TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Mehaanika ja tööstustehnika instituut

UNIVERSAALSE KAUBAALUSTE VIRNASTAJA PROJEKTEERIMINE

DESIGN OF AN UNIVERSAL PALLET STACKER MACHINE

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Haivo Annival
Üliõpilaskood: 191861
Juhendaja: Toivo Tähemaa, Teadur

Tallinn 2022

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö ainuisikuliselt ja 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.

"....." 2022

Autor: .....
/ allkiri /

Töö vastab magistritöödele esitatud nõuetele

"....." 2022

Juhendaja: .....
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."..... 2022

Kaitsmiskomisjoni esimees .....
/ nimi ja allkiri /

TTÜ Mehaanika ja tööstustehnika instituut
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Haivo Annival, 191861
Õppekava, peaeriala: MATM, Tootmistehnika ja Robootika
Juhendaja: Toivo Tähemaa, Teadur

Lõputöö teema:
Universaalse kaubaaluste virnastaja projekteerimine

Lõputöö põhieesmärgid:
1. Leida erinevad lahendusvariandid plastikust kaubaaluste üksteise otsa virnastamise automatiseerimiseks;
2. Analüüsida erinevaid kontseptuaalseid tõsteseadmete lahendusvariante;
3. Projekteerida vastavalt ülesande püstitusele kaubaaluste virnastaja;
4. Põhjendada virnastaja detailide ja komponentide valiku aluseid.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Ülesande püstitus	23.04.2021
2.	Lõputöö sisu kirjutamise lõpetamine	05.09.2021
3.	Lõputöö vormistamine vastavalt 2019 a. eeskirjadele	15.09.2021

Töö keel: Eesti **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "....."....2022.a

Üliõpilane: .... "....."....2022.a
/allkiri/

Juhendaja: ...."....."....2022.a
/allkiri/

SISUKORD

SISUKORD 4
EESSÕNA 7
LÜHENDITE JA TÄHISTUSTE LOETELU 8
1. SISSEJUHATUS 9
2. KONKUREERIVATE SEADMETE ÜLEVAADE JA ANALÜÜS 10
2.1 Palomat 10
2.2 Megapal 12
2.3 Newcastle 12
2.4 Marceau 13
2.5 Soco System 14
2.6 Konkureerivate seadmete võrdlus 15
3. KAUBAALUSTE VIRNASTAJA PROJEKTEERIMINE 16
3.1 Virnastaja projekteerimisvajaduse defineerimine 17
3.2 Virnastaja valmistamise eelduseks olevad projekteerimistingimused ja parameetrid 18
3.3 Virnastaja projekteerimine lähtuvalt DFX metoodikast 22
3.4 Virnastaja funktsioonistruktuur 23
3.5 Tõstemehhanismi eskiisid 25
3.6 Virnastaja tõsteseadme lahendusvariandid 26
3.6.1 Lahendus 1 - elektromehaaniline ajamiga tõsteseade 28
3.6.2 Lahendus 2 - pneumaatilise aktuaatoriga tõsteseade 30
3.6.3 Lahendus 3 - hüdraulilise aktuaatoriga tõsteseade 32
3.7 Morfoloogiline maatriks 33
3.8 Virnastaja lahendusvariantide hindamismaatriks 34
4. VIRNASTAJA KOOSTAMISEKS SOBIVATE MATERJALIDE JA STANDARDKOMPONENTIDE VALIK 35
4.1 Mehhaaniliste komponentide valiku alused 35
4.2 Virnastaja lineaarjuhikute valiku alused ja kontrollarvutused 38
4.3 Elektrikomponentide valiku alused 42
4.3.1 PLC valiku alused 42
4.3.2 Andurite valiku alused 44
4.4 Pneumaatika komponentide valiku alused ja arvutused 45
4.4.1 Pneumosilindrite valiku alused ja arvutused 45
4.4.2 Pneumojaotite valiku alused 50
5. TÕSTESEADME DETAILIDE TUGEVUSARVUTUSED 52

5.1 Lihtsamate detailide tugevusarvutused kasutades 3D mudeleid 52
5.2 Keevisõmbluse tugevusarvutused 54
5.3 Kaitseraami tugevusarvutused kasutades 2D kesktasapindasid 56
5.4 Kontrollarvutused 58
6. VIRNASTAJA HINNAKALKULATSIOON 60
6.1 Võrdlevad hinnapakkumised 60
6.2 Virnastaja detailid ja standardkomponendid koos hindade ning valmistamiskuludega 60
7. VIRNASTAJA DETAILIDE VALMISTAMINE 64
7.1 Virnastaja detailide lõikamine, painutamine ning keermestamine 64
7.1.1 Detailide lõikamise tehnoloogia valiku alused 64
7.1.2 Detailide lõikamine 67
7.1.3 Detailide painutamine 67
7.1.4 Detailide keermestamine 69
7.2 Kruvi-, polt ning keevisliited 70
7.2.1 Kruvi- ja poltliited 70
7.2.2 Keevisliited 71
7.3 Virnastaja värvimine 72
8. VIRNASTAJA JUHTIMISLOOGIKA 74
8.1 Virnastaja integreerimine tootmisliinidega 74
8.2 Virnastaja kontrolleri juhtprogrammi koostamine 76
9. VIRNASTAJA KASUTAMINE 78
9.1 Ohutusinformatsioon 78
9.2 Paigaldus, reguleerimine ning ühendamine 80
9.3 Ohutus enne seadme kasutamist 81
9.4 Virnastajaga opereerimine 81
9.5 Virnastaja hooldus ja puhastamine 83
9.6 Virnastaja konserveerimine, kui seadet ei kasutata pikaajaliselt 87
9.7 Toote utiliseerimine 87
KOKKUVÕTE 88
SUMMARY 90
KASUTATUD KIRJANDUS 92
GRAAFILINE OSA 94
Koostejooniste näide 95
Tööjoonise näide detailide lõikamiseks ja painutamiseks 96
Tööjoonise näide konstruktsiooni keevitamiseks ja värvimistöödeks 97
Tööjoonise näide detaili lõikamiseks ja avade keermestamiseks 98

LISAD 99
Lisa 1. Pildid virnastaja erinevatest valmistusetappidest 100
Lisa 2. Pilt tootmisettevõttesse paigaldatud töötavast virnastajast 104
Lisa 3. Virnastaja pneumoskeem 105
Lisa 4. Virnastaja elektriskeem 106
Lisa 5. Plastikaluse mõõdud 107
Lisa 6. Virnastaja visualiseering (plastikaluste virnastamine) 108
Lisa 7. Virnastaja visualiseering (euroaluste etteandmine) 109

EESSÕNA

Käesolev lõputöö on alternatiiv kuue aasta jooksul läbiviidud uuringute ja katsetuste põhjal koostatud magistritööle „Uitvoolude vähendamisvõimalused sagesdusmuunduritega juhitavates asünkroonmootorites" (98 lk), mille fookuses on äärmiselt oluline ning Eestis senini täielikult läbi uurimata teemaplokk, mis kirjeldab kõiki suurtes asünkroonmootorites laagreid kahjustavate uitvoolude vähendamise meetodeid (10 tk) ning analüüsib nende tõhusust. Unikaalne teemapüstitus, pikaajalised ja ressursimahukad uuringud (otsesed kulud erinevate uitvoolude vähendamise meetodite katsetamiseks olid *ca* 7000 €, millele lisanduvad aga märkimisväärsed kaudsed kulud ehk elektrienergia 250 kW mootori tööshoidmiseks katseteperioodil kogumaksumusega > 500000 €) ning selle põhjal koostatud põhjalik ülevaade ja analüüs annavad nimetatud magistritööle vaieldamatult erakordselt suure väärtuse.

Eelnimetatud magistritöö on täies mahus valmis kirjutatud professor Anton Rassõlkini juhendamisel, vastates sealjuures kõikidele TTÜ Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi magistritöö nõuetele. Kuna aga TTÜ Mehhaanika ja tööstustehnika instituudi ning Tootmistehnika ja Robootika eriala magistritöödes peab sisalduma ka tootearenduslik osa, valis töö autor vastavalt õpitavale erialale aga uue ja sellega paremini seonduva magistritöö teema, milleks on „Universaalse kaubaaluste virnastaja projekteerimine" ning kirjutas lisaks juba eelnevalt valmis olnud magistritööle samas mahus veel ka teise, käesoleva lõputöö.

Käesolev magistritöö on näide tootearendusega seonduvatest masinaehituslikest projektidest, millega töö autor tööalaselt igapäevaselt kokku puutub. Ühtlasi on lõputöö ühildatud reaalse vajadusega projekteerida tootmisettevõttele kaubaaluste virnastamiseprotsessi automatiseerimiseks mõeldud seade. Seega valmib magistritöö raames ka reaalne ning tootmisettevõttes 24/7 kasutama hakatav masin.

Käesoleva lõputöö juhendajaks on Tallinna Tehnikaülikooli Mehaanika ja tööstustehnika instituudi teadur Toivo Tähemaa, keda töö autor soovib tänada alati operatiivselt antud tagasiside ning heade tähelepanekute ja asjalike suuniste eest.

LÜHENDITE JA TÄHISTUSTE LOETELU

AMR - anisotropic magnetoresistive sensor
ATEX - Atmosphere Explosible ehk plahvatusohtlik atmosfäär
bar - baar ehk mittesüsteemne rõhu mõõtühik (1 bar = 10^5 Pa = 0,1 MPa)
ca - circa ehk umbes
CE - Conformité Européene (tõlkes „Euroopa vastavus"), ehk sertifitseerimistähis
CNC - computer numerical control ehk arvprogrammjuhtimine
DI – digital input
DO – digital output
GMR – giant magnetoresistive sensor
HACCP - Hazard analysis and critical control points ehk enesekontrolliplaan
HAZ – Heat affected Zone ehk termomõjutsoon
IP – Ingress Protection Code ehk IP-kaitseaste, mis on defineeritud IEC standardis 60529
kg – kilogramm, SI-süsteemi massiühik
km – kilomeeter, millimeeter, SI-süsteemi pikkusühik, võrdub 10^3 meetriga
KM – käibemaks
l – liiter, meetermõõdustiku ruumalaühik
lk - lehekülg
m – meeter, SI-süsteemi pikkusühik
max – maksimaalne
min – minimaalne
MIR – Mobile Industrial Robot ehk mobiilne robot
mm – millimeeter, SI-süsteemi pikkusühik, võrdub 10^{-3} meetriga
MPa – megapaskal, SI-süsteemi rõhuühik, võrdub 10^6 Paskaliga
ms – millisekund, SI-süsteemi agaühik, võrdub 10^{-3} sekundiga
N – Newton
NC – Normally Closed
nn - niinimetatud
NO – Normally Open
nt - näiteks
Pa – Paskal, SI-süsteemi rõhuühik
PLC - Programmable Logic Controller ehk programmeeritav loogikakontroller
RCM – Reliability Centered Maintenance
s – sekund, SI-süsteemi mõõtühik aja mõõtmiseks
SI - Système International d'Unités ehk rahvusvaheline mõõtühikute süsteem
TPM – Total Productive Maintenance
TRIZ - теория решения изобретательских задач
vt - vaata

1. SISSEJUHATUS

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on leida tööstusettevõttes lahendus reaalsele probleemile, milleks on inimeselt suurt füüsilist pingutust nõudvate erikujuliste plastikust kaubaaluste virnastamine, ehk eelnimetatud tegevuse mehhaniseerimine ja automatiseerimine. Kuigi turul on olemas mitmeid ettevõtteid, kes on spetsialiseerunud kaubaaluste virnastajate tootmisele, ei vasta paraku ükski olemasolevatest standardlahendustes mitmetel olulistel põhjustel (vt peatükk 3.1) nõuetele, mida erikujuliste plastikaluste (Joonis 1, ühe plastikaluse kaal on *ca* 31,5 kg) virnastamisel tuleb silmas pidada.

Probleemile lahendust otsides pakutakse käesolevas magistritöös välja erinevaid lahendusvariante ning neid analüüsides valitakse väljapakututest välja parim moodus kaubaaluste virnastamisprotsessi automatiseerimiseks.

Läbi erinevate peatükkide on lõputöö fookuses virnastaja projekteerimisprotsessi erinevate etappide kirjeldamine. Samuti tuuakse töös välja kõikide olulisemate langetatud valikute aluspõhimõtted, millest lähtuvalt on tehtud otsused virnastajas kasutatavate detailide ning standardkomponentide kasutamiseks. Lõputöö tulemusena valmib ühtlasi ka reaalne seade, mida ettevõttes igapäevaselt kasutama hakatakse.

Joonis 1. 31,5 kg kaaluvad erimõõdulised plastikalused

2. KONKUREERIVATE SEADMETE ÜLEVAADE JA ANALÜÜS

Kaubaaluste virnastaja on seade, mis tõstab inimese või konveieri või MIR-i poolt seadmesse viidud kaubaalused üksteise otsa, tekitades neist määratud kõrgusega virna. Kui enamasti piirdub seadme funktsionaalsus vaid aluste virnastamisega, siis täiuslikumad virnastajad on võimelised ka seadmesse viidud kaubaaluste virnast ükshaaval aluseid välja andma.

Enimkasutatava 1500 kg kandevõimega puidust euroaluse (800 mm x 1200 mm x 144 mm) kaal on *ca* 20 kg, mistõttu on nende üksteise otsa tõstmine suhteliselt raske füüsiline töö. Mida suurem on ettevõttes kaubaaluste käsitlemise maht, seda rohkem peaks ettevõte mõtlema kaubaaluste virnastamisprotsesside automatiseerimisele ehk virnastaja soetamisele.

Kuna euroaluseid kasutatakse globaalselt väga laialdaselt ja väga paljudes ettevõtetes, on ka standardsete kaubaaluste virnastajate tootjaid suhteliselt palju. Alljärgnevalt on toodud lühiülevaade tuntumatest kaubaaluste virnastamisseadmeid valmistavatest ettevõtetest koos toodete lühitutvustustega. Vastavalt töökeskkonnale ning virnastaja võimekusele on standardlahenduste jõuajamid kas elektrilised, pneumaatilised või hüdraulilised.

2.1 Palomat

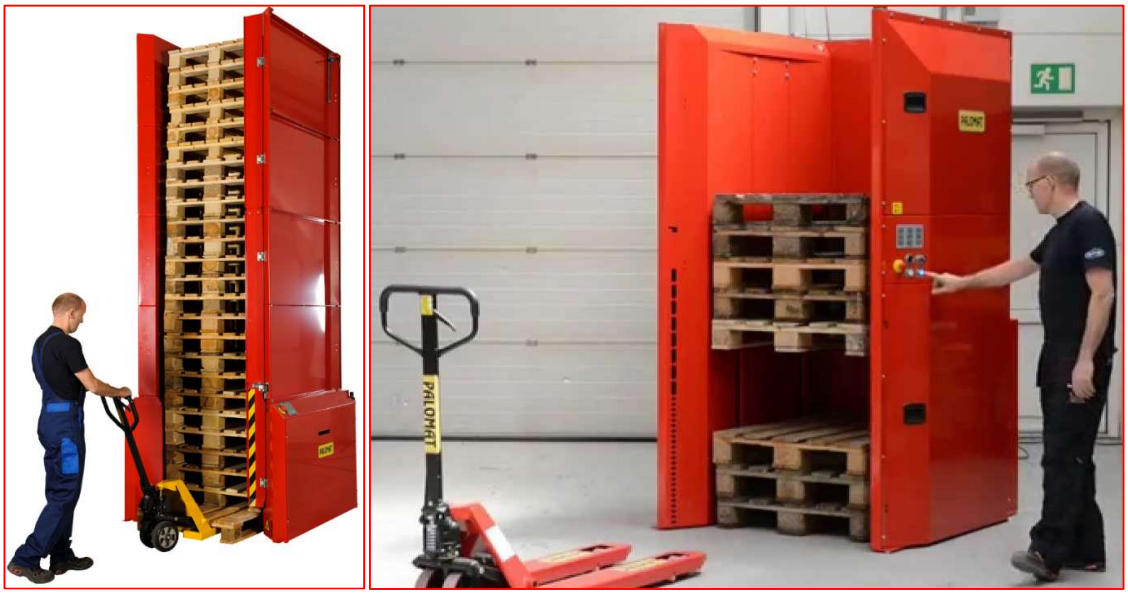
Palomat on Taani ettevõte, mis valmistab samanimelisi kaubaaluste virnastajaid. Esimene virnastaja ehitati juba aastal 1992, kui ühel tänastest ettevõtte omanikest tekkisid seljavalud, mis tulenesid raskete kaubaaluste virnastamisega kaasnevast füüsilisest tööst. [1]

Tänaseks on Palomat valmistanud kokku juba rohkem kui 7000 kaubaaluste virnastajat. Ettevõttel on esindused või edasimüüjad enamikes Euroopa riikides (ka Eestis) ning lisaks veel ka Austraalias ja USA-s. [1]

Tootevalikus on neli virnastajate standardkonfiguratsiooni, mida on võimalik vastavalt vajadusele kohandada lähtuvalt käsitletavate kaubaaluste suurusele ning käsitlusmahule (üksteise otsa tõstetavat kaubaaluste kogust saab muuta). Palomat virnastajad saab tellida nii elektrilise, kui ka pneumaatilise ajamiga. Hinna poolest on soodsam pneumaatilise tõsteseadmega virnastaja, mis maksab käibemaksuta *ca* 8200 € (aluse

suurus 1200 mm x 1200 mm x 150 mm, maksimaalne tõstevõime 500 kg). Elektrilise ajamiga virnastaja hinnalisa on *ca* 1000 €. Virnastaja tarneaeg (tellimine Taanist) on *ca* 1,5 kuud.

Palomat on oma toote (virnastaja) soetamiseks üles loetlenud kokku 10 põhjust, miks just neid peaks konkurentidest eelistama (Joonis 3). Palomat virnastajad (Joonis 2) omavad CE märgist ning seadme juhtimiseks kasutatakse Siemens S7 1200 seeria kontrollerit. [2]



Joonis 2. Erinevad Palomat kaubaaluste virnastaja mudelid [1]

Joonis 3. Palomat kaubaaluste virnastaja eelised [2]

2.2 Megapal

Megapal kaubamärki kandvaid virnastajaid toodab 1993. a Prantsusmaal asutatud rahvusvaheline ettevõte Triax Z.A, mis on spetsialiseerunud peamiselt erinevate automatiseeritud tööstuslike turvalahenduste projekteerimiseks. Näiteks on Triax Euroopa suurim turvaväravate valmistaja. [3]

Lisaks turvasüsteemidele valmistab ettevõte ka erinevates standardkonfiguratsioonides kaubaaluste käsitlemiseks mõeldud seadmeid alates aluste sorteerijast lõpetades aluste virnastajaga. Sarnaselt Palomat toodetega ei ole ka Megapal virnastajad universaalsed ning on mõeldud vaid konkreetse suurusega kaubaaluste käsitlemiseks (Joonis 4).

Joonis 4. Erinevad Triax Megapal kaubaaluste virnastajad [4]

2.3 Newcastle

Newcastle Company, Inc. on Ameerika Ühendriikides, Pensilveinia osariigis asuv masinaehitusettevõte, mis tegutseb alates 1962 aastast, olles spetsialiseerunud automatiseeritud pakkeliinide ning kaubaaluste käsitlemiseks mõeldud seadmete projekteerimisele ning valmistamisele. [5]

Erinevalt Euroopa erinevates ettevõtetes valmistatud toodetest, kasutab Newcastle Model 50-57XJ virnastaja kaubaaluste tõstmiseks hüdraulilist ajamit (Joonis 5). [5]

Joonis 5. Newcastle virnastajad (vasakul Model 50-57J ning paremal Model 50-57XJ) [5]

2.4 Marceau

Marceau SAS on 1946. a Prantsuse asutatud masinaehitusettevõte, mis alates 1990-ndatest on spetsialiseerunud automatiseeritud kaubaaluste käitlemissüsteemide projekteerimiseks ning valmistamiseks. Virnastajate tootevalikus on palju erinevaid ning vajaduspõhiselt konfigureeritavaid seadmeid, mis suudavad käsitleda kuni kahes reas erineva suurusega kaubaaluseid. Töökeskkonnana on seadmevailikus alates niiskest või kuivast lõpetades sooja või külma ning plahvatusohtlik keskkonnaga, millest tulenevalt on virnastajad konstruktsioondetailid värvitud või valmistatud kas galvaniseeritud või roostevabast terasest. [6]

Standardmudelite tõstemehhanismid on kas elektrilised või pneumaatilised. Valikus on nii ühe kui ka kaherealised kaubaaluste virnastajad, mis suudavad käsitleda kuni 100 kaubaalust tunnis, olles võimelised üksteise otsa tõstma maksimaalselt kuni 30 kaubaalust (Joonis 6). [6]

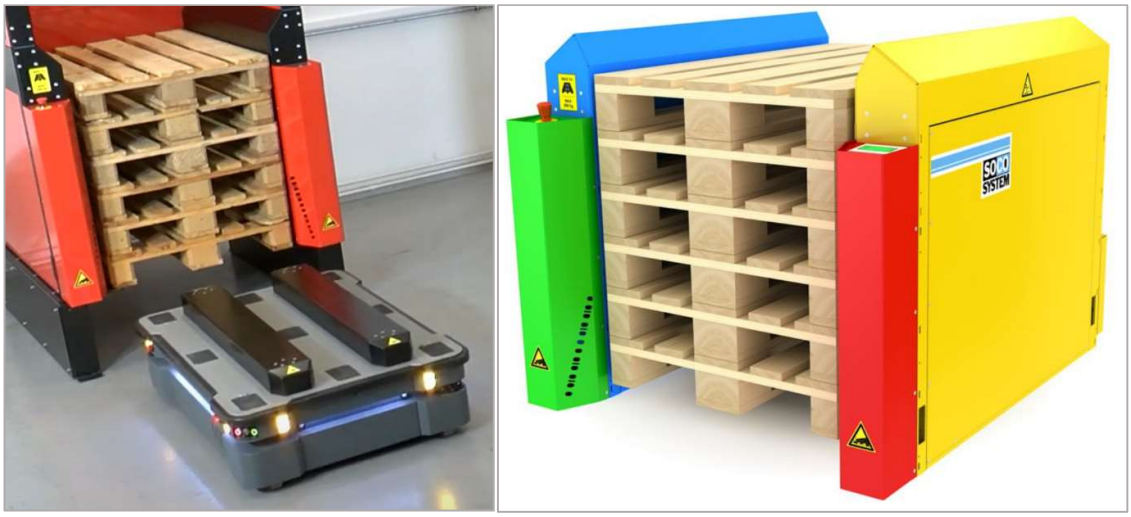
Joonis 6. Erinevad Marceau SAS kaubaaluste virnastajad [6]

2.5 Soco System

Soco System on 1961. a Taanis asutatud üks maailma juhtivatest kaubaaluseid ning pakkimisseadmeid ja konveiersüsteeme valmistav ettevõte, kellel on edasimüüjad üle maailma paljudes riikides, kaasa arvatud Eestis. Ettevõtte poolt toodetavate virnastajate tootevalikus on mitmeid erinevaid ning vajaduspõhiselt konfigureeritavaid mudeleid (Joonis 7 ja Joonis 8), mis on mõeldud kas eraldiseisvaks kasutamiseks või integreeritult koos MIR-idega. Samuti on võimalik tellida Soco Systemsilt täislahendus, kus virnastaja on paigaldatud kaupade käitlemise (pakkimise) liinide lõppu/algusesse. [7]

Joonis 7. Soco System virnastajad (vasakul pikendatud käiguga mudel, keskel kompaktne versioon ja paremal virnastaja puutetundlik ekraan [7]

Soco Systemsi virnastaja standardmudelid on kas elektrilised või pneumaatilised ning mõeldud kuni 24 kaubaaluse tõstmiseks. Kuna tõsteseadme pooled on eraldiseisvad, saab sama seadmega tõsta erineva laiusega kaubaaluseid.



Joonis 8. Vasakul MIR-iga integreeritud virnastaja, paremal toote väivivalik [7]

2.6 Konkureerivate seadmete võrdlus

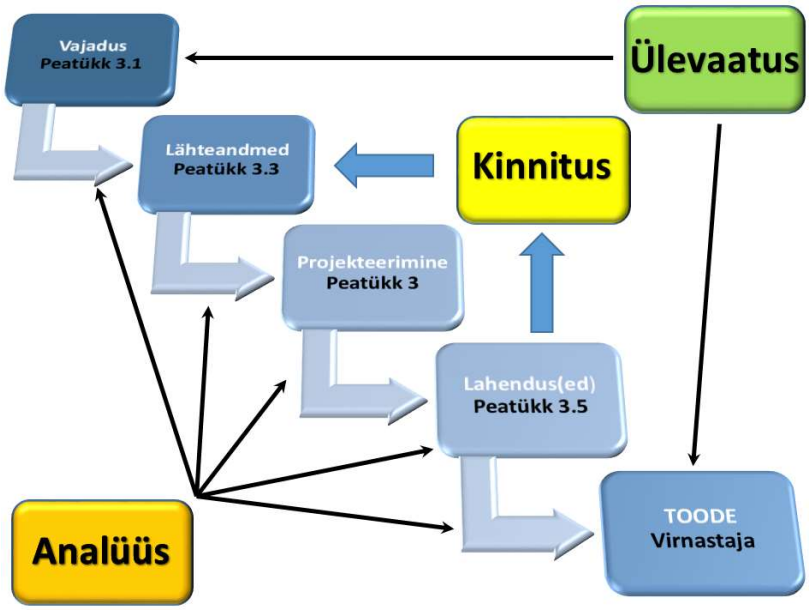
Tabel 1. Konkureerivate virnastajate omavaheline võrdlus

Toode	Eelised konkurendi ees	Puudused konkurendi ees
Palomat	- Edasimüüja Eestis (kohapealne teenindus, võimalus rentida testimiseks seade), saab kasutada koos MIR-idega	- Ettevõte tegeleb vaid virnastajate ehitamisega (ei saa tellida näiteks pakkeliini)
Megapal	- Lisaks virnastajale võimalik tellida palju erinevaid turvaseadmeid ning kaubaaluste käsitlemise seadmeid	- Virnastajate valmistamine ei ole ettevõtte põhitegevus
Newcastle	- Kõige laiem valik erinevad versioone (elektriline, hüdrauliline ja pneumaatiline)	- Ettevõte asub USA's (seadme tellimine ja tehniline tugi komplitseeritud)
Soco Systems	- Suur valik otse tootmisesse integreeritavaid seadmeid, puutetundlik ekraan, erinevad värvitoonid, moodulkonfiguratsioon, saab kasutada koos MIR-idega, väga pikk tõsteulatus	- Konkurentidega võrdluses puuduseid ei ole
Merceau	- Olemas standardlahendused ka toiduainetööstusele (saab tellida roostevabast materjalist detailidest valimistatud seadme) - Väga lai valik erinevaid konfiguratsioone (nt. kaherealine virnastaja)	- Ei ole standardlahendust töötamiseks koos MIR-idega

Kuna funktsionaalsuse poolest on kõik turul olevad virnastajad suhteliselt samaväärsed, siis vastavalt võrdlustabelile (Tabel 1) oleks eelistatum valik Palomat ja seda peamiselt lähtuvalt kohaliku esinduse olemasolust, testseadme rentimisese võimalusest ning toimivast järelteenindusest.

