



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

**LASERKEEVITUSROBOTI METOODILINE
JUURUTUS ETTEVÕTTESSE**

**METHODICAL APPROACH TO ADAPTING LASER
WELDING ROBOT TO A COMPANY**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Erik Lootus

Üliõpilaskood: 212190MATM

Juhendajad: Martinš Sarkans, Vanemteadur

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

"....."2023

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 2023

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."2023.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Erik Lootus (sünnikuupäev: 31.10.1996)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Laserkeevitusroboti meetodiline juurutus ettevõttesse, mille juhendajaks oli Martinš Sarkans.
 - 1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
 - 1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

_____ (allkiri)

_____ (kuupäev)

¹Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Erik Lootus, 212190MATM

Õppekava, peeriala: MATM, Tootmistehnika ja robotika

Juhendaja: Vanemteadur, Martinš Sarkans

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Laserkeevitusroboti meetodiline juurutus ettevõttesse

(inglise keeles) Methodical approach to adapting laser welding robot to a company

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Töötada välja juurutusmeetod laserkeevitusroboti kasutamiseks
2. Katsetada roboti tootmisprotsessi praktiliselt näite abil
3. Läbi töötatud meetodi põhjal muuta laserkeevitusroboti kasutamine veel efektiivsemaks

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Uuringute ja meetodite analüüsimine	02.2023
2.	Laserkeevitusroboti juurutus meetodi etapiline formuleerimine	03.2023
3.	Praktiliste metalloorikute välja mõtlemine ja katsetamine	04.2023
4.	Majanduslik analüüs ja meetodi hindamine	05.2023

Töö keel: eesti

Lõputöö esitamise tähtaeg: "22" mai 2023 a

Üliõpilane: Erik Lootus

.....
".....".....2023 a /allkiri/

Juhendaja: Martinš Sarkans

".....".....2023 a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Eerme

.....".....".....2023 a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	5
Lühendite ja tähiste loetelu	6
SISSEJUHATUS	7
1. Eesmärgi selgitus.....	8
1.1 Laserkeevitus	8
1.1.1 Laseri kiire kvaliteet	10
1.2 Laseritüübid keevituseks	12
1.2.1 Ketaslaseri tehnoloogia.....	13
1.3 Laserkeevituse efektiivsemaks muutmine	17
1.4 Laserkeevituse eelised ja puudused	19
1.5 Laserkeevituse etapiline lähenemine	20
1.6 Laserkeevituse robotiseerimine ja programmeerimine	23
2. Toodete valik ja valmistamise tolerantsid.....	25
2.1 CAD laserkeevituse jaoks	25
2.2 Eelnevad töölusoperatsioonid laserkeevitusele ja detailide täpsuse nõuded	27
2.3 Testkeevitus ja katseplaadid	28
2.4 Laserkeevitusega seotud joonised ja ISO standardid	31
3. Rakiste lahendused ja põhimõtted konstrueerimisel	34
3.1 Rakiste projekteerimise alused.....	34
3.2 Vabadusastmed ja tasandid	36
3.3 Surveklambrid ja pingutid	38
3.3.1 Näidisdetail rakistamine.....	39
3.4 Modulaarne rakistamine	42
3.5 Rakiste ligipääsetavus ja täpsus	43
3.6 Töölaua valik, asendiplaan.....	44
3.7 Rakise konstrueerimise võimalused	47
4. Laserkeevituse parameetrite valik.....	49
4.1 Materjali margid keevituseks	50
4.2 Liidete valik laserkeevituses ja pilu suuruse vähendamine	51
4.3 Laserkeevituses lisamaterjali kasutamine ja selle efektiivsus	52
5. Programmeerimine	56
6. Majandusliku tasuvuse hindamine	62
KOKKUVÕTE	67
SUMMARY	69
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	71
LISAD	73

EESSÕNA

Lõputöö teema sõnastati autori ja juhendaja Martinš Sarkansi koostööl. Vajadus tekkis laserkeevituse vähese populaarsuse ja leviku tõttu Eestis.

Olulisim osa lõputööst on välja töötada metodika laserkeevitusrobotile ning populariseerida laserkeevitust kui konkureerivat liitetehnoloogiat.

Konsultatsioonidega olid metodika välja töötamisel ja ideede arutamisel abiks juhendaja Martinš Sarkans. Abi eest sooviks tänada ka ettevõtet Laserline OÜ, tänu neile on see töö võimalikuks saanud.

Laserkeevitus, robotkeevitus, tootmistehnika, tootmistehnoloogia, magistritöö.

Lühendite ja tähiste loetelu

BPP – (ingl k. *beam parameter product*) e kiire parameetri korrutis

EBW – (ingl. k *electron beam welding*) e elektron(kiir)keevitus

EOAT – (ingl k. *end of arm tooling*) e roboti tööriist

FIR – kauginfrapunakiirgus (ingl k. *far-infrared*, 50...1000 μm)

Fookuskaugus (ingl.k. *focal length*) – läätse või peegli keskpunktist kaugus fookuspunktini.

Fookuspunkt (ingl.k. *focal spot*) – laserkiire asend, kus kiirel on minimaalne läbilõikepindala.

HAZ – (ingl k. *heat affected zone*) e termomõjutsoon

LIN – lineaarne liikumine programmikoodis (ingl. k *linear movement*)

NIR – lähiiinfrapunakiirgus (ingl k. *near-infrared*, 0,78...1,4 μm)

Nd – neodüüm, keemiline element järjekorranumbriga 60

OLP – off-line programmeerimine, ilma füüsilise robotita programmeerimine

PTP – punktist-punkti liikumine programmikoodis (point to point)

PW – (ingl k. *pulse welding*) e pulsseeriv keevitamismood

TruDisk – suure võimsusega tahkislaser, mis on mõeldud keevituseks, lõikamiseks ja metallsulamite töötlemiseks.

CW – (ingl k. *continuous welding*) e konstantne keevitusmood

CO_2 – süsihappegaas ehk süsinikdioksiid

WPS – (ingl k. *welding procedure specification*) e keevitusprotseduuri spetsifikaat

YAG – (ingl k. *Yttrium-Aluminium-Garnet*) e ütrium-alumiinium-granaat, sünteetiline kristall

Yb – üterbium, keemiline element järjekorranumbriga 70.

SISSEJUHATUS

Käesoleva magistritöö eesmärk on analüüsida ja välja töötada meetodeid robotlaserkeevituse jaoks, mis abistaks ettevõtetel teostada juurutamist ja üldist teadlikkust laserkeevitusrobotite kasutuse kohta. Laserkeevitusrobotid ei ole Eesti tööstusmaastikus veel tuntud kui konkureeriv liitetehnoloogia, hetkeseisuga tegeleb sellega paar ettevõtet.

Laserkeevitusrobotiga võivad esineda erinevad probleemid ja neid lahendades on vaja järgida mitmeid faktoreid ja parameetreid, et oleks võimalik teostada efektiivset laserkeevitust. Antud lõputöös lahendatakse seda erinevate teemade meetodite analüüsimisega ja esinenud probleemide lahendamisel ja meetodite loomisel kasutatakse nii eelnevaid teadmisi kui ka põhjalikku teooria eeltööd.

Lõputöö põhiosa analüüsib laserkeevituse efektiivsemaks muutmist, etapilist lähenemist ja spetsiifiliste detailide loomist, mis muudaks protsessi paremaks. Näidistoote ja katsetatud plaatide põhjal on välja toodud põhiparameetrid ja analüüsitud tulemuste erinevusi. Suure osana on analüüsitud ka rakiste tähtsust ja peamisi koostamis võimalusi. Lisaks on käsitletud programmeerimist ja simulatsiooni põhjal tootmisprotsessi kvaliteedi tõstmist. Kõige viimasena on toodud roboti riskianalüüs koos majanduslike arvutustega.

Laserkeevitus on ketaslaserite tuleku tõttu väga arenev tehnoloogia ja sellest tulenevalt on tegemist uuendusliku teemaga, mida tasub uurida.

Lõputöös teostatud praktiliste katsete kogu tootmisprotsess, programmeerimised, detailide ja rakise ettevalmistused ning laserkeevitus viidi läbi ettevõttes Laserline OÜ. Robotsüsteemiks kasutati Trumpfi TruLaser Weld 5000-i.

Detailide ja rakiste projekteerimisel ning jooniste tegemisel kasutati nii SolidWorks 2021 kui ka TruTops Boost CAD tarkvara. Keevitusprogrammi ja simulatsioonide loomisel kasutati TruWeld tarkvara.

1. Eesmärgi selgitus

Antud töö peamine eesmärk on uurida ja analüüsida meetodiliselt laserkeevituse efektiivsust ja kasutust praeguses tööstusmaailmas. Selle abil välja töötada etapiline meetodika, mille abil saaks laserkeevitust teostada ja paremaks muuta. Hinnata laserkeevituse vajalikkust hetkel ja selle tulevikupotentsiaali.

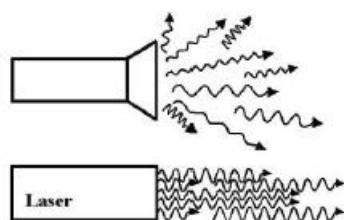
1.1 Laserkeevitus

Lasereid hakati põhjalikumalt uurima 1960ndatel. Tehnoloogia on pidevalt arenenud ja leidnud kasutust erinevates valdkondades. Eriti automatiseerimises on muutunud see aina konkureerivamaks võrreldes alternatiivsete tehnoloogiatega. Sellel on ka suur seos robotite kaasamisega tööstuses ja tootmises. Tehnoloogia tänapäeval on pidevalt arenev ja selle vastu on ka huvi pidevalt kasvav. Seda kaasatakse tootmisesse ja leitakse uusi rakendusi. Materjalide laseriga töötlemine põhineb kontsentreeritud ja võimendatud laserikiire soojuslikul toimel.

Laseri peamised kasutusvaldkonnad on [1]:

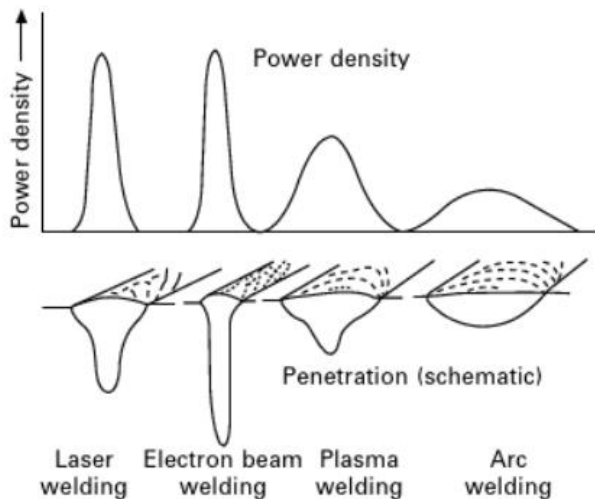
- Puurimine - 1.8%
- Keevitamine - 18.7%
- Graveerimine - 20.5%
- Mikroelektronika - 5.4%
- Lõikamine - 44.3%
- Muu - 9.3%

Laserit iseloomustab koherentsus, monokromaatilisus, intensiivsus ja suunatavaus. Laseri valgus langeb väga kitsaste lainepikkuste vahemikku ja kõik lained on ühes faasis.



Joonis 1. üleval on näidatud tavaline valgus, allpool laseri poolt genereeritud valgus. [2]

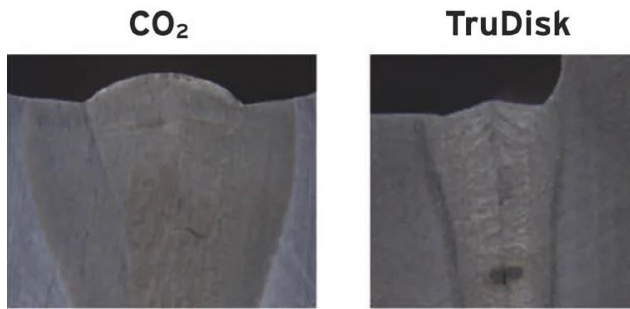
Tingituna suurest soojustihedusest toimub töötlemisel materjalide lokaalne sulatamine või aurustamine. Laseri keevituse puhul on tähtsaks näitajaks energiatihedus. Selle suhteline suurus on näidatud alloleval joonisel koos teiste keevitustehnoloogiatega.



Joonis 2. Energiatihedus keevituste ristlõigetes: laserkeevitus, elektron(kiir)keevitus, plasmakeevitus, kaarkeevitus ja nende keevitusvanni ristlõiked. [3]

Laserkeevitades on võimalik kokku liita 0,01 mm kuni 50 mm paksusi lehti. See liitetehnoloogia on kogunud viimasel ajal populaarsust just oma kõrge kvaliteeditaseme, täpsuse, tulemuslikkuse, kiiruse ja paindlikkuse pärast. Selle populaarsust tõstab ka see, et toimub vähem kuju muutusi ehk deformatsioone detailis endas, keevituste lähedal, sest termomõjutsoon on väiksem võrreldes teiste konkureerivate tehnoloogiatega. [3]

Väiksem termomõjutsoon lubab omakorda kasutada keevitamisel õhemat materjali ja muudab keevitamise kiiremaks. Joonisel nr 3. on näidatud gaaslaseri (CO₂) ja ketaslaseri (TruDisk) vaheline erinevus just termomõjutsooni aspektist. Termomõjutsooni vähesus võimaldab keevitada täpsemaid tooteid ehk detailide mõõdud püsivad peale keevitust paremini tolerantsivahemikes.



Joonis 3. Joonisel on näidatud CO₂ ja TruDiski vaheline termomõjutsooni (heat affected zone) erinevus. [4]

1.1.1 Laseri kiire kvaliteet

Lasereid võrreldakse parameetri *BPP* (ingl k. *beam parameter product*) ehk kiire parameetrite korrutise põhjal. *BPP* on kiire parameetri korrutis, mis on laseri kiire divergentsi nurga (nurk kui palju kiir hajub) ja kiire raadiuse korrutis. Antud korrutis määrab ära kiire kvaliteedi, mida madalam korrutise väärtus seda parem kiire kvaliteet. Gaussi kiirel on kõige väiksem võimalik *BPP*, suhe päris kiire *BPP*-st ideaal Gaussi kiire kohta samas lainepikkuses on tähistatud M^2 -ga.

$$BPP = \omega_0 * \frac{\theta}{2} [3], \text{ kus}$$

ω_0 – kiire vöö laius

θ – laseri kiire divergentsi nurk

Näidatud joonisel nr 4. a).

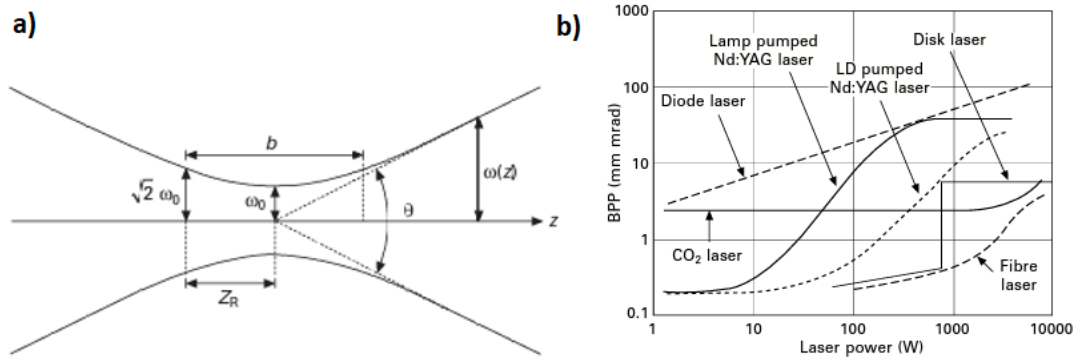
$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_q} \geq 1 [3] \text{ kus,}$$

BPP – päris kiire korrutis

BPP_q – ideaal Gaussi kiire korrutis, mille väärtus on $\frac{\lambda}{\pi}$

λ – on valguse lainepikkus.

M^2 laserkiire kvaliteedi parameeter on tähtis mikrokeevituste jaoks, kus keevitusvõimsused jäävad ~ 300 W juurde. Mikrokeevitused on keevitused kus kasutatakse laserkeevitust hästi madalatel võimsustel ja sageli kasutatakse mitmeid punktkeevitusi, et liita väikeseid tooteid (kooste).



Joonis 4. a) Gaussi „ideaal” kiire skeem, kiire laius $\omega(z)$ funktsioonina aksiaalsest kaugusest z . ω_0 : kiire minimaalne kaugus; b : fookussügavus; z_R : Rayleigh piirkond; θ : kogu nurga leviala. b) BPP vertikaalteljel ja funktsioonid sõltuvalt laseri võimsusest erinevate laserite kohta [3].

Joonisel 4. a) on skeemina toodud Gaussi kiire peamised parameetrid. BPP (Beam parameter product) leidmiseks on vaja jooniselt oma laserikiire kohta teada:

- ω_0 – kiire vöö laius ehk kiire minimaalne laius z – teljest
- θ – laseri kiire divergentsi nurka, mis näitab kui palju laserikiir hajub.

Nende kahe parameetri abil on võimalik välja arvutada BPP parameeter, mis võimaldab võrrelda ja hinnata laserikiire kvaliteeti. Praktiliselt näitab BPP arvuliselt seda kui hästi saab kiirt fokusseerida ühte kindlasse punkti. Ketaslaseritel on näiteks väga kvaliteetne BPP parameeter ($< 10 \text{ mm} * \text{mrad}$). BPP sõltub suures joones aktiivosa efektiivsusest. Soojuslevi on paranenud uuemate ketaslaseritega, sellepärast ka suuremate võimsuste juures laseri aktiivosas laserikiire teljega paralleelselt mõjuv soojuslevi ei mõjuta kiire kvaliteeti nii palju kui seda mõjutab vanemate varrastüüpi ehitusega Nd:YAG laserite aktiivosa. Nd:YAG varras aktiivosaga laserite puhul on näha, kuidas võimsuse tõusuga 100 – 1000 W muutub BPP tõus väga järsult, vt joonis 4. b). Võrdlusena ketaslaser (ingl k. „disk laser”) samal joonisel püsib lineaarse BPP parameetriga kuni $\sim 3000 \text{ W}$ võimsuseni, mis tõestab seda, et ketaslaseri laserikiir on stabiilselt kvaliteetsem võrreldes konkureerivate laseritega.

1.2 Laseritüübid keevituseks

Lasereid liigitatakse nende oleku järgi neljaks: gaaslasersed, tahkislaserid, diodlaserid e pooljuhtlaserid ja vedeliklaserid. [2]

Tabel 1. laseritüüpide jaotus, nende iseloomustus peamiste tunnuste järgi: lainepikkus, laseri võimsus, laseri aktiivosa, efektiivsus.

		Lainepikkus λ (μm)	Laseri võimsus (konstantsel keevitusel)	Laseri aktiivosa	Efektiivsus ja märkused
1	CO ₂ gaaslasersed	10,6 (FIR)	max: 50 kW normaal: 1-15 kW	CO ₂ N ₂ – He gaasisegu	Hea laserkiire kvaliteet, kompaktne, odavate ekspluatsioonikuludega
2	Impulss- lambiga ergastatud YAG tahkislaser (Nd:YAG)	1,06 (NIR)	max: 10 kW normaal: 50 W – 7 kW	Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ - granaat (tahkislaser)	1-4%, Kiudoptilised kaablid, robotkeevitus
3	Diodlaser e pooljuht- laser	0,8-1,1 (NIR)	max: 10-15 kW	InGaAsP (tahkislaser)	20-60%, väikesed mõõtmed, väiksem laserkiire võimsustihedus ja läbikeevituse suurus
4	Laserdiod tahkislaser (YAG)	1 (NIR)	max: 13,5 kW PW max: 6 kW	Nd ³⁺ :Y ₃ Al ₅ O ₁₂ - granaat (tahkislaser)	10% Parem laserkiire kvaliteet kui impulsslambiga laseril, pikem diodide tööiga
5	Ketaslaser (Yb ³⁺ kristall või YVO ₄)	1,03 (NIR)	max: 16 kW	Yb ³⁺ :YAG või YVO ₄ - tahkislaser	15-25%, kasutusel alates 2004. aastast, eeliseks kompaktsus, madal keevituse soojussisestus
6	Fiiber tahkislaser (Yb:YAG)	1,07 μm (NIR)	max: 100 kW	Yb ³⁺ :SiO ₂ tahkislaser	20-30% Väiksem lainepikkus võimaldab kasutada kiudoptilisi kaableid ja fookustada tavaliste läätseda abil ning sobib seetõttu hästi robotkeevituseks [2]

Nd:YAG lasereid saab kanda edasi kiudoptilise kaabli abil ja neil on keevitusmoodid CW või PW. Pulsseeriva keevitusega liidetakse väiksemaid detaile. CW laserid 2-7 kW on mõeldud nt alumiiniumsulamist autokerede või roostevabast terasest torude keevitamiseks. Impulsslambiga Nd:YAG (nr 2.) laseritel on aga madal elektriline efektiivsus (4%). Seega kõrgema võimsusega CO_2 ja YAG laserite arendus on lõppenud. Selle asemel on arendatud laserdiod ergastatud tahkislaser (nr 4.) kuni 6-10 kW võimsuseni. Hetkeseisuga on ka nende laserite arendus peatunud ja viimasel ajal on rohkem populariseerunud tulnud ketas ja fiiber tahkislaserid, millega tuleb suurem võimsus, parem efektiivsus ja kõrgem kiire kvaliteet.

21-sel sajandil on suurema võimsuse mõttes hakatud fokuseerima laserdiod ergastatud ketas ja fiiber laseritele. LD laseritel on kõrge elektriline efektiivsus (30-60%). LD miinus on aga kehv kiire kvaliteet.

Kvaliteedi pärast valitakse ketas või fiiber tahkislaserid, mille elektriline efektiivsus on 25%. Võimsus ulatub ketaste puhul 16 kW-ni, fiibri puhul 100 kW-ni. Nende lasertüüpide kiire kvaliteet on väga hea, BPP on väiksem kui $10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Mõlemad lasertüübid on kasutusel ka koostöös tööstusrobotitega. Tööstusrobotiga ühendatud keevitus koos kaameraga on kõige suurema tuleviku potentsiaaliga liitetehnoloogia kombinatsioon, arvestades kõrget roboti kiirust ja kiiret tootmistsükli. [3]

CO_2 gaas laser:

CO_2 laserid, millel on $10,6 \mu\text{m}$ lainepikkus, on kõrge kiire kvaliteediga ja lihtsamini saavutatav kõrgem võimsus. Maksimaalne võimsus nende laserite puhul ulatub 50 kW-ni, 1-15 kW võimsusega laserid on peamiselt kasutusel tööstustes, kus keevitatakse terast. Sageli keevitatakse autode, lennukite ja laevade komponente. [3]

CO_2 laseri puhul peaks tähele panema järgmisi märkusi:

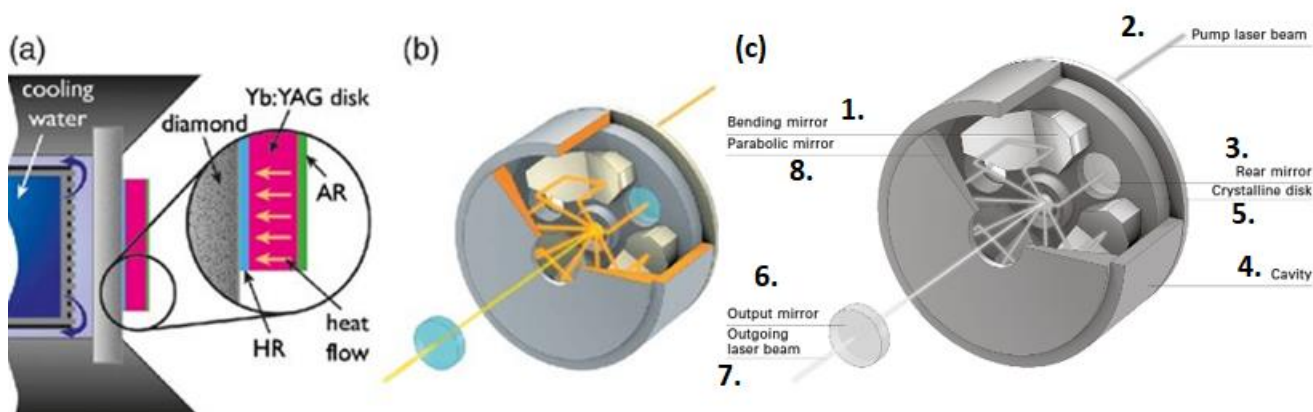
- Kõrgema võimsusega laserite kiire juhtimiseks peaks kasutama peegleid mitte kiudoptilisi kaableid
- Kui kasutada Ar-kaitsegaasi, siis võib väheneda läbikeevituse sügavus, sest tekib Ar plasma

1.2.1 Ketaslaseri tehnoloogia

Ketaslaseri kontseptuaalne idee mõeldi välja 90ndatel, aga esimesed tööstuslikud tooted tulid välja 2003. aastal. Varraslaserid olid domineerivad enne ketaslaserite turule

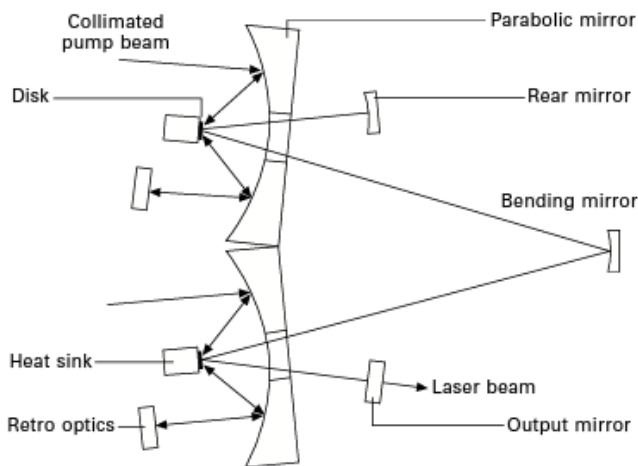
tulemist tahkislaserite osas. Varraste puhul oli miinuseks temperatuuride jaotus, kus sisemine osa vardast muutus kuumemaks kui välimine pind.

Yb:YAG ketas on 15 mm diameetriga ja 0,2 mm paksune. Kettal on oma jahutuselement taga, mis laseb soojusel tagantpoolt eemalduda ja jahutab ketast. See lubab kettal koguaeg anda võimalikult kõrget võimsust ja kvaliteetset laserkiirt. Ketast ergastavad diodlaserid. Ketas on nii õhuke, et see võtab endasse ainult väikese osa ergastatud kiirgusest. Sellepärast pannakse kiir ketast läbima mitu korda, kasutades ära paari volditud kujul peeglit (vt. joonis 5, (c) nr 1.) ja keskel sisemuses asuvat parabolset peeglit (vt. joonist 5, (c) nr 8.). Laserkiir moodustub kettas (vt. joonis 5, (c) nr 5.) ja (joonis 5, (a) Yb:YAG disk) ja väljub läbi ava, mis on paraboolses peeglis.



Joonis 5. (a) ja (b) Ketta sisust valitud kristall ja Yb:YAG ketas, mis on põhiline tehnoloogia, kuidas laserkiir genereeritakse. HR tähistab high-reflectionit, et kiir edasi peegelduks. AR - tähistab anti-reflectionit, et kiir samuti õiges sihis edasi liiguks. (c) Ketta sisu komponendid. [5]

Laseri võimsusega paar kilovatti on võimalik genereerida ühe sellise ketta süsteemiga. Tahtes saavutada suuremaid võimsusi, on võimalik kuni neli paraboolset peeglit omavahel ühendada. Volditud kujul peeglid suunavad lasereid ühest nõguspeeglist (vt. joonis 5, (c) nr 4.) teise, see seob süsteemi optiliselt ära (vt. joonis 6). Viimane väljundpeegel, kust võimsus edasi liigub, on alati optilisest süsteemist väljaspool (vt. joonis 5, (c) nr 6.).

