



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
MEHAANIKA JA TÖÖSTUSTEHNIIKA INSTITUUT

**PERISTALTIILISE PUMBA VOOLIKU
POOLAUTOMAATSE KOOSTEPINGI
PROJEKTEERIMINE**

**DESIGN OF SEMI-AUTOMATIC ASSEMBLY WORKBENCH
FOR PERISTALTIC PUMP TUBE**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Tõnis Kivisild

Üliõpilaskood: 221585MATM

Juhendajad: Martin Eerme,
Täisprofessor tenuuris, Tallinna
Tehnikaülikool
Maarjus Kirs,
Teadur, Tallinna Tehnikaülikool

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.

"....." 20.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 20.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Tõnis Kivisild

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Peristaltilise pumba vooliku poolautomaatse koostepingi projekteerimine,

mille juhendajad on Martin Eerme, Maarjus Kirs

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.

17.05.2024

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingulise tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Tõnis Kivisild, 221585MATM
Õppekava, peeriala: MATM - Tootearendus ja tootmistehnika
Juhendaja(d): Täisprofessor tenuuris, Martin Eerme, 6203270
Teadur, Maarjus Kirs, 6203256

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Peristaltilise pumba vooliku poolautomaatse koostepingi projekteerimine
(inglise keeles) Design of semi-automatic assembly workbench for peristaltic pump tube

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Projekteerida poolautomaatne koostepink peristaltilise pumba vooliku koostamiseks.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Nõuete loetelu koostamine	07.07.2023
2.	Kontseptsioonide genereerimine	07.08.2023
3.	Detailne projekteerimine	12.02.2024
4.	Jooniste tegemine	15.03.2024
5.	Magistritöö kirjutamine	20.05.2024

Töö keel: Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 20.05.2024

Üliõpilane: ".....".....20.....a
/allkiri/

Juhendaja: ".....".....20.....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....20.....a
/allkiri/

Programmijuht: ".....".....20.....a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

Sisukord

1	SISSEJUHATUS	7
2	ÜLESANDE PÜSTITUS	8
2.1	Toode	8
2.2	Tootmiskeskond	8
2.3	Täiendavad piirangud	9
3	KONTSEPTSIOONLAHENDUSE VÄLJATÖÖTAMINE	11
3.1	Olemasolevate lahenduste otsimine	12
3.2	Stopperite positsioneerimine.....	12
3.3	Liimimine	14
3.4	Liimi puhastamine	15
3.5	Ajamite energiaallika valik.....	16
4	DETAILNE PROJEKTEERIMINE	18
4.1	Tööpingi ülevaade	18
4.2	Ajamite valik	20
4.2.1	Sahtli pöördajamid	20
4.2.2	Paralleelhaaratsid	20
4.2.3	Lineaarajamid	20
4.2.4	Puhastuslindi pöördajam	22
4.3	Koostu sisestamise sahtel.....	23
4.3.1	Vooliku kinnitus tööpinki	23
4.3.2	Sahtli avamine	25
4.4	Liimimine	27
4.4.1	Süstalde kinnitamise rakis.....	28
4.4.2	Liimimismooduli tugijalg	28
4.5	Stopperite positsioneerimine.....	29
4.5.1	Stopperite positsioneerimise liikumisskeem	30
4.5.2	Haaratsite disain ja positsioneerimine.....	31
4.6	Liimi puhastus	32

4.6.1	Kerimismooduli disain.....	33
4.6.2	Kelgumooduli disain	36
4.7	Tööpingi raam ja laud	40
4.7.1	Raam ja kattepaneelid	40
4.7.2	Lauaplaat ja eelkoostamise kandik	43
4.8	Tugevusarvutused	45
4.8.1	Lauaplaadi ja raami tugevussimulatsioon	45
4.8.2	Puhastusmooduli raami tugevussimulatsioon	47
4.9	Tööpingi hooldus ja eluiga	48
4.9.1	Puhastuslindi vahetamise intervall.....	48
4.9.2	Ajamite eluiga	49
5	TÖÖPINGI PROBLEEMSED KOHAD JA VÕIMALIKUD EDASIARENDUSED	51
5.1	Testimisel esinenud probleemid	51
5.1.1	Nõelte tippude positsioneerimine	51
5.1.2	Liimi voolamine tsüklite vahel.....	52
5.2	Edasiarendamise võimalused	54
	KOKKUVÕTE	55
	SUMMARY	57
	KASUTATUD KIRJANDUS	59

1 SISSEJUHATUS

Magistritöö käsitleb peristaltilise pumba vooliku poolautomaatse koostepingi projekteerimist. Tööpingi projekterimise vajadus tuli kliendilt, kes toodab komponente meditsiinivaldkonnas kasutatavatele seadmetele. Üks ettevõtte valmistatavatest toodetest on silikoonvooliku koost, mida kasutatakse peristaltilises pumbas. Arvestades, et toodet kasutatakse meditsiinivaldkonnas, peab tööpingi projekteerimisel arvestama vastavas valdkonnas kehtivate tootmisõuetega. Tootmine toimub ISO 14644-1 standardi järgi klass 8 puhasruumis. Magistritöö kirjutamise hetkel toimub tootmine kahe töötaja käsitööna. Kliendi soov on tööpingi abil tõsta tootlikkust, vähendades tootmistsükli pikkust ja vähendada töötaja väljaõppele kuluvat aega. Suurem tootlikkus võimaldab kliendil kaks käsitsi toodet koostavat töölist asendada ühe tööpingi operaatoriga.

Magistritöö käsitleb kogu tootearendusprotsessi. Klient tellis valmis tööpingi ja see tähendas, et lisaks projekteerimisele tuli ka tellida detailide valmistus, tööpink koostada ja tööpink testida. Sellest tulenevalt on projekti mõnede osade projekteerimine, koostamine ja katsetamine toimunud paralleelselt. Magistritöö on jagatud etappideks. Esmalt antakse ülevaade projekti eesmärgist ja piirangutest. Seejärel vaadatakse olemasolevaid automaatseid liimimisseadmeid, et võimalusel võtta eeskujuga toimivatest lahendustest. Projekteerimise alguses analüüsiti silikoonvooliku koostamise tehnoloogilist protsessi ja jagati protsess funktsioonide alusel osadeks. Iga funktsionaalne osa analüüsiti ja kaaluti erinevaid kontseptsioonilahendusi ning vajadusel testiti püstitatud hüpoteese. Kontseptsioonilahenduste katsetamisel kasutati kihtlisandustehnoloogiaga valmistatud detaile. Kontseptsioonilahenduste hulgast valiti välja sobivaimad lahendused, mis said aluseks detailsel projekteerimisel. Detailsel projekteerimisel on esmalt antud ülevaade tööpingist ja seejärel lähemalt kirjeldatud kõikide põhiliste sõlmede projekteerimist. Kihtlisandustehnoloogiat kasutati ka osade detailide lõpliku disaini testimiseks, enne kui nende valmistus telliti. Magistritöö lõpus tuuakse välja testimise käigus ilmnenud probleemid ja neile leitud lahendused. Lisaks pakutakse välja mõned võimalikud edasiarendussuunad.

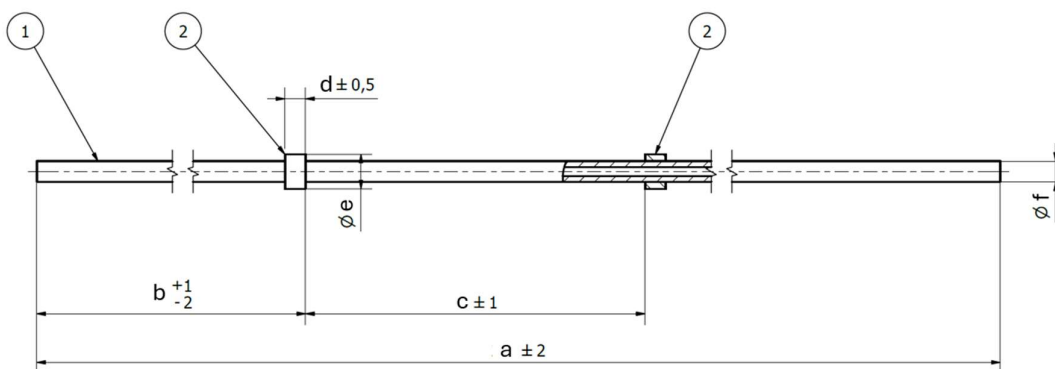
Kliendi soovil on magistritööst välja jäetud kliendi nimi ja kliendi käest saadud projekti täpsemad parameetrid. Veel on välja jäetud toote täpsed mõõtmed ja spetsifikatsioon ning liimi tehniline spetsifikatsioon. Välja on jäetud ka projekti maksumuse ja täpsemate tähtaegade seonduv informatsioon.

2 ÜLESANDE PÜSTITUS

Projekteeritava seadme lähteandmed tulenevad toodetava koostu spetsifikatsioonist ja kliendi soovidest. Lähteandmed pandi paika kliendiläbirääkimiste tulemusel toote ning tootmiskeskonna iseärasusi arvestades.

2.1 Toode

Valmistatav toode on vooliku koost, mis koosneb silikoonvoolikust ja kahest silikoonstopperist (joonis 2.1). Stopperid liimitakse vooliku külge kindlale kaugusele, kasutades omandiõigusega kaitstud ja sertifitseeritud ühekomponentset silikoonliimi. Koost peab jääma eskiisil märgitud tolerantside piiridesse.



Joonis 2.1 Vooliku koostu eskiis. 1) voolik, 2) stopperid

Koostu kasutatakse meditsiinilise seadme peristaltilises pumbas. Koostamisprotsess on sertifitseeritud ja koost tuleb valmistada kindla geomeetriaga detailidest kasutades sertifikaadile vastavat liimi. Uute sertifikaatide taotlemine on pikk ja kulukas protsess ja sellest tulenevalt ei soovinud klient muid tehnoloogilisi lahendusi nagu silikoonvalu vms. Voolik ja stopperid toodetakse eraldi ja seadme eesmärk on stopperite positsioneerimine ja liimimine. Liimitud stopperid peavad vastu pidama kindlas suunas koormusele. Liim peab olema ühtlase täituvusega ja üleliigne liim peab olema puhastatud.

2.2 Tootmiskeskond

Koostatava toote sertifikaat näeb ette, et koostamine toimub ISO 14644-1 standardi järgi klass 8 puhasruumis. See seab piirangud materjalide valikule. Kõik tootega kokku

puutuvad pinnad ja tööpingi pealispinnad peavad olema puhastatavad isopropüülalkoholi baasil valmistatud desinfitseerimisvahendiga. Korrosiooni vältimiseks on kasutatud roostevaba terast EN 1.4301, anodeeritud alumiiniumi EN AW-6082 ja plastide valikus on eelistatud POM (polüoksümetüleen). Kõik kinnitusvahendid on roostevabast terasest.

2.3 Täiendavad piirangud

Lisaks toote parameetritele on kliendi poolt täiendavad piirangud. Kliendilt saadi kaks liimi doseerimisseadet DELOMAT 101 [1]. Kliendi soov oli, et võimalusel kasutatakse liimi doseerimiseks neid seadmeid. Kui peaks selguma, et need seadmed ei sobi antud funktsiooni täitma, siis lepitakse kokku alternatiivse seadme valikus kliendiga. Tööpingi projekteerimisel tuleb arvestada võimaliku liimimisseadme väljavahetamisega.

Kliendi soov on, et ühe toote tootmistsükli pikkus ei kehtaks kauem kui soovitud aeg $t_{tsükkel}$. See vähendaks koostamisaega käsitsi valmistamisega võrreldes rohkem kui poole võrra. Koostu testimiseks on kliendil tõmbekatseseade, millega teostatakse kontrollmõõtmisi. Stopperid peavad vastu pidama etteantud koormusele $F_{koormus}$.

Tööpingi avatavad ukсед ja paneelid peavad olema lukustatavad ning transportimiseks peavad pingil olema rattad. Rattad peavad olema lukustatavad. Tööpingil peab olema ava ventilatsioonitoru kinnitamiseks, et liimimisel aurustuvad ühendid saaks eemaldada enne kui need ruumis lenduvad.

Tootmine toimub puhasruumis, kus temperatuur on vähemalt 18 kraadi ja tootmisruumis on saadaval suruõhk. Projekti nõuded, tootmistingimused ja muud kliendi soovid on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Projekti parameetrid

Nõuded:	
Tööpingi funktsioon	Stopperite voolikule liimimine tolerantsi piires
Koostu vastupidavus tõmbekatsel	$F_{koormus}$ (N)
Ühe toote tootmistsükli kestus	$t_{tsükkel}$ (s)
Nõutav eluiga	t_{eluiga} (aastat)
Transporditavus	Ratastel, lukustatav
Ventilatsiooni ava	Liimimiskambri taga- või küljepaneelil

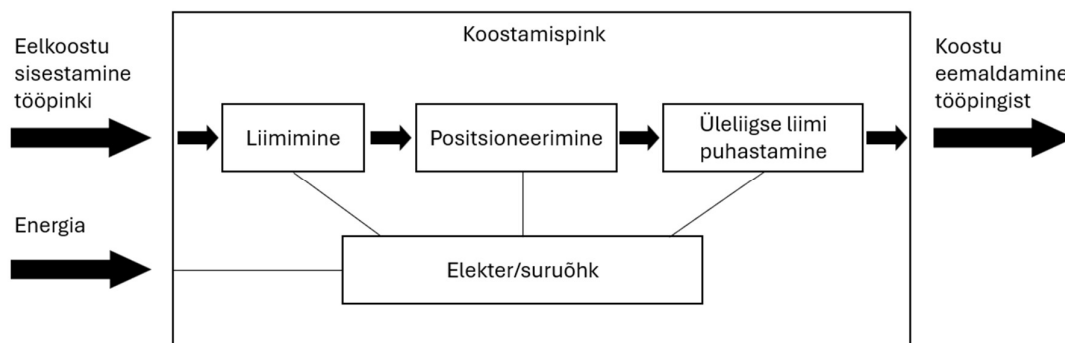
Põlvedele ruum laua esiserva all	≥ 300 mm
Projekti valmimise tähtaeg	$t_{tähtaeg}$ (kuupäev)
Tootmistingimused:	
Kasutustingimused ja -keskkond	Peab olema sobilik ISO 14644-1 klass 8 puhasruumi, pinnad peavad olema desinfitseerimisvahendiga puhastatavad (70% isopropüülalkohol)
Temperatuur	18+ kraadi
Tootmisruumis on suruõhk	Filtreeritud, ei vaja täiendavat filtrit, 7,6 bar
Soovid (läbiräägitav):	
DELOMAT 101 seadme kasutamine	Võimalusel
Tööpingi mõõtmed	Laius ≤ 1500 mm, sügavus ≤ 1000 mm
Tööpinna kõrgus	800 mm

3 KONTSEPTSIOONLAHENDUSE VÄLJATÖÖTAMINE

Vooliku koostamise protsess jagati funktsioonide alusel osadeks. Projekti analüüsimiseks koostati tehnoloogilise protsessi diagramm (joonis 3.1). Projekteeritav tööpink on poolautomaatne. Kliendiga lepiti kokku, et koostu ettevalmistamine, tööpinku sisestamine ja koostu eemaldamine jääb operaatore ülesandeks. Operatuur peab kaks stopperit paigutama voolikule ettemääratud vahemikku ja vooliku sisestama tööpinku. Peale töösükli võtab operatuur valmis koostu välja ja sisestab järgmise. Töösükli jooksul valmistab operatuur ette järgmise koostu. Tööpingi tsükkel koosneb järgmistest etappidest:

1. Operatuur valmistab ette koostu.
2. Operatuur sisestab koostu tööpinku.
3. Tööpingis toimub liimi doseerimine.
4. Stopperid positioneeritakse liimitud kohale.
5. Üleliigne liim eemaldatakse.
6. Operatuur võtab koostu tööpingist välja.

Punktis nr. 1 toodud järgmise koostu ettevalmistus toimub tsükli punktide 3-5 jooksul.



Joonis 3.1 Tehnoloogiline protsess

Puhasruumis on suruõhu trass, seega liikumiste teostamiseks saab kasutada kas pneumoajameid või elektriajameid. Ajamite energiaallika valiku langetamiseks analüüsiti kõigepealt iga eraldiseisvat sõlme ja selgitati välja vajalike liikumiste hulk ning tüüp (lineaarne, rotatsioon, vms.).

3.1 Olemasolevate lahenduste otsimine

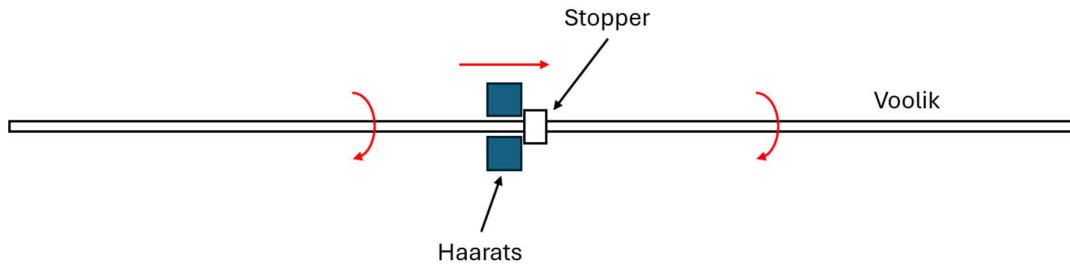
Kontseptsioonilahenduse väljatöötamiseks tehti kõigepealt olemasolevate liimimisseadmete otsing. Erinevate tootjate hulgas vaadati tooteid sellistelt ettevõtetelt nagu: DELO Industrie Klebstoffe GmbH & Co. KGaA, Threebond International, Inc., Applied Products, Inc. (Applied Adhesives), Nordson Corporation ja Topbest Technology Limited. Liimi doseerimisseadmete valik on suur. Turul leidub erinevaid käsitsi opereeritavaid seadmeid kui ka täiesti automaatseid liimi positsioneerimis- ja doseerimisseadmeid. Silikoonliimi puhul on sobivate seadmete hulk väiksem.

Automaatsete lahenduste hulgas leidis palju kolmeteljelisi liimimisseadmeid, mis oma olemuselt meenutavad laialt levinud kihtlisandustehnoloogiat (kõnekeeles 3D printimine). Enamus doseerimisseadmeid on disainitud liimimist viima erinevatesse positsioonidesse töölaual. Selliste lahenduste puhul kinnitatakse liimitav detail tööpinnale ja programmi abil doseeritakse kindel kogus liimi kindlatesse punktidesse. Käesoleva vooliku koostu liimimisel on kaks konkreetset positsiooni, mis ei muutu. Need positsioonid on võimalik saavutada mehaanilise seadistamise käigus ja seetõttu pole vaja keerukat süsteemi liimimise positsiooni muutmiseks. Ühtlasi puudub sellist tüüpi lahendustel töölaual piisav ruum lisaseadmete jaoks, mis muid funktsioone täidavad. Lisaks liimi positsioneerimisele on vaja lahendada veel koostu mugav ja kiire tööpinki sisestamine, koostu kinnitamine ja üleliigsest liimist puhastamine. Antud ülesande täitmiseks on igal juhul vaja eritellimusel valmistatud seadet. Eritellimusel valmistatud seadmete kohta detailsemat informatsiooni ei leidunud.

3.2 Stopperite positsioneerimine

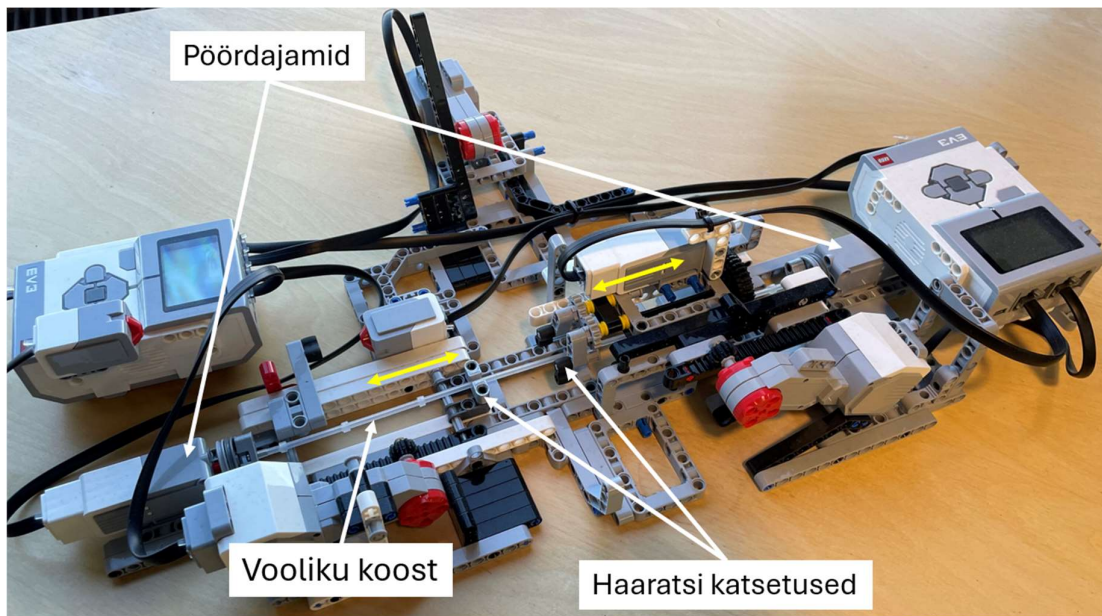
Esimesena saadi kliendilt koostu komponendid ja koostu näidised. Seepärast analüüsiti esimesena sõlme, mis positsioneerib stopperid. Stopperid paiknevad voolikul ja need tuleb liigutada positsioonile vooliku telje sihis. Stoppereid saab liigutada kas pealt haarates või kõrvalt lükates. Koost on elastne ja lõpupositsioonide seadistamiseks peab jätma ruumi. Haaratsite avamist ja sulgemist saab teostada paralleelhaaratsitega ning stopperite positsioneerimist saab teostada lineaarajamiga. Vooliku ja stopperite materjali tõttu tekib stopperite lükkamisel hõõrdumine, mis takistab sujuvat positsioneerimist. Seetõttu analüüsiti võimalikke lahendusi hõõrdumise vähendamiseks. Koost ei tohi kokku puutuda libisemist soodustavate vedelike või määretega, seetõttu tuli hõõrdumist vähendada mehaanilise liikumise abil. Parimaks lahenduseks leiti vooliku pöörlema panemine stopperite liigutamise ajal. Lahenduse sobivuse hindamiseks

teostati katse, kus voolik kinnitati otstest pöördajamite külge ja vooliku pööreldes lükati stoppereid voolikul edasi vastavalt skeemile joonisel 3.2.



