostamine ja kohaldamine stantsimistöökodades: EVS-EN ISO 12004-2:2008. Tallinn: Eesti Standardikeskus.
15. Mitukiewicz, G., Anantheshwara, K., Zhou, G., Mishra, R. K., Jain, M. K. (2014). A new method of determining forming limit diagram for sheet materials by gas forming. – *Journal of Materials Processing Technology*, 214. 2960-2970. [Online] ScienceDirect (10.04.2016).
16. Xiaoqiang, L., Nan, S., Guiqiang, G., Zhonggang, S. (2013). Prediction of forming limit curve (FLC) for Al-Li alloy 2198-T3 sheet using different yield functions. – *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(5). 1317-1323. [Online] ScienceDirect (02.04.2016).
17. Nurcheshmeh, M., Green, D.E. (2016) Prediction of forming limit curves for nonlinear loading paths using quadratic and non-quadratic yield criteria and variable imperfection factor. – *Materials and Design*, 91. 248-255. [Online] ScienceDirect (10.04.2016).
18. Bhargava, M., Tewari, A., Mishra, S. K. (2015). Forming limit diagram of Advanced High Strength Steels (AHSS) based on strain-path diagram. – *Materials and Design*, 85. 149-155. [Online] ScienceDirect (12.04.2016).
19. Avemax EH-610 [WWW] <http://www.milling.com.tw/product/99> (17.04.2016)
20. Instron 8802 [WWW] <http://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/dynamic-and-fatigue-systems/servo-hydraulic-fatigue/8802---8803-floor-model> (24.04.2016)
21. Aramis User Manual – Software. ARAMIS c6.1 and higher. Braunschweig: GOM mbH (2007)
22. Aramis User Information – Hardware. ARAMIS 1.3 M, ARAMIS 2M, ARAMIS 4M, ARAMIS HS. Braunschweig: GOM mbH (2007)
23. TTÜ mehaanika ja metroloogia katselaboratoorium [WWW] <http://www.ttu.ee/mehaanikateaduskond/mehaanika-ja-metroloogia-katselaboratoorium/labor-2/seadmed-3/> (15.05.2016)

LISAD

Lisa 1

AMF HOLEX. Horizontal toggle clamp



Version: Captive contact screws.
 37 6610/6620/6630/6640 – ■ More compact design due to new handle.
 ■ Ergonomic 2-component handle, very comfortable to use due to increased handle size.
 37 6610–6625 – With horizontal base for fixing to base plates etc.
 37 6630 – With vertical base for fixing to ribs and for welded structures.
 37 6640 – With angled base for side attachment.
Application: For quick clamping and releasing of parts in series production or for installation as part of special clamping jigs. Suitable for clamping during drilling, reaming, grinding, bending, welding, fitting etc.



For plain workpieces:
 Contact screw with rubber cap (standard version) with low overall height.

For two-point clamping:
 Cross arm with 2 contact screws No. 37 6970.

For non-flat workpieces:
 Contact screw with swivel joint available on request.



- 1 Clamping arm with captive screw.
- 2 Long holding arm guide.



- 1 Oil-resistant, ergonomic 2-component handle.
- 2 Hardened contact screw, adjustable vertically and horizontally. Clamping point and clamping force can be adjusted to the workpiece.
- 3 Oil-proof rubber cap protects delicate workpiece surfaces.
- 4 All parts galvanized.
- 5 Stainless bearing pins in hardened steel bushes for sizes 2 to 5.
- 6 Toggle action. Clamping force to 5500 N (size 5) with low input force.

Type		0	1	2	3	4	5
37 6610	AMF Horizontal toggle clamp with horizontal base	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
37 6620	AMF Horizontal toggle clamp with horizontal base stainless	XXX	XXX	XXX	XXX	—	—
37 6625	HOLEX Horizontal toggle clamp with horizontal base	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	—
Hole spacing e x f (37 6610, 37 6620)	mm	13,6 x 16	13,7 x 19,7	26 x 24,5	25,7 x 25	41 x 36	41,5 x 41,5
Hole spacing e x f (37 6625)	mm	13,6 x 16	13,5 x 19	26 x 28,5	26 x 31,6	41,2 x 43	—
Hole Ø d (37 6610, 37 6620)	mm	4,6	5,2	5,6	6,5	8,5	8,5
Hole Ø d (37 6625)	mm	4,3	4,3	5,5	6,6	8,8	—
Clamping height H (37 6610, 37 6620)	mm	14,5	19	24	32	45	46
Clamping height H (37 6625)	mm	8	18	24	33	45	—
Clamping force P1 (37 6610, 37 6620)	N	250	800	1000	1800	2000	3000
Clamping force P1 (37 6625)	N	230	460	1200	1650	2500	—
Clamping force P2 (37 6610, 37 6620)	N	400	1100	1200	2500	3000	5000
Clamping force P2 (37 6625)	N	380	650	1450	2350	3500	—
Overall height (37 6610, 37 6620)	mm	33	30	45	48,5	75	73
Overall height (37 6625)	mm	17	38	54	68,5	90	—
Overall length (37 6610, 37 6620)	mm	79	120	162	206	287	321
Overall length (37 6625)	mm	77	105	163	190	273	—
Contact screw (37 6610, 37 6620)	mm	M4 x 25	M5 x 30	M6 x 35	M8 x 45	M8 x 65	M8 x 65
Contact screw (37 6625)	mm	M4 x 20	M5 x 30	M6 x 40	M8 x 50	M10 x 90	—