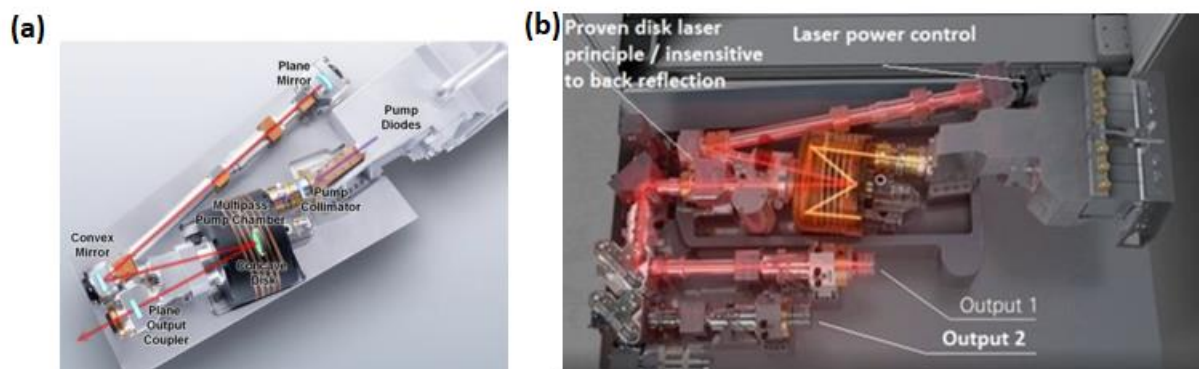


Joonis 6. Suurema laseri võimsuse jaoks pannakse mitu peeglite süsteemi kokku, et see genereeriks rohkem võimsust. [3]

TruDisk 4002 väljundvõimsus on 5,5 kW ja sellega saab garanteeritud 4 kW võimsust keevitava detaili peale. Ülejäänud võimsusest kasutatakse ära võimsuse tagasise kontrollimiseks ja energiakadude kompenseerimiseks optilistes osades: nt kiire suunaja, valguskaablid ja fokusseerimisoptika.

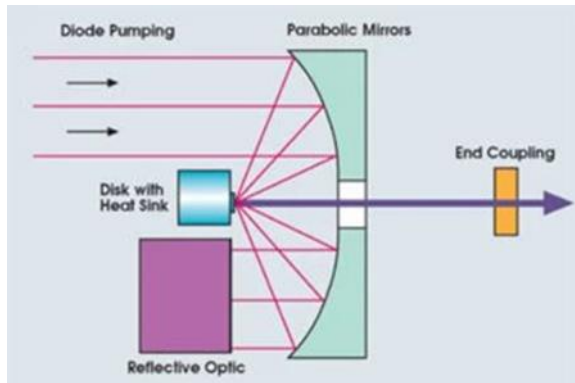
2013. a seisuga on arenenud ketaste väljundvõimsus edasi kuni 0,5 kW-st – 6 kW-ni ühe ketta kohta. Teoreetiline limiit, mis Stuttgarti Ülikoolis arvutati, on maksimaalselt 30 kW võimsust ühest kettast saada.

Selle tõttu on ka õhukese lehtmetsa keevitamine võimalik. Väikese fookusega ja kvaliteetne kiir, mis tagab suurema võimsuse tiheduse ja soojussisestuse. [6]



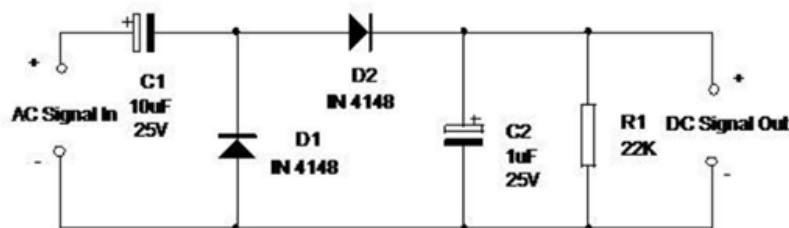
Joonis 7. (a) ja (b) TruDisk laseri tehnoloogia genereerimise skeem koos komponentide, koostu ja selgitustega. Visuaalselt laseri teke ära näidatud, toimub peeglite ja kristalli koosmõjul. [7]

Yb:YAG aktiiveerib end valgusest, mis tuleb laser diodidest. Nd:YAG varras annab soojust ära oma silindrilise pinna läbi, mis on risti laserikiire teljega, see omakorda tekitab soojusgradiente ja nähtuse „thermal lensing“. Mis vähendab kiire kvaliteeti kuna optilises komponendis on kuju muutus soojuse tõttu. Yb:YAG laserketas aga laseb soojust välja paralleelselt laserikiire teljega, see teeb soojuse eraldumise ühtlaseks üle terve ketta pinna ja „thermal lensing“ nähtust ei toimu.



Joonis 8. Skeemil on külgsuunas näidatud, kuidas paraboolse peegli abil suunatakse kristallketta kiired edasi. [6]

Yb:YAG laseri kristalli on lisatud trivalentne üterbium (Yb^{3+}) (Üterbium keemilise elemendi järjekorranumber on 70). Kristall on potentsiaali näidanud just kasutusvaldkondades ja süsteemides, kus on kompaktne, efektiivne, diod-pumbal põhinev lasersüsteem. [8]



Joonis 9. Skeemil on põhiline diodpumba elektroonikaskeem. [9]

Diodpumba kasutamisel vooluühenduses, kus esimene elektriabel annab vahelduvvoolu väljundi ja teine on draiveri elektriabel, suudab genereeritud alalisvoolu pinge püsida samal tasemel, mis on vahelduvvoolu signaal ehk pingelangust ei teki. [9]

- 2003. aastal tutvustatud ketas genereeris 1 kW laseri võimsust, laserkiire kvaliteediga BPP 7 mm * mrad.
- Trumpf on tänapäeval jõudnud valikuni kus võimsused ulatuvad 1 kW-st – 16 kW-ni ja kiire kvaliteet on ≥ 2 mm * mrad.
- Kõige suurema võimsusega on TruDisk 16003, kus on laserkiire kvaliteet 12 mm * mrad ja võimsus 16 kW.
- Kvaliteedi poolest saaks veel välja tuua TruDisk 6001, 6 kW ja 2 mm * mrad

Kuna ketaslaseri tehnoloogia on lihtsasti automatiseeritav ja kõrge tootlikkusega, siis see on tänapäeval üks konkureerivaid lahendusi tootmises, et saavutada efektiivne, kvaliteetne ja paindlik keevitussüsteem.

1.3 Laserkeevituse efektiivsemaks muutmine

Hiljutised arengud väga suure võimsusega laseritega on viinud huvi paksemate materjalide laserkeevituse juurde. Kuna laseri kiir annab kõige suurema energiatiheduse, mida hetkel võimalik saavutada on tööstuses (kuni $10^9 \frac{W}{cm^2}$). See on võimalik fokuseerida kuni 0,1 mm diameetrilisele osale materjalil, kus moodustub silindriline auk, nn lukuaugu kuju, mis võib läbistada terve materjali paksuse. [10]

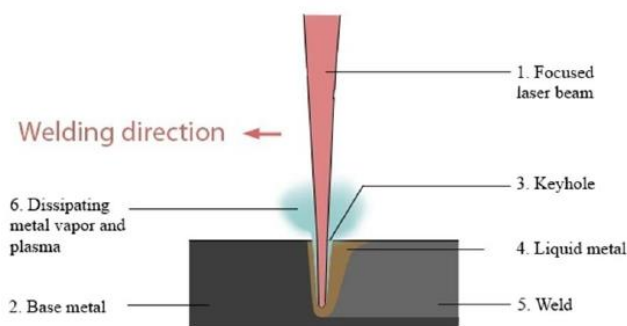


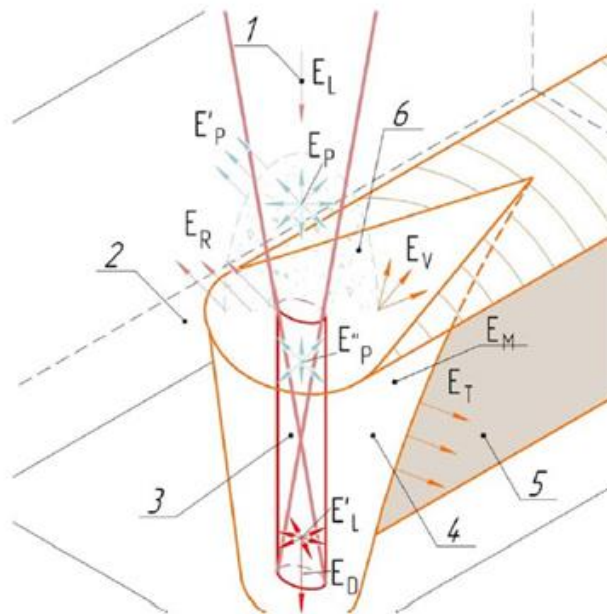
Fig. 1. Laser keyhole welding.

Joonis 10. Skeem keeviturrežiimist „keyhole welding“ ehk lukuaugu kuju võttev keevitus. 1. fokuseeritud laserkiir; 2. baasmetall; 3. lukuaug; 4. vedelal kujul metall; 5. keevis; 6. eralduv metalli aur ja plasma. [9]

Seoses metalli aurustumisega ja kraatri tekkimisega omandab keevitusvanni ristlõige nn „lukuaugu“ kuju ja inglise keeles kutsutakse sellist keevitusrežiimi („keyhole welding“). Kui kraater läbib metalli, siis võib protsessi nimetada läbistavaks keevituseks. Kui ei teki

läbivat ava, siis kutsutakse seda sügava läbisulatusega keevitamiseks (ingl k. „*deep penetration welding*“). [10]

Seda, kui efektiivne on laser keevitamisel hinnatakse energia põhjal, mis materjalisse neeldub.



Joonis 11. Energia balansseerimine laser kiire keevituse ajal. 1 – fokuseeritud laseri kiir; 2 – põhimetall; 3 – lukuaug; 4 – vedel metall; 5 – keevis; 6 – eemalduv metalli aur. Täpsemalt artiklis [9].

Energia ülekande laserilt materjalile saab väljendada valemiga:

$$n_{\text{eff}} = (E'_L + E''_L) / E_L ,$$

kus:

n_{eff} – efektiivsus

E'_L – laseri kiire energia, mis on neeldunud lukuaugu seintesse

E''_L – plasma ja metalli auru energia, mis on neeldunud lukuaugu seintesse

E_L – fokuseeritud laseri kiire energia

Serva pinnakareduse väärtus ei mängi nii suurt rolli lühema lainepikkusega laserite puhul.

On kolm lihtsat viisi, kuidas tõsta tooriku energia neeldumise protsenti:

1. Modifitseerides ja ettevalmistades toorikut parema pinnaviimistlusega
2. Madaldades rõhku keevitustsoonis
3. Lisades eelkuumutuse keevitusprotsessi. [10]

Artiklis „*Methods for Improving Laser Beam Welding Efficiency – M. Sokolov, A. Salminen*“ on põhjalikumalt käsitletud võimsamate laserite (≥ 10 kW) keevitussügavuse ja energia neeldumise parendamise osas.

1.4 Laserkeevituse eelised ja puudused

Laserkeevituse peamised eelised on:

- Järeltöötlust on vähe
- Vähem energiat läheb detaili ja kuumus on kontsentreeritud ühte punkti
- Materjali deformatsioonid on väiksemad võrreldes teiste keevitusmeetoditega, kuna termomõjutsoon on materjalis väiksema raadiusega
- Saab keevitada väga õhukesi detaile, nt 0,5 mm paksust roostevabaterast
- Saab keevitada keeruka kujuga detaile, oma hea ligipääsetavuse ja keevitusnurkade pärast
- Materjalidele puuduvad suured piirangud, nt ei ole enamuste laseritega võimalik vaske keevitada (vajab kindlat lainepikkust)

Laserkeevituse energiamahukus on suur, see-eest on see väga kontsentreeritud ja suunatud energia. Samuti on võimalik tark energiajuhtimine (ingl. k. intelligent energy management), mis muudab robotisüsteemi energiasäästvamaks.

Detailide mõõtmete täpsusaste on tähtis ja see oleneb materjali paksusest ja rakise täpsusest. Samuti mängib tähtsat rolli keevitavate detailide eelnev valmistustehnoloogia. Kui laserkeevitusele eelnes painutamine, siis peab ka painutamisel olema soovitud täpsusastmed teostatavad. Laseri tehnoloogia aga ise võimaldab väga suurt täpsust, arvestades ka roboti korratavuse täpsust $\pm 0,05$ mm.

Edasi keskendub autor laserite all just nimelt ketaslaseritele, kuna autoril on nende laseritega kogemus ja samuti võimalus praktiliselt keevitamist katsetada.

Laserkeevituse peamised puudused:

- Suur investeering (robotisüsteem ja personali koolitamine)
- Vajab suurte oskustega operaatorit, programmide inseneri ja rakiste inseneri.
- Vajab väga täpset rakist, mis ei laseks detailidel liikuda
- Läbikeevitus on piiratud paksemate materjalide puhul, 4000 W võimsusega kuni ~ 6 mm.
- Vajab prototüüpimist

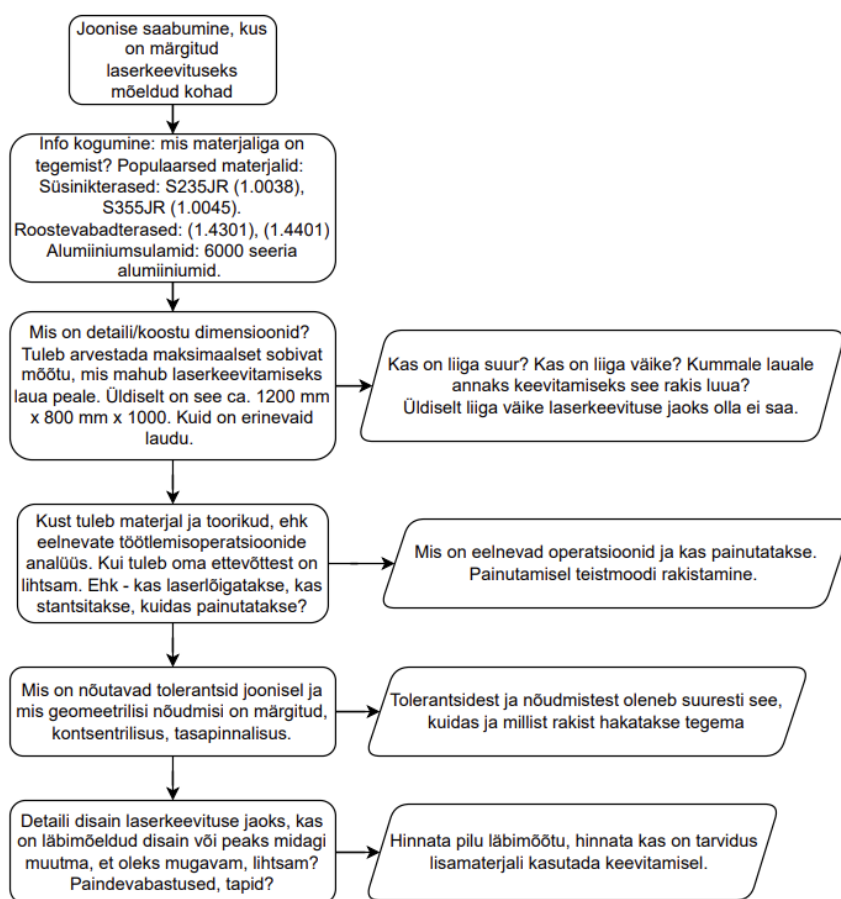
1.5 Laserkeevituse etapiline lähenemine

Metoodiline detaili laserkeevituse protsesside järjekord:

Esimeseks on alati joonise analüüs ja hindamine, kas üldse on võimalik seda keevitada ja selgitada välja täpsed kliendi nõudmised.

Allpool on toodud projekteerimise faasid 1-4. Esimeses faasis on tähtsaim saada teada insenerlikud parameetrid ja teadmised, mida on vaja, et alustada tootmistehnoloogia loomist. Enamus nendest saab joonistelt. Esimese etapi eesmärk on teada saada, millist keevitust soovitakse.

1. Etapp: info ja nõudmised

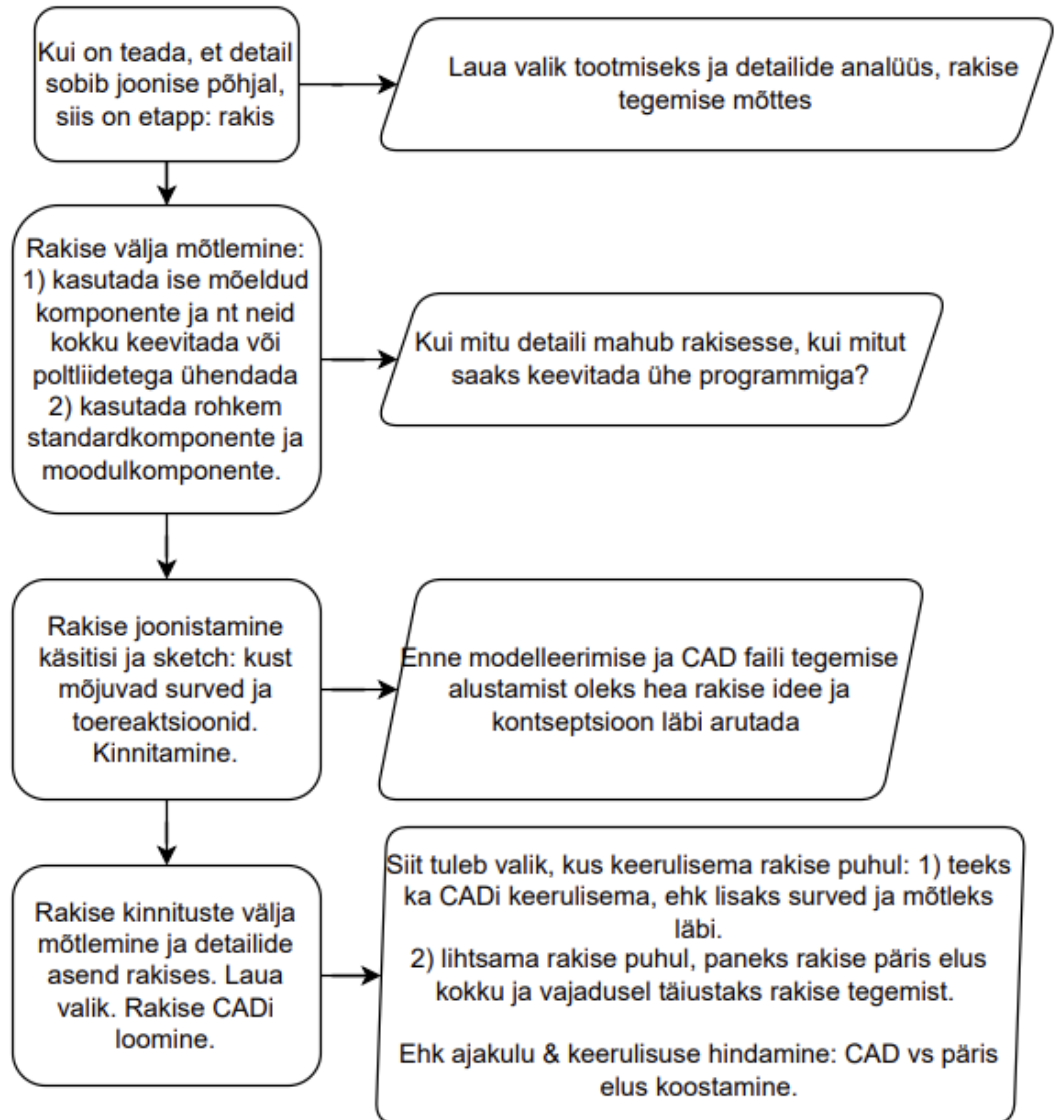


Joonis 13. Skeem kus on etapid, mis sisaldavad endas info kogumist klientidelt ja joonistelt vajaliku kätte saamist.

Teises projekteerimise etapis peaks pöörama tähelepanu tootearendusele ja detaili sobitamisele. Välja tooks erinevate rakiste analüüsimise, erinevate fikseerimis võimaluste hindamise ja võimalikud toote muudatused, mis teeks nt keevitamise

mugavamaks või efektiivsemaks. Kui rakis on spetsiaalselt välja lõigatud, siis tasub suuremat rõhku kontseptsioonile ja korrektsusele panna.

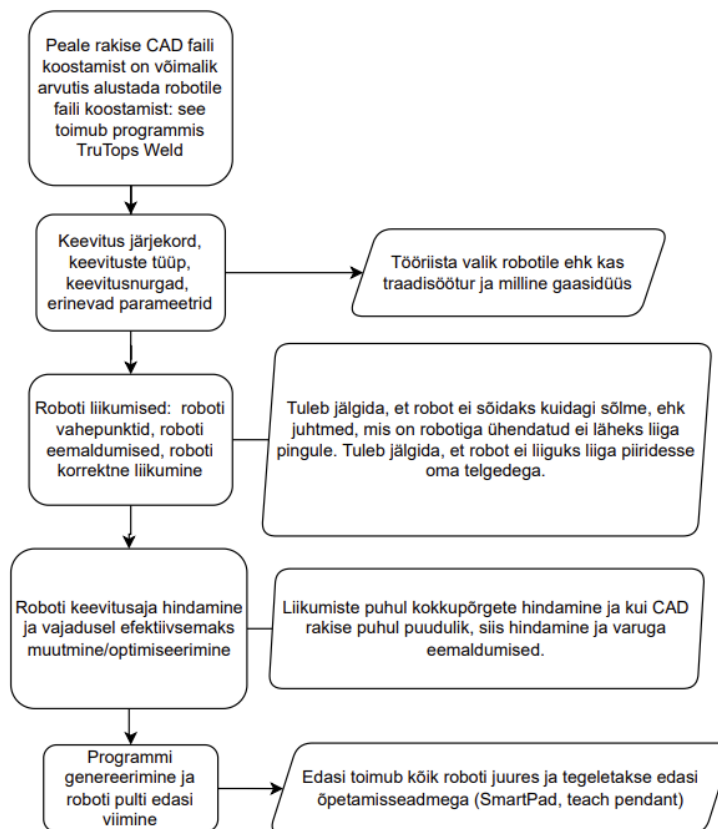
2. Etapp: rakise koostamine ja valik



Joonis 14. Rakise valiku ja kontseptsiooni välja töötamise etapp. Sageli üks kõige tähtsamaid etappe projekteerimises. Ehk 70-80% ideedest peavad selles faasis läbi mõeldud olema, pärast on keerulisem lisada asju. Sageli peab täiesti uuesti tegema nt midagi.

Kolmandas peatükis käsitletakse simulatsiooni loomist eraldi tarkvaras, mis genereerib ise keevituspunktid ja muud roboti liikumispunktid. Sellel faasil on keevituse aspektist tähtis osa, sest mida läbimõeldumalt programm teha, seda lihtsam on hiljem operaatoril roboti juures kohapeal. Tasuks infot jagada kahe isiku vahel kui rakise projekteerija ja simulatsiooni programmeerija on erinevad inimesed, sest roboti liikumisi tuleb arvestada kõikide komponentide suhtes, mis lõplikult rakisesse pannakse. Kõiki elemente ei ole ajalise kokkuhoiu tõttu CAD-i lisatud, sellepärast on kommunikatsioon tähtis. Tuleks kindlasti hinnata roboti võimekust ja tema telgede lõppasendeid, programm võib öelda, et kõik on tehtav, aga tegelikkuses on roboti A3 telg nt liiga kaugele läinud ja ei suuda seda liikumist edasi teha. Sellepärast on tähtis simulatsiooni läbi jooksutamine ja insenerlik hindamine, kas mõnda liikumist on võimalik lihtsamini teostada või just pikemal teel, aga seejuures töökindlal viisil.

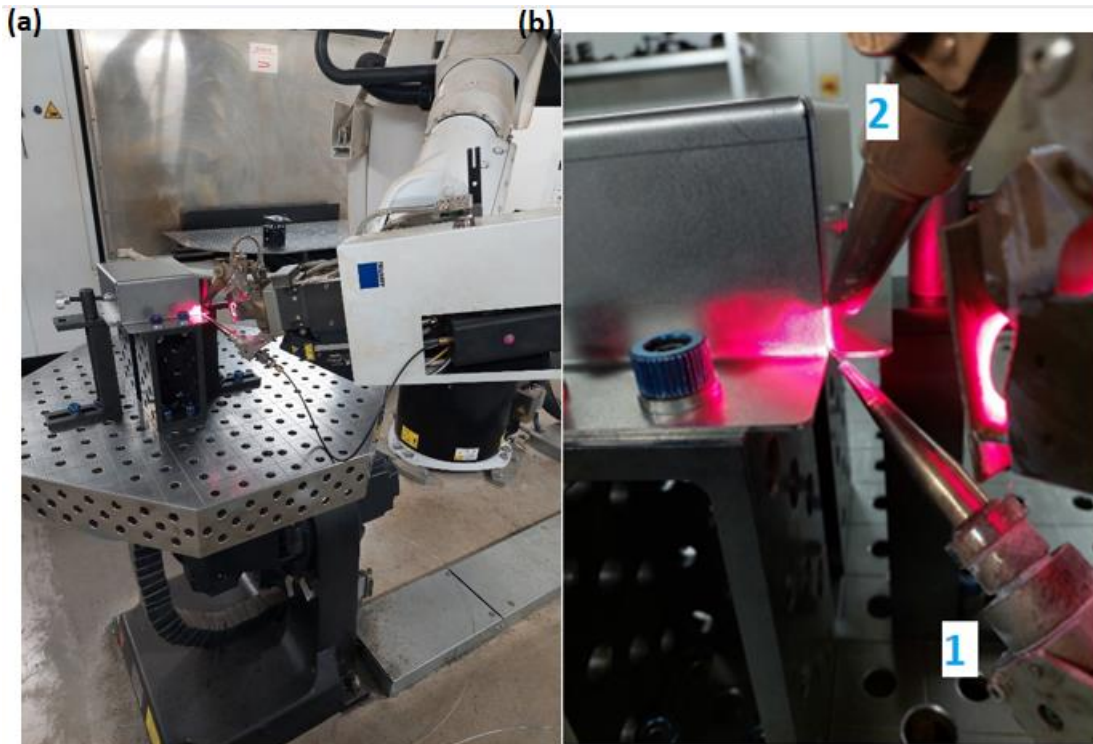
3. Etapp: simulatsiooni loomine ja roboti programmi turvalisuse kontroll



Joonis 15. Kolmas etapp ehk simulatsioon ja turvalisuse kontrollimine. Roboti liikumise üle vaatamine ja efektiivsuse hindamine.

1.6 Laserkeevituse robotiseerimine ja programmeerimine

Peale kolmandat faasi kui arvutis on simulatsioon tehtud, siis liigub fail robotisse. Robotis testitakse läbi keevituspunktid, vahepunktid ja eemaldumispunktid, vajadusel muudetakse punkte ja õpetatakse programmi üle.