3. KAUBAALUSTE VIRNASTAJA PROJEKTEERIMINE

Projekteerimise eeltingimuseks on alati vajadus teha midagi lihtsamaks, paremaks, mugavamaks, odavamaks, jne. Kui vajaduse olemus on defineeritud, on uue seadme eduka ja efektiivse projekteerimise eelduseks hästi koostatud ning läbimõeldud ülesande püstitus ehk lähteandmed, mis kirjeldavad võimalikult detailselt seadme olemust ja funktsionaalsust. Projekteerimise etapis teostatakse esmalt vastavalt lähteülesandele ideede otsing, milleks masinaehituses sobib väga hästi näiteks TRIZ probleemilahendusmetoodika. Pärast ideekorjet hinnatakse erinevaid lahendusvariante hindamismaatriksi abil. Seejärel valmistatakse parimast või parimatest lahendusvariantidest eskiisid ning antakse neile tehnilis-majanduslikud hinnangud, millele tuginedes saab tellija langetada otsuse, kas ja/või millise lahendusega edasi minna. Projekteerimise tüüpiline lihtsustatud plokkskeem on näidatud joonisel 9, kus teemaplokkidele on lisatud ka käesoleva tööga seonduvad peatükid.



Joonis 9. Projekteerimise lihtsustatud plokkskeem

Kui tellijapoolne positiivne otsus on projekteerijaga kooskõlastatud, saab lihtsama toote puhul alustada seadme tootmisega. Kui tegemist on aga keerulisema masinaga, alustatakse pärast tellimuse kooskõlastamist detailide optimeerimise ning prototüübi

valmistamisega, mille katsetamise käigus ilmnenud probleemid ja puudused kõrvaldatakse. Alles pärast edukat prototüübi katsetamist saab alustada tööjooniste ning spetsifikatsioonide koostamisega ning seadme tootmisega.

3.1 Virnastaja projekteerimisvajaduse defineerimine

Kaubaaluste virnastaja projekteerimise sisendiks ehk probleemiks oli tootmisettevõtte reaalne vajadus muuta füüsiliselt raske ja ebamugav plastikust kaubaaluste virnastamise töö inimestele lihtsamaks. Esmaselt kirjeldatud vajadus varieerus vahemikus, kus minimaalselt oleks olnud vaja vaid leida lahendus inimeste füüsilise töö lihtsustamiseks ehk kaubaaluste virnastamisprotsessi mehhaniseerimiseks, kuid ideaalvariandis toimuks kaubaaluste virnastamine automatiseeritult ja analoogselt turul olemasolevate seadmetega, olles konkurentide standardtoodetest aga kordades odavam ning samal ajal funktsionaalsuselt võimekam ning vastates täielikult kõikidele tellijapoolsetele rangetele erinõuetele (peatükk 3.2).

Olulisemad põhjused, miks ükski turul olemasolev seade (hästi) ei sobi, on järgmised:

- Plastikalused on rasked (31,5 kg) ja erikujulised (1200 x 1200 x 165 mm) ning neil on servades on väiksed „kõrvad" (joonis toodud lisa 5-s), millest tingituna tuleb alused enne virnastamist väga täpselt tsentreerida. **Ükski olemasolev seade ei tsentreeri kaubaaluseid;**
- Ettevõttes on käsitletavaid kaubaaluseid erinevas laiuses (800 mm ja 1200 mm). Seega peaks sama seade olema lihtsasti kohaldatav erinevate laiustega kaubaaluste käsitlemiseks. **Kõik olemasolevad virnastajad on ehitatud vaid konkreetse laiusega kaubaaluste käsitlemiseks**;
- Käesoleva töö raames valmistatav virnastaja projekteeritakse ning koostatakse ettevõttesiseselt, mistõttu ei tohiks seade ettevõttele otseselt maksma minna üle 3000 € + KM (ilma projekteerimise ja komplekteerimise maksumuseta). Seega isegi juhul, kui arvestada lisaks ka projekteerimise ja seadme koostamise turuhindadega (olenevalt seadme keerukusasemest on projekteerimise tunnihind Eestis 50€/h±10€ ning koostamine vastavalt 30€/h±5€), jääks seadme maksumus ikkagi *ca* kolmandiku võrra väiksemaks turul olemasolevatest standardsetest valmistoodetest, millel samal ajal puudub aga vajalik spetsiifiline funktsionaalsus. **Turul pakutavad seadmed on ebamõistlikult kõrge hinnaga**.

Just eeltoodud põhjused tingisid vajaduse leida probleemile lahendus läbi uue seadme projekteerimise.

Lisaks kõrgele hinnale ning puudulikule funktsionaalsusele on turul olemasolevate seadmete probleemiks veel ka asjaolu, et neid on lihtne tõstukiga vigastada. Seetõttu saab projekteeritav seade olema unikaalne ka konstruktsioonilt, kuna tõsteseadmed ning neid ümbritsev kaitseraam on üksteisest eraldatud, mis kokkuvõttes tagab tõsteseadmetele suurepärase kaitse mehhaaniliste vigastuste eest (Joonis 10). Kuna aga kaitseraam ei mõjuta virnastaja funktsionaalsust ning teda saab käsitleda eraldiseisvana, ei ole käesoleva lõputöö fookuses kaitseraami projekteerimine (ka tõstekäppade liigutamise ning kaubaaluste tsentreerimise süsteeme käsitletakse pealiskaudselt), vaid edaspidi keskendutakse järgnevates peatükkides põhjalikumalt üksnes tõsteseadmete loomisele.

Joonis 10. Lõputöö raames projekteeritav ja valmistatav täisautomaatselt töötav universaalne kaubaaluste virnastaja, mis vastab kõikidele tellijapoolsetele nõudmistele

3.2 Virnastaja valmistamise eelduseks olevad projekteerimistingimused ja parameetrid

Et alustada seadme projekteerimist, tuleb esmalt koostada nõuete loetelu (tabel 2) ehk loetleda seadme funktsioonid, töökeskkonna tingimused, üleüldised arvulised parameetrid ja nõudmised, millele peab valmistatav kaubaaluste virnastaja vastama.

Kuna käesoleva magistritöö raames valmistatav kaubaaluste virnastaja on mõeldud ettevõttesiseseks kasutamiseks, on antud juhul seadme tellija ehk kasutaja ning seadme valmistaja ehk projekteerija ühes isikus. Seega on ülesande püstituse ehk nõuete loetelu koostamisel lähtutud lisaks täpselt teadaolevatele töötingimustele ja funktsionaalsusele ka ettevõtte spetsiifilistest huvidest ning võimalustest, millest olulisemad on:

- Seade peab olema koostatav ja värvitav ettevõtte töökojas, kasutades seal olevaid tööriistu ja vahendeid;

- Seadme komponentide valik on rangelt piiratud ettevõtte teistes masinates kasutatavate standardkomponentidega (nõue, et varuosad oleksid ühildatavad).

Tabel 2. Nõuete loetelu

Nõue	**Väärtus / kommentaar**	**Nõue**	**Soov**
1. Virnastaja funktsionaalsus			
1.1 Kaubaaluste üksteise otsa tõstmine (virnastamine)	Protsess automatiseeritud	X	
1.2 Kaubaaluste etteandmine (virnast ükshaaval aluste väljaandmine)	Protsess automatiseeritud	X	
1.3 Kaubaaluste tsentreerimine	Protsess automatiseeritud	X	
1.4 Integreeritus tootmisliiniga	Digitaalsed väljundid (24 V DC, 2 tk), lisaks Profinet andmeside	X	
1.5 Erineva laiusega kaubaaluste käsitlemine sama seadmega	Laius muudetav tõsteseadmete füüsilise asetuse muutmisega	X	
2. Käsitletavad kaubaalused			
2.1 Kaubaaluste kogus virnastajas	15...24 tk, kogukaaluga kuni 600 kg (NB! Erinevast materjalist alused on erineva kõrguse ja kaaluga)	X	
2.2 Kaubaaluste käsitlus	Etteandmine ning kättesaamine ühekaupa	X	
2.3 Kaubaaluste asetus	Horisontaalne	X	
2.4 Kaubaaluste mõõtmed	Pikkus: 1200 mm Laius: 600...1200 mm Kõrgus: 80... 180 mm	X	
2.5 Masskeskme jaotumine kaubaaluste tornis	Ühtlane, stabiilne	X	
3. Kaubaaluste tõstmine/langetamine			
3.1 Maksimaalne operatsiooni aeg	Kuni 10 s	X	
3.2 Liikumiste juhtimine/piirasendite määramine	Piirasendid seadistatakse andurite kõrguste muutmise abil	X	
3.3 Aluste paralleelsus liikumise ajal	Alus ei tohi seadmes kinni kiiluda	X	
4. **Kaitseraam**			
4.1 Mõõtmed	Maksimaalne kõrgus 2,5 m	X	
4.2 Funktsionaalsus	Tõsteseadme komponendid peavad olema maksimaalselt kaitstud operaatorite või tõstukijuhtide eest. Kaitseraami kuju ning tugevus peab tagama minimaalsed võimalused tõsteseadmete vigastamiseks	X	

5. Virnastaja üldandmed			
5.1 Sügavus	Kuni 1350 mm	X	
5.2 Laius	Kuni 1500 mm	X	
5.3 Kõrgus	Kuni 2500 mm	X	
5.4 Kaal	Minimaalne, erinevate koostude kaal võiks jääda alla 50 kg		X
6. Tõstesüsteem			
6.1 Tõstevõime	Min. 600 kg	X	
6.2 Tösteulatus	Min. 250 mm	X	
6.3 Hooldatavus	Hooldusvaba		X
6.4 IP klass	Seadmel üleüldiselt IP51, lineaarjuhikutel minimaalselt IP60	X	
6.5 Tõstetäpsus	±5 mm, peab olema reguleeritav min ±50 mm ulatuses	X	
6.6 Tööiga	Min. 10 a (koormusel 100 kaubaalust ööpäevas)	X	
6.7 Detailide korrosioonikindlus	Kasutada mittekorrodeeruvaid materjale või vastavaid pinnakattematerjale	X	
6.8 Tõstesüsteemi laiendamise võimalus (nt. kaaluandur)	Kontrolleri vabad sisendid või kontrolleri laiendusmooduli lisamine		X
7. Töökeskkond			
7.1 Keskkond	Tolmune (väga palju väga väikseid *ca* 10 µm läbimõõduga ja kuni 1 mm pikkused puuvillatolmu osakesi). Kuna tolmuosakesi laagritihendid kinni ei suuda pidada, tuleb rakendada vastav metoodika lineaarjuhikute kaitsmiseks.	X	
7.2 Takistused liikumisel	Puuduvad (tagatud aluste tsentreerimisega)	X	
7.3 Töötemperatuur	20°C … 35°C	X	
7.4 Suhteline õhuniiskus	60% ... 85%	X	
7.5 Kõrgus merepinnast	Kuni 1000 m	X	
7.6 Standardkomponendid	Kasutada vaid ettevõtte teistes seadmetes olevaid komponente. Pneumaatika: SMC või Festo. Elektrikomponendid: Siemens, Omron, Datalogic. Lineaarjuhikud: THK. Mehhaanilised detailid ja materjalid: eelistada standardlahendusi ja materjale.	X	

7.6 Koosteosad (materjalid)	Tagatud peab olema korrosioonikindlus. Seadme hind peab mahtuma eelarvesse	X	
8. Elektrisüsteem / automaatika			
8.1 Toitepinge	230 V AC / 50 Hz	X	
8.2 Digitaalsed sisendid (vabad)	24 V DC. 1 tk, et saaks seadme nt distantsilt käivitada		X
8.3 Digitaalsed väljundid (liikumised + alarmid ja teated tehase tsentraalse häiresüsteemiga ühendamiseks)	24 V DC. Min. 1 tk, mis saadab teate, kui seade on tühi või kaubaaluseid täis	X	
8.4 Seadme el. võimsustarve	Max. 0,3 kW		X
9. Finants			
9.1 Hind	Minimaalne (võib kasutada tehase varuosade laos olevaid sobivaid standardkomponente)		X
9.1 Maksimaalne maksumus	3000 EUR (detailide ja komponentide kulu käibemaksuta, lisandub tööjõukulu seadme projekteerimiseks ja koostamiseks)	X	
10. Ajakava			
10.1 Tõsteseadme valmimine	01.09.2021		X
11. Ohutus			
11.1 CE märgis			X
11.2 Teravad nurgad	Keelatud, ei tohi esineda ISO 13715:2017 järgi defineeritavaid teravad nurki	X	
11.3 Kergesti purunevad detailid	Keelatud	X	
11.4 Vastupidavus koormusele	Seadme konstruktsioon peab olema projekteeritud piisava tugevusvaruga, et see ei puruneks koormuse all (varutegur min. 1,5)	X	
11.5 Vastupidavus väliste kokkupõrgete korral	Virnastaja tuleb ümbritseda kaitseraamiga, et tõstuk või ka kahvelkäru ei saaks seadet lihtsasti vigastada	X	
12. Järelteenindus			
12.1 Garantii	2 a (lähtub pneumokomponentidest)		X
12.2 Varuosad	Spetsiaalselt virnastaja jaoks varuosi ei ole vaja, kuna seadmes kasutatakse vaid selliseid komponente, mis on kasutusel ka teistes ettevõtte seadmetes	X	

3.3 Virnastaja projekteerimine lähtuvalt DFX metoodikast

DXF ehk *Design For X* ehk X-keskse projekteerimise metoodika on lihtsustatult tooteloomemetoodika, kus kasutades struktureeritud protsesse ja erinevaid tööriistu luuakse täisväärtuslik toode, arvestades sealjuures igas projekteerimisetapis lisaks toote funktsionaalsusele ka kõigi toodet puudutavate üleüldiste aspektidega. Joonisel 11 on näidatud olulisemad sõlmpunktid, kuidas X-kesksust saab tõlgendada ning millega peab projekteerimisel sellega seostuvalt arvestama.

X-kesksusest lähtuvalt on virnastaja projekteerimisel suurimas fookuses:

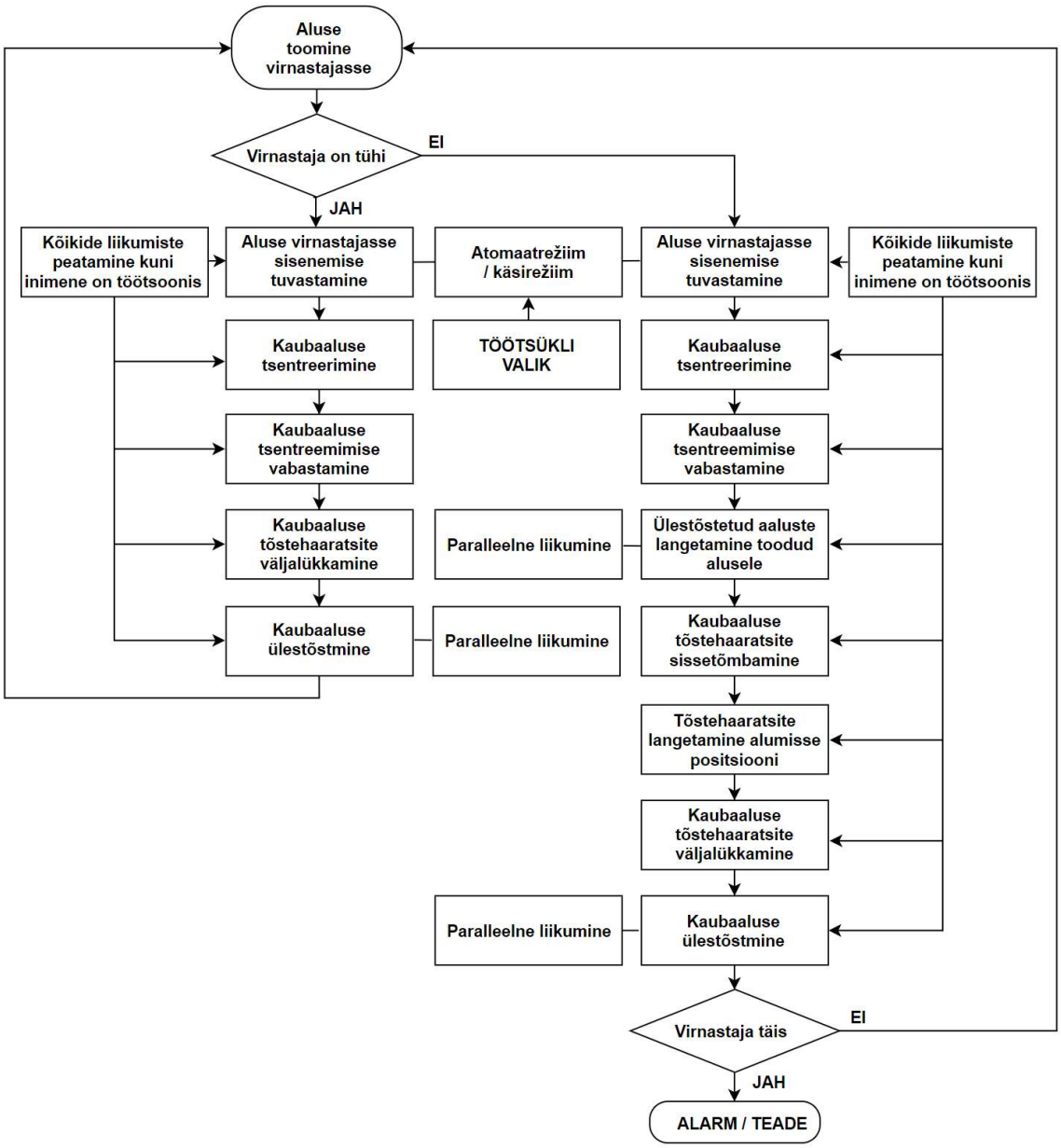
- **Töökindluskeskus** – kõik detailid, komponendid ja komponentide tootjad valitakse hoolikalt. Füüsiliste vigastuste eest kaitseb seadet kaitseraam. Seadme valmistatakse maksimaalselt hoolduskeskselt, mis omakorda tagab töökindluse;
- **Hoolduskesksuse** – seade projekteeritakse selliselt, kõik seadme komponendid on hästi ligipääsetavad, mis muudab seadme hooldustoimingud maksimaalselt lihtsaks. Hooldatavad komponendid markeeritakse ning hooldustööd kirjeldatakse;
- **Kasutuskeskus** – seade projekteeritakse opereerimiseks vaid täisautomaatselt;
- **Hinnakeskuse** – kõik kasutatavad materjalid valitakse maksimaalsekt hea hinna ning mehhaaniliste omaduste suhtega. Kõik virnastaja detailid ja standardkomponendid valitakse vastavalt kasutusfunktsioonile. Ükski virnastaja detail ega komponent ei ole (liigselt) üledimensioneeritud;
- **Koostamiskeskus** – virnastaja projekteeritakse selliselt, et seadme koostamiseks ei oleks vaja eritööriistu ega rakiseid, ehk et masin oleks täielikult kokkupandav tootmisettevõtte töökojas, kasutades seal olevaid töövahendeid;
- **Ohutuskesksuse** – virnastaja projekteeritakse maksimaalselt ohutuks.

Joonis 11. X-keskse projekteerimise olulisemad tõlgendused

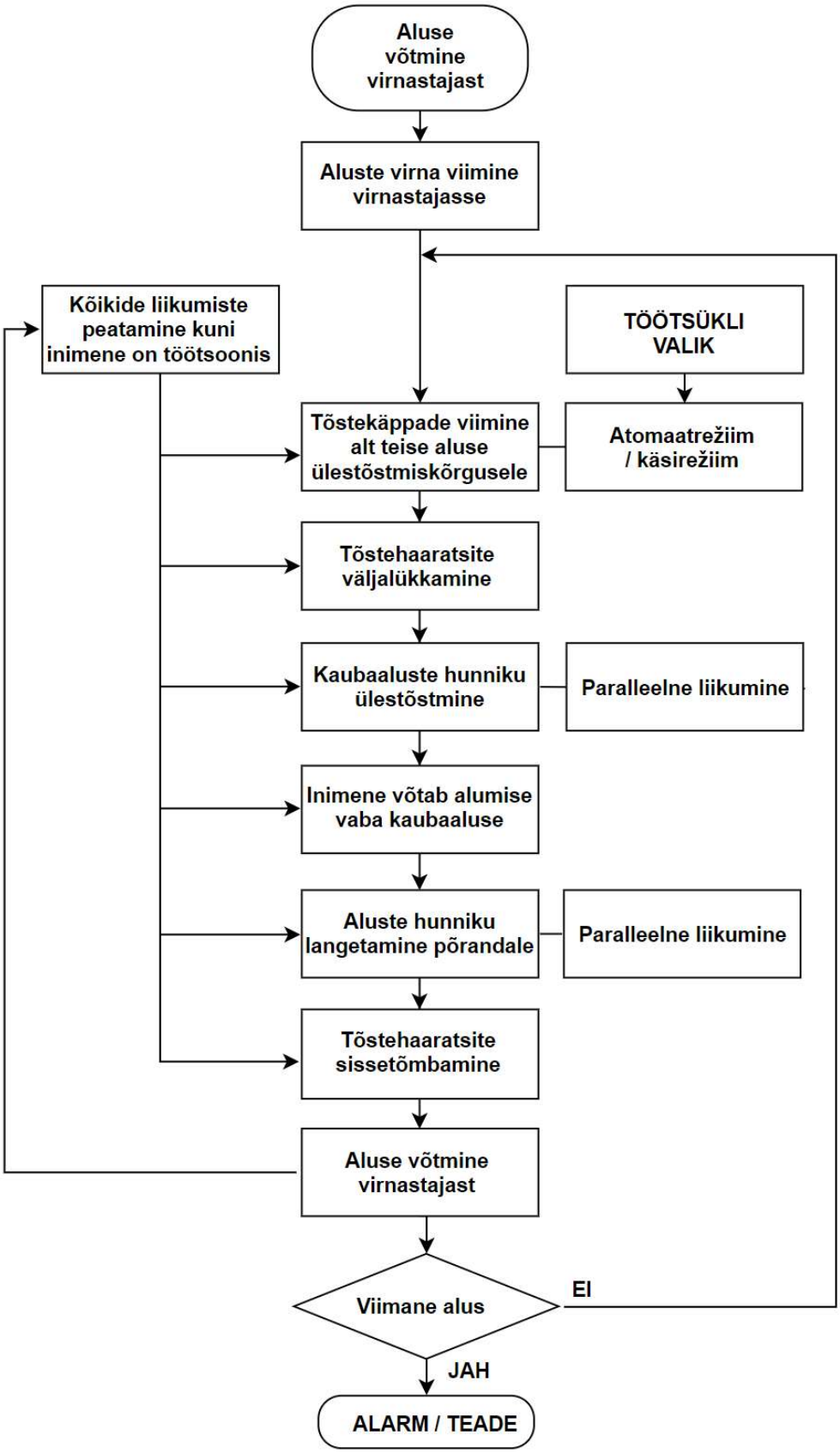
3.4 Virnastaja funktsioonistruktuur

Projekteerimise aluseks on loodava seadme lähteülesandes kirjeldatud tingimuste ehk funktsioonide täitmine. Et vältida mõne probleemi tekkimist ja tegevuse projekteerimisprotsessist väljajäämist, on esmatähtis valmistatava seadme funktsioonide struktureerimise protsess, mis asub ülesande püstitamise ning lahenduste otsimise vahel.

Alljärgnevalt tuuakse funktsioonistruktuurides (Skeem 1 ja Skeem 2) välja virnastaja tööfunktsioonid koos alamfunktsioonidega.