Joonis 3.2 Positsioneerimise katse skeem

Katse eesmärk oli valideerida hüpoteesi stopperite lükkamisel tekkiva hõõrdetakistuse vähendamisest. Katse läbiviimiseks kasutati LEGO komplekti, mis sisaldas programmeeritavaid elektriajameid (joonis 3.3). Ajamitele kirjutati testimiseks programm, mis simuleeris positsioneerimise etappi töösüklist. Voolik kinnitati otstest pöördajamite külge, pandi pöörelema ja stoppereid liigutati vooliku telje sihis. Katsed viidi läbi erineva vooliku pöörelemise kiirusega, erineva stopperite nihutamise kiirusega ja erinevate detailidega, mis asendasid haaratseid.



Joonis 3.3 Hõõrdumise vähendamise katse

Katse tulemustest selgus, et vooliku pöörelema panemine oli piisav stopperite takerdumise vältimiseks. Veel selgus, et haaratsikäppade detailsel projekteerimisel tuleb täiendavalt katsetada erinevat geometriat. Stopperi liigutamise ajal tuleb tagada stopperi ja vooliku samatelgsus. Stopperi viltu vajumisel võib hõõrdumine suurened ja

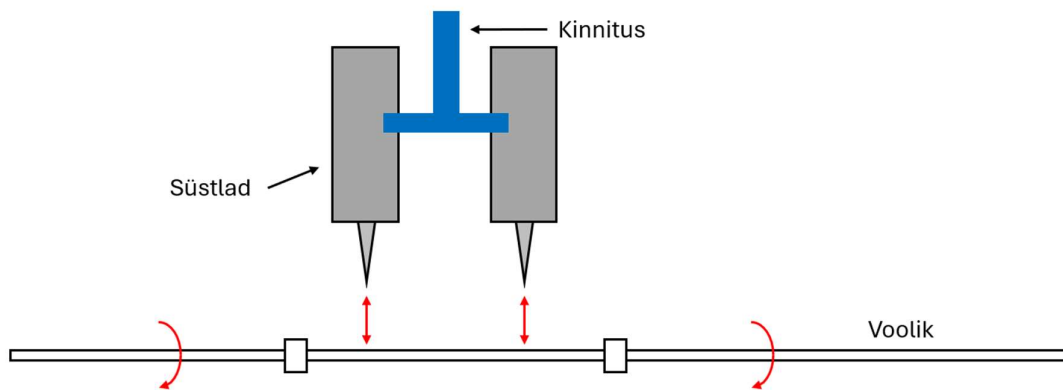
stopperi sujuv liikumine muutub võimatuks. Lisaks positsioneerimisele saab haaratseid kasutada ka liimimise ja puhastamise ajal vooliku toetamiseks.

3.3 Liimimine

Liimimiseks kasutatav liim on ühekomponentne silikoonliim. Liimil on suhteliselt suur viskoossus ja tootja sõnul võib tootepartii viskoossus kõikuda üle kahe korra. Arvestades, et kasutatava liimi viskoossus võib jääda välja doseerimisseadme tehnilistes andmetest toodud ettenähtud vahemikust, oli kõigepealt vaja välja selgitada kas kliendi pakutud seadme kasutamine on võimalik. Liimidosaatorite DELOMAT 101 testimiseks teostati katsed erineva surve ja ajalise kestusega. Katsetest selgus, et dosaatori kasutamine on võimalik, aga seadme kasutamisel võib tekkida komplikatsioone liimi koguse ja positsiooni täpsemal kontrollimisel. Kliendiga arutati võimalikke komplikatsioone ja kaaluti alternatiivseid doseerimisseadmeid. Projekteerimist otsustati jätkata olemasolevate seadmetega, jättes võimaluse seadmete hilisemaks väljavahetamiseks.

Liimi doseerimine toimub kahe DELOMAT 101 seadmega. Kummagi dosaatori külge on suruõhu voolikuga ühendatud liimi süstal. Liimimine toimub kahel positsioonil paralleelselt. Dosaatorid on ühendatud suruõhu trassiga ning süstaldele doseeritakse kindla kestuse ja survega suruõhu tsükkel. Süstal kannab liimi vooliku pinnale vooliku pöörlemise käigus. Täpsem sobilik ajalane kestus ja surve selgub masina seadistamise käigus. Doseerimistsükli kestus sõltub vooliku pöörlemise kiirusest ja surve sõltub liimi viskoossusest ja kasutatava nõela siseläbimõõdust. Kui katsetamise käigus selgub, et partiide viskoossuse erinevus on piisavalt suur ja mõjutab doseeritava liimi kogust oluliselt, siis peab operaator survet reguleerima vastavalt kasutatava liimi partiile.

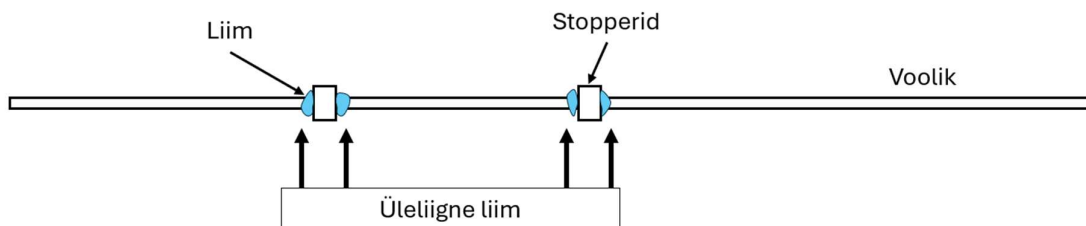
Liim paikneb süstaldes ja süstlad peavad olema kinnitatud rakises, mida on võimalik liigutada liimimise ajaks tööpositsioonile ja tagasi, et need stopperite positsioneerimisel haaratsitele ette ei jääks. Oluline on nõelte otste täpne positsioneerimine ja see tähendab, et rakis peab olema seadistatav. Rakise tööpositsioonile liigutamine on teostatav ühe lineaarse liikumisega (joonis 3.4).



Joonis 3.4 Liimimise skeem

3.4 Liimi puhastamine

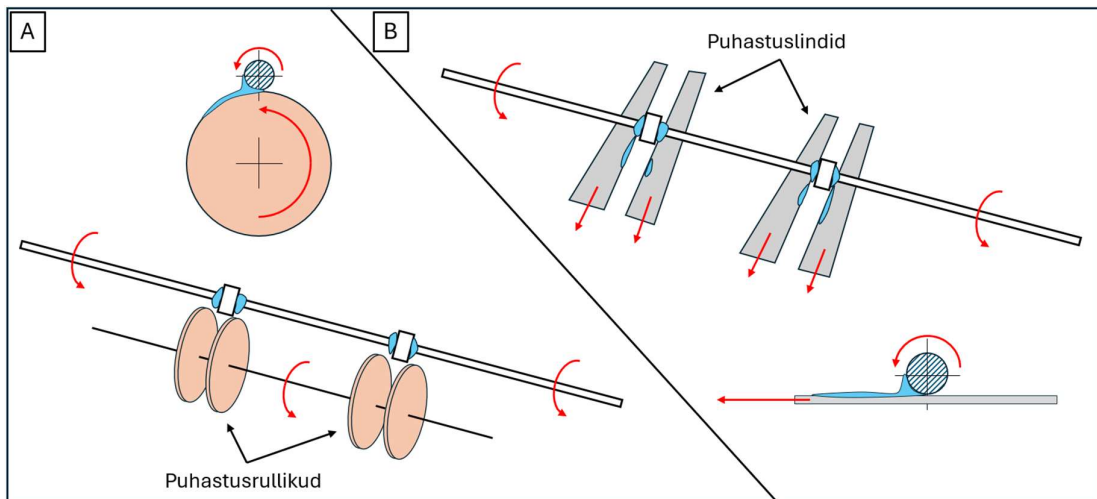
Peale liimimist ja positsioneerimist võib üleliigset liimi jääda stopperi mõlemale küljele. Kahe stopperi puhul on järelikult vaja puhastada neljal positsioonil (joonis 3.5). Tsükliaja vähendamiseks peaks puhastamine toimuma kõigil positsioonidel paralleelselt.



Joonis 3.5 Üleliigse liimi paiknemine

Puhastamise teostamiseks kaaluti kahte kontseptsiooni. Puhastamine rullikute abil (joonis 3.6, A). Rullikud peaks sel juhul olema harjased või mingi muu puhasruumi sobiv materjal, mis liimi silikoonvoolikult enda külge seob. Rullikute kasutamise puhul oleks vaja lahendada ka rullikute puhastamine peale liimi puhastamist. Vastasel juhul liim koguneb puhastusrullikutele ja nende efektiivsus langeb ning neid peab hakkama tihti vahetama. Puhastusrullide pöörlema panemiseks oleks vaja kasutada ühte pöördajamit.

Teine kontseptsioon oli puhastamine puhastuslintide abil (joonis 3.6, B). Sobilikud linnid oleks elektroonikatööstuse jaoks toodetavad mikrofiiberlindid. Neid toodetakse erineva tekstuuri ja laiusuga. Puhastuslindid oleks kuluosad, mida regulaarselt peaks vahetama. Lintide pikkust valides saaks lintide vahetamise tsükli pikkust kontrollida, vältides liigset hooldamise vajadust. Ka lintide puhul oleks vaja pöördajamit, mis linte edasi veab.



Joonis 3.6 Puhastamise kontseptsioonid. A) puhastusrullid, B) puhastuslint

Mõlema kontseptsiooni puhul on vaja lahendada veel lintide liigutamine vooliku vastu. Selleks sobib lineaarajam. Seega on puhastusmoodulil kokku vaja vähemalt kahte ajamit.

Mikrofiiberlintide kasutamine on puhasruumides juba tavapärase praktika. Neid kasutatakse näiteks trükkplaatide puhastamisel või fotogalvaaniliste elementide tootmisel. Sellest tulenevalt otsustati puhastuslintide kontseptsiooni kasuks.

3.5 Ajamite energiaallika valik

Sõlmede analüüsist selgus liikumiste kogus ja tüüp. Kokku on kolme erinevat tüüpi liikumist ja vaja läheb üheksat ajamit: 4 lineaarajamit, 3 pöördajamit ja 2 paralleelset haaratsit (tabel 3.1).

Tabel 3.1 Ajamite kogus ja funktsioon

Moodul	Ajami tüüp	Funktsioon
Liimimine	1 x lineaarajam	Liimimisnõelte positsioneerimine
Positsioneerimine	2 x pöördajam	Vooliku pöörlemine
	2 x lineaarajam	Stopperite positsioneerimine
	2 x paralleelhaarats	Stopperite haaramine / vooliku haaramine / stopperist üle liikumine
Liimi puhastamine	1 x lineaarajam	Puhastusmooduli tööpositsioonile liikumine
	1 x pöördajam	Puhastuslintide edasi liigutamine

Ajamite energiaallika valiku langetamiseks kasutati kaalutud punkthindamist (tabel 3.2). Hindamiseks võrreldi kaheksat kriteeriumi. Hindamisel võeti arvesse, et töökeskkond on puhas ja sellega väheneb pneumoajamite vastupidavuse ja töökindluse eelis elektriajamite ees. Esmases koostamispaigas puudus suruõhk ja see tähendanuks lisanduvat keerukust testimisel, sest suruõhk tuleb kompressoriga toota ning doseerimiseadmete nõuete kohaselt puhastada.

Tabel 3.2 Ajamite energiaallika hindamismatriks

Ajamite energiaallika hindamismatriks					
		Elekter		Suruõhk	
	kaal	hinne	skoor	hinne	skoor
Täpsus	0,15	5	0,75	4	0,6
Kiirus (suunamuutused)	0,1	5	0,5	4	0,4
Süsteemi lihtsus	0,1	4	0,4	3	0,3
Lihne ümberseadistatus	0,3	5	1,5	2	0,6
Testimisvalmidus	0,05	5	0,25	3	0,15
Vastupidavus	0,1	4	0,4	5	0,5
Hooldus	0,1	4	0,4	5	0,5
Hind	0,1	3	0,3	5	0,5
Summa:	1		4,5		3,55

Projekteeritav tööpink polnud tüüplahendus ja sellest tulenevalt oli kõige olulisemaks kriteeriumiks lihtne ümberseadistamine. Projekteerimise igal etapil on arvestatud, et tööpink peab olema võimalikult seadistatav ja jätab võimaluse testimise käigus saadava informatsiooni põhjal protsessi ümber häälestada. See annab elektriajamitele suure eelise, sest ajamite positsioonide muutmine on programmis väga lihtne ja kiire protsess. Suure seadistatavusega pneumoajamid on keerukama konstruktsiooniga ja nende puhul väheneks hinnaelis elektriajamite ees. Veel oli oluliseks kriteeriumiks ajamite täpsus. Arvestades koostu mõõtkava ja silikooni elastsust, peab ajamite positsioone olema võimalik suhteliselt suure täpsusega muuta. Lisaks arvestati ajamite vastupidavuse, hooldamise ja muude parameetritega, mida peeti oluliseks projekti iseärasusi ja ettevõtte kompetentse arvestades. Hindamismatriksist selgus, et elektriajamite kasutamine osutus paremaks valikuks (tabel 3.2).

4 DETAILNE PROJEKTEERIMINE

Projekteerimine algas vooliku koostu paigutusest tööpingis. Koostu ümber mudeldati liikumised ja nende ulatused ning valiti välja sobilikud ajamid. Hindamismaatriksi tulemusel otsustati elektriajamite kasuks ja kliendiga läbirääkimise tulemusel otsustati kasutada Festo elektriajameid nende kvaliteedi ja kasutajatoe tõttu.

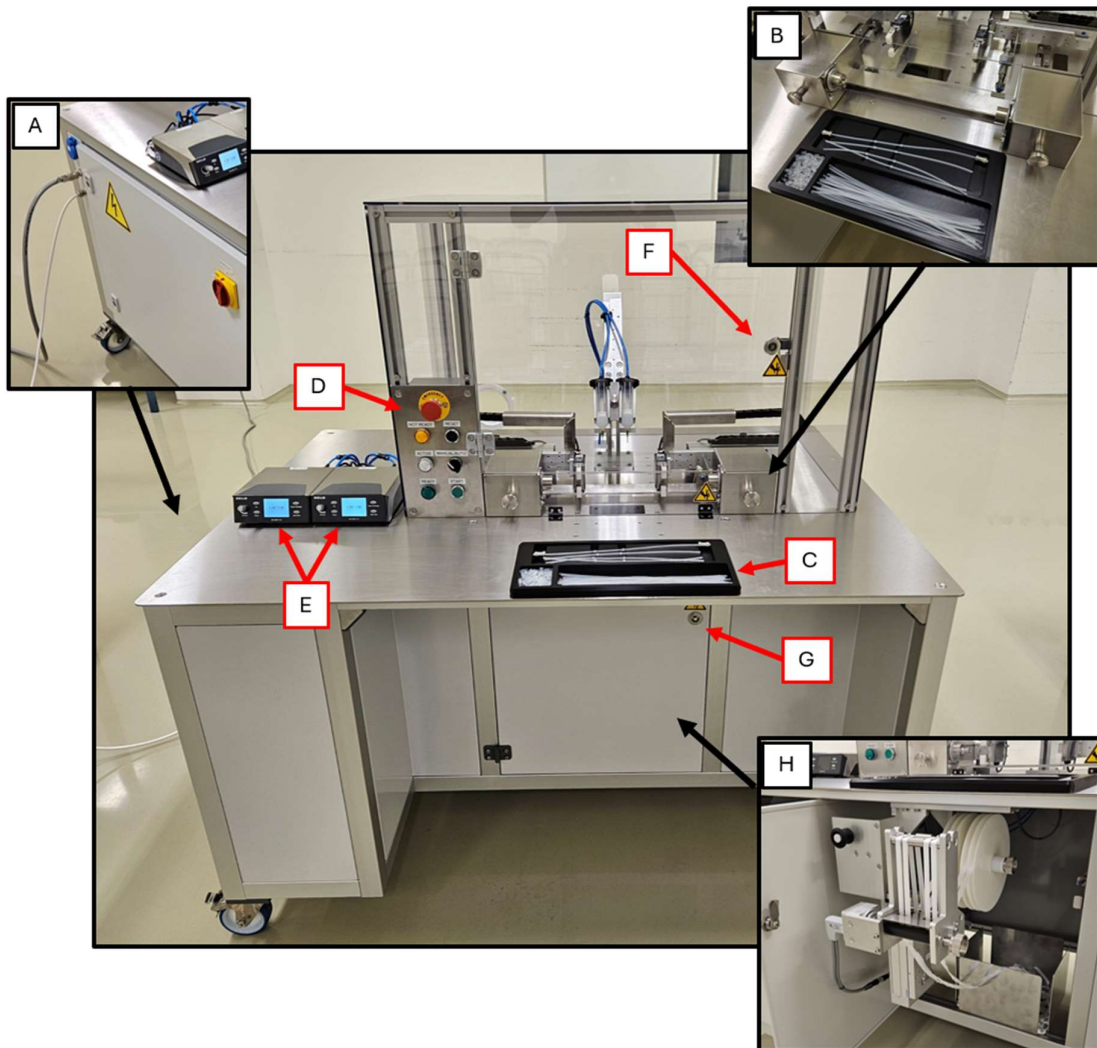
Tootearenduse juures oli väga olulisel kohal erinevate detailide 3D printimine. Prinditud detaile ja koostude osasid kasutati võimalike kontseptsioonide testimiseks ja informatsiooni kogumiseks. Prinditud detaile kasutati ka koostamise etapis enne lõplike detailide tellimist, et veenduda disaini sobivuses.

4.1 Tööpingi ülevaade

Tööpingi põhifunktsiooniks on silikoonvooliku koostu liimimine. Tööpingi taga töötab üks operaator istuvas asendis. Operaatori ülesandeks on ühest voolikust ja kahest stopperist koosneva koostu ettevalmistamine. Töotsükli lõpus tuleb valmis koost eemaldada ja ettevalmistatud koost tööpinkis sisestada. Sisestatud koost läbib tööpingis kolm põhilisest etapist, milleks on liimi doseerimine, stopperite positsioneerimine ja liimi puhastamine.

Tööpingi alumine raam on projekteeritud MiniTec 45 x 45 alumiiniumprofiilist. Raami peal on roostevabast terasest lauaplaat. Alumise raami välimised seinad on kaetud värvitud DC01 kattepaneelidega ja raami alumises neljas nurgas on lukustatavad rattad. Tööpingi vasakule küljele jääb elektrikilp ja paneel voolu ja suruõhu pinki ühendamiseks (joonis 4.1, A).

Laua peal on MiniTec raam 30 x 30 alumiiniumprofiilist. Ülemine raam on kaetud läbipaistvate PC (polükarbonaat) paneelidega. Raami esimese külje alumises servas on väljatõmmatav sahtel, mille kaudu operaator koostu tööpinkis sisestab (joonis 4.1, B). Sahtli ees töölaua peal on POM-ist freesitud koostamisrakis, mille abil operaator eelkoostu stopperid positsioneerib ja mis laual detaile organiseerib (joonis 4.1, C). Ülemise raami esimeses vasakus servas paikneb kontrollpaneel, millel on nupud ja indikaatortuled pingi kontrollimiseks ja staatuse jälgimiseks (joonis 4.1, D). Töölaua vasakul servas on kaks DELOMAT 101 liimi doseerimisseadet (joonis 4.1, E).



Joonis 4.1 Tööpingi ülevaade

Tööpingi hooldamiseks on nii ülemise kui alumise raami esiküljes ukseid, mis on võtme abil avatavad. Ülemine uks on liimi süstalde vahetamiseks (joonis 4.1, F). Alumine uks on puhastusmooduli hooldamiseks ja puhastuslintide vahetamiseks (joonis 4.1, G). Hoolduse ja puhastuslintide vahetuse lihtsustamiseks on puhastusmoodul väljatõmmatav (joonis 4.1, H). See on vajalik puhastusmoodulile ligipääsu tagamiseks ja puhastusprotsessi ergonomilisemaks muutmiseks. Operaatori ja tööpingi ohutu töö tagamiseks kontrollitakse uste, sahtli ja puhastusmooduli positsiooni anduritega. Töö peatatakse, kui mõni uks on avatud või sahtel ja puhastusmoodul pole kodupositsioonis.

Operaatori tööülesannete disainimisel peeti silmas ergonomika põhimõtteid vastavalt standardile EVS-EN 614-2. Puhasruumi sobivate masinaehituslike materjalide valikul on projekteerimisel aluseks võetud „GMP Equipment Design Guide“ [2] dokument, milles käsitletakse meditsiinitööstuse tootmisprotsesside ja seadmete tootmise head tava.

Üldistest masinaehituslikest nõuetest kinnipidamiseks lähtuti Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiivist 2006/42/EÜ.

4.2 Ajamite valik

4.2.1 Sahtli pöördajamid

Kontseptsiooni faasis tehtud katsest selgus, et voolik on vaja panna pöörlema. Vooliku pöörlema panemiseks oli vaja kahte pöördajamit. Vooliku elastsuse tõttu peavad vooliku otstes olevad ajamid pöörlema sünkroniseeritult. Pöörlemiseks pole suurt jõudu vaja, samuti ei teki vooliku pöörlemisel suuri takistusi. Vooliku hõõrdumisel haaratsite ja puhastuslintidega avaldatakse ajamile väga väikest koormust, sest moment mis hõõrdumisel tekib on vooliku läbimõõdu tõttu väikese jõuõlaga.

Liimi doseerimisel peab kasutama suhteliselt aeglast pöörlemiskiirust, et liim ühtlaselt silikoonvooliku külge jääks. Liimimiseks peab voolik tegema ühe täispöörde. Esialgsel hinnangul kestaks liimimistsükkel umbes 2 s, seega pöörlemiskiirus peaks olema umbes 3,14 rad/s. Valiku langetamisel oli oluliseks kriteeriumiks ajami väikesed gabariidid. Sobivaks ajamiks valiti ERMO seeria kõige väiksemad pöördajamid ERMO-12-ST-E [3].

4.2.2 Paralleelhaaratsid

Haaratsite ülesanne on stopperite haaramine ja vooliku toetamine liimimise ja puhastamise ajal. Kõik haaratsitele mõjuvad jõud on väga väikesed ja paralleelhaaratsi valimisel oli oluline haaratsi kompaktsus. Sobivaks haaratsiks valiti EHPS seeria kõige väiksemad haaratsid EHPS-16-A-LK [4].

