



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsanduse ja inseneeria instituut

Rasmus Laul

**PNEUMOBILE TECHNICS 5 KÄIGUKASTI
OPTIMEERIMINE**

PNEUMOBILE TECHNICS 5 GEARBOX OPTIMISATION

Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö
Tehnotroonika õppekava

Juhendaja: lektor Aare Aan, *PhD*

Tartu 2022

LÜHIKOKKUVÕTE

Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Rakenduskõrgharidusõppe lõputöö lühikokkuvõte	
Autor: Rasmus Laul		Õppekava: Tehnotroonika	
Pealkiri: Pneumobile Technics 5 käigukasti optimeerimine			
Lehekülgi: 72	Jooniseid: 24	Tabeleid: 0	Lisasisid: 1
Õppetool: Biomajandustehnoloogiate õppetool ETIS-e teadusvaldkond: 4. Loodusteadused ja tehnika CERC S-i kood: T455 Juhendaja(d): Aare Aan Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2022			
<p>Pneumobile Technics 5 on suruõhusõiduk, mis on ehitatud Emersoni poolt korraldatud „International Aventics Pneumobile Competition“ jaoks.</p> <p>Rakenduskõrgharidus lõputöö eesmärgiks on optimeerida pneumobile Technics 5 käigukasti. Käesoleva töö käigus vähendati käigukasti massi ja tõsteti üldist kasutegurit. Eesmärgi saavutamiseks otsiti vähendatud laiusega hammasratastele sobiv materjal. Sammuti muudeti käikude arvu ja ülekandesuhteid. Kasuteguri suurendamiseks vahetati liugelaagrid kuullaagrite vastu. Arvutuste põhjal projekteeriti optimeeritud käigukast. Optimeerimise tulemusena saavutati 10% massi vähenemine ja 5% kasuteguri suurenemine.</p>			
Märksõnad: hammasratas, kasutegur, ülekanne, mass			

ABSTRACT

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Professional Higher Education Thesis	
Author: Rasmus Laul		Curriculum: Technotronics	
Title: Pneumobile Technics 5 gearbox optimisation			
Pages: 72	Figures: 24	Tables: 0	Appendixes: 1
Chair: Chair of Biosystems Engineering Field of research: 4. Natural Sciences and Engineering CERC S code: T455 Supervisors: Aare Aan Place and date: Tartu, 2022			
<p>Pneumobile Technics 5 is a compressed aircraft built for the International Aventics Pneumobile Competition organized by Emerson.</p> <p>The aim of the professional higher education thesis is to optimize the pneumobile Technics 5 gearbox. In the course of this work, the weight of the gearbox was reduced and the overall efficiency was increased. To achieve this goal, a suitable material for reduced-width gears was sought. The number of gears and gear ratios were also changed. To increase efficiency, plain bearings were replaced with ball bearings. Based on the calculations, an optimized gearbox was designed. The optimization resulted in a 10% weight reduction and a 5% increase in efficiency.</p>			
Keywords: gear, efficiency, transmission, weight			

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE	2
ABSTRACT	3
1. PNEUMOBILE TECHNICS 5	9
2. TÖÖ EESMÄRK, PIIRANGUD JA NÕUDED	10
2.1. Töö eesmärk	10
2.2. Piirangud	10
2.3. Nõuded	12
2.4. Plaanitavad muudatused	12
3. PNEUMOBILE TECHNICS 5 2021. AASTAL	13
3.1. Mootor	13
3.2. Kasutuses olev käigukast	13
3.3. Käigukasti arvutus	17
4. OPTIMEERITUD KÄIGUKASTI ARVUTUSED JA MATERJALIVALIK	19
4.1. Arvutused	19
4.1.1. Esimene käik	19
4.1.2. Teine käik	22
4.1.3. Võllide väändepinged	25
4.1.4. Käigukasti kasutegur	26
4.2. Materjali valik	29
5. KÄIGUKASTI PROJEKTEERIMINE	31
5.1. Skeem	31
5.2. Korpus	31
5.3. Esimene võll	33
5.4. Teine võll	34
5.5. Väljundvõll	35
5.6. Lisa tugilaager	37
5.7. Ülekande osade kaitsmine	39
6. KÄIGUKASTI OPTIMEERIMISE TULEMUSED	40
6.1. Mass	40
6.2. Kasutegur	41
KOKKUVÕTE	43
KASUTATUD ALLIKAD	44

LISAD	45
Lisa A. Tehnilised joonised	46

TÄHISED

σ_{F1}	-	esimese käigu hammasratta paindestress, N/mm ²
σ_{F2}	-	teise käigu hammasrataste hamba paindestress, N/mm ²
η_u	-	optimeeritud käigukasti summaarne kasutegur
η_v	-	olemasoleva käigukasti summaarne kasutegur
η_1	-	esimese võlli kuullaagrite paari kasutegur
η_2	-	teise võlli kuullaagrite paari kasutegur
η_3	-	väljundvõlli kuullaagrite paari kasutegur
η_4	-	esimese võlli mitte veetava hammasratta kuullaagrite paari kasutegur
η_5	-	kolmanda käigulülituskahvli kasutegur
η_6	-	teisel võllil vastupidi liikuva hammasratta liugelaagri kasutegur
η_7	-	teise võlli mitte veetava hammasratta kuullaagrite paari kasutegur
η_8	-	väljundvõlli mitte veetava hammasratta kuullaagrite paari kasutegur
η_9	-	teise käigulülituskahvli kasutegur
η_{10}	-	hammaslati ülekanne hammasrattale kasutegur
η_{11}	-	hammasrattalt hammasrattale kasutegur
η_{12}	-	hammasrattalt hammasrattale kasutegur
τ_{t1}	-	esimeses ja teises võllis tekkiv väändepinge, N/mm ²
τ_{t2}	-	väljundvõllis tekkiv väändepinge, N/mm ²
b_1	-	uue ülekande hammasratta laius, mm
d	-	on võlli läbimõõt, mm
d_p	-	käigukasti sisend hammasratta jaotuslääbimõõt, m
d_s	-	silindri läbimõõt, m
d_{1-1}	-	esimese käigu hammasratta jaotuslääbimõõt mm
d_{1-2}	-	esimese käigu hammasrattaga hambumises oleva hammasratta jaotuslääbimõõt, mm
d_{2-1}	-	teise käigu hammasratta paari esimese hammasratta jaotuslääbimõõt, mm
d_{2-2}	-	teise käigu hammasratta paari teise hammasratta jaotuslääbimõõt, mm
F_{t1}	-	esimese käigu hammasrataste hammastele mõjuv ringkoormus, N
F_{t2}	-	teise käigu hammasrataste hammastele mõjuv ringkoormus, N
F_v	-	mootori maksimaalne väljund jõud, N

i_{u1}	-	uus esimese käigu ülekandesuhe
i_{u2}	-	uus teise käigu ülekandesuhe
i_1	-	esimese käigu ülekandesuhe
i_2	-	teise käigu ülekandesuhe
i_3	-	kolmanda käigu ülekandesuhe
K_{FX}	-	hambajuure stressi tegur
K_L	-	eluea tegur
K_O	-	koormustegur
K_V	-	dünaamilise koormuse tegur
l_{2-3}	-	teise ja kolmanda võlli vahemaa, mm
l_{2-3}	-	teise ja kolmanda võlli vahekaugus üksteisest, mm
m_n	-	hammasratta moodul, mm
M_{t1}	-	võllile mõjuv väändemoment, N·mm
M_{t2}	-	võllile mõjuv väändemoment, N·mm
p	-	rõhk, bar
S_F	-	varutegur
T_s	-	käigukasti sisend pöördemoment, Nm
t_s	-	esimese käigu hammasrattaga hambumises oleva hammasratta hammaste arv
T_{u1}	-	Uus esimese käigu pöördemoment, Nm
T_{u2}	-	uus teise käigu pöördemoment, Nm
T_1	-	esimese käigu pöördemoment, Nm
t_1	-	uus esimese käigu hammasratta hammaste arv
T_2	-	teise käigu pöördemoment, Nm
t_{2-1}	-	teise käigu esimese hammasratta hammaste arv
t_{2-2}	-	teise käigu teise hammasratta hammaste arv
T_3	-	kolmanda käigu pöördemoment, Nm
W_p	-	võllis tekkiv polaarvastupanumoment, mm ³
Y_β	-	koormuse jaotus tegur
Y_ϵ	-	kaldhamba tegur
Y_F	-	hammaste kuju tegur

SISSEJUHATUS

Käesolev töö annab ülevaate pneumobile Technics 5 käigukasti optimeerimiseks tehtud arvutustest ja projekteerimisest. Töö eesmärgiks on optimeerida 2021. aasta hooajal kasutuses olnud pneumobile Technics 5 käigukasti, vähendades käigukasti massi ja suurendades üldist kasutegurit. Eesmärgi saavutamiseks soovitakse leida kitsamate hammasrataste valmistamiseks sobiv materjal ja asendada kasutegurit vähendavad komponendid paremate vastu.

Töö koosneb kuuest põhijaotisest. Esimeses põhijaotises on kirjeldatud Pneumobile Technics 5. Teises põhijaotises on välja toodud töö eesmärk ja projekteerimisele kehtivad piirangud ja nõuded. Kolmandas põhijaotises on kirjeldatud Technics 5 ülekande olukorda 2021. aastal. Neljandas põhijaotises on tehtud optimeeritud käigukastile vajalikud arvutused ja leitud hammasrataste valmistamiseks sobiv materjal. Viiendas põhijaotises on kirjeldatud projekteerimist ja projekteeritud detaile. Kuuendas põhijaotises on tehtud optimeerimise tulemustest ülevaade.

1. PNEUMOBILE TECHNICS 5

Pneumobile Technics 5 on suruõhu pealt toimiv sõiduk. See on ehitatud suruõhu komponentide tootja Emersoni poolt korraldatud suruõhuga sõitvate masinate võistluse „International Aventics Pneumobile Competition“ jaoks. Masina on projekteerinud ja ehitanud Tehnikaüliõpilaste seltsi üliõpilased.

Technics 5 on nelja sõltumatu vedrustusega rattaga, millest vedavateks on mõlemad tagumised rattad (joonis 1.1.). Vedavad rattad saavad pöörelda erineva kiirusega, sest mõlemale rattale mõjuv jõud antakse läbi pörksidurite. Masina raam on valmistatud kokkukeevitatud alumiiniumtorudest. Esiosa kerepaneelid on valmistatud 3D prinditud PLAst ja küljed on kaetud kilega. Suruõhu süsteem koosneb Aventicsi tööstuslikest suruõhukomponentidest ja töötab töö rõhul 10bar. Elektroonika juhtimiseks on kasutusel National Instrumentsi PLC.



Joonis 1.1. Pneumobile Technics 5 mudel.

2. TÖÖ EESMÄRK, PIIRANGUD JA NÕUDED

2.1. Töö eesmärk

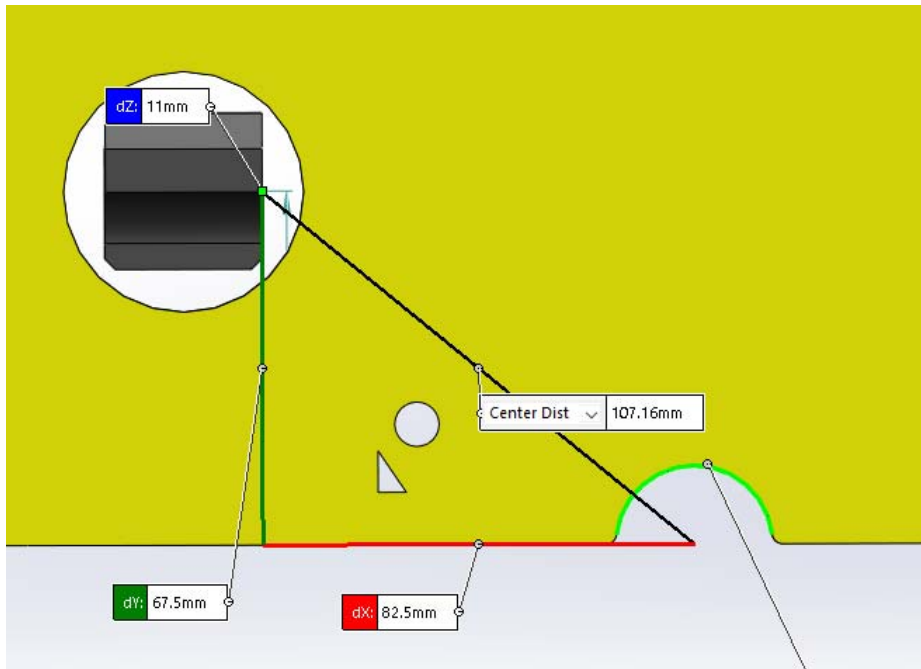
Töö eesmärgiks on optimeerida pneumobile Technics 5 käigukasti. Optimeerimisel soovitakse vähendada ülekande üleüldist massi ja ülekandes asuvate hammasrataste inertsi. Lisaks muuta ülekandesuhteid, sest kaotatakse ära käigukastist kolmanda käigu hammasratta paar, muutes käigukasti kahekäiguliseks. Massi vähendamise eesmärgina leitakse hammasratastele sobiv materjal. Sobiv materjal leitakse ülekande hammasratastele, mis on 10 mm laiad. Samuti soovitakse vähendada käigukasti kasutegurit hõõrdumise vähendamisega.

2.2. Piirangud

Tulenevalt eesmärgist kasutada optimeeritud käigukasti juba konstrueeritud sõidukis, kehtivad projekteeritavale käigukastile piirangud. Piirangute eesmärgiks on käigukasti sobivus ja lihtne paigaldamine olemasolevale masinale.

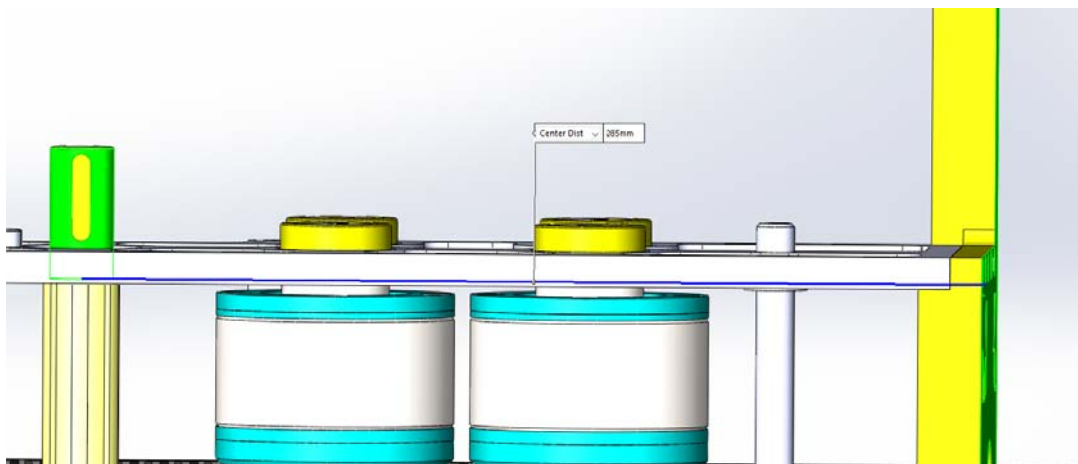
Projekteeritavale käigukastile kehtivad piirangud on järgmised:

1. kinnituskohtade projekteerimisel tuleb jälgida kasutuses oleva käigukasti kinnitusavasid, sest raamitorude sees jooksevad juba paigaldatud juhtmed ja voolikud, mida ei saa teiste kohtade peale enam paigutada;
2. mootorina kasutatava pneumosilindri külge kinnitatud hammaslati asukoht peab jääma samaks, kuna mootori asukohta muuta ei ole enam võimalik (joonis 2.1.);



Joonis 2.1. Hammaslati asukoht.

3. väljundvõlli asukoht peab jääma mootori ja raami suhtes samale kohale, kuna raami küljes on väljundvõlli toestamiseks laager (joonis 2.2.);



Joonis 2.2. Väljundvõlli asukoht.

4. kasutada tuleb põrksidureid MZEU 20, millest tulenevalt arvutuslikud jõud käigukastis ei tohi ületada tootjapoolses andmelehes kirjas olevaid väärtusi;
5. kasutada tuleb nuutvõlli KW 21x25x6;
6. käigukasti peale peab saama paigutada Messeri 10 l lämmastikuballooni. Ballooni läbimõõt on 140 mm[1].

2.3. Nõuded

Projekteerimisele on kehtestatud nõuded, et tagada käigukasti ohutus ja lihtne tootmine.

Projekteerimisele kehtivad nõuded on järgmised:

1. Projekteerimisel tuleb kasutada standardhammasratta mooduleid ja võllile kinnitamise viise;
2. Projekteerida käigukasti korpus kinniseks, aga lihtsalt ligipääsetavaks, et vältida abrasiivse materjali sattumist käigukasti. Lisaks on võistluste reeglites kirjas, et kohad, kus on oht viga saada ja mis on sõidusendis juhile ligipääsetavad, peavad olema kinni kaetud[1].

2.4. Plaanitavad muudatused

Planeeritavat muudatused on järgmised:

1. Hammasrataste laius muuta 25 mm-lt 10 mm-le
2. Vähendada käikude arvu 2-le, sest testsõite tehes jäi kiirenduseks vajalik jõud väheseks ja käiguvahetusel teiselt käigult kolmandale hakkas masina liikumine piirama mootori tööd. Seega tuleb esimese käigu ülekandesuhet vähendada ja teise käigu ülekandesuhet suurendada
3. Asendada plastikust liugelaagrid veerelaagritega
4. Teha käigukasti korpus kinniseks

3. PNEUMOBILE TECHNICS 5 2021. AASTAL

3.1. Mootor

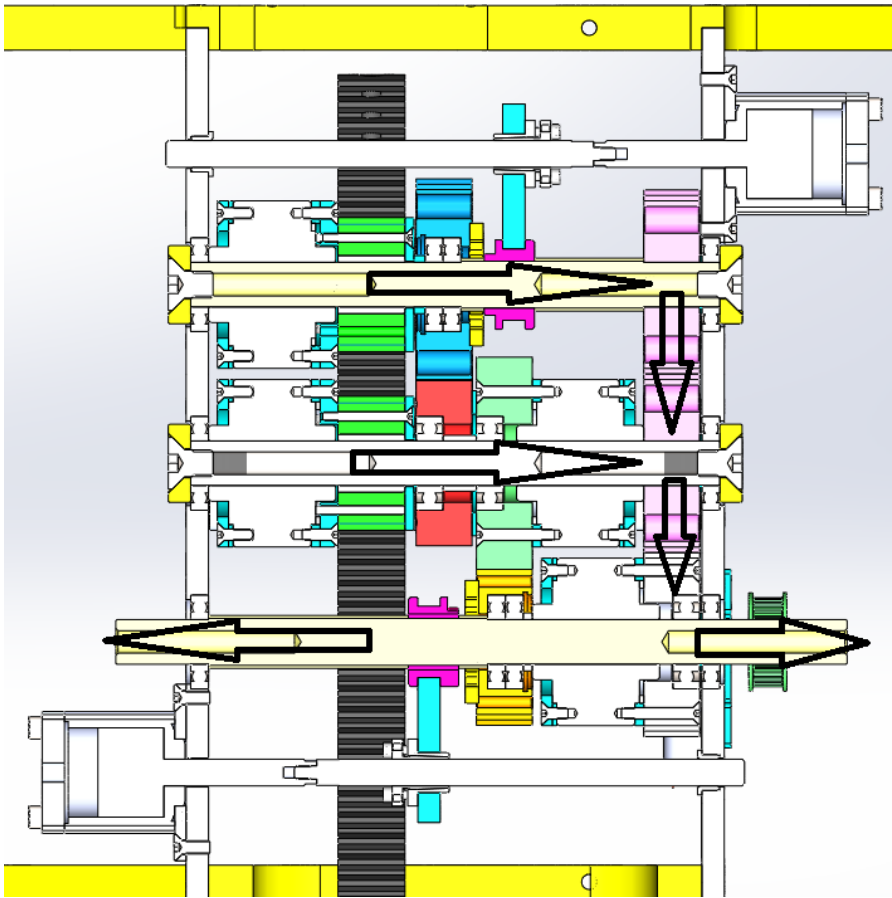
Pneumobile Technics 5 jõuallikaks on pneumosilinder, 100mm läbimõõduga ja 500mm käiguga. Silindri originaalpead on asendatud optimeeritud silindripeadega, millel on kaks 1 tollist porti ja lisa 1/8 tollist port silindri rõhu jälgimiseks, algasendi taastamiseks ning turvalisuse tagamiseks, ventileerimiseks. Silindri sisendportidesse juhitakse õhku läbi elektrooniliselt lülitatavate 1 tollist AS5 seeria aventicsi klappide. Väljundportidest juhitakse silindrist õhk välja läbi õhuga lülitatavate 1 tollist AS5 seeria aventicsi klappide. Kolvi asukohta silindris jälgitakse täispikkuses lineaar anduriga. Mootori maksimaalseks tööõhuks on 10bar.

3.2. Kasutuses olev käigukast

Hetkel kasutuses olev ülekanne on 3-käiguline. Pneumosilindrilt kandub jõud ülekandesse hammaslatiga, mis on kinnitatud keermega pneumosilindri külge ja mille moodul on 3. Jõud kandub ülekandesse hammaslati edasi ja tagasi liikumisel, ülekandes muudetakse kahesuunaline sirgjooneline liikumine ühesuunaliseks ringliikumiseks, kasutades kahte hammasratta ja pörksiduri paari. Hammasrattad saavad võllil vabalt pöörelda plastikust puksidel, samas on hammasrattad poltidega kinnitatud pörksidurite külge, mis on omakorda sisemises saales asetseva liistuga kinnitatud võllidele. Silindri poolt vaadatuna esimene hammasratta kannab silindri kolvi välja liikumise läbi pörksiduri võllile. Järgmine hammasratta kannab läbi pörksiduri teisele võllile silindri sisse suunas liikumise. Mõlema võlli otstes on omavahel hambumises hammasrattad, mis on kinnitatud võllidele liistuga.

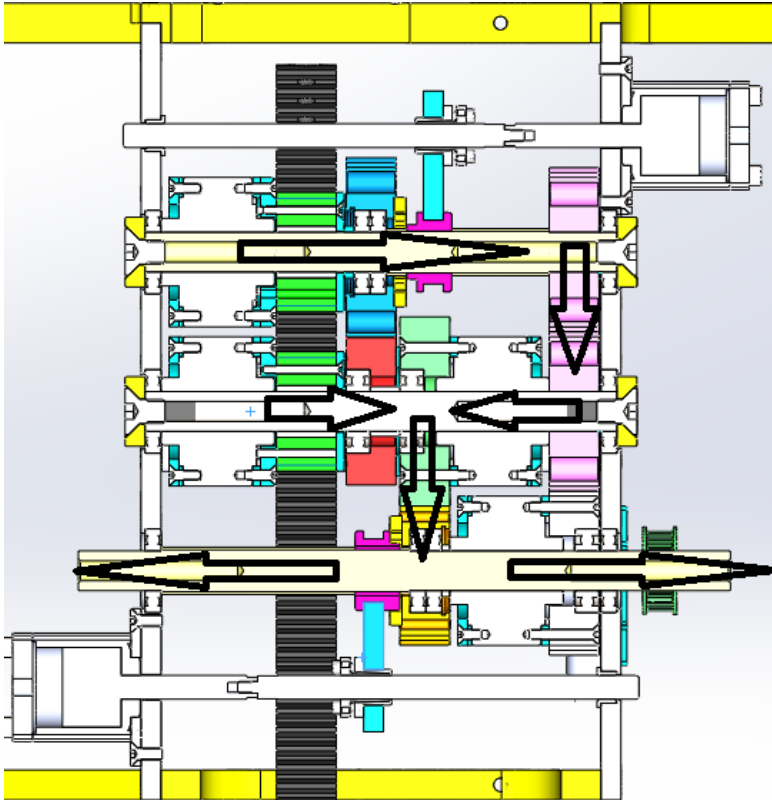
Esimese käigu korral kandub nende kahe hammasratta liikumine üle väljundvõllil asuvale hammasrattale, mis saab võllil vabalt pöörelda hammasratta sisse paigutatud laagril. See hammasratta on omakorda kinnitatud poltidega pörksiduri külge, mis on liistuga kinnitatud võllile. Läbi selle pörksiduri kantakse jõud väljundvõlli juhul, kui ühtegi käigulülituseks kasutatavat nuutpuksi ei ole aktueeritud ja kui väljundvõlli pöörlemiskiirus on väiksem kui

põrksiduril. Jõu liikumist käigukastis esimese käigu korral on näidatud ära joonisel (joonis3.1.)