Type		0	1	2	3	4
37 6630	AMF Horizontal toggle clamp with vertical base	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX
Hole spacing e	mm	13,5	14	26	25,7	41
Hole Ø d	mm	4,6	5,2	5,6	6,5	8,5
Clamping height H	mm	20	25,5	32	40	54
Clamping force P1	N	250	800	1000	1800	2000
Clamping force P2	N	400	1100	1200	2500	3000
Overall height	mm	33	43	61	65	97
Overall length	mm	79	119	164	206	287
Contact screw	mm	M4 x 25	M5 x 30	M6 x 35	M8 x 45	M8 x 65

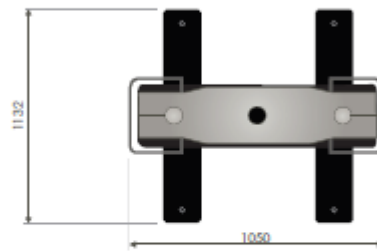
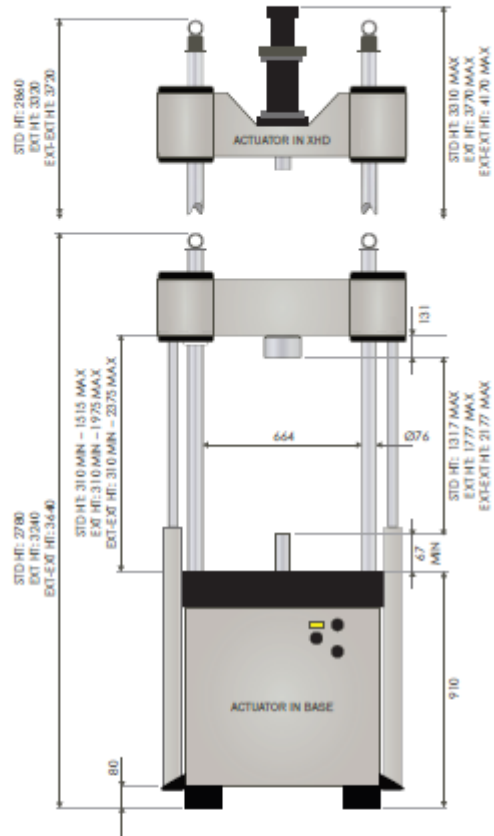
Type		2	3	4
37 6640	AMF Horizontal toggle clamp with angled base	XXX	XXX	XXX
Hole spacing e x f	mm	20 x 25,5	24 x 29	32 x 32
Hole Ø d	mm	5,6	6,8	8,5
Clamping height H	mm	48	40	60
Clamping force P1	N	1000	1800	2000
Clamping force P2	N	1200	2500	3000
Overall height	mm	94	86	133
Overall length	mm	162	206	282
Contact screw	mm	M6 x 35	M8 x 45	M8 x 65



Lisa 2

Specifications

		Standard Height Frame	Extra Height Frame	Extra-Extra Height Frame
Daylight Opening (Maximum Between Load Cell and Actuator at Mid-stroke, with Largest Capacity Actuator)	mm	1240	1700	2100
	in	48.8	66.9	82.7
Dynamic Load Capacity	kN	Up to 250		
	kip	Up to 58		
Actuator Stroke (Total)	mm	150		
	in	5.9		
Configuration		Twin-Column High-Stiffness Load Frame with Actuator in Lower Table or Upper Crosshead		
Lift and Locks		Hydraulically-Powered Lifts and Locks		
Load Cell		Patented, Dynacell™ Fatigue-Rated Load Cell with Capacity to Suit Actuator		
Load Weighing Accuracy		±0.5% of Indicated Load or ±0.005% of Load Cell Capacity (1-100), Whichever is Greater		
Manifold Options		Single Valve, Dual Valve, or High-Flow Manifold		
Servo-Valve Options	l/min	5, 10, 20, 40, 85 or 230		
	GPM	1, 2.5, 5, 10, 18.5 or 60		
Hydraulic Pressure Supply (Required)	bar	207		
	psi	3000		
Electrical Supply		Single-Phase Mains 90-132 or 180-264 V 45/65 Hz with Power Consumption 800 VA Max		
Operating Environment		+10 to +38 °C (+50 to +100 °F) with 10 to 90% Humidity Non-Condensing		
Frame Stiffness	kN/mm	585		
Maximum Frame Weight (Dependent on Final Configuration)	kg	1330		
	lb	2828		
Mechanical Interfaces				
Load Cell		M48 x 2 Right Hand Female Central Thread		
Actuator		M48 x 2 Right Hand Female Central Thread		
Table and Crosshead		4 x M10 Holes on a 280 mm x 90 mm for Accessory Mounting		



Intron® 8802 Dimensions (All Dimensions are in mm)

Accessories

Catalog Number	Description
2742-501	±250 kN Fatigue-Rated Hydraulic Wedge Grips
8000-092	M48 to M48 Attachment Kit
2750-118	Fracture Mechanics Grips for 25 mm Wide Compact Tension Specimen
2501-132	Adapters Kit for 2750-118 Clevis Grips
2750-120	Fracture Mechanics Grips for 50 mm Wide Compact Tension Specimen
2810-200	250 kN Fatigue-Rated 3-Point Bend Fixture
2810-201	4-Point Conversion Kit for 2810-200
2840-118	150 mm (6 in) Diameter Compression Platens

Note: Dimensions and specifications relate to a 250 kN system with a 175 mm (±2.95 in) stroke actuator. Smaller capacity actuators may change certain specifications. Check with your local Intron office for further information.