4.2.3 Lineaarajamid

Projektis on kasutatud nelja lineaarajamit. Ajamite valikul lähtuti liikumiste ulatusest, liigutatavast massist ja soovitud kiirendusest. Liikumiste projekteerimisel arvestati erinevate võimalike silikoonstopperite positsioneerimisskeemidega ja maksimaalsete võimalike liikumisulatustega ning leiti maksimaalne mass, mida iga ajam liigutama peab (tabel 4.1). Festo kasutajatoega konsulteerides kasutatakse ajamite konfiguratsioonis kiirendust 1 m/s^2 . Ajamite valiku langetamiseks arvutati ajamitele rakenduv koormus.

Tabel 4.1 Lineaarajamite liikumisulatus ja liigutatav mass

Ajam	Suurim liikumisulatus (mm)	Suurim liigutatav mass (kg)
Vasak haarats	127	1,1
Parem haarats	150	1,1
Liimi doseerimine	110	0,75
Puhastus moodul	130	3,3

Koormuse arvutamisel kasutatakse varutegurit $S = 1,5$, et võtta arvesse võimalikke ootamatuid koormuse olukordi. Seega ajamile mõjuv koormus saadakse valemist:

$$F = m \cdot a \cdot S \quad (4.1)$$

kus: F – ajamile mõjuv koormus
 m – suurim liigutatav mass
 a – ajamite kiirendus (1 m/s^2)
 S – varutegur (1,5)

Haaratseid liigutavad ajamid paiknevad horisontaalselt ja koormust ei mõjuta gravitatsioonikiirendus (joonis 4.2, A). Suurim ajamile mõjuv jõud F_{haara} on:

$$F_{haara} = m_{haara} \cdot a \cdot S = 1,1 \cdot 1 \cdot 1,5 = 1,65 \text{ N}$$

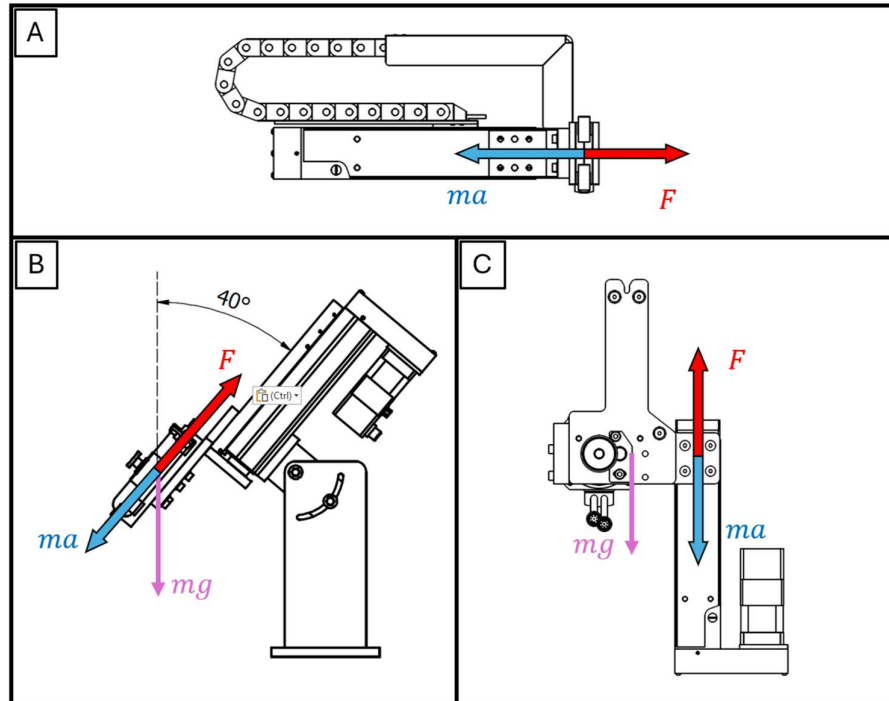
Liimimisrakise massi puhul on arvestatud, et mõlemad 30 cm^3 süstlad on täidetud liimiga. Suurim ajami koormus tekib peale liimimist, kui rakis tagasi üles liigub (joonis 4.2, B). Ajami liikumine toimub 40 kraadise nurga all ja seetõttu on koormuse arvutamisel kiirendusele a liidetud gravitatsioonikiirenduse liikumissuunaline komponent. Suurim ajamile mõjuv jõud F_{liim} on:

$$\begin{aligned} F_{liim} &= (m_{liim} \cdot a + m_{liim} \cdot g \cdot \cos(40^\circ)) \cdot S = m_{liim} \cdot (a + g \cdot \cos(40^\circ)) \cdot S = \\ &= 0,75 \cdot (1 + 9,81 \cdot \cos(40^\circ)) \cdot 1,5 = 9,58 \text{ N} \end{aligned}$$

kus: g – gravitatsioonikiirendus ($9,81 \text{ m/s}^2$)

Liimipuhastus mooduli lineaarajamiga liigutatav osa liigub vertikaalselt (joonis 4.2, C). Kiirendusele a tuleb liita gravitatsioonikiirendus g . Seega ajamile mõjuv jõud F_{puhas} on:

$$F_{puha} = (m_{puha} \cdot a + m_{puha} \cdot g) \cdot S = m_{puhas} \cdot (a + g) \cdot S = 3,3 \cdot (1 + 9,81) \cdot 1,5 = 53,5 \text{ N}$$



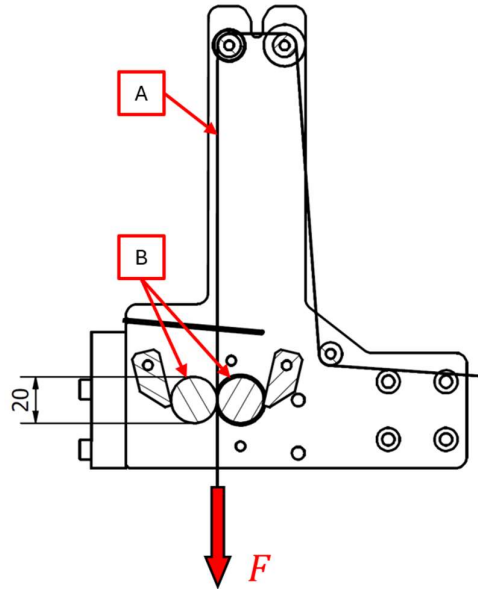
Joonis 4.2 Ajamite koormusskeemid

Festo kasutajatoe soovitusel kasutati EGSC-BS seeria lineaarsiine. Sobivad mudelid olid töökäiguga 125 mm ja 150 mm. Väikse hinnaerinevuse tõttu otsustati tellida kõik lineaarsiinid töökäiguga 150 mm. Lisaks siinile tuli tellida sammmotor ja paralleelülekanne. Sobivad komponendid on lineaarsiin EGSC-BS-KF-45-150-10P [5], sammmotor EMMS-ST-42-S-SE-G2 [6] ja paralleelülekanne EAMM-U-45-V32-42A-63 [7], mis võimaldab sammmotori lineaarsiini kõrvale paigutada, muutes ajami kompaktsemaks. Valitud ajamite suurim lubatud liikumistelje suunaline koormus on 120 N, mis jääb alla suurimale ajamile mõjuvale koormusele F_{puhas} .

4.2.4 Puhastuslindi pöördajam

Puhastuslindi tõmbamisel tekkinud koormus on keerukam ja suurimat võimalikku takistust enne katsetamist hinnata ei olnud võimalik. Kui puhastusmoodul oli koostatud, mõõdeti koormust dünamomeetriga. Mõõtmiseks kasutati taatlemata dünamomeetrit Natudeco, Model NK-200. Dünamomeetri täpsus on 1 N ja mõõteviga 0.1 N. Koormuse mõõtmiseks kinnitati neli puhastuslinti dünamomeetri külge (joonis 4.3, A). Rullikutele vahekaugus seadistati selliselt, et see tekiks piisav hõõrdumine lintide edasikerimiseks (joonis 4.3, B). Dünamomeeter tõmbamisel mõõdeti lintide vedamiseks vajaminevat jõudu. Mõõtmiste tulemused jäid vahemikku 27...30 N. Vajamineva momendi arvutamiseks

kasutati suurimat mõõdetud jõudu $F = 30 \text{ N}$ ja varutegurit $S = 1,5$. Vedava rulliku l bim ot on $d = 20 \text{ mm}$.



Joonis 4.3 Puhaslinte vedava ajami koormus

Moment leitakse valemiga:

$$M = F \cdot \frac{d}{2} \cdot S \quad (4.2)$$

kus: M – ajami moment
 F – lintide tekitatud koormus
 d – vedava rulliku diameeter
 S – varutegur

Seega saame, et suurim moment mida vaja läheb on:

$$M_{puhastus} = F \cdot \frac{d}{2} \cdot S = 30 \cdot \frac{0,02}{2} \cdot 1,5 = 0,45 \text{ Nm}$$

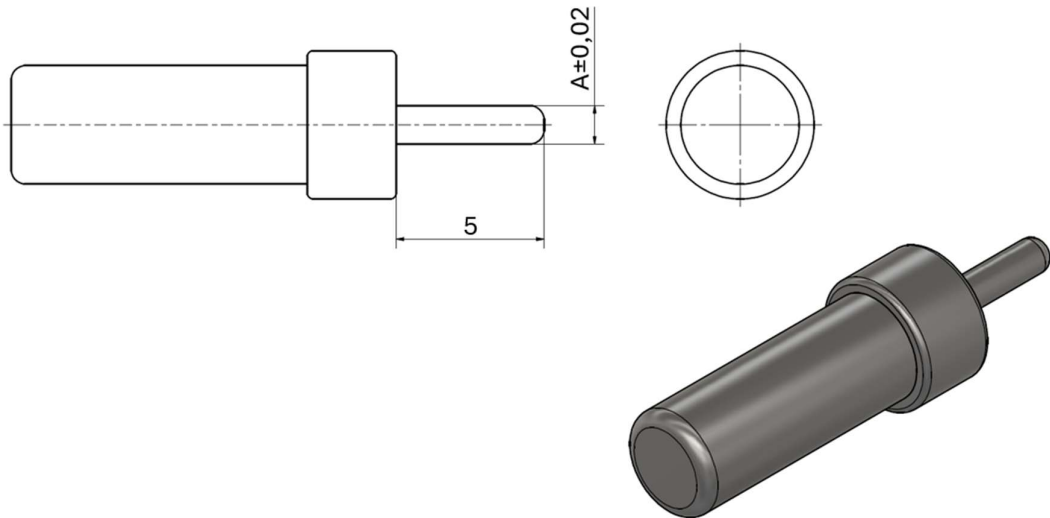
Sobivaks p ordajamiks valiti ERMO-16-ST-E [8], mille nominaalmoment on 0,8 Nm .

4.3 Koostu sisestamise sahtel

4.3.1 Vooliku kinnitus t oopinki

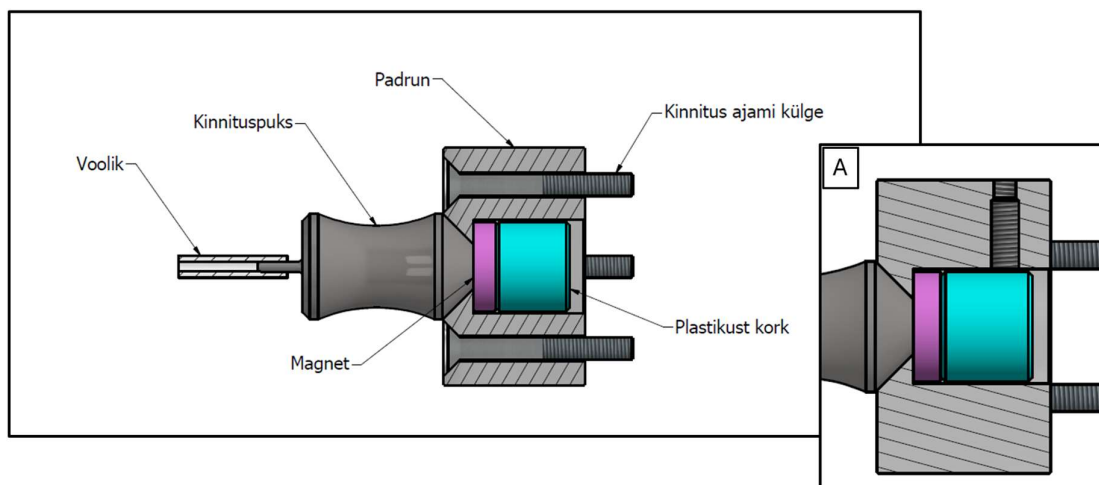
Vooliku sahtlisse kinnitamiseks on kasutatud terasest kinnituspukse. Puksidel on 1,4 mm läbimõduga silindriline ots, mis tekitab piisava h ordumise vooliku sisemise

pinnaga, et vältida libisemist. Puksi otsa sobiva läbimõõdu väljaselgitamiseks telliti katsetamiseks 10 näidisdetaili erineva otsa läbimõõduga, kus läbimõõt A kasvab vahemikus 1,3 mm kuni 2,2 mm sammuga 0,1 mm (joonis 4.4)



Joonis 4.4 Näidisdetailide eskiis

Kinnituspuksid on valmistatud magnetiseeruvast terasest Stavax [9] ja on koonilise pinnaga toetatud padrunile, millel on sama geometriaga kooniline süvend (joonis 4.5). Padrun on seest õõnes ja selle puksi poolsesse otsa on kinnitatud magnet, maksimaalse tõmbejõuga ligikaudu 62 N. Magneti tugevus valiti selliselt, et see tagaks puksi kiire ja kindla kinnitamise sahtlisse, tagaks kaasapöörlemise padruniga ning oleks käsitsi lihtsasti eemaldatav. Jõu vähendamiseks saab magneti ja puksi vahele lisada plastikust distantssliistu. Padrun on kinnitatud pöördajami külge ja magnetit hoiab pesas plastikust kork, mis on fikseeritud padruni küljel paikneva seadekruviga (joonis 4.5, A).

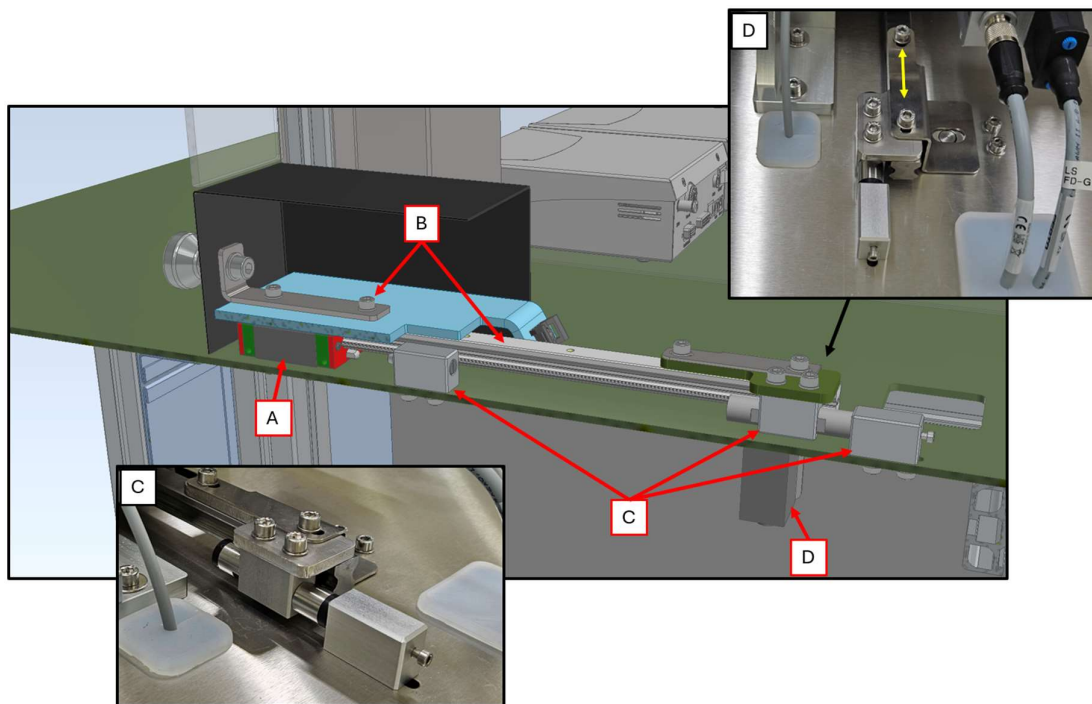


Joonis 4.5 Vooliku koostu kinnitamine ajami külge

Pöördajamid on paigutatud vooliku suhtes sümmeetriliselt ja vooliku mõlemas otsas on kasutatud kinnitamiseks samasugust koostu. Ajamid on kinnitatud 5 mm paksusest teraslehest sahtli põhja külge, mille abil positioneeritakse ajamid teineteise suhtes samale teljele.

4.3.2 Sahtli avamine

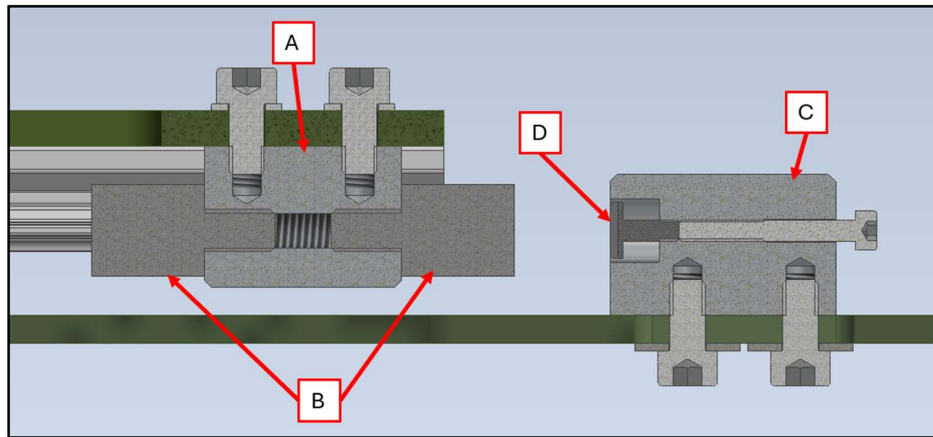
Tööpingi töötsükli jooksul peavad kõik ajamite liikumised olema operaatori jaoks ohutud. Ohutuse tagamiseks on ülemine raam kaetud 5 mm paksuste läbipaistvate PC paneelidega. Töötsükli jooksul on sahtel suletud ja tsükli lõppedes avab operaator sahtli. Sahtli täpseks positioneerimiseks on kasutatud Hiwin lineaarjuhikuid siinidega HGR15T ja kelkudega HGL15CA [10]. Kelgude konstruktsiooni tõttu võib neid kasutada igas asendis. Kelgud on kinnitatud seljaga lauaplaadi külge (joonis 4.6, A) ja siinid on kinnitatud sahtlipõhja külge (joonis 4.6, B). Selle tulemusel jäävad lineaarjuhikud PC paneelidega kaetud raami alla ja sahtli esine laua pind on tühi. Sahtli lõpuasendite määramiseks on projekteeritud stopperklotsid (joonis 4.6, C) ja töötsükli ajaks lukustatakse sahtel solenoidluku abil (joonis 4.6, D).



Joonis 4.6 Lõige sahtli lineaarjuhiku kõrvalt, stopperid ja lukustus

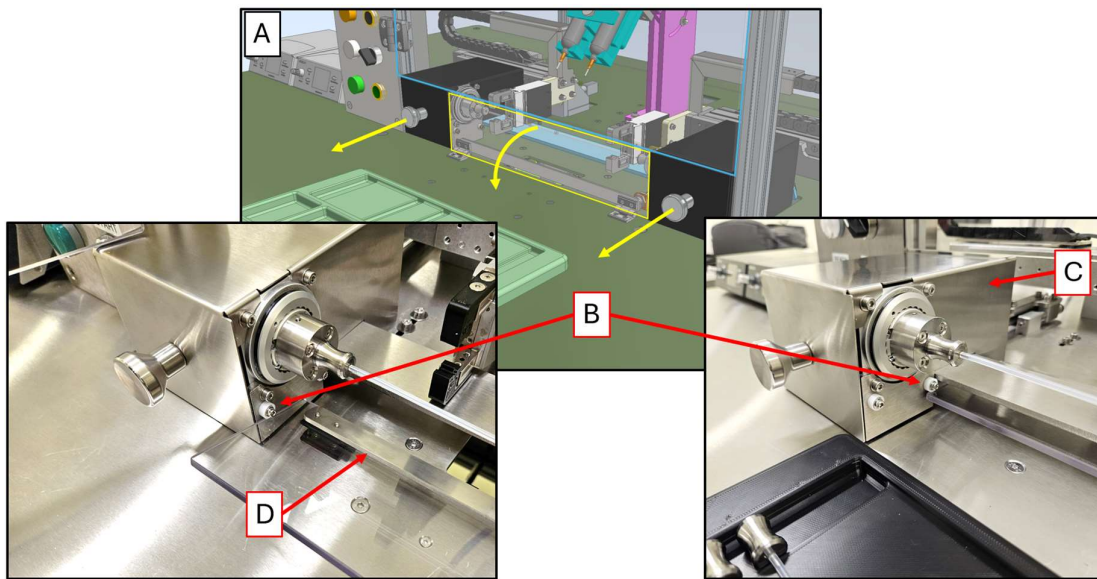
Stopperklotsid on alumiiniumist freesitud ja anodeeritud. Sahtli siini küljes on sümmeetriline stopper (joonis 4.7, A), mille mõlemas otsas on magnetpuks

termoplastilisest elasomeerist otsapehmedustega [11] (joonis 4.7, B). Sahtli liikumise lõpupositsioonide määramiseks on laua külge kinnitatud liikumist peatav stopper (joonis 4.7, C). Positsiooni seadistamiseks on lauaplaadis piklik ava. Stopperklotsi läbib keermetatud ava. Ava ühes otsas on magnetiseeruvast terasest lapiku peaga DIN 921 kruvi (joonis 4.7, D), mille pea jaoks on freesitud süvis. Kruvi keeramisel sügavamale stopperi sisse saab reguleerida jõudu, millega magnet takistab sahtli avamist. Stopperi teises otsas tavaline kruvi, millega kruvide liikumine fikseeritakse.