Skeem 1. Seadme virnastamise funktsioonistruktuur

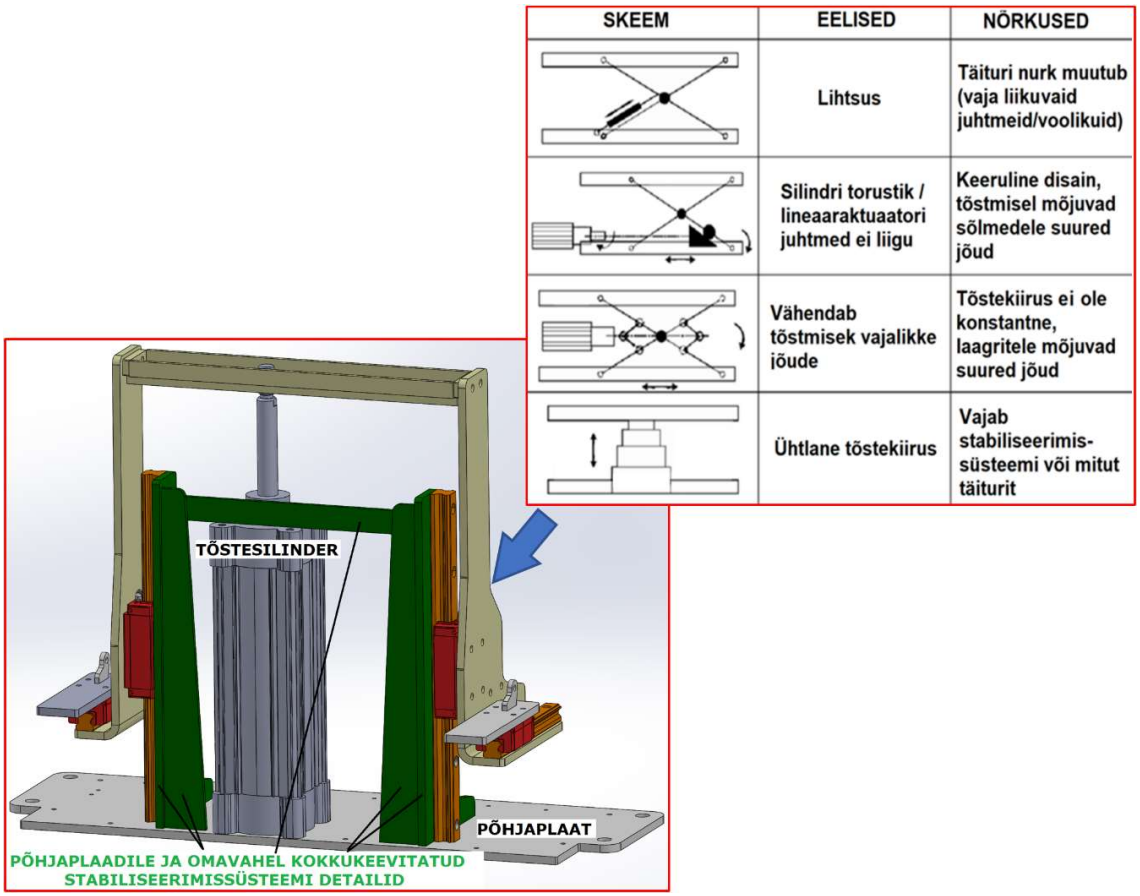


Skeem 2. Seadme kaubaaluste väljaandmise funktsioonistruktuur

3.5 Tõstemehhanismi eskiisid

Eskiis on joonis, mis valmistatakse ilma joonestusvahenditeta, silma järgi ning vabalt valitud mõõtkavas. Eskiisi kasutatakse nii puhta tööjoonise eelvisandina, kui ka arvutiga CAD mudelite loomiseks.

Virnastaja tõsteseadme projekteerimisel oli teoreetiliste ideedena algselt valikus ligi 10 erinevat lahendusvarianti. Väljapakutud eskiisidel (joonis 12) on kujutatud neli kõige tõenäolisemat lahendust, millest tõsteseadme projekteerimiseks sai lähtuvalt ülesande püstitusest (tabel 2) ja hindamiskriteeriumitest (tabel 5) välja valitud viimane variant.



Joonis 12. Ülal tõsteseadme erinevate lahendusvariantide eskiisid ning all väljavalitud kontseptsiooni põhjal loodud tõsteseadme mudel

Kuigi väljavalitud viimase ehk neljanda eskiisvariandi nõrkusena saab nimetada süsteemi stabiliseerimisvajadust, on puuduse kõrvaldamiseks tõsteseadme raamile konstruktsioondetailide näol lisatud vajalik stabiliseerimissüsteem (joonis 12, allolev mudel, rohelised detailid), mistõttu leiab käesolevas töös edaspidi põhjalikumat käsitlemist vaid eelnimetatud lahendusvariant.

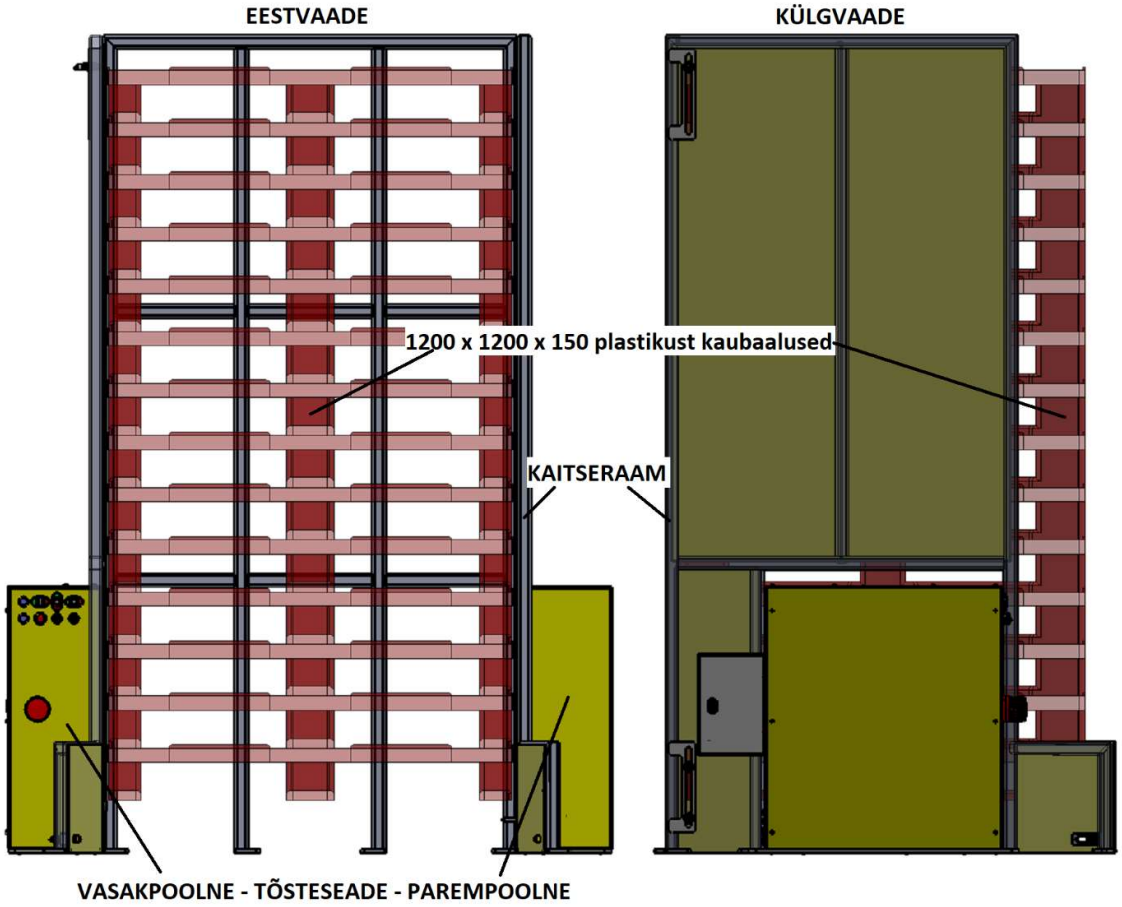
3.6 Virnastaja tõsteseadme lahendusvariandid

Peatüki 3.7 morfoloogilises maatriksis (Tabel 4) on välja pakutud kokku kaheksa erinevat lahendust virnastaja tõstseadme sõlmpunktide projekteerimiseks. Kuna seade peab töötama täisautomaatselt, saab koheselt välistada mehhaanilise lahenduse, mis tähendab, et virnastaja tõstesüsteemi jõuallikas saab olla:

- Elektriline;
- Pneumaatiline;
- Hüdrauliline.

Elektrilise, pneumaatilise ning hüdraulilise süsteemi olulisemad olemuslikud erinevused on toodud tabelis 3.

Kuna virnastaja mõõtmed on rangelt määratud seadme füüsilisest asukohast tulenevate suuruspiirangutega, tuleb seade projekteerida maksimaalselt minimalistlikult (Joonis 13).



Joonis 13. Virnastaja tõsteseadmete ning kaitseraami üldine kontseptsioonlahendus

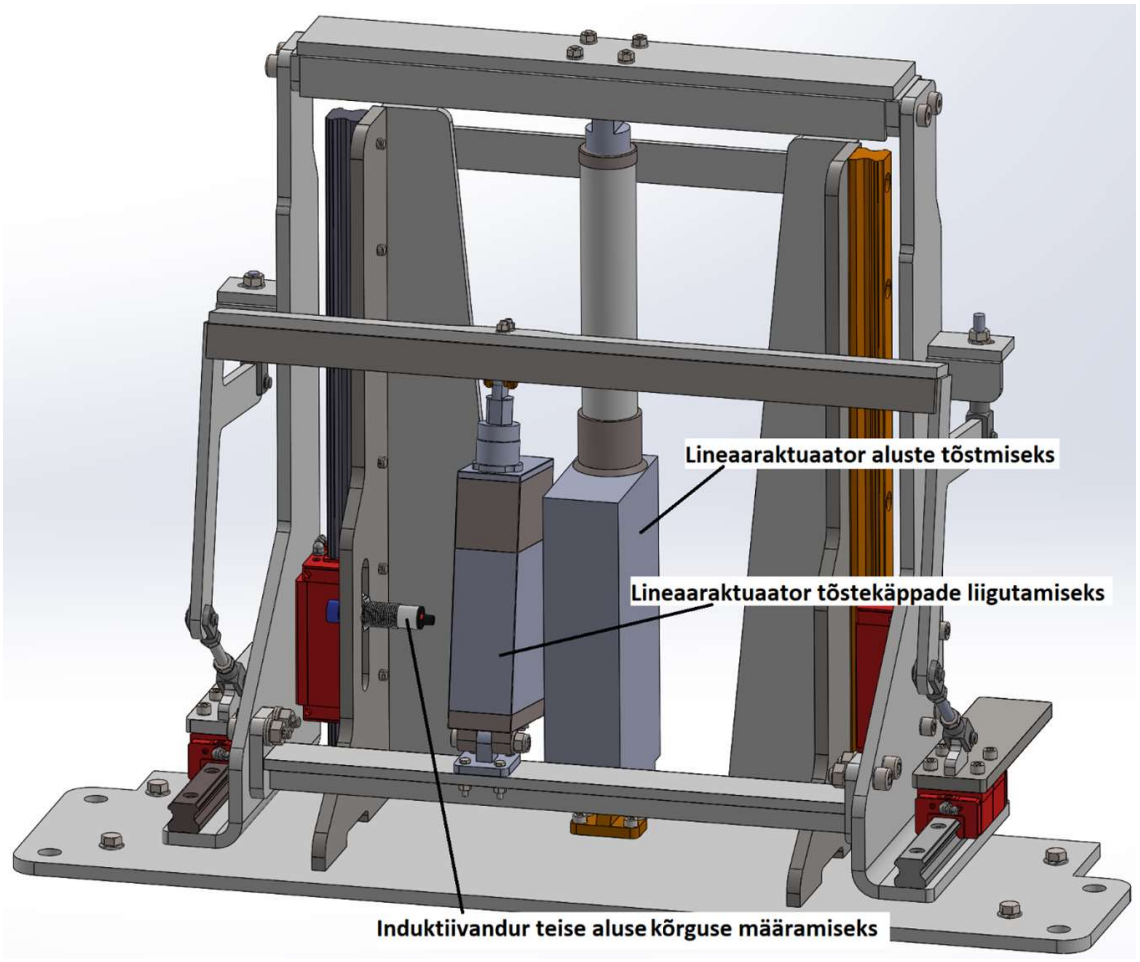
Tabel 3. Süsteemide üleüldine võrdlus*

	Elektriline	Pneumaatiline	Hüdrauliline
Juhtsüsteemi keerukus	Juht- ning kontrollsüsteemid saavad koos töötada erinevates konfiguratsioonides. Teatud juhtudel saab süsteem olla väga lihtne	Lihtsad põhikomponendid (silindrid, klapid)	Lihtsad põhikomponendid, kuid vaja lisaks veel ka hüdrojaama
Positsioneerimistäpsus	Saab olla väga täpne	Väga halb, määratud peamiselt/enamasti silindri käiguga, ei saa kasutada, kui liikumisi on vaja täpselt igas positsioonis kontrollida	Halb, kuid siiski pisut parem kui pneumaatilisel süsteemil (pneumaatikast parem positsioneerimine tuleneb vedeliku mitte kokkusurutavusest)
Liikumiskiirus	Üldjuhul kiire, lineaaraktuaatori puhul aeglane	Väga kiire	Keskmine
Kiirendus	Kiire	Väga kiire	Väga kiire
Süsteemi tippvõimsus	Kõrge	Kõrge	Väga kõrge
Võimekus	Kõrge	Keskmine	Väga kõrge
Löökkoormused	Ei sobi hästi löökoormuste puhul	Talub hästi löökkoormuseid	Tekivad hüdrolöögid, vajadusel tuleb süsteemi hüdrolöökide eest kaitsta
Toiteseadmed	Toitepinge (230 V AC)	Toitepinge (230 V AC) + kompressor (6 bar)	Toitepinge (230 V AC) + hüdropump (200 bar)
Efektiivsus	Kõrge	Madal	Keskmine
Opereerimiskulu	**Madal**	**Keskmine**	**Kõrge**
Seadme hind	**Kõrge**	**Madal**	**Kõrge**
Hoolduskulu	**Madal**	**Keskmine**	**Kõrge**
Hooldusvajadus	Piirdub peamiselt puhastamise ning kontaktide kontrollimisega	Hooldusvajadus sõltub süsteemi keerukusest ja oluliselt ka töökeskkonnast. Võimalik väga hästi teostada ennustavat või seisundipõhist hooldust (komponentide suruõhulekkeid saab väga lihtsasti ultrahelimeetodil varajases staadiumis avastada)	Hooldusvajadus sõltub süsteemist ja keskkonnast. Võimalik osaliselt teostada ennustavat või seisundipõhist hooldust (vajalik võtta regulaarselt õliproove)
Tõrkekindlus	Suurepärane	Hea	Hea
Eluiga	Pikk	Keskmine, eluiga sõltub ka töökeskkonnast ja hooldusest	Keskmine, eluiga sõltub ka töökeskkonnast ja hooldusest
Müra	Vaikne	Keskmine müratase	Kõrge müratase

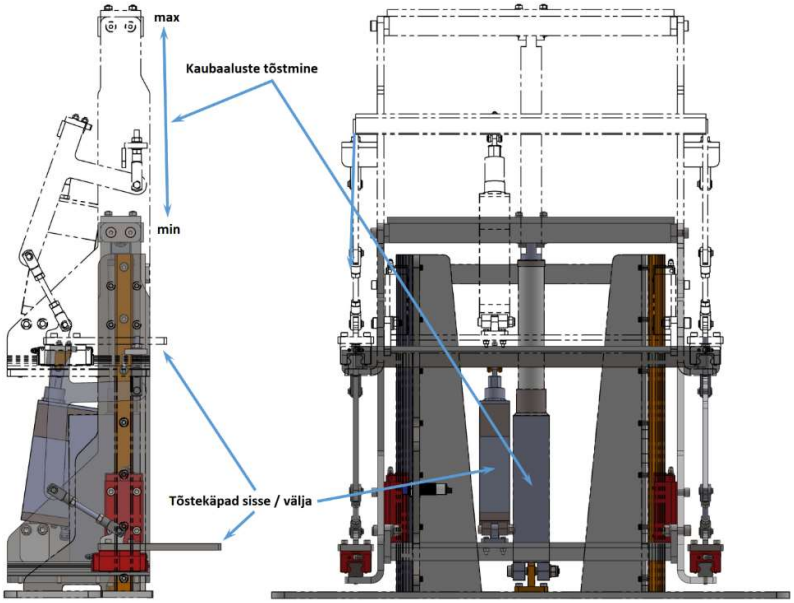
** Tabel 3-s antud hinnangud on suhtelised ning võivad teatud juhtudel ka oluliselt erineda tabelis näidatust (nt kui elektrisüsteemis kasutada servomootorit vs lineaaraktuaatorit). Kuigi tabelis tehakse palju üldistusi, on tabeli koostamisel võrdluste tegemisel mõningatel juhtudel (nt toiteseadmed reas sulgudes olevad väärtused) silmas peetud vaid virnastajat.*

3.6.1 Lahendus 1 - elektromehaaniline ajamiga tõsteseade

Virnastaja elektromehaanilise tõsteseadme mudel on kujutatud joonisel 14, kus ajamiteks on valitud Saksamaa tootja Elero lineaaraktuaatorid (tõstmiseks vastavalt tüüp „Junior 2" ja käppade liigutamiseks tüüp „Junior 1s"). Tõstemehhanismi aktuaatori keskpositsiooni määramiseks (et ülestõstetud kaubaaluste virna saaks langetada uuele alusele ning tõstekäpad välja tõmmata ja siis need uuesti välja lükata juba alumise kaubaaluse tõstmiseks), on tõsteseadme elektromehaanilisele versioonile lisatud induktiivandur, mis peatab tõsteajami määratud (seadistatavas) asukohas. Kuigi induktiivanduriga positsiooni määramine on võrreldes nt. enkoodriga varustatud lineaaraktuaatorist oluliselt ebatäpsem, on antud lahenduse suureks eeliseks lihtsus, mis samas tagab tõsteajamile siiski piisava positsioneerimistäpsuse.



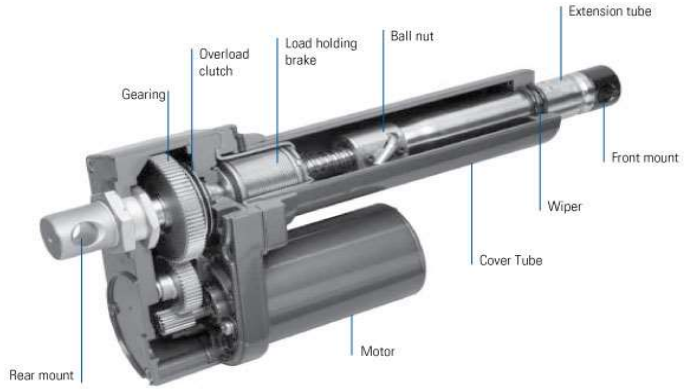
Joonis 14. Elektromehaanilise tõsteajamiga virnastaja ajamid ning andurid



Joonis 15. Elektromehaanilise ajamiga tõsteseadme kinemaatika

Elektromehaanilise virnastaja olulisemateks tugevuseks madal opereerimiskulu ning minimaalne hooldusvajadus. Samuti on elektrilise tõsteseadmete toite tagamine kõige lihtsam ning kauakestvam arvestades asjaolu, et tõstekäppade aktuaator asub üles-alla liikuval tasapinnal (liikuva asukohaga elektrilist tõstekäppade aktuaatorit on oluliselt lihtsam toita võrreldes pneumaatilise või hüdraulilise aktuaatoriga, joonis 15).

Elektromehaanilise virnastaja peamiseks ning kõige olulisemaks puuduseks on seadme oluliselt kallim lõpphind võrreldes just pneumaatilise versiooniga. Virnastajale lisanduv märkimisväärne hinnalisa (kokku *ca* 1500 €) tuleneb peamiselt aktuaatori keerukusest (Joonis 16). Samuti on elektriline aktuaator (Jumo 2) väga aeglane, mis teeb seadme töötsükli võrreldes pneumaatilise või hüdraulise lahendiga kordades pikemaks.

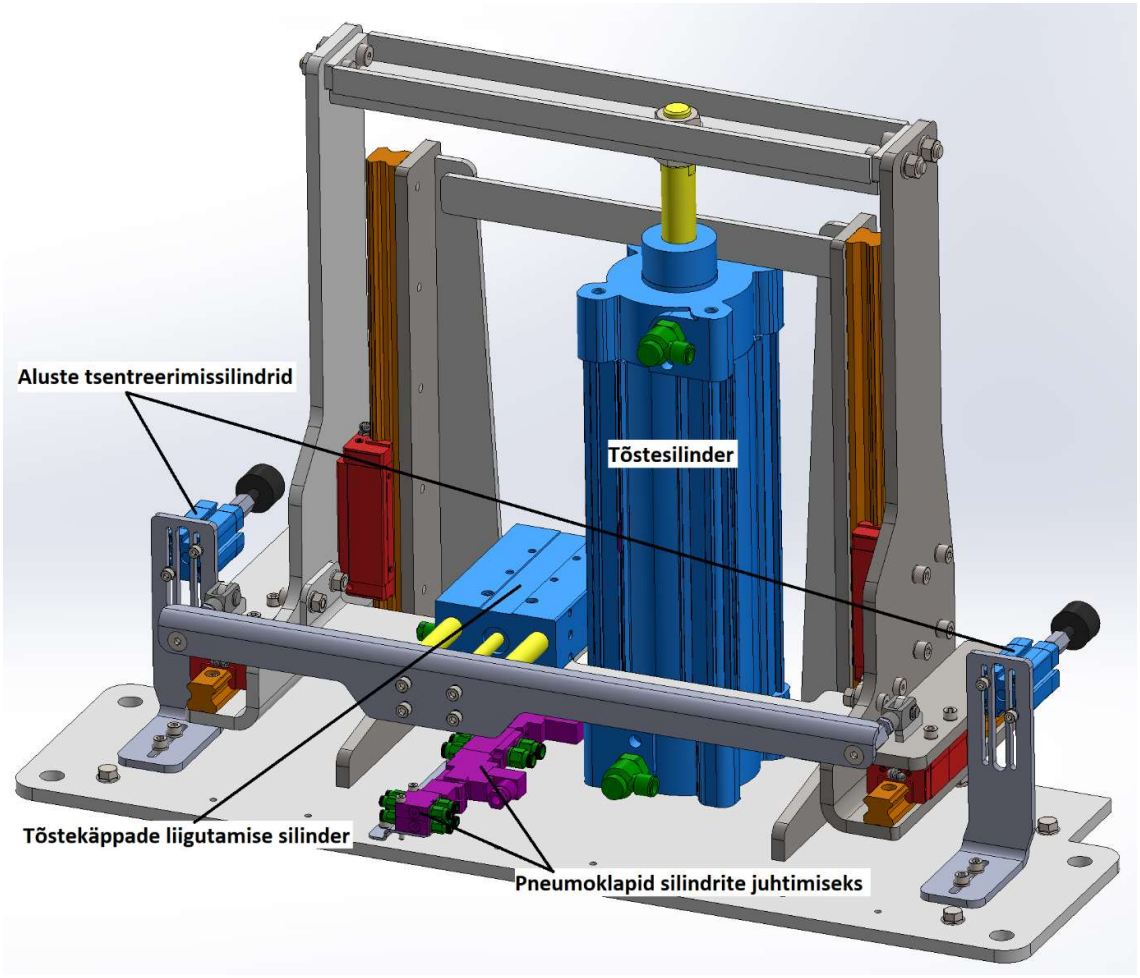


Joonis 16. Tüüpilise elektrilise lineaaraktuaatori olulisemad komponendid [8]

Kuigi elektriline tõsteajam oli virnastaja ehitamisel algselt esmane valik, siis vastavalt süsteemide võrdlustabelile (Tabel 3) ning lähtuvalt hindamismaatriksi tulemustest (Tabel 5) ei osutunud elektriline tõsteajam siiski kokkuvõttes kõige parimaks.

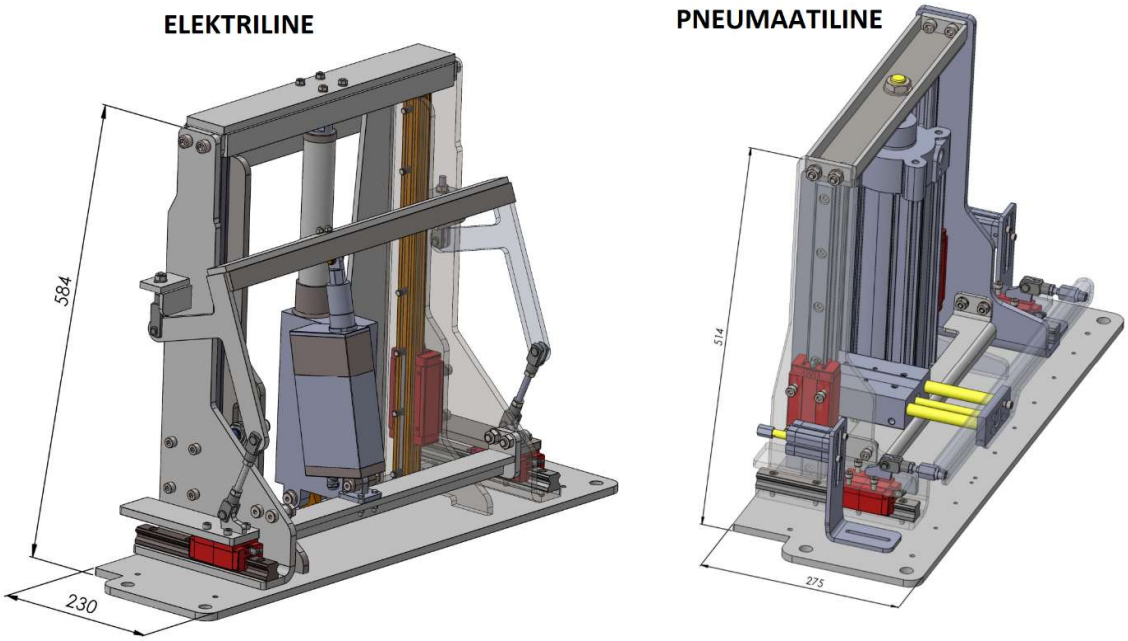
3.6.2 Lahendus 2 - pneumaatilise aktuaatoriga tõsteseade

Virnastaja pneumaatilise tõsteseadme projekteeritud mudel on kujutatud joonisel 17. Vastavalt hindamistulemustele (peatükk 3.8) osutus kokkuvõttes parimaks lahenduseks just pneumaatilise tõsteseadmega versioon, mistõttu on joonis 17 detailne (lõppversioon) ning seal on näidatud lisaks tõstesilindrile ja käppade liigutamise süsteemile ka seadme külgedel asuvate kaubaaluste tsentreerijate pneumosilindrid.