1) US Patent Number 6508132

www.intron.com



Worldwide Headquarters
825 University Ave, Norwood, MA 02062-2843, USA
Tel: +1 800 564 8378 or +1 781 575 5000

European Headquarters
Coronation Road, High Wycombe, Bucks HP12 3SY, UK
Tel: +44 1494 464646

Intron Industrial Products
900 Liberty Street, Grove City, PA 16127, USA
Tel: +1 724 458 9610

Intron is a registered trademark of Illinois Tool Works Inc. (ITW). Other names, logos, icons and marks identifying Intron products and services referenced herein are trademarks of ITW and may not be used without the prior written permission of ITW. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. Copyright © 2012 Illinois Tool Works Inc. All rights reserved. All of the specifications shown in this document are subject to change without notice.

WB12592

Lisa 3

```
% Katseandmed
% FLC vasakpoolne osa
xx=[-0.097 -0.096 -0.209 -0.1 -0.059 -0.091 -0.091 -0.076 -0.107
yy=[0.268 0.27 0.406 0.294 0.177 0.275 0.275 0.251 0.273

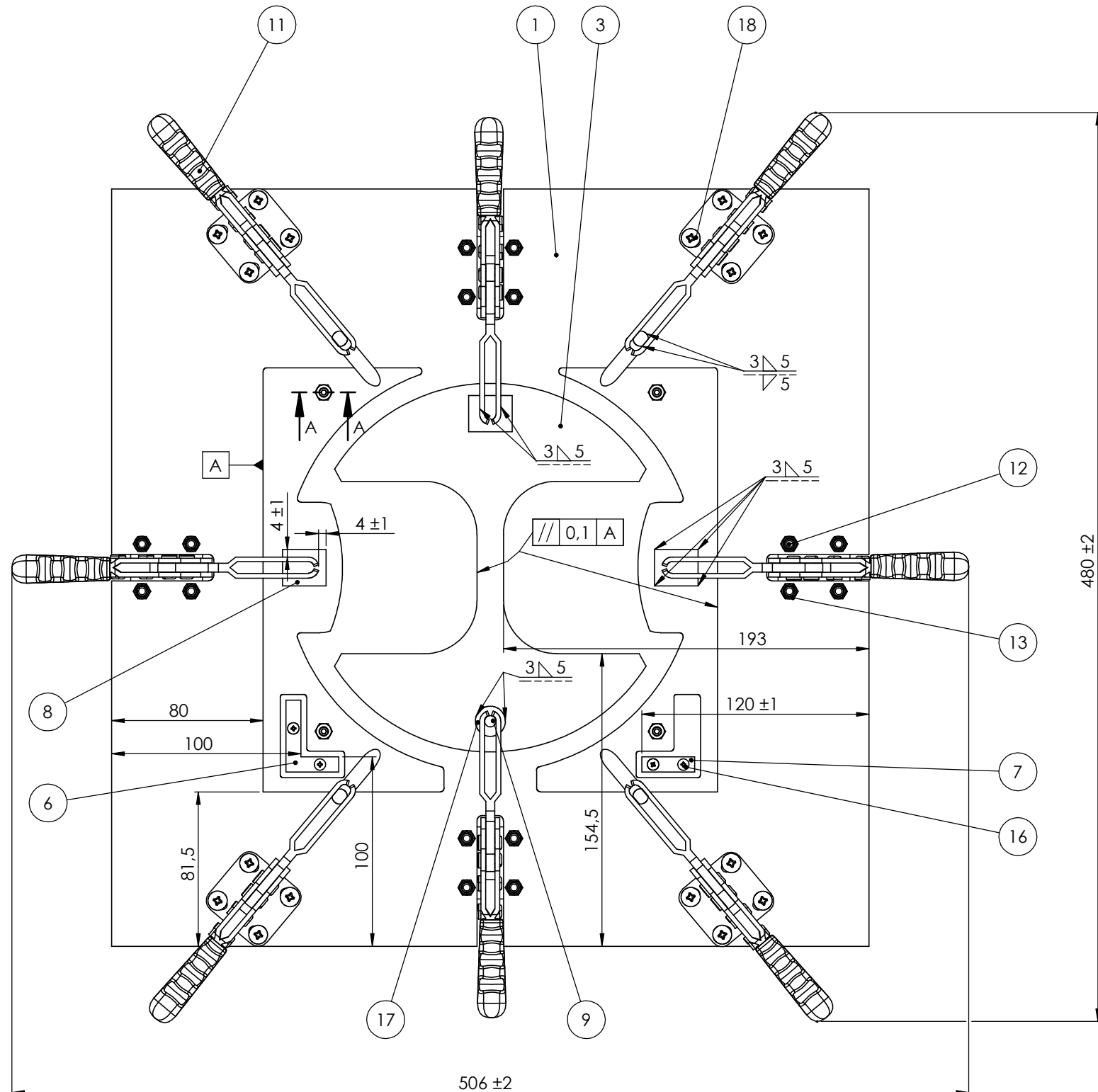
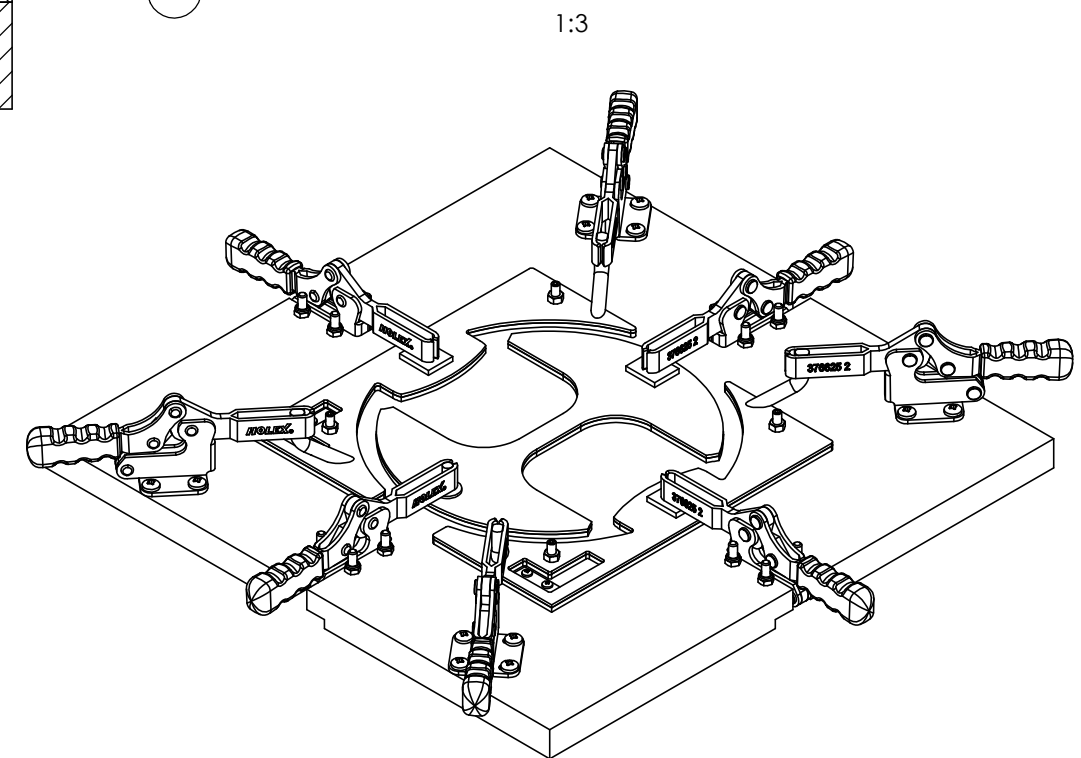
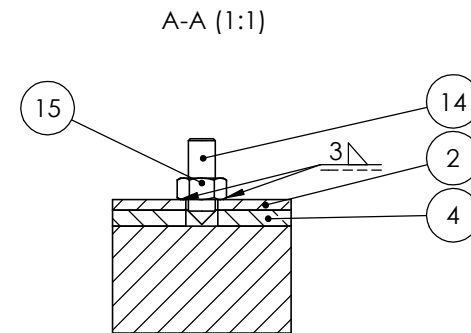
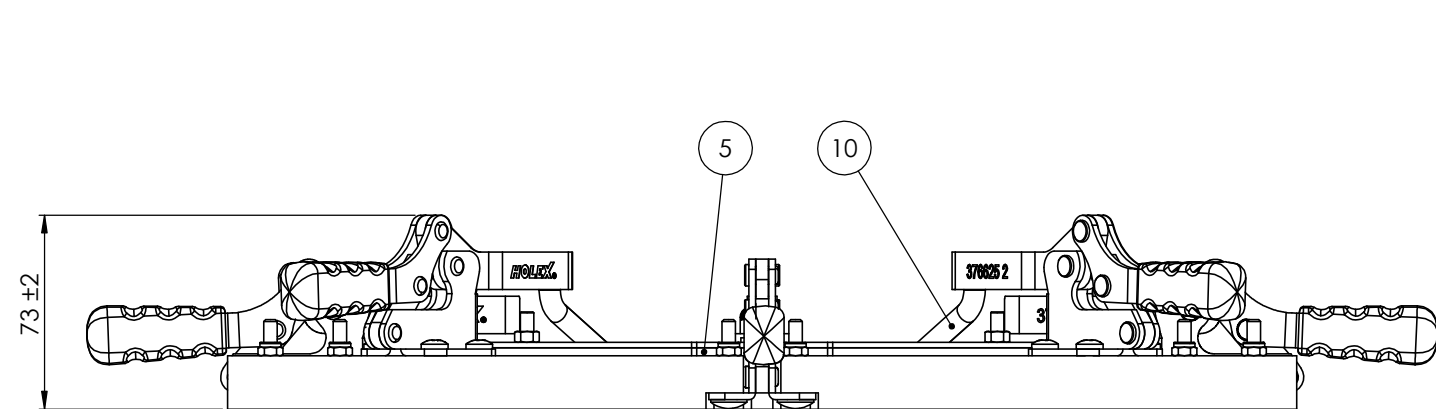
% FLC parempoolne osa
xx1=[0.016 0.016 0.014 0.018 0.017 0.018 0.018 0.018 0.019
yy1=[0.112 0.118 0.11 0.133 0.128 0.124 0.115 0.122 0.123