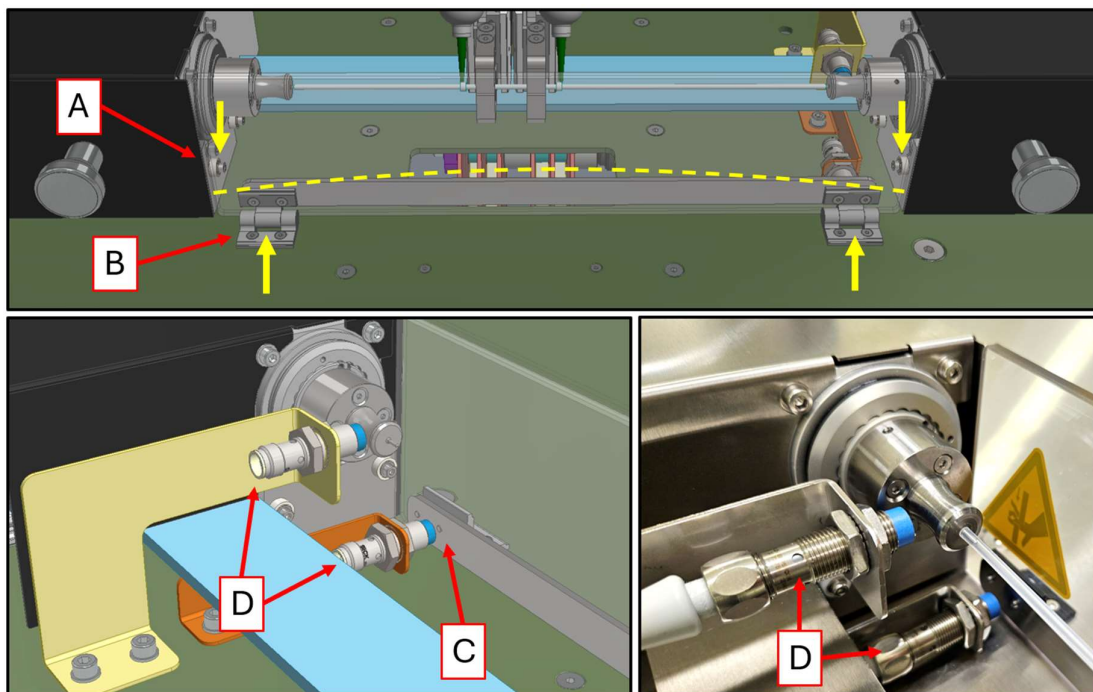
Joonis 4.7 Stopperklotsid

Sahtli esist ava katab PC-st valmistatud kattepaneel, mis on kinnitatud vedruhingedega. Hinged hoiavad paneeli kinnises asendis. Sahtli avamisel vajutatakse paneel pikali ja see jääb sahtli alla (joonis 4.8, A). Paneeli alla vajutamiseks on sahtli keskmise osa siseküljel Igus BB-623-B180-50-ES kuullaagrid (joonis 4.8, B).



Joonis 4.8 Sahtli esipaneeli avamine ja kate

Sahtli servades paiknevad pöördajamid on kaetud lehtmetailist katetega kogu sahtli väljatõmmatavas ulatuses (joonis 4.8, C). Läbipaistva paneeli sisemise külje alumises servas on pikk ja kitsas terasest plaat, mis lisab paneelile jäikust (joonis 4.8, D). Vastasel juhul saaks paneel läbi painduda, sest paneeli toetavad kuullaagrid paiknevad väljaspool paneeli kinni lükkavatest vedruhingedest (joonis 4.9, A ja B). Sama terasplaati kasutatakse esipaneeli asendi kontrollimiseks (joonis 4.9, C).



Joonis 4.9 Sahtli esipaneeli toetav terasplaat ja andurid

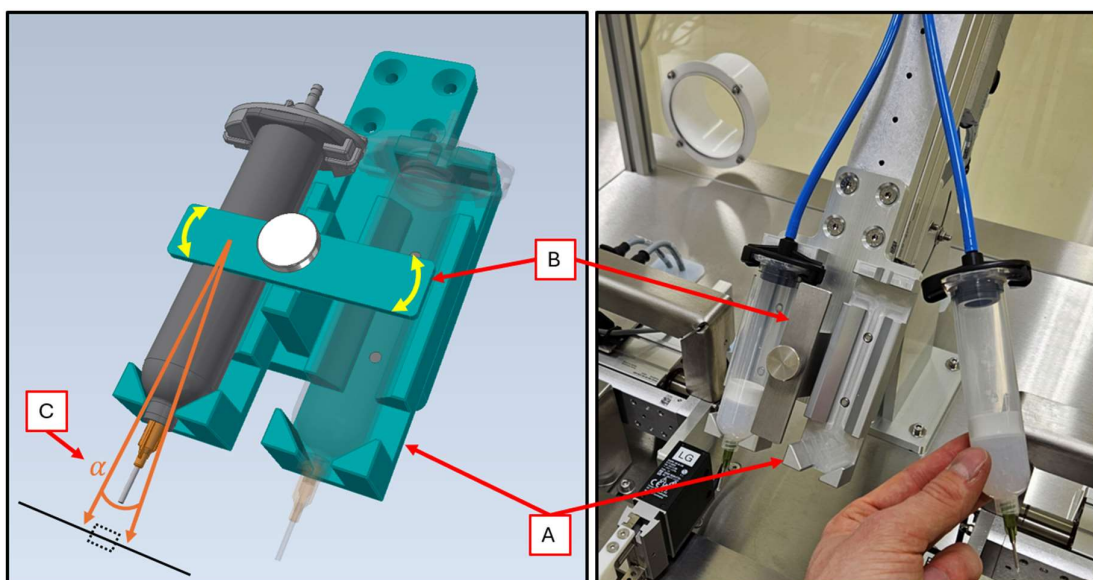
Sahtlil on kokku kaks Sick IMB12-08NPSVC0K induktiivandurit [12]. Ülemise anduri abil kontrollitakse, kas koostu kinnituspuks on tööpingis. Alumise anduri abil kontrollitakse, kas esipaneel on kinnises asendis (joonis 4.9, D).

4.4 Liimimine

Liimi doseerimiseks on kasutatud kahte DELOMAT 101 seadet [1]. Seadmed on ühendatud suruõhu trassiga. Doseerimiseseadme juhtimine toimub selliselt, et seadmele edastatakse signaal, mille peale seade teeb ühe suruõhu doseerimis tsükli. Dosaatori seadistuses saab määrata tsükli survet vahemikus 0,01...6,0 bar sammuga 0,05 bar ja doseerimisaega 0,01..640 s sammuga 0,01 s [1]. Kumbki doseerimiseseade on ühendatud standardse 30 cm³ mahutava süstla külge, millele sobib valik erinevaid standardühendusega nõelu.

4.4.1 Süstalde kinnitamise rakis

Süstalde positsioneerimiseks on projekteeritud alumiiniumist freesitud rakis. Rakis on alusplaadiga kinnitatud lineaarajami külge. Rakisel on kummagi süstla jaoks pesa (joonis 4.10, A), mis on kahe poldiga kinnitatud alusplaadi külge. Alusplaadile on tehtud poltide kinnitamiseks piklikud avad, mis võimaldavad pesade omavahelist kaugust ja nurka muuta teineteisest sõltumatult. Nende abil saab seadistada süstlaid liimima erinevalt kauguselt stopperite vasakult või paremalt küljelt. Süstalde fikseerimiseks on kasutatud 3 mm paksust terasest plaati (joonis 4.10, B). Plaat on kinnitatud rihveldatud peaga kruvi abil, et süstlaid saaks ilma tööriistadeta vahetada.



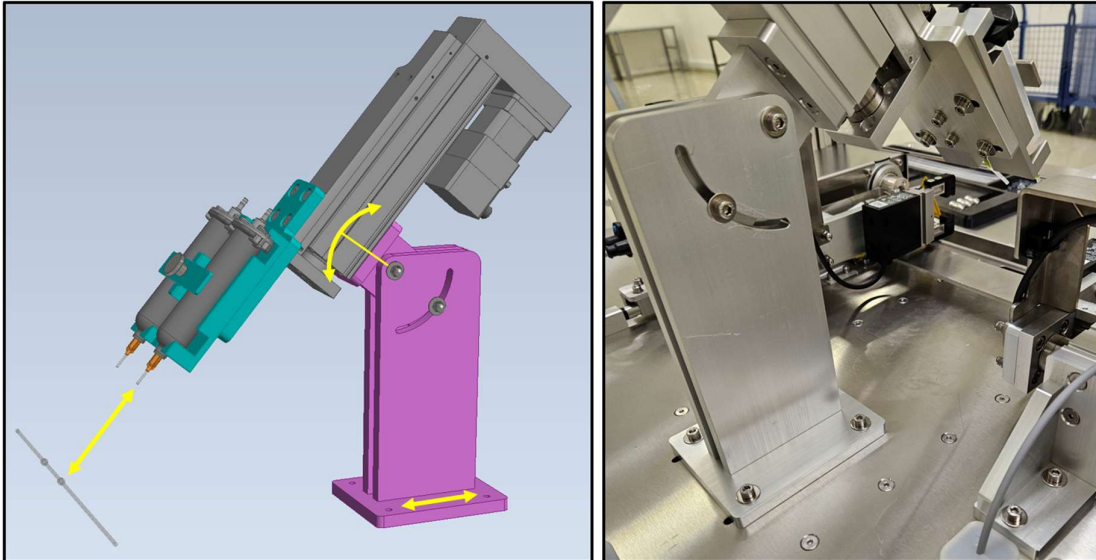
Joonis 4.10 Süstalde rakis

Süstalde vahetamiseks tuleb kruvi pingutust vähendada ja kinnitusplaat keerata 90 kraadise nurga alla. Seejärel saab mõlemad süstlad pesast välja tõsta, korgi küljest vabastada ja välja vahetada.

4.4.2 Liimimismooduli tugijalg

Süstalde liimimispositsiooni viimiseks kasutatakse väljavalitud lineaarajamit. Ajami abil saab liimisüstlad liimimise ajaks viia õigele positsioonile ja seejärel liigutada eemale, et teha ruumi haaratsite liikumisele. Ajam on kinnitatud jala külge, millel on kahest osast koosnev süsteem ajami kinnitusplaadi nurga muutmiseks. Tugijala alus on kinnitatud lauaplaadi külge ja töölaua sees on piklikud kinnitusavad jala edasi-tagasi nihutamiseks.

Süstalde positsioneerimiseks seadistatakse jala positsioon töölaual, seejärel sätitakse ajami nurk selliselt, et süstalde nõelad joonduksid täpset silikoonvooliku teljega ja tööpingi programmis seadistatakse lineaarajami liikumiskaugused vastavalt vajadusele (joonis 4.11).

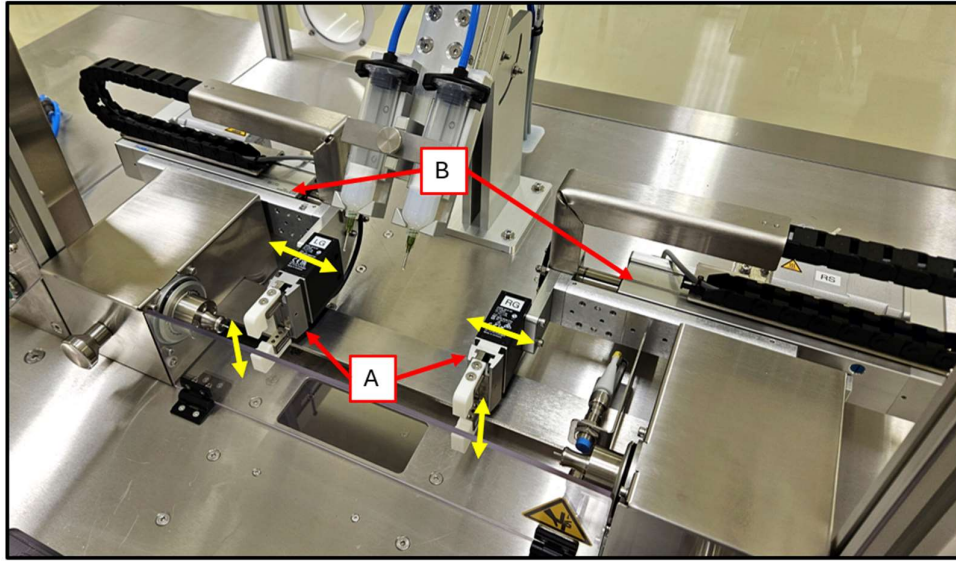


Joonis 4.11 Liimimis ajami jalg

Ajami jalg on valmistatud 10 mm paksustest alumiiniumplaatidest. Vertikaalsete plaatide otsetesse on tehtud keermestatud avad ja jala alumise plaadi ning ajami külge kinnituva plaadi sees on peitpeadega kruvid plaatide kinnitamiseks.

4.5 Stopperite positsioneerimine

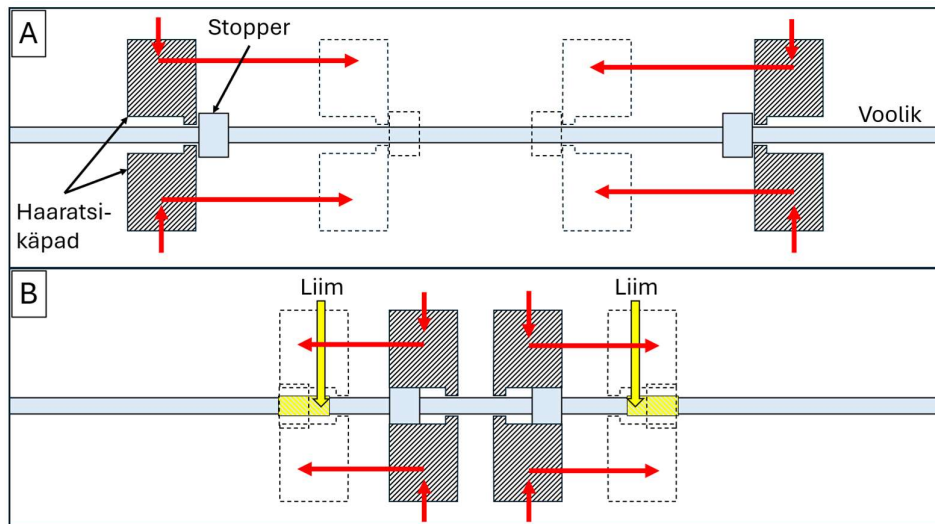
Stopperite positsioneerimiseks on projekteeritud kaks sümmeetrilist koostu. Silikoonvooliku ja stopperite haaramiseks kasutatakse väljavalitud paralleelhaaratseid (joonis 4.12, A), mis on kinnitatud lineaarajamite külge (joonis 4.12, B). Lineaarajamitega liigutatakse stopperite asukohta vooliku telje sihis ja viiakse haaratsid toetamise positsiooni liimimise ning puhastamise ajal.



Joonis 4.12 Stopperite positsioneerimise koostud

4.5.1 Stopperite positsioneerimise liikumisskeem

Stopperite positsioneerimiseks katsetati erinevaid liikumisskeeme, sest haaramisest ja stopperite liigutamise suunast sõltus milline peab olema käppade disain. Valitud liikumisskeem on järgmine. Esmalt suletakse käpad ja stopperid eelpositsioneeritakse neid välimise küljelt sisse lükates (joonis 4.13, A). Tööpingil puudub tagasiside stopperite positsiooni kohta ja esimene liikumine on vajalik stopperite kindlasse positsiooni viimiseks haaratsite suhtes. Järgmist liigutust alustades on teada stopperite eelnev positsioon.

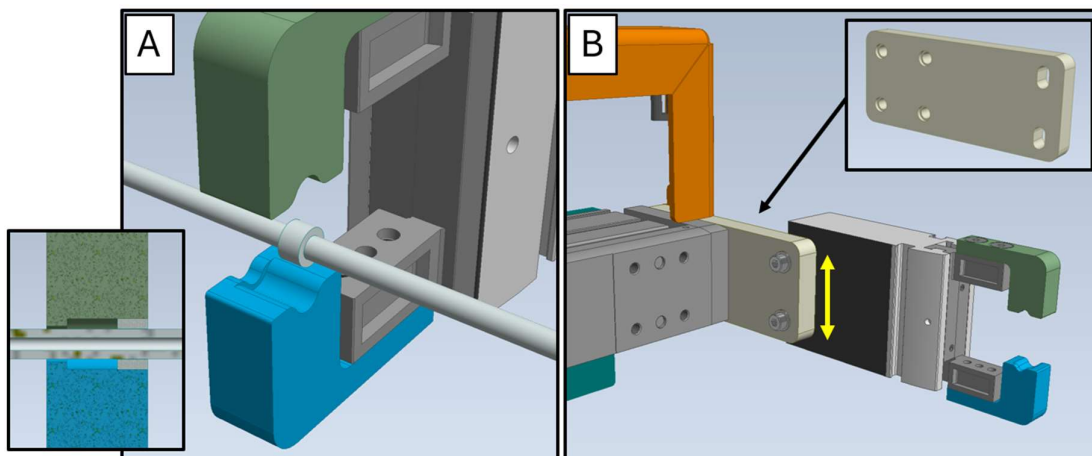


Joonis 4.13 Haaratsi käppade ristlõige stopperite positsioneerimisel

Järgmiseks toimub voolikule liimi doseerimine. Lõpuks haaratakse stopperid välispinna pealt kinni ja liigutatakse voolikul paikneva liimi peale, ehk oma lõplikule positsioonile (joonis 4.13, B).

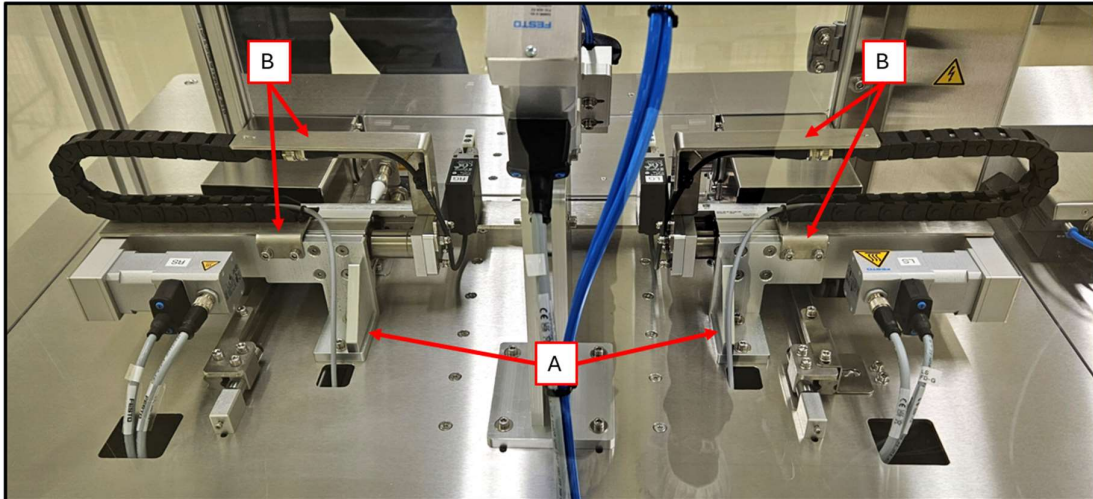
4.5.2 Haaratsite disain ja positsioneerimine

Stopperite positsioneerimise teostamiseks oli vaja projekteerida käpad, mille üks serv on kitsam ja haarab vooliku lähedalt, jättes vooliku pöörlemiseks ruumi. Käppade teine serv haarab stopperi pealt, seda kergelt, kuid mitte liiga tugevalt pigistades (joonis 4.14, A). Paralleelhaaratsid on lineaarajamite külge kinnitatud alumiiniumist freesitud plaadi abil. Haaratsite kinnitamiseks on projekteeritud vertikaalsed piklikud kinnitusavad, mis võimaldavad haaratsite kõrguse seadistamist (joonis 4.14, B). Festo ajamite avad on süvistega, et avade joondamiseks saaks kasutada tsentreerimishülse. Seetõttu on haaratsi käpad ja kinnitusplaadi kõik avad valmistatud samasuguste süvistega. See lihtsustab haaratsite täpset joondamist silikoonvoolikuga.



Joonis 4.14 Haaratsi käpad ja haaratsi kinnitus

Lineaarajamid, mis paralleelhaaratseid liigutavad, on laua pinnast tugijala abil üles tõstetud, et haaratsid oleksid vooliku koostuga samal kõrgusel (joonis 4.15, A). Ajamite alt peavad läbi mahtuma sahtli külge kinnitatud siinid. Lauaplaadi all keskel on liimi puhastus moodul. Seetõttu ei saanud paralleelhaaratsite kaableid otse laua alla juhtida. Tugijala ja lineaarajami otsa külge projekteeriti terasest lehtmetailid, mille külge kinnitub kaablikett paralleelhaaratsite kaabli juhtimiseks (joonis 4.15, B).

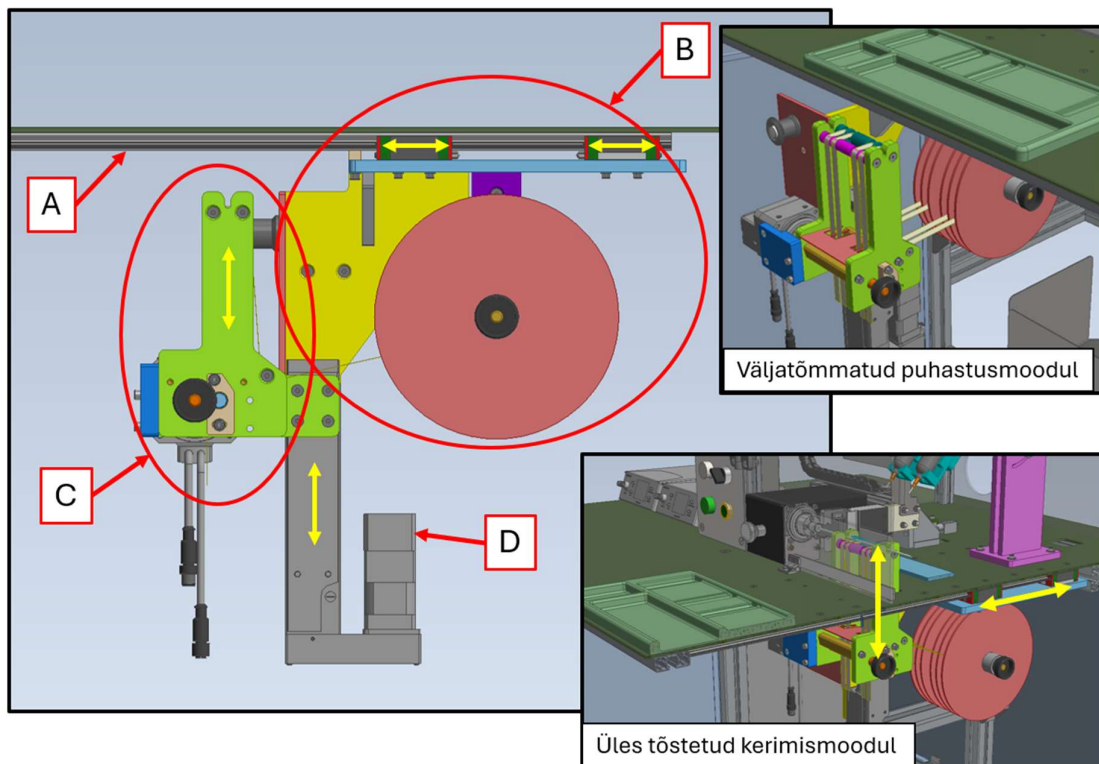


Joonis 4.15 Paralleelhaaratsi kaabli laua alla juhtimine

4.6 Liimi puhastus

Liimi puhastamiseks kasutatakse 10 mm laiusi mikrofiiberlinte. Neid saab tellida rullidena. Tellitud 50 ja 100 meetrise lindiga rullide läbimõõt jäi vahemikku 100 kuni 200 mm. Läbimõõt sõltub lindi pikkusest, lindi materjali paksusest, südamikus paikneva rulli läbimõõdust ja sellest kui tihedalt lint on rullile keritud. Puhastusrullid on paigutatud laua alla.