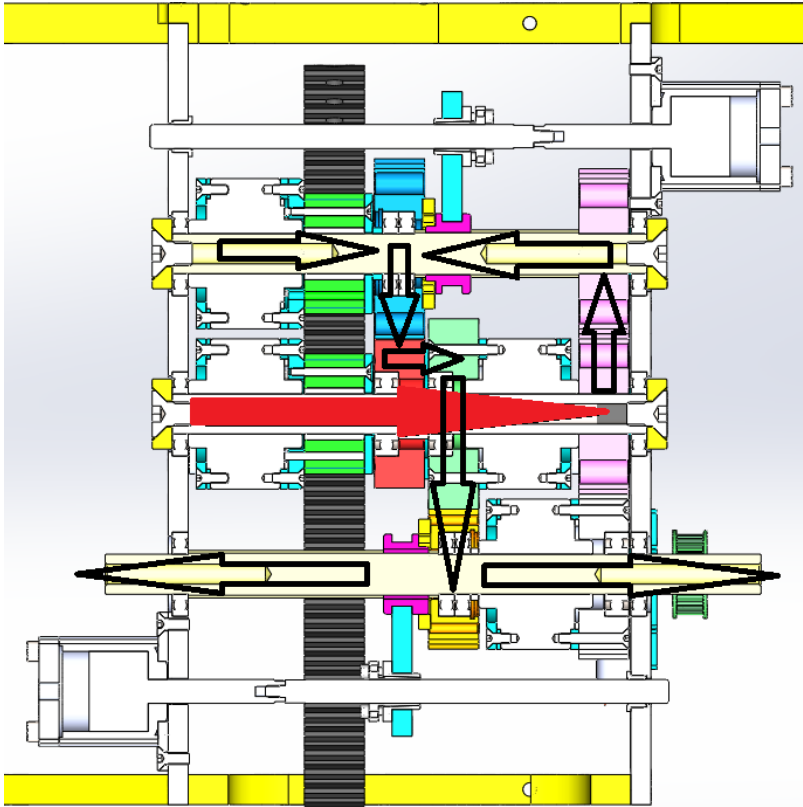
Joonis 3.1. Jõu liikumine esimesel käigu korral

Teise käigu korral liigub jõud läbi teisel võllil asetseva põrksiduri ja hammasrataste paari. Väljundvõllil on laagritel nuutpuksiga võlliga seotav hammasratas. See hammasratas on hambumises teisel võllil asetseva hammasrattaga ning sidumata asendis pöörleb laagritel. Seotud asendis kannab see hammasratas teiselt võllilt saadud jõu üle väljundvõllile. Kuna teise käigu ülekanne on suurem, kui esimese oma, on teise käigu korral väljundvõlli pöörlemiskiirus suurem esimese käigu pöörlemiskiirusest. Seega libiseb väljundvõllil asetsev põrksiduri ja esimese käigu hammasratta paar läbi. Jõu liikumist teise käigu korral on kujutatud joonisel (joonis 3.2.).



Joonis 3.2. jõu liikumine teise käigu korral.

Kolmanda käigu korral aktiveeritakse lisaks väljundvõllil asetsevale nuutpuksile ka esimesel võllil asetsev nuutpuks, sidudes nii võlliga esimesel võllil muidu vabalt laagritel pöörleval hammasratta. Aktueerides esimesel võllil asetsev nuutpuks kandub jõud läbi seotud hammasratta teisel võllil asetseva hammasrataste ja pörksiduri paarile. Sealt kantakse jõud läbi teise käigu hammasrataste ja nuutpuksi väljundvõllile. Kuna hammasrataste ja pörksidurite paar pöörleb kolmanda käigu korral kiiremini, kui teine võlli, kantakse jõud teiselt võllilt alati esimesele võllile. Jõu liikumist kolmanda käigu korral on kujutatud joonisel (joonis 3.3.).



Joonis 3.3. Jõu liikumine kolmanda käigu korral.

Hetkel kasutuses oleva käigukasti ülekandesuhted on järgmised:

1. esimese käigu ülekandesuhe 1:1;
2. teise käigu ülekandesuhe 1:1,38 ;
3. kolmanda käigu ülekandesuhe 1:1,66.

3.3. Käigukasti arvutus

Käigukasti arvutusi tuleb alustada mootori maksimaalse väljund jõu määramisest. Silindri läbimõõt on 100mm ja mootori maksimaalne töö rõhk on 10bar.

Mootori maksimaalne väljund jõud (F_v) leitakse valemist(3.1)[2: 42]:

$$F_v = p \cdot \pi \cdot d_s^2 / 4 = 1000000 Pa \cdot \pi \cdot 0,1^2 m / 4 = 7854 N \quad (3.1)$$

kus F_v on mootori maksimaalne väljund jõud N;

p -mootori töö rõhk Pa;

d_s -silindri läbimõõt m.

Kuna silindri otsas olev hammaslatt paneb liikudes pöörlema käigukasti sisendhammasratta, saab mootori maksimaalse jõuga leida käigukasti maksimaalse sisendpöördemomendi. Selleks on lisaks hammasrattale mõjuvale jõule vaja teada sisendhammasratta jaotusläbimõõtu (d_p), mis on 54mm. Käigukasti sisendpöördemoment (T_s) leitakse kasutades valem(3.2)[2: 37]:

$$T_s = \frac{F_v \cdot d_p}{2} = \frac{7854 N \cdot 0,054 m}{2} = 212,05 Nm \quad (3.2)$$

kus T_s on käigukasti sisendpöördemoment Nm;

F_v -mootori maksimaalne väljund jõud N;

d_p -käigukasti sisendhammasratta jaotusläbimõõt m.

Käikude väljundpöördemendid leitakse läbi ülekande suhte ja sisendpöördemomendi.

Esimese käigu väljundpöördemomenti (T_1) leidmist kirjeldab valem(3.3)[2: 37]:

$$T_1 = \frac{T_s}{i_1} = \frac{212,05}{1} = 212,05 Nm \quad (3.3)$$

kus T_1 on esimese käigu väljundpöördemoment Nm;

T_s -käigukasti sisendpöördemoment Nm;

i_1 -esimese käigu ülekandesuhe.

Teise käigu väljundpöördemomenti (T_2) leidmist kirjeldab valem(3.4)[2: 37]:

$$T_2 = \frac{T_s}{i_2} = \frac{212,05}{1,38} = 154,22Nm \quad (3.4)$$

kus T_2 on teise käigu väljundpöördemoment Nm;

T_s -käigukasti sisendpöördemoment Nm;

i_2 -teise käigu ülekandesuhe.

Kolmanda käigu väljundpöördemomenti (T_3) leidmist kirjeldab valem(3.5)[2: 37]:

$$T_3 = \frac{T_s}{i_3} = \frac{212,05}{1,66} = 128,03Nm \quad (3.5)$$

kus T_3 on kolmanda käigu väljundpöördemoment Nm;

T_s -käigukasti sisendpöördemoment Nm;

i_3 -kolmanda käigu ülekandesuhe.

Arvutuste tulemusena saadi hetkel kasutuses oleva käigukasti käikude väljundpöördemomendid. Esimese käigu pöördemoment 212,05 Nm. Teise käigu pöördemoment 154,22 Nm. Kolmanda käigu pöördemoment 128,03 Nm.

4. OPTIMEERITUD KÄIGUKASTI ARVUTUSED JA MATERJALIVALIK

4.1. Arvutused

Arvutusi tehakse kasutades hammasratta moodulit 2,5. Sellise mooduli toimivus ja sujuv töö on varasemates pneumobilides testitud. Samuti on sellise mooduliga hammasrattad hetkel kasutuses olevas käigukastis. Tulenevalt sellest ei pea mõningaid mõõte muutma, mille tulemusena on käigukasti lihtsam projekteerida. Arvutuste vähendamiseks ja hammasrataste universaalsete väärtuste leidmiseks on kasutatud maedler.de kataloogi. Sealt on võimalik standardhammasratastele leida hammaste arv, jaotuslääbimõõdud ning teised sarnased väärtused.

4.1.1. Esimene käik

Optimeeritud käigukasti maksimaalne sisendvõimsus jääb sama suureks kui vanal käigukastil. Technics 5 meeskonna liikmete arutelu tulemusel on planeeritav esimese käigu pöördemomendi tõus 10%. Pöördemomendi tõstmiseks on vaja vähendada ülekande suhet 10%. Uue esimese käigu ülekande suhte (i_{u1}) leidmiseks kasutatakse valemit(4.1).

$$i_{u1} = i_1 \cdot (100\% - 15\%) = 1 \cdot (100\% - 10\%) = 0,85 \quad (4.1)$$

kus i_{u1} on uus esimese käigu ülekandesuhe;

i_1 -olemasoleva esimese käigu ülekandesuhe.

Kuna hammaslati liikumisamplituud on piiratud, planeeritakse esimese ja teise käigukasti võlli omavaheline kaugus säilitada. Selle piirangu tulemusena nendel võllidel asuvate hammasrataste hammaste arvu ei muudeta. Esimese käigu hammasrataste paari esimene hammasratas on 32 hambaga, teise hammasratta hammaste arv leitakse ülekandesuhte läbi.

Esimese käigu hammasratta paari teise hammasratta hammaste arvu (t_1) leidmist kirjeldab valem(4.2)[2: 299]:

$$t_1 = \frac{t_s}{i_{u1}} = \frac{32}{0,9} = 35,5 \quad (4.2)$$

kus t_1 on hambumises oleva hammasratta hammaste arv;

t_s -esimese käigu hammasrattaga hambumises oleva hammasratta hammaste arv;

i_{u1} -uus esimese käigu ülekandesuhe.

Arvutuse tulemusena saadi $t_1 = 35,5$, aga et hammaste arv peab olema täisarv, ümardatakse $t_1 = 36$. Sellise hammaste arvuga hammasratas on Maedler.de veebilehel tootekoodiga 23203600. 36 hambaga ja mooduliga 2,5 hammasratta jaotuslääbimõõt on 90 mm[3]. Ümardamise tulemusena muutub ülekandesuhe.

Uus ülekande suhe (i_{u1}) leitakse kasutades valemit(4.3)[2: 299]:

$$i_{u1} = \frac{t_s}{t_1} = \frac{32}{36} = 0,88 \quad (4.3)$$

kus i_{u1} on uus esimese käigu ülekandesuhe;

t_s -esimese käigu hammasrattaga hambumises oleva hammasratta hammaste arv;

t_1 -uus esimese käigu hammasratta hammaste arv.

Teise ja kolmanda võlli vahe(l_{2-3}) leitakse kasutades hammasrataste jaotuslääbimõõte valemis (4.4)[2: 296]:

$$l_{2-3} = \frac{(d_{1-1} + d_{1-2})}{2} = \frac{90mm + 80mm}{2} = 85mm \quad (4.4)$$

kus l_{2-3} on teise ja kolmanda võlli vahemaa mm;

d_{1-1} -esimese käigu hammasratta jaotuslääbimõõt mm;

d_{1-2} -esimese käigu hammasrattaga hambumises oleva hammasratta jaotuslääbimõõt mm.

Arvutuse tulemusena saadi kahe võlli vahemaa 85mm.

Uuest ülekandesuhtest saame leida esimese käigu korral mõjuva pöördemomendi.

Uue esimese käigu pöördemoment (T_{u1}) leitakse valemist(4.5)[2: 37]:

$$T_{u1} = \frac{T_s}{i_{u1}} = \frac{212,05}{0,88} = 240,97Nm \quad (4.5)$$

kus T_{u1} on uus esimese käigu pöördemoment Nm;

i_{u1} -uus esimese käigu ülekandesuhe;

T_s -käigukasti sisend pöördemoment Nm.

Uus esimese käigu pöördemoment(T_{u1}) jääb pörksiduri MZEU 20 lubatud piiri, mis on 245 Nm[4].

Kasutades hammasrattale mõjuvat pöördemomenti ja jaotusläbimõõtu, leitakse ühele hambale mõjuv jõud. Hammasrataste paari hammastele mõjuvad jõud on võrdsed, kuid vastassuunalised. Tulenevalt sellest on vajalik arvutada vaid ühele hammasratta paari hammasratta hammastele mõjuv ringkoormus .

Hambale mõjuv ringkoormus(F_{t1}) leitakse valemis(4.6)[2: 37]:

$$F_{t1} = \frac{2 \cdot T_{u1}}{d_{1-1}} = \frac{2 \cdot 240,97Nm}{0,09m} = 5355N \quad (4.6)$$

kus F_{t1} on esimese käigu hammasrataste hammastele mõjuv ringkoormus N;

T_{u1} -uus esimese käigu pöördemoment;

d_{1-1} -uue esimese käigu hammasratta jaotusläbimõõt m.

Hammasratta valmistamiseks sobiva materjali leidmiseks tehakse hammasratta hamba paindestressi arvutus. Arvutuses kasutatud tegurid on valitud veebileheküljelt vastavatest tabelitest hammasrattale mõjuvate tegurite järgi. Varutegur valiti 1,5, mis tähendab, et hammasratas on 1,5 korda tugevam kui peab olema.

Esimese käigu hammasrataste hambas tekkiva paindestressi(σ_{F1}) leidmist kirjeldab valem(4.7)[5]:

$$\sigma_{F1} = F_{t1} \cdot \frac{Y_F \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta}{m_n \cdot b} \cdot \left(\frac{K_V \cdot K_O}{K_L \cdot K_{FX}} \right) \cdot S_F =$$

$$= 5355N \cdot \frac{1,95 \cdot 0,594 \cdot 1}{2,5mm \cdot 10mm} \cdot \left(\frac{1 \cdot 1,75}{1,4 \cdot 1} \right) \cdot 1,5 = 465N/mm^2 \quad (4.7)$$

kus σ_{F1} on hammasratta paindestress N/mm²;

Y_F -hammaste kuju tegur;

Y_ε -kaldhamba tegur;

Y_β -koormuse jaotustegur;

F_{t1} - esimese käigu hammasrataste hammastele mõjuv ringkoormus N;

S_F -varutegur;

K_V -dünaamilise koormuse tegur;

K_O -koormustegur;

K_L -eluea tegur;

K_{FX} -hambajuure stressi tegur;[5]

b_1 -uue ülekande hammasratta laius;

m_n -hammasratta moodul mm.

Arvutuse tulemusena saadi hammasratta hambale mõjuv paindestress 465 N/mm²

4.1.2. Teine käik

Optimeerimise eesmärgina suurendatakse teise käigu ülekande suhet 10%. Teise käigu ülekande suhte muutmise eesmärgiks on vanast käigukastist kolmanda käigu eemaldamine. Et saavutada sarnane lõppkiirus, on vaja ülekande suhet suurendada. Kolmanda käigu hammasrataste eemaldamise tulemusena väheneb ka käigukasti mass ja keerukus. Ülekandest kaovad ära üks hammasrataste paar ja üks käigulülituse kahvel koos lülitussilindriga. Uue teise käigu ülekande suhte (i_{u2}) leidmiseks kasutatakse valemit(4.8):

$$i_{u2} = i_2 \cdot (100\% + 10\%) = 1,375 \cdot (100\% + 10\%) = 1,51 \quad (4.8)$$

kus i_{u2} on uus teise käigu ülekandesuhe;

i_2 -hetkel kasutuses oleva käigukasti teise käigu ülekandesuhe.

Teise käigu hammasrataste paari leidmiseks on vaja arvutada hammasrataste jaotuslääbimõõdud läbi käigukasti võllide vahemaa, sest tulenevalt võllide omavahelisest ülekandest on vahemaa fikseeritud. Võllide vahemaa on 85 mm. Esmalt valitakse üks hammasratas ja selle järgi arvutatakse teise hammasratta jaotuslääbimõõt. Valiti 27 hambaga hammasratas. Maedler.de tootekoodiga 23202700, antud hammasratta jaotuslääbimõõt on $d_{2-1}=67,5$ mm[6]. Teisekäigu suurhammasratta jaotuslääbimõõdu (d_{2-2}) leidmist kirjeldab valem(4.9)[2: 296]:

$$d_{2-2} = l_{2-3} * 2 - d_{2-1} = 85 * 2 - 67,5\text{mm} = 102,5\text{mm} \quad (4.9)$$

kus d_{2-2} on teise käigu suurhammasratta jaotuslääbimõõt mm;

l_{2-3} -teise ja kolmanda võlli vahekaugus üksteisest mm;

d_{2-1} -teise käigu hammasratta paari esimese hammasratta jaotuslääbimõõt mm.

Jaotuslääbimõõdule 102,5mm vastav hammasratas maedleri.de kataloogis on 24204100, mis on 41 hambaga hammasratas[7]. Ülekande suhte kontrollimiseks tehakse uuesti uue teise käigu ülekandesuhte arvutus.

Uus teise käigu ülekandesuhe(i_{u2}) leitakse läbi hammasrataste hammaste arvu valemis(4.10)[2: 299]:

$$i_{u2} = \frac{t_{2-2}}{t_{2-1}} = \frac{41}{27} = 1,52 \quad (4.10)$$

kus i_{u2} on uus teise käigu ülekandesuhe;

t_{2-2} -teise käigu teise hammasratta hammaste arv;

t_{2-1} -teise käigu esimese hammasratta hammaste arv.

Uuest ülekandesuhtest saame leida teise käigu korral väljundvõllile mõjuva pöördemomendi. Uue teise käigu pöördemomendi(T_{u2}) leidmiseks kasutatakse valemit(4.11)[2: 37]:

$$T_{u2} = \frac{T_s}{i_{u2}} = \frac{212,05Nm}{1,52} = 139,51Nm \quad (4.11)$$

kus T_{u2} on uus teise käigu väljund pöördemoment Nm;

i_{u1} -uus teise käigu ülekandesuhe;

T_s -käigukasti sisendpöördemoment Nm.

Ühele hambale mõjuv jõud leitakse kasutades hammasrattale mõjuvat pöördemomenti ja teise käigu suurhammasratta jaotusläbimõõtu.

Teisekäigu hammasratate hammastele mõjuva ringkoormuse(F_{t2}) leidmiseks kasutatakse valemit(4.12)[2: 37]:

$$F_{t2} = \frac{2 \cdot T_{u2}}{d_{2-2}} = \frac{2 \cdot 139,51Nm}{0.1025m} = 2722N \quad (4.12)$$

kus F_{t2} on teise käigu hammasratate hammastele mõjuv ringkoormus N;

T_{u2} -uus teise käigu pöördemoment Nm;

d_{2-2} -uue teise käigu hammasratta jaotusläbimõõt m.

Teise käigu hammasratate hammastele mõjuv paindestress(σ_{F2}) leidmist kirjeldab valem (4.13)[5]:

$$\begin{aligned} \sigma_{F2} &= F_{t2} \cdot \frac{Y_F \cdot Y_\varepsilon \cdot Y_\beta}{m_n \cdot b} \cdot \left(\frac{K_V \cdot K_O}{K_L \cdot K_{FX}} \right) \cdot S_F = \\ &= 2722N \cdot \frac{1,95 \cdot 0,594 \cdot 1}{2,5mm \cdot 10mm} \cdot \left(\frac{1 \cdot 1,75}{1,4 \cdot 1} \right) \cdot 1,5 = 236N/mm^2 \end{aligned} \quad (4.13)$$

kus σ_{F2} on hammasratta hamba paindestress N/mm²;

Y_F -hammaste kuju tegur;

Y_ε -kaldhamba tegur;

Y_β -koormuse jaotustegur;

- b₂ - uue 2. käigu hammasratta laius mm;
- F_{t2} - teise käigu hammasrataste hammastele mõjuv ringkoormus N;
- S_F - varutegur;
- K_V - dünaamilise koormuse tegur;
- K_O - koormustegur;
- K_L - eluea tegur;
- K_{FX} - hambajuure stressi tegur; [5]
- m_n - hammasratta moodul mm.

Arvutuse tulemusena saadi hambale mõjuvaks paindestressiks 236 N/mm²

4.1.3. Võllide väändepinged

Võllide vastupidavuse kontrollimiseks tuleb leida nende väändepinged ja võrrelda tekkivaid suurusmaterjali lubatud väändepingetega.

Esimesele ja teisele võllile mõjub M_{t1} = 212,05 Nm ja nende läbimõõdud on d=20mm.

Esmalt on vaja leida võlli polaarvastupanumoment (W_p) valemist(4.14)[2: 47]:

$$W_p = \frac{\pi \cdot d^3}{16} = \frac{\pi \cdot (20mm)^3}{16} = 1571mm^3 \quad (4.14)$$

kus W_p on võlli polaarvastupanumoment mm³;

d - on võlli läbimõõt.

Seejärel saab kasutades polaarvastupanumomenti leida väändepinge (τ_t) valemist(4.15)[2: 47]:

$$\tau_{t1} = \frac{M_{t1}}{W_p} = \frac{212050N \cdot mm}{1571mm^3} = 135N/mm^2 \quad (4.15)$$

kus τ_t on esimeses ja teises võllis tekkiv väändepinge N/mm²;

M_{t1} - võllile mõjuv väändemoment N·mm;

W_p - võllis tekkiv polaarvastupanumoment mm³.

Arvutuse tulemusena saadi esimeses ja teises võllis tekkiv väändepinge 135 N/mm².

Kasutades väljundvõllis tekkivat maksimaalset väändemomenti $M_{t2}=241$ Nm, leitakse väljundvõllis tekkiv väändepinge. Väändepinge leidmisel saab kasutada valemis(4.14) leitud polaarvastupanumomenti $W_p=1571$ mm³, sest antud võlli väikseim diameeter on samuti 20 mm. Väljundvõlli väändepinge (τ_{t2}) leitakse valemis(4.16)[2: 47]:

$$\tau_{t2} = \frac{M_{t2}}{W_p} = \frac{241000N \cdot mm}{1571mm^3} = 153N/mm^2 \quad (4.16)$$

kus τ_{t2} on väljundvõllis tekkiv väändepinge N/mm²;

M_{t2} – võllile mõjuv väändemoment N·mm;

W_p – võllis tekkiv polaarvastupanumoment mm³.