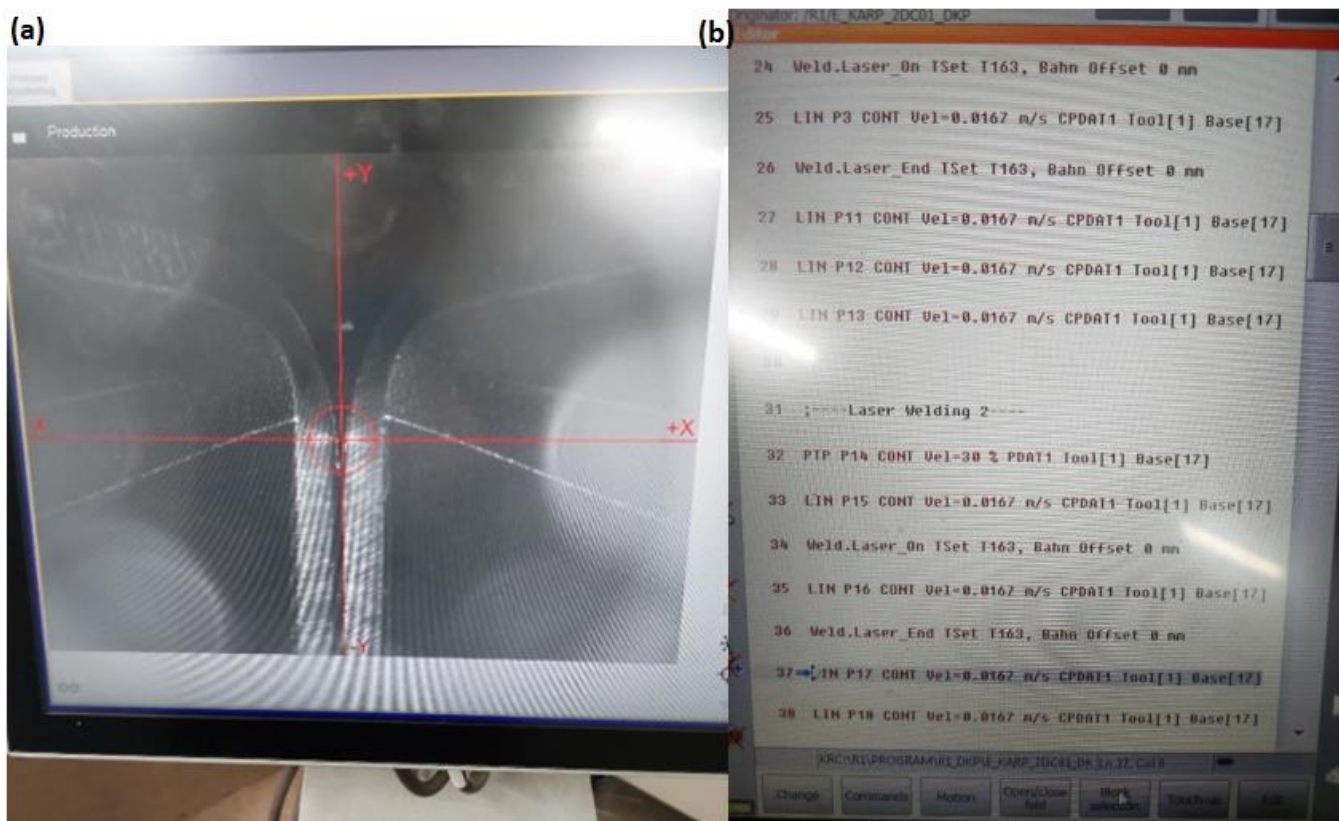


Joonis 16. (a) Robotiga punktide üle õpetamine, (b) pildil on traadisöötur (1) ja gaasidüüs (2).



Joonis 17. Õpetamiseade (smartPAD) millega saab keerulisi programme lihtsalt õpetada ja roboti liikumisi muuta. KUKA SmartPAD. [11]

Roboti programmifaili puhul on tarvis kontrollida paari esimese keevitatud detaili kvaliteeti. Kui kvaliteet on piisavalt hea, saab rakise toimivaks lugeda ja tootmise käima panna.



Joonis 18. (a) kaamerapilt ekraanil, joonelaser ja punktide fookusesse viimine, (b) programmikood SmartPADis

Vasakpoolsel joonisel on näidatud ekraan, kus on näha joonelaser, mis on detaili peale suunatud. See on punktide üle käimiseks, et oleks aru saada kui kaugel robot detailist on. Punase ringi raadius on 1 mm. Parempoolsel pildil on programmikood, mis on tavaliselt segu PTP ja LIN punktidest ning keevituse käskudest, kuid programm saab ka keerulisem olla.

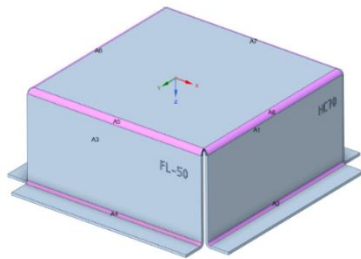
Programmikoodi ja programmide loomist simulatsioonis käsitletakse põhjalikumalt viiendas peatükis.

2. Toodete valik ja valmistamise tolerantsid

Antud peatükis käsitletakse toodete spetsiifilist modifitseerimist vastavalt laserkeevitusele. Seda saavutatakse painutuse nurgavabastuste muutmisega ja materjalide ülekattuvusega, mis annab laserkeevituse piisava materjali, mida keevitamise ajal sulatada. Toodakse välja tolerantsid ja standardid, mida laserkeevituse puhul kasutatakse.

2.1 CAD laserkeevituse jaoks

Toodetel on oma kindlad disaini eripärad ja nõudmised, mis toimivad laserkeevituse puhul kõige paremini. Sellepärast saab luua eraldi CAD-alapeatüki, mis keskendub disaini muutmisele laserkeevituse efektiivsemaks tegemise eesmärgil. Allpool on pilt testdetailist, kus materjaliks on 2 mm 1.0330 (DC01). Keevitamiseks on neli nurkkeevitust ja nurkadele on mõeldud erinevad ülekatted.



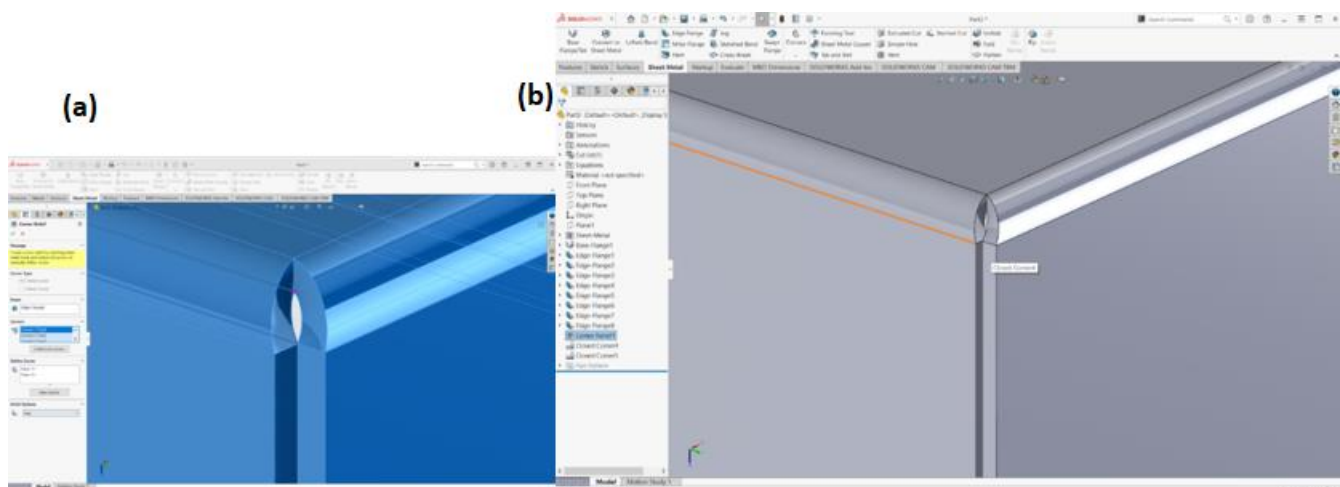
Joonis 19. Näidisdetail keevitamiseks

Toote disainimisel, painutusfailide ja nurga vabastuste korrigeerimisel on kasutatud TruTops Boost tarkvara. Neli erinevat nurka, kaks nurka lisamaterjaliga sulakeevitades (ingl k. *FusionLine*). Kaks nurka sulakeevitades (ingl k. *heat conduction*) ainult laseriga.

Toodete projekteerimisel tuleb ka arvestada tehnoloogiaga, mis neile järgneb enne kui need täpselt valmis saavad. Seega laserkeevituse jaoks on olemas sobilikumad detailide disainid. Materjalide erinevused ja nurgavabastused on tähtsad. Seega kui servade vahe on $> 0,3$ mm, tuleb tavaliselt kasutusele võtta lisamaterjali lisamine. Alternatiiv on paksemate materjalide puhul servade ülekattuvus (50-70%), mis annab sulatades piisavalt materjali, et detaili oma mõõtmed ei muutuks.

Toodete projekteerimisel ja koostude kokkupanemisel tuleks samuti mõelda tehnoloogiate variantide peale, kuidas see lõpuks kokku liidetakse. Kui arvestatakse keevitusega, siis tuleks mõelda ligipääsetavuse peale, rakise koostamise lihtsusele, keevitusajale ja potentsiaalsele tsükliajale. Selline mõtteviis võib säästa juba disaini järgus palju aega ja raha ühe detaili või koostu kohapealt. Sellepärast on tähtis, et projekteerija ja tehnoloog suhtleks pidevalt või projekteerijal oleks põhiteadmised ka tehnoloogiast, mis edaspidi disainitavale tootele rakendatakse ja mis nõuded sellega kaasnevad.

Pilude konstrueerimisel tuleks lähtuda sellest, kas keevitatakse lisamaterjaliga või ainult laserkeevitusega. Juhul kui lisamaterjaliga, siis ei ole üldjuhul vaja ülekattuvust.

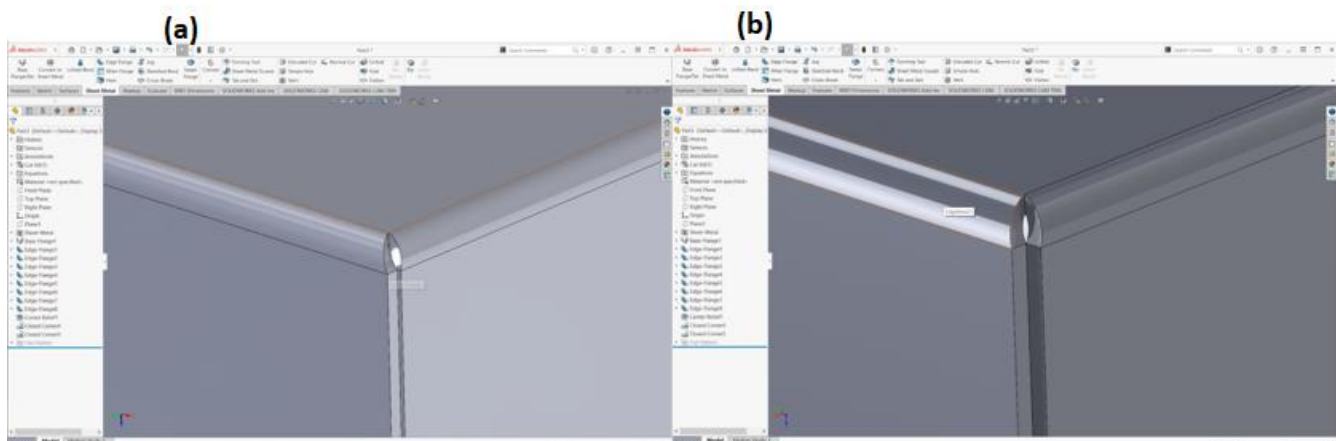


Joonis 20. (a) vaikimisi seadistus nurgavabastusele kui Solidworksis detaili teha (b) „Tear“ seadistus detailile.

Solidworksis ära näidatud, kuidas nurgavabastus vaikimisi seadistuse pealt „tear-seadistuse“ peale panna. Nurga keevitatavus paraneb kuna enam pole sellist tühja auku, vaid materjali on rohkem. Samuti ülekattuvus on (b) pildil 50%. Ehk parempoolne materjali külje serva on pikendatud 0,5 mm.

See annab sellise tulemuse, mis laserkeevitusele ilma lisamaterjalita sobib.

Joonisel 21. (a) on näidatud 70%-lise ülekattuvusega nurga disain.



Joonis 21. (a) 70% ülekattuvus, vasak serv on 0,7 mm pikendatud, (b) vaikimisi seadistatud nurgavabastus ja 0% ülekattuvus

Traadiga on paksemate materjalide puhul > 3 mm võimalik ka negatiivseid ülekattuvusi kokku keevitada. Materjalide vahe oleks sellisel juhul 1-2 mm.

Tabel 2. Näidatud testdetalli andmed ja mass:

Mass	1312 g
Volume	167171mm ³
Center of mass	(170, -59, 39)mm
Total surface area	170534mm ²
Principal moment and axis	5348519,57405068 g mm ² (1, -0,00272, -0,00002)
Principal moment and axis	6347770,7464735 g mm ² (0,00272, 1, 0,00008)
Principal moment and axis	9233519,74661931 g mm ² (0,00002, -0,00008, 1)
Known relative accuracy %	0

2.2 Eelnevad tötlusoperatsioonid laserkeevitusele ja detailide täpsuse nõuded

Laserkeevitusele eelnevad tötlusoperatsioonid võiksid ühtida ja olla samal tasemel, mis on keevitusoperatsioonid. Kuna laserkeevitusega saavutatakse suur täpsus, siis peavad ka eelnevad operatsioonid olema väga hea kvaliteedi ja täpsusega läbi viidud.

Seejuures on hea kui tootmisprotsessis on võimalikult palju automatiseerimist kaasatud ja vähendatud inimestest tulenevate potentsiaalsete vigade olemasolu. Nt lehtmetailist tooriku lõikamiseks on kõige täpsem laserlõikus.

Seega näitena tootmisprotsessi tsükkel oleks järgnev: laserlõigatud toorikud -> painutusrobot ->

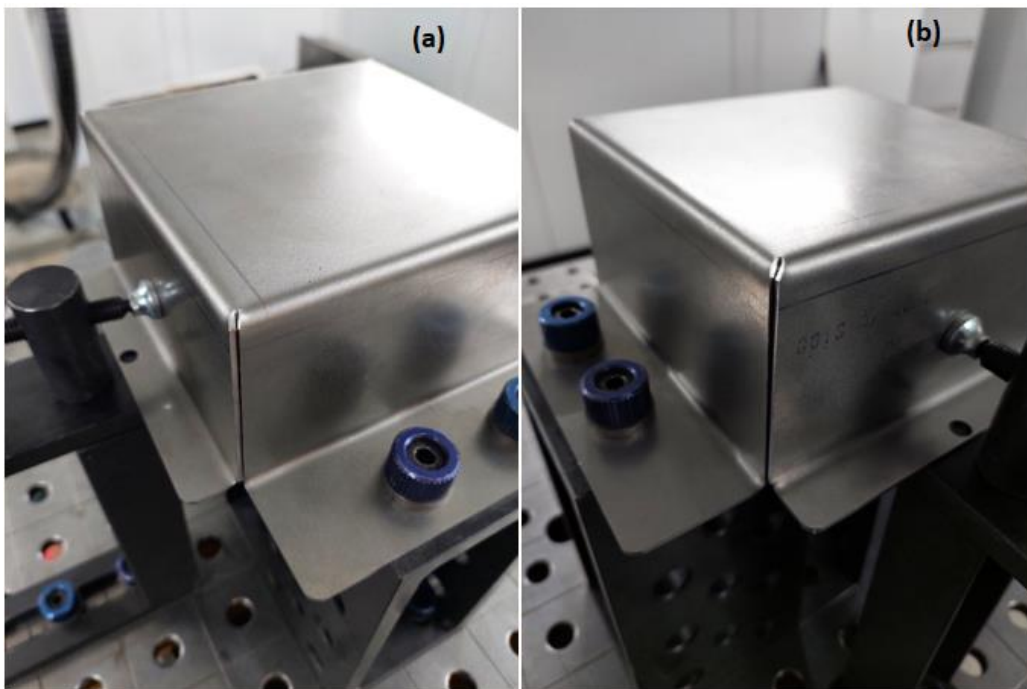
-> laserkeevitusrobot -> vajalik lihvimine. Sinna vahele käivad muidugi etapid, kus tuleb kontrollida mõõte ja teha prototüüpe, et testida kas toode vastab joonisel soovitud tootele.

Sellise tootmistsükliga on tagatud piisav täpsus ja toorikute identsus.

Toorikute identsust ja keevitusekvaliteeti mõjutab suuresti ka rakise kvaliteet ja efektiivsus. Seda käsitletakse peatükis nr. 3.

2.3 Testkeevitus ja katseplaadid

Saavutatavad tolerantsid on seotud nõutud mõõtmete täpsusega, mis joonisel antud on. Täpsuse juures kaks peamist faktorit: rakis ja keevitustehnoloogia (parameetrite valik).

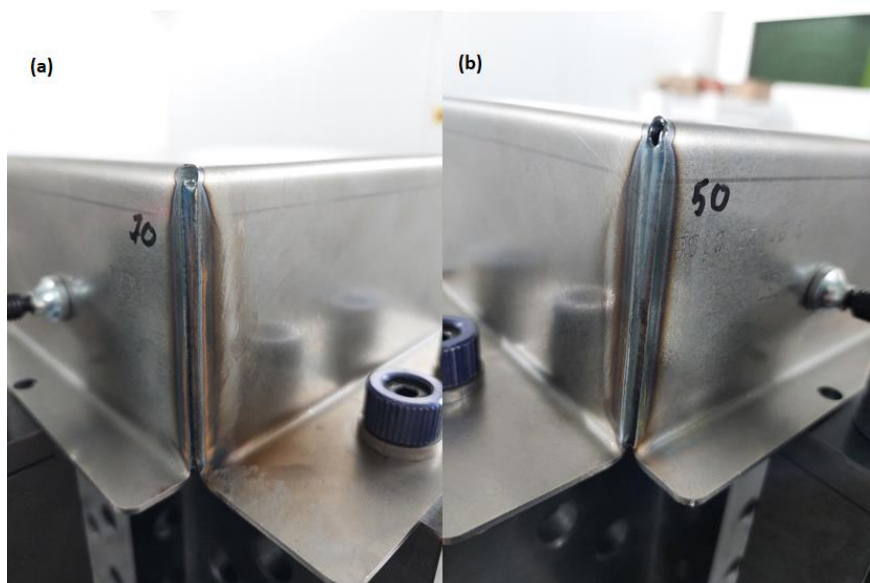


Joonis 22. (a) on 50%-line ülekattuvusega nurk ja (b) on 70%-lise ülekattuvusega nurk

Peale laserlõikust ja painutamist sai detailid prototüüpikesse pandud.

Tabel 3. katsetus nr.1 sulakeevituse parameetrid.

		Sulakeevitus 50-70%
1	Materjal	1.0330 (DC01)
2	Liite tüüp	Nurkliide
3	Materjali paksus	2 mm
4	Tehnoloogia	Sulakeevitus
5	Ligikaudne õhupilu	0, positiivne ülekattuvus 50-70%
6	Laseri võimsus	3000 W
7	Roboti kiirus	0,015 [m/s]
8	Fookus positsioon	15
9	Traadi etteandekiirus	0



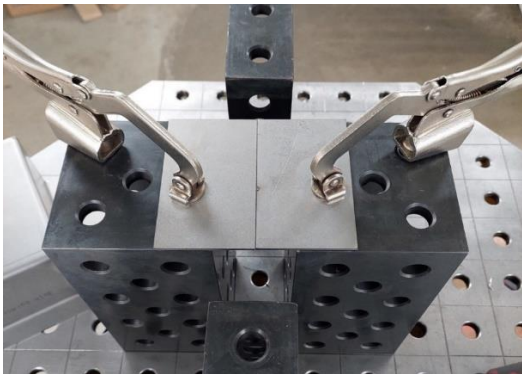
Joonis 23. Sulakeevitusega ilma lisamaterjalita 2 erinevat keevitust.

Vasakpoolsel (a) pildil on 70% ülekattuvusega nurga laserkeevitus. Parempoolsel pildil on 50% materjali ülekattuvusega keevitus. 70%-lise ülekattuvusega nurga keevituse kvaliteet tuli parem kuna tekkinud raadius peale keevitust oli sujuvam ja materjali oli keevitamiseks piisavalt.

Parempoolsel (b) pildil on nurka jäänud kas 1) liiga vähe materjali või 2) kahest keevituspunktist ei piisanud, et nurk ära keevitada. Tuleb lisada, et siinkohal autori eesmärk oli lineaarne keevitus ülevalt alla. See õnnestus ka 50%-lise lineaarse keevituse puhul hästi, aga visuaalselt kui ka katsudes oli arusaadav, et esimene (a) variant on parem.

Järgmisena sai läbi viidud katseplaatide ettevalmistus, plaadid asetati keevitamiseks nii, et nendevaheline pilu jäi $< 0,2$ mm.

Joonisel on näidatud katseplaatide kinnitus kahe survepingutiga ja plaatide ettevalmistus enne keevitust. Kevituse alla on jäetud tühi ruum, sest tegemist on sügava läbikeevitusega ja energia jõuab materjalist läbi minna:



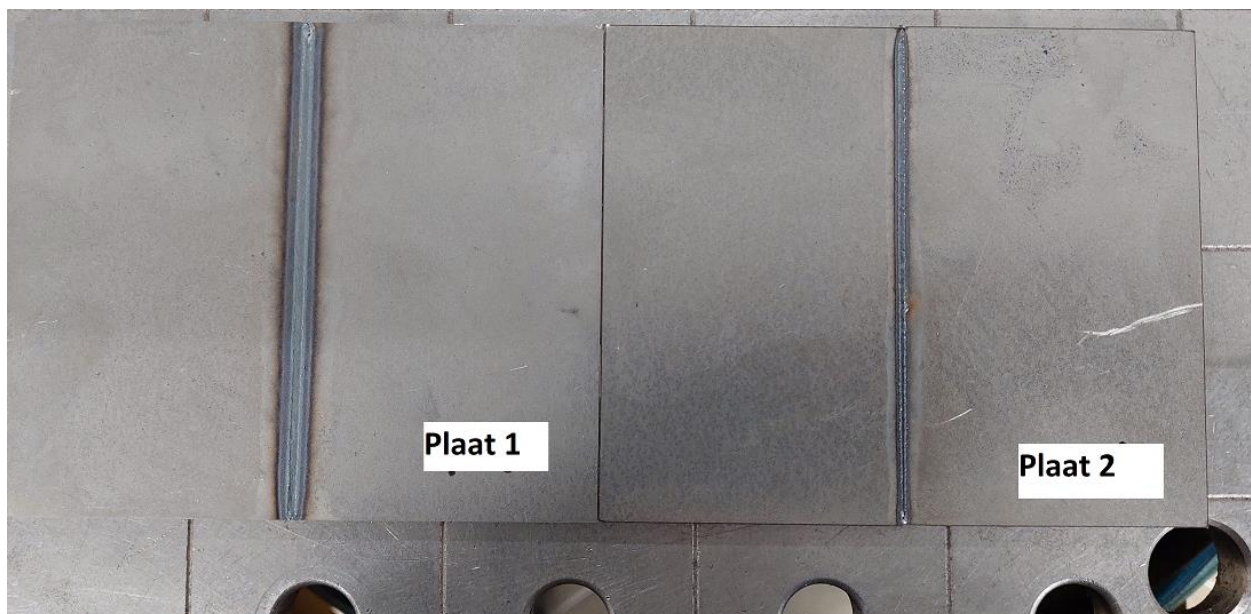
Joonis 24. Katseplaadid rakises

Tulemused kahe testplaadi näitel:

Plaat 1 – lisamaterjaliga sulakeevitus, Plaat 2 – laseriga läbikeevitus

Tabel 4. Katse nr 1. olulisemad keevitusparameetrid:

		Plaat 1	Plaat 2
1	Materjal	1.0330 (DC01)	1.0330 (DC01)
2	Liite tüüp	Põkkliide	Põkkliide
3	Materjali paksus	2 mm	2 mm
4	Tehnoloogia	Traadiga sulakeevitus	Laseriga läbikeevitus
5	Ligikaudne õhupilu	0,1 mm	0,1 mm
6	Laseri võimsus	3000 W	2000 W
7	Roboti kiirus	0,0333 [m/s]	0,0583 [m/s]
8	Fookus positsioon	0 mm	-2 mm
9	Traadi etteandekiirus	2,6 [m/min]	0 [m/min]



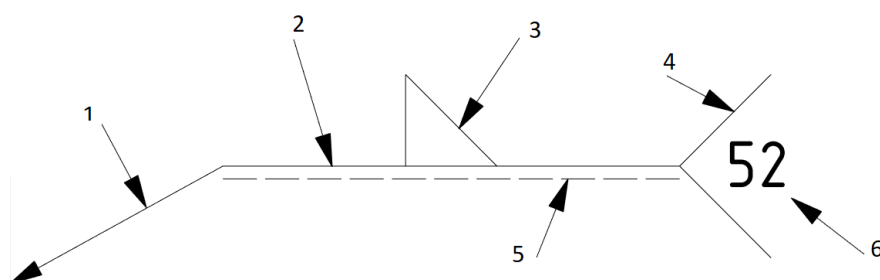
Joonis 25. Joonisel on näidatud kaks põkkkeevitust laserkeevitusega. 1) vasakpoolne on lisatraadiga ja suurema võimsusega 3 kW. 2) parempoolne on ilma lisamaterjalita ja võimsusega 2 kW.

2.4 Laserkeevitusega seotud joonised ja ISO standardid

Allpool on toodud standardid, mida kasutatakse laserkeevituste korrektsel esitamisel tööjoonistel ja kvaliteediastete määramisel.

Laserkeevitusprotsess tähistatakse numbriga 52 joonistel ja töökäskudel, ISO standardi 4063 põhjal. Spetsiifilisemalt tahkislaserite puhul 521, gaaslaserite puhul 522 ja dioodlaserite puhul 523. [12]

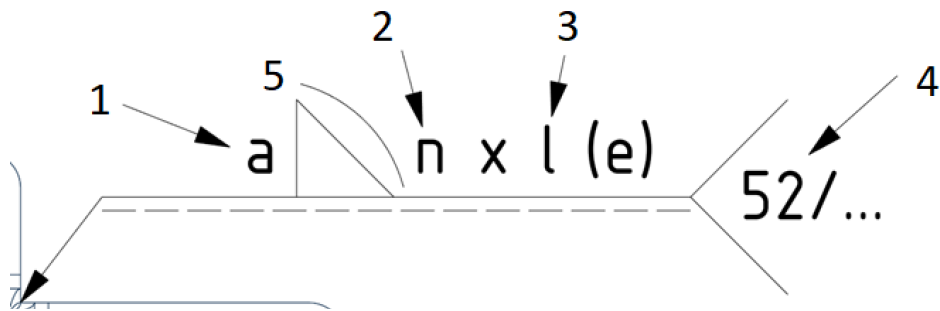
Keevituse tähistamise sümbolid:



Joonis 26. Keevituse sümbolite tähendused

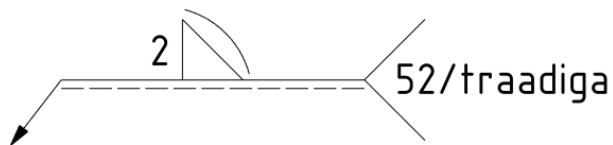
Joonisel nr. 26 on näidatud keevituse sümbolite tähendused: 1 - viitejoon, 2 - pidevviitejoon, 3 - keevisetähis (nurkkeervis), 4 - sabaosa, 5 - katkendviitejoon, 6 - keevitusprotsess (52 - laserkeevitus). [13]

Nurga sulakeevituse puhul tähistus:



Joonis 27. Sulakeevituse tähistuse sümbolid laserkeevitus puhul

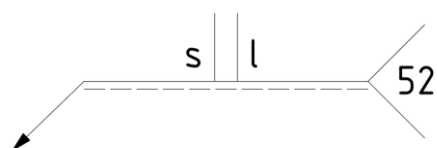
Joonisel 27. on näidatud nurga sulakeevituse puhul kasutatavad sümbolid: a – keevise jala pikkus (laserite puhul sümboolne väärtus), 2 – n (keevituste number); 3 – l (keevituste pikkus), e – (keevituste vahe), kui see osa jäetakse tühjaks tähendab see konstantset täiskeevitust. 4 – keevitusprotsessi tunnusnumber / muu informatsioon keevituse kohta. [13]



Joonis 28. Näide sulakeevituse tähistusest koos traadiga

Näitel on sulakeevitusega ümar nurkkeevitus, keevise jala pikkus 2 mm. Laserkeevitus ja lisamaterjaliga. Katteliidete puhul tuleks kommenteerida kas soovitakse läbiskeevitust.