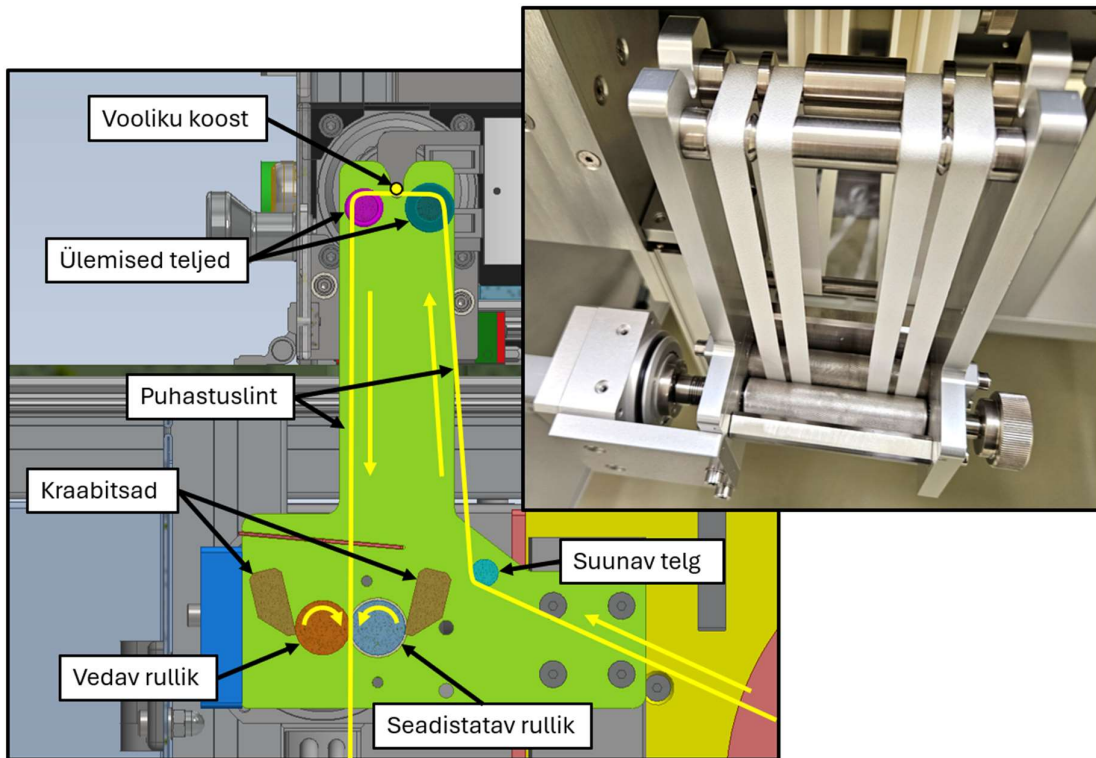
Peale stopperite positsioneerimist peab liimi puhastama mõlema stopperi mõlemalt küljelt, nagu on näidatud joonisel 3.5. Liimipuhastusmoodul on jagatud kaheks alammoduliks, milleks on kelgu moodul ja kerimismoodul. Kogu puhastusmoodul on lineaarsiinidel, mis on kinnitatud lauaplaadi alumisele küljele (joonis 4.16, A). Kelgu mooduli liigutamiseks kasutatakse samu Hiwin lineaarsiine ja kelke, mida kasutati sahtli projekteerimisel [10]. Siinide külge on kinnitatud kelgumoodul, mille abil on kogu puhastusmoodul töölaua alumisest uksest välja tõmmatav (joonis 4.16, B). Puhastusmooduli välja tõmbamine annab parema ligipääsu puhastusmooduli hooldamiseks ja puhastuslintide vahetamiseks. Lisaks puhastuslindi rullidele on kelgu külge kinnitatud kerimismoodul. See tõstetakse puhastamise ajaks läbi lauaplaadis paikneva ava vooliku koostu juurde (joonis 4.16, C). Kerimismoodul ja puhastuskelk on ühendatud vertikaalses asendis paikneva lineaarajamiga (joonis 4.16, D).



Joonis 4.16 Liimipuhastusmooduli osad

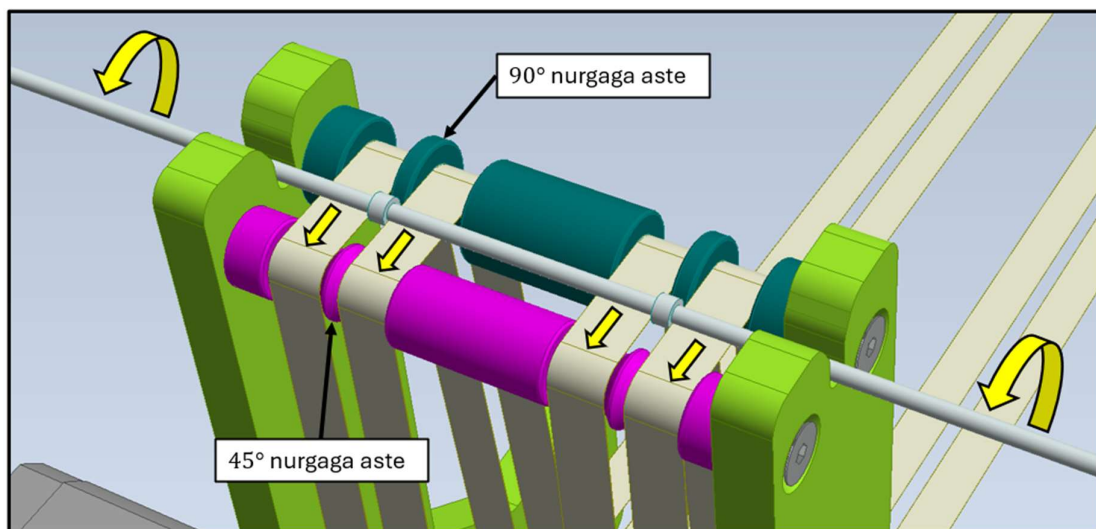
4.6.1 Kerimismooduli disain

Puhastuslindi vooliku vastu juhtimiseks on projekteeritud kerimismoodul, mis koosneb kahe alumiiniumplaadi vahele paigutatud telgede ja rullikute süsteemist (vt. joonis 4.17). Rullilt tulev lint juhitakse suunava telje alt läbi ja üle ülemiste telgede peale, mis asuvad kerimismooduli ülemises otsas. Kui moodul on üles tõstetud, puutub üle telgede veetav lint kokku vooliku koostuga. Vastassuunalise liikumise tõttu tekitatud hõõrdumise abil pühitakse voolikult üleliigne liim. Kerimismooduli alumises osas on kaks rihveldatud rullikut, mis linte edasi veavad. Teljed fikseerivad küljeplaatide omavahelise kauguse. Rihveldatud rullikutest on üks vedav rullik. See on ühendatud pöördamisega. Teine rullik on reguleeritav ja selle abil saab muuta rullikute kaugust üksteisest, et seadistada piisav hõõrdumine lintide edasi tõmbamiseks. Lindi vahele kerimise vältimiseks on rullikutele lisatud kraabitsad.



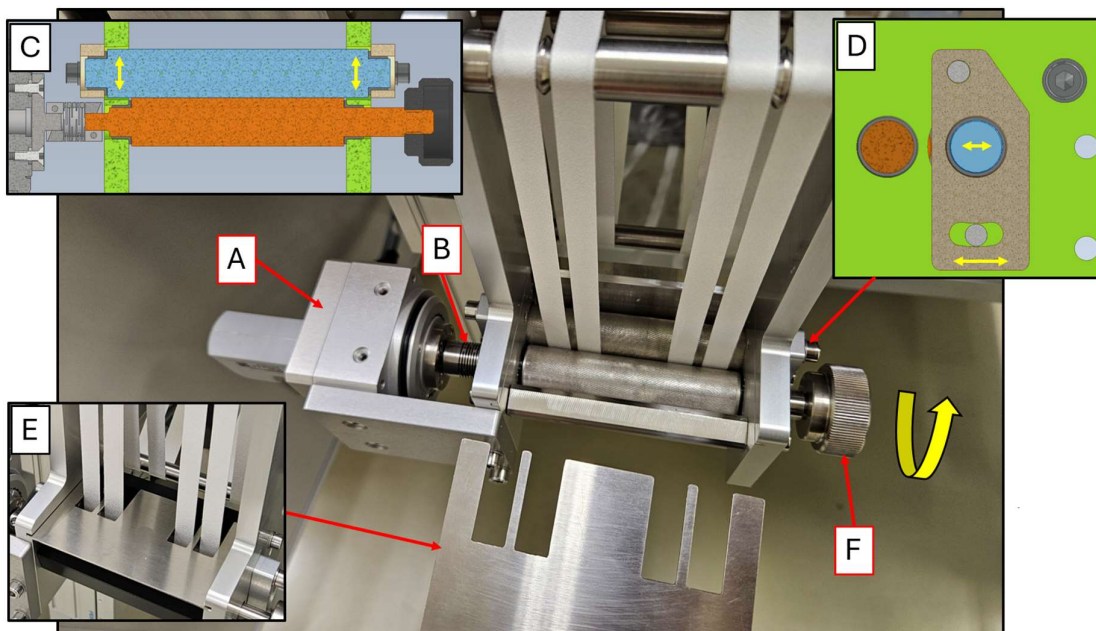
Joonis 4.17 Telgede ja rullikute süsteem

Puhastuslintide suunamiseks on ülemised teljed astmelised. Tagumine telg on sügavamate astmetega ja lintide vaheline aste on 90 kraadise nurgaga. Esimene telg on madalamate astmetega ja linte eraldav aste on 45 kraadise nurga all. Peale liimiga kokkupuutumist võib osa liimist kanduda esimesele teljele ja seetõttu peab telg olema lihtsasti puhastatav (joonis 4.18).



Joonis 4.18 Astmelise teljed

Puhastuslinte veab väljavalitud pöördajam (joonis 4.19, A). Rullikutel kasutati DIN 82-RGV 0.8 rihveldust. See tekitab vajaliku hõõrdumise lintide edasi tõmbamiseks. Samas jäi rullikute pind piisavalt sile, et vältida lindi takerdumist kraabitsa ja rulliku vahele. Ajam on siduriga ühendatud vedava rulliku külge (joonis 4.19, B). Rullikute otsad toetuvad liugelaagritele. Vedava rulliku otsad on fikseeritud asendis, aga veetava rulliku otsad on kinnitatud reguleeritavate klotside külge, mille abil on võimalik muuta selle kaugust vedavast rullikust (joonis 4.19, C, D). Seadistamise käigus leiti rullikute optimaalne vahekaugus, mille puhul on lintide edasiliikumine tagatud, aga hõõrdetakistus ei kasva liiga suureks. Eelnevalt kirjeldatud lahendust eelistati vedruga pingutatud rullikutele, sest fikseeritud vahekauguse puhul on ka kraabitsa serva ja rullikute vaheline kaugus konstantne.



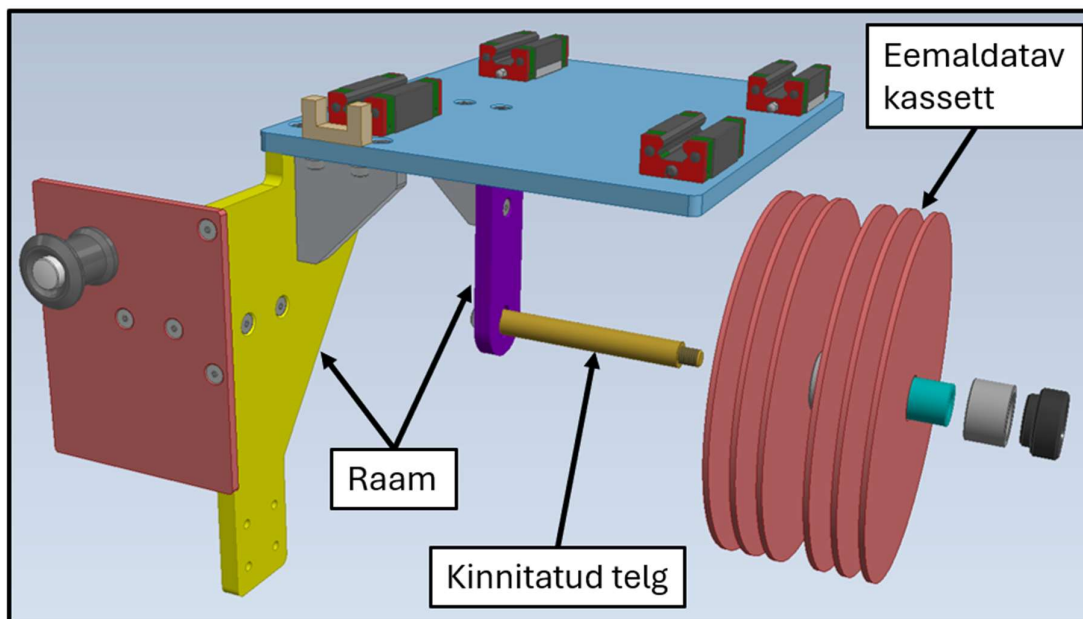
Joonis 4.19 Puhastuslintide tõmbamine

Rullikute vahekauguse seadistamisel arvestatakse, et kõik puhastuslindid on ühekordselt. Seda seetõttu, et lintide risti jooksmisel tekib liigne takistus. Selle vältimiseks projekteeriti kerimismooduli küljeplaatidesse sooned, kuhu asetatakse linte eraldav plaatdetail, mis takistab lintide risti jooksmist (joonis 4.19, E).

Lintide vahetamisel tuleb lint ajada läbi kerimismooduli nagu on näidatud joonisel 4.17. Vana lindi eemaldamiseks ja uue lindi rihveldatud rullikute vahel läbi ajamiseks on vedava rulliku otsas DIN 6303 tüüp A rihvelmutter (joonis 4.19, F). Mutri välisläbimõõt on 36 mm. See tekitab piisava jõuõla lindi käsitsi edasi kerimiseks. Keerme suuna tõttu pingutub mutter lindi edasi keeramisel.

4.6.2 Kelgumooduli disain

Kelgumoodul koosneb siinide külge kinnitatud raamist ja eemaldatavast kassetist. Eemaldatava kasseti abil lihtsustatakse mikrofiiber lindirullide vahetamist tööpingis (joonis 4.20). Raami külge on kinnitatud ka lineaarajam, mis tõstab kerimismooduli vooliku puhastamiseks üles. Et tagada kerimismooduli täpne positioneerimine, peab raam olema piisavalt jäik. Lineaarajamit kandva alumiiniumplaadi jäikuse suurendamiseks kasutati tugevdusribisid.



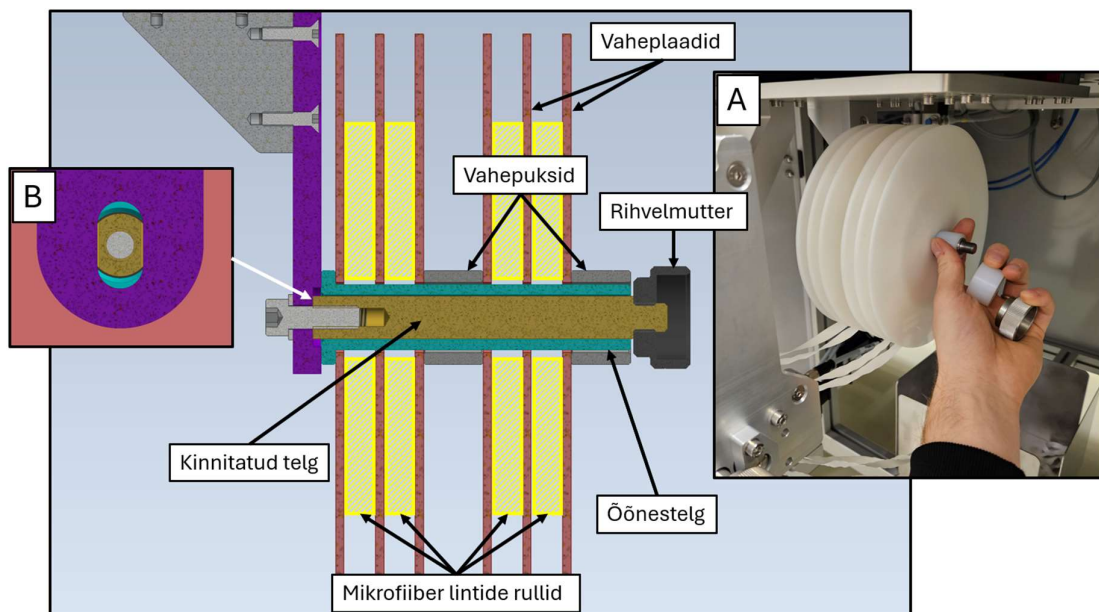
Joonis 4.20 Kelgumoodul

Projekti algusfaasis telliti erinevatelt tootjatelt mikrofiiberlintide näidiseid (joonis 4.21). Näidised olid erineva pikkuse ja erineva tekstuuriga. Lindid on keritud plastikust rõnga peale ja erinevate tootjate tooted on erineva tihedusega keritud. Seetõttu oli näiteks ühe tootja 50 m pikkuse lindiga rull sama diameetriga, mis teise tootja 100 m pikkuse lindiga rull. Arvestades võimalikke erinevusi tootevalikus, projekteeriti lintide kasseti vaheplaadid piisavalt suure läbimõõduga, et kassetti mahuksid vähemasti 100 m pikkused lindirullid erinevatelt tootjatelt. Mõnede tootjate puhul sobiksid kassetti ka pikema lindiga rullid.



Joonis 4.21 Mikrofiiberlintide näidised

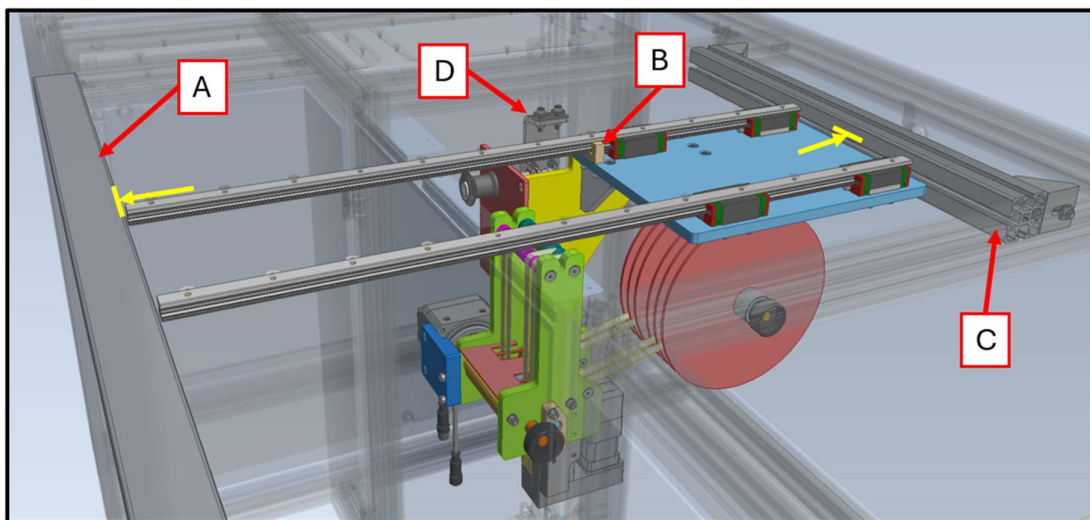
Raami külge on kinnitatud terasest telg (joonis 4.20 ja 4.22). Telje peal on eemaldatav õõnestelg, mis on koos ülejäänud kasseti detailidega valmistatud POM-ist. Eemaldatava õõnestelje peale laotakse vaheldumisi vaheplaadid ja lindirullid. Kummaski servas on kaks lindirulli ja kolm vaheplaati. Nende vahel on vahepuks. Õõnestelje lõpus on aste, mis ei lase vaheplaate teljelt maha libiseda kui kassett tööpingist välja võtta. Rihvelmutri ning esimese vahepuksi eemaldamisel saab haarata õõnestelje otsast ja tõmmata välja kogu kassett (joonis 4.22, A). Kasseti saab laua peal õõnestelje otsale toetades lahti võtta ja uute lindirullidega uuesti komplekteerida.