% Katseandmete sorteerimine
[x,ind]=sort(xx);
y=yy(ind);

[x1,ind1]=sort(xx1);
y1=yy1(ind1);
% Kõvera lähendamine
% Vasakpoolne osa
[c,s]=polyfit(x,y,2); % structure s contains fields R,df, normr...
[Y,delta]=polyconf(c,x,s,0.05);

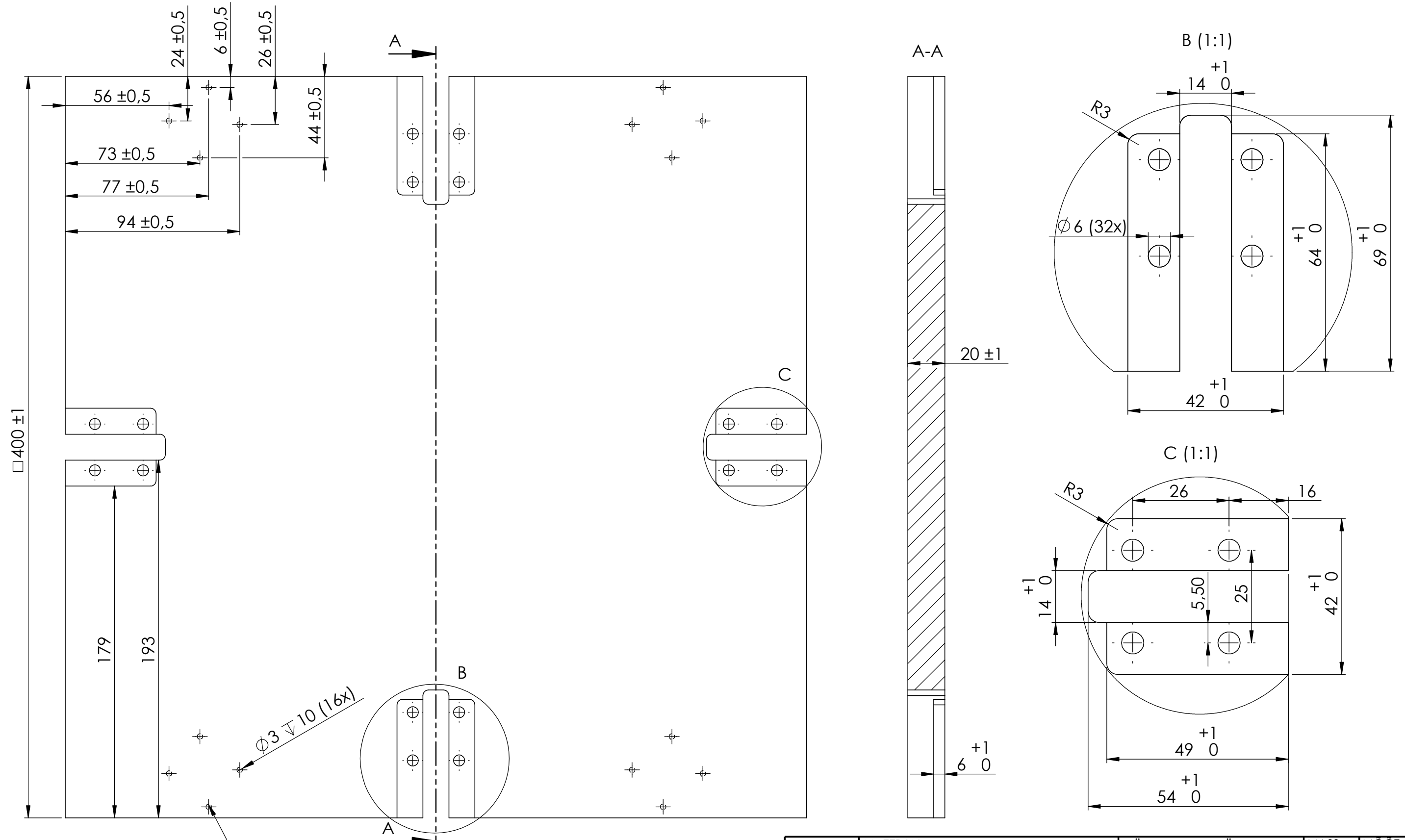
% Parempoolne osa
[c1,s1]=polyfit(x1,y1,3); % structure s contains fields R,df, normr...
[Z,delta1]=polyconf(c1,x1,s1,0.05);

% Graafiku konstrueerimine
plot(x,Y,'g-',x,Y-delta,'r--',x,Y+delta,'r--',x,y,'k*'); hold on;
xlabel('Minor strain (log)');
ylabel('Major strain (log)');
plot(x1,Z,'g-',x1,Z-delta1,'r--',x1,Z+delta1,'r--',x1,y1,'k*')
grid on
```