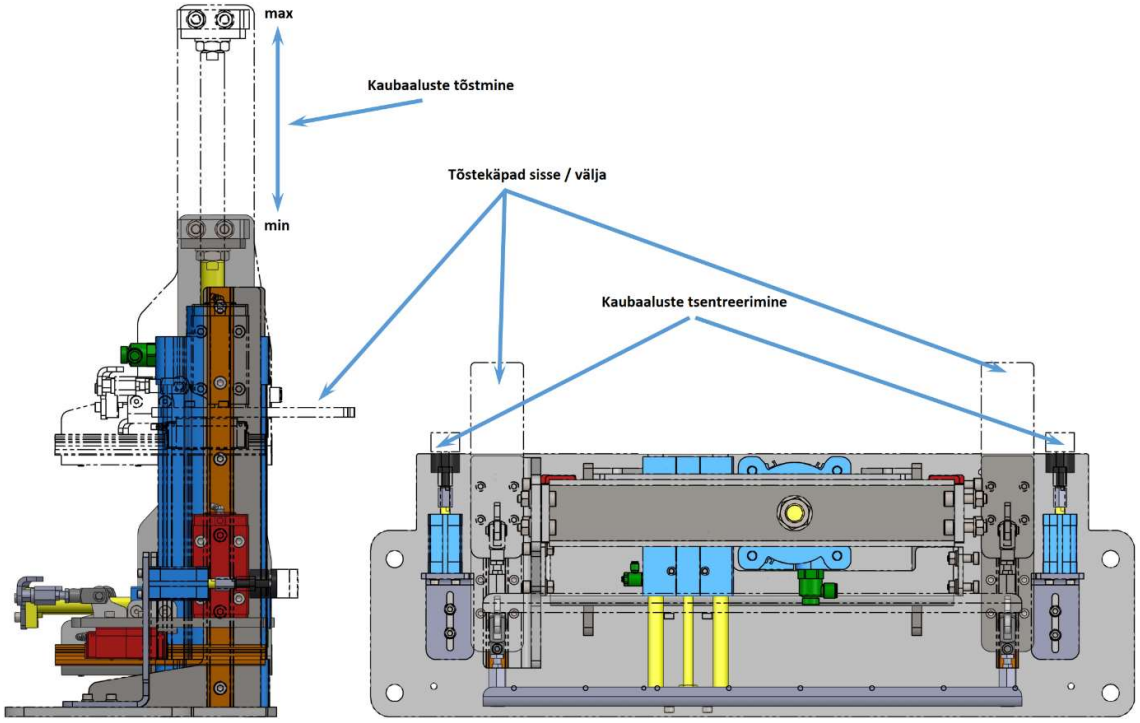
Joonis 17. Pneumaatilise virnastaja mudel

Pneumaatilise virnastaja olulisemateks eeliseks on töötsükli suur kiirus, seadme madal hind ning väiksed hooldus- ja remondikulud. Pneumaatilise tõsteseadme puudustena saab välja tuua halvema positsioneerimistäpsuse (võrdluses just elektrilise seadmega) ning oluliselt madalama efektiivsuse (liikumised teostatakse suruõhu abil, mille tootmiseks kasutatakse palju elektrienergiat). Võrreldes elektrilise tõsteseadmega on muutunud ka pneumaatilise seadme mõõdud – lähtuvalt pneumosilindrite asukohast ning mõõtmetest on pneumaatiline tõsteseade on 45 mm laiem, kuid 70 mm madalam (joonis 18).



Joonis 18. Elektrilise ja pneumaatilise virnastaja tõsteseadme mõõtude erinevused

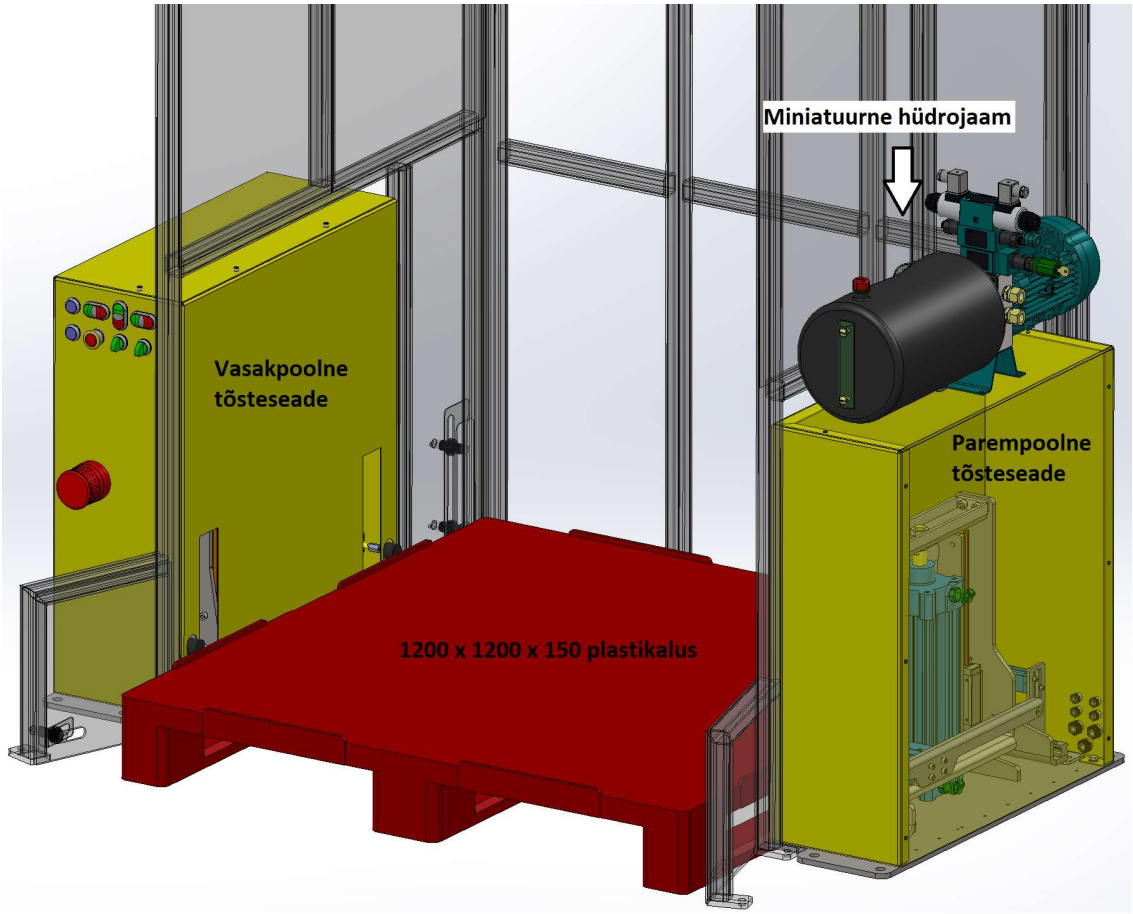
Pneumaatilise tõsteseadme kinemaatika on näidatud joonisel 19, kus punktiirjoontega on näidatud tõsteseadme maksimaalsed liikumisulatused.



Joonis 19. Pneumaatilise virnastaja tõsteseadme kinemaatika

3.6.3 Lahendus 3 - hüdraulilise aktuaatoriga tõsteseade

Virnastaja hüdraulilise tõsteseade lihtsustatud mudel on kujutatud joonisel 20. Seadme jõuallikaks on valitud miniatuurne hüdrojaam, mille saab paigaldada tõsteseadme korpusele, mida sel juhul tuleb vastavalt tugevdada. Tõsteseadme liikumised saab teostada hüdrosilindritega analoogselt pneumaatilise versiooniga.



Joonis 20. Autori poolt väljapakutud hüdraulilise virnastaja kontseptsioonlahend

Hüdraulilise tõsteseadme ainsaks arvestatavaks eeliseks pneumaatilise ja elektromehaanilise seadme ees on oluliselt suurem ajami võimekus. Võrdluses teistega on hüdrauliline virnastaja lõpphind aga tuntavalt kallim, seadme disain kõige keerulisem (lähtuvalt peamiselt lisanduvast hüdrojaamast ning antud tõsteseadme puhul lisandub ka hüdrovoolikute komplitseeritud paigaldus) ning hoolduskulud teistest märksa kõrgemad. Just eeltoodud põhjused olid olulisemad, miks hüdraulisise tõsteseadmega lahendus sai hindamismaatriksis (Tabel 5) kõige madalama lõppskoori. Seega, kuna antud juhul tagasid projekteerimistingimustest lähtuva võimekuse ka elektromehaaniline ning pneumaatiline tõsteseade, jäi hüdrauliline versioon alternatiivseks lahenduseks juhuks, kui peaks tekkima vajadus ehitada väga suure (1000+ kg) tõstevõimega seade.

3.7 Morfoloogiline maatriks

Morfoloogilise skeemi abil leitakse funktsioonistruktuurist funktsioonikandjad. Projekteeritava virnastaja olulisemad sõlmed tuuakse tabelis eraldi välja ning vaadatakse, missugune lahend oleks võimalik või mõttekas antud seadme jaoks valida. Koostatud morfoloogilise maatriksi aluseks on virnastaja funktsioonistruktuur.

Tabel 4: Tõsteseadme morfoloogiline maatriks

	Lahendusvariandid						
nr	**Osafunktsioon**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
1	**Materjalid (kaitsmine keskkonna/korrosiooni eest)**	Roostevaba teras	Alumiinium	Plastik	Titaan	Värvitud teras	Komposiitmaterjal
2	**Tõstesüsteemi jõuallikas**	Elektrimootor reduktoriga	Hüdrosilinder	Pneumosilinder	Lineaarajam	Inimene (nt. kangi mehhanismi abil)	Elektromagnet
3	**Tõstmise mehhanism**	Ülekandeta, otse täituri pealt	Trapetskeere	Kangimehhanism	Hammasülekanne	Tigumehhanism	Rihmülekanne
4	**Tõstemehhanismi asukoht**	Seadme all	Taga	Individuaalne (kahel küljel)	Küljel (ühendatud hoovastikuga)	Ülal	Kombineeritud
5	**Liikumise suunamine**	Pöördlaagrid	Lineaarlaagrid	Täituri geomeetria	Juhtvardad	Magnetlaagrid	Hammasülekanne
6	**Kaubaaluse tsentreerimine**	Geomeetriaga	Mehaanilised tsentreerijad	Pneumaatilised tsentreerijad	Eletromagnetid	Hoovastik	Vaakum (iminapad)
7	**Tõstemehhanismi kinnitamine raamile**	Neetimine	Keevitamine	Kiilutamine	Magnetitega	Poltimine	Liimimine
8	**Ohutus**	Optilised sensorid	Avariilüliti (mehhaaniline)	Helisignaal	Kombineeritud	Laser (ohutusskänner)	Ohutusmatt

3.8 Virnastaja lahendusvariantide hindamismaatriks

Hindamismaatriksi (Tabel 5) abil leitakse morfoloogilises maatriksis (Tabel 4) väljatoodud lahenduste seast sobivaim. Lahendusi hinnatakse enda poolt määratud kriteeriumite põhjal. Hindamismaatriksis toodud numbrite vasted on leitavad morfoloogilisest maatriksist.

Hindamismaatriksi sisendiks on kolm võimalikku lahendusvarianti (Peatükk 3.6), kus väljapakutud lahendused on koostatud lähtuvalt kõige ratsionaalsematest morfoloogilise skeemi komponentide kooslusest.

Tabel 5. Hindamismaatriks

Funktsioonide numbrid →	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
	Osafunktsioonide lahendusvariantide numbrid morfoloogilisest tabelist							
Tõsteseadme lahendus 1	1	1	4	3	5	1	5	1/2/3
Tõsteseadme lahendus 2	5	3	1	3	5	3	2	1/2/3
Tõsteseadme lahendus 3	5	2	1	3	5	5	2	1/2/3

Lahenduse nr	**Funktsioon**	**Hind**	**Töökindlus**	**Mass**	**Kujundus**	**Ohutus**	**Summa**
Lahendus 1 *Elektriline tõstemehhanism*	2	2	3 minimaalne hooldus	3 *minimaalne*	2	3	**15**
Lahendus 2 *Pneumaatiline tõstemehhanism*	3 *suur kiirus*	3 *hind mõistlik*	2	3 *minimaalne*	3 *lihtsus*	3	**17**
Lahendus 3 *Hüdrauliline tõstemehhanism*	3	1	1	2	1	3	**11**

Hindamismaatriksi hinnete selgitus: 3 – hea, 2– keskmine, 1– kesin

Lähtuvalt hindamismaatriksi tulemustest osutus parimaks pneumaatiline lahendus, mille projekteerimisele töö järgnevalt keskendub.

4. VIRNASTAJA KOOSTAMISEKS SOBIVATE MATERJALIDE JA STANDARDKOMPONENTIDE VALIK

Lisaks nõuete loetelus (Tabel 2) toodule on virnastaja detailide valmistamiseks kasutatavate materjalide üleüldised valiku alused tähtsuse järjekorras järgmised:

1. Materjali sobivus (nt. mehhaanilised tugevusomadused, keevitatavus, töödeldavus, viimistletavus, vastupidavus, korrosioonikindlus);
2. Materjali saadavus;
3. Materjali hind;
4. Taaskasutatavus ja ümbertöödeldavus.

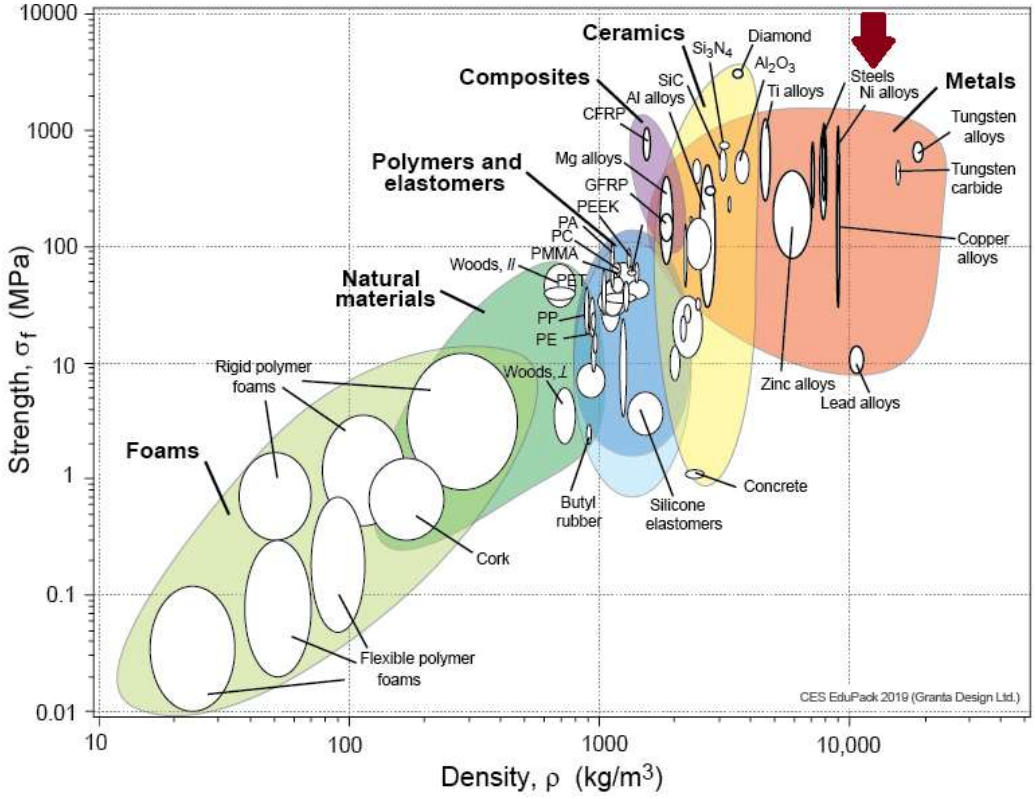
Virnastaja valmistamiseks kasutatavate mehhaaniliste ja pneumaatiliste standardkomponentide üleüldised valiku alused lisaks nõuete loetelus (Tabel 2) toodule on järgmised:

1. Komponentide saadavus (tarneaeg);
2. Kõrge kvaliteet (virnastaja puhul kasutatakse vaid tuntud Euroopa või Jaapani tootjate komponente);
3. Maksumus.

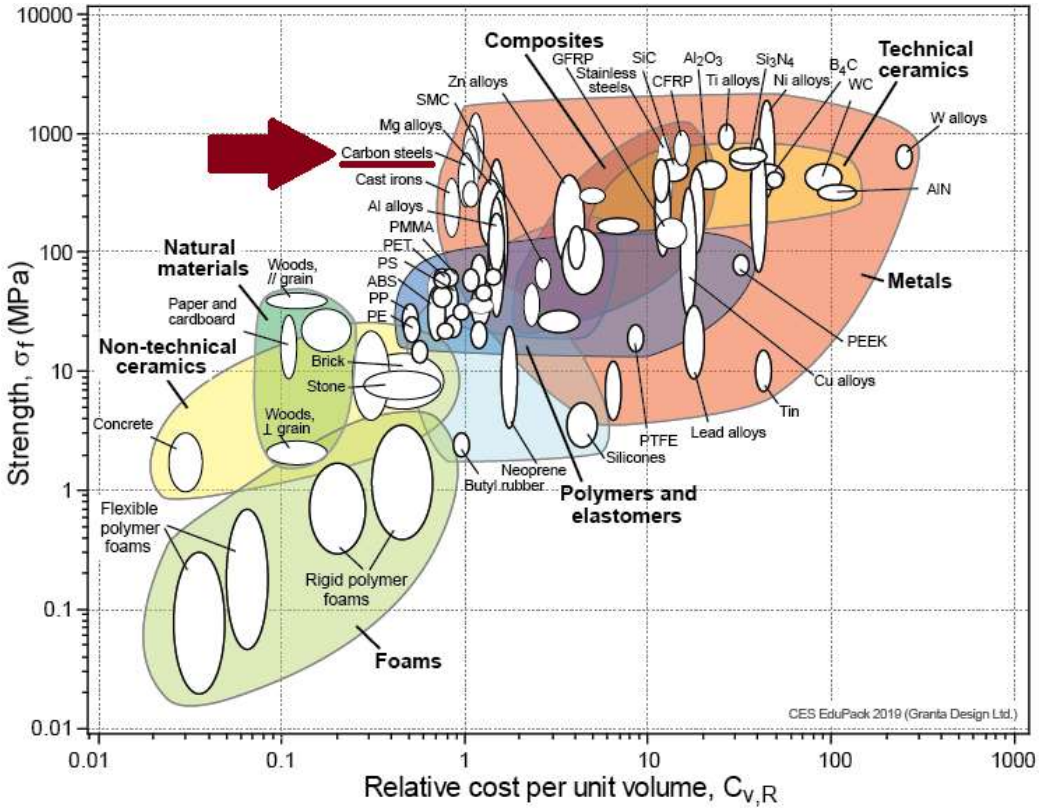
4.1 Mehhaaniliste komponentide valiku alused

Virjastaja tõsteseadme detailide ja kaitseraami valmistamiseks on põhimõtteliselt sobivaid materjale mitmeid. Kuna aga materjal peab olema mehhaaniliselt suhteliselt tugev (tõsteseadme detailidel ja kaitseraamil voolepiir kindlasti kõrgemal kui 300 Mpa), hästi töödeldav, hea saadavuse ning mõistliku hinnaga, siis vastavalt joonistele 21 ja 22, kus on näidatud materjalide tugevuse ja tiheduse ning tugevuse ja suhtelise hinna graafikud, jäävad valikusse siiski vaid metallid.

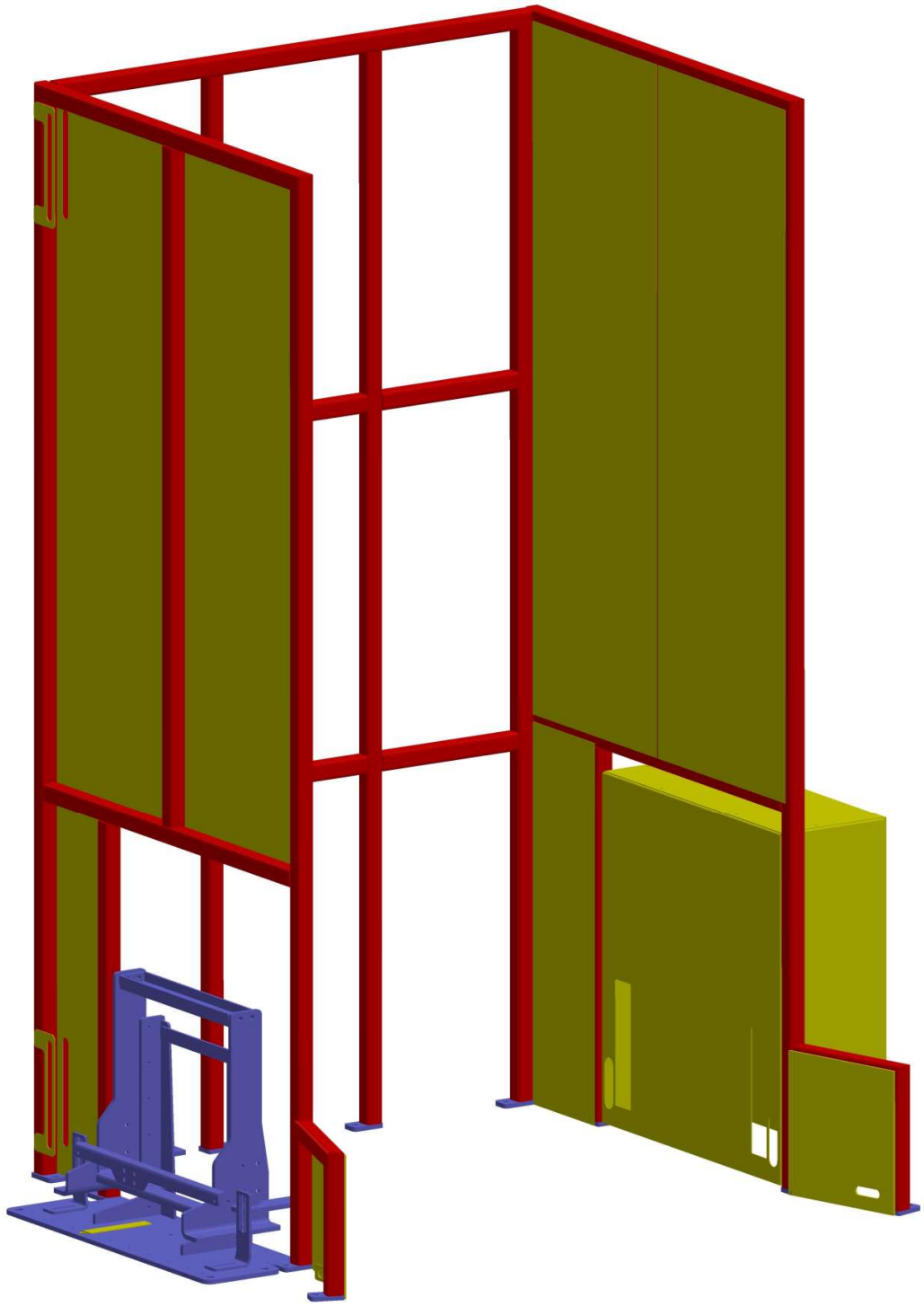
Lähtuvalt peamiselt just hinna ning tugevusomaduste omavahelisest suhtest, jäävad metallidest omakorda ainsana valikusse süsinikterased, millest virnastaja tõsteseadme ja kaitseraami ehitamiseks sobivamaks alagrupiks on heade sitkus ning tugevusomadustega konstruktsioonterased. Virnastaja erinevate detailide valmistamiseks kasutatavad terase margid on näidatud joonisel 23.



Joonis 21. Materjalide tugevuse (Mpa) ja tiheduse (kg/m^3) graafiline võrdlus [9]



Joonis 22. Materjalide tugevuse ja suhtelise kaaluhinna graafiline võrdlus [9]



– DC01, teraslehest lõigatud detailid, paksused 1 mm ja 2 mm

– S355 J2H, nelikanttorud 40x40x4

– S355 J2H, lõigatud/painutatud/keermestatud detailid terasplaadist, paksused 5...10 mm

Joonis 23. Virnastaja ning kaitseraami ehitamiseks kasutatud materjalid

4.2 Virnastaja lineaarjuhikute valiku alused ja kontrollarvutused

Tulenevalt väljavalitud tõsteseadme kontseptsioonist teostatakse masina olulisemad liikumised lineaarjuhikute abil. Seega tulevad kõik kaubaaluste tõstmisel seadmele ülekanduvad reaktsioonijõud läbi lineaarjuhikute, mistõttu on nende korrektne valik kriitilise tähtsusega.

Käesolevas peatükis on ülevaade standardlahendustena pakutavatest lineaarlaagritest koos virnasta tõsteseadmele kõige paremini sobivate juhikute valikute aluspõhimõtetega.