Põkkkeevituse puhul tähistus:



Joonis 29. Sümbolid põkkkeevituse näitamiseks laserkeevitusega

Joonisel 29. näidatud sümbolid: s - tähistab keevituse sügavust kui arvulist väärtust pole, siis tähendab läbiskeevitust; l - tähistab keevituse pikkust, ilma väärtuseta tähendab konstantset keevitust.

EVS-EN ISO 13919-1 keskendub terassulamitele, niklisulamitele ja titaaniumsulamitele.

„EVS-EN ISO 13919-1:2019

Electron and laser-beam welded joints - Requirements and recommendations on quality levels for imperfections - Part 1: Steel, nickel, titanium and their alloys (ISO 13919-1:2019)". [13]

Visuaalse kontrolli põhjal jaotuvad laserkeevitused kolme keevitusastmesse: D, C, B. Kus B on kõige rangem kvaliteediaste.

EVS-EN ISO 13919-2 keskendub alumiiniumile, vasele, tsingile. [15]

Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure specification – Part 4: Laser Beam welding (ISO 15609-4:2009):

ISO 15609-4:2009 koondab enda alla kõik nõuded, mis peab laserkeevituse puhul WPSi lisama. Ehk aitab koostada keevitusprotseduuri atesteerimiseks valmistatud kontrollliidete positiivsete katsetulemuste põhjal koostatud tehnoloogilist kaarti. [16]

3. Rakiste lahendused ja põhimõtted konstrueerimisel

Peatükis käsitletakse peamisi rakiste koostamise etappe, printsiipe ja metoodikaid, mida võiks vaja minna laserkeevitusrakiste koostamisel. Rakiste tähtsus keevituste puhul on väga suur, laserkeevituse puhul kasvab rakiste täpsuse vajalikkus, eriti õhukeste materjalide puhul. Rakiste peamiseks ülesandeks on detailide fikseerimine sellisel moel, et need oleks igakord samamoodi rakises.

3.1 Rakiste projekteerimise alused

Keevitamine on tootmises üks kõige efektiivsemaid liitmismeetodeid. See on peamine viis, kuidas detailidest koost (keeviskonstruktsioon) kokku pannakse. Kuna levib kuumus ja termomõjud avalduvad nii koostus kui ka rakises, siis on probleemiks deformatsioonid. Rakised mängivad suurt rolli nende kuju muutuste vähendamisel ja eemaldamisel.

Rakised keevitamise jaoks saab jaotada sisuliselt kaheks: keevitamine, traageldamine (ig k *tacking*) ja lõikudena keevitamine (ig k *skip welding*).

Traageldamise rakised on mõeldud selleks, et koostu saaks kinni punktida enne keevitamist, et see saavutaks oma õige asendi. Sageli saab sama rakist laserkeevituses kasutada ka edasi keevitamise jaoks. Kuigi täis keevitamise rakis vajab sageli suuremat survet kuna suuremad pinged avalduvad nii keeviskoostule kui ka rakisele. Seega keevitusrakis peab olema paremini fikseeritud.

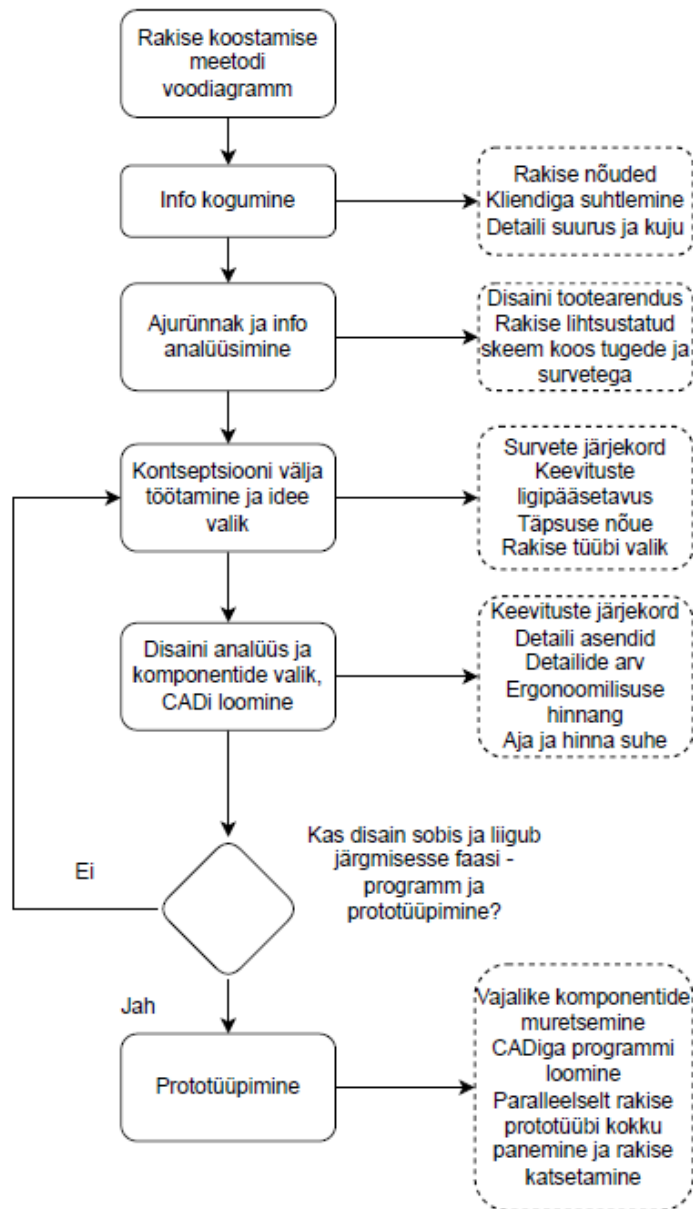
Kuigi üldiselt on rakiste vajatav täpsus väiksem kui teiste töötlusoperatsioonidega, siis laserkeevituses ja ka muudes automaatkeevitustes peab rakis olema täpne. Kuna keevitus toimub programmi põhjal, siis rakis peab hoidma detaili teatud täpsusega alati samas kohas. [17]

Kui on tegemist paksemate materjalidega (> 4 mm), siis on soovitatav teha suurema hoidmisjõuga rakis, mis suudaks suuremaid termopaisumisi ja survejõude tasakaalustada. Rakise liitmiseks on peamiselt kaks viisi:

- 1) Keermesliidetega rakis (eelis on lahtivõetavus ja komponente annab vahetada või taaskasutada)
- 2) Keevisliidetega rakis (rakis on lõplik ja vajadusel saab materjali lihvida, kuid disaini muutumisel peab uue tegema)

Rakis peaks olema läbimõeldud ja võimalikult väheste komponentidega. Lihtsuse ja kvaliteedi suhe on tähtis. Lõigates ise rakise detailid peaks teadlikult valima rakise komponentide materjali paksusi ja mõõtmeid. Teha rakis võimalikult lihtsalt, et ülesanne täidetud saaks. [17]

Rakiste tegemisel on soovitatav jälgida allolevat meetodikat:



Joonis 30. Rakise meetodika lihtsustatud voodiagramm (rakise meetodilisest koostamisest artiklis (H Radhwan et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 551 012028) [18])

Rakise nõuded ja spetsiifika:

Rakised tagavad peamise täpsuse ja see kuidas detail istub rakisesse. Ehk kas detail istub igakord täpselt samamoodi rakisesse. Rakise puhul on tähtis, et see ei muutuks ajas, ehk materjal peaks olema võimalikult tugev, kulumis-ja deformatsioonikindel.

Detailide kokkupuutumisel võiks detaili materjal olla sama, mis rakise materjal.

Lihtsuse ja ajakulu mõttes on hea kasutada olemasolevaid komponente ja hoida rakise idee võimalikult lihtsana, ehk luua süsteem, kus on kaks tuge ja kaks surumispinda.

Rakised peaks olema väga jäigalt laua küljes ja ei tohiks liikuda, see on väga tähtis. [17]

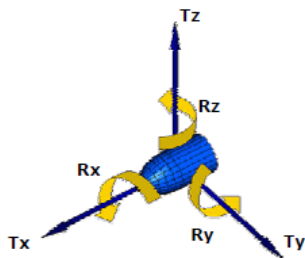
3.2 Vabadusastmed ja tasandid

Rakistamisel tuleks tavaliselt piirata liikumine kahes suunas, teised suunad siduda toega. Ehk piirata ära kaks tasandit ja sellest piisab, et detail ei liiguks. Võimaldab detailil ainult üles-alla liikuda.

Peamine rakiste eesmärk on töödeldav toorik või koost terve töötlemise aja vältel paigal hoida. Selle jaoks peab kinnitus olema:

- 1) Piisavalt tugeva survega, et detail ei liiguks ja rakise komponendid peataks detaili liikumise.
- 2) Kinnitus ei tohi deformeerida ega kahjustada töödeldavat toorikut.
- 3) Kinnituste kasutus peaks olema võimalikult lihtne, et kogu rakistamise protsess oleks tõhus ja ajakulu oleks minimaalne. [17]

Luues rakiseid laserkeevituse jaoks peab CAD projekteerija või tootmistehnik valdama põhiprintsiipe ja oskama hinnata, mis jõud on piisavad, et fikseerida toorik. Seega valdama tugevusõpetust ja oskama ette kujutada ka toereaktsioone ja jõudude tasakaale.

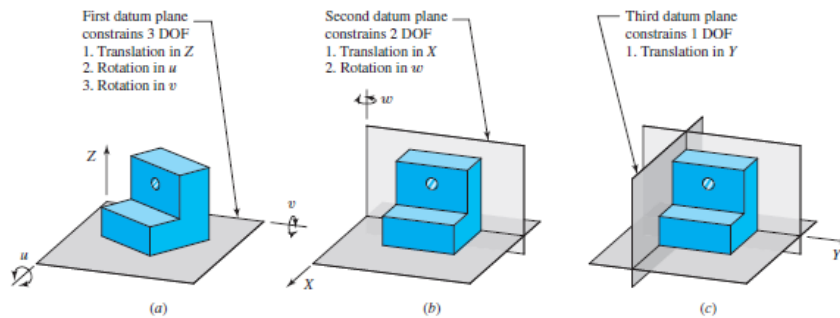


Joonis 31. Detailil on kuus vabadusastet, ehk suunda kus on võimalik vabalt liikuda. [19]

- 3 translaatorset (T_x, T_y, T_z)

- 3 pöörlevat (R_x, R_y, R_z)

Detaili rakistamisel on kasulik mõtestada ka tasandeid, kus liikumine toimuda saab ja mis tasandid peaks fikseerima, et detail oleks piisavalt fikseeritud. Tugede kontaktpunktid tasandi ja detaili vahel võiks püsida > 2 tk (vt. joonis 34, nr 1 & 2).



Joonis 32. (a) – detailil on tavaliselt kas laud või alusplaat, mis takistab negatiivse z-telje suunalise liikumise. (b) – nüüd lükates detaili teise tasandi külje rakise toe vastu on x-telje negatiivses suuna liikumine takistatud. (c) – viimasena pannes y-teljes negatiivse suunaline liikumine kinni on meil tüüpiline kolme tasandiga toetatud rakis. [20]

Kui toed on tasandite näol ette kujutatud on vaja lisada survejõud, mis detaili fikseerivad tugede vastu. Samuti tuleks mõelda survete järjekorrale ja katsetada kas on erinevus. Nii nagu ka tugede puhul on kontaktpind tähtis, mida suurem kontaktpind survekomponendi puhul, seda stabiilsem rakis kuna surve jaotub suurema pindala peale ära.

See tuleneb survepinge valemist:

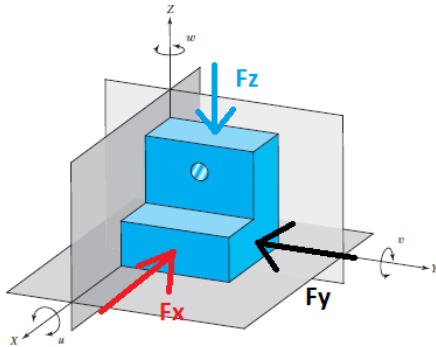
$$\sigma = \frac{F}{S},$$

kus

$$\sigma - \text{survepinge, } \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right]$$

F – survejõud [N]

S – ristlõikepindala [mm²] [13].



Joonis 2. Tavaliselt on survejõud klambrite näol F_x, F_y suunas, aga suunas F_z võib ka survet vaja minna kui detail peaks üles tõusma. Ehk järjekord võiks survetel olla F_z ja siis F_x, F_y . [20]

3.3 Surveklambrid ja pingutid

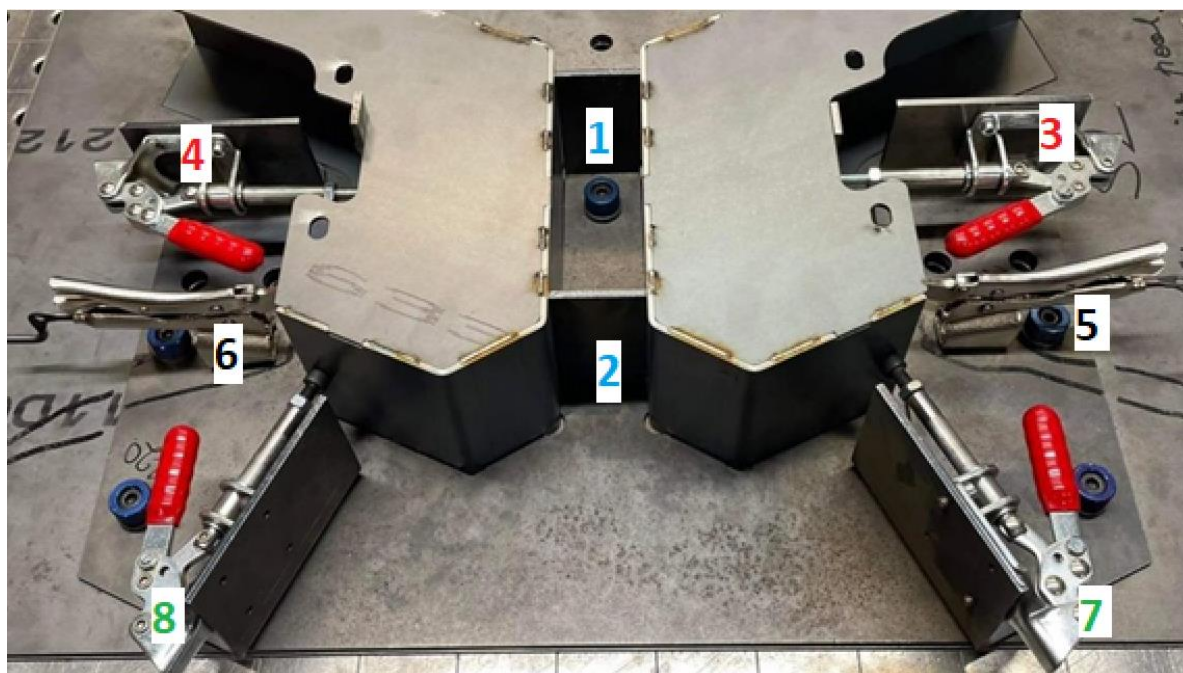
Surveklambrid on ühed kõige tõhusamad rakistamisel kasutatavad standardkomponendid, mida on lihtne lisada oma rakise juurde ja sättida vajaminev surve.

- Kiiresti reageerivad ja lihtne kasutus
- Fikseerimine käib lihtsalt ja seega kaasneb nendega kiirem rakistamine ja detailide vahetus.
- Suur eelis on ka survejõu (ingl.k. *clamping force*) ja hoidmisjõu (ingl.k. *holding force*) vahel.

Survejõud – jõud, mis kinnituskomponent rakistamisel toorikule avaldab.

Hoidmisjõud – jõud, mis kinnituskomponent suudab vastu võtta samal ajal hoides detaili rakises.

Surveklambrid töötavad hoobade süsteemil, kus liikumine on tavaliselt kolme pöördepunkti ümber. [17]



Joonis 34. Pildil on kahe positsiooniline rakis, kus vasakpoolsest positsioonist nr.1 saab detaili ümber pöörata ja panna positsiooni nr. 2. Pildil on ka peamised rakiste puhul kasutatavad surveklambrid 20304, mille maksimaalne hoidmisjõud on 136 kg ehk 1,33 kN.

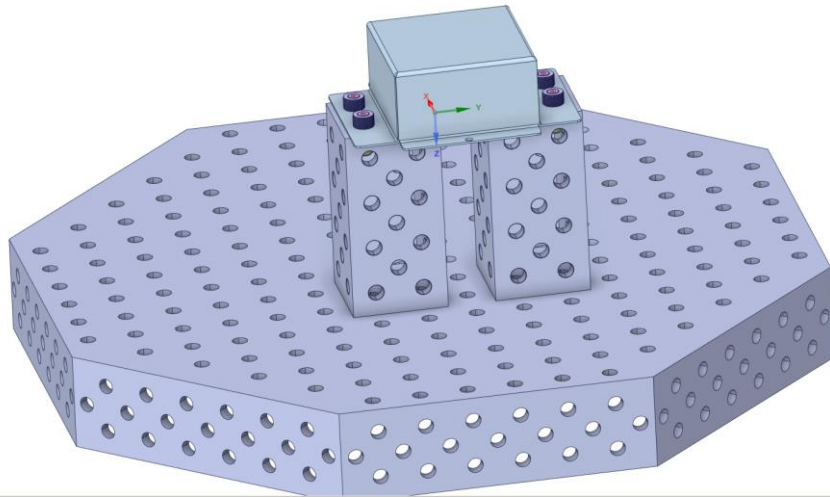
Pealtvaatel joonisel on märgitud:

- 1, 2 – sisetod.
- 3, 4 – horisontaalteljes surveklambrid, mille survepindalat on suurendatud lisaplaadiga.
- 5, 6 – pingutid.
- 7, 8 – vertikaaltelje suunalised surveklambrid.

Fikseerimise järjekord antud rakisel oleks 5, 6 -> 3, 4 -> 7, 8.

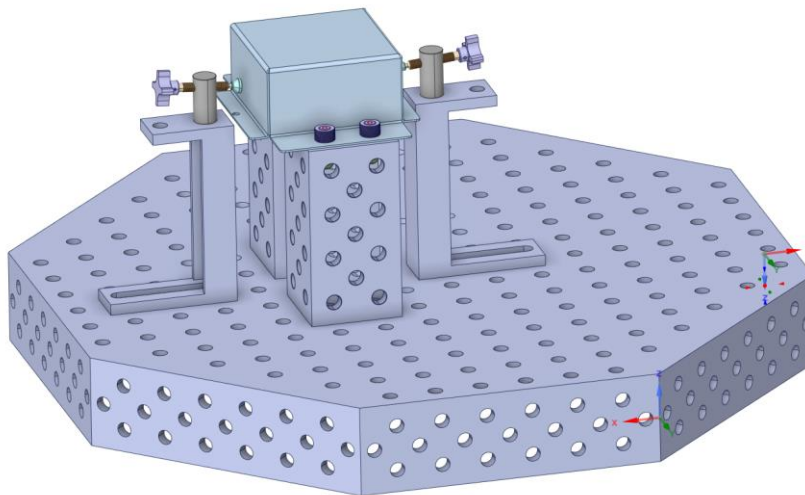
3.3.1 Näidisdetail rakistamine

Karp koos DKP laua ja kahe keevitusühendusplokiaga, avade järgi on detail paigas kuullukustuspoltidega.



Joonis 35. Modulaarne DKP laud, kahe plokiga.

Lisatud kaks L-kujulist kronsteini ja kaks külgsurvekomponenti TCX5210.



Joonis 36. Lisatud kronsteinid ja külgsurvekomponendid

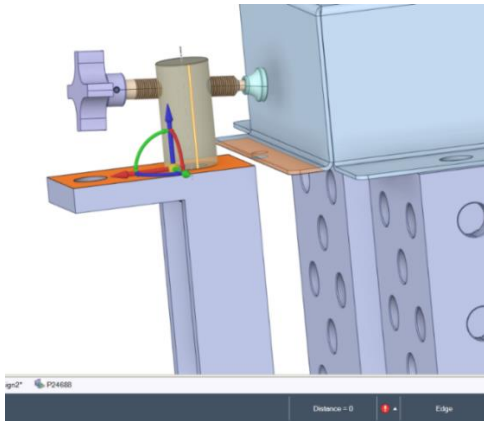
Rakise kontseptsiooni idee on:

- 1) kuullukustuspoltidega detail keevitusühendusplokkide külge ühendada
- 2) seest magnetiga detail riserblocki külge kinnitada (valikuline)
- 3) külje pealt surved silma järgi, et oleks nurgad ja detail piisavalt fikseeritud

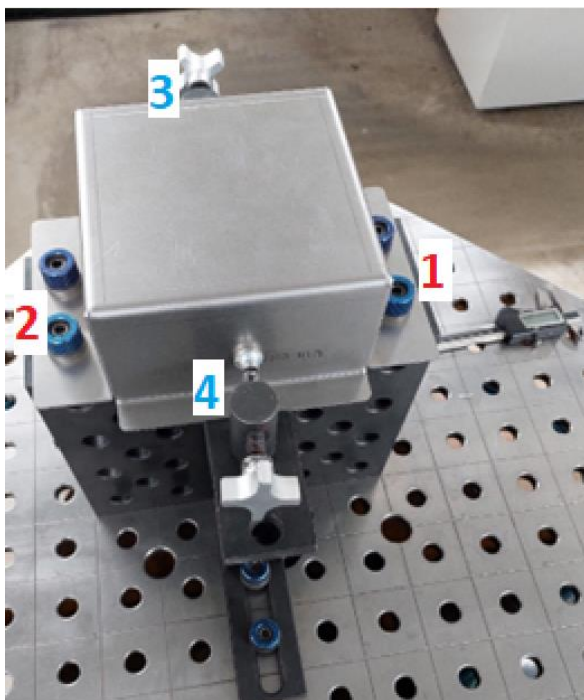
Sellisest kontseptuaalsest mudelist piisab, et liikumistrajektorid tuleks turvalised robotifailis. Kui midagi lisandub rakisesse, siis tuleb punkte üle õpetada kohapeal või siis teadlikult eemaldumised juba varuga programmeerida.

Samuti on näha kuidas modulaarne rakistamine on hea:

On näha, et kronsteini kõrgus on sama, mis keevitusühendusploki, ehk tegelikult annab veel kronsteini liigutada ja vajadusel toetada detaili. Kontseptsiooni faas on tähtis ja alati tasuks rakis koos survete ja tugegeda joonistada. Samuti, mis järjekorras surved peale läheks.



Joonis 37. Külgsurvekomponent ja selle toe sama kõrgus, mis plokkidel



Joonis 38. Prototüüprakis, (1,2) – poldid, (3, 4) – külgsurvekomponendid

Joonisel nr 38. on näidatud prototüüprakis, kus disainitud spetsiaalselt avad poldide (1, 2) jaoks, mis kiirendab rakistamise protsessi. (3, 4) on lisa külgsurvekomponendid, mis on painutatud serva kokkusurumise eesmärgil. Positioneerimise täpsuse korratavus on sellise rakis puhul keerulisem. Detaili nurgast (2) tuleks mõõta digitaalse nihikuga vertikaal-ja horisontaal teljelised kaugused laua külge kinnitatud ploki. Sellisel viisil annab programmi suuri muudatusi tegemata rakist uuesti kasutada.

$F_G = mg$, [13] kus

F_G – toote raskusjõud [N]

m – mass [kg]

g – raskuskiirendus $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$

Seega toote raskusjõud on: $F_G = 1,35 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 13,5 \text{ N}$

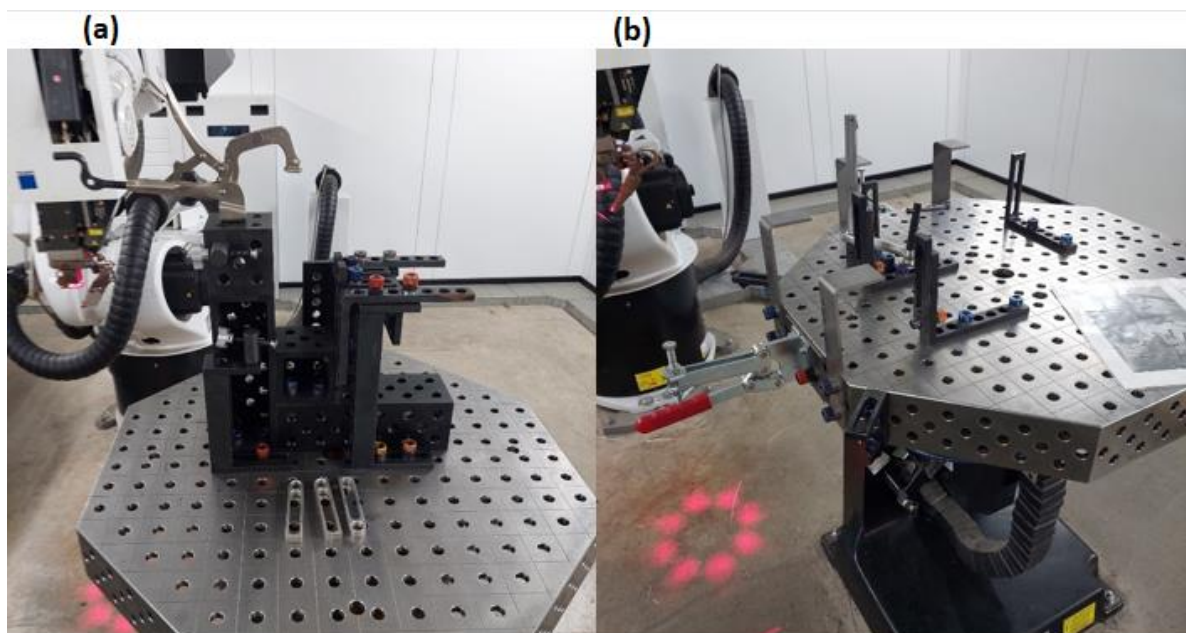
Detail on fikseeritud 4 lukustuspoldiga ja kahele küljele on külgsurvekomponentidega surve peale pandud, seega võib öelda, et detail on piisavalt hästi fikseeritud.

3.4 Modulaarne rakistamine

Standardsete komponentide kasutus võib tõsta rakise kiirust ja kvaliteeti. Samuti säästab see raha materjali ja tööjõu kulu pealt.