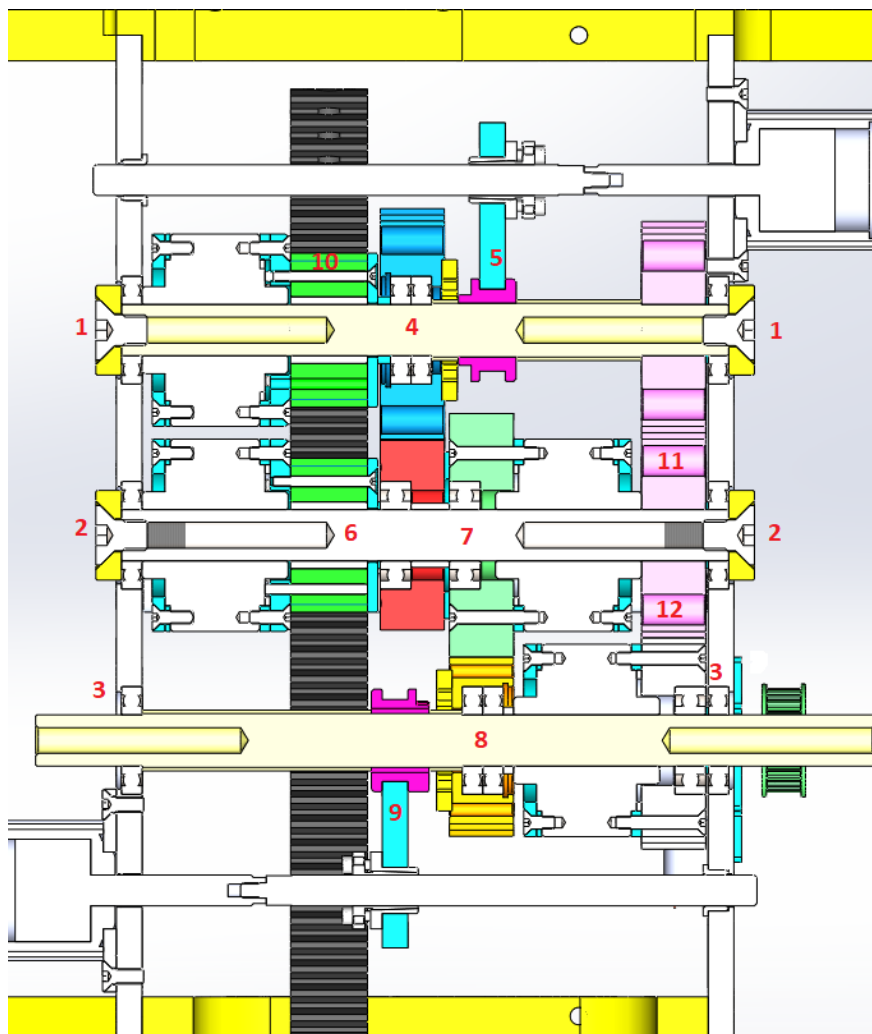
Arvutuse tulemusena saadi väljundvõllis tekkiv väändepinge 153 N/mm².

Väljundvõllina kasutatakse maedler.de kataloogis koodiga 64840600 KW 21x25x6 nuutvõlli, mille vähim läbimõõt käigukastis on 20 mm. Antud nuutvõll on valmistatud terasest margiga C45[8].

Antud materjali lubatud väändepinge II koormusjuhule on 350 N/mm². Lubatud väändepinge valiti II koormusjuhule, kuna võllidele mõjub ühesuunaline pulseeriv koormus[2: 44].

4.1.4. Käigukasti kasutegur

Hetkel kasutusel oleva käigukasti kasutegur sõltub käigukastis valitud käigust. Käigust sõltuvus tekib sellest, millised hammasrattad hetkel on vedvas olekus ja millised hammasrattad ja nendes olevad laagrid takistavad liikumist. Et leida käigukasti kõige madalama kasuteguriga olek, arvutatakse käigukasti kasutegur juhul, kui esimene käik on rakendatud. Kasuteguri arvutamiseks on välja toodud käigukasti joonis, millele on märgitud numbritega arvutamiseks olulised kohad (joonis 4.1.).



Joonis 4.1. Hetkel kasutuses oleva käigukasti kasuteguri arvutamiseks olulised kohad.

Olemasoleva käigukasti kasuteguri(η_v) leidmiseks kasutatakse valemit(4.17)[9: 19]:

$$\begin{aligned}
 \eta_v &= \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \cdot \eta_6 \cdot \eta_7 \cdot \eta_8 \cdot \eta_9 \cdot \eta_{10} \cdot \eta_{11} \cdot \eta_{12} = \\
 &= 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,98 = \\
 &= 0,84
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

kus η_v on olemasoleva käigukasti summaarne kasutegur;

- η_1 -esimese võlli kuullaagrite paari kasutegur;
- η_2 -teise võlli kuullaagrite paari kasutegur;
- η_3 -väljundvõlli kuullaagrite paari kasutegur;
- η_4 -esimese võlli mitteveetava hammasratta kuullaagrite paari kasutegur;
- η_5 -kolmanda käigu lülituskahvli kasutegur;
- η_6 -teisel võllil vastupidi liikuva hammasratta liugelaagri kasutegur;

- η_7 -teise võlli mitteveetava hammasratta kuullaagrite paari kasutegur;
- η_8 -väljundvõlli mitteveetava hammasratta kuullaagrite paari kasutegur;
- η_9 -teise käigu lülituskahvli kasutegur;
- η_{10} -hammaslati ülekanne hammasrattale kasutegur;
- η_{11} -hammasrattalt hammasrattale kasutegur;
- η_{12} -hammasrattalt hammasrattale kasutegur[9: 19].

Arvutuse tulemusena saadi hetkel kasutuses oleva käigukasti kasuteguriks 0,84.

4.2. Materjali valik

Materjali valimise aluseks on arvutustest leitud suurim paindestress, mis tekib esimeses hammasratta paaris. Suurim hammasratta hammastele mõjuv paindestress saadi 465 N/mm^2 . Selle väärtuse võrdlemiseks tabelis esitatud väärtustega, tehakse teisendus $465 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 47 \text{ kgf/mm}^2$. Kasutades seda väärtust leitakse (jooniselt 4.2.) sobiv materjal σ_{Flim} tulba järgi tulbast material.

	Material (Arrows indicate the ranges)	Core hardness		σ_{Flim} kgf/mm ²
		H _B	H _V	
Structural carbon steel	S15C S15CK	140	147	18.2
		150	157	19.6
		160	167	21
		170	178	22
		180	189	23
		190	200	24
Structural alloy steel	SCM415 SCM420 SNCM420 SNC415 SNC815	220	231	34
		230	242	36
		240	252	38
		250	263	39
		260	273	41
		270	284	42.5
		280	295	44
		290	305	45
		300	316	46
		310	327	47
		320	337	48
		330	347	49
		340	358	50
		350	369	51
		360	380	51.5
		370	390	52

Joonis 4.2. Süsinikrikastatud ja karastatud hammasrattaste materjalid.[5]

Joonise alusel leitakse, et tabelis jääb teisendatud paindestressi väärtus materjali SNCM815 piiridesse. ISO standardi kohaselt on selle materjali nimetus 15NiCr13[10].

Materjali 15NiCr13 mehaanilised omadused:

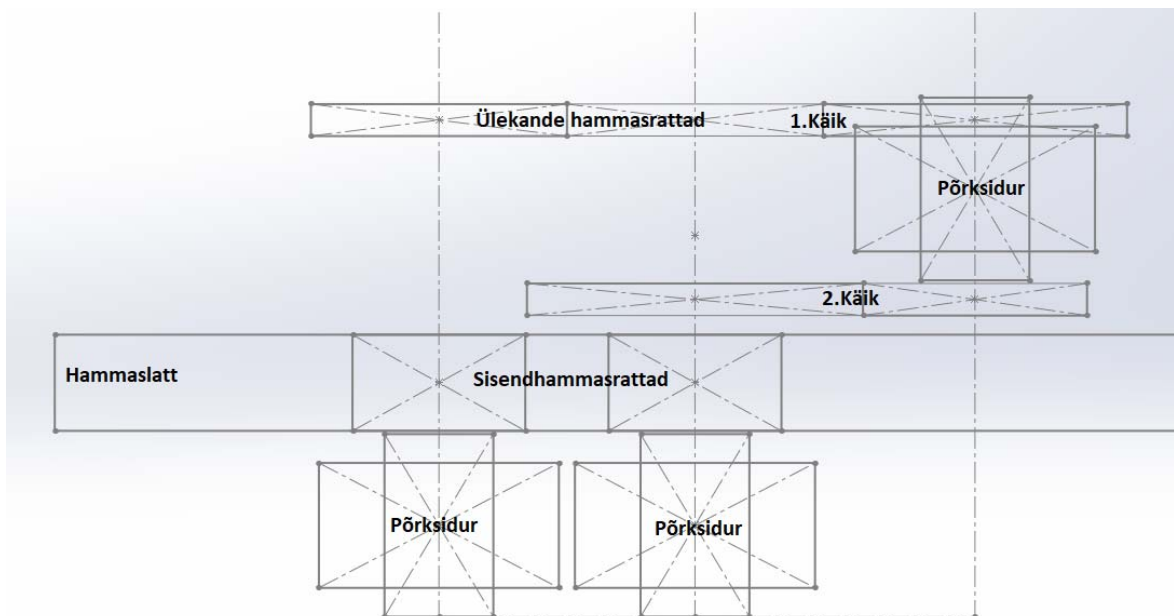
Tõmbetugevus:	920-1230 N/mm ² ;
Voolepiir:	785 N/mm ² ;
Katkevenivus:	10 %;
Kõvadus väljastusolekus:	156-207 HB[2: 139].

Et saavutada hammasratastele hea vastupidavus, on soovitatav hammasrattad tsementiitida, seejärel karastada ja noolutada. Selline teguviis tõstab hammasrataste pinna kulumiskindlust ja annab hea väsimustugevuse[2: 172].

5. KÄIGUKASTI PROJEKTEERIMINE

5.1. Skeem

Projekteerimist alustati esialgse skeemi koostamisest. Esialgses skeemis pandi esmalt joontega paika võllide asukohad. Seejärel paigutati võllidele kastidena hammasrattad ja pörksidurid, üritades neid paigutada võimalikult kompaktselt. Kastskeemilt leiti käigukasti laius, sammuti leiti selle kaudu ka pörksidurite ja hammasrattaste paigutus (joonis 5.1.).

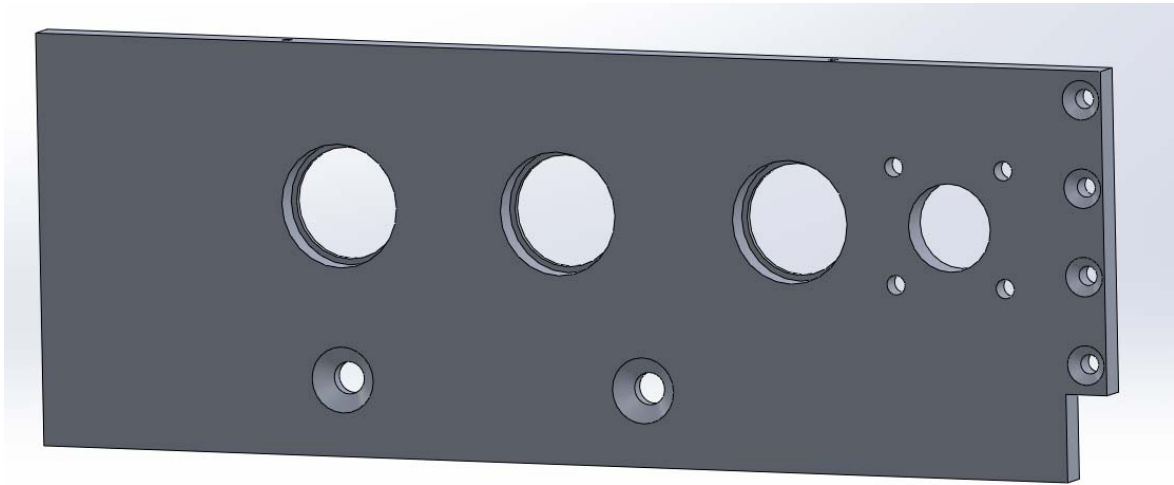


Joonis 5.1. Optimeeritud käigukasti kastskeem.

5.2. Korpused

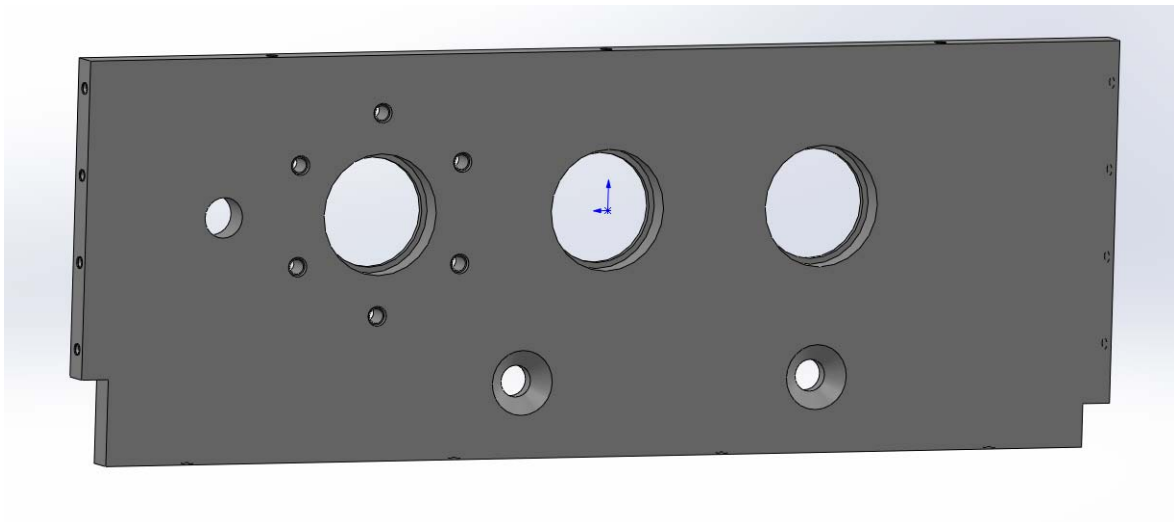
Projekteerimise teise etapina alustati käigukasti detailide projekteerimisega. Projekteerimiseks kasutati raalprojekteerimis tarkvara Solidworks, tehes kõikidest uutest detailidest ja koostudest tehnilisedjoonised (lisa A). Esimesed detailid oli küljepaneelid, millele pandi paika käigukasti võllide asukohad ja tehti nendesse kohtadesse laagripesad 16004 laagritele. Laagrid on paigutatud küljepaneelidesse väljastpoolt sisse, et saaks käigukasti küljed tõmmata omavahel kokku, fikseerides kasti laiuse võllidega. Käigukasti võllidest madalamale on paigutatud hammaslatti tugiteljed, need on fikseeritud käigukasti

küljeplaatide külge M10 peitpea sisekuuskantpoltidega. Vasakpoolse küljeplaadi väliskülge on peitpea M6 poltidega kinnitatud teise käigu lülitamiseks pneumosilinder (joonis 5.2.).



Joonis 5.2. Vasak käigukasti küljeplaat.

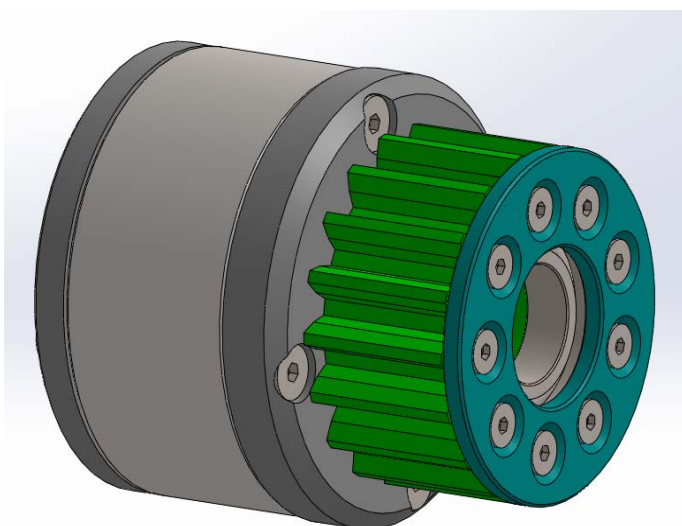
Parempoolse plaadi sisse tehti silindri kinnituse asemele sama silindri otsas paiknevale vardale plastikust Iguse 12 mm sisediameetri ja 14 mm välisdiameetriga äärikuga liugepuski paigutamiseks ava[11]. Ning väljundvõlli laagri ümber on 6xM6 keermestatud avad, kuhu kinnitatakse väljundvõlli lisatugilaagri pesa (joonis 5.3.).



Joonis 5.3. Parem käigukasti küljeplaat.

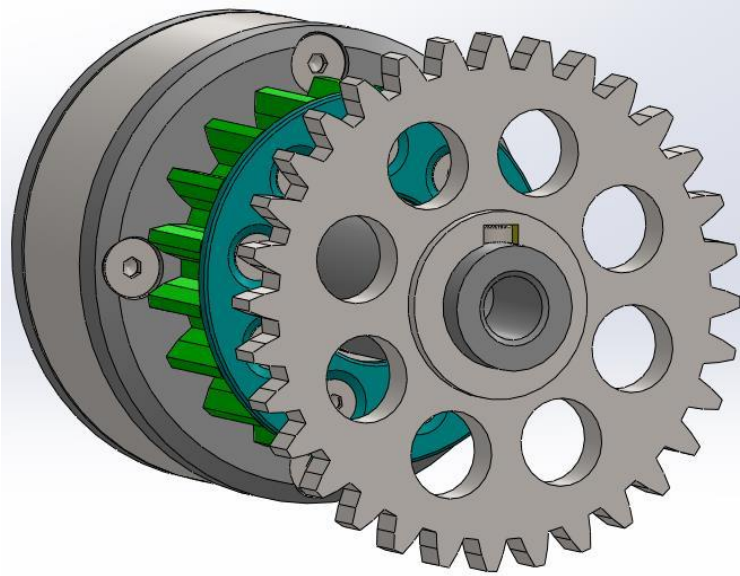
5.3. Esimene võll

Käigukasti esimesel võllil paikneb sisendhammasratta ja pörksiduri paar, mille ülesandeks on üle kanda jõud mootori silindri otsas paikneva hammaslati välja liikumisel. Sisendhammasrataste seest eemaldati plastikust liugelaager, ning asendati kuullaagriga 61904, et vähendada hõõrdetakistust hetkel, kui hammaslatt liigub sisse ja hammasratas pöörleb võlli liikumissuunale vastupidises suunas. Hammasratas ja pörksidur on omavahel ühendatud läbi vaheplaadi, mis on kinnitatud pörksiduri külge M5 peitpeapoltidega ja hammasratta külge M4 peitpea poltide ja 4 mm tihvtidega. Vasakult poolt on pörksiduri külge kinnitatud katteplaat, mille eesmärk on takistada laagri välja tulemist ja saasteainete sattumist laagrisse (joonis 5.5.).



Joonis 5.5. Pörksiduri ja hammasratta paar.

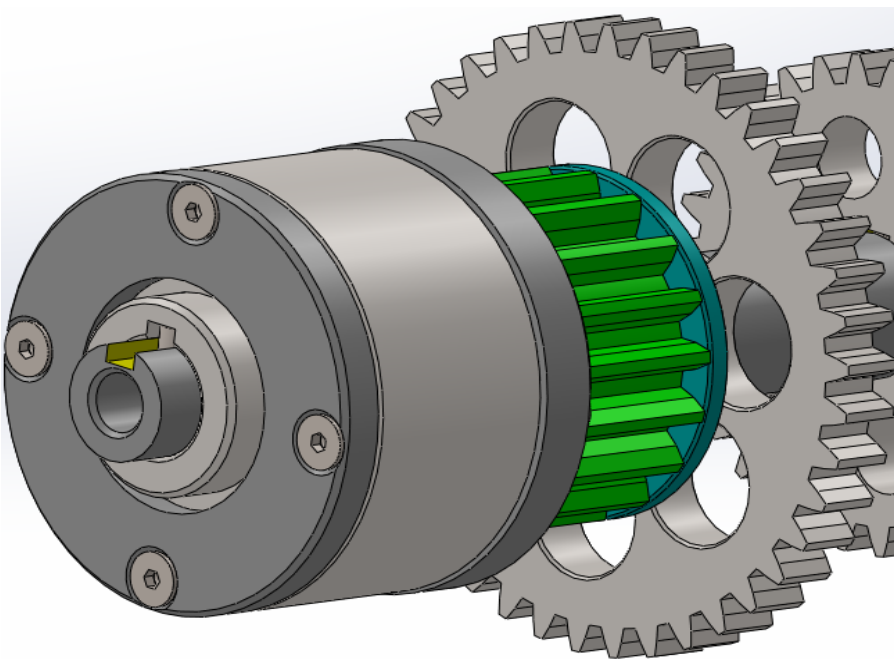
Pörksidur on võllile paigutatud prismaliistuga, mis tuleb paigaldada pärast sisendhammasratta ja pörksiduri paari paigaldamist võllile. Esimese võlli parempoolses otsas on 32 hambaga veohammasratas, mis edastab jõu teisele võllile. See hammasratas on võllile kinnitatud prismaliistuga. Hammasrattale on tehtud massi vähendamiseks avad (joonis 5.6.).



Joonis 5.6. Esimesele võllile paigutatud hammasratas.

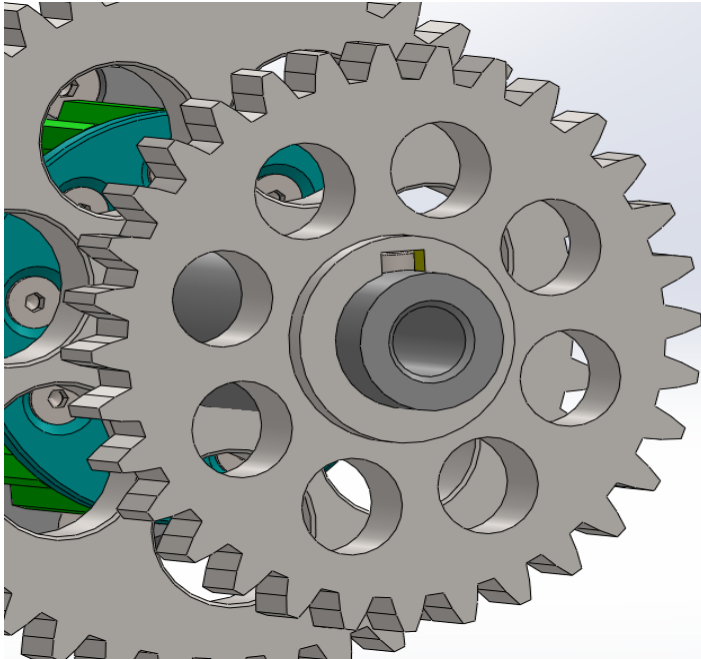
5.4. Teine võll

Käigukasti teise võlli vasakus otsas on samasugune sisendhammasratta ja pörksiduri paar, mille ülesandeks on silindri otsas paikneva hammaslati sisseliikumisel tekkiv jõud üle kanda võllile. Sisendhammasratta ja pörksidurist paremale poole on vaheseibiga eraldatult paigutatud teise käigu hammasratas, mis on võllile kinnitatud prismaliistuga. Teisekäigu hammasrattale on samuti tehtud massi vähendamiseks avad (joonis 5.7).



Joonis 5.7. Teisele võllile paigutatud teise käigu hammasratas.

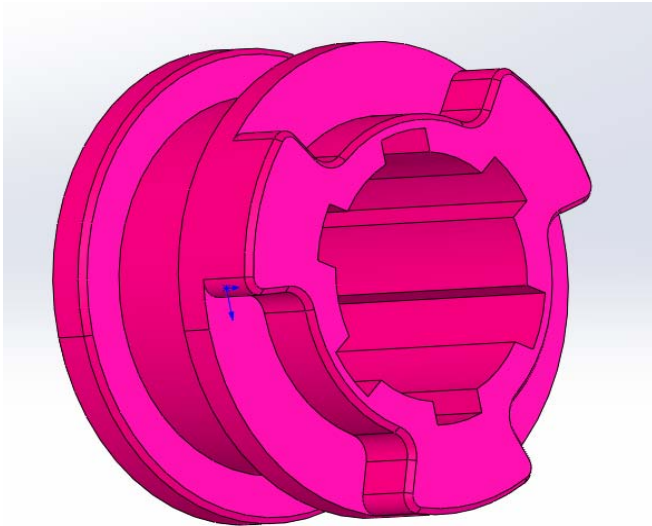
Teise võlli parempoolses otsas on sama hammasratas, mis esimese võlli otsas ning samuti on see kinnitatud võllile prismaliistuga. See hammasratas kannab jõu esimeselt ja teiselt võllilt väljundvõllile (joonis 5.8.).



Joonis 5.8. Teise võlli parempoolses otsas asuv hammasratas.