Joonis 4.22 Kassetti disain

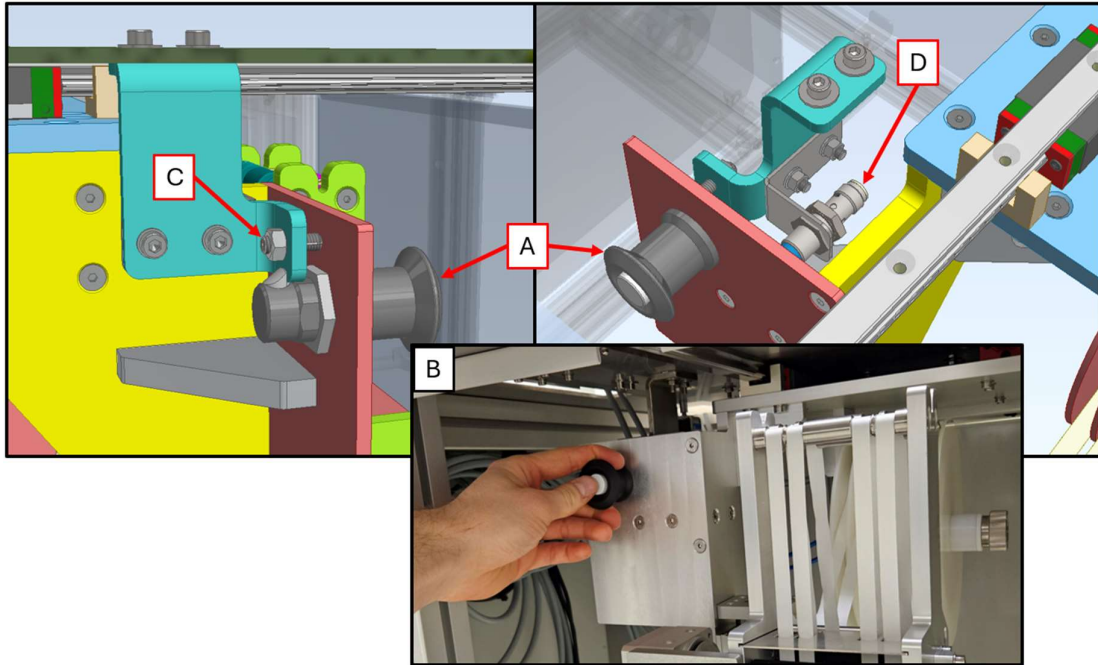
Rihvelmutrit keeratakse mõlemas suunas. Kinnitatud telje ots on tehtud lapikuks ja alumiiniumplaadi sisse on freesitud piklik süvis, et takistada telje pöörlemist rihvelmutri kinni ja lahti keeramisel (joonis 4.22, B).

Kelgumooduli liikumisulatuse piiramiseks on kasutatud MiniTec raami profiile. Kelgu väljatõmbamisel peatab kelgu liikumise laua esiserva all paiknev profiil (joonis 4.23, A). Kelgu külge on projekteeritud alumiiniumist stopper, mis fikseerib väljatõmmatud kelgu kaugeima asendi (joonis 4.23, B). Kelgumooduli kodupositsiooni peab saama seadistada, sest sellest sõltub kerimismooduli asend vooliku koostu suhtes. Lõpuasendi muutmiseks on kelgu taga MiniTec profiil, mis on otsetest nurgikutega kinnitatud teiste profiilide vahele (joonis 4.23, C). Seadistamiseks tuleb nurgikute poldid lõdvendada ja profiil liigutada soovitud asendisse. Kelgu kodupositsiooni fikseerimiseks ja kodupositsioonis viibimise kontrollimiseks on lauaplaadi alumisele kinnitatud roostevabast terasest painutatud klamber (joonis 4.23, D).



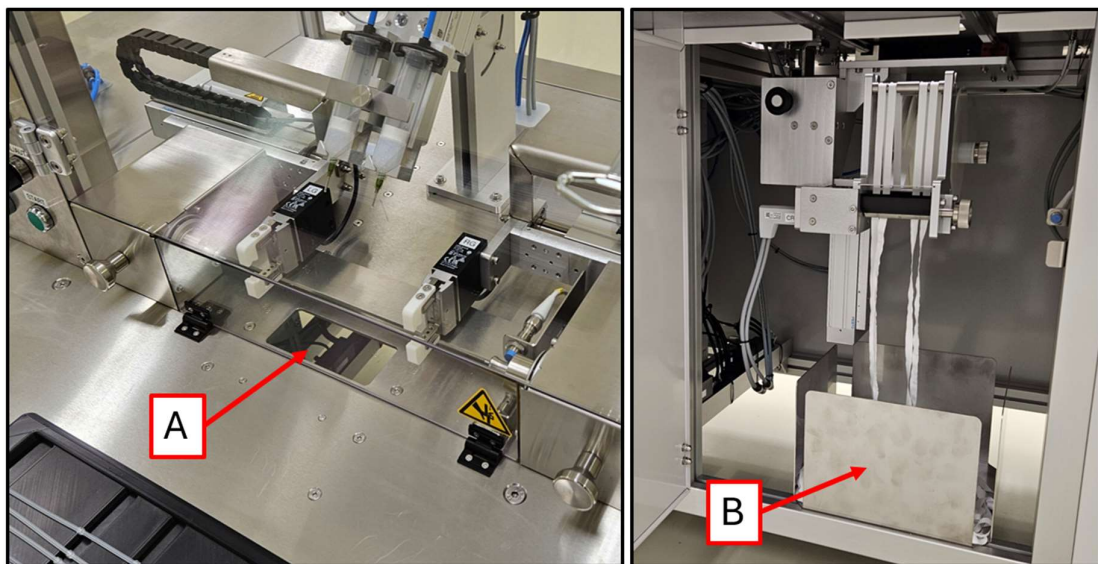
Joonis 4.23 Kelgumooduli lõpupositsioonid

Klambri positsiooni seadistamiseks on klambri kinnituspoltidele töölaua sisse tehtud piklik ava. Kelgu kodupositsiooni fikseerimiseks on kasutatud Eles+Ganteri vedrukeelega lukku GN 315-A1 [13] (joonis 4.24, A). Kelgu lõppu lükkamisel lukustub kelk automaatselt. Kelgu välja tõmbamiseks tuleb vajutada luku peal olevat nuppu, mis vabastab klambri serva tagant luku keele (joonis 4.24, B). Luku lõtku seadistamiseks ja kelgu sulgemise pehendamiseks on lisatud klambri väike vedrukolb [14] (joonis 4.24, C). Lõpuasendi seadistamisel peab kõigepealt klambri abil seadistama sobiva kauguse ja seejärel nihutama lukustatud kelgu tagakülje vastu profiili C, joonisel 4.23. Profiil aitab vastu võtta suuremat koormust kui hoolduse käigus peaks kelgumoodul kinni lükatama suurema hooga.



Joonis 4.24 Kelgumooduli kodupositsiooni seadistamine

Kerimismooduli üles liigutamiseks peab puhastusmoodul olema kodupositsioonis, sest kerimismoodul tõuseb üles läbi lauaplaadis paikneva ava (joonis 4.25, A). Muus asendis toimub kokkupõrge lauaplaadiga. Et vältida kahju tekitamist tööpingile ja tagada puhastamisel täpne positioneerimine, kasutatakse puhastusmooduli kodupositsiooni kontrolliks induktiivandurit [12] (joonis 4.24, D).



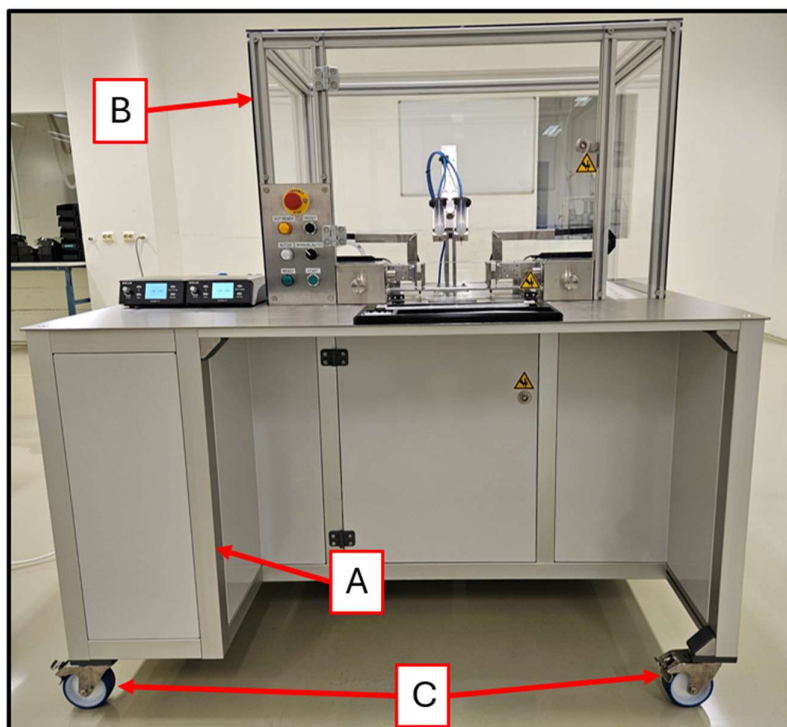
Joonis 4.25 Puhastusmooduli ava lauaplaadis

Liimiste puhastuslintide kogumiseks on alumise raami külge kinnitatud lehtmetailist painutatud prügikast. Puhasruumis kasutades peab joonisel 4.25, vaade B, nähtavas prügikastis olema kilekott, et vältida mustuse sattumist pörandale. Prügikasti neljas vertikaalses servas on piisavalt suur vahe, et jätta ruumi puhastusvahendi ja lapiga puhastamiseks.

4.7 Tööpingi raam ja laud

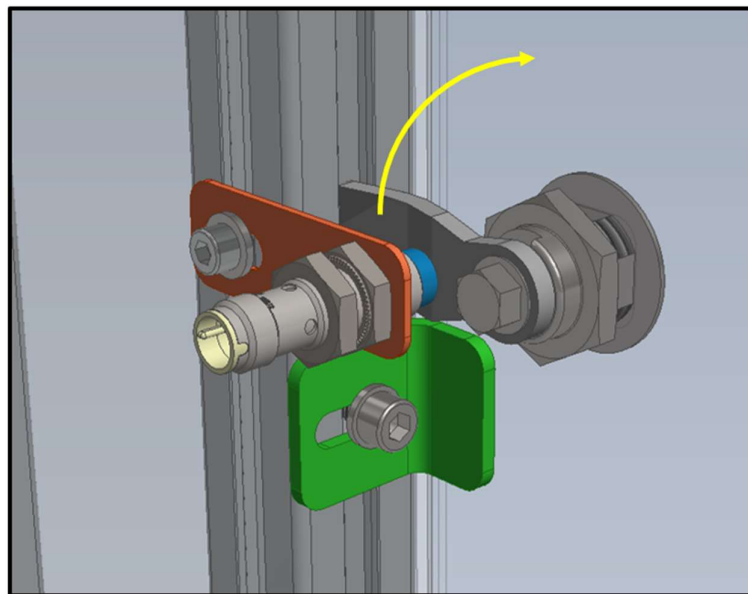
4.7.1 Raam ja kattepaneelid

Laua raam on valmistatud MiniTec alumiiniumprofiilidest. Alumine raam on valmistatud 45 x 45 profiilidest. Raami väliseintes kasutati G-seeria profiile, mille välised sooned on kinni kaetud (joonis 4.26, A). Puhasruumi seadmete projekteerimisel on oluline vähendada võimalikke mustuse kogumise kohti ja lihtsustada seadmete puhastamist desinfitseerimisvahendiga. G-seeria profiilide valikus on kõik võimalikud kombinatsioonid ühe kuni nelja kaetud küljega profiilidest. Tööpingi ülemine raam koosneb 30 x 30 profiilidest. See on avatud soontega, sest 5 mm paksused PC kattepaneelid katavad kogu ülemise raami (joonis 4.26, B). Ülemised paneelid on kinnitatud peitpea poltidega, säilitades võimalikult sileda pealispinna. Alumised paneelid on valmistatud värvitud DC01 lehtmetailist paksusega 1,2 mm.



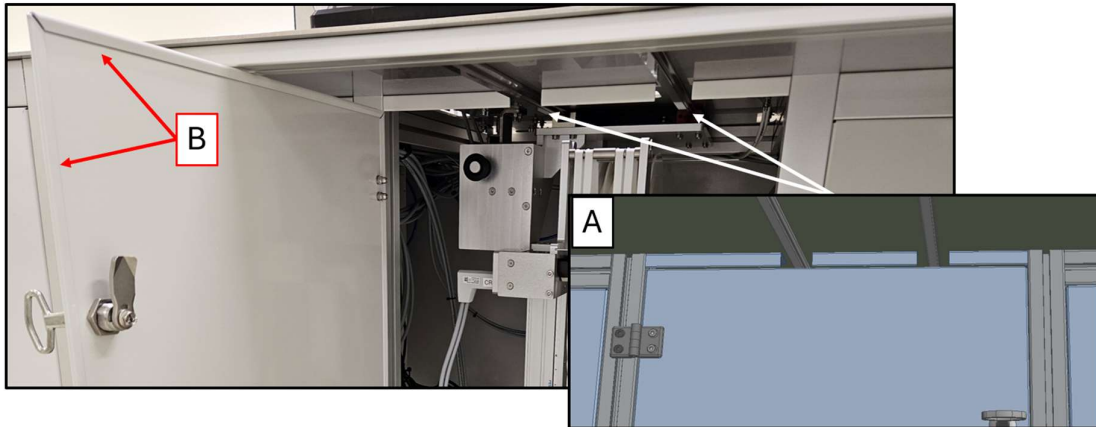
Joonis 4.26 Tööpingi raam ja kattepaneelid

Paneelide servad on tagasipainutatud ja kinnitatakse profiilide vahele seestpoolt, säilitades samuti võimalikult sileda välispinna. Alumise raami neljas nurgas on puhasruumi jaoks disainitud lukustatavad rattad [15] (joonis 4.26, C). Ohutuse tagamiseks on ülemine ja alumine uks lukustatavad roostevaba lukuga [16]. Lisaks kontrollib mõlema ukse kinniolekut sama induktiivandur, mida kasutati sahtlil ja puhastusmoodulil [12]. Mõlema ukse lukustamine on lahendatud samamoodi. Ust toetab kinnises asendis väike terasest klamber, mille kõrgust saab raami profiili soones muuta. Ukse sulgedes ja lukku keerates läheb luku keel profiili soonde. Profiili tagumise soone külge on klambriga kinnitatud induktiivandur, mille kaugust saab keermetatud korpuse ja kinnitusmutrite abil reguleerida. Induktiivandur on suunatud luku keelele kinnises asendis. See tähendab, et andur saab signaali alles ukse lukustamisel, mitte sulgemisel. (vt. joonis 4.27)



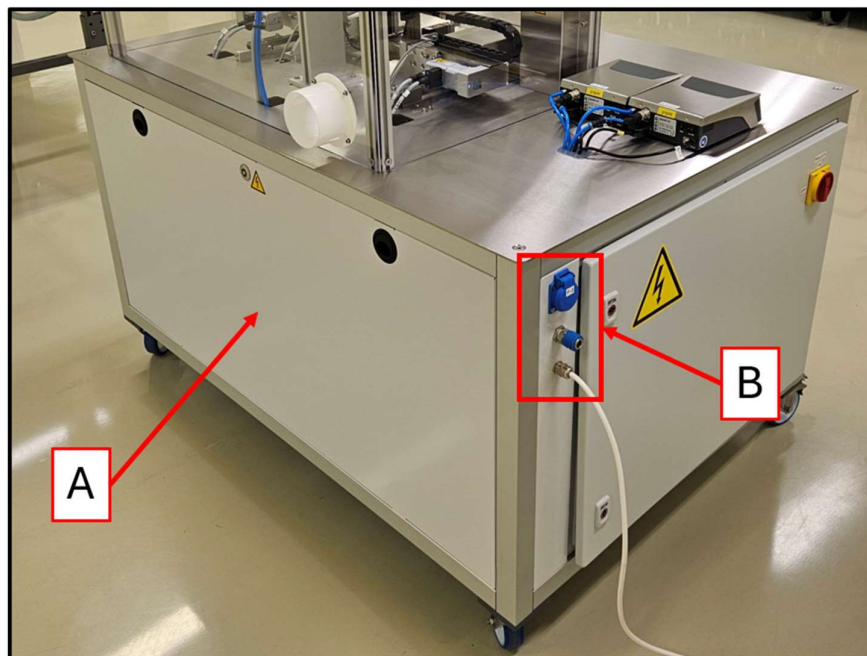
Joonis 4.27 Ukse lukk ja andur

Puhastusmooduli lineaarsiinide tõttu on alumine uks laua plaadist natuke eemal. Seetõttu jääb siinide vahele kitsas pilu. Pilu on piisavalt lai, et sealt mahuvad sõrmed läbi. Ohutuse tagamiseks projekteeriti siinide vahele painutatud lehtmetailist kattend, mis vahe kinni katavad (joonis 4.28, A). Katete vahele on jäetud nii suur ava, et lineaarjuhikute kelgud sealt läbi mahuvad. Katete ja ukse välimised servad on tagasipainutatud, et lisada jäikust ja vältida teravate servade teket (joonis 4.28, B).



Joonis 4.28 Alumise ukse disain

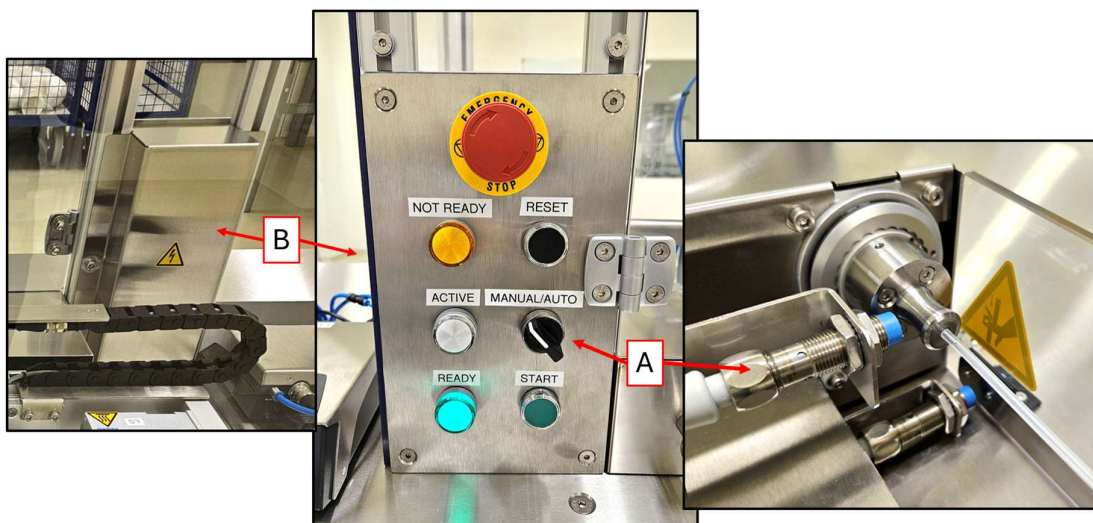
Selleks, et lihtsustada tööpingi koostamist, seadistamist ja võimalikke hooldustöid, on tööpingi alumise raami tagaküljel olev paneel eemaldatav (joonis 4.29, A). Paneeli eemaldamisel avaneb ligipääs lauaplaadi külge kinnitatud kinnitusvahenditele ja laua alla paigutatud kaabeldusele. Tööpingi vasakul küljel on elektrikilp ja elektrikilbi kõrval on sisendite-väljundite paneel (joonis 4.29, B).



Joonis 4.29 Tagapaneel ja sisendite- väljundite paneel

Paneeli ülemises servas on CEE 7/3-tüüpi elektripistik, juhaks kui tööpingi laual peaks olema vaja kasutada mõnda elektrit vajavat tööriista või valgustust. Pistiku all on emane suruõhu pistik ja selle all on elektrikaabli läbiviik, millest ulatub välja 2 m elektrijuhet tööstusliku ühefaasilise 2P+E-tüüpi pistikuga.

Ülemise raami esimese seina vasakul servas on kontrollpaneel (joonis 4.30). Paneelil on olulised indikaatortuled tööpingi staatus jälgimiseks ja nupud tööpingi kontrollimiseks. Paneeli ülemises osas on hädastopp nupp. Hädastopi aktiveerimisel ühendatakse ajamite toide lahti. Indikaatortuled näitavad millal tsükkel on aktiivne, millal tsükkel on lõppenud ja sahtli võib avada ning tärkeid, mille puhul tavapärase töö on peatatud. *Reset* nupp teeb ajamite algpositsioneerimise ja viib programmi tagasi algusesse. *Start* nupp alustab uut tsükli. *Manual/Auto* lülitist saab kontrollida, kas tsükli käivitamiseks on vaja vajutada *Start* nuppu, või alustab tööpink uut tsükli kohe kui operaator sahtli sulgeb ja andurist vooliku koostu hoidev puks tuvastatakse (joonis 4.30, A).

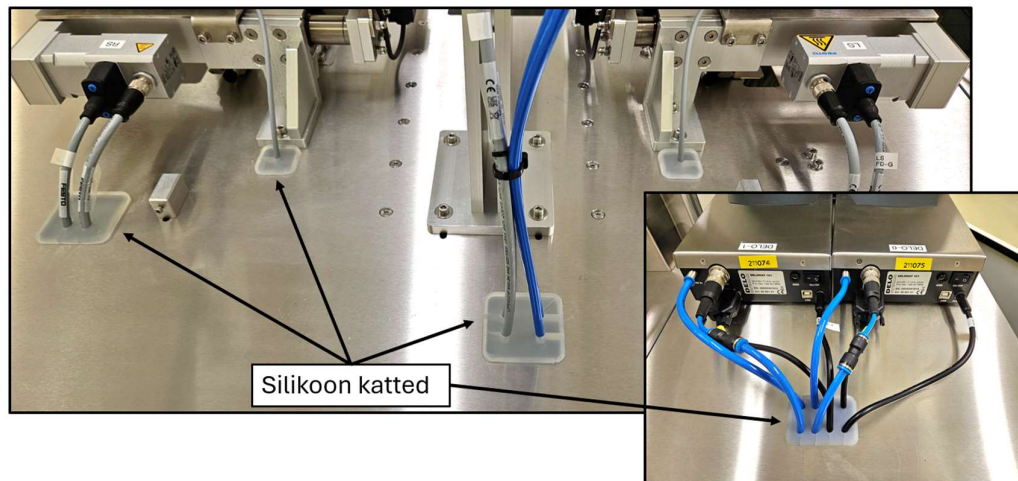


Joonis 4.30 Kontrollpaneel

Kontrollpaneeli tagumisel küljel on nuppude ja tulede juhtmete ühendused, mis laua sees oleva ava kaudu laua alla viiakse. Juhtmeid katab roostevabast teraslehest painutatud kate (joonis 4.30, B).

4.7.2 Lauaplaat ja eelkoostamise kandik

Tööpingi lauaplaat on kõikide koostude positsioneerimisel siduvaks detailiks. Plaat on terasest EN 1.4301. Plaadi paksuse valikul lähtuti sellest, et laua all paiknevad lineaarsiinid oleks võimalik plaadi külge kinnitada peitepeaga kruvidega. Kliendiga kooskõlastati, et töölaua esisele võivad jääda kruvi pead, kui need on lauaga samas tasapinnas. Lauaplaadi sees on lisaks kinnitusvahendite avadele ka avad kaablite ja pneumovoolikute laua alla viimiseks. Suuremate avade katmiseks on silikoonvaluga valmistatud silikoonkatted (joonis 4.31).