Kuna spetsiaalselt disainitud rakiseid saab ainult kindlate detailide jaoks kasutada, siis on hea valik modulaarsed komponendid, mida saab uuesti kasutada vana rakist lahti võttes.

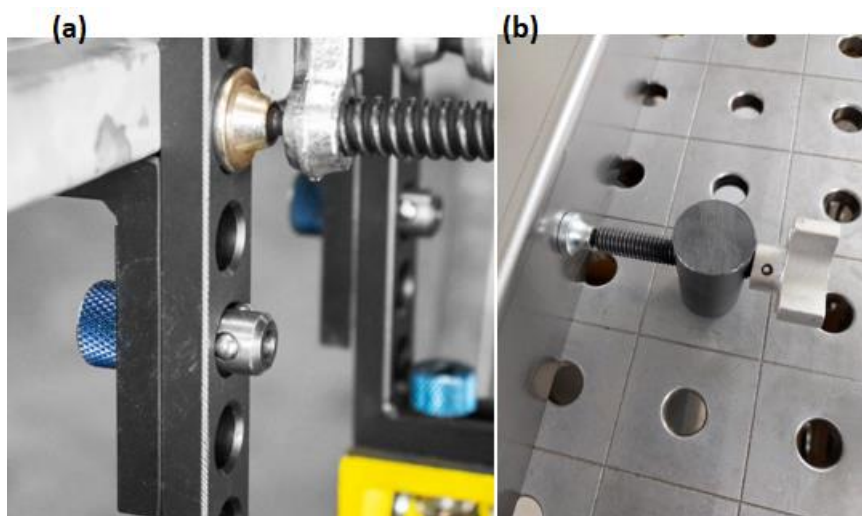
Modulaarse rakise puhul on spetsiaalsed komponendid, mida saab lukustuspoltidega nii laua kui ka teiste osade külge kinnitada. See annab rakise koostajale suure vabaduse ja ka võimaluse rakist paindlikult muuta kui seda peaks vaja minema. Keradega lukustuspolt võimaldab rakise kiiresti ja turvaliselt kinni ühendada. [17]



Joonis 39. Pildil kaheteljeline positsioneerimislaud DKP-400.1 – kannab kuni 400 kg

Vasakul pool (a) on modulaarsetest komponentidest loodud rakis, mis oli kas prototüüp või väiksema tootekogusega toode. Paremal pool (b) pildil on näha suurem

survekomponent (toggle clamp TDJB2F – survejõud ligikaudu 2260 N, hoidmisjõud 3700 N). Samuti on näha sisetõed, mis toetavad detaili kui surved väljast peale panna.



Joonis 40. Joonistel on näha kuullukustuspolt (T55055 ja paremal joonisel on laua külge kinnitatud külgsurvekomponent TCX5210)

3.5 Rakiste ligipääsetavus ja täpsus

Rakiste puhul on tähtis prototüüpimine, eriti suuremate projektide puhul. Väga keeruline on esimese korraga saada ideaalset ja toimivat rakist. Just täpsuse ja tolerantside poole pealt. Samuti prototüüpimisel puudub tavaliselt vajadus mitmekordselt detail rakisesse täpselt samamoodi paika saada. Olenevalt punktide arvust programmis, on mõistlik teha kiire rakis ja testida keevitus paari korraga ära. Kevituste puhul on võimalik kasutada robotile tasandilist tuvastamismeetodit TeachLine, mis tuvastab ühel tasandil geomeetrilise kujundi (ring või äärejoon) ja selle põhjal otsib üles kus on keevitusjoon. Seda saab lisada arvutist ja programmeerida kohapeal. Võimaldab teha rakise vähem täpsema kuid on palju ajamahukam ja soovitatav ainult suuremate ja tähtsamate tootmiste puhul.

Rakis ei peaks olema liiga täpne, muidu kasvab toote hind. See oleneb jooniselt saadud infost ja sellest, mis materjaliga tegu on. Samuti toote olemusest ja disainist. Rakise tolerantsid laserkeevituse jaoks ei tohiks lubada detailil olla rohkem kui $\pm 0,5 \text{ mm}$ mööda, kuna siis võib keevitus defektne või mitte täielikult joont jälgida. Kuna laserkeevitusega termomõjud on väikesed, siis muutused keevituse ajal rakises on tavaliselt väga väikesed. Peamiseks eesmärgiks oleks detaili piisava jõu ja positsioneerimistäpsusega kinnitamine. Kevitamise ajal detail ei tohiks termomõjudel muutuda. Detail võib

deformatsioonide tõttu läbi painduma hakata kui alustatakse pikka keevitust suure võimsusega ühest nurgast teise. Sellisel juhul tuleks kaaluda kas on võimalik detail paremini rakistada või siis enne koos punktida ja valida teise protsessina osati keevitus täiskeevituse asemel.

Olenevalt detailist sõltub see kui suur rakis peab tulema ja millise kujuga. Tuleb hinnata kas on ümaraid pindasid, kas on torusid. Mitu detaili on ja kuidas nad kokku istuvad, kui on tegemist koostuga.

Rakiste arv püsib tavaliselt ühe kuni kahe juures, tavaliselt on võimalik kõik keevitused ühe rakisega ära teha. Võimalus on, et ühes rakises keevitatakse üks pool ja siis teine pool kõrval rakises. Ehk on kaks positsiooni keevitamiseks (vt joonis nr. 25).

Operatsioonide järjekord on tähtis nii koostu lõpptulemuse mõttes kui roboti trajektoori silmas pidades. Järjekorda valides tuleb lähtuda sellest kuidas mõjub soojus detailile ja kas koostus muutub midagi kui kasutada erinevaid järjekordi. Koostu fikseerimiseks kindlas asendis kasutatakse punktimist enne keevitamist.

Keevituste ligipääsetavusel on väga tähtis osa rakise planeerimises, robot peab pääsema ligi ja keevitada optimaalselt. Sellele tuleb rakist projekteerides paralleelselt mõelda.

Disain peab olema ergonoomiline ja läbimõeldud ka töötaja silmade läbi, kes lõpuks sellega roboti juures tegelema hakkab. Tuleb mõelda kuidas oleks kõige lihtsam detaile vahetada ja rakisesse asetada. Samuti pole mõtet jätta rakisesse teravaid nurki ja muud, mis võiks kuidagimoodi kellelegi liiga teha.

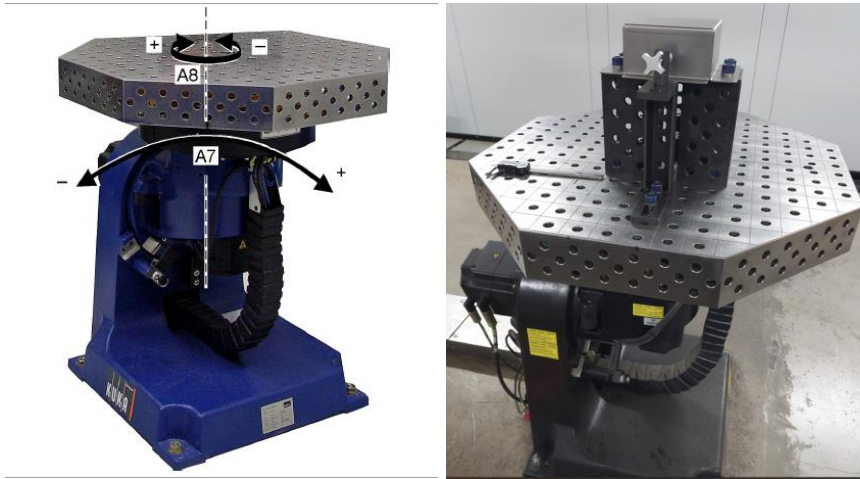
3.6 Töölaua valik, asendiplaan

Kõigepealt tuleks selgeks teha mida on robotisüsteemis vaja ettevõttele ja mis on kõige efektiivsem.

Tuleks luua asendiplaan ja ette kujutada tootmisprotsessi. Asendiplaan tuleks luua roboti ja töökoha jaoks.

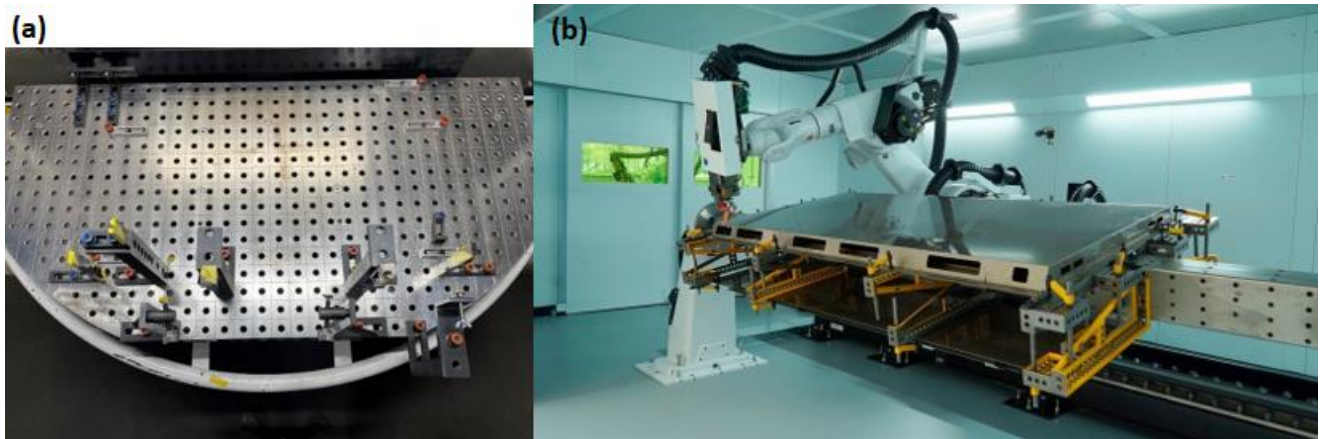
Seal peaks välja tooma komponendid:

1. Toorikute aluse koht
2. Valmis detailide asukoht
3. Ümar kallutatavad laud DKP1



Joonis 41. DKP 400.1 KUKA positsioneerimislaud, mis võimaldab kallutada ühes tasandis ja pöörata ümberringi, neid laua telgi on võimalik robotiga sünkroonis liikuma panna

4. Pöördlaud S11, S12 (efektiivsem tootmine) ja lihtsam ladustamine, lao korrashoid.



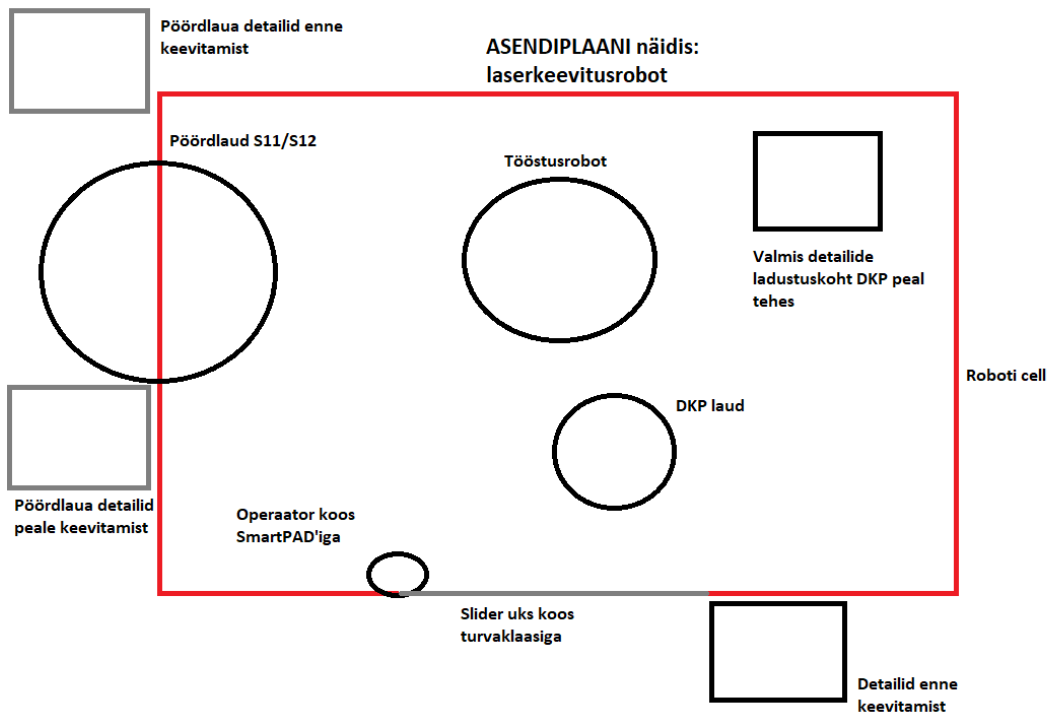
Joonis 42. (a) pöördlaud, mis on kaheosaline ja võimalik ümber pöörata, kasutatakse suuremate detailide ja tootmismahude puhul. Võimaldab tootmist efektiivsemaks muuta, (b) parempoolsel pildil on näidatud laud, kus on võimalik kinnitada kuni neljameetriseid detaile (4000 x 1500 x 1000, pikkus, laius, kõrgus)

5. Tööstusrobot (KR 30 HA)

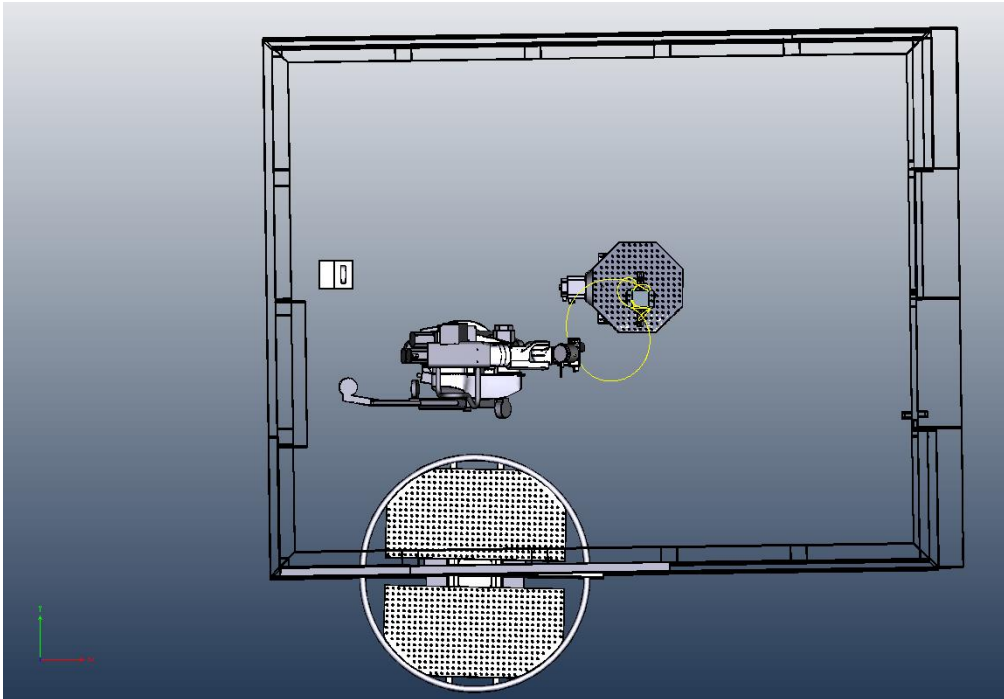


Joonis 43. KUKA 6-teljeline tööstusrobot KR-30 HA, 30 tähendab nimetuses tema tööriista kandevõimet, keevitamise puhul on see vähe tähtis, mis laserkeevituse jaoks sobib.

Kui on olemas asendiplaan, siis on ka parem analüüsida kumba lauda kindla projekti jaoks valida:



Joonis 44. Laserkeevitussüsteemi näidis asendiplaan, asendiplaane on väga palju erinevaid ja mõõtmed on muutuvad, kõik on vastavalt ettevõtete oma vajadustele ja võimalikkusele



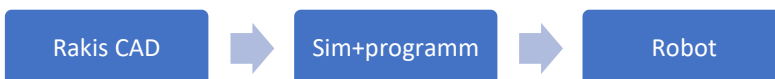
Joonis 45. Pealtvaates laudade asetus ja programmi pealtvaade

Töölaua valik on üldiselt lihtne, kui on prototüübid või väiksemad kogused, siis on parem kasutada DKP-d. DKP laual on robotil palju parem ligipääsetavus kuna laud saab end kallutada külgedele ja pöörata.

Kui on suuremad kogused, siis on tootlikkuse pärast parem kasutada pöördlauda. Samuti on pöördlaual rohkem tööpinda. Ehk laua valik on seotud detailide ja koostude suurustega.

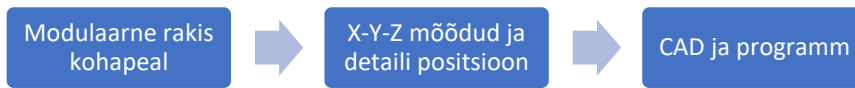
3.7 Rakise konstrueerimise võimalused

Rakis konstrueerimine arvutis või siis roboti juures kohapeal. Suuremate projektidega oleks parem rakis arvutis luua, sest see muudab rakise loomise protsessi mugavamaks ja turvalisemaks.



Joonis 46. arvutis enne siis kohapeal

Kui aga on lihtsam rakis ja vaja katsedada, nt prototüüp. Siis võib kaaluda varianti kus:



Joonis 47. rakis kohapeal valmis ja selle põhjal lihtne fail arvutis

Prototüüpide puhul on sageli vaja informatsiooni kas see detail on keevitatav ja sellega saab väga hästi prototüüprakis hakkama. Keevitusfailide tegemine on üldiselt alati mõistlikum arvutis teha, esiteks see on kiirem ja teiseks see on turvalisem. Arvutis läbi simulatsiooni on palju parem kontroll roboti liikumise üle, nii on nõ „topelt kontroll“. Kohapeal operaator käib T1-s ehk aeglasemas konfiguratsioonis õpetamiskiirusega üle, aga tal on see teadmine, et see programm on arvutis üle vaadatud. See, et peaks tekkima mõni kokkupõrge või probleem, on juba suuresti vähendatud.

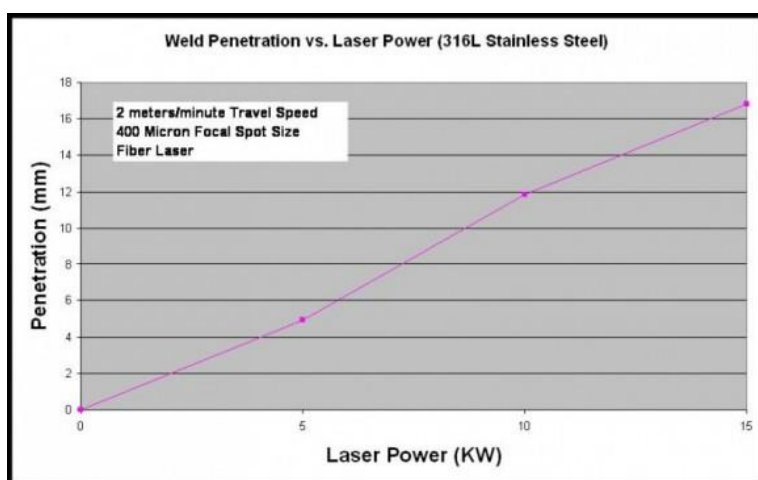
4. Laserkeevituse parameetrite valik

Antud peatükis käsitletakse peamiste laserkeevitusparameetrite olulisust ja nende valemiteid. Hinnatakse erinevate materjalide sobivust keevitamiseks ja arvutatakse CE valemi põhjal süsinikekvivalent. Liidete valik, mida tahkislaserite on eelistatud keevitada ja lisamaterjali kasutamise efektiivsus laserkeevituses.

Laserkeevitusroboti valikul on väga oluline maksimaalne võimalik võimsus. Kuna see määrab suuresti ära kui suure paksusega materjale kokku saab keevitada. Parameetrite valikul laserkeevituses kui tootmisprotsessis on tähtsad:

1. Materjalitüüp
2. Materjali paksus
3. Keevitusetüüp
4. Keevitamismeetod (sulakeevitus (*ingl.k. heat conduction welding*), fusionline welding (*ingl.k. traadiga sulakeevitus*, sügav läbisulatusega keevitus (*ingl.k. deep penetration welding või deep welding*))

Tavaline rusikareegel: süsinikteraste ja roostevabateraste kohta. 2 m/min kiirusel on vaja umbes 1 kW võimsust iga millimeetri läbimiseks.



Joonis 48. Laseri läbikeevitatavuse (vertikaalteljel) ja laseri võimsuse (horisontaalteljel) suhe roostevabaterase näitel [21]

Lasери tähtsamad parameetrid keevitusprotsessi juures on:

- Laseri võimsus P (W)
- Laseri intensiivsus I ($\frac{W}{cm^2}$)
- Keevituskiiirus v (roboti kiirus $\frac{m}{min}$)
- Traadi etteandekiirus w ($\frac{m}{min}$)

- Kaitsegaasi kasutus ja selle vooluhulk ($\frac{\text{flow}}{\text{min}}$)
- Eelkaitsegaasi kogus ja järelkaitsegaasi kogus – (ingl k. *preflow ja afterflow*) ($\frac{\text{flow}}{\text{min}}$)
- Fookuskaugus ja fookus diameeter
- S_{pilu} – materjalide vahelise pilu pindala läbilõikes (mm^2)
- A_{traat} – traadi läbilõike pindala (mm^2)

Kasutades traadi etteandmist keevitamise ajal lisanduvad parameetrid, mis mängivad suurt rolli keevituse kvaliteedis. Tähtsamaks muutub keevituskiirus (roboti kiirus) ja traadi etteandekiirus. Gaasina kasutatakse tavaliselt Ar kaitsegaasi või gaaside segu. Ar on inertgaas, õhust raskem, hea keevitusvanni kaitse ja ei reageeri põhimetalliga.

Traadi etteandekiirust saab valemiga esitada järgnevalt:

$$w [\text{m/min}] = \frac{v [\text{m/min}] * S_{\text{pilu}} [\text{mm}^2]}{A_{\text{traat}} [\text{mm}^2]}$$

Traadi kasutusega kaasneb üldiselt 10% kuni 20%-line keevituskiiruse vähenemine, kuna on rohkem materjali, mida peab sulatama. [22]

4.1 Materjali margid keevituseks

Eelistatakse roostevaba terast ja süsinikterast laserkeevituseks kuna vase ja alumiiniumsulamite puhul on suur tagasi peegeldumine. Alumiiniumsulamite puhul peab eeltööd tegema ja parameetreid hoolikalt enne katsetama.

Test detaili puhul sai kasutatud tunnusnumbriga 1.0330 (DC01) madalsüsinikterast, mis klassifitseerub terase grupi numbri „03“ järgi kui „kvaliteettersed“ ja tunnuseks on kas 1) terased, millel on $C < 0,12\%$ või 2) $R_m < 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Kehtivad praktiliselt mõlemad.

Järgnevalt sai leitud testdetaili süsinikekvivalendi (CE) valemi ja keevitatavuse hindamine keemilise koostise järgi.

Materjali DC01 sertifikaadist saadud keemiliste ühendite protsendid materjalis.

Külmvalts madalsüsinikteras DC01-A-M-O leht ISO EN 10130:2006 põhjal.

Kus A tähistab pinnatüüpi ja pinnaviimistlust „Matt“ ($0,60 \mu\text{m} < Ra \leq 1,9 \mu\text{m}$). [23]

Tabel 5. Materjali DC01 sertifikaadist välja võetud madal süsinikterase keemiline koostis %-ides

Nr		C	Si	Mn	P	S	Al
001	K189600A	0,05	0,014	0,2	0,010	0,007	0,029

Keemiliste ühenditega saab arvutada CE valemi põhjal materjali süsinikusisalduse.

$$CE = C\% + \frac{\text{Mn}\%}{6} + \frac{(\text{Cr}\% + \text{Mo}\% + \text{V}\%)}{5} + \frac{(\text{Ni}\% + \text{Cu}\%)}{15} \quad [24]$$

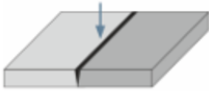
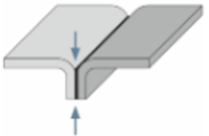
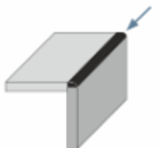
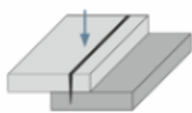
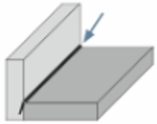
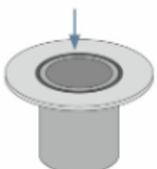
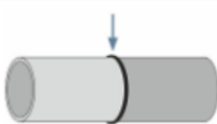
$$CE = 0,05 + \frac{0,20}{6} + \frac{(0)}{5} + \frac{(0)}{15} = 0,083$$

Selle valemi põhjal saab öelda, et keemilise koostise järgi on materjal valmis keevitamiseks kuna CE väärtus on < 0,40.

4.2 Liidete valik laserkeevituses ja pilu suuruse vähendamine

All toodud tabelis on ülevaade enimlevinud laserkeevitus keevisõmblustest ja protsessidest, mida kasutatakse tahkislaserte (Yb: YAG) ketaslaserite puhul.

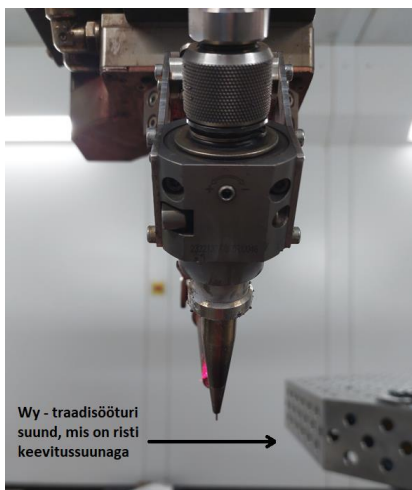
Tabel 6. Keevituste geomeetrised lahendused laserkeevitusega [24]

Õmbluse kujud		Sobiv laserkeevitus protsess
Põkkliide		<ul style="list-style-type: none"> • Sulakeevitus traadiga • Sügav läbisulatusega keevitus • Sulakeevitus
Kahe L-kujulise painutatud detaili liide		<ul style="list-style-type: none"> • Sügav läbisulatusega keevitus
Nurkliide		<ul style="list-style-type: none"> • Sulakeevitus traadiga • Sulakeevitus
Katteliide		<ul style="list-style-type: none"> • Sügav läbisulatusega keevitus
Nurkliite sisemine õmblus		<ul style="list-style-type: none"> • Sulakeevitus traadiga • Sügav läbisulatusega keevitus
Aksiaalne ringikujuline keevisliide		<ul style="list-style-type: none"> • Sügav läbisulatusega keevitus
Radiaalne ringikujuline keevisliide		<ul style="list-style-type: none"> • Sulakeevitus traadiga • Sügav läbisulatusega keevitus

4.3 Laserkeevituses lisamaterjali kasutamine ja selle efektiivsus

Lisamaterjali kasutamine muudab laserkeevituse protsessi parameetreid ja nende kasutust. Lisanduvad traadi etteandekiirus, traadisööturi positsioon keevitamise suhtes. Need parameetrid on tihedalt sõltuvad keevitatava detaili disainist, ehk kui suur on pilu kahe liidetava plaadi vahel ja mis paksuse lehtmetailiga on tegemist. Traadiga keevitades vajab laserkeevitus rohkem võimsust ja termomõjutsoon muutub suuremaks sellepärast. [26]

Etteandetraadi diameeter mõjutab ka keevitusprotsessi. Õhupilu materjalide vahel saaks teoreetiliselt olla kaks korda suurem etteandetraadi diameetrist kui traadisöötur suudaks piisavalt kiiresti traati ette anda. Mis tuleb piiravaks on piisav võimsus, mis on nõutud, et lisamaterjaliga keevitus ära sulatada. [26]



Joonis 49. Traadisöötur tagant vaates. W_y – tähistab musta noole suunas traadi nihkumist.