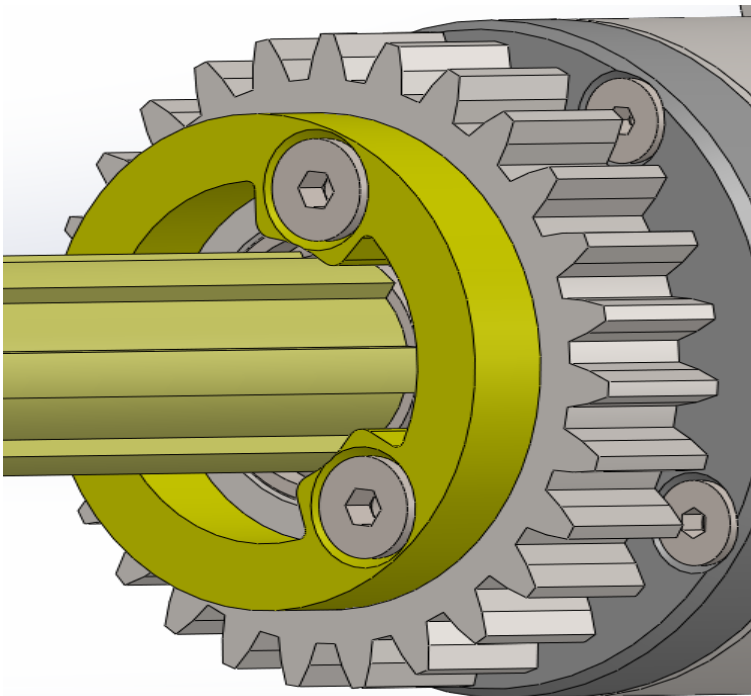
5.5. Väljundvõll

Väljundvõll on valmistatud maedler.de kataloogist võetud KW 25X21X6 nuutvõllist. Selle võlli paremal otsal on 20 mm läbimõõduga pind, millel on prismaliistu jaoks soon, et saaks sinna kinnitada väljundvõlli pikenduse. Nuutvõlli töötlemata osal on teise käigu võlliga sidumiseks nuutpuks, mida aktiveeritakse pneumosilindriga, mille küljes on käigulülituskahvel (joonis 5.9.).



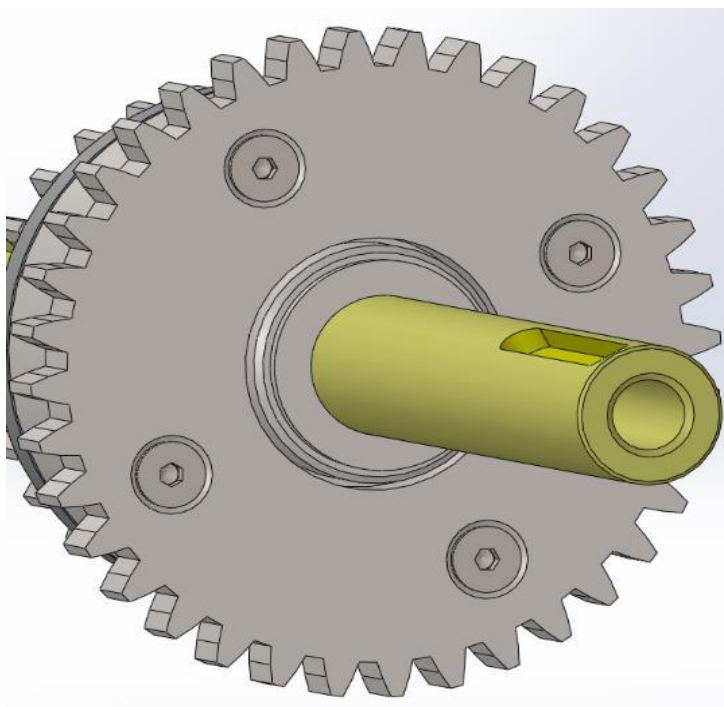
Joonis 5.9. Käigulülituse nuutpuks.

Väljundvõlli vasakul pool on teise käigu väike hammasratas, mis on nuutpuksi abil võlliga seotav. Selle hammasratta sees on 61804 laager, et hammasratas saaks võllil sidumata olekus võllist erineva kiirusega pöörlelda. Hammasrattas olev laager on piiratud ühelt poolt randiga ja teiselt poolt nuutpuksiga haakumiseks mõeldud detailiga (joonis 5.10.).



Joonis 5.10. Teise käigu väikehammasratas.

Liikudes võllil hammasrattast paremale, on vaherõngaga eraldatult pörksiduri ja esimese käigu hammasratta paar. Pörksiduri vasakusse otsa on paigaldatud katteplaat. Paremas otsas on esimese käigu hammasrattas, millele on tehtud tsentreerimiseks ja pörksiduri laagri kaitsmiseks pörksiduri vabastus. Hammasrattas on kinnitatud pörksidurile nelja M5 poldiga (joonis 5.11.).

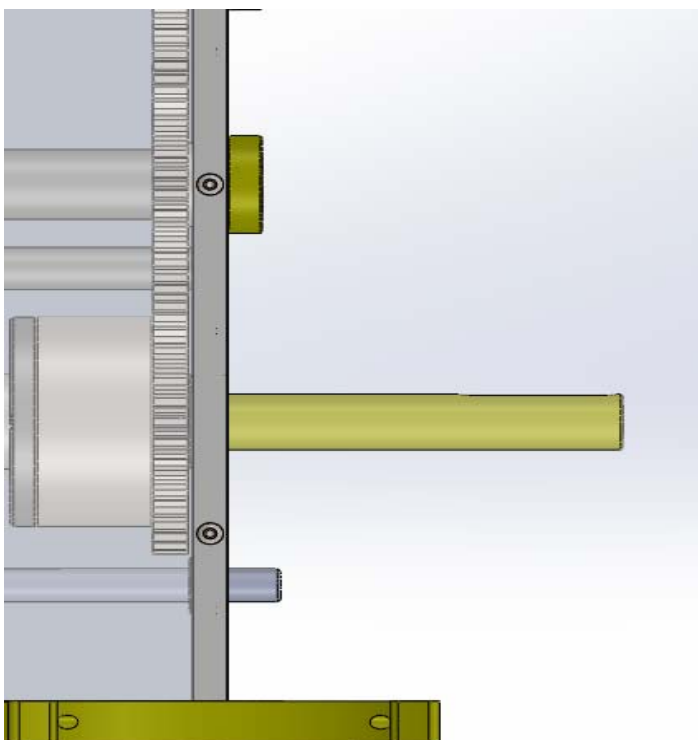


Joonis 5.11. Pörksidurile kinnitatud esimese käigu hammasrattas.

Pörksidur on kinnitatud võllile prismaliistuga. Pörksiduri ja hammasratta paarist paremal, enne laagrit, on paigaldatud 2 mm vaherõngas.

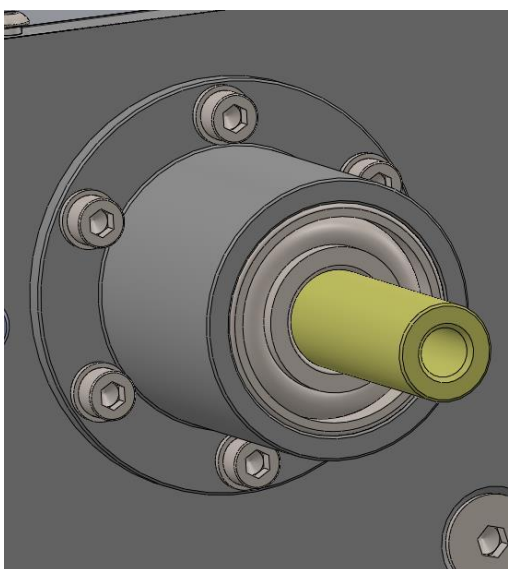
5.6. Lisa tugilaager

Võlli parempoolne ots ulatub käigukasti küljeplaadist 114,5 mm välja, et säiliks ülekande väljundketiratta asukoht (joonis 5.12.).



Joonis 5.12. Käigukasti küljest pikalt väljaulatuv toestamata võlliots.

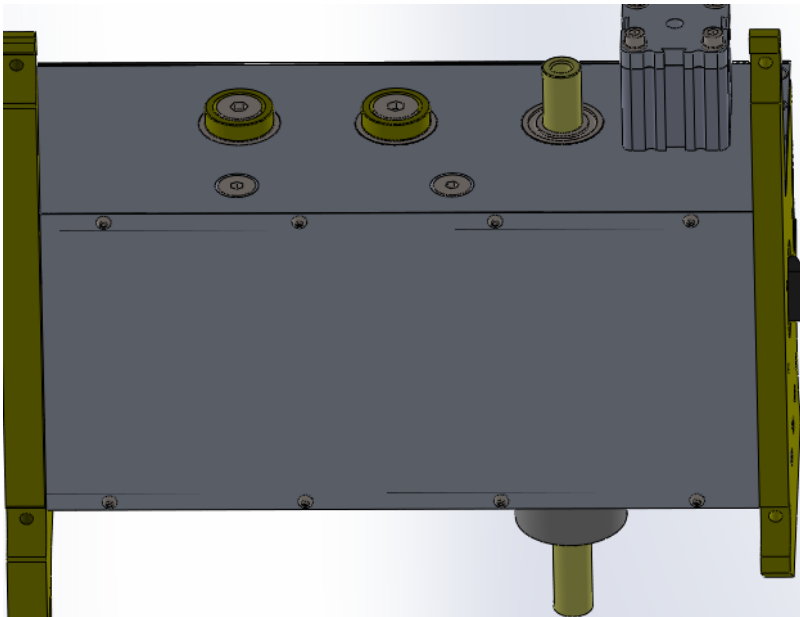
Kuna võll on küljeplaadist pikalt väljas ja toestamata, on jõu ülekandmisel ratastesse oht pikk võlli ots väänata kõveraks. Selle ärahoidmiseks on lisatud küljeplaadi külge tugilaagri pesa koos laagriga 7204 BE. See tugilaager on paigutatud nii, et pörksiduri ja ketiratta paariga saab võlli pingutada vastu laagrit. Samuti hoiab see laagripesa kinni küljeplaadis olevat kuullaagrit (joonis 5.13.).



Joonis 5.13. Tugilaagriga toetatud võlli ots.

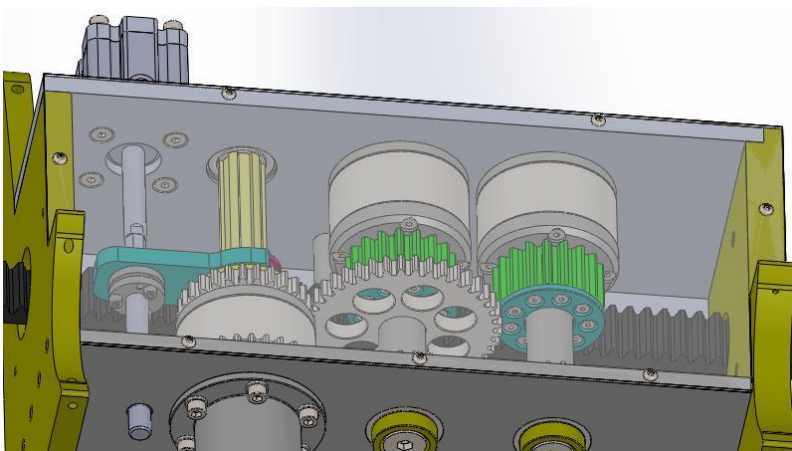
5.7. Ülekande osade kaitsmine

Abrasiivsete saasteainete käigukasti sattumise vältimiseks on käigukast projekteeritud kinniseks. Varem külje- ja otsaplaatides olnud massi vähendamiseks mõeldud avad eemaldati. Lisaks kaetakse kast alt 0,5 mm paksuse alumiiniumlehega, mis kinnitatakse M4 sisekuuskantpoltidega küljeplaatide külge (joonis 5.14.).



Joonis 5.14. Käigukasti põhjaplaat.

Käigukast kaetakse ülevalt 2 mm paksuse akrüüllehega ning kinnitatakse samuti M4 poltidega käigukasti korpuse külge (joonis 5.15.).



Joonis 5.15. Käigukasti ülemine katteplaat.

6. KÄIGUKASTI OPTIMEERIMISE TULEMUSED

6.1. Mass

Käigukasti optimeerimise eesmärgiks oli vähendada käigukasti massi ja suurendada kasutegurit. Massi vähendamiseks muudeti hammasrataste laiust 25 mm-lt 10 mm-le ja vähendati käikude arvu kolmelt käigult kahele käigule.

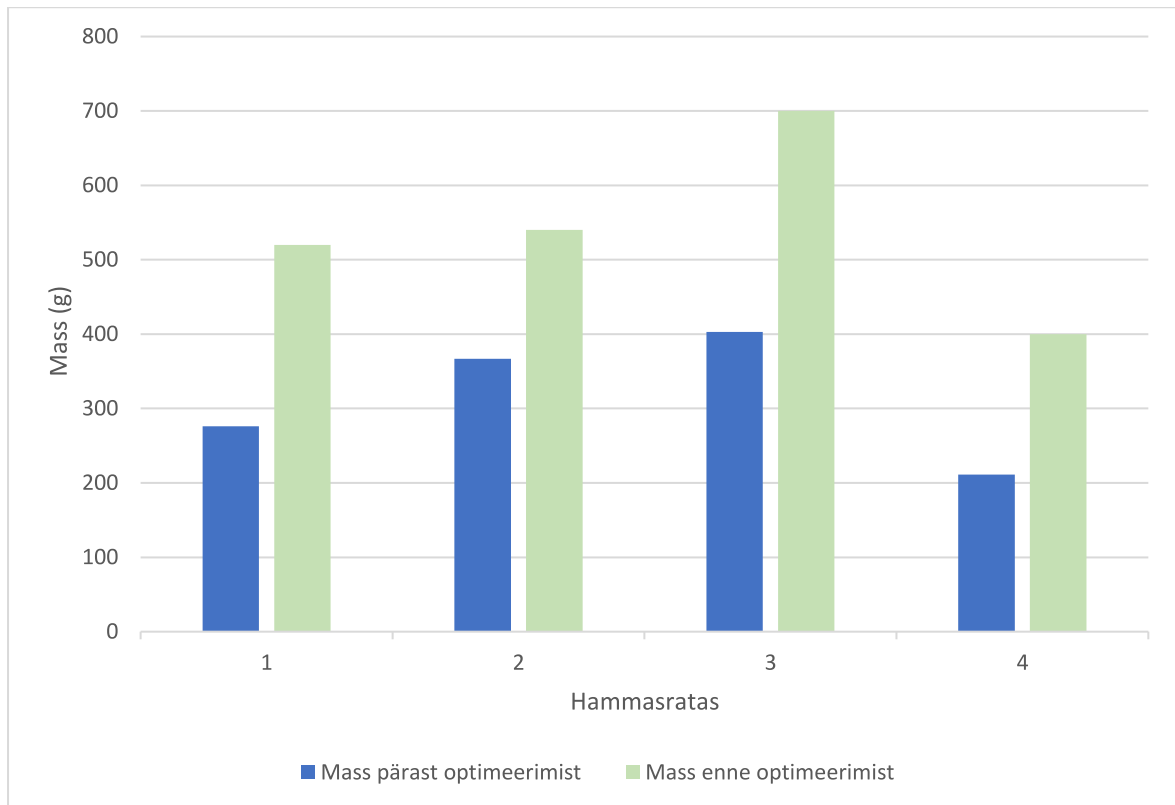
Hammasrataste laiuse muutmise tulemusena saavutati esimesel ja teisel võllil otstes paiknevate hammasrataste massiks 276 grammi ühe hammasratta kohta. Eelnevalt oli selle hammasratta mass 520 grammi. Seega vähenes hammasratta mass 244 grammi, mis on 46% esialgsest massist (joonis 6.1. hammasratas 1).

Esimese käigu hammasratta massiks pärast optimeerimist saadi 367 grammi. Eelnevat oli selle hammasratta mass 540 grammi. Seega vähenes esimese käigu hammasratta mass 173 grammi, mis on 32% esialgsest massist (joonis 6.1. hammasratas 2).

Teise käigu suurhammasratta mass pärast optimeerimist saadi 403 grammi, eelnevalt oli selle hammasratta mass 700 grammi. Seega vähenes teise käigu suurhammasratta mass 297 grammi, mis on 42% esialgsest massist (joonis 6.1. hammasratas 3).

Teise käigu väikehammasratta mass pärast optimeerimist on 211 grammi, eelnevat oli see hammasratta mass 400 grammi. Seega vähenes teise käigu väikehammasratta mass 189 grammi, mis on 47% esialgsest massist (joonis 6.1. hammasratas 4).

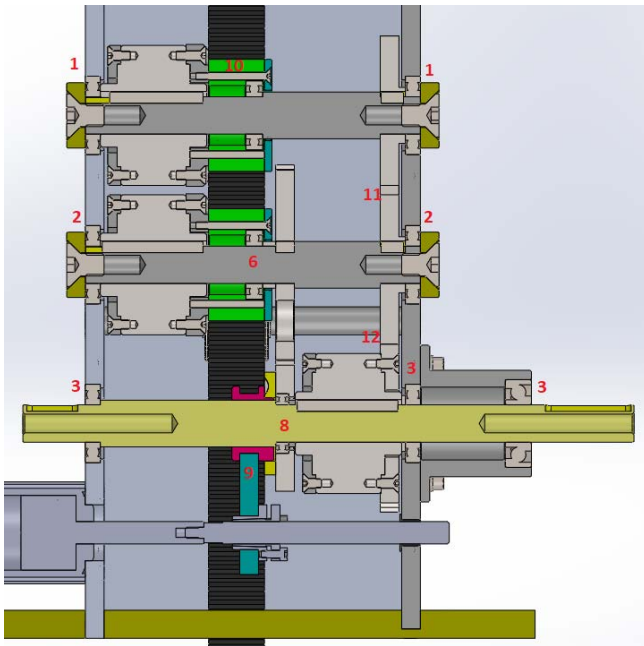
Üleüldine käigukasti mass saavutati 17,1 kg. Hetkel kasutuses oleva käigukasti mass on 19 kg. Seega vähenes käigukasti mass 1,9 kg, mis on 10% varasemast massist. Üleüldise massi vähenemisele aitas lisaks hammasrataste optimeerimisele kaasa ka kolmanda käigu hammasratastepaari ja lülitusmehhanismi eemaldamine, lisaks eemaldati ka üks pörksidur.



Joonis 6.1. Hammasrataste masside võrdlus enne ja pärast optimeerimist.

6.2. Kasutegur

Optimeerimise teiseks eesmärgiks oli suurendada käigukasti kasutegurit. Kasuteguri suurendamise eesmärgina vahetati sisendhammasrataste sees olevad plastikust liugelaagrid kuullaagritega. Kolmanda käigu eemaldamisega kadusid ka kaks veerelaagrite paari, üks põrksidur ja käigulülituse kahvel. Kasuteguri arvutamiseks on välja toodud optimeeritud käigukasti joonis, millele on märgitud numbritega arvutamiseks olulised kohad (joonis 6.2.).



Joonis 6.2. Optimeeritud käigukasti kasuteguri arvutamiseks olulised kohad.

Uue käigukasti kasutegur(η_u) leitakse valemiga(6.1)[9: 19]:

$$\begin{aligned} \eta_u &= \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_6 \cdot \eta_8 \cdot \eta_9 \cdot \eta_{10} \cdot \eta_{11} \cdot \eta_{12} = \\ &= 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,99 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,98 = 0,88 \end{aligned} \quad (6.1)$$

kus η_u on optimeeritud käigukasti summaarne kasutegur;

η_1 -esimese võlli kuullaagrite paari kasutegur;

η_2 -teise võlli kuullaagrite paari kasutegur;

η_3 -väljundvõlli kuullaagrite paari kasutegur;

η_6 -teisel võllil vastupidi liikuva hammasratta liugelaagri kasutegur;

η_8 -väljundvõlli mitteveetava hammasratta kuullaagrite paari kasutegur;

η_9 -teise käigu lülituskahvli kasutegur;

η_{10} -hammaslati ülekanne hammasrattale kasutegur;

η_{11} -hammasrattalt hammasrattale kasutegur;

η_{12} -hammasrattalt hammasrattale kasutegur[9: 19].

Arvutuse tulemusena saadi optimeeritud käigukasti kasuteguriks $\eta_u = 0,88$. Hetkel kasutuses oleva käigukasti kasutegur η_v oli 0,84. Seega on optimeeritud käigukasti kasutegur 5% suurem.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli optimeerida 2021. aasta hooajal kasutuses olnud pneumobile Technics 5 käigukasti. Optimeerimise eesmärgil vähendati käigukasti massi ja suurendati kasutegurit hõõrdumise vähendamiseks. Massi vähendamise eesmärgil muudeti hammasrataste laiust 25 mm-lt 10 mm-le, ning leiti arvutuste abil selliste hammasrataste valmistamiseks sobiv materjal. Saavutades nii arvestatavalt kergemad hammasrattad. Kogu käigukasti mass muutus 10% väiksemaks.

Lisaks eemaldati käigukastist kolmas käik, mille tulemusena muudeti esimese ja teise käigu ülekandesuhteid. Esimese käigu ülekandesuhete muutmise eesmärgiks oli suurendada paigalt liikuma hakkamiseks vajaliku jõudu. Teise käigu ülekande suhte suurendamise eesmärgiks oli varasemalt kasutusel olnud kolmanda käiguga saavutatava kiiruse säilitamine.

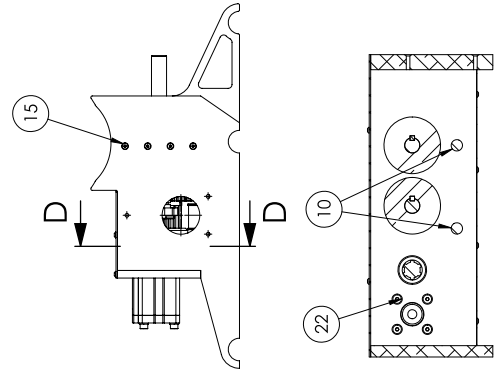
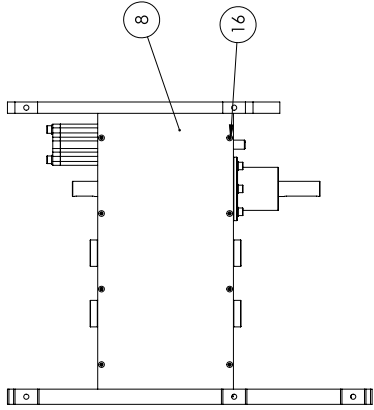
Kasuteguri suurendamiseks vahetati käigukastis olevad liugelaagrid veerelaagritega ning eemaldati üks pörksidur. Selle tulemusena saavutati 5 %-line üldise kasuteguri tõus. Seega saavutati autori poolt püstitatud eesmärgid.