Joonis 4.31 Silikoonkatted

Töölaua esimeses servas, operaatori ees paikneb eelkoostamisrakis. Rakis jaguneb kolmeks seksiooniks, milleks on voolikute kauss, stopperite kauss ja koostamisalus (joonis 4.32). Koostamise lihtsustamiseks on koostu mõlemasse otsa tehtud süvendus vooliku kinnituspükside paigutamiseks. Need paikevad teineteisest sellisel kaugusel, et vooliku koost mahub nende vahele. Stopperite alla on tehtud ka süvendused, mis võimaldavad tööpingist valmis koostu väljavõtmisel selle ajutiselt tagasi kandikule asetada ilma, et värskelt liimitud stopperid kandiku vastu puutuksid.



Joonis 4.32 Eelkoostamisrakis

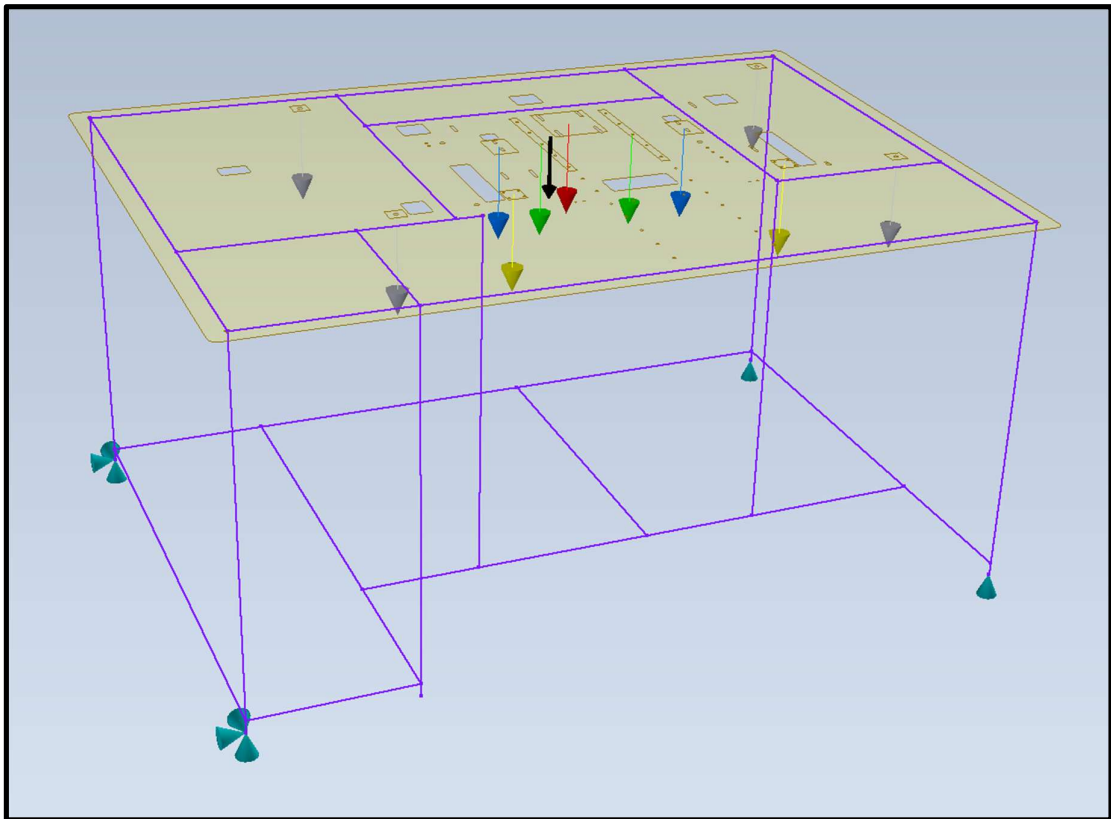
Kandiku valmistamisel on arvestatud, et see peab olema kergesti puhastatav. Kandik on freesitud POM-ist ja kõik siseraadiused, mis oli võimalik, tehti vähemasti 3 mm, et tagada võimalikult hea ligipääs puhastamisel.

4.8 Tugevusarvutused

Enamus projekteeritud detaile on suure tugevusvaruga. Ajamite positsioneerimiseks on täpsete liikumiste saavutamisel lisaks tugevusele oluline ka piisava jäikuse saavutamine. Läbipainde kontrollimiseks tehti kaks lõplike elementide meetodil (LEM) põhinevat tugevussimulatsiooni. Simulatsioonid tehti lauaplaadist ja seda kandvast raamist ning puhastuskelgu raami alumisest otsast, kuhu on kinnitatud lineaarajam.

4.8.1 Lauaplaadi ja raami tugevussimulatsioon

Lauaplaadi LEM tugevussimulatsiooniks kasutati *Autodesk Inventor Nastran* keskkonda. MiniTec profiilide geomeetria on keeruline ja seetõttu ei ole 3D elementide kasutamine mõistlik. See põhjustaks probleem elementide võrgu genereerimisel ja simulatsiooni arvutuste maht oleks väga suur. Seetõttu on lauaplaadi ja raami tugevussimulatsioonis kasutatud 1D ja 2D elemente. 4 mm paksune lauaplaat on mudeldatud 2D elemendina. Plaadi materjal on teras EN 1.4301. Plaadile on tekitatud eraldi pinnad, et lisada kõik suuremad koormused, mis plaadile mõjuvad. Koormused tulevad komponentide massist, millele mõjub raskuskiirendus. Koormuste paigutus on näha joonisel 4.33.



Joonis 4.33 Laua raami ülemine serv

Erinevad koormused on tähistatud erinevat värvi nooltega. Mitmest kohast toetatud komponentide massi tekitatud koormus on jagatud võrdselt mitme pinna vahel. Sellised komponendid on ülemine raam, mis toetub neljale nurgale, puhastusmoodul, mis on kinnitatud kahe linearsiini külge lauaplaadi alumisel küljel ja sahtel, mis toetub kummaski servas lineaarjuhiku kelgule. Ühest kohast toetatud komponendid avaldavad kõik koormust eraldi pinnale. Nendeks komponentideks on liimimismoodul ja mõlemad haaratsite koostud. Lisaks on LEM mudelile lisatud gravitatsioonikiirendusest tulenev koormus, mis mõjub raamile ja lauaplaadile. Komponentide massist põhjustatud koormused ja neile vastavad noolte värvid on välja toodud tabelis 4.2.

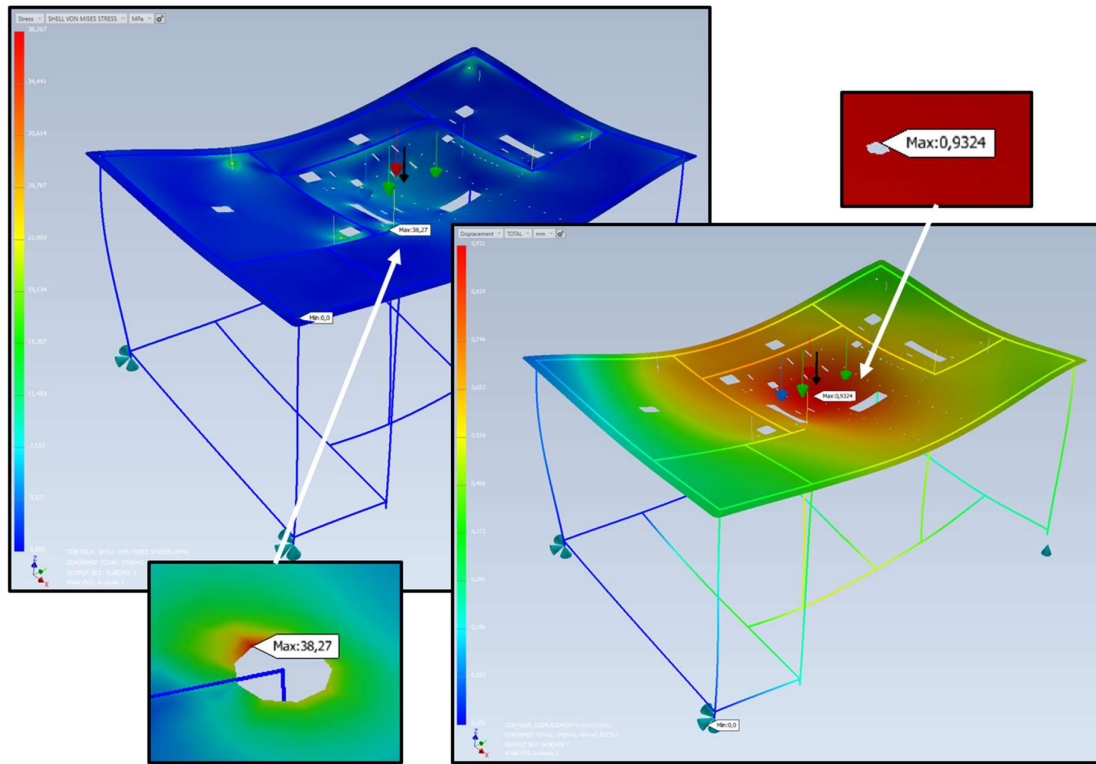
Tabel 4.2 Lauale mõjuvad koormused

Komponent	Noolte värvus	Koormus (N)
Ülemine raam	Hall	211 kokku
Puhastusmoodul	Roheline	98 kokku
Sahtel	Kollane	54 kokku
Liimimismoodul	Punane	5
Vasak haarats	Sinine (vasak)	49
Parem haarats	Sinine (parem)	49
Gravitatsioon	Must	(gravitatsioonikiirendus)

Laua raam koosneb MiniTec profiilidest, mis on valmistatud alumiiniumist EN AW-6030. Raami mudeldamiseks on kasutatud 1D elemente. MiniTec profiilid olid Inventori andmebaasi talaelementidena sisestatud ning *Nastrani* moodul kasutas talade ristlõike tekitamiseks automaatselt projekteerimisel kasutatud profiilide ristlõiget. Raami kinnitamiseks on tehtud mõned lihtsustused. Vasaku esimese ja tagumise jala taldade translatoorne liikumine piiratud ja pöörlemised jäetud vabaks. Paremale jäävate jalgade taldadel on piiratud ainult vertikaalne translatoorne liikumine. Raami alumistes nurkades on rattad ja seatud piirangud jätavad võimaluse raami jalgadel kohalt liikuda, samal ajal takistades laua kohapeal pöörlema hakkamist.

Kasutades 1D ja 2D elemente on LEM mudelis kasutatavate elementide arv väiksem. Seetõttu on lauaplaadi elementide küljepikkuseks ja raami elementide pikkuseks valitud 5 mm. Inventor Nastran keskkond ei võimalda 1D ja 2D elementide kinnitamisel 1D elementide külgedele lisada *separation* tüüpi kontakti, sellepärast on raami ülemine pind kinnitatud lauaplaadi külge. See ei muuda tulemust märkimisväärselt, sest lauaplaat on kinnitatud raami külge neljast nurgast ja kahest punktist plaadi keskmises osas ning

plaat on koormusega surutud vastu raami. Simulatsioonis kasutatud materjalide omadused on võetud MatWeb.com andmebaasist [17].



Joonis 4.34 Lauaplaadi LEM simulatsioon

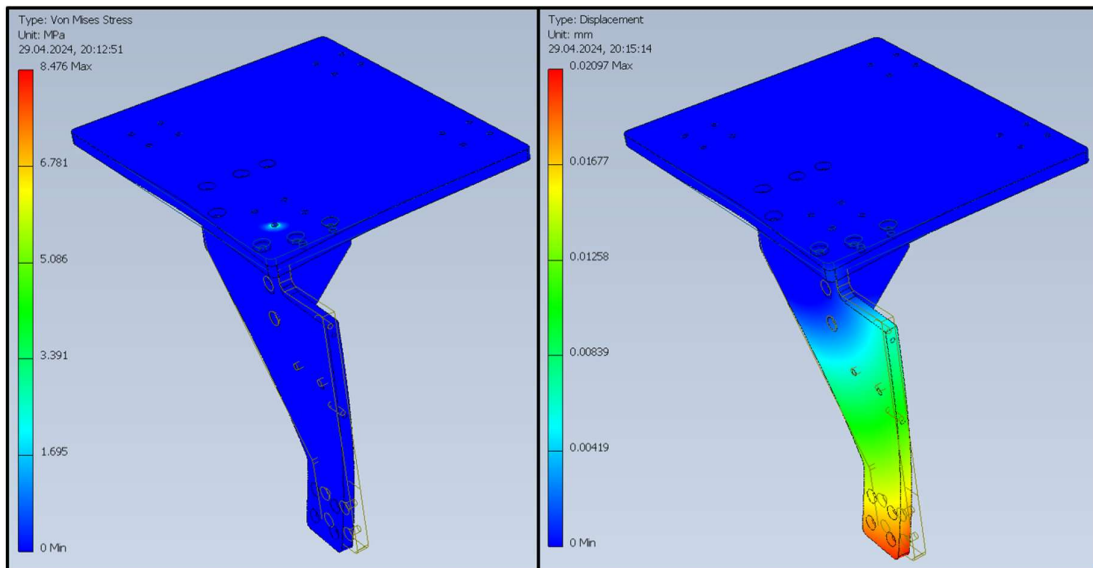
Jooniselt 4.34 on näha, et suurim ekvivalentpinge on 38 MPa, mis paikneb poldi ava servas. See on pingekontsentratsiooni koht ja ainuke nii kõrge pinge. Ülejäänud avade servas jäävad suurimad pinged alla 20 MPa. Laua raami pinged on ühtlaselt väga madalad kogu raami ulatuses. Suurim läbipaine asub laua keskel ja jääb alla 1 mm. Tugevussimulatsioonist võib järeldada, et lauaplaadi jäikus on piisav ja talle rakendatud koormus ei deformeeri plaadi pinda olulisel määral.

4.8.2 Puhastusmoduli raami tugevussimulatsioon

Puhastusmoduli raami tugevussimulatsiooniks kasutati *Autodesk Inventor Stress Analysis* keskkonda. LEM simulatsiooni tegemiseks on raami lihtsustatud ja jäetud ainult ülemine plaat, ajami külge kinnitav plaat ja tugevdusribi. Välja jäeti ka kinnitusvahendeid. Kinnitusvahendid on pingutatud piisava tugevusega, et kokkupuutuvad pinnad töötavad hõõrdele. Kontakti tüübiks valiti *bonded*. Raami ülemine plaat on kinnitatud nelja lineaarsiini kelgu külge. LEM mudelis tehti plaadi alumisele küljele kinnitusavade ümber seibi toetuspinna suurused pinnad.

Kinnitusplaatidele kõige lähemal olevatelt pindadelt võeti kõik vabadusastmed ja eemal olevad pinnad kinnitati hõõrdevaba tasapinnalise kinnitusega *frictionless*. Koost on suhteliselt väike ja mudelis kasutati igal pool sellise tihedusega võrku, et materjali paksuse sihis jäi vähemasti neli elementi.

Koormuseks on kasutatud peatükis 4.2.3 arvatatud liimipuhastusmooduli lineaarajamile mõjuvat jõudu $F_{puhastus}$, millele on lisatud ajami massist tulenev jõud ja gravitatsioon. Raam on valmistatud alumiiniumist EN-AW-6082. Materjali omadused on võetud emetal.eu lehelt [18].



Joonis 4.35 Puhastusmooduli raami LEM simulatsioon

Suurim ekvivalentpinge on umbes 8 MPa ja raami ots nihkub oma positsioonilt alla 0,1 mm (joonis 4.35). See tähendab, et puhastuskelgu raami jäikus on piisav.

4.9 Tööpingi hooldus ja eluiga

4.9.1 Puhastuslindi vahetamise intervall

Tööpingis kasutatakse mikrofiiberlindi rulle pikkusega 100 m. Korraga kasutatakse 4 linti. Linti veab 20 mm läbimõduga rullik ja puhastustsükli jooksu teeb rullik ühe täispöörde. Ühe töötsükli jooksul kulub puhastuslinti:

$$l_{linti_tsükkel} = \pi \cdot d = 20\pi \approx 62,83 \text{ mm}$$

kus d – on rulliku läbimõõt

Tsükliite arv, mida ühe 100 meetrise lindiga saab teha on järelilikult:

$$n_{tsükliit_rull} = \frac{100}{62,83 \cdot 10^{-3}} \approx 1592$$

Viimase testitud programmiga saadi tsükli kestuseks 34 s. See tsükli kestus oli väiksem kui kliendi nõutud minimaalne tsükli aeg $t_{tsükkel}$. Arvestades, et operaator teeb tööpäeva jooksul koos pausidega vähemalt 7 tundi tööpingis tööd, teeb ta päeva jooksul tsükleid:

$$n_{tsükliit_päevas} = \frac{7 \cdot 60 \cdot 60}{34} \approx 741$$

Lindirullide vahetamise intervall päevades on:

$$n_{päeva_rull} = \frac{n_{tsükliit_rull}}{n_{tsükliit_päevas}} = \frac{1592}{741} \approx 2,1$$

Juhul kui ettevõtte kasutab tööpinki kahes vahetuses, tuleks puhastuslintide rulle vahetada igapäevaselt. Soovi korral on võimalik tellida ka pikemaid lindirulle. Kasseti on jäetud piisav varu, et mõnede tootjate 150 m lindirullid sinna mahuksid.

4.9.2 Ajamite eluiga

Lineaarajamite tehnilistes andmetes on välja toodud võrreldav kasutusiga (ingl. *reference service life*) 5000 km ja hoolduse infona on kirjas, et määre kestab terve lineaarsiini eluea [5]. Tööpingis kasutatakse lineaarajamit kolmes kohas. Haaratsid liiguvad ühe tsükli jooksul edasi-tagasi ja seetõttu liiguvad haaratseid liigutavad lineaarsiinid ühe tsükli jooksul kõige rohkem. Liigutuste ulatus ühe tsükli jooksul on umbes 200 mm. See tähendab, et lineaarajamiga saab valmistada selle eluea jooksul tooteid:

$$n_{toodete_arv} = \frac{5000 \cdot 10^3}{0,2} = 2,5 \cdot 10^7$$

Kui ettevõtte peaks tootma kahes vahetuses, siis arvestades, et aastas on umbes 260 tööpäeva, suudaks ettevõtte tooteid toota aastas:

$$n_{toodet_aastas} = 2 \cdot n_{tsükliit_päevas} \cdot 260 = 2 \cdot 741 \cdot 260 = 385400$$

Lineaarajami eluiga aastates oleks:

$$t_{lineaarajami_eluiga} = \frac{n_{toodete_arv}}{n_{toodet_aastas}} = \frac{2,5 \cdot 10^7}{385400} \approx 65$$

Seega peavad lineaarajamid kindlasti vastu terve tööpingi eluea. Lisaks võib arvesse võtta, et tööpingis mõjuvad kordades väiksemad koormused tehnilistes andmetes väljatoodud nominaalkoormustest ja ajamite töötingimused on ideaalilähedased, sest tööpink paikneb puhasruumis.

Pöördajamitel pole tehnilistes andmetes ajamite eluea kohta infot välja toodud [3] [8], aga ajamid töötavad väiksemal koormusel ja kiirusel kui nominaalselt ettenähtud.

Paralleelhaaratsite tehnilistes andmetes on välja toodud haaratsite juhikute määrimise intervall 2 miljonit tsükli [4]. Ühe tsükli jooksul teevad haaratsi 3 haaramist. Kui arvestada, et ettevõtte toodab kahes vahetuses, siis peaks paralleelhaaratsite juhukuid hooldama intervalliga $t_{haaratsi_hooldus}$ aastat.

$$t_{haaratsi_hoold} = \frac{2 \cdot 10^6}{3 \cdot n_{toodet_aastas}} = \frac{2 \cdot 10^6}{3 \cdot 385400} \approx 1,73$$

Järelikult on piisav, kui haaratsit hooldatakse iga $12 \cdot 1,73 \approx 20$ kuu tagant. Üldiselt võib arvutustest järeldada, et ajamite vastupidavus on piisav, et saavutada tööpingil kliendi soovitud eluiga t_{eluiga} . Täpsema hooldamise planeerimiseks peab lisainformatsiooni küsima Festo kasutajatoe käest.

5 TÖÖPINGI PROBLEEMSED KOHAD JA VÕIMALIKUD EDASIARENDUSED

Projekteeritud tööpink on kliendi tellimusel valmistatud tööpink konkreetse toote valmistamiseks. Lahenduse välja töötamisel ei leidunud sarnaseid tööpinke, mille eeskujul projekteerida. Selliselt projekteeritud seadmel on alati võimalusi parendusteks. Järgnevalt on käsitletud mõningaid tööpingi probleemseid kohti ja potentsiaalseid edasiarendusi.

5.1 Testimisel esinenud probleemid

5.1.1 Nõelte tippude positsioneerimine

Projekti algaasis arutati kliendiga kasutatava liimi doseerimisseadme potentsiaalseid probleemseid kohti. Kliendi soovil jätkati projekteerimist olemasolevate doseerimisseadmetega ja otsustati, et kui testimise käigus selgub, et probleeme ei õnnestu lahendada otsitakse võimalikke alternatiivseid liimimisseadmeid.

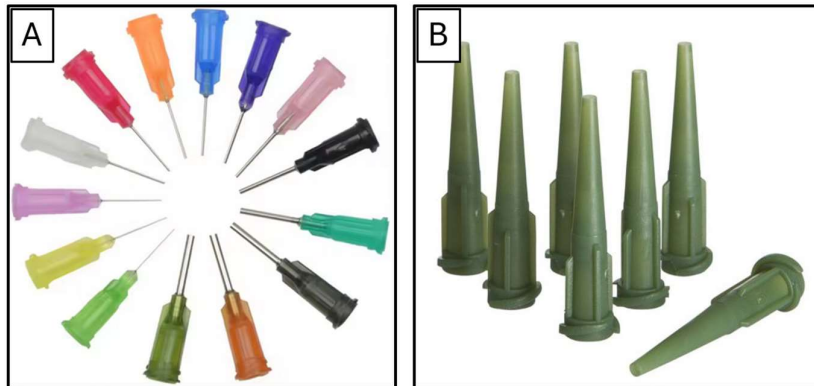
Esimeseks probleemseks kohaks oli süstla nõelte täpne positsioneerimine. Kui liim otsa saab, on süstlaid vaja vahetada. Kuigi süstalde korpused on samasugused ja süstlaid hoidev rakis võimaldab nende positsiooni seadistada, siis nõelte geomeetria erineb pisut. Nõelte pikkus oli iga kord sama, aga nõelte otsa positsioon süstla pikitelje suhtes muutus (joonis 5.1). Sellest tulenevalt tuli testides rakist iga kord ümber seadistada kui süstalt või ainult otsikuid vahetati.