Oletades, et W_y on laserikiire optilise telje ja traadi vaheline kaugus vaadates risti (transverse to welding direction) keevitussuunaga. Probleemid traadisööturi õige asetusega puudumisega on selged. Kui traadi $d = 2 \text{ mm}$ ja positsioon on mööda

$W_y = 0,25 \text{ mm}$, sulatus efektiivsus langeb 30% ja traadi diameetrite 1 mm ja 1,2 mm kohta vastavalt 36%. (Arata et al., 1986) Positsioneerimise ebatäpsus W_y teljes suurusega 0,4 mm võib muuta keevituse ebasümmeetriliseks. [26]

Energia leidmiseks, mis on vajalik, et ära sulatada traat on antud allolevas valemis:

$$P = \rho * V_{fw} * (c * (T_m - T_0) + L) \text{ [26]}, \text{ kus}$$

$$P = \text{laseri võimsus [W]}$$

$\rho = \text{materjali tihedus } \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right]$

$V_{\text{fw}} = \text{traadi kulu (volume)} \left[\frac{\text{mm}^3}{\text{s}} \right]$

$C = \text{erisoojus } [\text{J/kgK}]$

$T_m = \text{sulamistemperatuur } [\text{K}]$

$T_0 = \text{keskkonna temperatuur } [\text{K}]$

$L = \text{sulamissoojus } [\text{J/kg}]$

$V_{\text{fw}} = \frac{W}{v} * A_{\text{traat}} [27]$

Võttes andmete jaoks süsinikterase saame mehaanikainseneri käsiraamatust, et:

$\rho = 7,85 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$, Sulamistemperatuur $\approx 1500 \text{ }^\circ\text{C}$, Sulamissoojus $= 205 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, Erisoojus

$c = 0,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$, $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. [13]

Traadiga katsetus nr. 1 (ebaõnnestunud):



Joonis 50. Ebaõnnestunud traadiga keevitus, $P=3000 \text{ W}$

Traadiga ebaõnnestunud keevitus, põhjuseid selleks on erinevaid:

1) detaili disain ja rakistus ei olnud piisav ja keevitusepilu oli liiga suur vastava parameetri jaoks

2) traadi vahetusel ei paigaldatud traati korrektselt (ebatõenäoline)

3) parameeter oli vale ehk nt kas traadi etteandekiirus oli liiga suur

4) keevituskiirus oli liiga suur

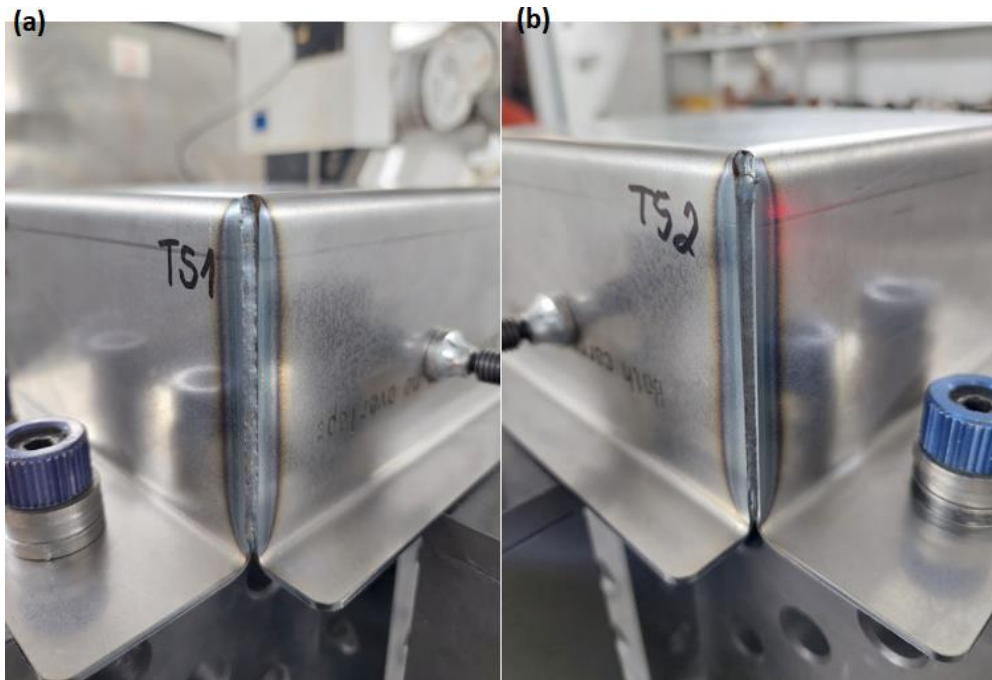
Pakuks nr. 3 või nr. 1. Pakutud variantidest oli õige kolmas variant ehk parameeter oli vale. Sai uuesti välja lõigatud ja painutatud samasugune detail ja katsetatud keevitamist, seekord ainult traadiga. Keevitused õnnestusid ja traadi ette andmine toimus õigesti.

Tabel nr. 7 katsetuste keevitusparameetrid

		Katsetus nr. 1	Katsetus nr. 2
1	Materjal	1.0330 (DC01)	1.0330 (DC01)
2	Liite tüüp	Nurkliide	Nurkliide
3	Materjali paksus	2 mm	2 mm
4	Tehnoloogia	Sulakeevitus traadiga	Sulakeevitus traadiga
5	Ligikaudne õhupilu	0,5 – 1 mm	0,5 – 1 mm
6	Laseri võimsus, P	3000 W	3000 W
7	Roboti kiirus, v	0,0167 [m/s]	0,0167 [m/s]
8	Fookus positsioon, f	-5	0
9	Traadi etteandekiirus, w	4,9 m/min	(a) 4,3 ja (b) 3,3 m/min (kaks erinevat nurka)

Katsetus nr. 2:

(a) TS1 - $w = 4,3$ m/min, (b) TS2 $w = 3,3$ m/min



Joonis 51. Teine katsetus (a) variant ja (b) variant

Katsetused toimisid ja parameetrid sobisid. Ehk eelneva parameetri puhul oli fookus antud keevituse jaoks liiga sügaval ehk ta ei sulatanud traati ära ühtlaselt, sellepärast jäi traat kinni.

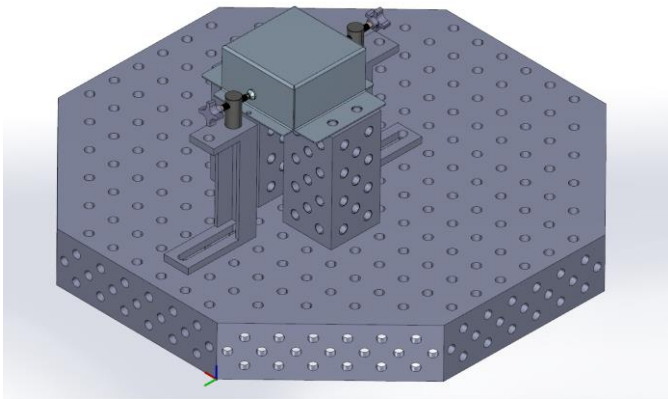
Muutused toimusid fookuse juures peamiselt, traadi etteandekiirus muutus 4,9 pealt 4,3 peale. See on väike muutus. Analüüsis keevitust, siis saaks traadi etteandekiirust ka mõningal määral suurendada kui tahta ühtlasemat üleminekut servade ja keevituse vahel.

5. Programmeerimine

Antud peatükis kirjeldatakse programmeerimisetappe ning analüüsitakse, miks on simulatsioon ja off-line programmeerimine parem kui tavaline käsitsi programmi loomine.

Programmi loomine:

Simulatsiooni ja keevitusprogrammi loomine tarkvaras TruTops Weld: alustamiseks töstetakse eelnevalt loodud CAD step failina programmi.

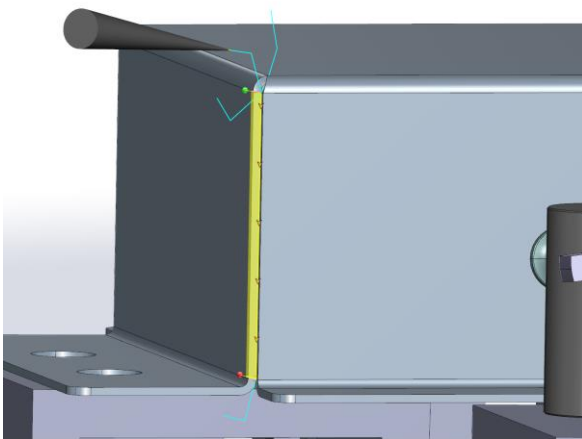


Joonis 52. DKP laud – CAD mudel

Koordinaatsüsteemi paika panek, ehk laua nullasend tuleb paika panna, et programmis loodav CAD oleks ligilähedane päris elus olevale robotsüsteemile.

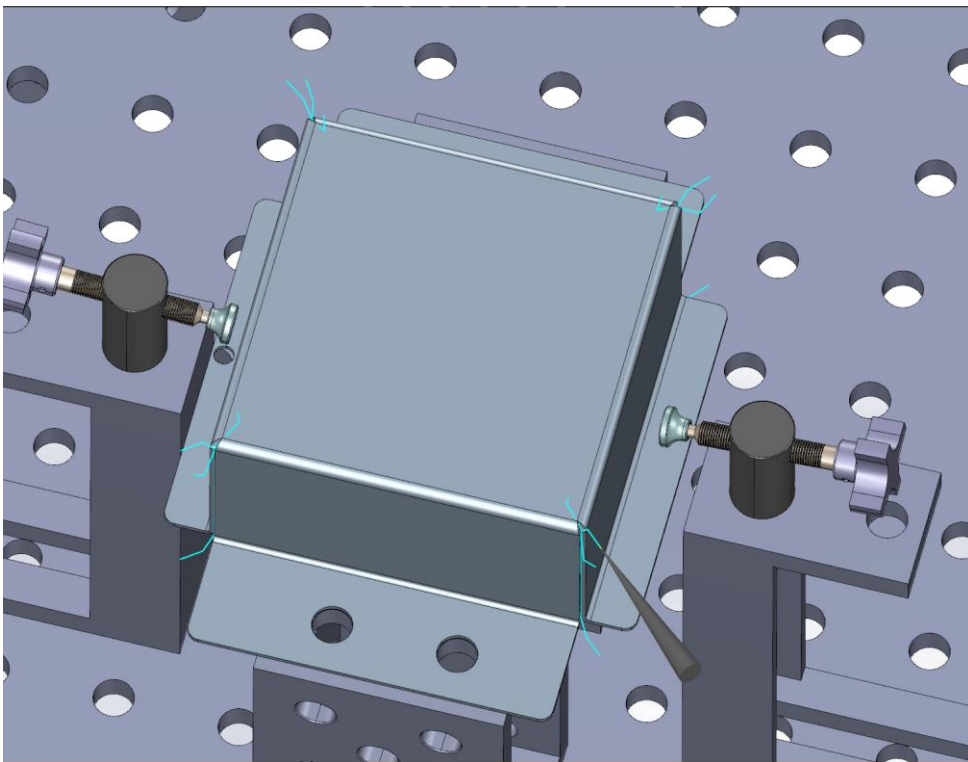
Keevituste lisamine:

On näidatud nurkkeevitus lineaarselt ülevalt alla. Traadisöötur allpool, robot 8-kraadise nurga all.



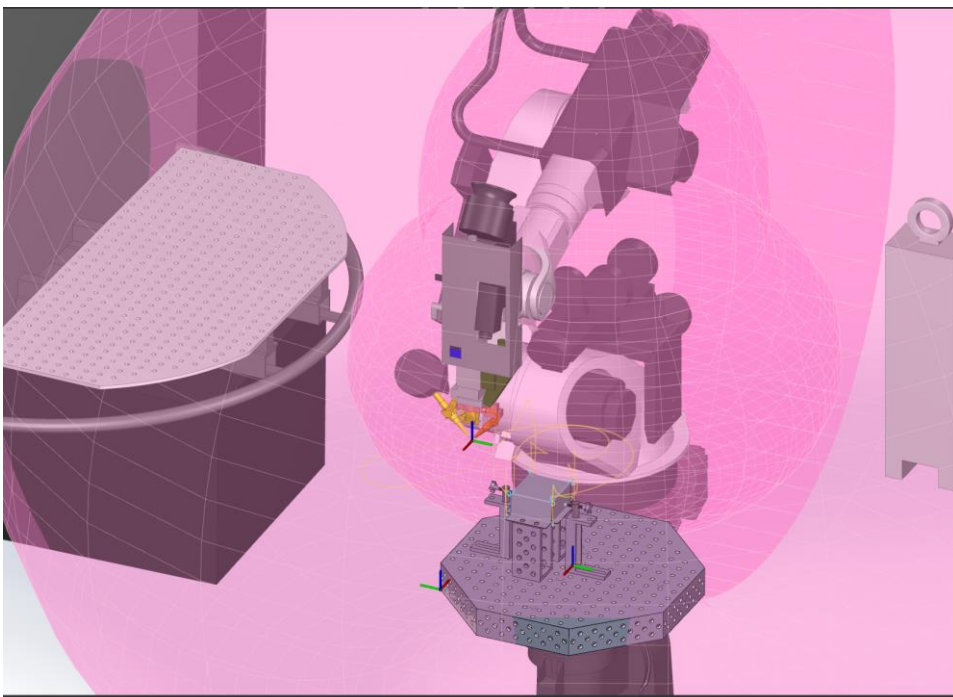
Joonis 53. Lineaarne nurkkeevitus

Kõik 8 keevitust on detailile lisatud:

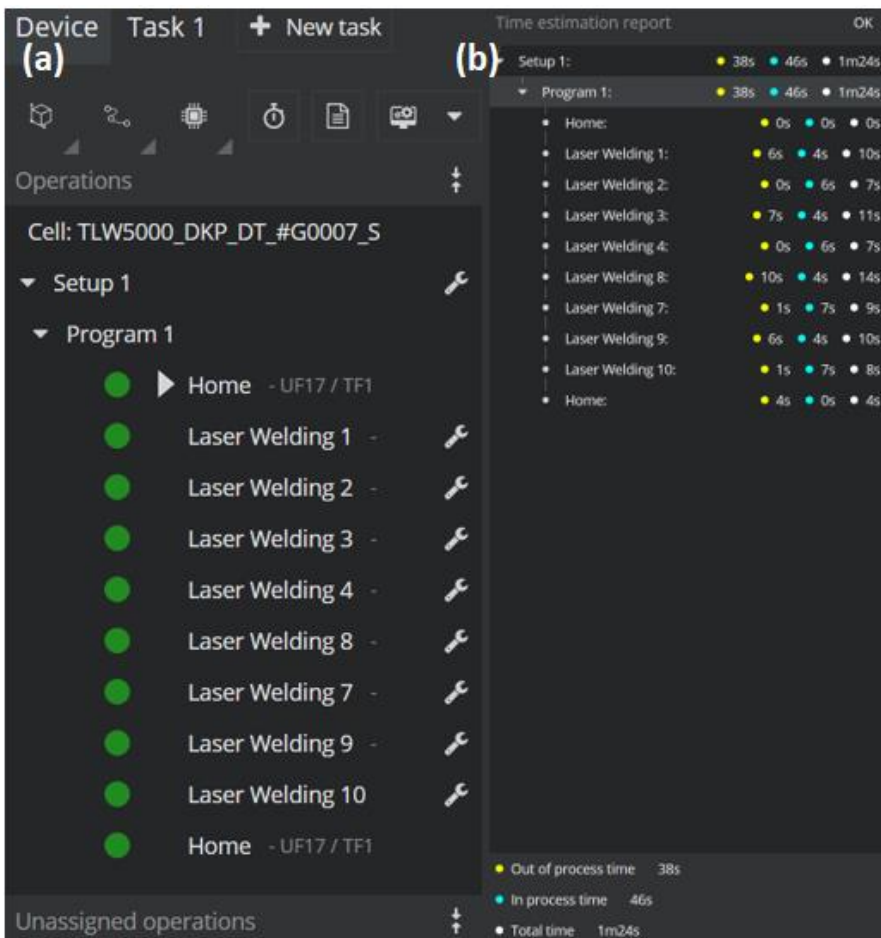


Joonis 54. Keevitused on lisatud

Järgmisena: laua lisamine ja tööriista valik:



Joonis 55. Laud koos robotisüsteemiga ja mullidega mis näitavad roboti ulatust



Joonis 56. Laserkeevitused ja programm (kokkupõrked ei ole)

Keevitused on rohelisega tähistatud ehk kokkupõrkeid pole tuvastatud, alguses tavaliselt ikkagi on kokkupõrked kuna keevitusasendid ja järjekorra peab looma.

- Keevituste üle vaatamine, liikumiste üle vaatamine, eemaldumiste lisamine, keevituste järjekord:
- Keevituste muutmise vajadusel, keevitusnurkade muutmise, roboti asend ja juhtmete asend
- Paremalt all telgede tööulatuste jälgimine, et roboti liikumised ei läheks liiga maksimumi piiridesse
- Roboti ulatuse jälgimine, mullid mis on roboti ümber
- Time estimation ja robotisse fail

Joonis (b) kui on kõik punktid ja liikumised korras, siis saab teha aja arvutuse. Programm arvutab ära kui palju kindlatele liikumistele kulub, selle abil saab arvutada keevitushinda ja analüüsida kas liikumisi on võimalik optimeerida. Kogu keevitustsükli aeg (in process time) on jaotatud keevitusajaks ja keevituse väliseks ajaks (out of process time).

Lisatud roboti seinad ka, kuigi neid tavaliselt programmi tehes pole vaja näidata. Mida peaks jälgima on aga lagi ja roboti eemaldumiste turvalisus.

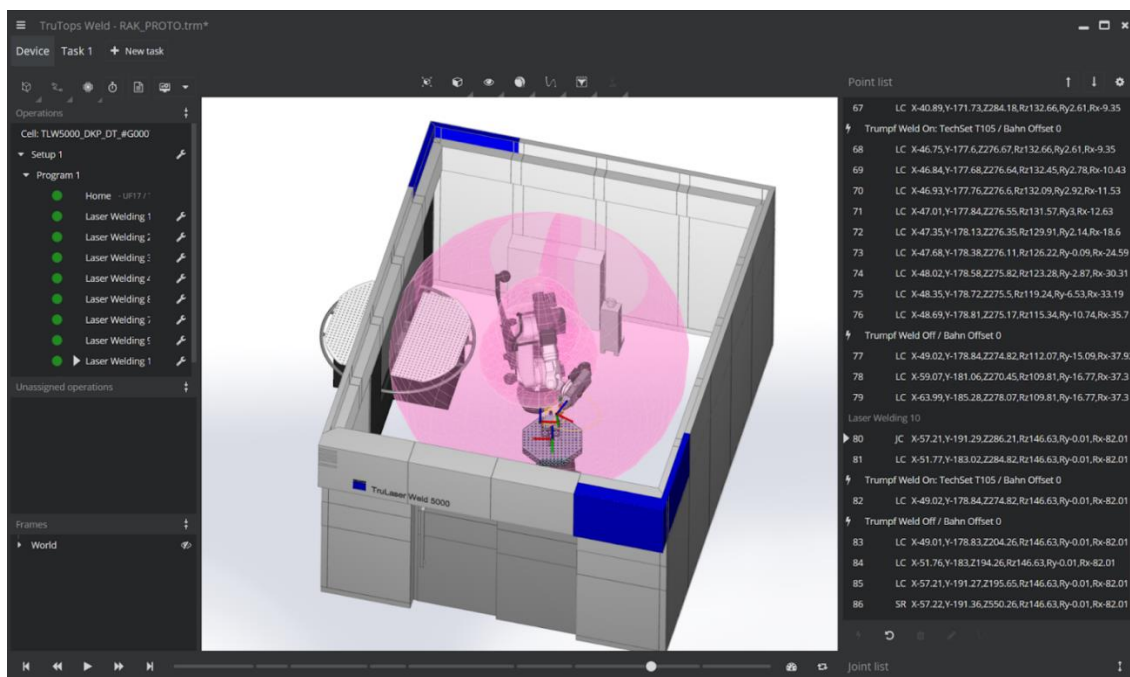
Joonis nr. 57 on paremal näha, kuidas programm genereerib punktide listi, mis on tavaliselt lineaarne kontuur, ringikujuline kontuur või siis PTP liikumine.

Käsitsi programmi luues on kaks peamist keevitustrajektoori: LIN – liikumine on kõige lihtsam liikumine ja seda kasutatakse väga sageli, selle defineerimiseks on vaja kahte punkti; CIRCULAR – on ringikujuline liikumine ja selle defineerimiseks on vaja vähemalt 3 punkti.

Lineaar liikumisel on alguspunkt ja lõpp-punkt. Ringliikumisel on alguspunkt, raadiusel vahepunkt ja lõpp-punkt. Nende kolme punkti abil teostab robot ringikujulisel trajektooriga liikumise.

Eristatakse ka LIN ja PTP liikumisi: LIN tähendab lineaarset liikumist, kus robot liigub lisatelgesid kasutamata ja lineaarselt. PTP, punktist-punkti liikumise puhul liigub robot ühe salvestatud punkti põhjal ja kasutab kõiki telgesid. PTP liikumised on tavaliselt kiire vahe liikumised, kus ei toimu keevitamist vaid on vaja robot ühest asendist teise saada.

LIN liikumised on tavaliselt lähenemised, eemaldumised ja keevitamised.



Joonis 57. Robotsüsteem tarkvaras

Off-line programmeerimine ja testimine simulatsioonis

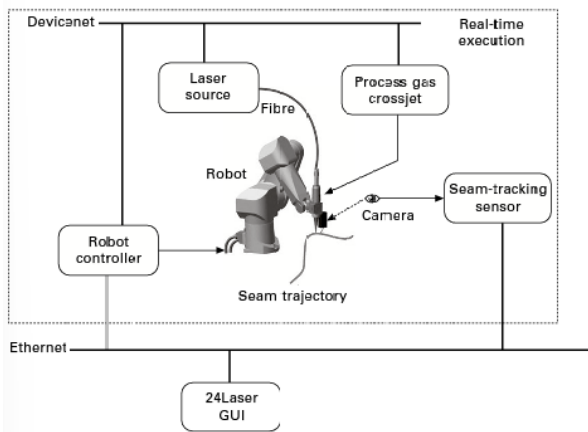
Off-line programmeerimine on tähtis funktsioon ja seda tasub kasutada, et vältida põhjendamatuid vigu ja liigset materjalikulu. Programmeerides ja CAD-i ette valmistades saab aru, kas rakise ja keevitusroboti vahel on kokkupõrkeid või ei ole. Kui ei ole, siis rakise prototüüp peaks sobima, edasi saab programmeerida ja opereerida pingi juures.

OLP lisab tootmisele tulemuslikkuse ja produktiivsuse osas kuna samal ajal kui pingis midagi keevitatakse, on võimalik midagi uut juba programmeerida ja ette valmistada ehk „seismise aeg“ muutub väiksemaks. Samuti on programmi loomine OLP-ga rohkem kui kaks korda kiirem. Mõnda programmi ei saagi kohapeal edukalt luua või siis see muutuks liiga ajakulukaks.

Off-line programmeerimisega on võimalik ettevalmistada keerulise geomeetria ja trajektooriga keevituskoostused, mida käsitsi programmeerida oleks peaaegu võimatu. Miinuseks ongi erinevused kohapeal oleva keeviskoostu positsiooni ja arvutis tarkvaras oleva koostu positsiooni vahel. Sellepärast on vajalik korra kohapeal alati punktid üle käia ja neid ka üldiselt korrigeerida kuigi korrigeerimised jäävad üldiselt $< 0,5 \text{ mm}$ suurusjärku. Siiski punktide korrigeerimine on ajaliselt kindlasti mitu korda kiirem kui teha keeruline programm käsitsi kohapeal. Teatud katsetuste ja lihtsamate prototüüpide puhul võib kasutada ainult kohapeal programmeerimist nt kahe plaadi pötkkeevitus. Eriti kui tegemist on ühekordse projektiga, seega ka prototüüpide puhul ei tasu liigselt ajakulukaks programmeerimist viia. Off-line programmeerimine on tähtis keerulisemate trajektooriga keevituste puhul. Ehk keevitused kus on kaarliikumised, splaini kuju jälgivad trajektooriga. See keeruline keevitustrajektoor tingib sageli seda, et robot muudab oma keevitusnurka koguaeg oma parameetritele vastavalt ja selle käsitsi paika panek nullist muutub väga keeruliseks ja aeganõudvaks protsessiks.

Kasutades keevitusprojektide puhul mitte ainult roboti liikumiste programmeerimist vaid ka DKP-laua liikumist, annab suure eelise ja kiiruse tervele keevitustsüklile. Laua nurkade katsetamine ja keevitusasendite proovimine on üks kõige suurimaid eeliseid OLP puhul. Ühe kindla keevituse puhul on võimalik katsetada nt 5 erinevat laua asendit ja keevitus järjekordasid on võimalik paari hiireklikiga muuta. Ehk toote lõppkvaliteedis mängib suurt rolli offline-programmeerimine. Programmi loomise efektiivsus ja kiirus annab suure eelise ainult kohapeal programmeerijate vastu, sest OLP-kasutajad saavad lisaks eelnimetatud eelistele veel kõigele lisaks ette valmistada uue uue programmi samal ajal kui eelmine tootmine on robotis töös ja ei ole võimalik kohapeal programmeerida.

Samuti on hea simulatsiooni kasutus kui rakise heakskiitmise viis. Pöördlauale on võimalik luua rakis, kus on nt 5 detaili kõrvuti. Kiirelt keevituste peale panemisega on hetkega arusaadav kas robot läheb oma piiridest välja või mitte. Seega sellest lähtuvalt saab kas: rakist muuta, detailide arvu vähendada, teha mitme positsiooniline rakis või siis katsetada teist lauda. Keevituste jälgimissüsteem (TeachLine):



Joonis 58. Ühendusskeem sensoritega laserkeevitusroboti süsteemis [28]

Operaator saab läbi kasutajaliidese kontrollida kogu keevitusprotsessi. Lisaks sellele on operaatoril võimalus kasutada kaamerat ka keevitustrajektoori tuvastamisel. Keevitustrajektoori tuvastamine toimub tavaliselt mõne serva või ava järgi. Eelnevalt robot otsib tuvastab geomeetrilise kujundi koodi põhjal ja selle järgi otsib üles materjali serva, millele olid keevituspunktid seadistatud.

6. Majandusliku tasuvuse hindamine

Antud peatükis toimub majanduslik hinnang robotsüsteemile ja laserkeevitusele näidistoodete põhjal. Kuna laserkeevitusroboti alginvesteering on teistest robotitest suurem, siis peab hindama kas robotile oleks pakkuda piisavalt tööd ja kas seda oleks võimalik realiseerida nii nagu ettevõtte seda soovib.

Laserkeevitus sobib pigem masstootmisele kuna rakiste väljamõtlemine ja katsetamine on ajamahukas protsess. Üldiselt saab kõike keevitada ja kui rakise loomise aeg suudetakse viia minimaalseni ning soovitud tulemuseni jõutakse kiiresti, siis on laserkeevitus ka väiksema seeriatootmise puhul just keevituskvaliteedi aspektist konkurentsivõimeline alternatiiv.