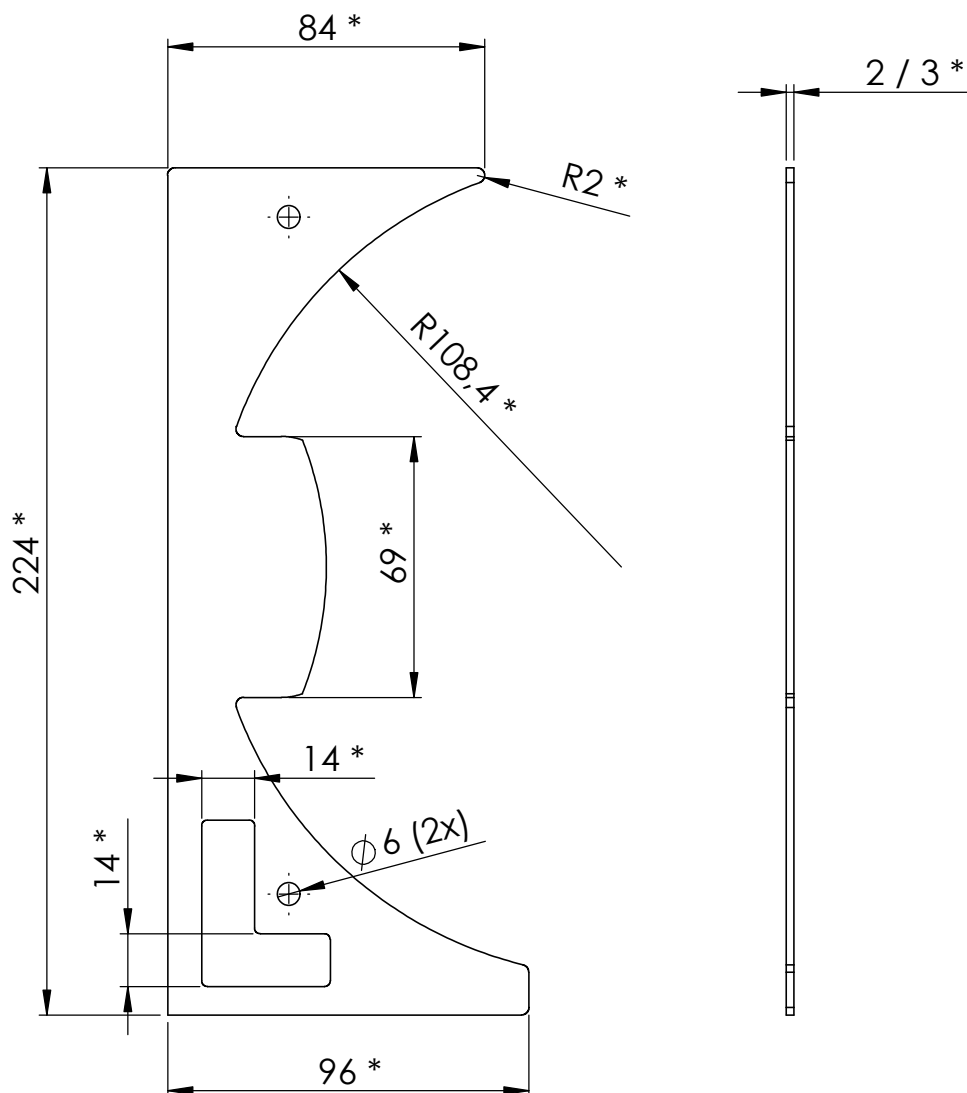


18	Kruvi DIN 7996 M5x20		16
17	Seib DIN 9021 M5		1
16	Kruvi DIN 7996 M3x16		4
15	Mutter DIN 934-8 M5		4
14	Seadekruvi DIN 914 45H M5x16		4
13	Mutter DIN 985-8 M5		16
12	Polt DIN 603 M5x30		16
11	Sulgur Horex 376625_2		8
10	Fikseerimistraat	FLC.01.00.08	4
9	Tsentreerimisvarras	FLC.01.00.07	1
8	Distsantsplaat	FLC.01.00.06	3
7	Piiraja	FLC.01.00.05	1
6	Nurgapiiraja	FLC.01.00.04	1
5	Tugiplate keskmine	FLC.01.00.03	1 PE300
4	Tugiplate külgmine	FLC.01.00.02	2 PE300
3	Tugiplate keskmine	FLC.01.00.03	1 DX53D+ AS120
2	Tugiplate külgmine	FLC.01.00.02	2 DX53D+ AS120
1	Alusplaat	FLC.01.00.01	1
Osa	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk Märkus

	MATERJAL:	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED: ISO 2768-mK	MASS:	MOOT: 1:2
TEOSTAS	Mart Suurkivi	NIMETUS: Freesimisrakis		
KONTROLLIS				
KINNITAS				
	TTÜ MEHAANIKATEADUSKOND Mehaanika ja tööstustehnika instituut	LEHT: 1/1	TÄHIS: FLC.01.00.00	



	MATERJAL:	Vineer	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED:	ISO 2768-mK	MASS:	1 kg	MOOT:	1:2
	TEOSTAS	Mart Suurkivi	NIMETUS:					
KONTROLLIS			<h2>Alusplaat</h2>					
KINNITAS								
	TTÜ MEHAANIKATEADUSKOND	LEHT:	1/1	TÄHIS:	FLC.01.00.01			
	Mehaanika ja tööstustehnika instituut							