Tabel 6. Enamlevinud lineaarlaagrid ja nende olulisemad erinevused

	Tüüp	Hõõrdetegur μ*	Hind	Tugevused	Nõrkused
	Lineaarlaagrid, lineaarpuksid	0,001...0,005	madal / keskmine	Suur täpsus, talub suuri koormuseid, suur jäikus, madal hõõrdetegur, saab olla kompaktne, madal hõõrdetegur, saab kasutada suurematel kiirustel, pikk eluiga	Ei saa kasutada väga mustas keskkonnas (mustus pääseb laagrisse), vajab määrimist, saab kasutada vaid karastatud juhtvõllil, tekitab liikumisel teatud määral müra
	Lineaarkelgud, lineaarjuhikud	0,02...0,004	keskmine / kõrge	Suur täpsus, talub suuri koormuseid, suur jäikus, saadaval väga palju erinevaid konfiguratsioone (suurused, kinnitused ja jõudude suunad), kompaktne, madal hõõrdetegur, on olemas miniatuurseid suurusi, laagri otstesse saab paigaldada lisavarustust - nt. määrdepesad automaatmäärimiseks või tihendid mustuse tõrjumiseks, pikk eluiga	Siinid on üldjuhul kallid, laagrid vajavad määrimist (kui ei ole automaatmäärimist), väga peenike mustus (nt. puuvillatolm) pääseb paratamatult laagrisse (kui puuduvad siine katvad lõdvikud)

	Juhikteed	0,005	kõrge	Kõrge koormustaluvus, suur täpsus, kompaktne, madal hõõrdetegur	Kallis, ei meeldi tolmune keskkond, juhiktee peab olema kaitstud
	Juhiklaagrid	0,002...0,004	keskmine	Suur koormustaluvus, hea täpsus, kompaktne, madal hõõrdetegur	Suhteliselt kallis, ei meeldi tolmune keskkond
	Rulljuhikud	0,005...0,02	madal / keskmine	Keskpärane täpsus, suur koormatavus, madal hõõrdetegur, talub moment- ja külgsuunalisi jõude, rullikutele saab paigaldada tihendid - seega saab laagrid määrida elukestvalt, vaikne ja ühtlane liikumine, talub teatud määral mustust (kui laagritel on tihendid)	Ei ole väga täpne, ei saa kasutada suurtel kiirustel, juhiktee muudab laagri kalliks ning paljudel juhtudel paigalduse keeruliseks, suurem (staatiline) hõõrdetegur, mis avaldub liikuma hakkamisel
	Erinevat tüüpi plastiklineaarlaagid	0,1...0,4	madal	Vaikne, võimalikud on kiired liikumised, väike inertsijõud, suur kiirendus, talub mustust, ei korrodeeru, summutab lööke, mittemääritav, kergesti vahetatavad ja odavad puksid	Kõrge hõõrdetegur, halb löök- ja staatilisekoormuse talumine, madal täpsus, lühike eluiga
	Keraamilised lineaarlaagrid	0,09...0,15	madal	Vaikne ja ühtlane liikumine, võimalik lineaarne ning pöörlev liikumine, talub teatud määral mustust, mittemagnetiline, talub kõrgeid temperatuure, saab olla isemääriv, hea kemikaalikindlus, ei korrodeeru	Suhteliselt kõrge hõõrdetegur, halb löökkoormuse talumine

** Hõõrdetegur saab olla tabelis esitatud väärtustest ka erinev, kuna erinevad tootjad kasutavad erinevaid tehnoloogiaid ja materjale, mis mõjutavad oluliselt toodete tehnilisi parameetreid. Seega on tabelis toodud hõõrdetegurid indikatiivsed mitte absoluutsed.*

Enamlevinud lineaarlaagrite erinevused on toodud tabelis 6. Virnastaja lineaarlaagrite valikul on arvesse võetud järgmiseid olulisemaid tegureid (sulgudes üldised näited):

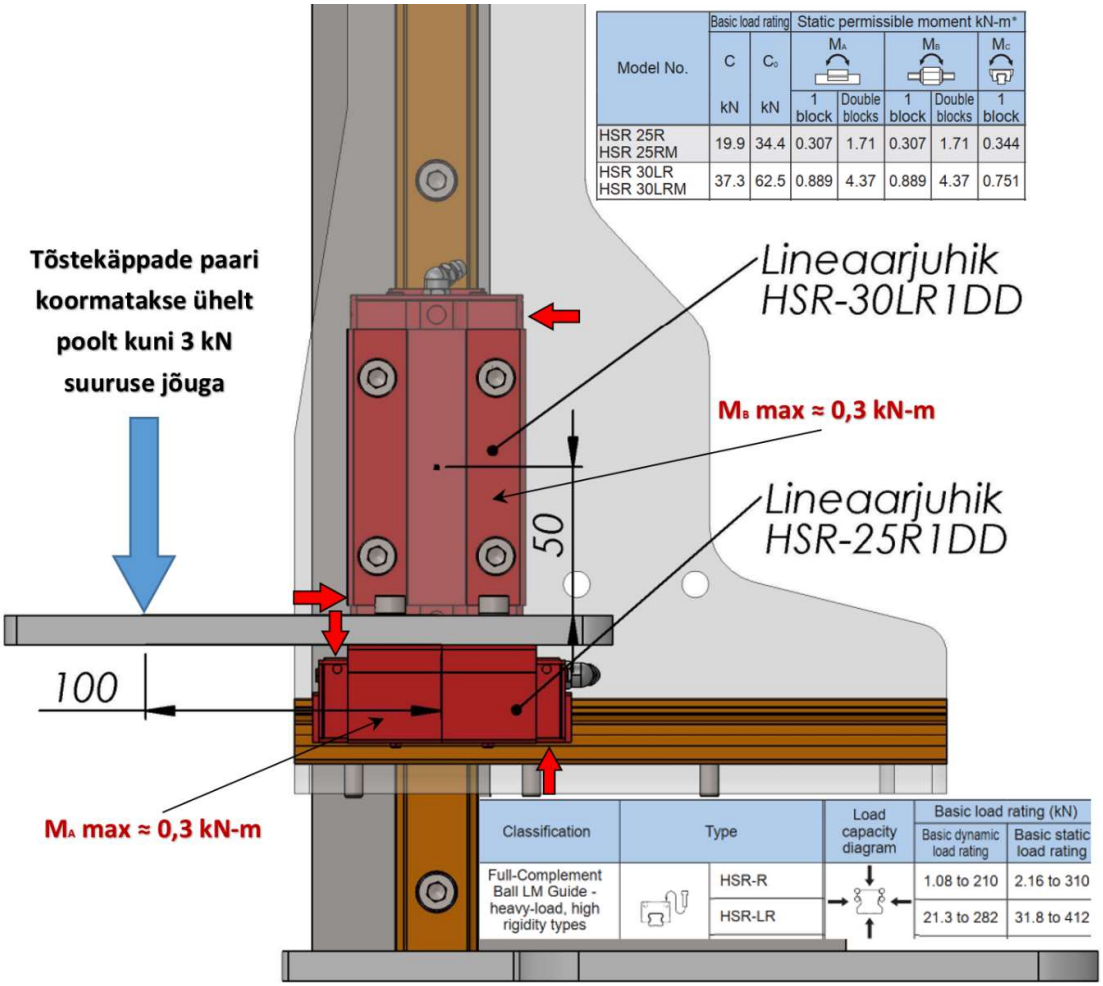
- Koormus (koormuse suunad ja liigid, arvestama peab kindlasti ka inertsijõududega);
- Liikumistäpsus;
- Laagri kinnitusviis ja võimalused;
- Töökeskkond (nt. tolmune, kõrge temperatuur, alarõhk, jne);
- Korrosioonikindlus (nt. niiske keskkond, toiduainetööstus, jne);
- Suurus (kompaktne, suured koormused, jne);
- Hõõrdetegur (mõjurid: kuullaager, plastiksiinid, määritav, mittemääritav, jne).

Valikukriteeriumitest lähtuvalt osutusid virnastajale sobivateks THK HSR seeria lineaarjuhikud (Joonis 24) ja seda järgmistel põhjustel:

- Suurepärane ja ühtlane koormustaluvus kõikides suundades (pealt, alt, vasakult, paremalt);
- Juhikul olemas sobiv paigaldusviis ja võimalused teiste detailide kinnituseks;
- Talub hästi väiksemaid paigaldusel tekkivaid paralleelsusega seonduvaid ebatäpsusi;
- Suurepärane tolmukindlus (virnastajasse paigaldatud laagritel on otstes topelt tihendid);
- Võimalik kasutada samal siinil pikemaid (LR tähistus) laagri versioone, mistõttu suureneb nii süsteemi eluiga ja täpsus kui ka koormustaluvus.

Joonis 24. Vasakul virnastaja pikendatud kerega ning topelttihenditega juhiklaagerid (THK HSR LR1DD seeria) ning paremal HSR-25R1DD lineaarjuhik.

Kuna virnastaja liikumistel lineaarjuhikutele mõjuvad jõud ja nende suunad ei muutu, on juhikute arvutamisel oluline arvestada vaid staatiliste koormustega (virnastatud ülestõstetud kaubaaluste hoidmine) ning aluste ülestõstmisel (kiirendusel) tekkivate dünaamiliste jõumomentidega. Seega saab lineaarjuhikute valimiseks kasutada staatilisi ja dünaamilisi koormustaluvuse andmeid (Joonis 25).



Model No.	Basic load rating C kN	Basic load rating C_0 kN	Static permissible moment kN-m* M_A 1 block	M_A Double blocks	M_B 1 block	M_B Double blocks	M_C 1 block
HSR 25R HSR 25RM	19.9	34.4	0.307	1.71	0.307	1.71	0.344
HSR 30LR HSR 30LRM	37.3	62.5	0.889	4.37	0.889	4.37	0.751

Classification	Type		Load capacity diagram	Basic load rating (kN) Basic dynamic load rating	Basic static load rating
Full-Complement Ball LM Guide - heavy-load, high rigidity types		HSR-R		1.08 to 210	2.16 to 310
		HSR-LR		21.3 to 282	31.8 to 412

Joonis 25. Virnastajale mõjuvad koormused, koormuste suunad ning lineaarlaagrite olulisemad koormustaluvuse andmed [10].

Virnastaja lähteandmetest tulenevalt peab seade olema projekteeritud vähemalt 10 a pikkuse elueaga (arvestusega 100 tõstet ööpäevas), mis tähendab, et virnastaja käpad liiguvad selle ajaga edasi-tagasi 730000 korda läbides sealjuures *ca* 300 km pikkuse teekonna. Lineaarjuhukute nominaalset eluiga L saab arvutada järgmiselt [10]:

$$L = \left(\frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C}{f_W} \cdot \frac{C}{P_C}\right)^3 \cdot 50 = \left(\frac{0{,}9 \cdot 1 \cdot 0{,}81}{2} \cdot \frac{19900}{3000}\right)^3 \cdot 50 = 707\ km \quad (4.1)$$

Kus:

C – dünaamiline koormus (N)

P_C – arvutatud koormus (N)

f_H – materjali kõvaduse faktor

f_T – temperatuuri faktor

f_C – kontakti faktor

$f_W - K$oormuse faktor

Lineaarjuhiku tööaega tundides L_h saab arvutada aga järgmiselt [10]:

$$L_h = \frac{L \cdot 10^6}{2 \cdot l_s \cdot n_1 \cdot 60} = \frac{707 \cdot 10^6}{2 \cdot 220 \cdot 0{,}0877 \cdot 60} = 3{,}05 \cdot 10^5\ h\ \rightarrow \approx 35\ aastat \quad (4.2)$$

Kus:

$l_s -$ lineaarjuhiku käigu pikkus (mm)

$n_1 -$ töötsüklite arv minutis

Arvutustulemustest (valem 4.2) lähtuvalt oleks virnastaja käppade lineaarjuhikute eluiga tagatud isegi maksimaalkoormusel (virnastaja tegelik keskmine töökoormus on kordades väiksem) rohkem kui kolmekordse varuga. Kindlasti tuleb aga silmas pidada, et lineaarjuhikute eluiga on tagatud vaid juhul, kui laagreid määritakse õigesti, õige määrdeainega ning õige määrimisintervalliga (määrimisprotseduur, määrdeaine tüüp ja selle kogused ning intervallid on toodud virnastaja hooldusjuhendis, peatükk 9.5).

4.3 Elektrikomponentide valiku alused

Virnastaja olulisemad elektrikomponendid on järgmised:

- Toiteplokk (vastavalt PLC, andurite ja pneumojaotite võimsustarbimisele on optimaalne toiteplokk nimivooluga 5 A ning väljundpingega 24 V DC);
- Kaitselüliti (virnastaja toiteks kasutatakse faasipinget, mis on 230 V AC. Seega tulenevalt seadme toiteploki võimsusest, mis toidab kõiki virnastaja elektrisüsteemi komponente, on optimaalseks valikuks kahepooluseline, 2 A nimivooluga ning B karakteristikuga kaitselüliti);
- PLC (valiku alused on toodud peatükis 5.3.1);
- Andurid - liikumiste ja objektide tuvastamiseks (valiku alused on toodud peatükis 5.3.2);.

4.3.1 PLC valiku alused

Virnastaja puhul on tegemist suhteliselt lihtsa seadmega, mille juhtimise saaks põhimõtteliselt üles ehitada ka kasutades vaid releeloogikat. Arvestades aga kaasaegsete tööstuskontrollerite taskukohaseid hindasid ning nende programmeerimislihtsust, on virnastaja juhtimiseks kindlasti mõttekas kasutada mõnda lihtsamat tööstuskontrollerit.

Virnastaja juhtkontrolleri valik on tehtud lähtuvalt järgnevast (virnastaja valikutingimused on toodud kaldkirjas):

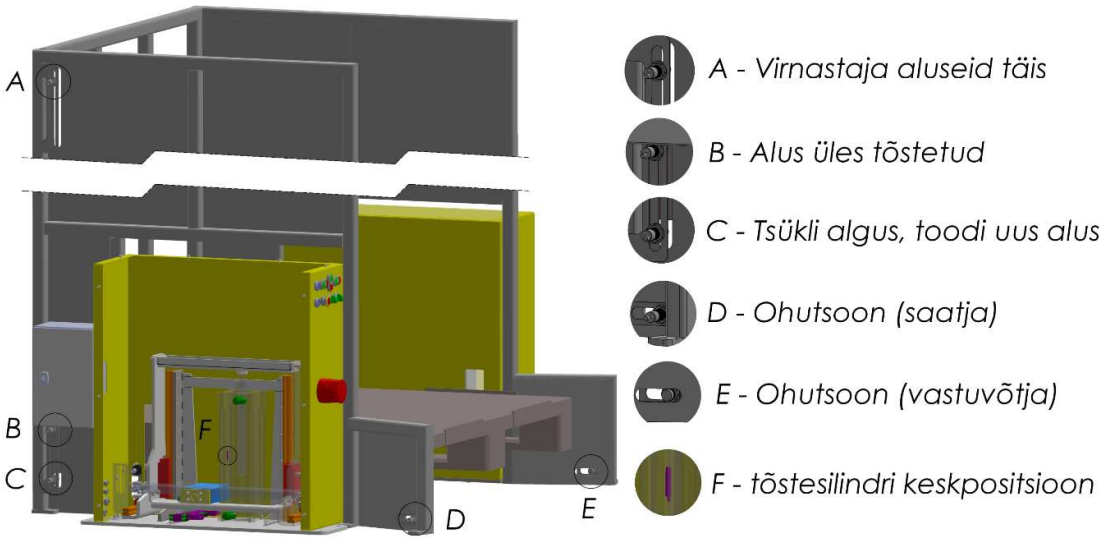
- Tootja, millest sõltub ka kontrolleri programmeerimistarkvara – *kuna käesoleva töö autoril on oskused ja kogemused Siemensi, Mitsubishi ja Unitronicsi tööstuskontrollerite programmeerimiseks, siis sellest lähtuvalt on valikus vaid eelnimetatud tööstuskontrollerite tootjate erinevad PLC-d*;
- Tüüp – kompakt, moodul, kassett, OPLC, tööstusarvuti, kaart- või tarkvaraline PLC – *kõige paremini sobib (hinna ja suuruse poolest) virnastaja lihtsust arvestades kompaktne PLC*;
- Võimekus (mälumaht ja kontrollerisse integreeritud võimalused) ning laiendatavus – *kuna virnastaja on väga lihtne seade, ei ole PLC võimekus oluline ning seadme juhtimiseks piisab ka lihtsast/odavast tööstuskontrollerist*;
- Sisendid/väljundid (tüüp ja arv) – *nuppudelt ja anduritelt tulevate signaalide jaoks on vaja kokku 14 digitaalset sisendit ning klappide juhtimiseks ja signaalide edastamiseks peab virnastaja PLC-l olema 10 digitaalset väljundit (tüübilt sobivad nii relee- kui ka transistorväljundid);*
- Tsükliaeg – *sobib PLC, mille tsükliaeg on ≤ 500 ms*;
- Ühilduvus ehk andmevahetus – *profinet + DO (2 tk), et saata virnastaja olekuinfot tehase tsentraalsesse HMI-sse, et kuvada töötsükleid, millest juhindub seadme hooldus. Digitaalväljundeid kasutatakse olekualarmide edastamiseks*;
- Hind – *võimalikult väike*.

Lähtuvalt projekteerimisnõuetest on oluline, et virnastaja komponendid oleksid analoogsed teistes tehase seadmetes kasutatavatega (nõue tuleneb asjaolust, et virnastaja tõttu ei peaks suurendama tehase tagavaraosade laos artiklite arvu). Kuna tehase erinevates seadmetes on kasutusel Siemensi, Lenze, Wago ning Trützschleri kontrollerid, siis just lähtuvalt töö autori tööstuskontrollerite programmeerimise oskustest ja kogemustes jäid virnastaja PLC valikusse nimetatud brändidest vaid Siemensi tooted ja valikukriteeriumitest lähtuvalt LOGO! ning SIMATIC S7 1200 seeria kontrollerid. Mõlema nimetatud Siemensi PLC programmeerimiseks on tehases olemas ka tarkvara – esimesel juhul saab kasutada LOGO!Soft Comfort V8.0 tarkvara ning S7 1200 kontrollerile juhtprogrammi loomiseks on olemas TIA Portal V16 tarkvarapakett.

Kuigi LOGO! seeria kontrolleri hind on pisut (*ca* 100 €) odavam ning ka programmeerimine lihtsam, otsustas töö autor valida virnastaja juhtkontrolleriks siiski SIMATIC S7-1200 1214C (6ES7214-1AG40-0XB0) kontrolleri ja seda peamiselt põhjusel, et LOGO! ei toeta Profinet protokolli ning samuti on TIA portal tarkvara väga kasutajasõbralik, mistõttu on lihtne ja mugav ühes keskkonnas luua virnastajale vajalik juhtprogramm ning visualiseerida hooldusinfot edastavad puutetundlikud HMI ekraanid.

4.3.2 Andurite valiku alused

Virnastaja liikumiste, olekute ning objektide tuvastamiseks kasutatakse kokku kuute erinevat andurit (Joonis 26).



Joonis 26. Virnastajale andurite asukohad ja funktsioonid

Kuigi virnastajas plastikust kaubaaluste kohalolu tuvastamiseks (positsioonid A, B, C) sobiksid tööpõhimõttelt ka nt. mehhaanilised-, ultraheli- või mahtuvusandurid, on virnastajasse valitud objektilt tagasipeegelduvad tausta mahasurumisega optilised andurid (Datalogic S51-MA-5-C10-PK), mis tuvastavad objekti värvist, materjalist ning välistest häirijatest sõltumatult kuni 1 m kauguselt. Lähtuvalt PLC sisendist on valitud andur PNP väljundiga ning töötab sobilikul 24 V DC toitepingel. Lülituselt on andur universaalne, mis tähendab, et tal on olemas nii NO kui ka NC kontaktid (väljundi tüüp sõltub M12 pistikus kasutavatest jalgadest).

Ohutsooni (positsioonid D ja E) anduritena on kasutusel samuti optiliste andurite paar, kus üks anduritest on saatja ning teine vastuvõtja.

Tõstesilindri keskpositsiooni tuvastamiseks tuleb kasutada andurit, mis füüsiliselt sobib silindril olevasse profiilsoonde. Tööpõhimõttelt on enimkasutatavad *reed* lülitid, halli efektil põhinevad andurid ning pooljuhtandurid (AMR ja GMR). Kuna tõstmiseks kasutatakse SMC silindrit, siis lähtuvalt tootevalikust (*reed* lülitid ja pooljuhtandurid) eelistati pooljutandurit (pikk eluiga, hea tundlikus, suur häire- ja vibratsioonikindlus).

Lähtuvalt hooldatavusest ning lihtsatest keskkonnanõuetest on kõik valitud optilised andurid pistikühendusega, et neid oleks vajadusel võimalik kiiresti asendada.

4.4 Pneumaatika komponentide valiku alused ja arvutused

4.4.1 Pneumosilindrite valiku alused ja arvutused

Virnastaja tõstesüsteemi täituriks on pneumosilinder, mistõttu on õige silindri valik lähtuvalt seadme funktsionaalsusest esmatähtis. Samuti dikteerib tõstesilinder lähtuvalt oma kujust ning kinnitusviisidest väga paljus ka virnastaja tõsteseadme detailide suuruse ning konstruktsioondetailide kujuparameetrid.

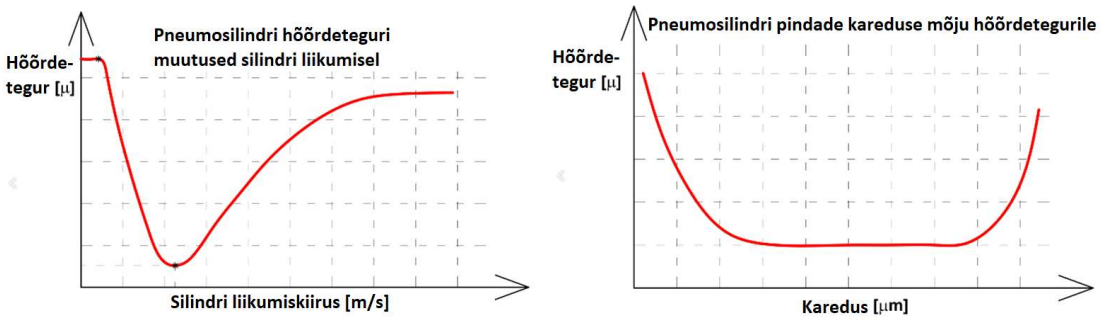
Lähtuvalt virnastaja projekteerimistingimustes (peatükk 3.2) toodud nõuetest on tõstesilindri valiku alusteks järgmised kriteeriumid:

- Silindril peab olema vajalik võimekus ja kiirus, et tagatud oleks ettenähtud tõstevõime ning tsükliaeg;
- Silinder peab olema kahepoolse lineaarse liikumisega (*double acting*) ning sobiva liikumisulatusega, et kaubaaluseid saaks nii tõsta kui ka langetada seadme projekteerimistingimustes näidatud ulatuses;
- Silindril peavad olema sobivad võimalused tema kinnitamiseks seadme raamile ning samuti peab olema silindri varre külge võimalik mugavalt kinnitada tõsteseadme konstruktsioondetailid;
- Silindril peab olema keskpositsiooni tuvastamise võimalus, millest lähtuvalt peab olema võimalik kinnitada silindrile vastav positsiooniandur ning samuti peavad silindri korpus ning kolb olema sobivatest materjalidest, et kolvi asukohta oleks võimalik läbi silindri korpuse seina tuvastada;
- Disain – kuna lähtuvalt suruõhusüsteemi rõhust peab vajaliku võimekuse saavutamiseks virnastaja tõstesilindri läbimõõt olema suhteliselt suur, peab silinder (korpus) olema kompaktse ehitusega ning kindlasti väga lihtsasti lahtivõetav, et lekete tekkimisel saaks vahetada silindri tihendid (suurematel silindritel on tihendite remondikomplektid kordades odavamad uuest silindrist, seega tasub paratamatult tekkivate suruõhulekete tekkimisel suuremaid silindreid üldjuhul remontida, mitte välja vahetada);
- Standardsus, millest lähtuvalt on tõstesilindriks valitud ISO 15552 standardil põhinev pneumosilindrite seeria. ISO 15552 silindrite seeriast leiab tõsteseadmele vajaliku standardse käigupikkusega silindri, koos sobivate kinnitusviisidega nii silindri enda kui ka tõsteseadme detailide kinnitamiseks. Samuti on ISO seeria ehk standartsete ehk samasuguste parameetritega silindrid olemas kõikide tuntud pneumosilindrite valmistajate tootevalikus;

- Tootjaks SMC, et täita üheaegselt nii kvaliteedi ja hinna kui ka saadavuse nõuded (suurepärase kvaliteediga tootja, Eestis parima saadavusega, võrreldes nt Festoga ka oluliselt soodsam).

Kuna virnastaja tõstesilinder liigutab suuri raskuseid, on mõistlik seadme kaitsmiseks ehk löökide summutamiseks ja purunemiste vältimiseks kasutada pneumosilindrisse sisseehitatud amortisaatoreid, mis toimivad vaid juhul, kui silindri kolb on jõudnud piirasendi vahetusläheduses, kus ta saab liikuda vaid (reguleeritava kiirusega) aeglustusega. Samuti kaitsevad amortisaatorid seadet ka näiteks suruõhu süsteemis tekkivate probleemide korral (nt suruõhukatkestus, pneumovoolikute purunemine, jne).

Olenevalt rakendusest on üleüldine soovitus pneumosilindrite valikul jätta jõuvaruks 33...100 % arvutuslikust teoreetilisest jõust [11]. Üheks olulisemaks jõuvaru lisamise vajaduse põhjuseks on silindri tihendite poolt tekkiv hõõrdejõud, kuhu normaaltingimustel ehk töörõhul vahemikus 0,4 kuni 0,8 MPa (4...8 bar) kaob *ca* 3...20% silindri poolt arendatavast teoreetilisest jõust [12]. Silindri hõõrdejõu suurus oleneb peamiselt tihendi materjalist, kujust, tüübist ning pindade karedusest ja kasutatavast määrdeainest (joonis 27).