Masstootmisega on lihtsam kuna vähem aega kulub rakiste vahetamise ja nõ „tühiaja“ peale ehk mida suuremad on tellimused, seda suurem on roboti produktiivsus ja reaalne töösoleku aeg. Mis on pingi tasuvuse mõttes kõige tähtsam.

Laserkeevituse puhul on tegemist suure algse investeeringuga ja see tasub ära alles pikas perspektiivis. Ehk üheks riskiks (miinuseks) võib võtta suure investeeringu, aga sellepärast lähtutakse riskide hindamise ja pingi tasuvuse hindamisega väga põhjalikult. See aga on kindel, et laserkeevitus on lähitulevikus aina populaarsemaks saav liitetehnoloogia ja paljudele pakub see huvi. Samuti teeb selle rakendamine tööstuses lihtsamaks automatiseerimine ja roboti kasutus ehk kui programm saadakse tööle on tulemus garanteeritud, eriti kui ajavahe tavakeevitusega on mitmekordne. Operatsiooniaja juures on hea see, et programm ütleb juba arvuti simulatsioonis ära kui palju aega ühe detaili keevitamisele kulub. Sellele lisaks tuleb juurde lisada tühiajad ja muud laos ettevalmistavad ajad.

Kvaliteeti tuleb kontrollida kahe esimese detaili puhul ja korrektsioonid sisse viia, järgmised tulevad nendega sarnased. Kvaliteedi tõstmiseks on üks võimalus kasutada TeachLinei, mis võimaldab robotil kaamera abil tuvastada geomeetrilisi kujundeid ja nende põhjal üles otsida keevitus joon. Tuvastamine toimib ainult ühe tasandilistel pindadel.

Tähtis oleks võimalusel programme parendada nii, et robot teeks võimalikult vähe liigutusi nii, et teeks töö kvaliteetselt ära. Ehk kõik liigsed PTP liikumised tasuks eemalda ja asendada LIN liikumistega, optimeerida liikumisi.

Tabel 8. Roboti tehnilised parameetrid

Tehniliste parameetrite arvestus laserkeevitusroboti valikul		
1	Vabadusastmed	Tähtis (6 telge)
2	Positsioneerimistähtsus	Tähtis (+/- 0,05 mm)
3	Liikumiskiirus	Keskmine
4	Roboti ulatus	Keskmine (2033 mm)
5	Roboti kandevõime	Keskmine (30 kg)
6	Sensorite olemasolu	Tähtis
7	Erinevate tööriistade olemasolu (EOAT)	Väike

Toodud KUKA KR 30 HA näited.

Roboti riskianalüüs:

Tabel 9. Laserkeevitusroboti riskianalüüs

	Riski kirjeldus	Riski esinemise tõenäosus	Riski olulisus	Hinnang
1	Puudub roboti kasutamise oskus	kõrge	kõrge	Koolitada robotit kasutavad isikud või palgata uute kogemuste töötaja ettevõttesse
2	Puudub roboti hooldamise oskus	keskmine	keskmine	Hooldus väljaspoolt: nt korra või kaks korda aastas. Traadisööturi lahti võtmine ja komponentide hooldamine on operaatoril sagedane tegevus, roboti hooldust teevad spetsialistid.
3	Robot on peale töötamist kuum ja võib olla ohtlik töötajale	madal	madal	Robot ei tohiks minna nii kuumaks.
4	Roboti seadistamisel uuele töökohale tekib viga	keskmine	kõrge	Enne märkida ära kindlalt kohad kuhu mis peaks tulema ja teha läbi tühitsuikel, et saada aru kas kõik toimib ja kõige jaoks on piisavalt ruumi.
5	Küberturvalisus	madal	keskmine	Sellele tuleb tähelepanu tänapäeval pöörata. Ettevõtete kohta tuleb teha analüüs ja samuti kaitsta kõiki võrke erinevate programmidega. Nt. eraldi firma, kes tegeleb võrgu- ja küberturvalisusega.
6	Toodete sorteerimisel tehtavad vead (koostamisel kasutatavad detailid on valede kohtades)	madal	kõrge	Üldiselt paigaldus võiks olla ettevõtte poolt. Kui ei ole siis tuleb igakord kontrollida kas koostamine toimub 100% juhendi põhjal.
7	Puudulikud turvameetmed	madal	kõrge	Turvameetmed on kõige tähtsam aspekt, et inimesed, kes robotiga töötavad oleks turvatud. See on ka seotud operaatorite vastava koolitusega. Et ei tuleks viga lihtsalt teadmise puudulikkusest või valesti aru saamisest. Vajalikud sildid ja juhised kuidas toimida robotiga igalepoole. Samuti individuaalselt testida töötajaid, kas saadakse aru, mida teha nt kui miski lakkab töötamast vms. "Riskikontroll".
8	Robot jääb rikke tõttu seisma	keskmine	madal	Automaatne monitooring oleks hea, aga üldiselt võiks olla üks vastutav töötaja/operaator, kes on roboti lähedal ja jälgib, et kõik oleks korras. Muu töö kõrvalt/komplekteerimine/ladu jne.

Tabel 10. Kaasnevad kulutused laserkeevitus robotsüsteemiga

1	Kulukirje	Maksumus (EUR)
2	Robotsüsteemi (laserkeevitus) baashind (oletuslik)	800,000
3	Installeerimine	10,000
3	Koolitus	10,000
4	Tööohutus	5,000
5	Muu	10,000
6	Kokku	835,000

Tabel 11. Keevitusega kaasnevad lisakulud:

	Aastas	EUR
1	Lisametalli kulu	10 tk \approx 2000
2	Tööjõukulu (2 tk)	72252
3	Kaitsegaasi kulud	600
4	Elektrienergia kulud	-
5	Muu, (hooldus)	3000
6	Summa	77852

Suuresti oleneb kui palju projekte on lisametalli kasutusega, samuti oleneb kui palju on roostevaba terase keevitamist, selle ja Al-sulamist traadi lisamaterjal maksab rohkem. Tööjõukulu all on arvestatud ühe operaatori ja ühe konkreetse laserkeevitusroboti inseneriga.

Roboti efektiivne tööajafondi valem:

$$F_{ef} = (K - P_u - P_{\bar{u}}) * V_a * V_k * k, \text{ kus}$$

F_{ef} – robotkeevitussüsteemi efektiivne tööajafond tundides,

K – kalendripäevade arv aastas, 365 päeva,

P_u – puhkepäevade arv aastas, 104 päeva,

$P_{\bar{u}}$ – pühade arv aastas, 7 päeva,

V_a – vahetuste arv, 1 vahetus,

V_k – vahetuse kestus, 8 tundi,

k – seadme kasuliku kasutamise tegur; $k = 0,92 \dots 0,98$; $k = 0,95$.

Seega saab arvutada kogu roboti tööajafondi:

$$F_{ef} = (K - P_u - P_{ij}) * V_a * V_k * k = (365 - 104 - 11) * 1 * 8 * 0,95 = 1930 \text{ tundi}$$

Aastane tootmisplaan on katsetusena see sama üks toode, leian selle toote tsükliaja. Jooniselt 57. saame programmi järgi, et kogu keevituse aeg DKP-laual oleks võimalik teha 1 minuti ja 24 sekundiga.

Protsessi väline aeg p_v – 38 sekundit.

Protsessi sisene aeg p_s – 46 sekundit.

Keevitusaeg programmist - $t_{keev} = p_v + p_s = 1 \text{ min } 24 \text{ s}$

Tootmiskiirust saaks parandada kasutades pöördlauda, mis annab tootmisproduktiivsusele juurde. Lauale asetades ~ 4 detaili saaksime teoreetiliselt kaks detaili praeguse ajaga. Seega ühe detaili keevitusajaks tuleks $t_{prog} = 42 \text{ s}$.

Lisaks tuleks lisada rakisesse panemise ja muuga kaasneva abiajale lisada. Toote puhul on abiajaks pöördlaual 60 sekundit, kuna tuleb arvestada ka detailide maha võtmisega peale laua pööramist. Rakis oleks aga kahepositsiooniline, seega tuleks kaks detaili edasi tõsta ja siis kaks uut rakisesse asetada.

$$t_{abi4} = 60 \text{ s}$$

Leides abiaja ühe toote jaoks jagame abiaja neljaga kuna neli toodet on laual. Saame

$$t_{abi1} = 15 \text{ s}$$

Ekh ühe toote aeg kokku tuleks $t_{keev} = t_{abi1} + t_{prog} = 42 + 15 = 57 \text{ s}$.

$$t_{wr} = \frac{t_w * n_a}{3600}$$

t_{wr} – toote robotiga keevitamisele kuluv aeg aastas, h,

t_w – ühe toote keevitamiseks kuluv aeg, s,

n_a – tootmiskaht aastas, tk

Seega saame test karbi toote kohta arvutada aastase tootmisaja:

$$t_{wr} = \frac{57 \text{ s} * 10000 \text{ tk}}{3600} = 158,3 \text{ h}$$

Mille osakaal kogu roboti aastasest tööajafondist: $\frac{t_{wr}}{F_{ef}} = \frac{158,3}{1930} = 0,082 * 100 = 8,2 \%$

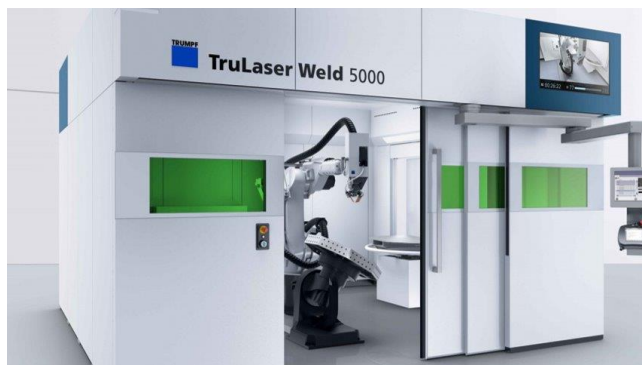
Ehk 10000 tk laserkeevitusega keevitatud karpi täidaks roboti aastasest mahust ainult 8,2%.

Võttes näitena, et oleks 10 sellist toodet siis saaksime 82% kogu ajast. Kindlasti tuleks arvestada, et praegusest arvutusest jäi välja teatud hulk ajast, mis kulub rakise ja programmi tegemisele ning robotis tootmisplaani üles seadmisele. Samuti kui on traadiga keevitus, siis lisandub traadi üles seadmise aeg ja traadi vahetamisele kuluv aeg. See annab ülevaate, et teoreetiliselt oleks vaja väga palju rohkem, et robot maksimaalselt ära kasutada. Kui toodete valikusse jõuab liiga palju erinevaid tooteid ja nende kogused ei ole suured, siis kulub suur aeg lisaks rakiste üles seadmisele ja programmi punktide üle käimisele. Sellepärast on laserkeevituse puhul efektiivsed just suured kogused, seljuhul ei pea rakist liigutama ja programm püsib toimivana ning see maksimeerib roboti töösoleku aja. Robotsüsteemi tasuvusaja arvutamiseks oleks vaja realistlikku käsitsi keevitamisaega test toodete jaoks, see hetkel puudub.

Robotisse investeerimine on pikaajaline ja selle tasuvus tuleb arvatavasti rohkema kui viie aastaga tagasi. Kui on teada, et robotile on võimalikke tooteid piisavalt ja suuremas mahus, siis tasub laserkeevitust kaaluda. Samuti kui see täidab oma eesmärgi ja rakendub ettevõttes nii, kuidas näiteks tavatöötaja ei suudaks. Robotisse investering hoiab töötajate tervist ja teeb keevitused suletud süsteemis ära.

Antud töös ei saa teostada korrektset tasuvus arvutust robotile kuna näidiseks on ainult testdetailid ja tasuvus arvutuses on tavaliselt võrdluseks toodud tavakeevituse aeg ja hind. Selle põhjal võrreldakse kas robot tasub end ära kui võtta robotsüsteem tavalise kaarkeevituse asemel, leitakse aastane kokkuhoid. Siis saab juurutatava robotsüsteemi kogu maksumuse jagada aastase kokkuhoiuga ja vastuseks tuleb aastates tasuvusaeg.

Üldiselt loetakse robotite puhul heaks tasuvusajaks 5 aastat, kuid suuremate investeeringute puhul võib see ka alles 10 aastaga juhtuda. Oleneb kui hästi on tootmine ja tootmismahud planeeritud. Laserkeevitusroboti valikul tuleks hinnata toodete sobivust selle robotile ja toodete mahtu.



Joonis 59. Näidis robot: TruLaser Weld 5000, Laserkeevitus robotisüsteem [29]

KOKKUVÕTE

Käesolevas magistri lõputöös sai analüüsitud laserkeevitusroboti efektiivsust töödades välja põhjalikud etapilised tootmismetoodikad erinevate protsesside jaoks, mida võib laserkeevituses vaja minna. Enne meetodite juurde jõudmist käsitles autor põhjalikult laserkeevituse teooriat, et luua arusaam, mida kujutab endast süsteem, millega töös edasi liigutakse.

Etapiline metoodika laserkeevituse jaoks aitab arusaama luua protsesside järjekorrast ja nende olulisusest. Toodete projekteerimisel lahendati probleemid ja tõestati tootearenduse efektiivsust katsedetailide disainiga, mis võimaldas efektiivsemalt detaili kokku liita. Selle osa järelendus oli, et disaini faas on projekteerimisel väga tähtis, tehes ükskõik millist tootearendust.

Tootmistehnika vaatenurgast sai analüüsitud, mis tähtsus on eelnevatel operatsioonidel ja kui palju rolli mängivad need lõpptulemuse kvaliteedis. Teooria ja praktika põhjal jõuti järeldusele, et laserkeevituse puhul on tähtis, et eelnevad operatsioonid oleks sarnase täpsusastmega nagu on roboti ja laseri täpsus. Toorikute mõõtude täpsus ja korratavus sama tellimuse puhul peaks olema kitsas vahemikus, muidu on võimalus, et detailid ei istu rakisesse korrektselt.

Suure osa sisust võttis enda alla rakiste välja mõtlemine ja projekteerimine, selles peatükis analüüsitud teemade ja meetodite põhjal saab välja tuua kui oluline roll on rakistel laserkeevitus protsessi juures. Kuna rakise valik on tähtis osa tootmisprotsessist ja on tihedalt seotud laserkeevituse kvaliteedi ja lõpptulemusega, siis pani autor suure fookuse just selle teema uurimisele ja kirjutamisele.

Laserkeevituse kui töötlusoperatsiooni juures on palju erinevaid parameetreid ja liiteid, mille valikul peab lähtuma kindlatest soovitustest, selle jaoks sai analüüsitud spetsiifiliselt lisamaterjaliga laserkeevitust, kuna sellega kaasnevad automatiseeritud laserkeevitusega uued väljakutsed. Katsetega sai välja toodud kui tähtsad on detailile peale suunatud laseri parameetrid ja võimsus. Katsete detailid ja rakised olid koostatud spetsiaalselt lõputöö jaoks.

Tahtes laserkeevituse juurutamist ja protsessi ennast teostada efektiivsemalt sai toodud sisse off-line programmeerimine, mis lubab robotifaile luua läbi tarkvara. Sellest peatükist võib järeldada, et tootmisprotsessis on OLP väga tähtis ja see tõstab produktiivsust mitmekordselt.

Laserkeevitust pole eelnevalt TalTechi lõputöö teemades põhjalikumalt käsitletud, mis andis autorile võimaluse valida täiesti uudne teema.

Välja töötatud metoodikad töötati välja teooria ja praktiliste katsete koostöös. Autor on saanud tulemustega rahul ja näeb suurt potentsiaali edasiste arengute puhul laserkeevituses ja selle automatiseerimises. Lõputöös jäid välja teemad, mida oleks

huvitav uurida: mitme läbimiga paksemate materjalide keevitus kasutades lisamaterjali, ette tõstmise automatiseerimine ja coboti kasutamine, põhjalikum tugevusarvutus erinevate liidete puhul ja makropildid.

SUMMARY

In this master's thesis, by working out the efficiency of the laser welding robot, comprehensive step-by-step production methodologies were developed for various processes that may be needed in laser welding. Before getting to the methods, the author thoroughly discussed the theory of laser welding to create an understanding of what the laser system consists of and how it works.

A step-by-step methodology for laser welding helps to create an understanding of the sequence of processes and their importance. When designing products, problems were solved and the effectiveness of product development was proven with the design of the test parts, which made it possible to join the parts more efficiently. The conclusion of this outcome was that the design phase is very important in industrial environments, no matter what kind of product development.

From the point of production engineering's view author analyzed how important role there is for previous operations which are done before laser welding and how does it effect the outcome of the final part. Between combinations of theory and practice author came to a conclusion that it is very important for the previous operations heading to laser welding on a part, to be as precise as laser welding. So the accuracy requirements are very high for such parts. Also the repeatability for dimension tolerance produced for same batch of parts is very important, should they differ then it is a higher chance that they wont fit perfectly into the fixture and that slows down the production time.

Large part in the body of thesis was focused on creating fixtures and jigs for laser welding. In this chapter author analyzed based on methods and theory how important role fixture has in laser welding processes. Because fixtures design choice has an important role in the production effectiveness, and is one of the main quality assurances of the finished laser welded part, author decided to put a lot of focus on analyzing and writing this topic.

There are many different welding parameters and joints when it comes to laser welding. Choosing those parameters and joints is very critical for laser welding. For that author decided to include examples with laser welded parts and the differences between finished weld outcomes. These example were specifically designed and prepared for this thesis. To be more thorough the laser welding with filler material and it's parameters were also analyzed. With filler material there are extra parameters which can be hard to control.

With test weldings it was clear how important role welding parameters have in laser welding.

To be more effective when adapting a laser welding robot to a company, author decided to add a chapter with off-line programming. Off-line programming proves to be very productive in various parts of industrial robot applications. Because it makes the production process much more fluid and enables to use robot for part processing while someone else can off-line program a new welding program in a PC.

„Laser welding“ as a process hasn't been in any titles of TalTech's previous thesis works which is an opportunity to choose a completely new topic.

Methodologies were developed by the combination of theory and practical experiments. Author of the thesis is satisfied with the outcome and sees a lot of potential in further developments considering laser welding and automation. Topics that weren't discussed in the thesis but which could be interesting are: 1) the theory and practice behind multi-pass laser welding, part design and sequence of welds. 2) Making production more effective by adapting a cobot to the system which enables easier part loading with large batches. 3) Thorough strength analysis with different joints and materials – macro pictures.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

1. <https://blogmech.com/laser-technology-properties-of-a-laser-beam/> [Online]
2. Keevitustehnoloogia / A. Laansoo. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
3. Handbook of Laser Welding Technologies by S. Katayama 2013, Elsevier Science & Technology. [Online]
4. <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/supplements/pit/features/articles/34420> [Online]
5. https://www.researchgate.net/figure/Schematics-of-thin-disk-laser-technology-a-Cold-finger-with-substrate-showing-the_fig3_264993946 2014 a. [Online]
6. https://www.photonics.com/Articles/Disk_Lasers_Enable_Application_Advancements/a17863 2004 a. [Online]
7. <https://www.scientificmaterials.com/products/yb-yag.php> [Online]
8. Latest trends in high power disk laser technology – Lasers in Manufacturing Conference 2015 – erinevad autorid – WLT. [Online]
9. <https://www.engineersgarage.com/diode-pump/> [Online]
10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389214002934?via%3Dihub> - Methods for Improving Laser Beam Welding Efficiency – M. Sokolov, A. Salminen, 2014 a. [Online]
11. <https://www.kuka.com/en-be/services/robot-programming> [Online]
12. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-4063-2023> [Online]
13. Mehaanikainseneri käsiraamat / üldtoimetaja P. Kulu. Tallinn: TTÜ Kirjastus, Teine väljaanne, 2021
14. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13919-1-2019> [Online]

15. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-13919-2-2021> [Online]

16. <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-15609-2-2019> [Online]

17. Jig and Fixture Design, 5th edition, Edward G. Hoffman. Delmar, Cengage Learning Drafting Series, 2004 a.

18. H Radhwan et al 2019 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 551 012028, Design and Analysis of Jigs and Fixtures for Manufacturing Process. [Online]

19. Raalkonstrueerimissüsteemide slaidid – Liigendid [Online]

20. Mechanical Engineering Design – Shigleys 2015. [Online]

21. <https://ewi.org/how-much-laser-power-do-you-need-for-welding/> , 2010 a. [Online]

22. <https://www.primapowerlaserdyne.com/developing-processes-for-laser-welding-with-wire-feed/> [Online]

23. <https://www.esb-group.com/en/products-din-en/cold-rolled-steel/> [Online]

24. Laser welding „A practical guide“ Christopher Dawes. 1992 a.

25. TruLaser Weld 5000 (Data collection), 2019 a.

26. „The effects of filler wire feed on the efficiency, parameters and tolerances of laser welding“ Antti Salminen, 2003 a.

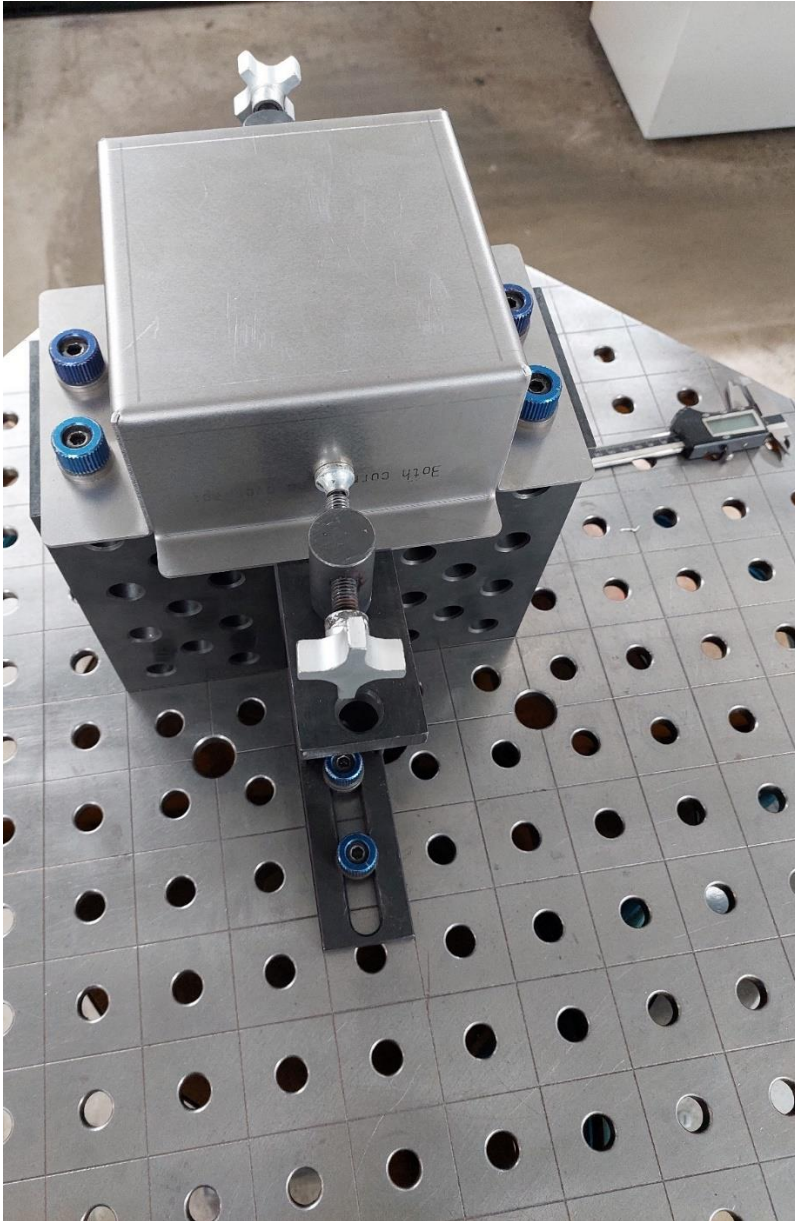
27. Penetration and mixing of filler wire in hybrid laser welding by W.Suder, S.Ganguly, S. Williams, B.Y.B. Yudodibroto May 2021 [Online]

28. https://www.researchgate.net/publication/221276820_Ethernet-based_communication_framework_for_sensor_integration_on_industrial_robots - 2007 a. [Online]

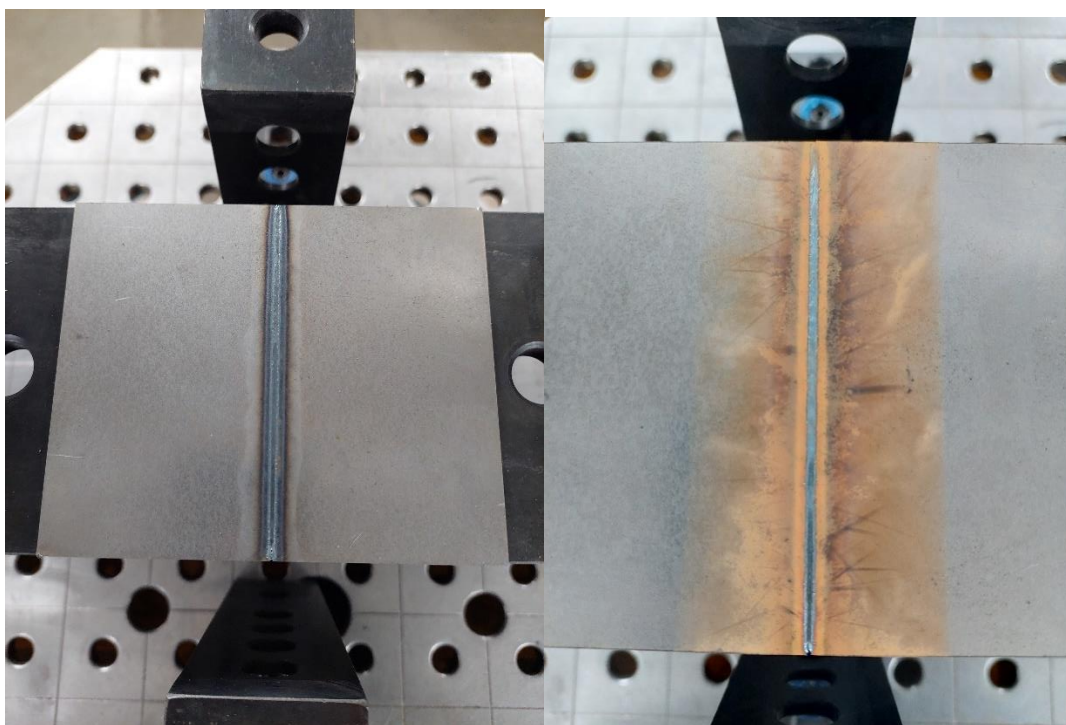
29. https://www.trumpf.com/en_GB/products/machines-systems/laser-welding-systems-and-the-arc-welding-cell/trulaser-weld-5000/ [Online]