KASUTATUD ALLIKAD

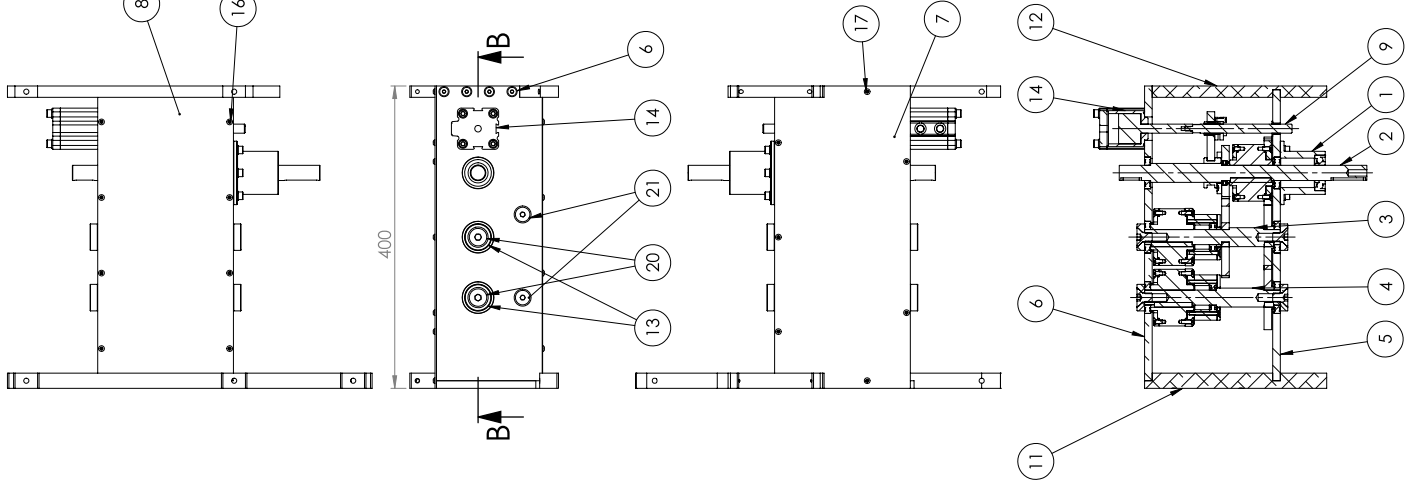
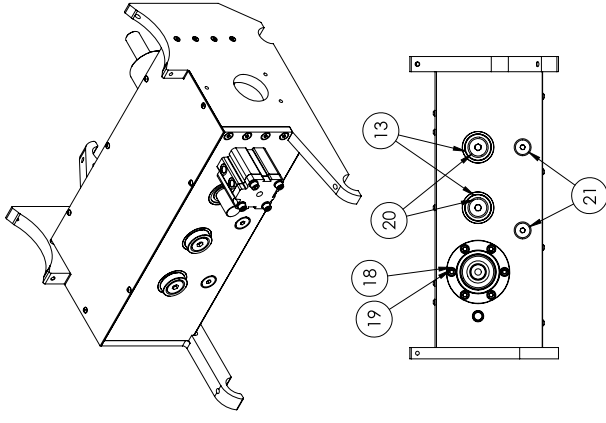
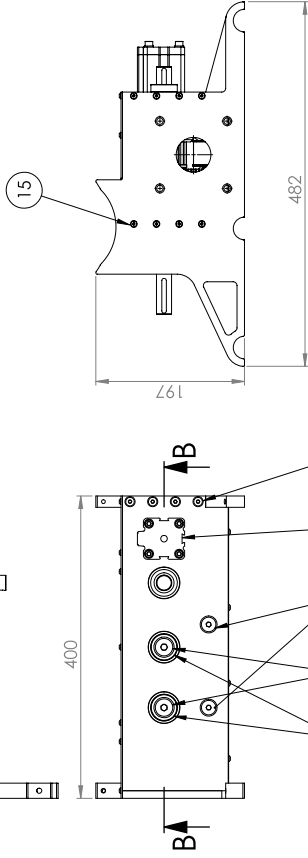
1. „14th International Aventics Pneumobile Competition“ võistluse reeglid (formaad .pdf)
Kättesaadav:
https://en.pneumobil.hu/pneumobile_2021/announcement_and_rules_new_2021/competition_rules_2021 (24.05.2022).
2. Mehaanikainseneri käsiraamat. (2015). Tallinn: TTÜ kirjastus. 492lk.
3. Spur gear made of steel C45 with hub module 2.5 36 teeth tooth width 20mm outside diameter 95mm. [veebileht] <https://maedler.de/Article/23203600> (24.05.2022).
4. Mzeu-20 mm bore cam clutch. [veebileht] <https://chains.ustsubaki.com/item/indexing-overrunning-applications/mzeu-series-basic-type-cam-clutch/mzeu20k> (24.05.2022).
5. Bending strength of spur and helical gears. [veebileht] https://khkgears.net/new/gear_knowledge/gear_technical_reference/bending-strength-of-spur-and-helical-gears.html (24.05.2021).
6. Spur gear made of steel C45 with hub module 2.5 27 teeth tooth width 20mm outside diameter 72.5mm. [veebileht] <https://maedler.de/Article/23202700> (24.05.2022).
7. Spur gear made of steel C45 without hub module 2.5 41 teeth tooth width 20mm outside diameter 107.5mm. [veebileht] <https://maedler.de/Article/24204100> (24.05.2022).
8. Splined shaft similar to DIN 14 profile KW 21X25 x 1000mm long steel C45. [veebileht] <https://maedler.de/Article/64840600> (24.05.2022).
9. **Tiidemann, M.** (2010). Masinaelementide projekteerimise alused. Tallinn: Tallinna Tehnikakõrgkool. 117 lk.
10. JIS SNC815. [veebileht] <https://equivalentmaterials.com/materials/jis-snc815> (24.05.2022).
11. iglidur® G, sleeve bearing with flange, mm. [veebileht] <https://www.igus.ee/product/64?artNr=GFM-1214-11> (22.05.2022).

LISAD

Lisa A. Tehnilised joonised



LÕIGE D-D



SECTION B-B

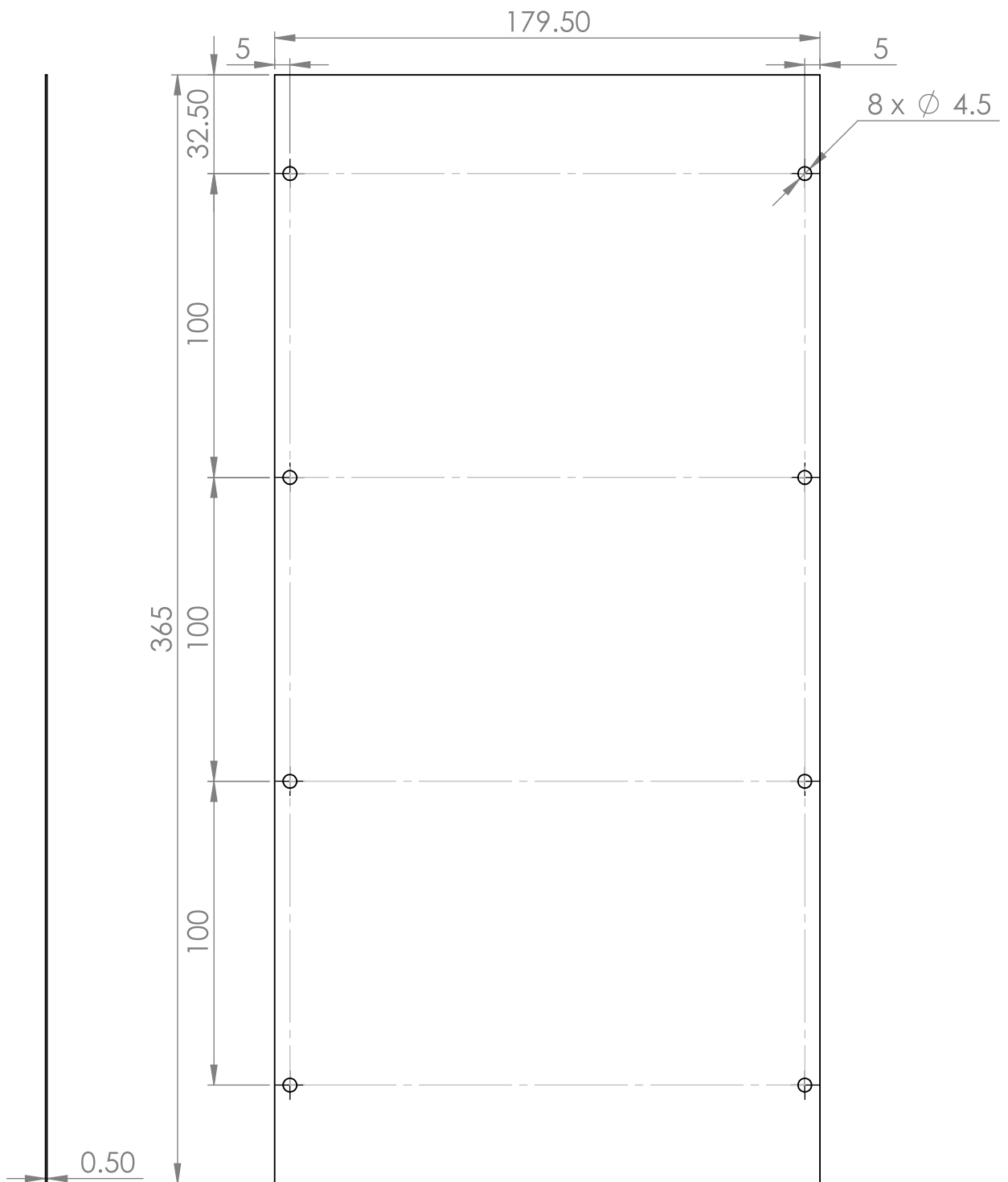
1	Tugilaagri koost	TN 21/170497 A.00.07.00 K	1		
2	Väljundvälli koost	TN 21/170497 A.00.06.00 K	1		
3	Teise välli koost	TN 21/170497 A.00.05.00 K	1		
4	Esimise välli koost	TN 21/170497 A.00.03.00 K	1		
5	Parema küljeplaadi koost	TN 21/170497 A.00.02.00 K	1		
6	Vasaku küljeplaadi koost	TN 21/170497 A.00.01.00 K	1		
7	Ülemine karie plaat	TN 21/170497 A.00.00.02 D	1		
8	Põhjaplaat	TN 21/170497 A.00.00.01 D	1		
9	Kõiguvõlluskahvel	Olemasolevdetail	1		
10	Hammaslati tugi	Olemasolev detail	2		
11	Esimene plaat	Olemasolev detail	1		
12	Tagumine plaat	Olemasolev detail	1		
13	Välli otsaseib	Olemasolev detail	4		
14	Pneumotsilinder	Standard detail	1		
15	Poli ISO 10642-M4x20-20N	Standard detail	12		
16	Poli ISO 7380-M4x8-8N	Standard detail	8		
17	Poli ISO 7380-M4x10-10N	Standard detail	7		
18	Seib ISO 7091-6	Standard detail	6		
19	Poli ISO 4762-M6x16-16N	Standard detail	6		
20	Poli ISO 10642-M12x20-20N	Standard detail	4		
21	Poli ISO 10642-M10x20-20N	Standard detail	4		
22	Poli ISO 10642-M6x25-25N	Standard detail	8		
Osa	Välli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus

Materjal:	Näitamata piirihäbed:	Massi:	Möödi:
	ISO 2768 Fk	17,2kg	1:5



Teostas	Rasmus Lau	Nimetus:	Optimeeritud käigukast
Kontrollis	Aare Aan		
Kinnitas	Aare Aan		

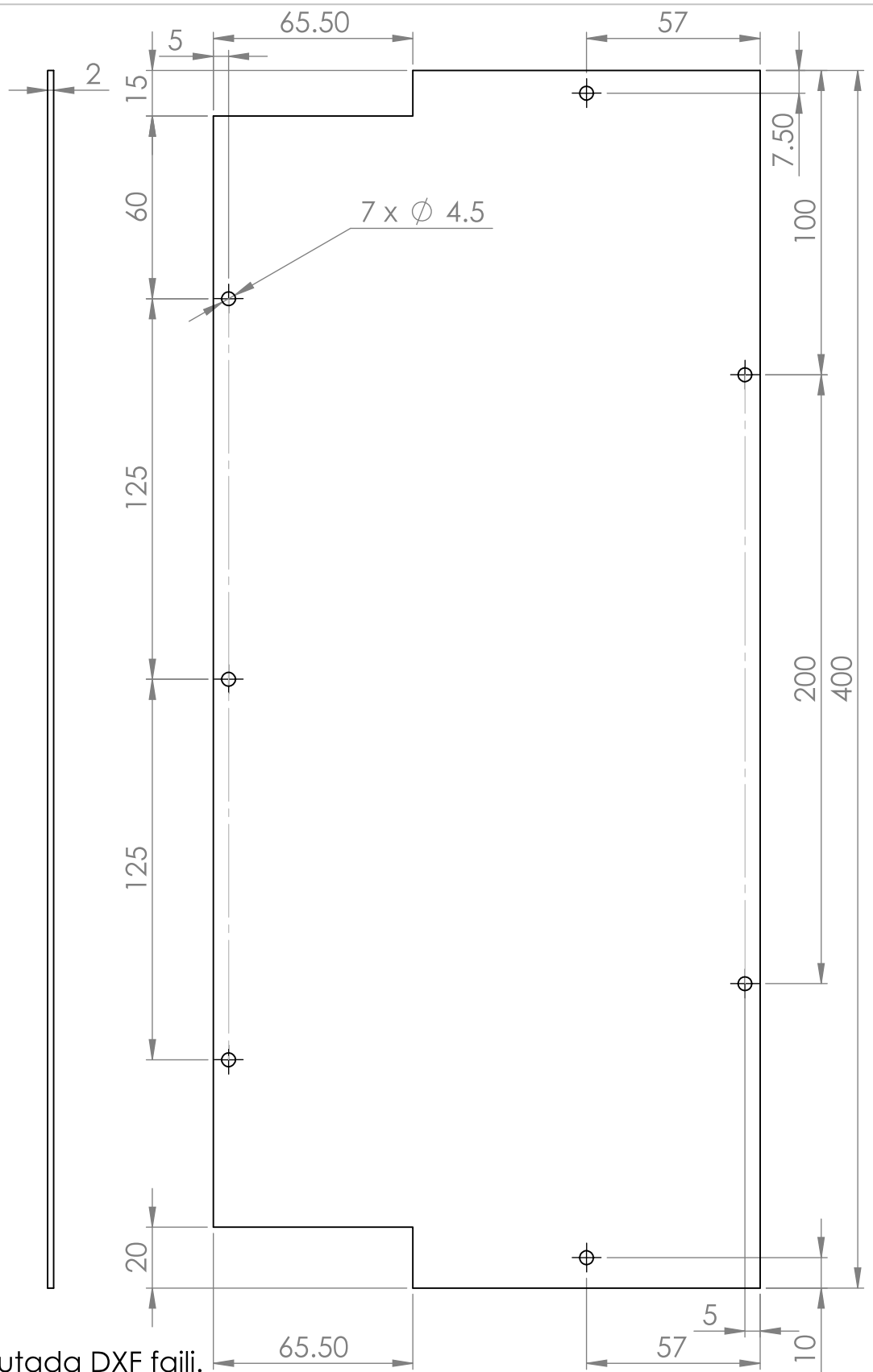
Lehti:	Tähis:	TN 21/170497 A 00.00.00 K
1 / 1		







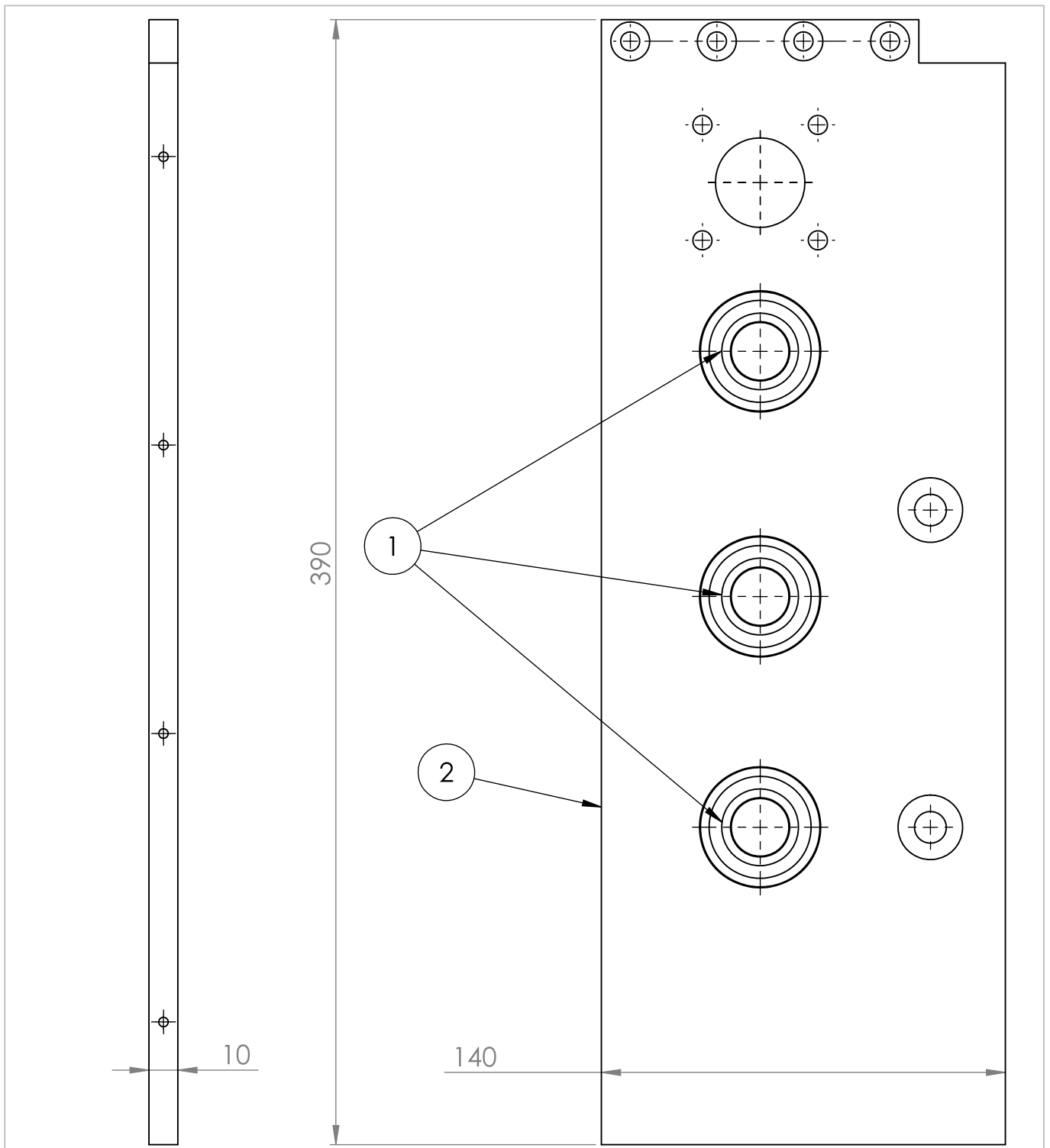
Tootmiseks kasutada DXF faili.

	<i>Materjal:</i> 3.3523 (EN-AW 5052)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.09Kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Põhjaplaat		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
		<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 00 01 D	

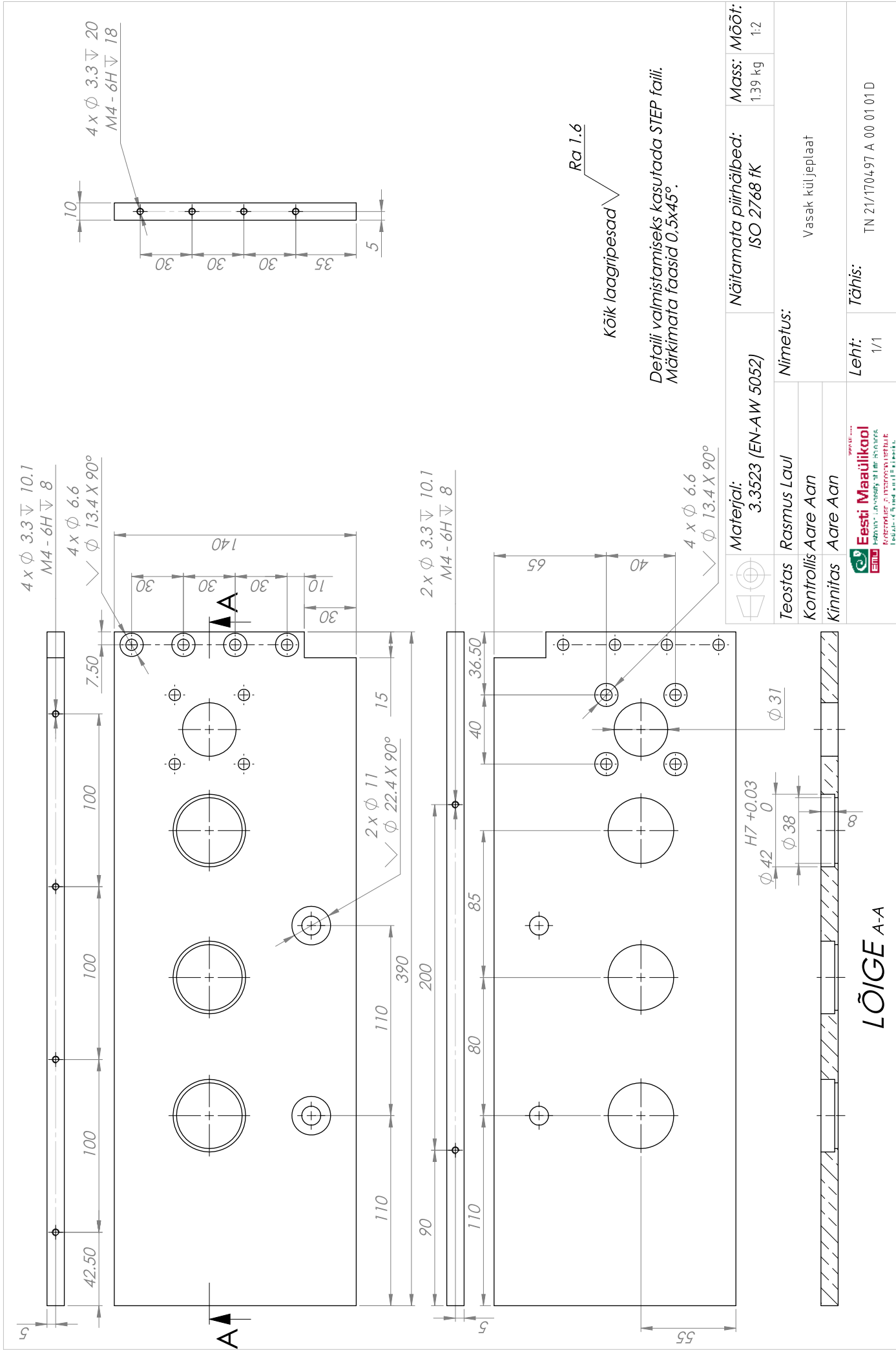


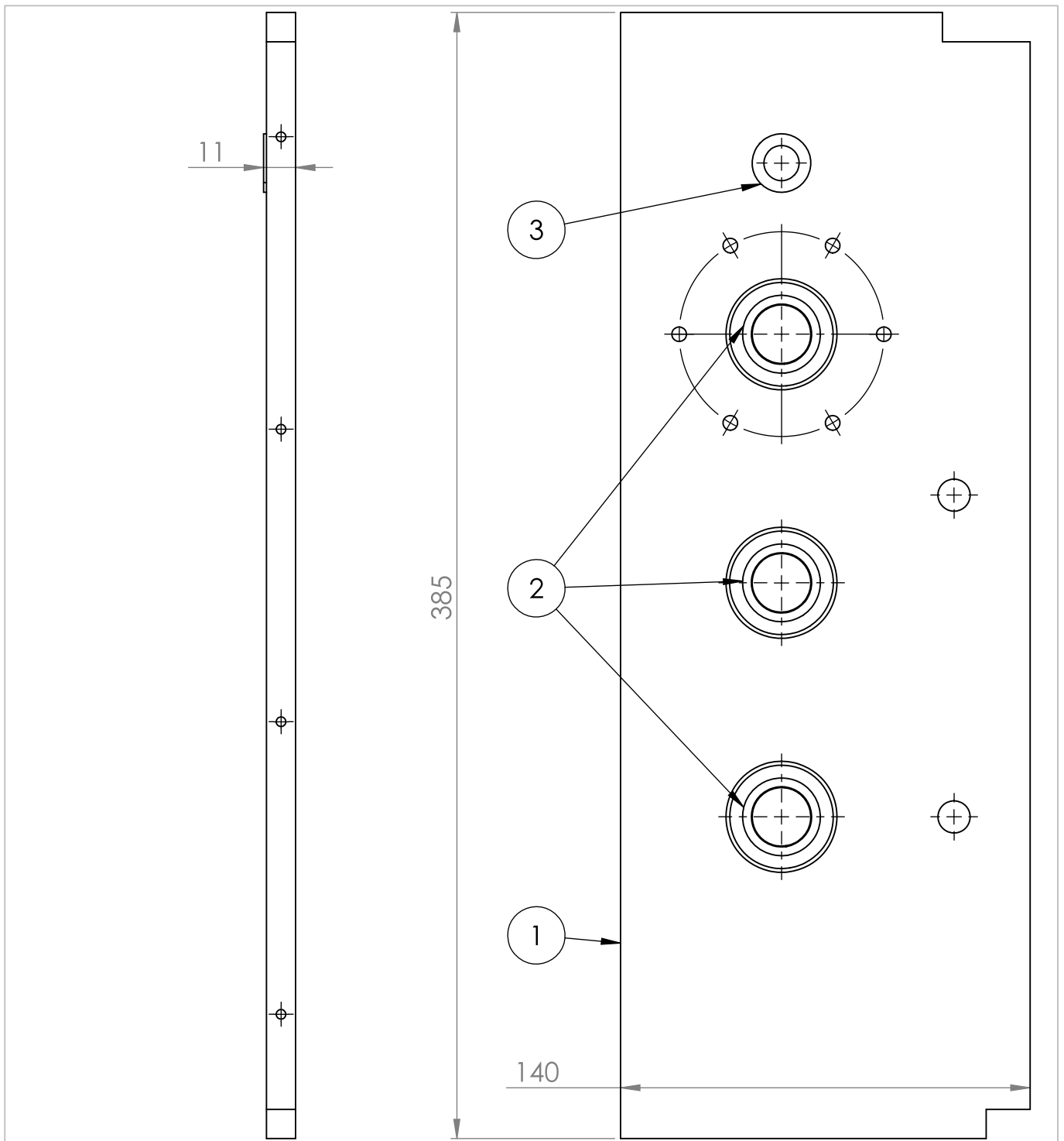
Tootmiseks kasutada DXF faili.