Joonis 27. Pneumosilindri hõõrdeteguri olulisemad mõjurid [13]

Seega nt 100 mm kolvi läbimõõduga silindri reaalseks tõstejõuks F_r võib lugeda (valem 4.3):

$$F_r = p \cdot A \cdot 0{,}7 = 600000 \cdot 7{,}85 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}7 = 3297\ N \quad (4.3)$$

Kus:

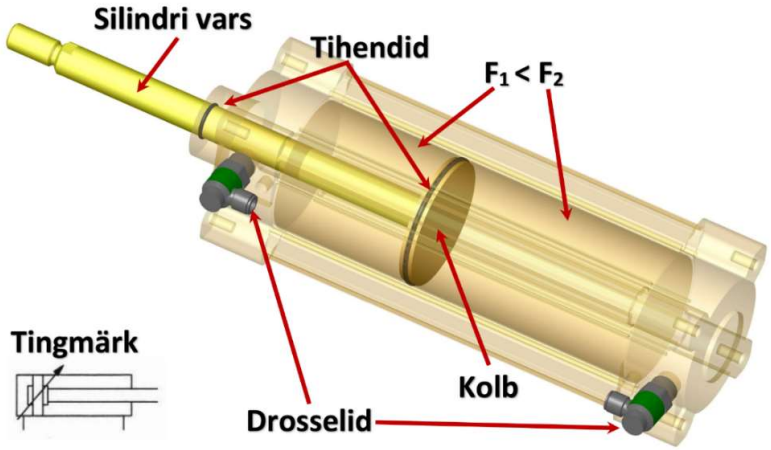
F_r – pneumosilindri kolvi poolt arendatav jõud (N)

p – kasutatav töörõhk (Pa)

A – silindri kolvi pindala (mm^2)

0,7 – varutegur

Pneumosilindri sisemistest kadudest (tihendid) on üldjuhul märksa suuremad välised mõjurid, millest virnastaja puhul on olulisemad konstruktsioondetailide kaal ning lineaarjuhikute hõõrdetegur, millele lisanduvad erinevad pneumosüsteemi kaod alates ummistunud filtritest lõpetades suruõhusüsteemis paratamatult aja jooksul tekkivate leketega. Seega kuna virnastaja tõstemehhanismi komponentide kaal on *ca* 20 kg, siis vastavalt virnastaja lähtetingimustele on optimaalne kasutada tõstesilindritena kahte (vasakus ja paremas tõsteseadmes kummaski üks silinder) 100 mm kolvi läbimõõduga SMC ISO seeria pneumosilindrit CP96SBB100 (joonis 28).



Joonis 28. Valitud tõstesilindri (CP96SDB100-250) läbilõige koos tingmärgiga

Kuna virnastaja tõstekäppade edasi-tagasi liikumised toimuvad koormuseta (takistuseks vaid lineaarjuhik), sobiks sellesse positsiooni põhimõtteliselt ka väike, nt. 10 mm kolvi läbimõõduga silinder. Samas kinnitatakse tõstekäppade silinder tõsteraamile horisontaalselt, mistõttu peab väljalükatud (100 mm pikkuses) silindri kolb suutma taluda käppade tugiplaadi poolt vertikaalsihis tekitatavat momenti (*ca* 1,5 Nm). Seega osutus heaks valikuks antud positsiooni juhikutega ning 25 mm kolvi läbimõõduga Festo DFM-25-100-P-A-GF silinder.

Kaubaaluste tsentreerimissüsteemi komponentide valikul on oluline, et silindrid jõuaksid betoonpõrandal lükata 31,5 kg kaaluvat plastikust kaubaalust. Seega tuleb ületada kõva plastiku ning kuiva ja sileda betoonpõranda hõõrdetegur, milleks võib valida 0,3 [14]:

$$F_f = \mu N = 0{,}3 \cdot 315 = 94{,}5\ N \tag{4.4}$$

Kus:

F_f – hõõrdejõud (N)

μ – betoonpõranda hõõrdetegur

N – plastikaluse kaal (N)

Vastavalt arvutustulemusele (valem 4.4) on hõõrdejõud F_f 94 N, mis tähendab, et tsentreerimissilindriteks sobivad 20 mm kolvi läbimõõduga Festo ADN-20-25-A-P-A-S2 silindrid. Kuna silindreid on tsentreerimissüsteemis mõlemal pool kaks, suudavad nad kaubaaluseid betoonpõrandal liigutada suure varuteguriga (valem 4.5).

$$F_{ADN-20-25-A-P-A-} = p \cdot A \cdot 0{,}7 = 600000 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}7 = 131{,}9\ N \quad (4.5)$$

Virnastaja käppade liigutamise mehhanismi ning kaubaaluste tsentreerimissüsteemile sobivad Festo silindrid on näidatud joonisel 29.

Joonis 29. Vasakul kaubaaluste tsentreerimissilinder ADN-20-25-A-P-A-S2, paremal juhikutega silinder DFM-25-100-P-A-GF tõstekäppade liigutamiseks.

Lisaks silindrite poolt rakendatavale jõule on oluline leida ka virnastaja töötsükli jooksul pneumosüsteemi toitmiseks vajalik õhukulu Q [m^3]. Süsteemi erinevaid komponente läbiv suruõhu kohus (pneumosüsteemides tuuakse välja tavaliselt kulu liitrites → 1 liiter = 10^{-3} m^3) on leitav järgmise valemi (5.6) abil:

$$Q = Q_F + Q_r = \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot [p+1] + \pi \cdot ({r_1}^2 - r_2^2) \cdot h \cdot [p+1] \quad (4.5)$$

Kus:

$Q_F -$ pneumosilindri õhukulu silindri väljalükkamisel (m^3)

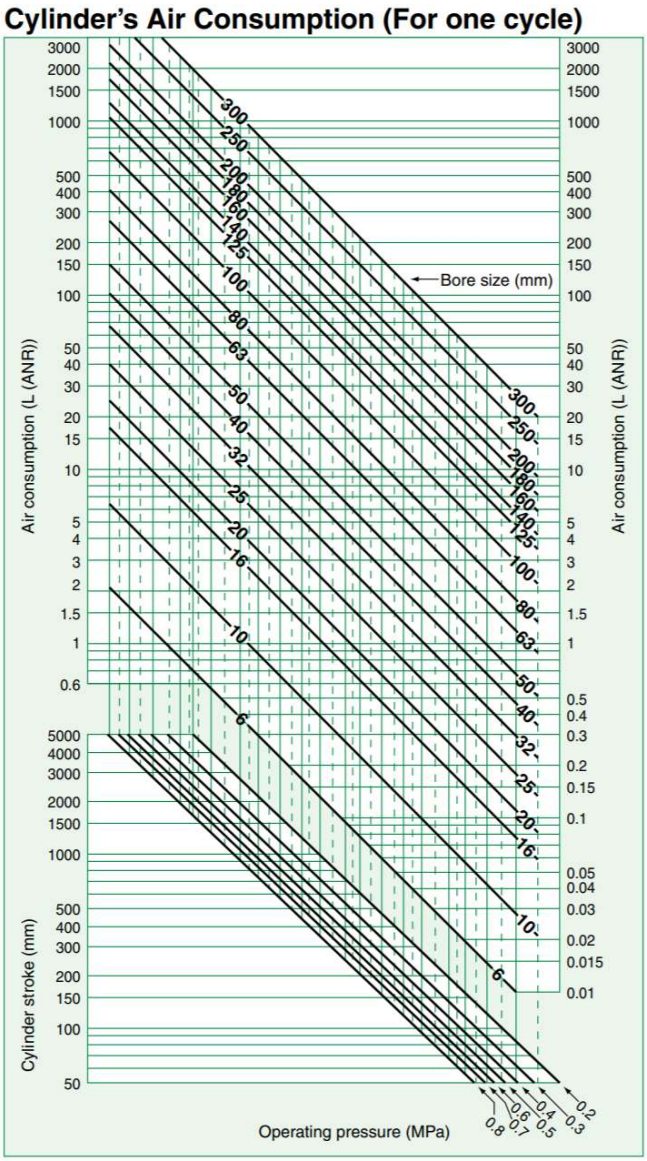
$Q_r -$ pneumosilindri õhukulu silindri tagasitõmbamisel (m^3)

$h -$ silindri kolvi käigu pikkus (mm)

$p -$ kasutatav töörõhk (Pa)

Vastavalt valemile 4.5 sõltub pneumosüsteemis silindrite liigutamiseks vajalik suruõhu kogus töörõhust, silindri läbimõõdust ning kolvi käigu pikkusest. Süsteemi kogu suruõhu tarbimiskulu arvutamisel tuleb arvesse võtta ka pneumovoolikute läbimõõt ja pikkus.

Valemist 4.5 lähtuvalt moodustub pneumosilindrite õhukulu graafiku (Graafik 1), mida võib leida enamuste pneumosilindrite valmistajate kataloogidest.



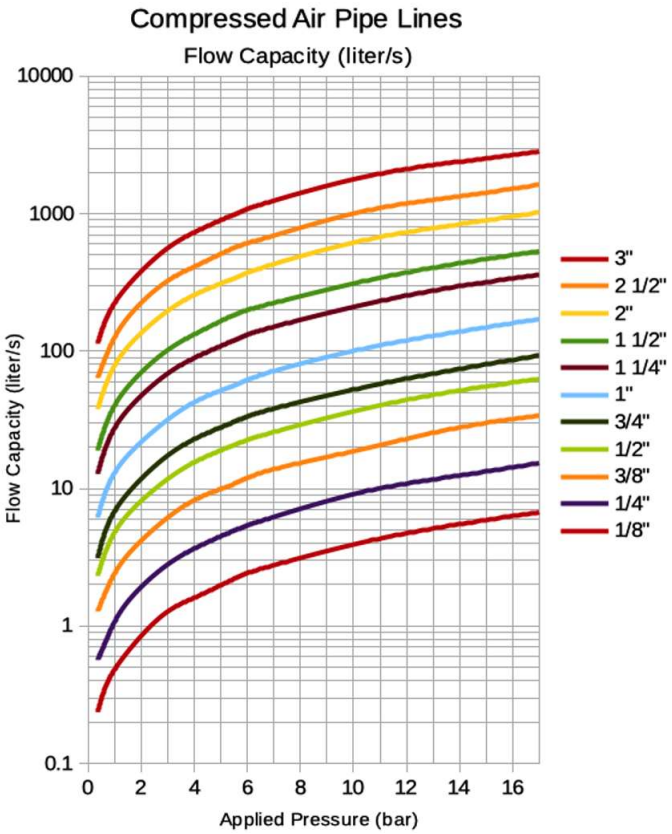
Graafik 1. Suruõhusilindrite poolt kasutatavad õhukogused ühe tsükli jooksul [15]

Vastavalt arvutustulemustele (valem 4.5) on virnastaja pneumosüsteemi komponentide õhukulu 0,6 MPa töösurvega süsteemis järgmine:

- Tõstesilinder CP96SBB100 (kolvi käik 250 mm) ≈ 10 x 2 ≈ 20 l
- Tsentreerimissilinder ADN-20-25-A-P-A-S ≈ 0,07 x 4 ≈ 0,3 l
- Käppade liigutamise silinder DFM-25-100-P-A-GF ≈ 0,33 x 2 = 0,7 l
- Suruõhutorud (d = 6 mm ja 10 mm, l = vastavalt 8 m ja 4 m) ≈ 6 l

Seega on virnastaja pneumosüsteemi kõikide silindrite ja ühendustorude õhukulu ühe töötsükli sooritamiseks kokku *ca* 27 l. Arvestades, et ühe töötsükli kestvus on *ca* 10

sekundit, peab suruõhu toitesüsteem olema võimeline tagama õhu pealevoolu vähemalt *ca* 3 l/s (pneumosüsteemi projekteerimisel tuleb siia lisada ka varutegur).



Graafik 2. Suruõhusüsteemi toiteliinide dimensioneerimine [16]

Lähtuvalt ülaltoodud graafikust (graafik 2) on virnastaja toitemagistraaliga ühendamiseks valitud 10 mm läbimõõduga suruõhutoru, mis on mõistliku suurusega, kuid samas ka piisava varuteguriga.

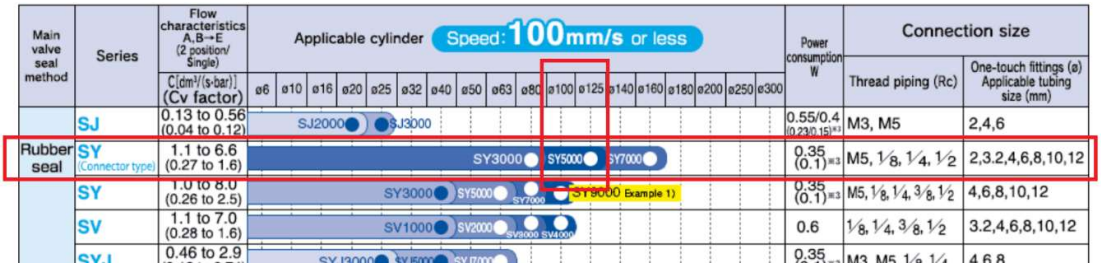
4.4.2 Pneumojaotite valiku alused

Pneumojaotite valikul on olulisemad kriteeriumid järgmised (virnastaja konkreetsed kriteeriumid on näidatud kaldkirjas ridade lõpus, vt ka Lisa 3. Virnastaja pneumoskeem):

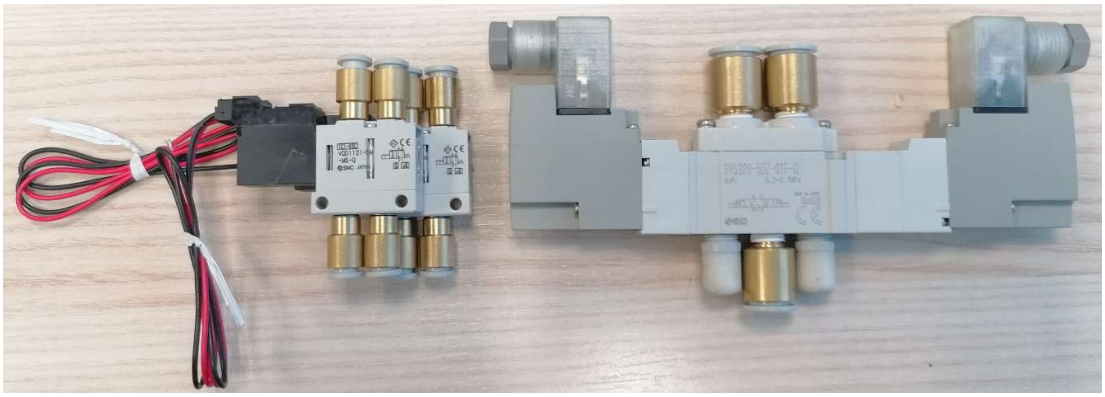
- Tööpõhimõte (direct / semi-derect / indirect). *Virnastaja puhul oleks saanud kasutada põhimõtteliselt kõiki variante igas positsioonis, kuid lähtuvalt muudest asjaoludest (hind, kättesaadavus), on tehtud valikud järgmiselt: tsentreerimine ja käpad direct, tõstesilinder aga sisemise piloodiga ehk indirect*;
- Tüüp (elektriliselt, mehhaaniliselt või manuaalselt lülitatav). *Elekter*;

- Funktsionaalsus (portide ja positsioonide arv ning nende funktsionaalsus). *5/3 (keskelt suletud) ja 4/2*;
- Võimekus (ühendusportide mõõdud, voolukiirused, Kv väärtus, lülituskiirus). *Silindrid peavad liikuma min. 100 mm/s*;
- Voolis, töökeskkond ja paigalduskoht/viis (klapi materjal, IP klass, temperatuur, klapi kinnituskohtade asukohad (kas asub nt. otse jaotusplaadil või aktuaatoril)). *Õhk, 0,6 MPa, IP65, universaalne kinnitus (mitte moodulisse või otse silindrile)*;
- Tööpinge: *24 V DC*.

Virnastaja pneumosüsteemi komponentidest on kõige olulisem ø 100 mm kolvi läbimõõduga tõstesilinder, mis peab saama liikuda piisavalt kiiresti, et seadme töötsükkel ei ületaks projekteerimistingimustes lubatut. Samuti peab olema võimalik silindrit peatada magnetanduriga määratud keskpositsioonis tõstekäppade sisse-välja liigutamiseks. Jaoturite valikul tuleb ka arvesse võtta, et ühe klapiga juhitakse nii vasak- kui ka parempoolset tõsteseadet. Seega sobib tehniliste andmete järgi (Joonis 30) tõstesilindri juhtimiseks SMC pneumojaoti SY5320-5DZ-01F-Q, millega 0,6 MPa töösurvel tuleb virnastaja ühe töötsükli pikkuseks *ca* 8 sekundit. Virnastaja tsentreerimissüsteemis ja tõstekäppade liigutamise mehhanismis on väiksed silindrid, mille juhtimiseks sobib hästi SCM 4/2 jaoti VQD1121-5M-M5-Q 4 (Joonis 31).



Joonis 30. SMC Pneumojaotite valimine lähtuvalt silindri kolvi läbimõõdust ja töökiirusest [17]



Joonis 31. Virnastajasse paigaldatavad erinevad pneumojaotid (vasakul 4/2 jaotid VQD1121-5M-M5-Q ning paremal tõstesilindrile 5/3 jaoti SY5320-5DZ-01F-Q)

5. TÕSTESEADME DETAILIDE TUGEVUSARVUTUSED

5.1 Lihtsamate detailide tugevusarvutused kasutades 3D mudeleid

Tõsteseadme detailide tugevusarvutused on teostatud lõplike elementide meetodit kasutades. Kuna allolevad detailid on suhteliselt väiksed ja ebasümmeetrilised, ei ole mudeleid lihtsustatud ning arvutamiseks on kasutatud Ansys Workbench tarkvarasse imporditud detailide 3D mudeleid. Usaldusväärsemate arvutustulemuste saamiseks on võrgustiku koostamisel jälgitud, et võrgustiku kvaliteet oleks parem kui 0,7 (Joonis 32).

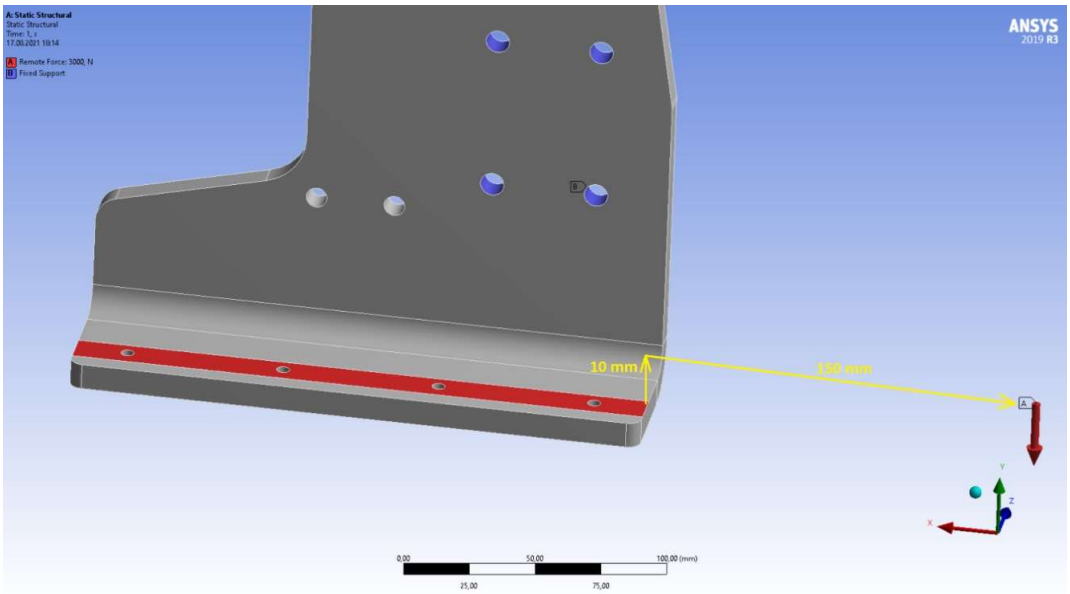
Orthogonal Quality mesh metrics spectrum

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Joonis 32. Võrgustiku spekter on väga hea, kui keskmine kvaliteet on 70+ [18]

Käppade tõsteplaadi arvutamiseks on kasutatud järgmised rajatingimusi (Joonis 33):

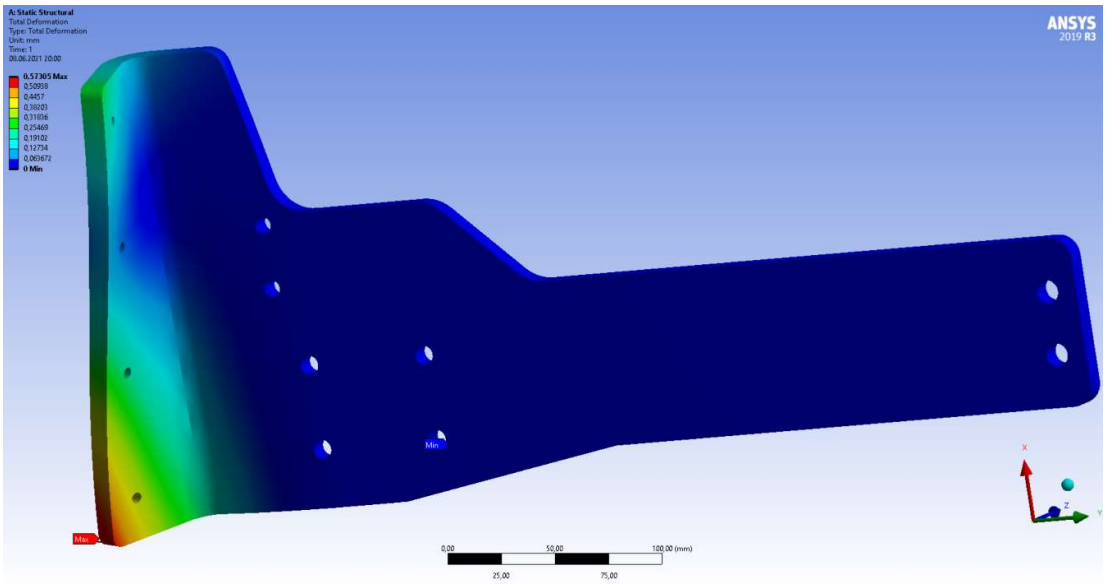
- Detail on fikseeritud lineaarjuhiku kinnituspoltide avadest (4 tk, „B“);
- Detail on koormatud 150 mm kauguselt ja 10 mm plaadi pinnast kõrgemalt (ehk Remote Force, „A“) „käpa otsast“ koormusega 3000 N, mis on 1,5 korda suurem, kui töötaval seadmel maksimaalselt lubatud koormus;
- Jõud tuleb detailile lineaarjuhiku siini kaudu („A“);



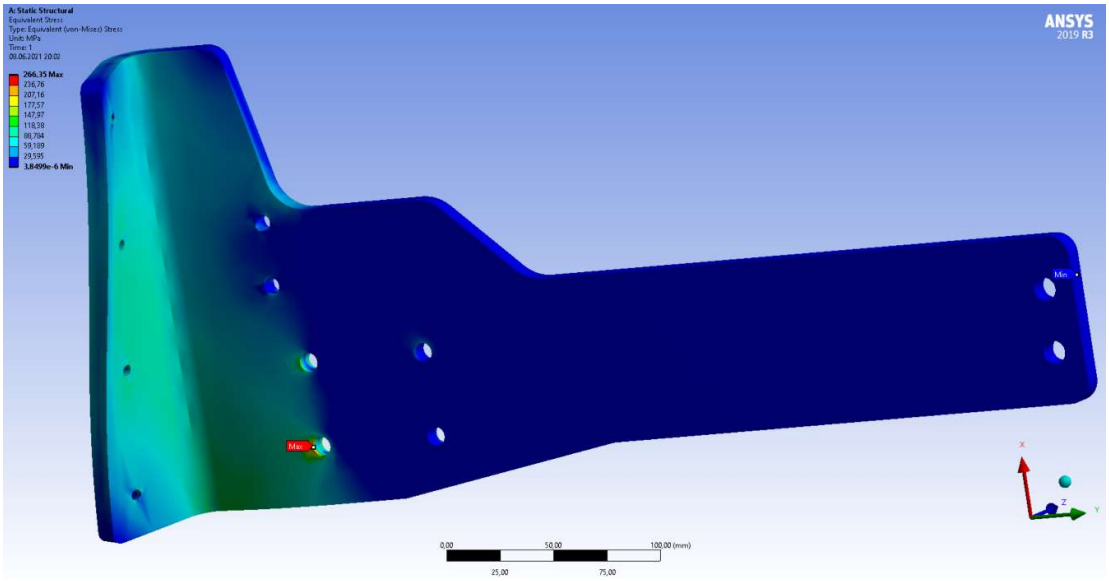
Joonis 33. Tõsteplaadi tugevusarvutuse rajatingimused

Arvutustulemused (Joonis 34 ja Joonis 35) on järgmised:

- Maksimaalne pinge: 266,35 MPa
- Maksimaalne deformatsioon: 0,57 mm
- Varutegur S355 konstruktsioonterase kasutamisel: 2,3



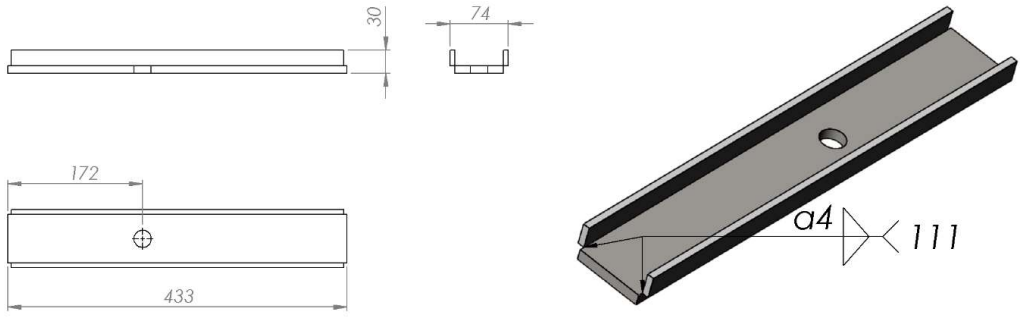
Joonis 34. Tõsteplaadi deformatsioon



Joonis 35. Pingete jaotus tõsteplaadis

5.2 Keevisõmbluse tugevusarvutused

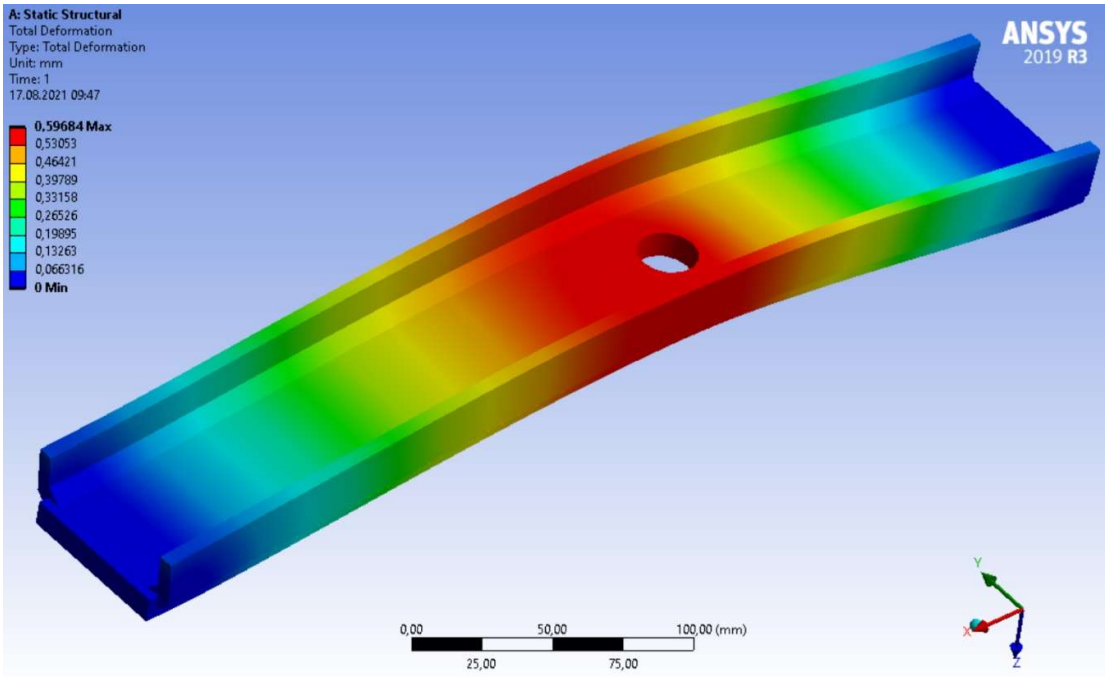
Lisaks olulisemate detailide tugevusarvutustele on teostatud ka kõige kriitilisematele konstruktsioondetailidele keevisõmbluste tugevusarvutused (Joonis 37 ja Joonis 38). Tõsteraami olulisemad mõõdud ning keevisliite andmed on toodud joonisel 36.