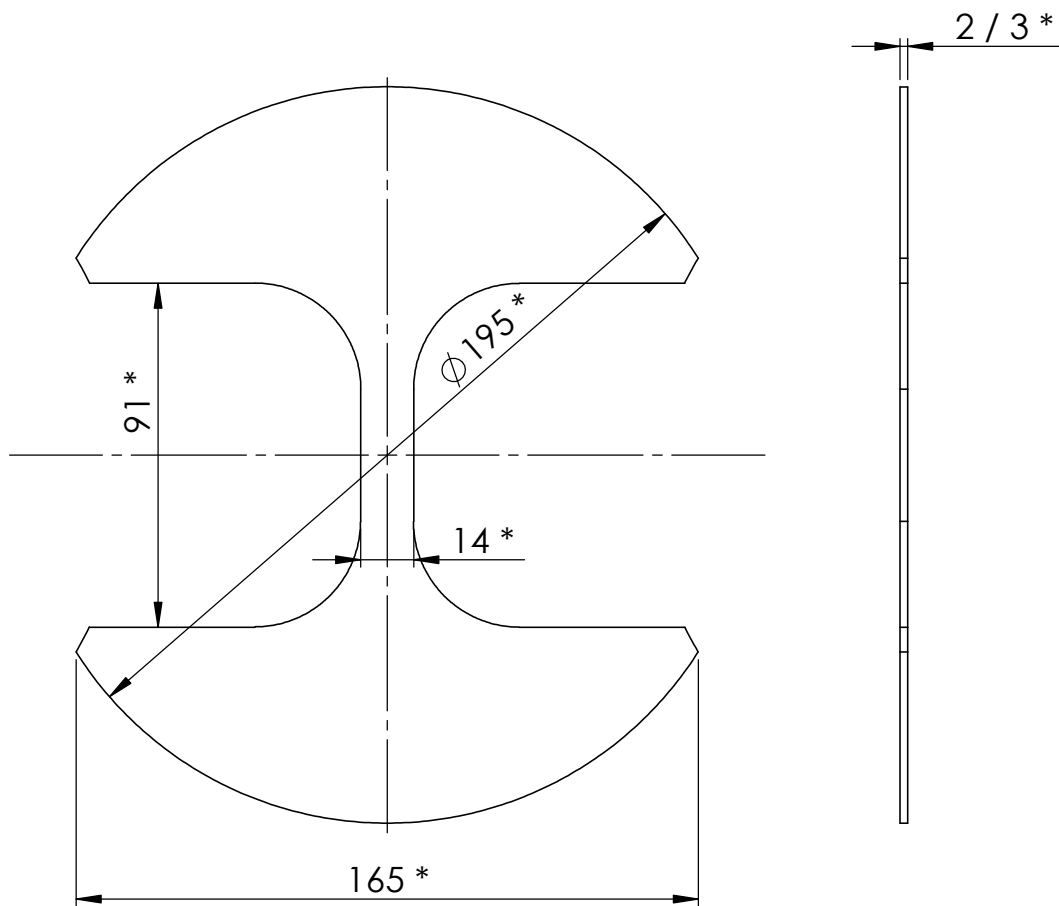


* Märkused:

1) Mõõtmed vastavalt CAD mudelile

2) Valmistada 2 tk materjalist DX53D+AS120 (2 mm) ja 2 tk materjalist PE300 (3 mm).

	MATERJAL: DX53D+AS120 / PE300 *	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED: ISO 2768-mK	MASS:	MOOT: 1:2
TEOSTAS	Mart Suurkivi	NIMETUS: Tugiplaad külgmine		
KONTROLLIS				
KINNITAS				
	TTÜ MEHAANIKATEADUSKOND Mehaanika ja tööstustehnika instituut	LEHT: 1/1	TÄHIS: FLC.01.00.02	

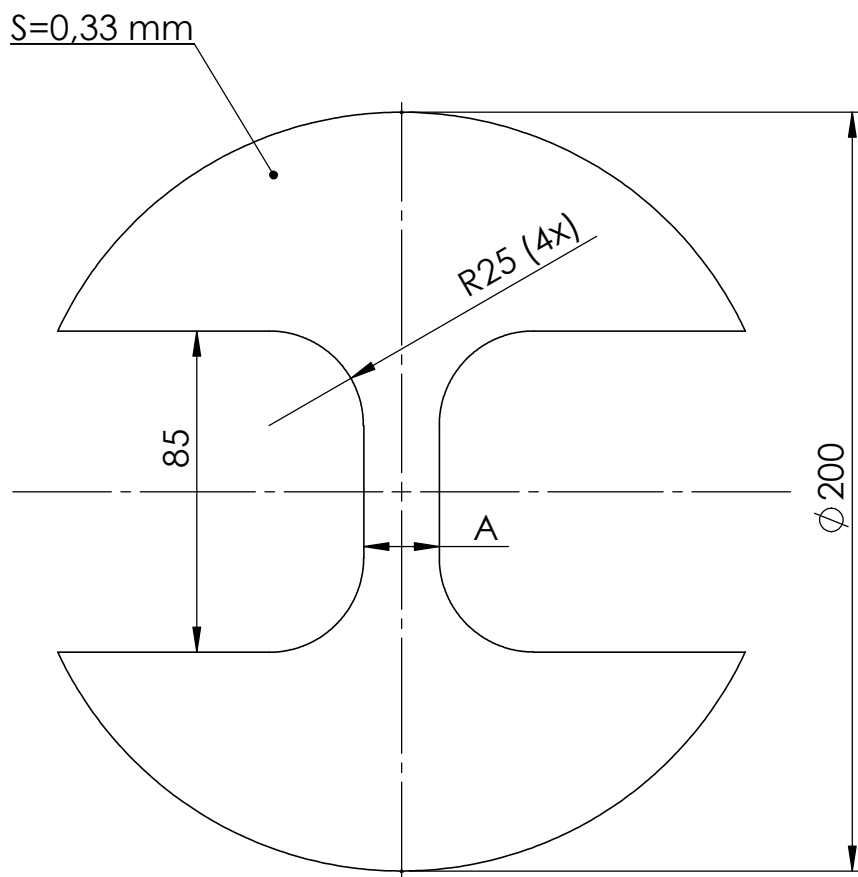


* Märkused:

1) Mõõtmed vastavalt CAD mudelile

2) Valmistada 2 tk materjalist DX53D+AS120 (2 mm) ja 2 tk materjalist PE300 (3 mm).