	<i>Materjal:</i> Acrylic (Medium-high impact)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.17Kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Ülemine katte plaat		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
 Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 00 02 D		

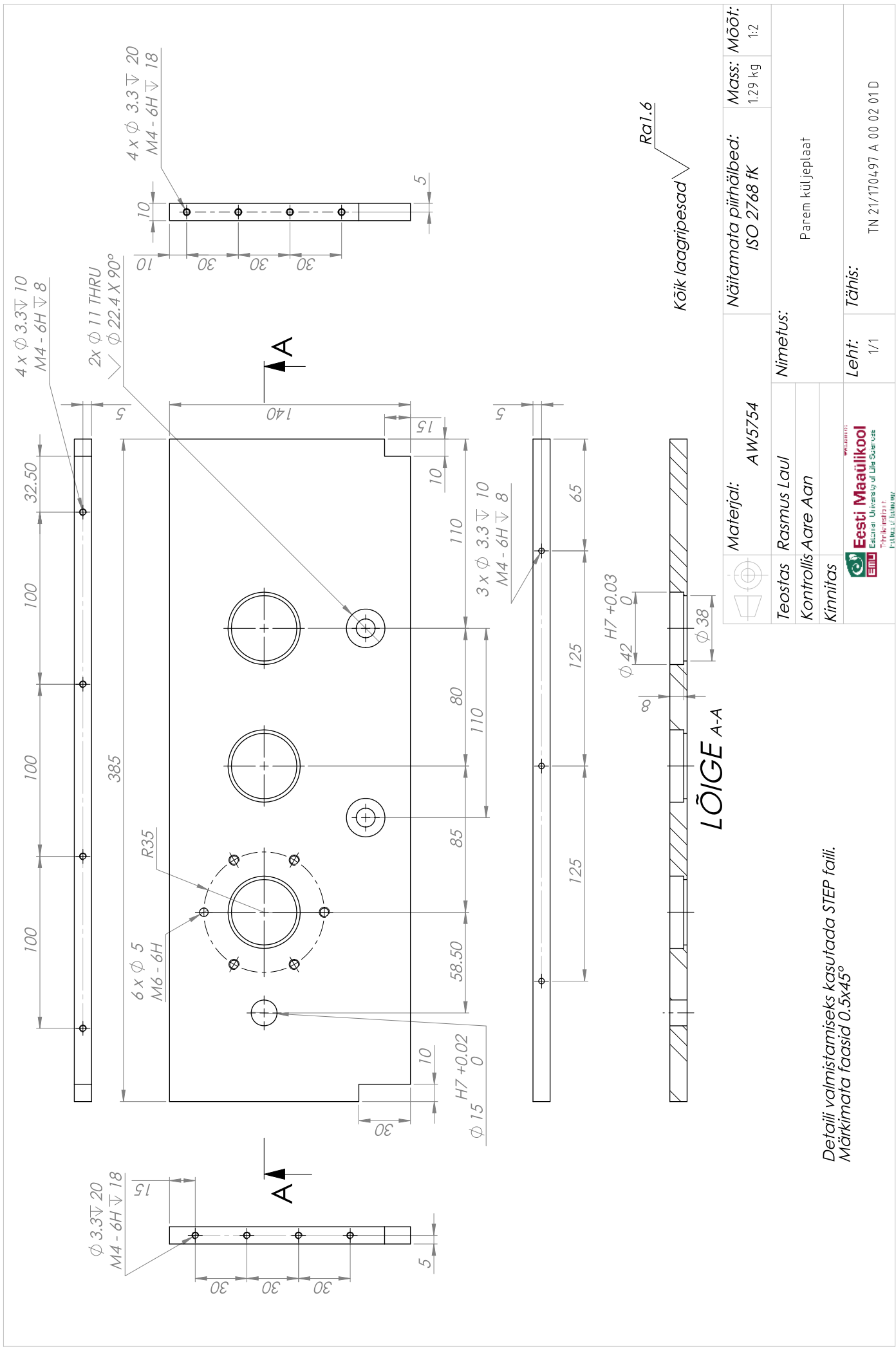


2		Vasak küljeplaat	TN 21/170497 A 00 01 01 D	1	
1		Kuullaager 16004	Standard detail	3	SKF
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
	<i>Materjal:</i>		<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 1.41Kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Vasaku küljeplaadi koost			
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan				
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan				
		Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 01 00 K	





1		Parem küljeplaat	TN 21/170497 A 00 02 01 D	1	
2		Kuullaager 16004	Standard detail	3	SKF
3		GFM_1214_11_1	Standard detail	1	Igus
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
	<i>Materjal:</i>		<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 1.32Kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Parema küljeplaadi koost			
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan				
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan				
Eesti Maaülikool <small>Estonian University of Life Sciences Võtteprodukt ja tootmisprotsessi tehnika Institute of Food and Engineering</small>		<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 02 00 K		

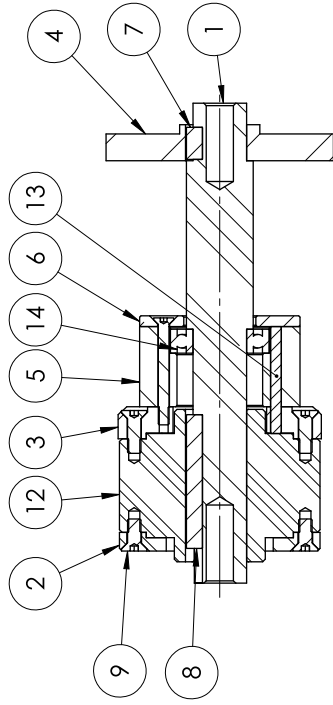
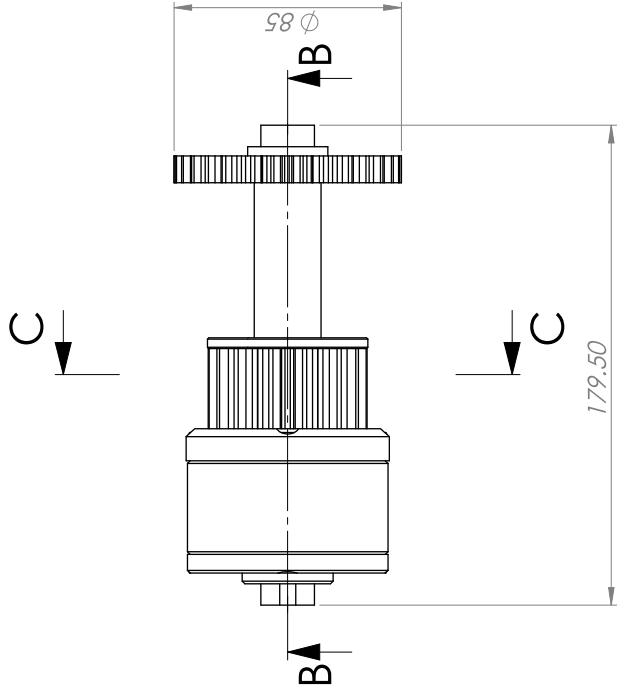


Kõik laagripesad

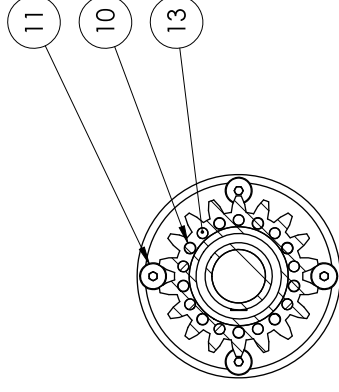
LÕIGE A-A

	Materjal: AW5754	Näitamata piirhälbed: ISO 2768 Fk	Mass: Mõõt: 1.29 kg 1:2
Teostas	Rasmus Laul	Nimeetus: Parem küljeplaat	
Kontrollis	Aare Aan		
Kinnitas		Leht: 1/1	Tähis: TN 21/170497 A 00 02 01 D

Detaili valmistamiseks kasutada STEP faili. Märkimata faasid 0.5x45°



LÕIGE B-B



LÕIGE C-C

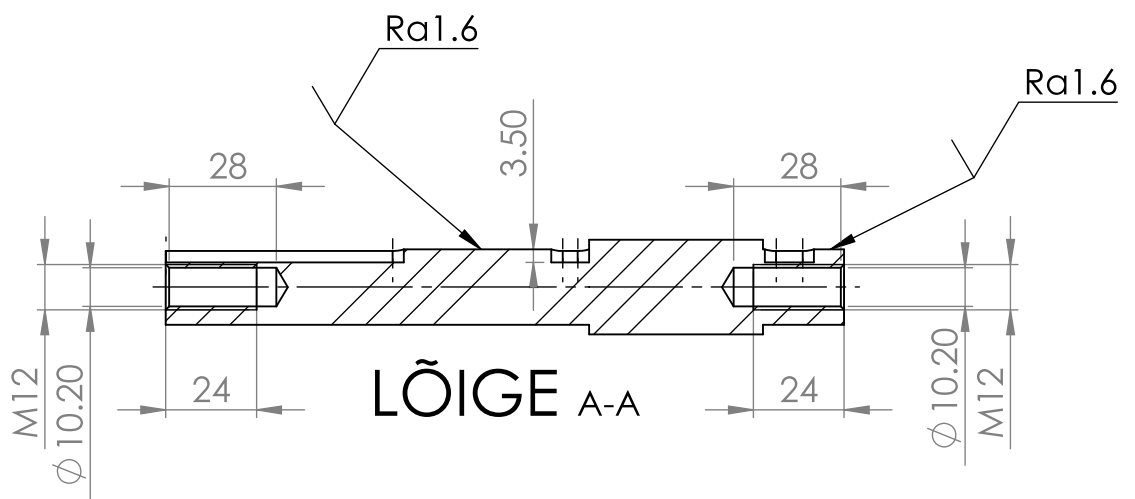
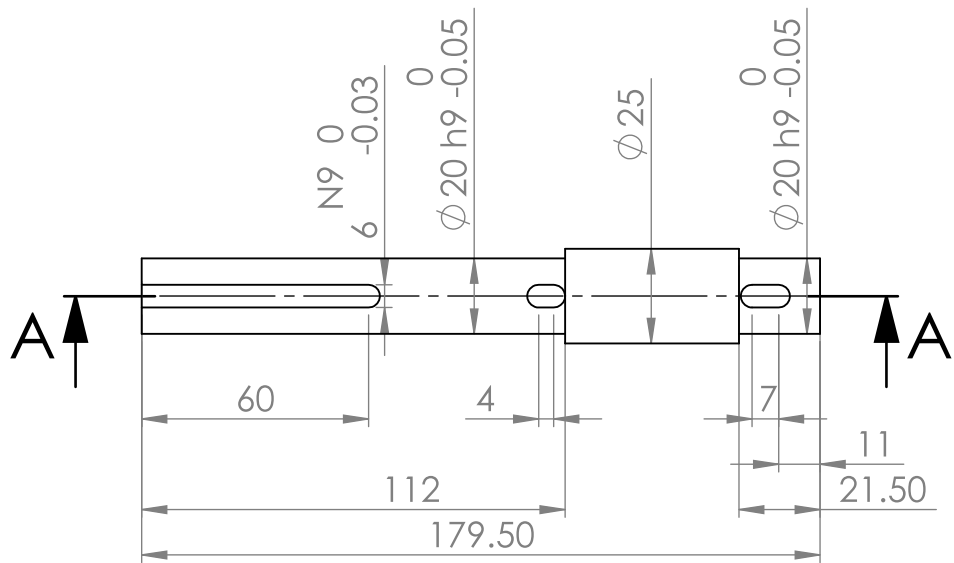
1	Esimene võll	TN 21/170497 A 00 04 01 D	1
2	Põrksiduri kate	TN 21/170497 A 00 04 05 D	1
3	Sisendhammasraffa kinnitus plaad	TN 21/170497 A 00 04 04 D	1
4	Ülekande hammasraffas	TN 21/170497 A 00 04 03 D	1
5	Sisendhammasraffas	TN 21/170497 A 00 04 02 D	1
6	Hammasraffa plaad	Olemasolev detail	1
7	Prismalist DIN 6885-A6x6x12	Standard detail	1
8	Prismalist DIN 6885-A6x6x50	Standard detail	1
9	Polt ISO 10642-M5x12-12N	Standard detail	4
10	Polt ISO 10642-M4x40-20N	Standard detail	9
11	Polt ISO 10642-M5x16-16N	Standard detail	4
12	Põrksidur MZEU 20	Standard detail	1
13	Tihvt ISO 8734-4x40-A	Standard detail	9
14	Kuullaager 61904	Standard detail	1
Osa	Võlli	Nimetus, materjal	Hulk
Material:		Näitamata piirhälbed: ISO 2768 fK	Mass: Mõõt: 2.67 kg 1:2

Teostas	Rasmus Lau	Nimetus:	Esimene võlli koost
Kontrollis	Aare Aan		
Kinnitas	Aare Aan		

Leht: 1/1

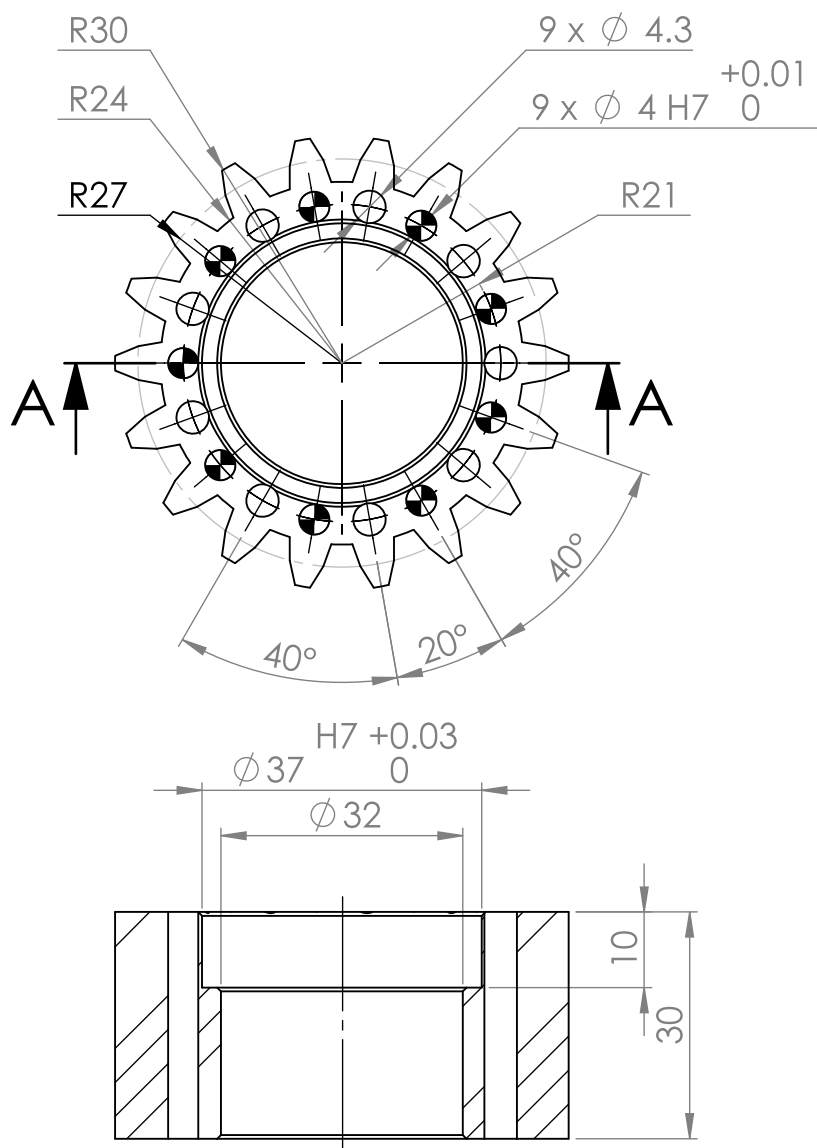
Tähis:

TN 21/170497 A 00 04 00 K



Märkimata faasid 1x45°

	<i>Materjal:</i> 1.0503 (C45)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.45Kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Teine võll		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN21/170497 A 00 05 01 D		

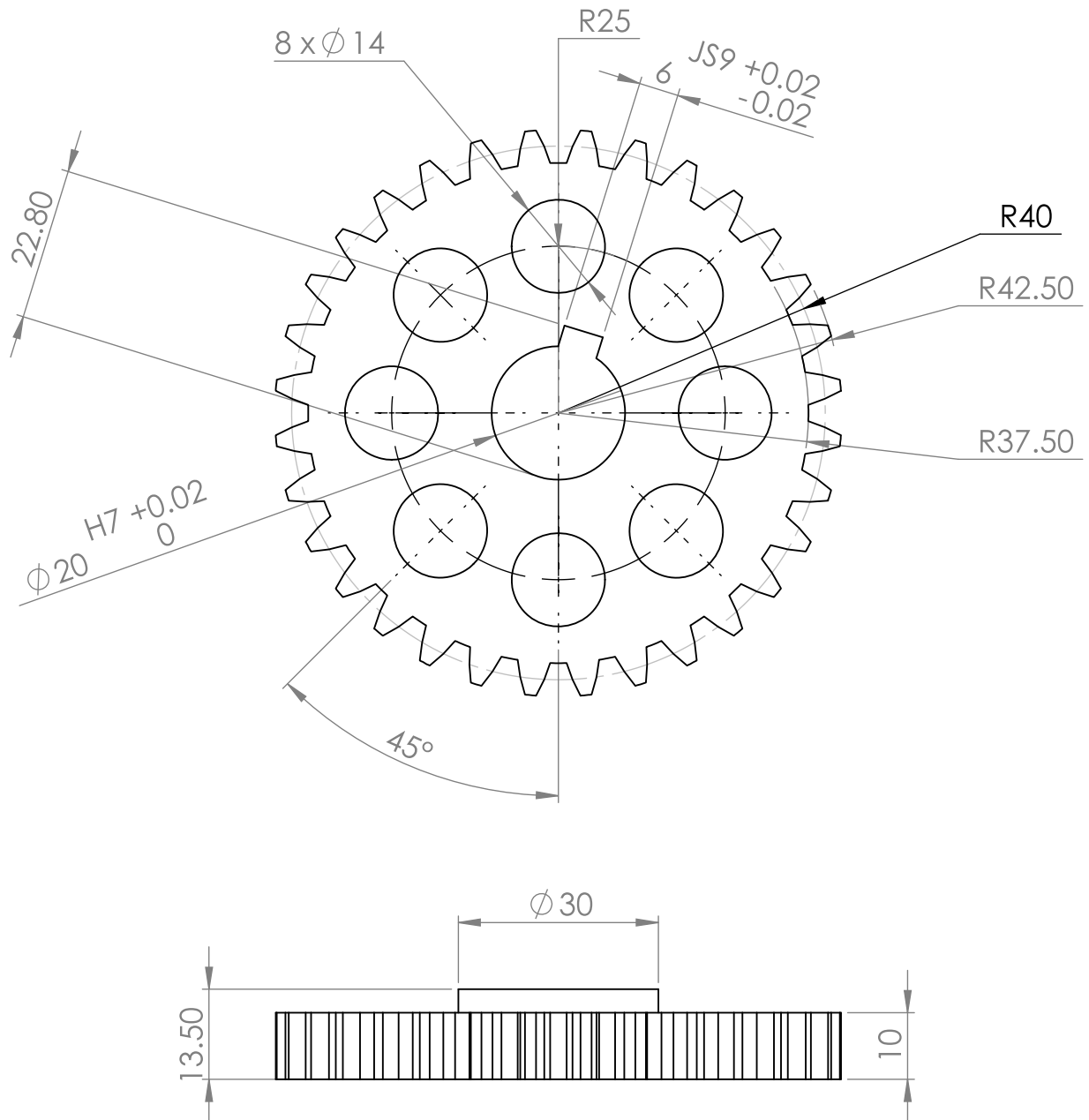


LÕIGE A-A

Laagripesa $\sqrt{\text{Ra 1.6}}$

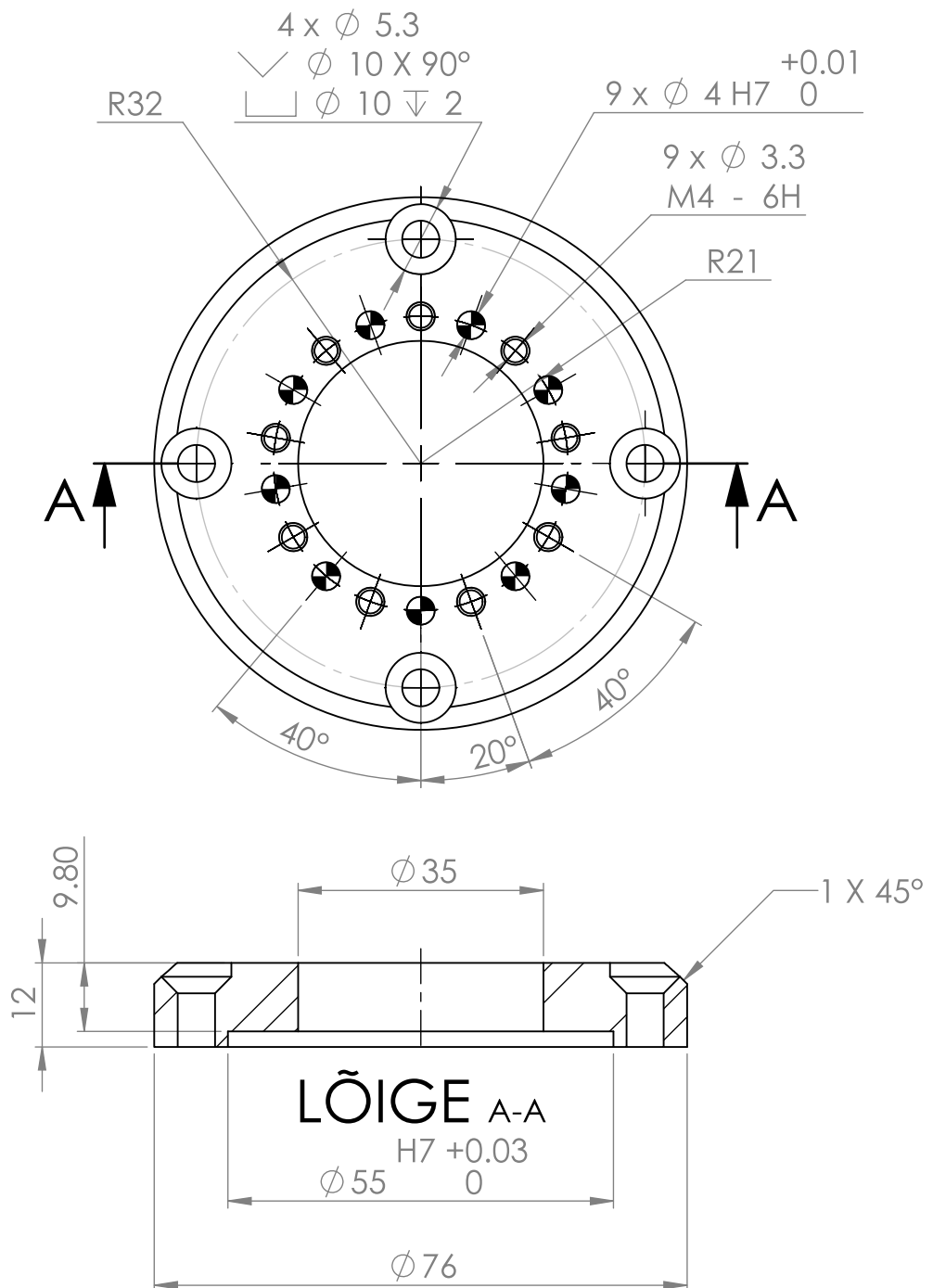
Toorikuks Maedler.de hammasratas tootekoodiga: 24311018
 Hammasratta moodul: 3
 Hammaste arv: 18
 Detaili valmistamiseks kasutada STEP faili.
 Märkimata faasid 0.5x45°