Joonis 5.1 Nõelte tippude muutuv positsioon

Süstlad on standardse otsikuga ja tekkinud probleemi lahendamiseks otsustati katsetada erineva läbimõõduga ja erinevat tüüpi nõelu. Probleemsete nõelte konstruktsioonist oli näha, et need on valmistatud kahest komponendist. Plastikust kinnitusots, mis on standardse keermega ja nõela ots, milleks on peenike metalltoru (joonis 5.2, A). Kahe komponendi koostamisel ei jää detailide teljed täpselt joondatuks. Alternatiivse nõelte otsimisel leiti, et toodetakse ka üleni plastikust survevalatud nõelu

(joonis 5.2, B). Nende geomeetria ühtlasem, sest need on valmistatud ühes tükis ja ühe protsessi käigus.



Joonis 5.2 Erinevat tüüpi nõelad

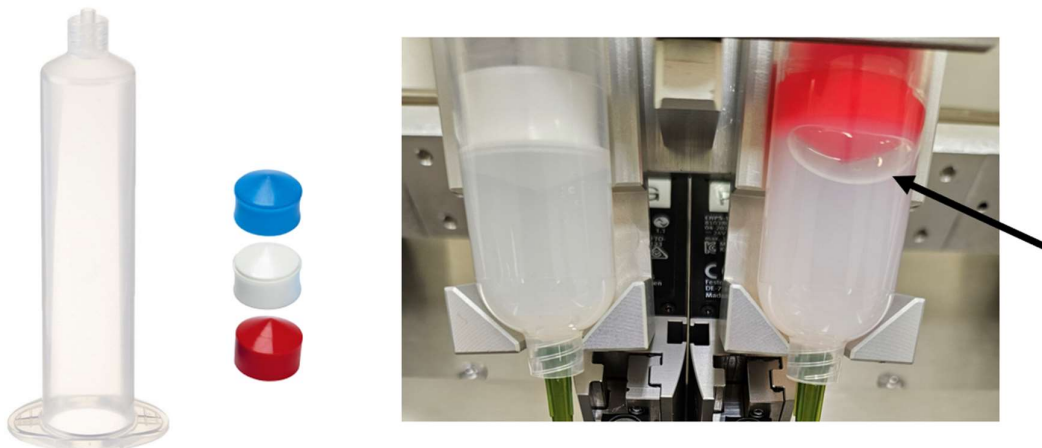
Survevalatud nõelte testimisel selgus, et nõela otste positsioneerimine paranes märgatavalt. Kuigi see lahendas nõelte tippude positsioneerimise probleemi suures osas, tuleb siiski tähelepanu pöörata jõule, millega operaator nõelu kinni keerab. Nõrgemini kinni keeratud nõelte tipp jääb süstlast kaugemale ja tugevamini kinni keeratud ots lähemale. See tähendab, et peale süstalde vahetamist peaks kontrollima nende kaugust voolikust ja seda vajadusel korrigeerima. Selle võimaldamiseks jäeti süstla rakistesse väike lõtk süstla teljesihiliseks liigutamiseks. Nõelte geomeetria muutuse tõttu tuli uuesti seadistada ka doseerimisseadmete rõhk, sest liimi läbilaskevõime suurenes.

5.1.2 Liimi voolamine tsüklite vahel

Teiseks probleemseks kohaks oli liimi voolamine dosaatori survetsüklite vahelisel ajal. See tähendas, et peale liimimist tekkis süstla nõela otsa liimi tilk ja järgmise liimimise alguses jäi vooliku külge lisaks doseeritud kogusele ka vahepeal kogunenud tilk. Sellest tulenevalt oli liimi kogus ebaühtlane ja tihti jäi kogunenud liimi tilk vooliku ühele küljele.

Probleemi lahendamiseks katsetati erinevaid doseerimisseadme parameetreid. Doseerimisseadmetele on sisseehitatud vaakum funktsioon, mis liimimise vahepeal tekitab süstla sisse väikese vaakumi. See funktsioon toimib manuaalselt reguleeritava ventiili abil ja ventiili avanedes suurendatakse pneumaatilist tagasi imavat jõudu. Kasutava liimi suure viskoossuse tõttu ei avaldanud vaakum funktsioon liimi voolamisele märgatavat mõju.

Tööpingis kasutatavaid liimisüstlaid hakkab ettevõtte ise täitma. See tähendas, et ka testimise ajal oli vaja süstlaid käsitsi täita. Kui dosaatorist tulev suruõhu voolik on kinnine ja tsüklite vahel voolikusse lisa õhku ei tule, siis peaks see takistama liimi voolamist. Sellest tulenevalt uuriti süstalde täituvust, suruõhu kolbe ja täitmisprotsessi. Erinevate kolbide katsetamisel selgus, et väiksema kolvi läbimõõdu puhul liigub suruõhk kolvist mööda ja kolvi taha tekib õhutühimik (joonis 5.3). Kolbide vahetamine liimi tilkumist ei peatanud.



Joonis 5.3 Plastikkolbide katsetamine

Järgmiseks vaadati süstalde täituvust. Õhk on liimist väiksema tihedusega ja doseerimistsükli jooksul surutakse õhutühimikes õhk kokku. Tsüklite vahepealsel aja võib see vähehaaval süstla avatud otstest liimi välja suruda. Selle katsetamiseks leiti viis kuidas süstlad täita ilma, et liimi sisse õhutühimikud jääks. Katsetuse tulemusest selgus, et ilma liimis paiknevate õhutühimiketa liimi liigne voolamine peatus või vähenes sellisel määral, et see ei olnud enam takistuseks ühtlase liimikoguse saavutamisel. Sellise liimidosaatori kasutamise puhul tuleb veenduda, et süstalde täimisel ei jääks liimi sisse õhutühimikke.

Kuigi DELOMAT 101 kasutamine on võimalik tuleb selle kasutamisel pöörata lisa tähelepanu süstalde täitmisele ja nõelte tippude kaugusele voolikust. Stabiilsema liimimismooduli projekteerimiseks peaks kasutama teist liimidoseerimise seadet, mis doseerib liimi avatava ja suletava ventiili abil ja mille otsik on alati samamoodi positioneeritud.

5.2 Edasiarendamise võimalused

Esimese edasiarendusena võiks kaaluda liimi doseerimisseadme vahetamist. Sobilikum seade võimaldab paremini kontrollida liimimise protsessi ja vähendada hooldamis- ja seadistusaega. Rakises paiknevate süstalde asemel võiks kasutada seadet, millel on korraliku kinnitusega liimi doseerimise otsik ja mis oleks ventiili abil avatav ja suletav. See tagaks täpsema positsioneerimise ja parema liimi koguse kontrollimise. See tähendaks kliendilt saadud dosaatori välja vahetamist ja see tõstaks tööpingi hinda. Samuti eeldaks see liimimismooduli detailide ümberprojekteerimist.

Toote geomeetria ja materjali tõttu otsustati projekti alguses, et projekteeritav seade peab olema võimalikult seadistatav. Kaalutud punkthindamise tulemusena otsustati kasutada elektrijameid (vt. tabel 3.2). Teise edasiarendusena võiks olla elektrijamite väljavahetamine pneumoajamite vastu. See võib osutada odavamaks, kui tööpinke peaks suurem kogus toodetama. Samas tähendaks see tööpingi programmi põhjalikku testimist ja kõikide liikumiste täpsustamist, et võimalikult palju liikumisi teha konkreetsete lõpupositsioonidega.

Kolmanda edasiarendusena võib välja pakkuda masinnägemise lisamist tööpingile. Masinnägemise abil oleks võimalik kiirendada töötsükli optimeerides haaratsite liikumist. Tagasiside puudumise tõttu tehakse esimene stopperite liigutamine selleks, et tagada stopperite kindel asukoht haaratsite suhtes. Masinnägemise abil oleks võimalik arvutada välja stopperite täpne asukoht ja haaratsite positsioonile liikumine teha maksimumkiirusel. See võimaldaks see välistada valesti eelpositsioneeritud stopperite tõttu tekkivaid praake, kuna vajadusel saab haaratsite positsiooni alati korrigeerida. Lisaks töötsükli kiirendamisele saab masinnägemise abil rakendada kvaliteedikontrolli. Defektsete detailide või ebaõnnestunud liimimise puhul saab peatada töötsükli enneaegselt ja anda operaatorile märku, praak koostu eemaldamiseks.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli projekteerida poolautomaatne tööpink peristaltilise pumba vooliku koostamiseks. Vooliku koost koosneb silikoonvoolikust ja kahest silikoonstopperist, mis liimitakse voolikule kindlale positsioonidele. Tööpink oli tellimustöö ettevõttelt, mis toodab komponente meditsiinitööstuses kasutatavatele seadmetele. Pink on mõeldud tootlikkuse tõstmiseks, et kaks töötajat, kes toodet käsitsi koostavad, asendada ühe tööpingi operaatoriga.

Magistritöö on jagatud kolmeks põhiliseks osaks: ülesande püstitus, kontseptsioonilahenduse väljatöötamine ja detailne projekteerimine. Lisaks on töö lõpus käsitletud testimisel ilmnunud probleeme ja nende lahendusi. Esimeses osas vaadeldi toote iseloomust, tootmiskeskonnast ja kliendi soovidest tingitud piiranguid ja pandi paika ülesande püstitus. Oluliseks piiranguks oli asjaolu, et tööpinki hakatakse kasutama ISO 14644-1 klass 8 puhasruumis. See seadis täiendavad piirangud detailide geometriale, kasutatud materjalidele ja ostukomponentide valikule. Põhilisteks materjalideks projekteerimisel olid teras EN 1.4301, anodeeritud alumiinium EN AW-6082 ja POM.

Töö teises osas analüüsiti vooliku koostamise tehnoloogilist protsessi ja jagati tööpink funktsionaalseteks osadeks. Igale funktsioonile töötati välja kontseptsioonilahendus. Järgmiseks analüüsiti väljavalitud lahendusi ja pandi paika projektis vajaminevate ajamite kogus ja tüüp.

Töö kolmas osa käsitleb tööpingi detailsest projekteerimisest. Seal on lähemalt kirjeldatud kõikide oluliste sõlmede lahendamist. Projekteerimist alustati vooliku kinnitamisest tööpinki. Koostu tööpinki sisestamiseks projekteeriti väljatõmmatav sahtel. Sahtli servades on pöördajamid, mis töötsükli ajal vooliku pöörlema panevad. See on vajalik vooliku pinnale liimi doseerimiseks, üleliigse liimi puhastamiseks ja stopperite liigutamiseks, mis silikooni suure hõõrdumise tõttu vastasel juhul takerduda võivad. Kiireks ja mugavaks vooliku kinnitamiseks projekteeriti magnetiseeruvast terasest kinnituspuksid, mille abil eelkoostatud voolik pöördajamite külge kinnitub. Sahtel on avamiseks kinnitatud lineaarsiinidele.

Liimi doseerimiseks kasutatakse kahte doseerimisseadet. Liim paikneb süstaldes, mis on kinnitatud rakisesse. Rakis on kinnitatud lineaarajami külge, mille abil süstlad liimimise ajaks positsioonile viiakse ja sealt eemaldatakse. See on vajalik, et teha ruumi stoppereid positsioneerivatele haaratsitele. Ajam on kinnitatud jalaga lauale. Nii rakis kui ajami jalg on seadistavad, et häälestada liimimis positsiooni.

Stopperite positsioneerimiseks projekteeriti kaks sümmeetrilist koostu. Vooliku ja stopperite haaramiseks kasutatakse haaratseid. Haaratsite käpad disainiti selliselt, et kinnises asendis saab stopperit liigutada ilma vooliku pöörlemist takistamata. Haaratsid on kinnitatud lineaarajamite külge, mille abil stoppereid piki vooliku telge liigutatakse.

Liimi puhastamiseks kasutatakse mikrofiiber linte. Nende vahetamise lihtsustamiseks on projekteeritud plastikust valmistatud kassett. Linnid jooksevad üle telgede süsteemi, mis tõstetakse puhastamise ajaks läbi lauaplaadis paikneva ava vooliku juurde. Neli paralleelselt liikuvat linti puhastavad korraga kahe silikoonstopperi mõlemalt küljelt üleliigse liimi. Linte veetakse edasi rihveldatud rullikute abil. Kogu puhastusmoodul on lineaarsiinide abil tööpingi alumisest uksest väljatõmmatav, et lihtsustada lintide vahetust ja puhastusmooduli hooldust.

Töölaua raam on koostatud MiniTec profiilidest. Laua alumine osa on kaetud lehtmetailist paneelidega ja ülemine raam on kaetud läbipaistvate PC paneelidega. Tööpingi hooldamiseks on nii ülemises kui alumises raamis lukustusega uks. Uste ja erinevate liigutatavate moodulite asendi kontrolliks kasutatakse induktiivandureid. Ohutuse tagamiseks peavad töö ajal olema kõik ukсед kinni ja kõik moodulid kodupositsioonis. Töölaua ja puhastusmooduli raami jäikuse hindamiseks teostati löplike elementide meetodil põhinev tugevusanalüüs. Analüüsist selgus, et läbipaine on väga väike ja ei sega komponentide täpset seadistamist.

Magistritöö viimases osas on käsitletud tööpingi testimisel ilmnenuid probleeme ja neile leitud lahendusi. Probleemseks osutus süstla nõelte tippude positsioneerimine ja liimi liigne voolamine tsüklite vahel. Positsioneerimine lahendati teist tüüpi nõelte kasutamisega ja liimi voolamise peatamiseks tuli süstlad täita selliselt, et liimi sisse ei jääks õhutühimikke, mis doseerimise ajal kompresseruvad ja hiljem paisuvad.

Magistritöö lõpus on pakutud välja võimalikke edasiarendusi tööpingi parendamiseks. Liimi doseerimise täpsemaks kontrollimiseks võiks kaaluda alternatiivsete liimi dosaatorite kasutamist. Töötsükli kiirendamiseks ja kvaliteedikontrolliks saaks rakendada masinnägemist, et lugeda stopperite asukohta ja peatada töötsükkel defektsete detailide või ebaõnnestunud liimimise korral.

Töö esitamise hetkel on tööpink testimise lõppfaasis. Tõmbekatsel testitud näidiste tugevus ületab nõutut, kuigi tulemuste kõikumine on olnud soovitud suurem. Tööpingi ümberseadistamisega vähenes kõikumine märgatavalt ja hetkel oodatakse kliendilt tagasisidet, kas on vaja täiendavaid muudatusi.

SUMMARY

The objective of this master's thesis was to design a semi-automatic assembly workbench for peristaltic pump tube. The tube consists of a silicone tube and two silicone stoppers, which are glued to the tube at specific positions. The machine was commissioned by a company that produces components for medical devices. The workbench was commissioned by a company producing components for devices used in the medical industry. The purpose of the workbench is to increase productivity by replacing two manual assembly workers with one operator.

The thesis is divided into three main sections: task definition, concept solution development, and detailed design. Additionally, the work addresses issues that arose during testing and their solutions. The first part examined the product's characteristics, manufacturing environment, and constraints imposed by customer requirements to establish the project parameters. An important constraint was that the workbench would be used in an ISO 14644-1 class 8 cleanroom, which imposed additional restrictions on component geometry, materials used, and selection of purchased components. The primary materials used in the design were EN 1.4301 stainless steel, anodized aluminium EN AW-6082, and POM.

In the second part, the technological process of tube assembly was analysed, and the workbench was divided into functional parts. A conceptual solution was developed for each function. The selected solutions were analysed, and the quantity and type of actuators required for the project were determined.

The third part of the thesis focuses on the mechanical engineering of the workbench, providing a detailed description of the design of all the main components. The design process began with attaching the tube to the workbench. A pull-out drawer was designed for inserting the tube into the machine. The drawer has rotary actuators on the sides that rotate the tube during the work cycle. This is necessary for dispensing adhesive onto the surface of the tube, cleaning excess adhesive, and moving the stoppers, which can otherwise become stuck due to the high friction of the silicone. Magnetized steel mounting bushings were designed for quick and convenient attachment of the tube to the rotary actuators. The drawer is attached to linear guides for opening.

Two dispensing devices are used for applying the adhesive. The adhesive is contained in syringes mounted on a fixture. The fixture is attached to a linear actuator, which moves the syringes into gluing position and away. This is necessary to leave room for the grippers that position the stoppers. The actuator is mounted on a stand. Both the fixture and the stand are adjustable to fine-tune the gluing position.

To position the stoppers, two symmetrical assemblies were designed. Grippers are used to grasp the tube and stoppers. The gripper arms were designed so that the stoppers can be moved without obstructing the rotation of the tube. The grippers are attached to linear actuators, which are used to move the stoppers along the axis of the tube.

The adhesive is cleaned using microfiber tapes. A plastic cassette was designed to simplify tape replacement. The tapes run over a system of axles, which is raised through an opening in the table to clean the tube. Four parallel-moving tapes simultaneously clean both sides of the two silicone stoppers, removing excess adhesive. The tapes are advanced using knurled shafts. The entire cleaning module can be pulled out through the bottom door of the workbench using linear guides, making tape replacement and module maintenance easily accessible.

The table frame is assembled from MiniTec profiles. The lower frame is covered with sheet metal panels, and the top frame is covered with transparent PC panels. The machine has locking doors on both the upper and lower frames for maintenance. Inductive sensors are used to check the position of the doors and various movable modules. For safety, all doors must be closed and all modules in their home positions during operation. A finite element method-based strength analysis was performed to assess the rigidity of the worktable and the cleaning module frame. The analysis showed that the deflection is very small and does not interfere with the precise setting of the components.

The final part of the thesis discusses problems encountered during testing and their solutions. There were problems with positioning the syringe needle tips and controlling excessive adhesive flow between cycles. The positioning problem was solved by using a different type of needle. To prevent excess adhesive flow, the syringes had to be filled without any air pockets, as these would compress during dispensing and then expand.

The thesis concludes with potential improvements for the machine. For more precise control of adhesive dispensing, alternative dispensers could be considered. To speed up the work cycle and improve quality control, machine vision could be used to check the position of the stoppers and stop the work cycle if defective details or unsuccessful assembly are detected.

At the time of submitting the thesis, the workbench is in the final testing phase. The tensile test results indicate that the strength of the samples exceeds the required standard, although there has been more variability in the results than desired. However, this variability has significantly decreased after reconfiguring the workbench. Client feedback is currently awaited to determine if further modifications are necessary.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] DELO, „DELOMAT 101,“ DELO, [Võrgumaterjal]. Available: https://www.deloadhesives.com/fileadmin/user_upload/images/content/products/equipment/dispersing_systems/flyer/en/flyer_delomat_101-en.pdf. [Kasutatud 26 04 2024].
- [2] „GMP Equipment Design Guide,“ 06 2023. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.eca-foundation.org/gmp-equipment-design-guide.html>.
- [3] Festo, „Rotary drive ERMO-12-ST-E,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.festo.com/gb/en/a/download-document/datasheet/3008525>. [Kasutatud 26 04 2024].
- [4] Festo, „Parallel gripper EHPS-16-A-LK,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.festo.com/gb/en/a/download-document/datasheet/8103809>. [Kasutatud 26 04 2024].
- [5] Festo, „Mini slide EGSC-BS-KF-45-150-10P,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.festo.com/gb/en/a/download-document/datasheet/8048304>. [Kasutatud 26 04 2024].
- [6] Festo, „Stepper motor EMMS-ST-42-S-SE-G2,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.festo.com/gb/en/a/download-document/datasheet/1370471>. [Kasutatud 26 04 2024].
- [7] Festo, „Parallel kit EAMM-U-45-V32-42A-63,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.festo.com/gb/en/a/download-document/datasheet/4280674>. [Kasutatud 26 04 2024].
- [8] Festo, „Rotary drive ERMO-16-ST-E,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.festo.com/gb/en/a/download-document/datasheet/3008526>. [Kasutatud 26 04 2024].
- [9] Uddeholm, „Uddeholm Stavax ESR - Technical brochure,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/10/2023/08/productdb/api/tech_uddeholm-stavax-esr_en.pdf. [Kasutatud 20 04 2024].

- [10] HIWIN, „HGL15CA,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.hiwin.de/en/Products/Linear-guideways/Blocks/Series-HG-QH/HGL/HGL15CAZ0H/p/5-001374>. [Kasutatud 20 04 2024].
- [11] Norelem, „09117 Magnets deep pot,” [Vörgumaterjal]. Available: https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/en/09/09117_Datasheet_21072_Magnets_deep_pot_with_threaded_pin_NdFeB_rubber_magnetic_face--en.pdf. [Kasutatud 22 04 2024].
- [12] SICK, „IMB12-08NPSVC0K,” [Vörgumaterjal]. Available: https://cdn.sick.com/media/pdf/1/51/551/dataSheet_IMB12-08NPSVC0K_1072750_en.pdf. [Kasutatud 22 04 2024].
- [13] Eles+Ganter, „GN 315,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.eles-ganter.com/siteassets/PDF/EN/GN%20315.pdf>. [Kasutatud 26 04 2024].
- [14] Norelem, „03056-01 Spring plungers,” [Vörgumaterjal]. Available: https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/en/03/03056-01_Datasheet_21848_Spring_plungers_with_hex_socket_and_flat_thrust_pin_stainless_steel_with_thread_lock--en.pdf. [Kasutatud 26 04 2024].
- [15] Norelem, „95046-02_LS Swivel castors with stop fix,” [Vörgumaterjal]. Available: https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/en/95/95046-02_LS_Datasheet_22360_Swivel_castors_with_stop_fix--en.pdf. [Kasutatud 26 04 2024].
- [16] Norelem, „05566-05_DR Quarter-turn locks,” [Vörgumaterjal]. Available: https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/en/05/05566-05_DR_Datasheet_20659_Quarter-turn_locks_stainless_steel_small_version--en.pdf. [Kasutatud 26 04 2024].
- [17] MatWeb, „304 Stainless Steel,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>. [Kasutatud 27 04 2024].
- [18] Emetal, „ALUMINIUM AW-6082,” [Vörgumaterjal]. Available: <https://emetal.eu/en/AW-6082/>. [Kasutatud 27 04 2024].