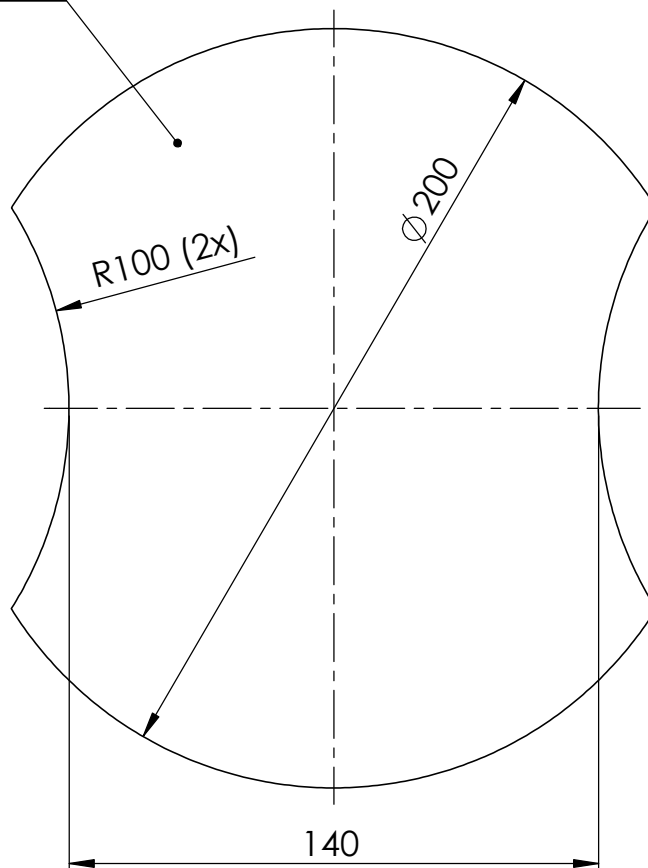
	MATERJAL: DX53D+AS120 / PE300 *	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED: ISO 2768-mK	MASS:	MOOT: 1:2
TEOSTAS	Mart Suurkivi	NIMETUS: Tugiplaad keskmine		
KONTROLLIS				
KINNITAS				
	TTÜ MEHAANIKATEADUSKOND Mehaanika ja tööstustehnika instituut	LEHT: 1/1	TÄHIS: FLC.01.00.03	

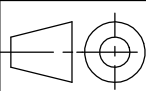



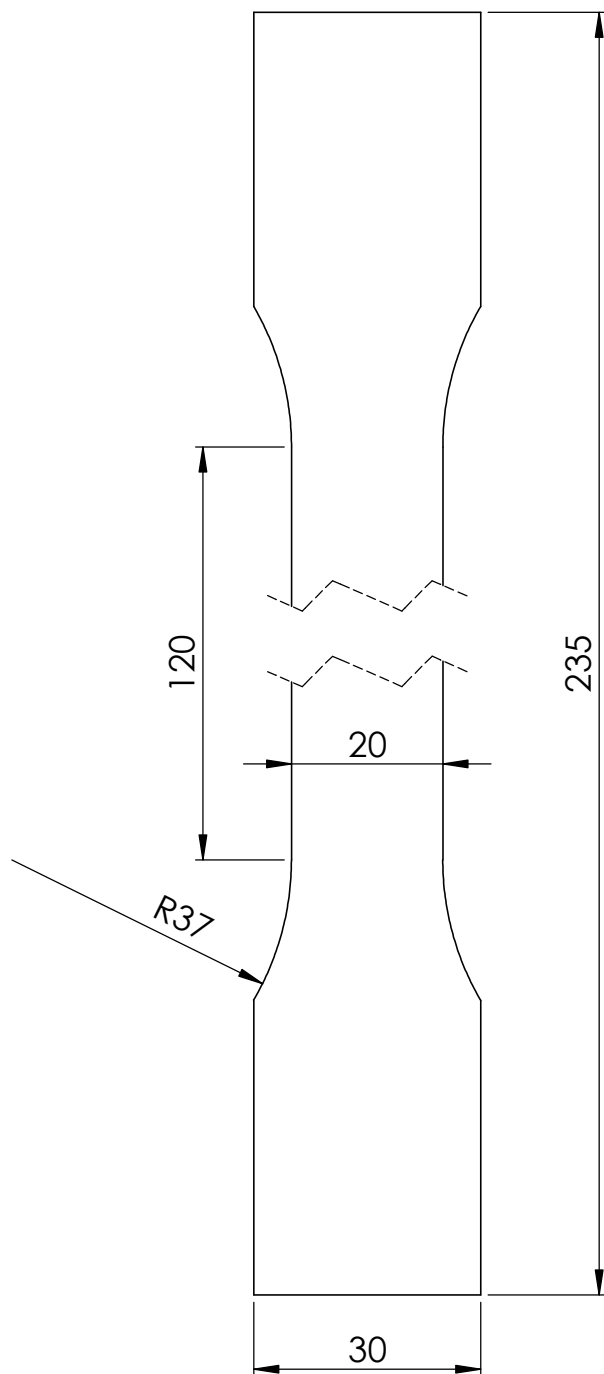
Katsekeha	Mõõt A, mm
20	20
40	40
60	60
80	80
100	100
120	120
130	130

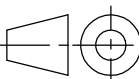

	MATERJAL:	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED:	MASS:	MOOT:
	Teras TH550	ISO 2768-mK		1:2
TEOSTAS	Mart Suurkivi	NIMETUS: Katsekeha (vormimiskatse)		
KONTROLLIS				
KINNITAS				
	TTÜ MEHAANIKATEADUSKOND Mehaanika ja tööstustehnika instituut	LEHT:	TÄHIS:	
		1/1	FLC.01.00.09	

S=0,33 mm



	MATERJAL: Teras TH550	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED: ISO 2768-mK	MASS: 72 g	MOOT: 1:2
TEOSTAS	Mart Suurkivi	NIMETUS: Katsekeha 140 mm		
KONTROLLIS				
KINNITAS				
	TTÜ MEHAANIKATEADUSKOND Mehaanika ja tööstustehnika instituut	LEHT: 1/1	TÄHIS: FLC.01.00.10	



	MATERJAL: Teras TH550	MÄRKIMATA PIIRHÄLBED: ISO 2768-mK	MASS:	MOOT: 1:1
TEOSTAS	Mart Suurkivi	NIMETUS: Katsekeha (tõmbekatse)		
KONTROLLIS				
KINNITAS				
	TTÜ MEHAANIKATEADUSKOND Mehaanika ja tööstustehnika instituut	LEHT: 1/1	TÄHIS: FLC.01.00.11	