	<i>Materjal:</i> 1.0503 (C45)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.26Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Sisendhammasratas		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 04 02 D		



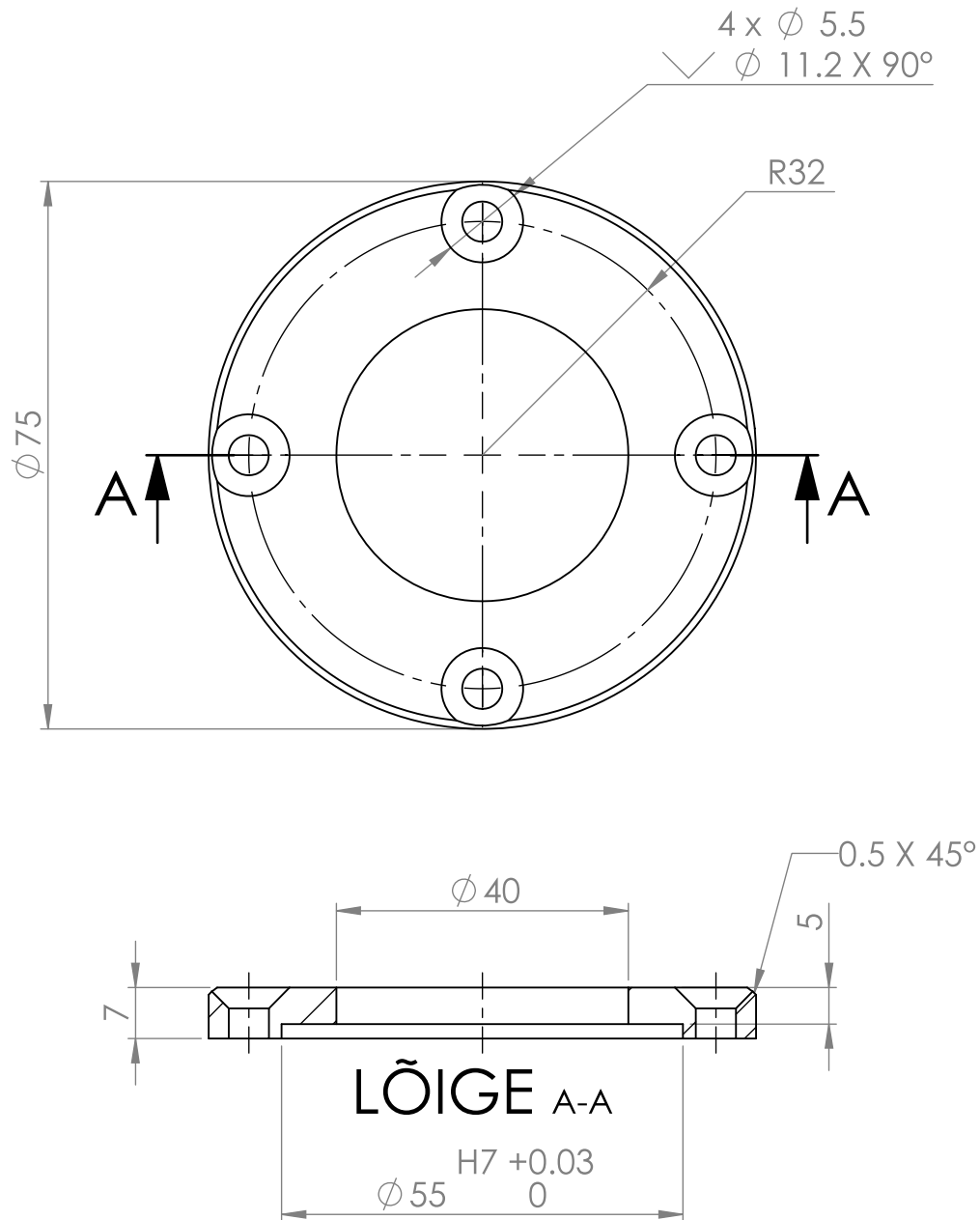
Hammasratta moodul: 2.5
 Hammaste arv: 32
 Detaili valmistamiseks kasutada STEP faili.

	<i>Materjal:</i> 1.5805 (10NiCr5-4)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.28Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Ülekande hammasratas		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 04 03 D	



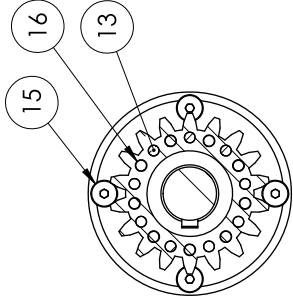
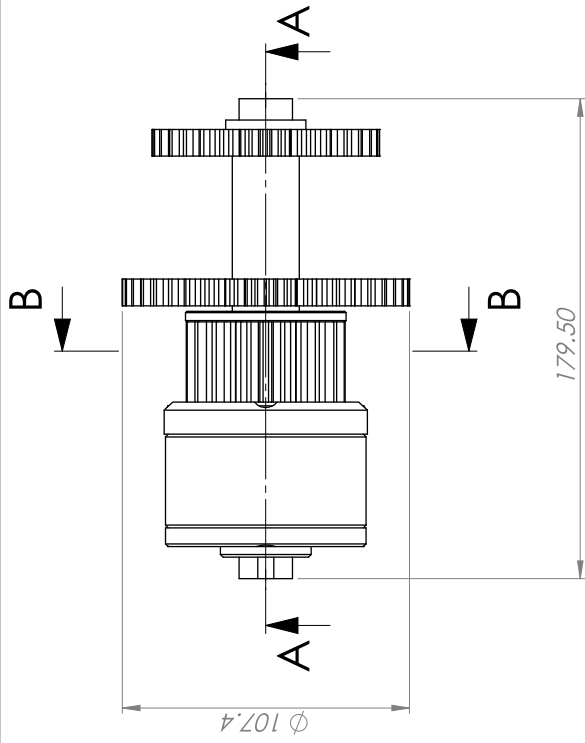
Valmistamiseks kasutada STEP faili.
 Märkimata faasid 0.5x45°

	<i>Materjal:</i> 1.0045 (S355JR)	<i>Näitamata piirhálbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.27Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Sisendhammasratta kinnitus plaat		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 04 04 D	



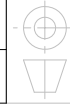
Setaali valmistamiseks kasutada STEP faili.
 Märkimata faasid 0.5x45°

	<i>Materjal:</i> 1.0045 (S355JR)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.15Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Põrksiduri kate		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 04 05 D	



LÕIGE B-B

1	Teine völli	TN21/170497 A 00 05 01 D	1
2	Teise völli vaheerõngas	TN 21/170497 A 00 05 03 D	1
3	Teise kõigu suurhammasratas	TN 21/170497 A 00 05 02 D	1
4	Põrksiduri kate	TN 21/170497 A 00 04 05 D	1
5	Sisendhammasraatta kinnitus plaat	TN 21/170497 A 00 04 04 D	1
6	Ülekande hammasratas	TN 21/170497 A 00 04 03 D	1
7	Sisendhammasratas	TN 21/170497 A 00 04 02 D	1
8	Hammasraita plaat	Olemasolev detail	1
9	Prismalist DIN 6885-A6x6x54	Standard detail	1
10	Prismalist DIN 6885-A6x6x12	Standard detail	1
11	Prismalist DIN 6885-Ax6x10	Standard detail	1
12	Kuullaaager 61904	Standard detail	1
13	Tihvt ISO 8734-4x40-A	Standard detail	9
14	Põrksidur MZEU 20	Standard detail	1
15	Polt ISO 10642-M5x16-16N	Standard detail	4
16	Polt ISO 10642-M4x40-20N	Standard detail	9
17	Polt ISO 10642-M5x12-12N	Standard detail	4
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis



Materjal:

Näitamata piirhälbed:
ISO 2768 fK

Mass: Mõõt:
3,06 kg
1:2

LÕIGE A-A

Teostas Rasmus Lauul

Kontrollis Aare Aan

Kinnitas Aare Aan

Nimetus:

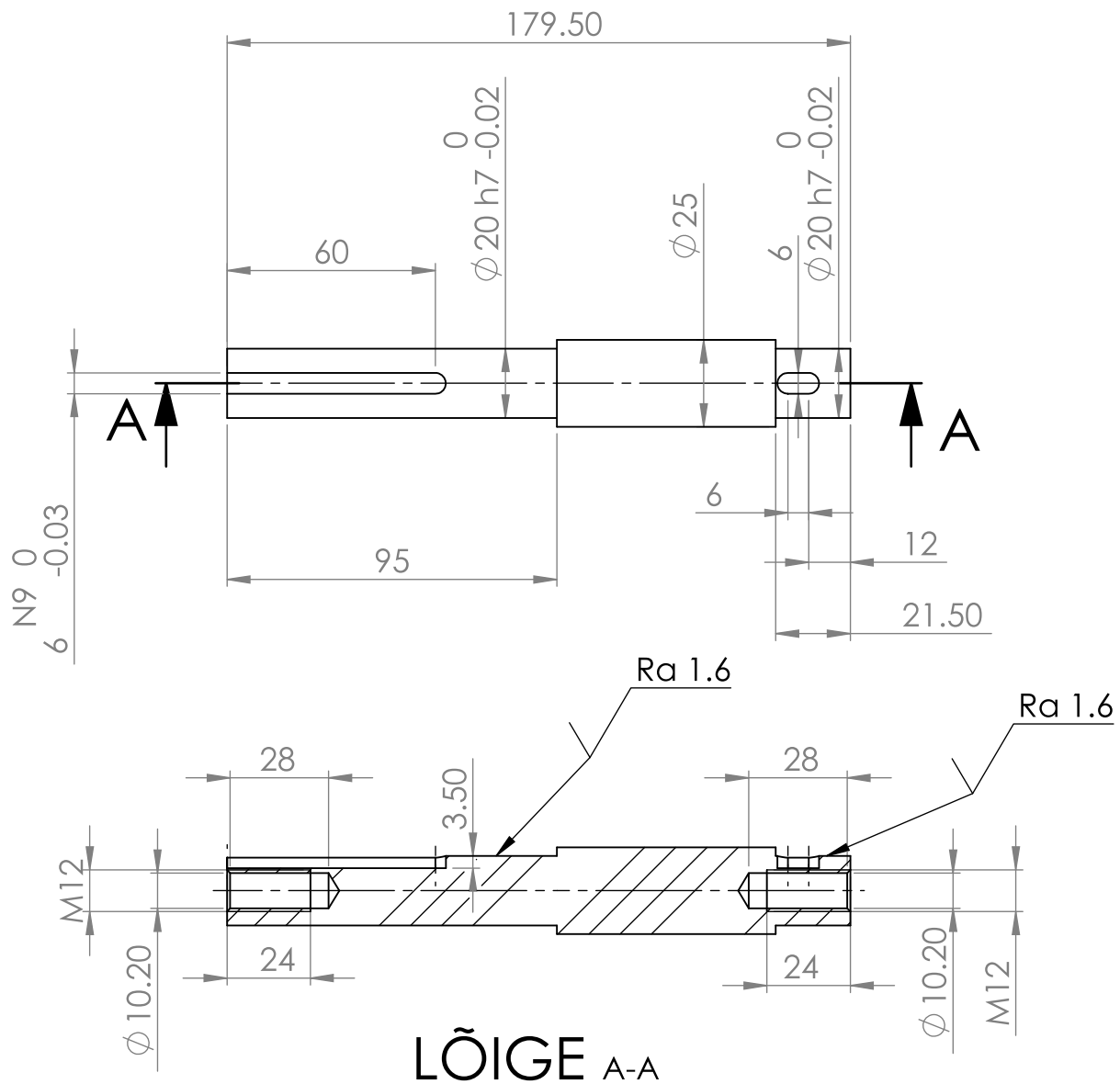
Teise völli koost



Leht:
1/1

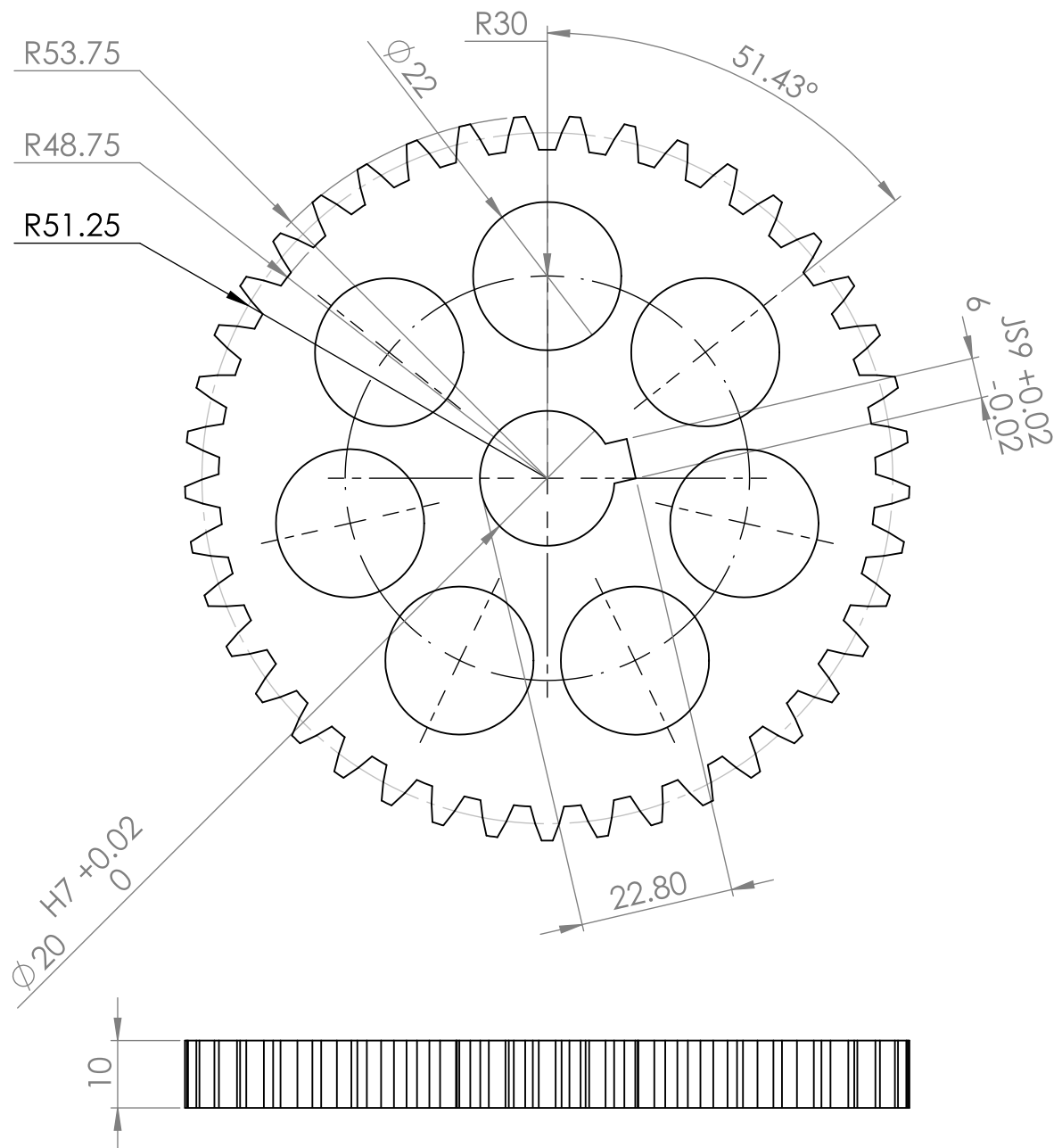
Tähis:

TN 21/170497 A 00 05 00 K



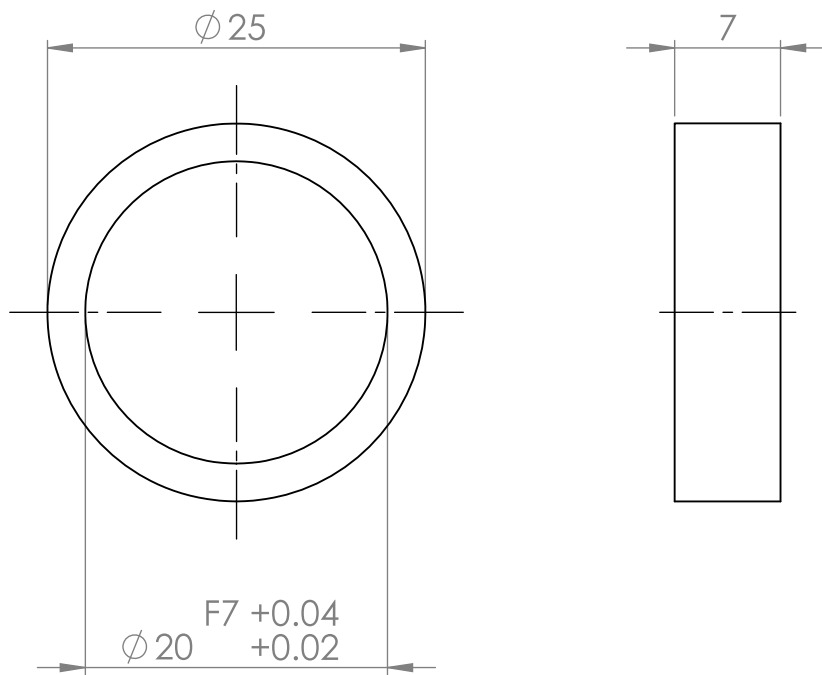
Kõik märkimata faasid 1X45°

	<i>Materjal:</i> 1.0503 (C45)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.48Kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Esimene võll		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 04 01 D		





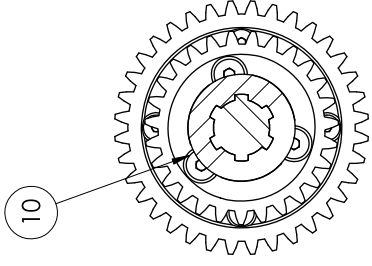
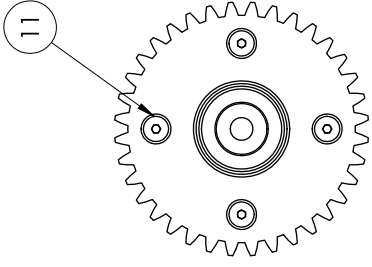
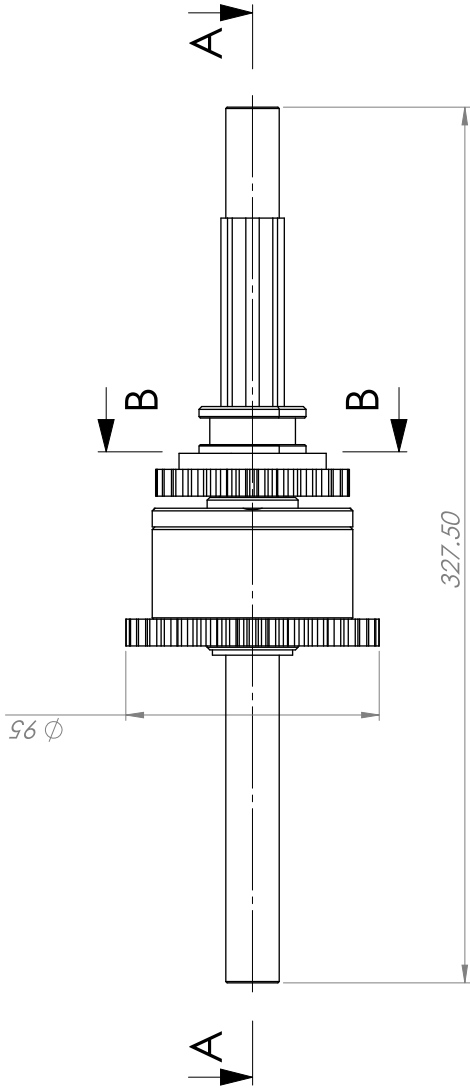
Hammasratta moodul: 2.5
 Hammaste arv: 41
 Detaili valmistamiseks kasutada STEP faili.