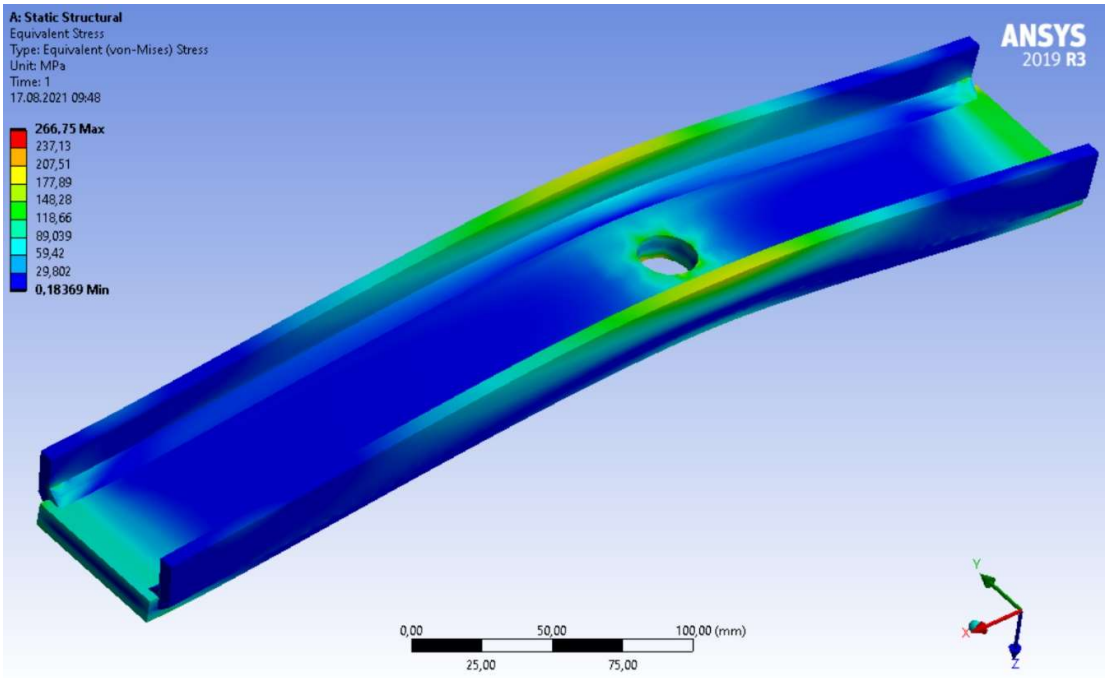
Joonis 36. Tõsteraami põhimõõdud ning 3D mudel koos keevisliite andmetega

Tõsteraami tugevusarvutuste tegemiseks ning keevisliite hindamiseks on kasutatud järgmiseid rajatingimusi:

- Konstruktsioon on fikseeritud avaga plaadi otstest;
- Konstruktsioonile mõjub alt üles (silindri tõstmise suunas) jõud 6000 N, mis on *ca* kaks korda suurem, kui töötaval seadmel maksimaalselt lubatud koormus;
- Detailile on lisatud keevisliited, mis on konstrueeritud vastavalt arvutusskripti nõuetele.

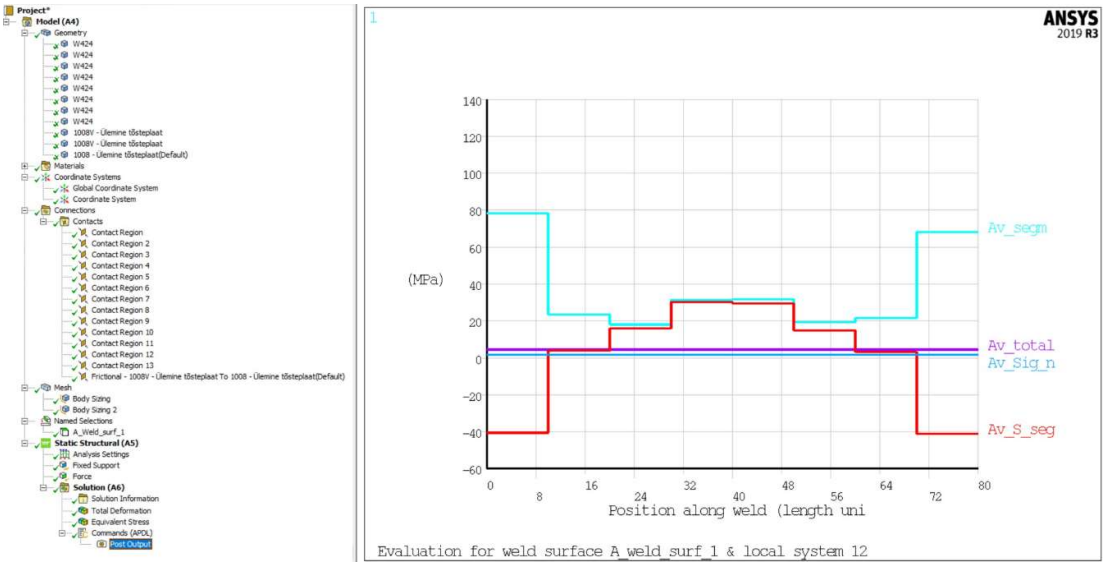


Joonis 37. Virnastaja tõsteraami deformatsioon (max 0,6 mm)



Joonis 38. Pingete jaotus virnastaja tõsteplaadis (max 267 MPa)

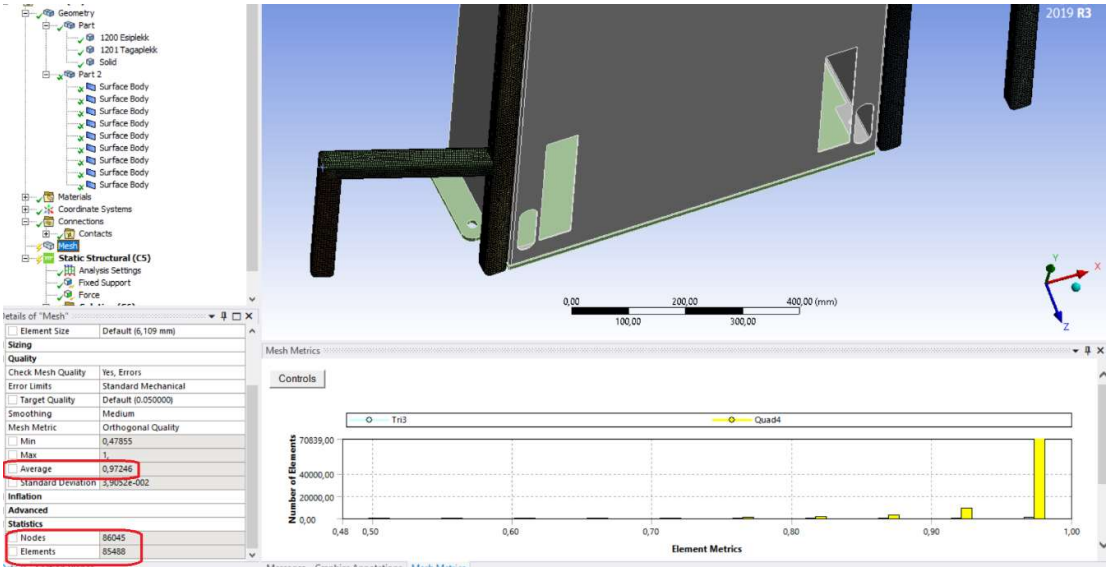
Keevisõmbluse hindamiseks on kasutatud spetsiaalselt selleks ettenähtud skripti („commands_static_stress_plane_geometry.txt"). Arvutustulemuste järgi (Joonis 39) on keevisliites tekkivad pinged oluliselt väiksemad, kui konstruktsiooni detailides (Joonis 38), mis tähendab, et keevisliide on projekteeritud suure tugevusvaruga.



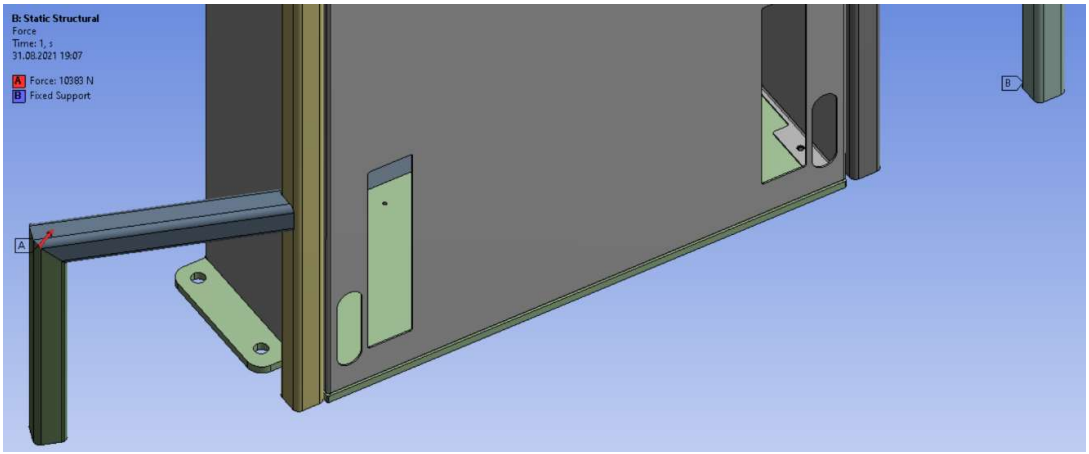
Joonis 39. Pingete jaotus virnastaja tõsteplaadi keevisõmblustes

5.3 Kaitseraami tugevusarvutused kasutades 2D kesktasapindasid

Kuigi virnastaja on modelleeritud 3D-s, ei ole mõistlik suuremate detailide või konstruktsioonide puhul teha kontrollarvutusi 3D mudelitega, kuna see nõuab palju arvutusressurssi, mistõttu võib tulemuste saamine võtta väga kaua aega. Seega on arvutusressursi kokkuhoidmiseks mõistlik mudeleid lihtsustada, mille üheks võimaluseks on kesktasapindade kasutamine, kus antud juhul on nelikanttorust (40x40x4) kaitseraami 3D mudeli detailidest ANSYS tarkvara DesignModeler moodulis genereeritud „Midsurface“ käsu abil 2D tasapinnad ehk kooriktasapindadest mudel (Joonis 40). Arvutamiseks vajalikud rajatingimused on näidatud joonisel 41 (raam fikseeritakse jalgadest, jõud *ca* 10 kN).

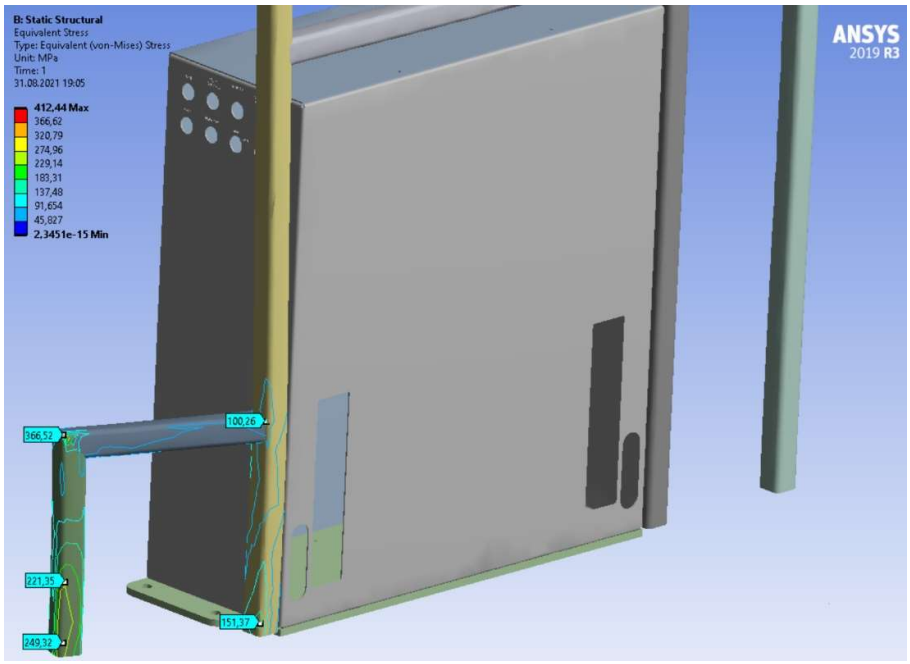


Joonis 40. Kaitseraami 2D mudel koos virnastaja korpusega ning võrgustiku andmed

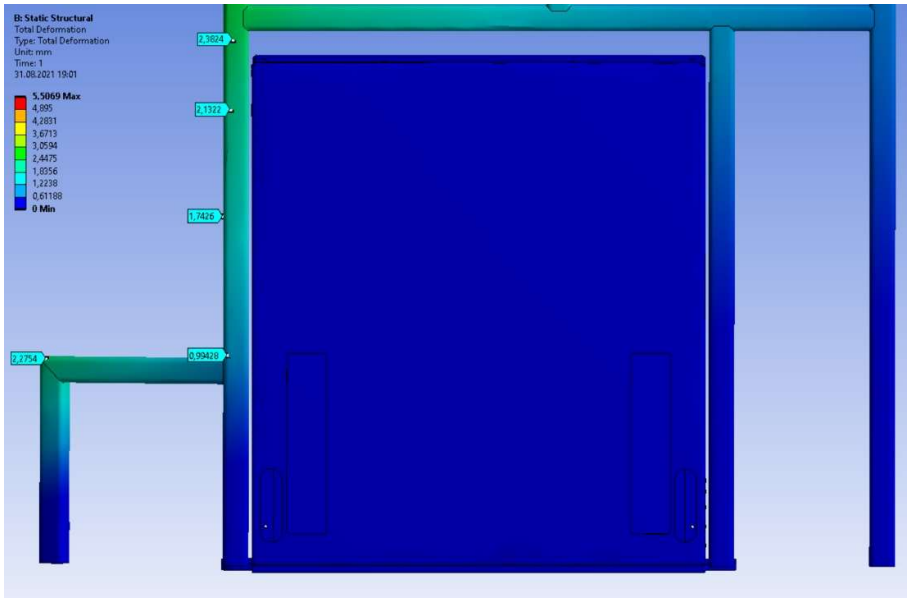


Joonis 41. Kaitseraami rajatingimused tugevusarvutuste tegemiseks

Selleks, et paremini aru saada, kas kaitseraam on projekteeritud õigesti ning deformeerub virnastaja korpust kahjustamata, on arvutamisel kasutatud jõudu, mis kaitseraami kindlasti kahjustab, ehk pinged raamis ületavad S355 terase voolepiiri, põhjustades raami detailides plastse deformatsiooni (Joonis 42).



Joonis 42. Pingete jaotus raamis (412 MPa, deformatsiooni võimendus: 40 korda)



Joonis 43. Kaitseraami deformatsioon (5,5 mm, näidatud võimenduseta, 1:1 skaalal)

Joonisel 43 on näha, et kaitseraam deformeerub antud juhul S355 terase voolepiiri ületava jõu rakendamisel juba plastselt (ülaservast *ca* 5,5 mm), kuid sealjuures ei kahjusta raam virnastaja korpust. Seega on raam projekteeritud õigesti.

5.4 Kontrollarvutused

Kontrollarvutused on tehtud virnastaja kõige olulisemale detailile ehk tõstekäppadele plaatidele. Arvutamiseks vajalikud parameetrid on:

$l = 0{,}1\ m$

$F = 3000\ N$

$h = 10\ mm$

$b = 55\ mm$

Tõstekäpas tekkiv paindepinge σ_b on leitav alljärgneva valemi 4.1 abil:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_x} \tag{4.1}$$

Kus:

$M_b - paindemoment\ [N/m]$

$W_x - ristlõike\ telgvastupanumoment\ [m^3]$

Esmalt tuleb leida paindemoment M_b (valem 4.2):

$$M_b = F \cdot l_F = 3000 \cdot 0{,}1 = 300\ Nm \tag{4.2}$$

Kus:

$F - koormus\ [N]$

$l_F - koormuse\ kaugus\ [m]$

Seejärel arvutatakse ristlõike telgvastupanumoment W_x (valem 4.3):

$$W_x = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{0{,}055 \cdot 0{,}01}{6} = 9{,}17x10^{-7} \tag{4.3}$$

Kus:

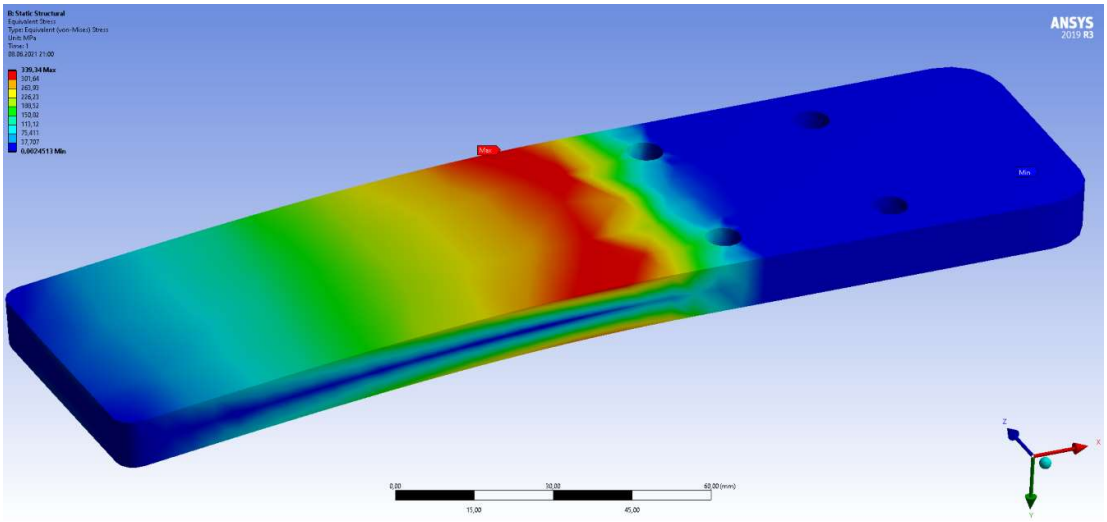
$b - käpa\ laius\ [m]$

$h - käpa\ paksus\ [m]$

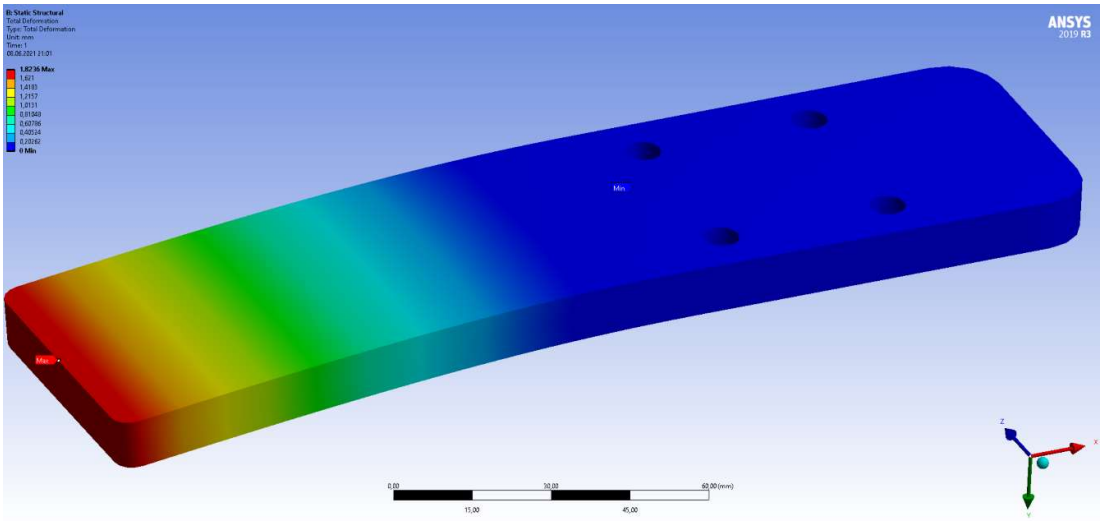
Saadud tulemuste järgi leitakse käpas koormamisel tekkiv pinge (valem 4.4):

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_x} = \frac{300}{9{,}17 \cdot 10^{-7}} = 327\ MPa \tag{4.4}$$

Ansys Workbench tarkvaras lõplike elementide meetodil leitud paindepinged erinevad käsiarvutusest *ca* 4% (Joonis 44).



Joonis 44. Pingete jaotus tõstekäpa plaadis (max 339,34 MPa)



Joonis 45. Tõstekäpa plaadi deformatsioon (max 1,62 mm)

Tõstekäpa arvutustulemused järgmised:

- Maksimaalne pinge: 327 MPa (valem 4.4)
- Maksimaalne deformatsioon: 1,82 mm (Ansys tarkvaras, Joonis 45)

Seega tõstekäpa tegelik varutegur S355 konstruktsioonterase puhul on *ca* 1,6 (virnastajas on kaks käppa).

6. VIRNASTAJA HINNAKALKULATSIOON

6.1 Võrdlevad hinnapakkumised

Virnastaja valmistamiseks on hinnapakkumised võetud kokku 18-lt erinevalt ettevõttelt. Kuna virnastaja tõsteseadme esmaseks materjalivalikuks oli lähtuvalt tehase keskkonnatingimustest ja HACCP nõeutest roostevaba teras, olid detailid algselt projekteeritud vastavalt AISI 304 materjali tugevusomadustele. Roostevabast materjalist detailide valmistamine (laserlõikus + painutamine + avade keermestamine) oleks aga kallima hinnapakkumise järgi läinud maksma 1980.- € + KM ning parimal juhul 1401.80 € + KM, mistõttu tuli tõsteseadme materjalivalikus teha korrektuure (vt Joonis 23), kuna seadme valmistamiskulud oleksid läinud liiga suureks suuremaks, kuid projekteerimistingimus (peatükk 3.2) nõutud.

Vastavalt parimatele pakkumistele on konstruktsioondetailid ning standardkomponendid hangitud kokku kümne erineva tarnija käest:

- Virnastaja terasdetailide lõikamine (mõlemad näidatud ettevõtted kasutavad lõikamiseks fiiberlaserseadmeid), painutamine ja keermestamine: Baltic Steel Center OÜ; Intar MW OÜ
- Materjal virnastaja kaitseraami valmistamiseks: Corm OÜ
- Pneumokomponended: SMC Automation OÜ; Memi Varustaja OÜ
- Kinnitusvahendid: Baltic Bolt OÜ
- Tõsteseadmete ja kaitseraami värv: Bauhaus Eesti OÜ
- Standardsed mehhaanika komponendid: Memi Varustaja OÜ; Alas-Kuul Eesti AS
- Elektri- ja automaatikakomponendid: Sakala Tööstusautomaatika OÜ; Kemeri OÜ

6.2 Virnastaja detailid ja standardkomponendid koos hindade ning valmistamiskuludega

Tabelites 7...11 on toodud virnastaja valmistamiseks kasutatud komponentide hinnad käibemaksuta. Kollasel taustal on näidatud olemasolevad komponendid, mis on võetud tehase varuosade laost (nende kulu virnastaja maksumuses ei kajastu). Alltoodud tabelitest lähtuvalt on virnastaja valmistamiseks tehtud otseseid kulutusi 2793,79 € ulatuses, mis tähendab, et seadme valmistamiskulud vastavad projekteerimistingimustes nõutule.