LISAD

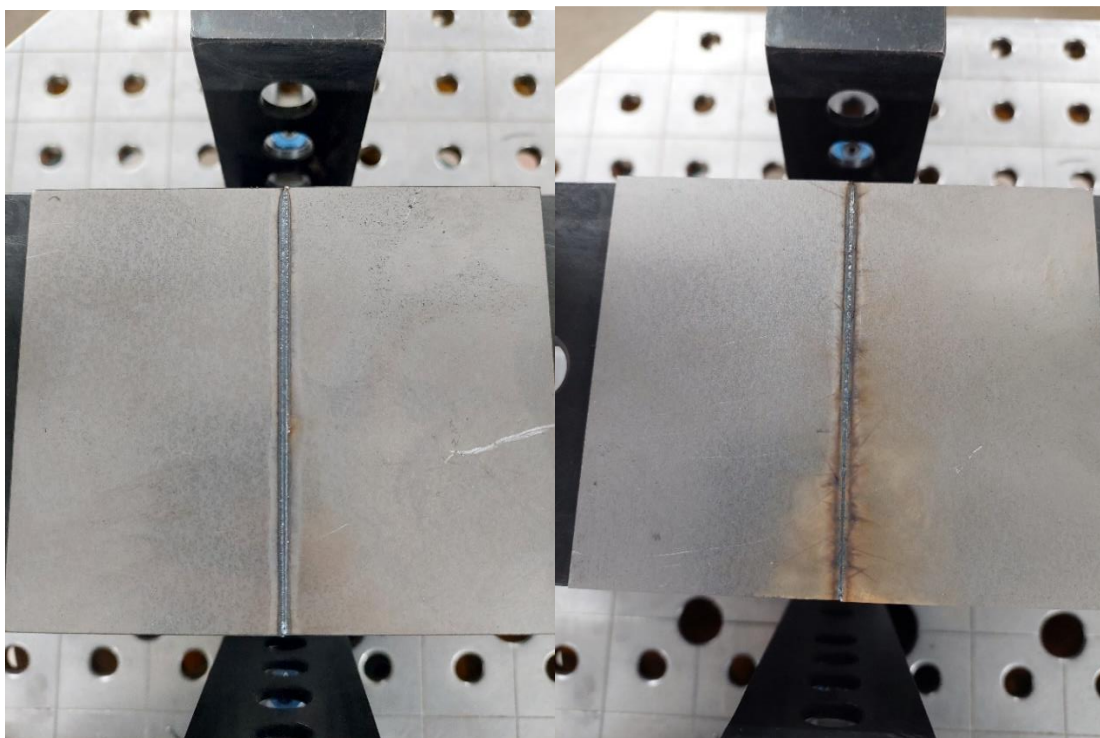
L1 (Rakis DKP laual)



L2 (traadiga põkkõmblus, pilu < 0,1 mm, P = 3000 W, termomõjutsoon kohe suurem (HAZ))



L3 (Laseriga P = 2000 W, põkkõmbus, < 0,1 mm pilu)



L6 (Programmi koodilõik)

Point list		↑	↓	⚙
Laser Welding 1				
0	Rapid	X71.1,Y-361.55,Z394.37,I0.21,J0.16,K-0.96		
1	Linear	X73.24,Y-359.92,Z384.74,I0.21,J0.16,K-0.96		
2	Linear	X69.17,Y-366.08,Z376.34,I0.21,J0.16,K-0.96		
3	Linear	X69.13,Y-366.12,Z376.32,I0.22,J0.17,K-0.96		
4	Linear	X69.1,Y-366.17,Z376.29,I0.23,J0.18,K-0.96		
5	Linear	X68.88,Y-366.45,Z376.09,I0.3,J0.28,K-0.91		
6	Linear	X68.66,Y-366.7,Z375.85,I0.37,J0.37,K-0.85		
7	Linear	X68.44,Y-366.9,Z375.56,I0.43,J0.45,K-0.78		
8	Linear	X68.22,Y-367.05,Z375.24,I0.45,J0.51,K-0.73		
9	Linear	X67.99,Y-367.14,Z374.91,I0.48,J0.57,K-0.67		
10	Linear	X67.78,Y-367.17,Z374.56,I0.49,J0.62,K-0.61		
11	Linear	X59.35,Y-370.43,Z367.97,I0.49,J0.62,K-0.61		
12	Linear	X54.42,Y-376.63,Z374.08,I0.49,J0.62,K-0.61		
Laser Welding 2				
13	Rapid	X57.22,Y-377.69,Z385.95,I0.7,J0.7,K-0.14		
14	Linear	X64.23,Y-370.7,Z384.56,I0.7,J0.7,K-0.14		
⚡	Trumpf Weld On: TechSet T163 / Bahn Offset 0			
15	Linear	X67.78,Y-367.17,Z374.56,I0.7,J0.7,K-0.14		
⚡	Trumpf Weld Off / Bahn Offset 0			
16	Linear	X67.78,Y-367.17,Z304,I0.7,J0.69,K-0.19		
17	Linear	X64.23,Y-370.69,Z294,I0.7,J0.69,K-0.19		
18	Linear	X57.27,Y-377.61,Z295.94,I0.7,J0.69,K-0.19		

L7 (programmil koodilõik 2)

Laser Welding 3

19 Rapid X207.05,Y-363.1,Z394,I-0.13,J0.17,K-0.98

20 Linear X205.72,Y-361.35,Z384.24,I-0.13,J0.17,K-0.98

⚡ Trumpf Weld On: TechSet T163 / Bahn Offset 0

21 Linear X212.45,Y-365.64,Z376.42,I-0.13,J0.17,K-0.98

22 Linear X212.54,Y-365.71,Z376.38,I-0.15,J0.2,K-0.97

23 Linear X212.63,Y-365.77,Z376.34,I-0.16,J0.22,K-0.96

24 Linear X212.71,Y-365.83,Z376.29,I-0.17,J0.24,K-0.95

25 Linear X213,Y-366.05,Z376.09,I-0.27,J0.31,K-0.91

26 Linear X213.25,Y-366.28,Z375.85,I-0.37,J0.37,K-0.85

27 Linear X213.45,Y-366.5,Z375.56,I-0.45,J0.43,K-0.78

28 Linear X213.6,Y-366.72,Z375.24,I-0.52,J0.45,K-0.73

29 Linear X213.68,Y-366.94,Z374.91,I-0.57,J0.47,K-0.67

⚡ Trumpf Weld Off / Bahn Offset 0

30 Linear X213.72,Y-367.16,Z374.56,I-0.63,J0.49,K-0.61

31 Linear X217.02,Y-375.55,Z367.95,I-0.63,J0.49,K-0.61

32 Linear X223.3,Y-380.41,Z374.03,I-0.63,J0.49,K-0.61

L8 (Param: TS3, teise katsetuse 50% ülekattuvusega serva keevitus traadi etteandekiirusega $w = 2,3 \text{ m/min}$)

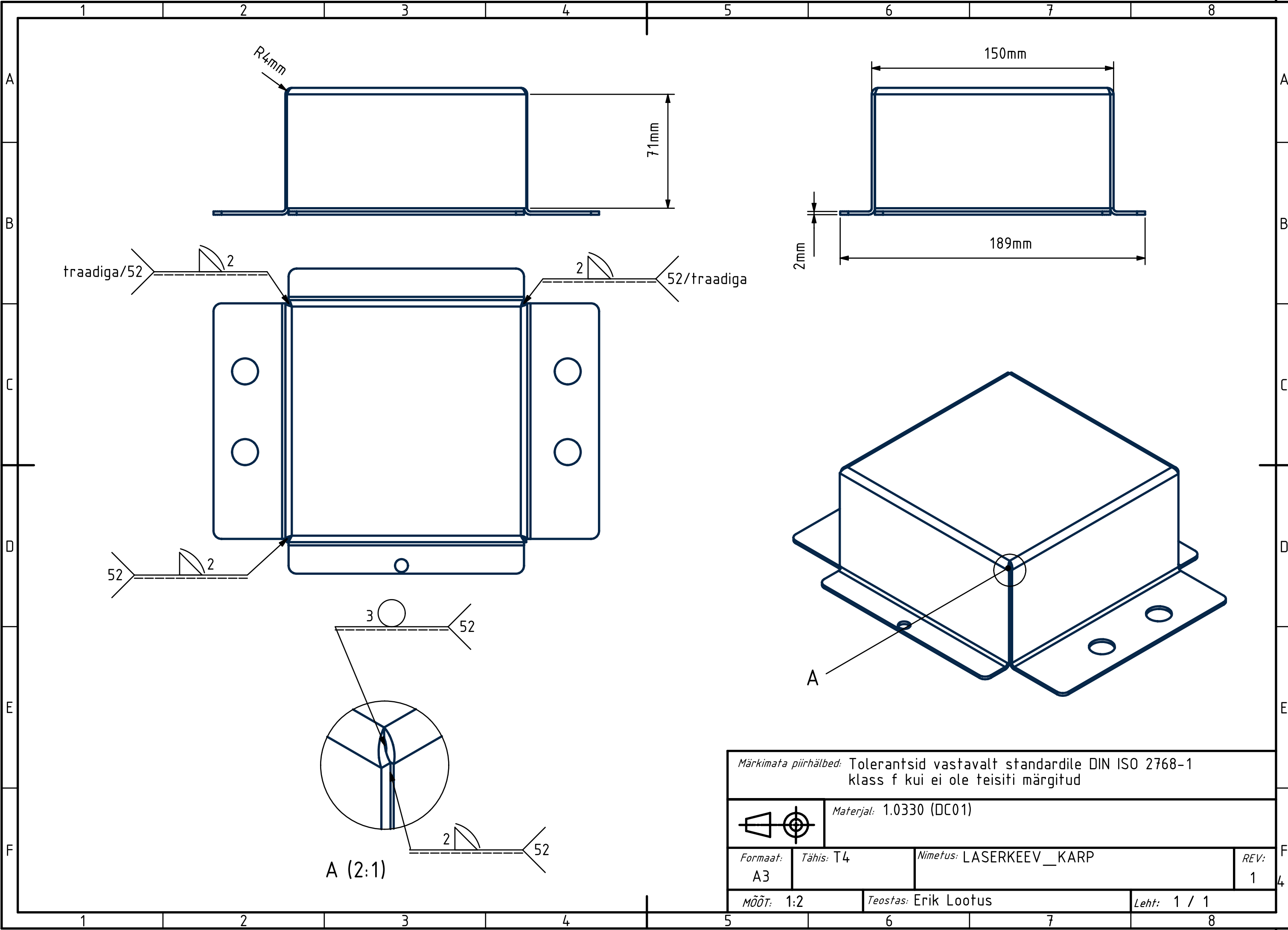


L9 (Teine katsetus, TS1 w = 4,3 m/min (a) nurgakeevitus seestpoolt)



L10 (Teine katsetus TS2, $w = 3,3$ m/min (b) nurgakeevitus seestpoolt)





R4mm

71mm

150mm

189mm

2mm

traadiga/52

52/traadiga

52

52

A (2:1)

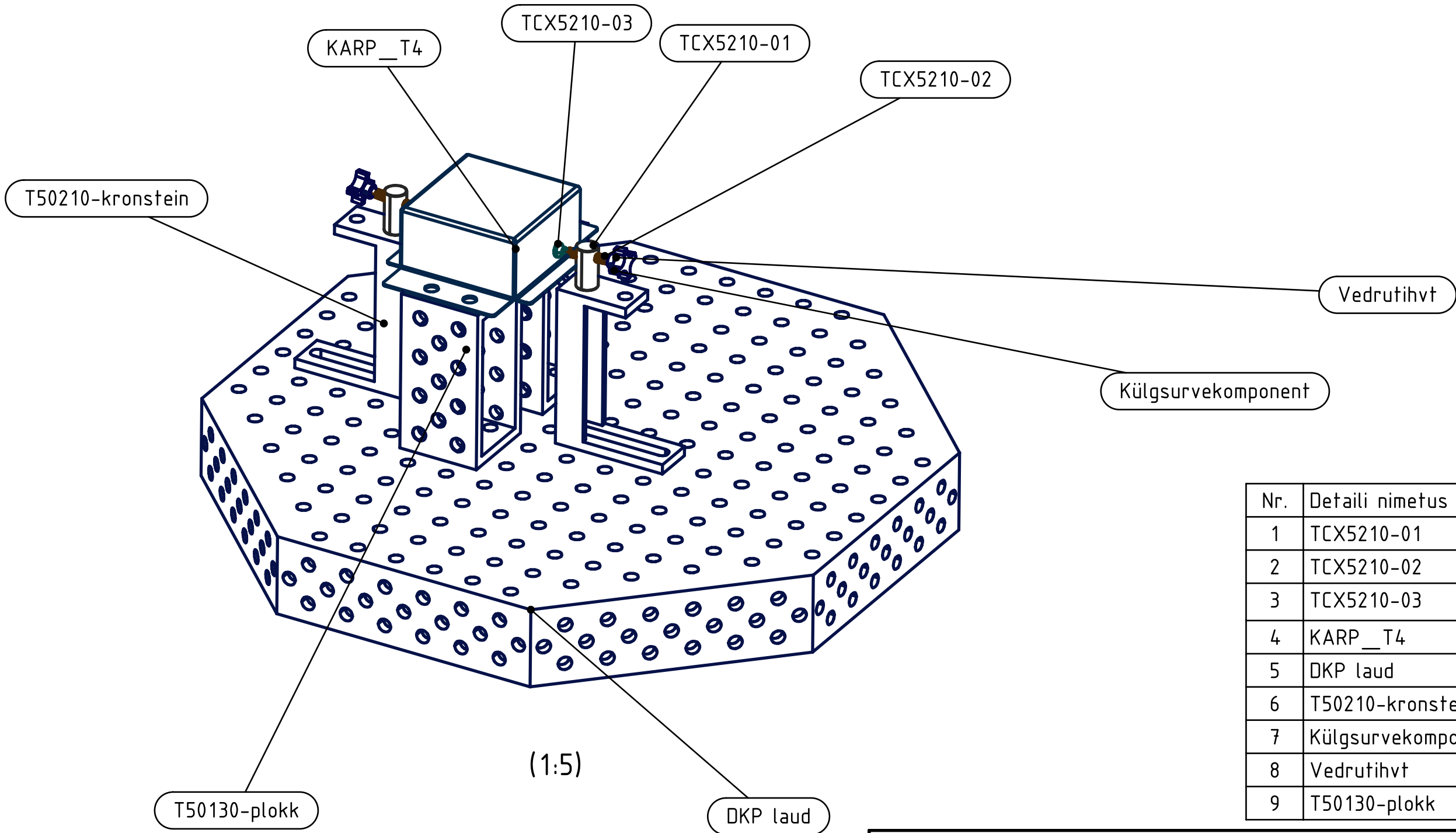
52

Märkimata pürhälbed: Tolerantsid vastavalt standardile DIN ISO 2768-1 klass f kui ei ole teisiti märgitud

Materjal: 1.0330 (DC01)

Formaat: A3	Tähis: T4	Nimetus: LASERKEEV_KARP	REV: 1
----------------	-----------	-------------------------	-----------

MÕÖT: 1:2	Teostas: Erik Lootus	Leht: 1 / 1
-----------	----------------------	-------------



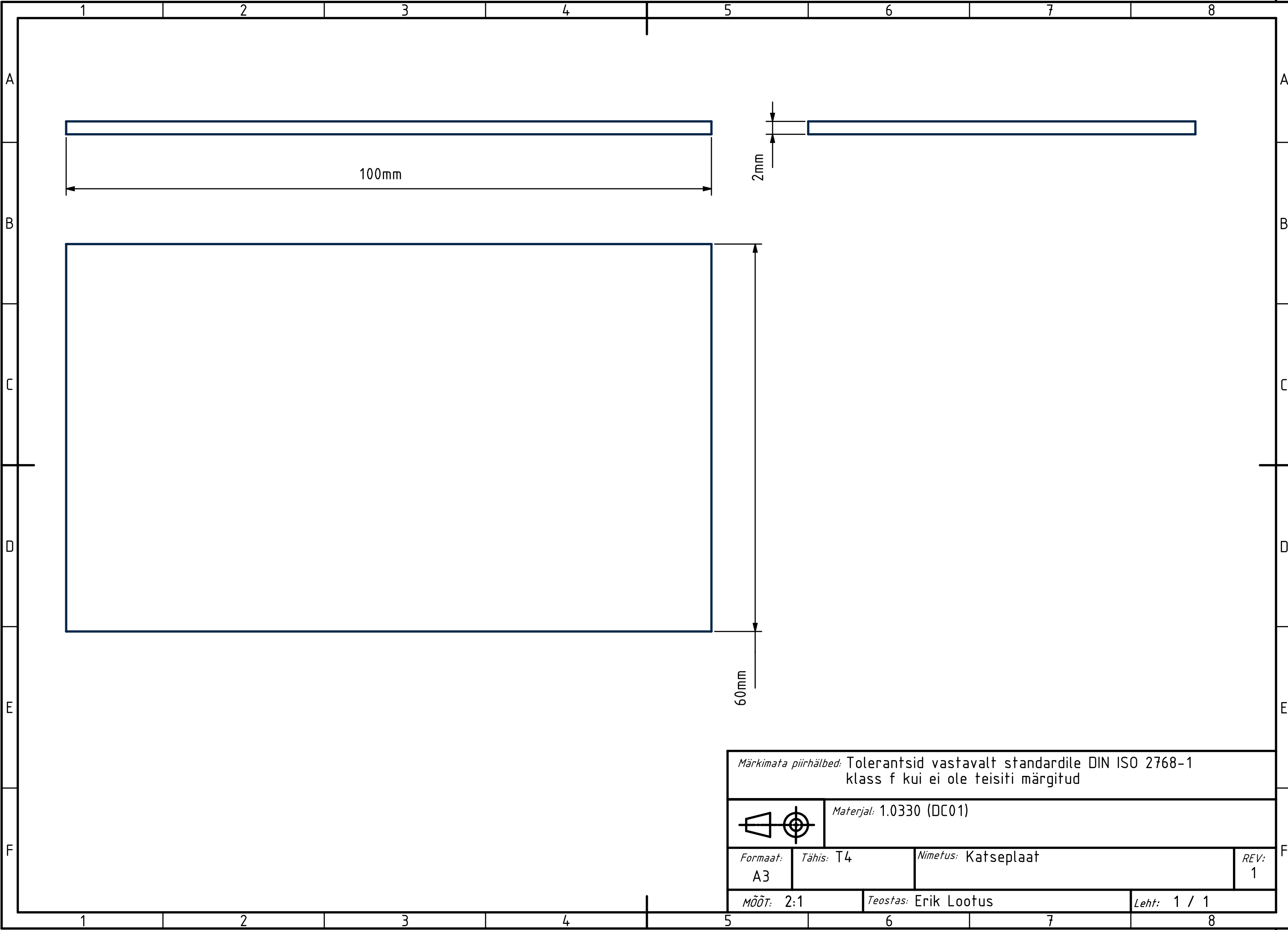
Nr.	Detaili nimetus	Tk
1	TCX5210-01	2
2	TCX5210-02	2
3	TCX5210-03	2
4	KARP__T4	1
5	DKP laud	1
6	T50210-kronstein	1
7	Külgsurvekomponent	2
8	Vedrutihvt	2
9	T50130-plokk	1

Märkimata piirhälbed: -

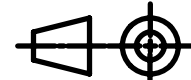
Materjal: -

Formaat: A3 Tähis: T4 Nimetus: KARP_T4_PROTOTÜÜP RAKIS REV: 1

MÕÕT: 1:5 Teostas: Erik Lootus Leht: 1 / 1

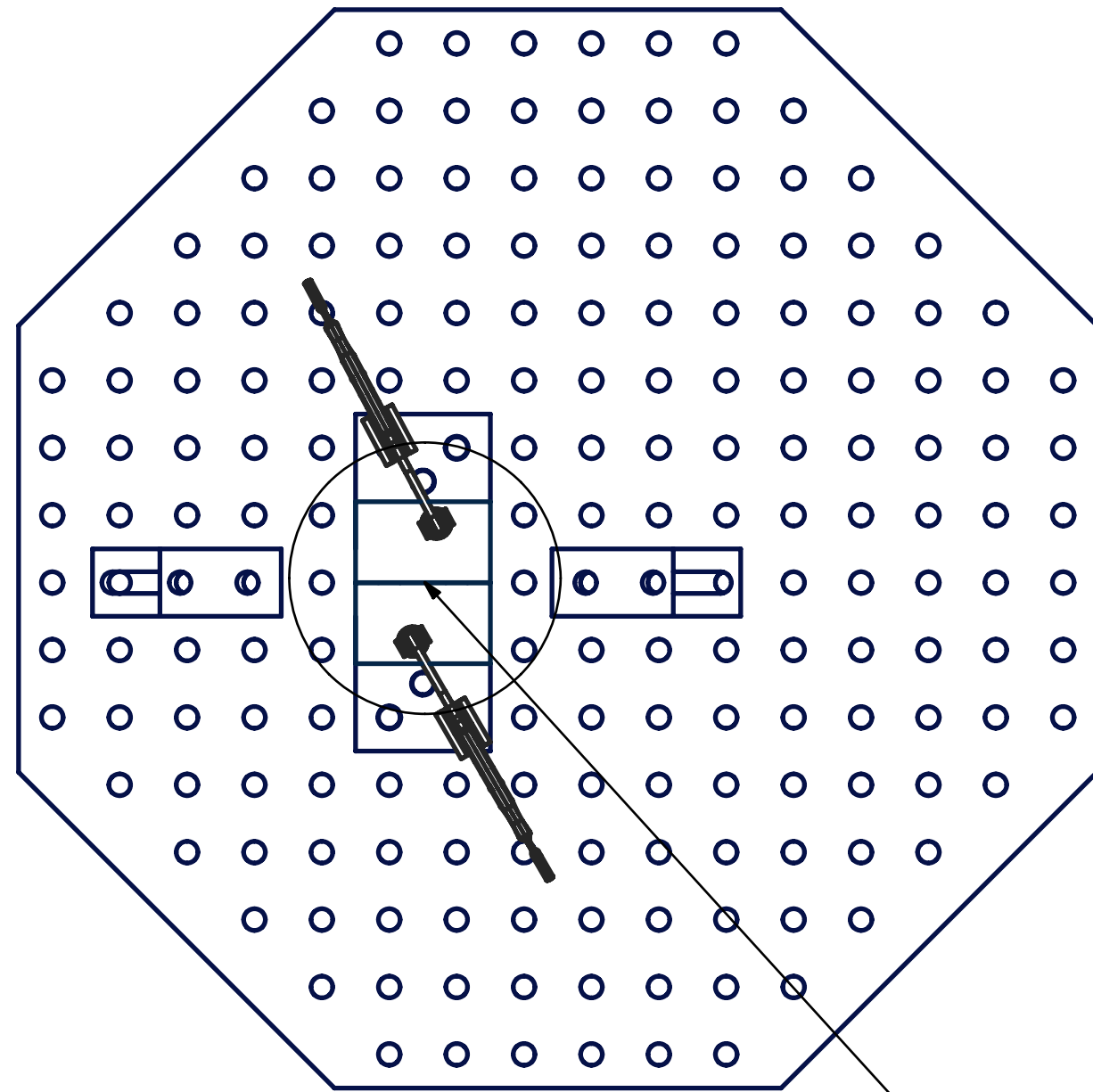


Märkimata piirhálbed: Tolerantsid vastavalt standardile DIN ISO 2768-1 klass f kui ei ole teisiti märgitud

 Materjal: 1.0330 (DC01)

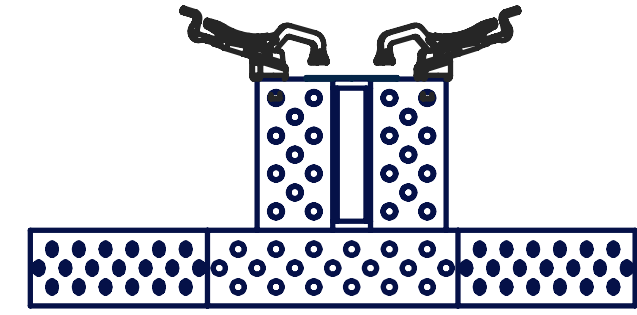
Formaat: A3	Tähis: T4	Nimetus: Katseplaat	REV: 1
----------------	-----------	---------------------	-----------

MÕÕT: 2:1	Teostas: Erik Lootus	Leht: 1 / 1
-----------	----------------------	-------------

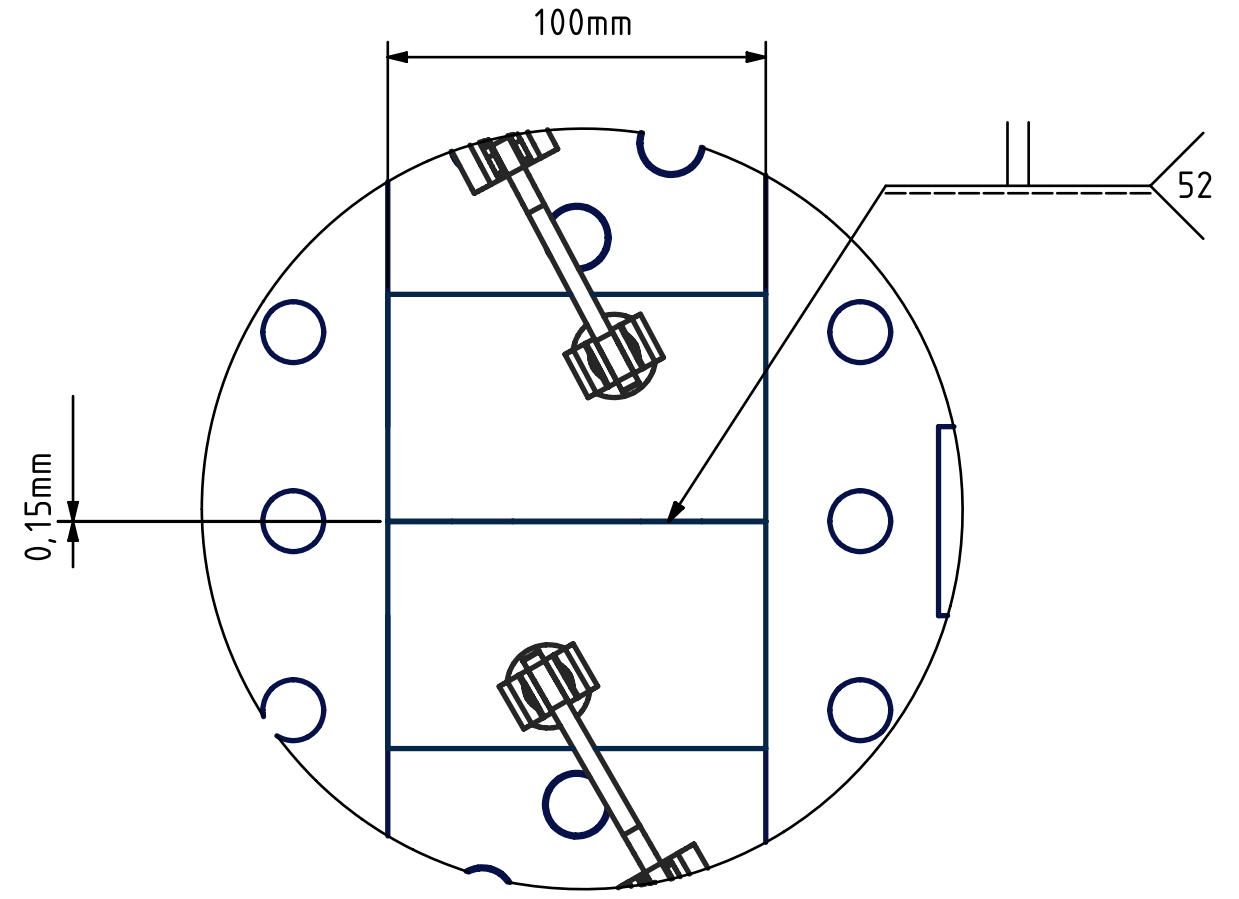


(1:5)

A



(1:10)



A (1:2)

Märkus: teostada kaks katset: 1) ainult laseriga; 2) lisamaterjaliga

Märkimata piirhälbed: Tolerantsid vastavalt standardile DIN ISO 2768-1 klass f kui ei ole teisiti märgitud			
		Materjal: 1.0330 (DC01)	
Formaat: A3	Tähis: T4	Nimetus: Rakis katseplaadid	REV: 1
MÕÖT: 1:5	Teostas: Erik Lootus	Leht: 1 / 1	