	<i>Materjal:</i> 1.5805 (10NiCr5-4)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.40Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Teise käigu suurhammasratas		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 05 02 D		



Märkimata faasid 0.25x45°

	<i>Materjal:</i> 1.0045 (S355JR)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.01Kg	<i>Mõõt:</i> 2:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Teise võlli vaherõngas		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
 Eesti Maaülikool <small>Estonian University of Life Sciences Kehteränne, Jämsa maakond, Eesti Vabariik Institute of Food and Engineering</small>		<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 05 03 D	



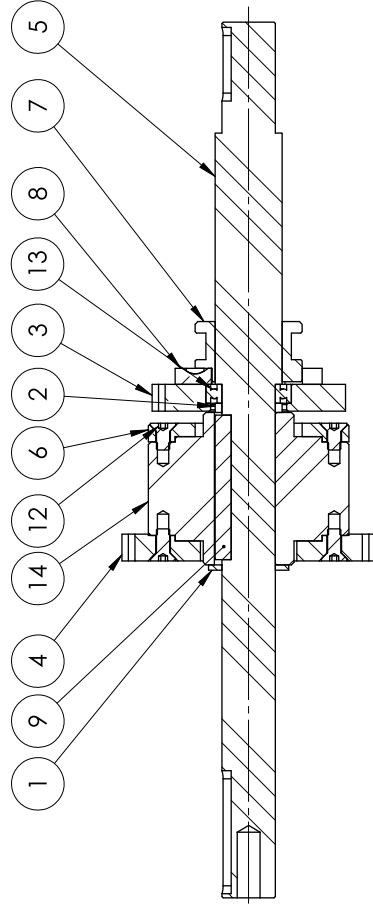
LÕIGE B-B

1	Väljundvõlli vaherõngas 2	TN 21/170497 A 00 06 05 D	1
2	Väljundvõlli vaherõngas 1	TN 21/170497 A 00 06 04 D	1
3	Teise käigu väikehammasratas	TN 21/170497 A 00 06 03 D	1
4	Esimese käigu hammasratas	TN 21/170497 A 00 06 02 D	1
5	Väljundvõlli	TN 21/170497 A 00 06 01 D	1
6	Põrksiduri kate	TN 21/170497 A 00 04 05 D	1
7	Nuutpüks	Olemasolev detail	1
8	Nuutpüksivastus	Olemasolev detail	1
9	Prismallist DIN 6885-A6x6x54	Standard detail	1
10	Polt ISO 10642-M6x12-12N	Standard detail	3
11	Polt ISO 10642-M5x12-12N	Standard detail	4
12	Polt ISO 10642-M5x10-10N	Standard detail	4
13	Kuullager 61804	Standard detail	1
14	Põrksidur MZEU 20	Standard detail	1
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Hulk
		Materjal:	Näitamata piirhälbed:
			ISO 2768 fK
			Mass: Mõõt:
			2.94 kg 1:2

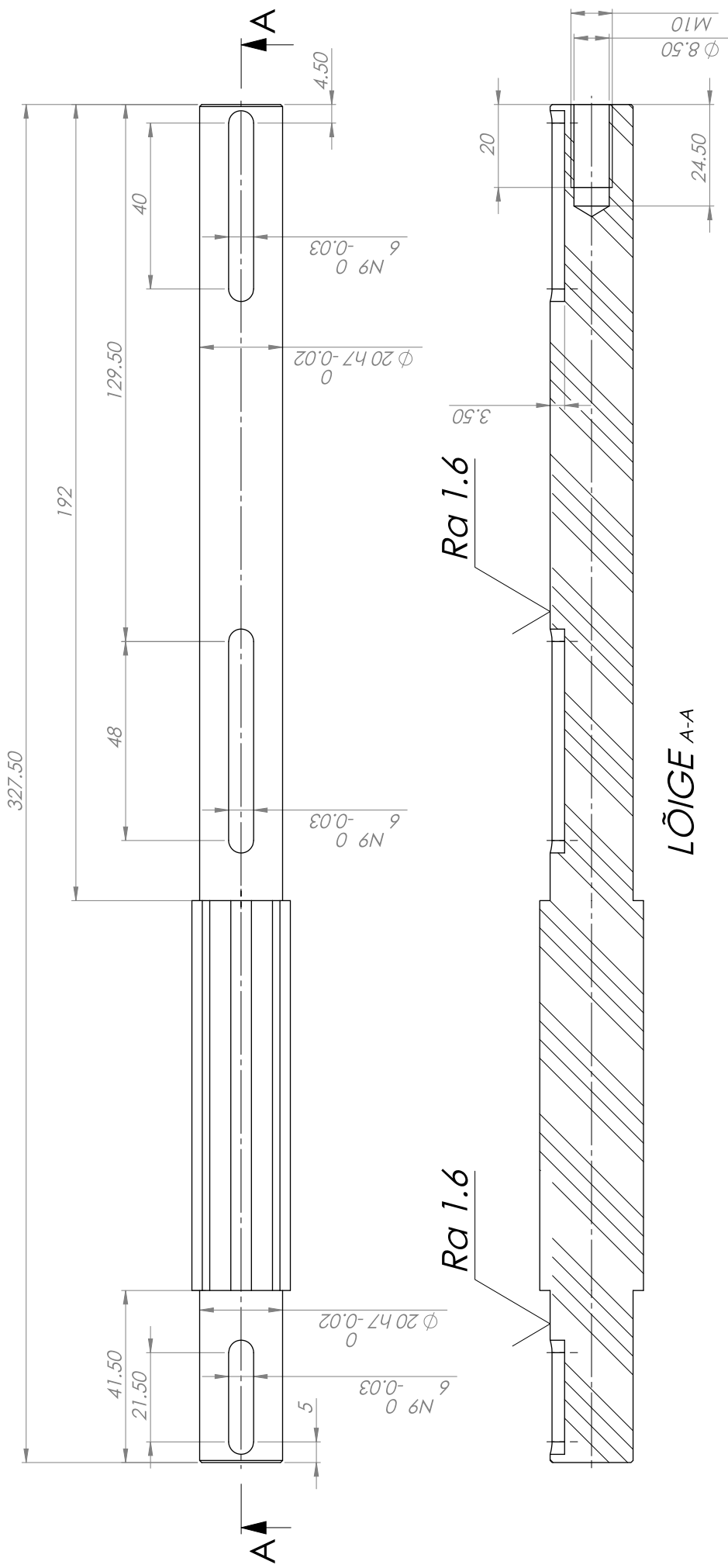


Teostas	Rasmus Laul	Nimetus:	Väljundvõlli koost
Kontrollis	Aare Aan		
Kinnitas	Aare Aan		

Leht:	Tähis:
1/1	TN 21/170497 A 00 06 00 K



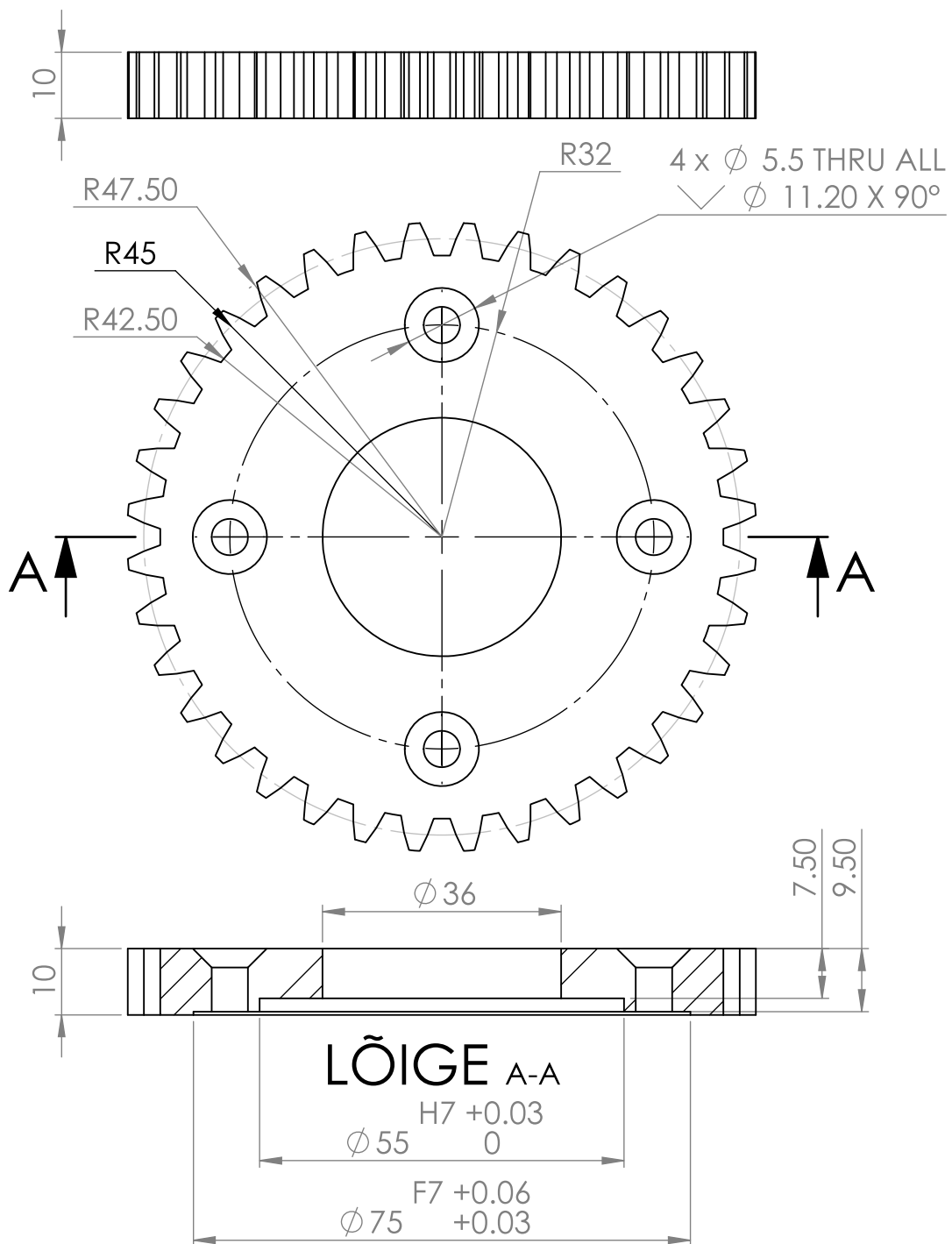
LÕIGE A-A



LÕIGE A-A

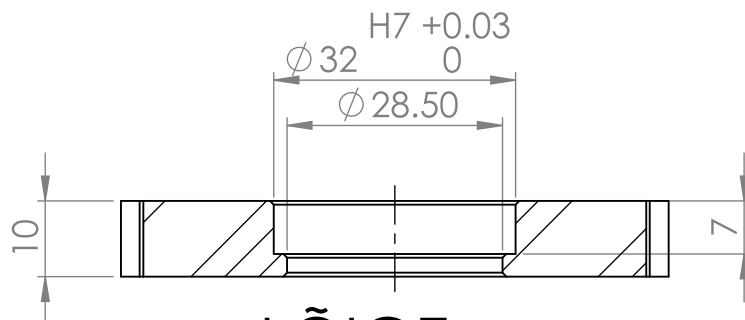
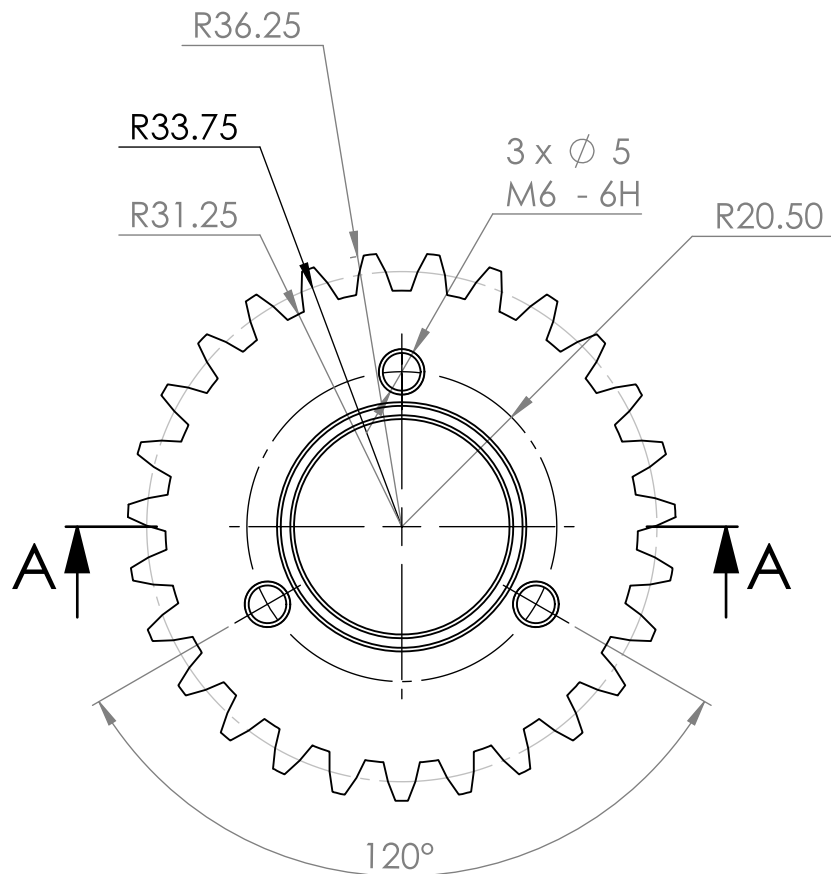
Võllfoorik: nuutvõll KW25X21X6
 Maedler.de tootekood: 64840600
 Märkimata faasid 0.5X45°

	Materjal:	1.0503 (C45)	Näitamata piirhälbed:	ISO 2768 fK	Mass:	Mõõt:
	Teostas	Rasmus Laul	Nimeetus:	Väljundvõll	0.84 kg	1:1
	Kontrollis	Aare Aan				
	Kinnitas	Aare Aan				
	www.um.ee Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Maaülikooli teadus- ja arenduskeskus		Leht:	Tähis:		
			1/1	TN 21/170497 A 00 06 01 D		



Hammasratta moodul: 2.5
Hammaste arv: 36

	<i>Materjal:</i> 1.5805 (10NiCr5-4)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.37Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Esimese käigu hammasratas		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 06 02 D		

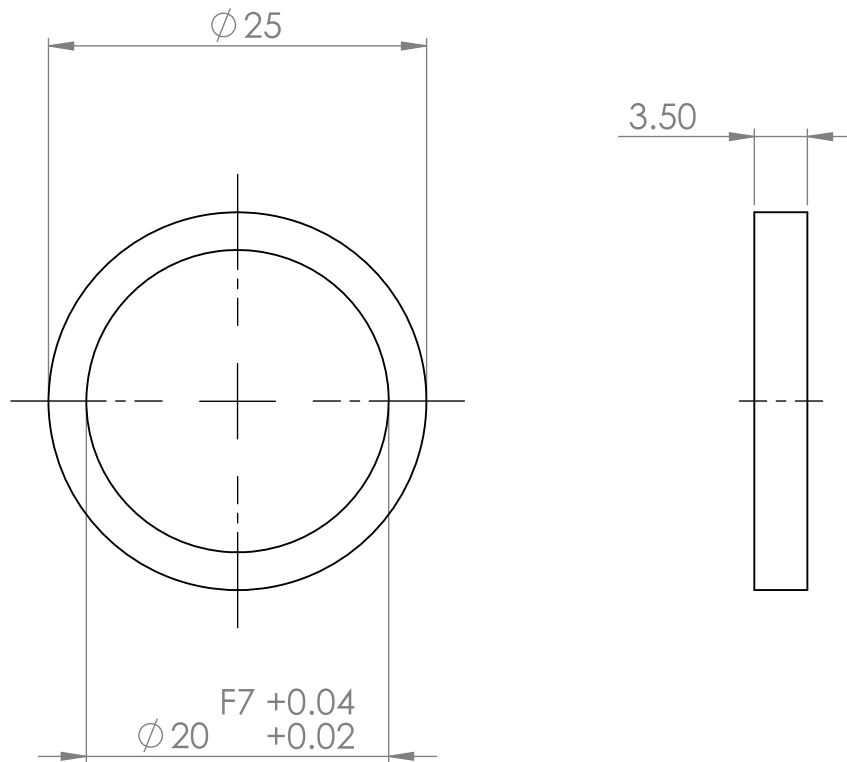


LÕIGE A-A

Laagripesa $\sqrt{\text{Ra 1.6}}$

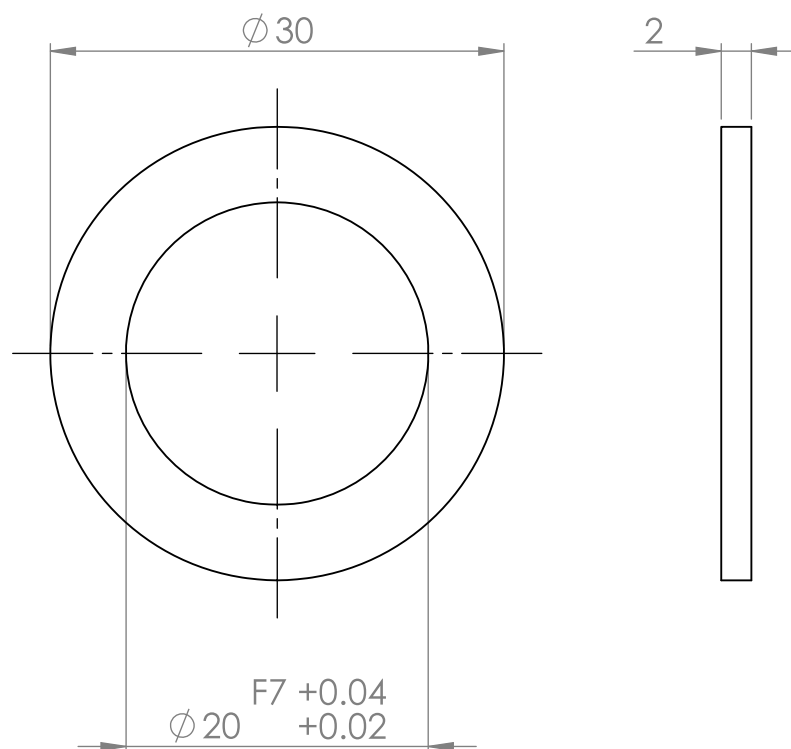
Hammasratta moodul: 2.5
 Hammaste arv: 27
 Detaili valmistamiseks kasutada STEP faili.
 Märkimata faasid 0.5x45°

	<i>Materjal:</i> 1.5805 (10NiCr5-4)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.21Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Teise käigu väikehammasratas		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering Faculty of Food and Engineering	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 06 03 D	



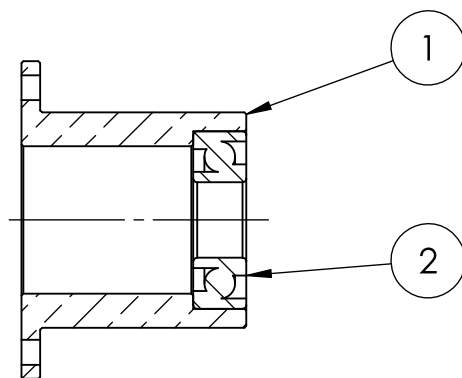
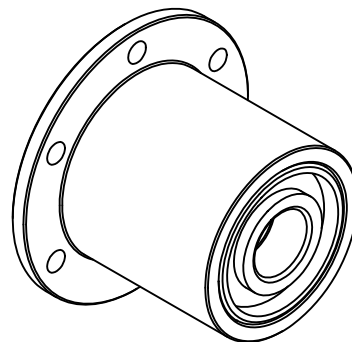
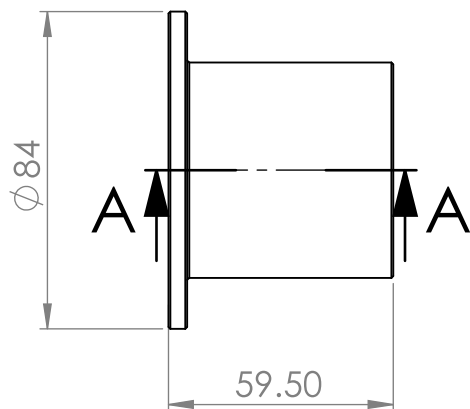
Märkimata faasid 0.25x45°

	<p><i>Materjal:</i> 1.0045 (S355JR)</p>	<p><i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK</p>	<p><i>Mass:</i> 0.00Kg</p>	<p><i>Mõõt:</i> 2:1</p>
<p><i>Teostas</i></p>	<p>Rasmus Laul</p>	<p><i>Nimetus:</i></p>		
<p><i>Kontrollis</i></p>	<p>Aare Aan</p>	<p>Väljundvõlli vaherõngas 1</p>		
<p><i>Kinnitas</i></p>	<p>Aare Aan</p>	<p><i>Leht:</i> 1 / 1</p>	<p><i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 06 04 D</p>	
<p>Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering</p>				



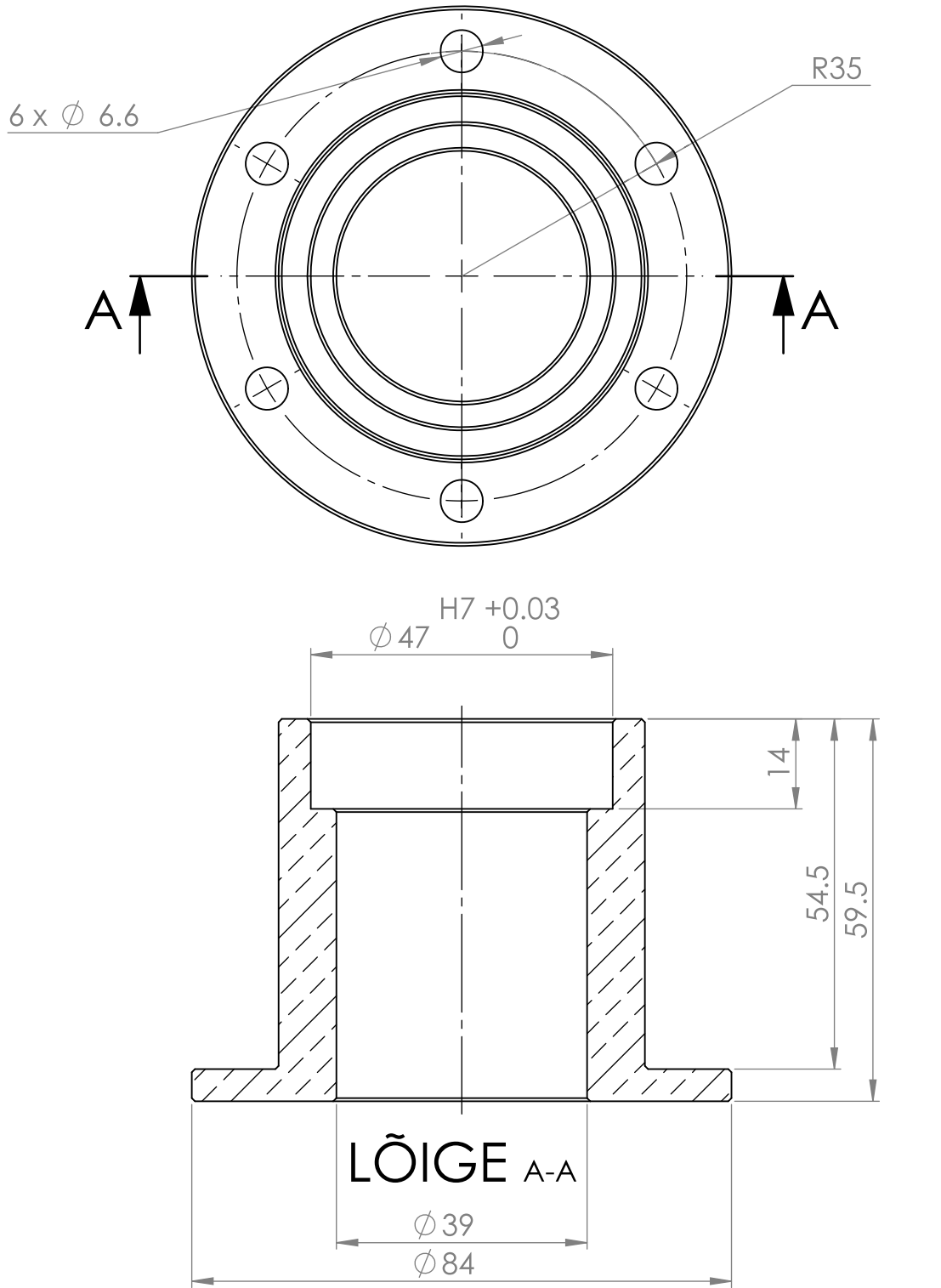
Märkimata faasid 0.25x45°

	<i>Materjal:</i> 1.0045 (S355JR)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.01Kg <i>Mõõt:</i> 2:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Väljundvõlli vaherõngas 2	
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan		
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan		
Eesti Maaülikool <small>Estonian University of Life Sciences Reprodutsiooniparanduskeskus Institute of Food and Engineering</small>		<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 06 05 D



LÕIGE A-A

1		Tugilaagripesa	TN 21/170497 A 00 07 01 D	1	
2		Tugilaager 7204 BE	Standard detail	1	SKF
Osa	Väli	Nimetus, materjal	Tähis	Hulk	Märkus
	<i>Materjal:</i>		<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.25Kg	<i>Mõõt:</i> 1:2
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Tugilaagri koost			
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan				
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan				
		<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 07 00 K		



Märkimata faasid 0.5x45°

Laagripesa $\sqrt{\text{Ra 1.6}}$

	<i>Materjal:</i> 3.3535 (EN-AW 5754)	<i>Näitamata piirhälbed:</i> ISO 2768 fK	<i>Mass:</i> 0.23Kg	<i>Mõõt:</i> 1:1
<i>Teostas</i>	Rasmus Laul	<i>Nimetus:</i> Tugilaagripesa		
<i>Kontrollis</i>	Aare Aan			
<i>Kinnitas</i>	Aare Aan			
	Eesti Maaülikool Estonian University of Life Sciences Institute of Food and Engineering	<i>Leht:</i> 1 / 1	<i>Tähis:</i> TN 21/170497 A 00 07 01 D	

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning
juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Rasmus Laul
Sünniaeg: 29.09.1998,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö Pneumobile Technics 5 käigukasti optimeerimine, mille juhendaja(d) on Phd Aare Aan
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 27.05.2022

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)