Hinnaarvestuses ei ole välja toodud virnastaja projekteerimise ja koostamise kulusid ning pisidetailide ja kuluvahendite maksumust.

Tabel 7. Virnastaja kinnitusvahendite hinnad

Tk	Ühik	Kirjeldus	Hind	Kokku
14	tk	BOLT DIN 6921 8.8 M 8 x 16	0,50	6,97
4	tk	BOLT DIN 912 12.9 M 10 x 35	0,37	1,49
4	tk	BOLT DIN 912 12.9 M 8 x 25	0,21	0,86
8	tk	BOLT ISO 10642 8.8 M 10 x 25	0,48	3,80
4	tk	BOLT ISO 10642 8.8 M 8 x 20	0,21	0,82
8	tk	HEX NUT ISO 4032 5-2 ZN AD W7 M 10	0,23	1,83
8	tk	HEX NUT ISO 4032 5-2 ZN AD W7 M 8	0,19	1,54
4	tk	BOLT ISO 4762 12.9 2,5 x 5	0,84	3,35
4	tk	BOLT ISO 4762 12.9 4 x 30	0,12	0,48
4	tk	BOLT ISO 4762 12.9 5 x 12	0,10	0,40
8	tk	BOLT ISO 4762 12.9 5 x 16	0,10	0,81
20	tk	BOLT ISO 4762 12.9 6 x 10	0,10	1,98
16	tk	BOLT ISO 4762 12.9 6 x 16	0,10	1,61
24	tk	BOLT ISO 4762 12.9 6 x 20	0,10	2,45
8	tk	BOLT ISO 4762 12.9 6 x 25	0,10	0,84
16	tk	BOLT ISO 4762 12.9 8 x 20	0,10	1,61
24	tk	BOLT ISO 4762 12.9 8 x 25	0,11	2,61
8	tk	WASHER ISO 7091 100HV 10	0,10	0,78
8	tk	WASHER ISO 7091 100HV 5	0,06	0,48
8	tk	WASHER ISO 7091 100HV 6	0,06	0,50
20	tk	WASHER ISO 7091 100HV 8	0,08	1,54
4	tk	BOLT ISO 7379 12.9 h8 M 10 x 20	5,16	20,64
4	tk	BOLT ISO 7379 12.9 h8 M 8 x 16	3,42	13,68
4	tk	WASHER R 88120 tüüp S SCHNORR 10	0,03	0,12
4	tk	WASHER R 88120 tüüp S SCHNORR 5	0,03	0,11
40	tk	WASHER R 88120 tüüp S SCHNORR 6	0,03	1,15
44	tk	WASHER R 88120 tüüp S SCHNORR 8	0,02	0,92
				73,37

Tabel 8. Lineaarjuhikute, standardkomponentide ja värvide hinnad

Tk	Ühik	Kirjeldus	Hind	Kokku
4	tk	LINEAARLAAGER HSR 25 LRDD -THK	117,34	469,36
4	tk	LINEAARLAAGER HSR 30 LRDD -THK	122,67	490,68
4	tk	HSR 30 L=520 G=20 THK Lineaarjuhiku siin	53,00	212,00
4	tk	HSR 25 L=220 G=20 THK Lineaarjuhiku siin	21,00	84,00
4	tk	VIBRATSIOONIPUKS 30 X 20 M8 NBR	1,21	4,84
4	tk	Clevis joint DIN 71752 with circlip size 8 x 16	4,48	17,92
4	tk	Beam coupling for cylinder diameter 20mm	22,07	88,28
1	tk	Metallivärv Hammerite Smooth 750 ml, kollane	10,75	10,75
1	tk	Metallivärv Hammerite Hammered 750 ml, valge (kogus suurem, kui vaja)	10,75	10,75
				1388,58

Tabel 9. Virnastaja detailide hinnad

Tk	Ühik	Kirjeldus	Hind	Kokku
2	tk	1008 (10 mm; materjal: S355) - Lõikus	9,26	18,52
2	tk	1008H (10 mm; materjal: S355) - Lõikus	2,14	4,28
12	tk	Jalaplaat (10 mm; materjal: S355) - Lõikus	2,55	30,6
2	tk	Kulg sensor All (5 mm; materjal: S355) - Laserlõikus	10,18	20,36
1	tk	Plaat Kulg (1 mm; materjal: DC01) - Lõikus	12,83	12,83
4	tk	1008V (6 mm; materjal: S355) - Lõikus	3,49	13,96
4	tk	1011 (2 mm; materjal: DC01) - Lõikus	2,19	8,76
4	tk	1002 (10 mm; materjal: S355) - Lõikus	4,14	16,56
2	tk	1004 (10 mm; materjal: S355) - Lõikus + Keermestamine	20,82	41,64
4	tk	1004H (6 mm; materjal: S355) - Lõikus	4,28	17,12
2	tk	1008HV (8 mm; materjal: S355) - Lõikus	2,47	4,94
2	tk	1001 (10 mm; materjal: S355) - Lõikus + Keermestamine	55,73	111,46
4	tk	1000 (6 mm; materjal: S355) - Lõikus	1,27	5,08
1	tk	1200 (2 mm; materjal: DC01) - Lõikus + Painutamine + Keermestamine	56,14	56,14
1	tk	1200V (2 mm; materjal: DC01) - Lõikus + Painutamine + Keermestamine	55,28	55,28
2	tk	1201 (2 mm; materjal: DC01) - Lõikus + Painutamine	24,28	48,56
2	tk	1007V (5 mm; materjal: S355) - Lõikus + Painutamine + Keermestamine	11,92	23,84
1	tk	1015 (2 mm; materjal: DC01) - Lõikus + Painutamine + Keermestamine	19,34	19,34
2	tk	1014P (6 mm; materjal: S355) - Lõikus + Painutamine	7,28	14,56
2	tk	1014 (6 mm; materjal: S355) - Lõikus + Painutamine	7,28	14,56
2	tk	1007 (5 mm; materjal: S355) - Lõikus + Painutamine	12,23	24,46
2	tk	1005R (10 mm; materjal: S355) - Lõikus + Painutamine + Keermestamine	26,88	53,76
2	tk	1005 (10 mm; materjal: S355) - Lõikus + Painutamine + Keermestamine	26,88	53,76
1	tk	1201 (2 mm - 1tk) (2 mm; materjal:) - Lõikus + Painutamine	31,34	31,34
2	tk	1004 (10 mm - 2tk) (10 mm; materjal:) - Lõikus	20,82	41,64
7	tk	Nelikanttoru 40x40x4x12000 S355 J2H, 6000mm (kaitseraami valmistamiseks, kogus võetud väikse varuga, materjali jääb natuke üle)	42,24	295,68
				1039,03

Tabel 10. Virnastaja pneumokomponentide hinnad

Tk	Ühik	Kirjeldus	Hind	Kokku
2	tk	CP96SDB100-250C CYLINDER	147,29	294,58
2	tk	DFM-25-100-P-A-GF CYLINDER	297,76	595,52
4	tk	ADN-25-55-A-P-A CYLINDER	61,63	246,52
4	tk	AS4201-04-F10S SPEED CONTROL VALVE	15,27	61,08
2	tk	D-A93L AUTO SWITCH	15,30	30,60
1	tk	SY5320-5DZ-01F-Q 5 PORT SOLENOID VALVE	57,58	57,58
2	tk	VQD1121-5M-M5-Q 4 PORT SOLENOID VALVE	29,27	58,54
4	tk	AS2201F-01-06 SPEED CONTROLLER	6,38	25,52
8	tk	KQ2E06-00A BRASS FITTING	2,39	19,12
6	tk	KQ2E10-00A BRASS FITTING	4,58	27,48
6	m	TU1005B POLYURETHANE TUBE (10 mm)	0,89	5,34
12	m	TU0604B POLYURETHANE TUBE (6 mm)	0,50	6,00
				1427,88

Tabel 11. Virnastaja elektri- ja automaatikakomponentide hinnad

Tk	Ühik	Kirjeldus	Hind	Kokku
1	tk	6ES7214-1AG40-0XB0 - SIMATIC S7-1200, CPU 1214C	316,00	316,00
3	tk	S51-MA-5-C10-PK FOTOANDUR, 10-30DC	39,27	117,81
1	tk	S50-PR-5-F01-NN fotoandur, 10-30DC	47,59	47,59
1	tk	S50-MR-5-F01-PP fotoandur, 10-30DC	49,60	49,60
1	tk	CS-32/150 METALLKILP, 300X200X150MM, PINNAPEALNE	43,36	43,36
3	tk	M22-DDL-S-X7/X7 surunupp nooltega	7,03	21,09
1	tk	M22-D-S must surunupp, tagastuv, valgustuseta, madala kattega, hõbedase rõngaga	2,54	2,54
1	tk	M22-PVT hädaseiskamisnupp, pöörates tagastuv, valgustuseta	10,41	10,41
1	tk	Summer 24AC/DC, 78dB, 1 toon, vilkuv punane, IP20	11,13	11,13
1	tk	KU 325N koormuslüliti, 3 poolust, DIN-põhjakinnitus, 25A, 11kW, ilma pöördlülitita	7,48	7,48
1	tk	EDR-120-24 toiteplokk, DIN, 24DC, 5A, 120W	40,00	40,00
				667,01

Lisaks ülaltoodud komponentide maksumusele on virnastaja komplekteerimiseks kasutatud tehase töökojas olevaid tööriistu ning võetud varuosade laost erinevaid väiksemaid komponente ja kuluvahendeid (nt. keevituselektroodid, värvid, lahustid, puhastusvahendid, määrdeained, liivapaberid, lihv- ja lõikekettad, juhtmed, klemm- ja din-liistud, kaitselüliti, surunupu raamid), mida ei ole spetsiaalselt virnastaja valmistamiseks eraldi hangitud, kuid mille kogukuluks võib arvestada *ca* 50 €.

7. VIRNASTAJA DETAILIDE VALMISTAMINE

Kõik virnastaja tõsteseadme konstruktsioondetailid on unikaalsed ning tuleb valmistada vastavalt tööjoonistele. Detailid esmalt lõigatakse valitud materjalist ja valitud tehnoloogia abil ning seejärel vajadusel painutatakse, keermestatakse ning keevitatakse.

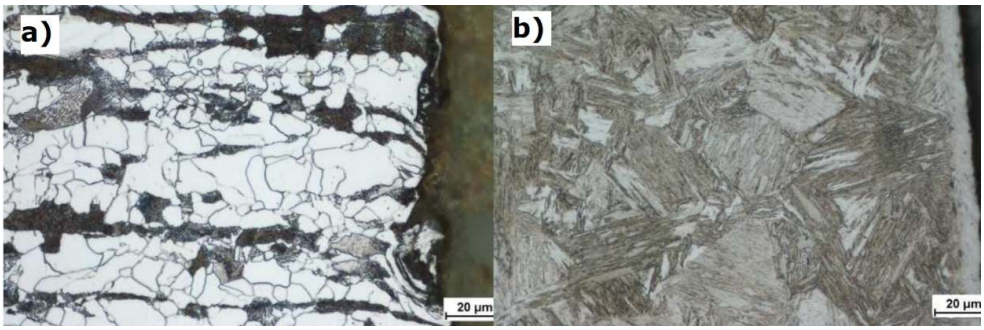
7.1 Virnastaja detailide lõikamine, painutamine ning keermestamine

7.1.1 Detailide lõikamise tehnoloogia valiku alused

Erinevate materjalide lõikamiseks on võimalik kasutada palju erinevaid meetodeid. Enamlevinud tehnoloogiad on saagimine, vesilõikus, plasmalõikus, gaasilõikus ja laserlõikus.

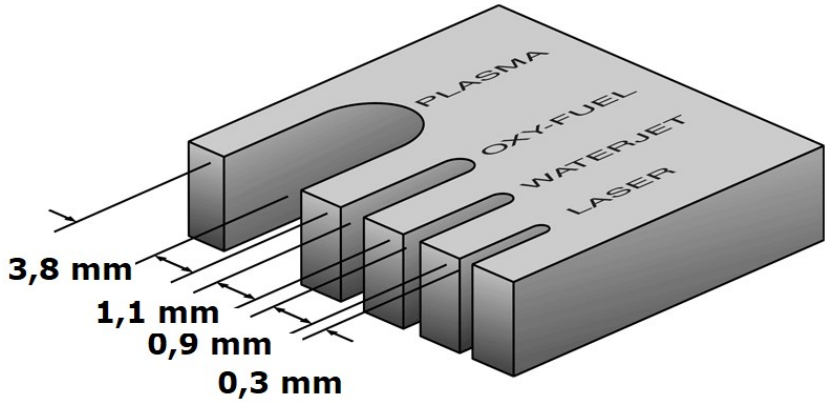
Saagimine võimaldab lõigata lihtsaid, madalate täpsusnõuetega ja eelistatult sirgete servadega detaile. Kuna virnastaja tõsteseadme detailidel on aga palju ümardatud nurkasid ning samuti ei ole saagimise teel võimalik lõigata materjali sisse siseavasid, ei ole saagimistehnoloogia kasutamine virnastaja detailide valmistamisel sobilik;

Vesilõikusel kasutatakse materjali lõikamiseks kõrgsurvel (*ca* 300 Mpa ... 650 MPa) vett ja abrasiivosakesi. Mida suurem on terase süsiniku sisaldus, seda paremini avaldub ka vesilõikuse eelis termiliste lõikustehnoloogiate ees - nimelt ei toimu vesilõikamisel materjali termilist kuumutamist (Joonis 46), mistõttu ei muutu ka materjali mehhaanilised omadused (nt ei suurene kõvadus lõikeservas) ning samuti on lõikeserv puhas (ka laserlõikusest väiksema karedusega, millest tingituna puudub järeltöötluse ehk metali servalt kraatide eemaldamise vajadus) ja põletusjälgedeta.



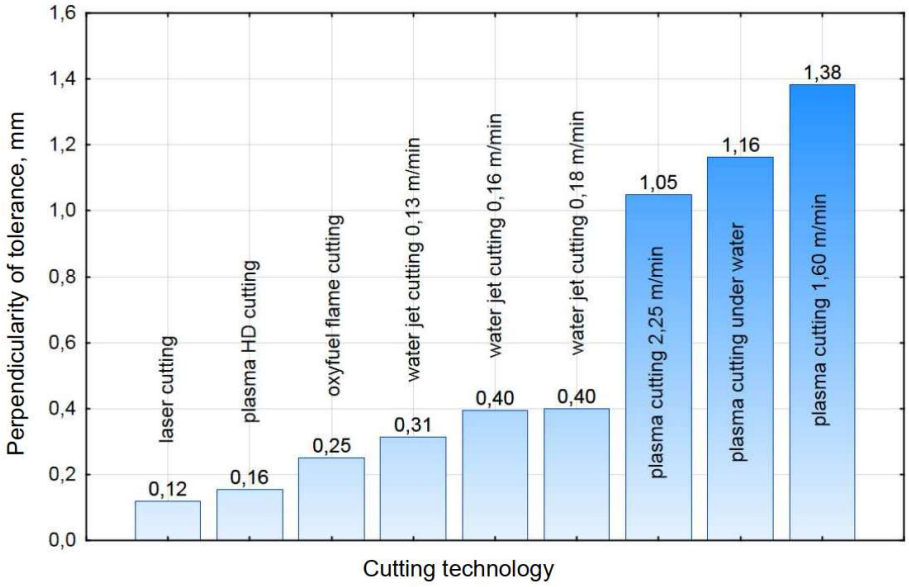
Joonis 46. S355 terase HAZ tsooni mikrostruktuur a) plasmalõikusel, b) vesilõikusel [20]

Samuti on vesilõikus lõikamistehnoloogiatest kõige keskkonnasõbralikum, kuna lõikamisprotsess ei tekita ega eralda kahjulikke mürgiseid gaase. Seega on vesilõikuse puhul tegemist põhimõtteliselt potentsiaalse tehnoloogiaga virnastaja detailide lõikamiseks. Kuigi väikeste siseavade lõikamine on vesilõikuses problemaatiline (nt 1 mm avad tulevad ebatäpsed, Joonis 47), ei ole ka see takistuseks, kuna minimaalse lõigatava siseava läbimõõt on antud juhul 2,5 mm. Samas just paksemate terasdetailide puhul on vesilõikusel lõikekiirus väga madal (kordades madalam ka laserlõikusest), mis muudab nende valmistamiskulud suhteliselt suureks, millest lähtuvalt otsustati nimetatud meetodit virnastaja tõsteseadme detailide valmistamiseks mitte kasutada;



Joonis 47. Tehnoloogiate lõikelaiuste võrdlus, mis mõjutab lõiketäpsust ning minimaalset lõigatavat siseava suurust [19]

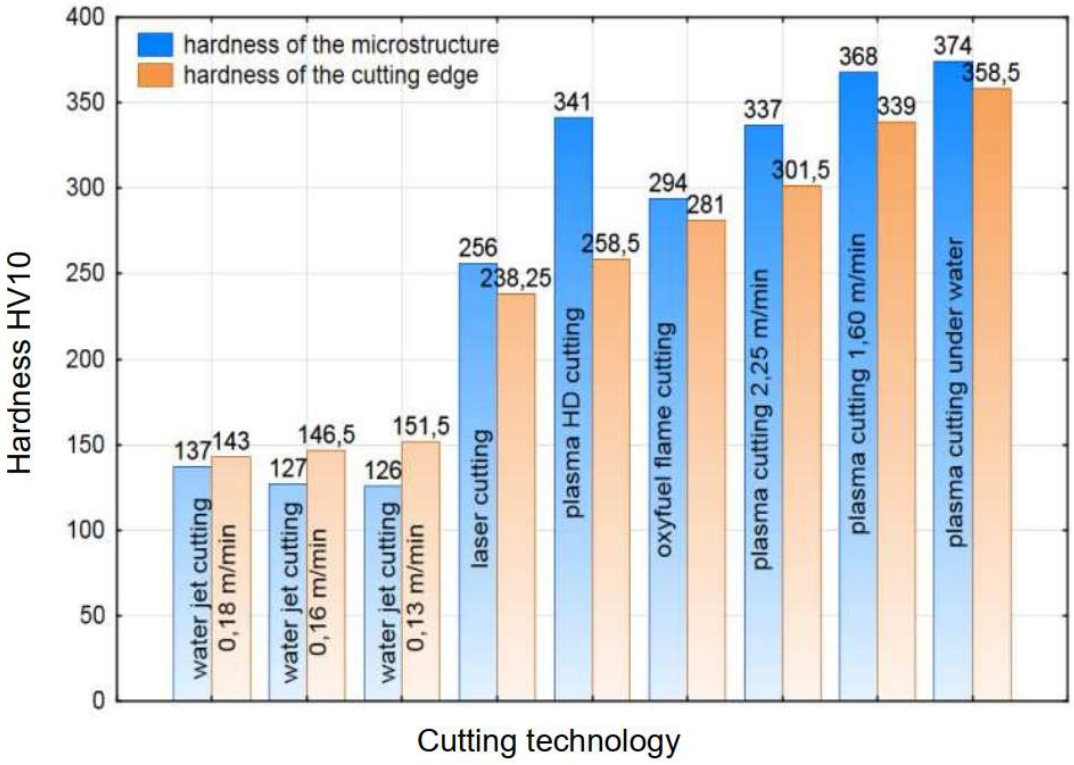
Plasmalõikus on laialt levinud metalli lõikamise meetod. Kuigi plasmalõikus on väga produktiivne ning suhteliselt odav, ei ole tegemist täppislõiketehnoloogiaga (Joonis 48), mistõttu ei saa seda kasutada virnastaja detailide valmistamiseks;



Joonis 48. 10 mm paksuse S355 teraslehe lõiketäpsuse võrdlus [20]

Gaasilõikuse eeliseks võrreldes teiste termiliste lõikustehnoloogiatega saab nimetada suhteliselt madalaid tootmiskulusid. Kuigi detailide hind tuleks gaasilõikusel madal, ei ole ka gaasilõikuse puhul tegemist täppislõiketehnoloogiaga. Samuti avaldub gaasilõikuse puhul olulisest HAZ mõju lõikeservades, mis teeks detailide avade keermestamise (suurema süsiniku sisaldusega terastes) väga keeruliseks. Seega ei ole gaasilõikus sobilik virnastaja detailide valmistamiseks.

Laserlõikus võimaldab lõigata terast kiiresti ja väga täpselt. Kuna laserlõikusel on terase puhul lõikejoone laiuseks üldjuhul kuni ca 0,5 mm, saab laserlõikustehnoloogia abil lõigata teatud juhtudel ka avasid, mille diameeter on väiksem paksusest (oluline nüanss virnastaja detailide puhul). Sarnaselt plasma- ja gaasilõikusega muudab aga ka laserlõikus oluliselt materjali mehhaanilisi omadusi lõikeserva juures (HAZ piirkonnas), mida tuleb kindlasti arvestada näiteks laseris lõigatud avade keermestamisel. Kuna aga virnastaja tõsteseadme detailid valmistatakse S355 terasest, mille süsiniku sisaldus on suhteliselt väike, ei muutu materjal lõikeservas väga kõvaks (Joonis 49), mis tähendab, et laseris detailidesse lõigatud avad saab otse ja ilma üle puurimata keermestada.



Joonis 49. S355 terase lõikeserva kõvaduse võrdlus erinevatel lõiketehnoloogiatel [20]

Seega on laserlõikamine kõige sobivam tehnoloogia virnastaja detailide lõikamiseks.

7.1.2 Detailide lõikamine

Kuna detailide materjaliks on süsinikteras, mille paksus varieerub vahemikus 1...10 mm ning tõsteseadme detailid peavad olema valmistatud suhteliselt hea täpsusega (max. ±0,5 mm), on lähtuvalt peatükis 7.1.1 põhjendatule lõikamiseks mõistlik kasutada uuemaid fiiber- või ka CO_2 tehnoloogial põhinevaid CNC laserlõikeseadmeid.

Et detailide valmistajal oleks hinnapakkumise ja lõikeprogrammi koostamine võimalikult lihtne (mis omakorda muudab teenuse hinna kliendile soodsamaks), luuakse kõikidest tõsteseadme 3D mudeli detailidest *.pdf formaadis tööjoonised, mis saadetakse koos detailide pinnalaotusfailidega (*.dxf failid, mis on koostatud vastavast laserlõikuspingi nõuetele, et neist saaks järeltöötlemata oste koostada CNC laserlõikuspingile tööprogrammi) erinevatesse ettevõtetesse esmalt hinnapakkumise saamiseks, kellest parima pakkumise esitanule esitatakse tellimus.

Lähtuvalt laserlõikusest on virnastaja detailide projekteerimisel arvesse võetud järgmised laserlõikust lihtsustavad ja lõikekvaliteeti soodustavad asjaolud:

- Avade suurus ja asukohaga (vastavalt materjalile õigesti valitud materjali paksuse ja läbimõõdu suhe ning minimaalne avade asukoht materjali servas). Laserlõikuseks liiga väiksed avad tuleb *.dxf failidelt eemaldatud ning need tuleb laserlõikusjärgselt puurpingis lõigata (ei olnud vaja teha virnastaja puhul);
- Servade kuju (välditud on teravaid nurki, maksimaalselt palju on kasutatud ümarservi, et laser saaks liikuda ühtlase kiirusega).

Virnastaja kaitseraam, mille valmistamistäpsus on ±3 mm, valmistatakse ettevõtte töökojas, kus nelikanttoru lõigatakse esmalt vastavalt joonisele mõõtu, misjärel keevitatakse detailid omavahel kokku.

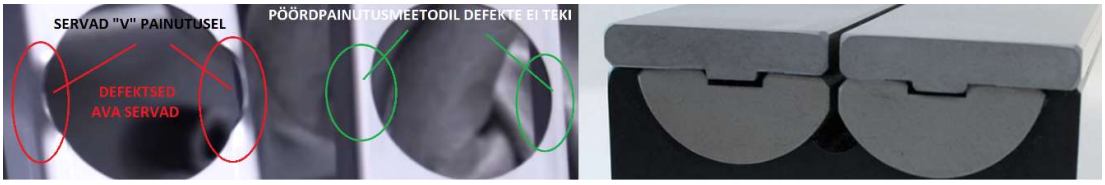
7.1.3 Detailide painutamine

Virnastaja detailide projekteerimisel on lähtuvalt painutuspingi võimalustest arvesse võetud järgmised painutusprotsessi puudutavad asjaolud:

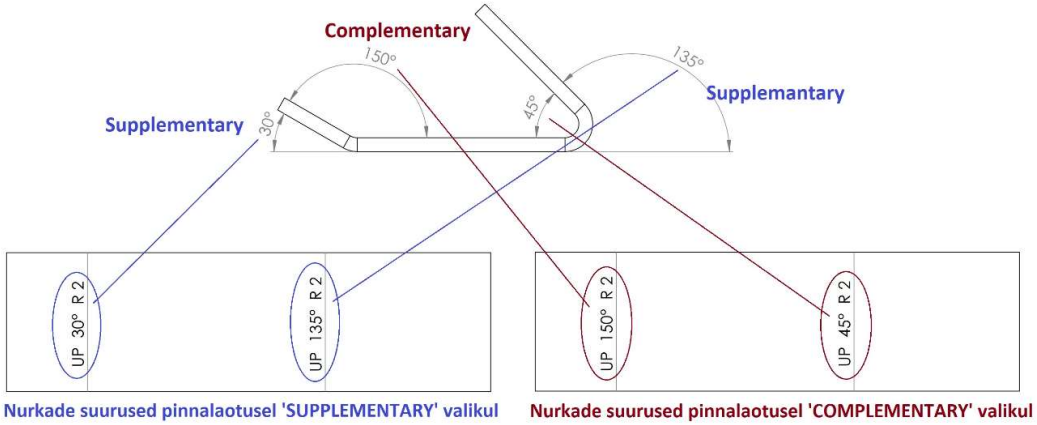
- Virnastaja detailide valmistamiseks kasutatakse „V" painutusmeetodit, millega on arvestatud ka detailide projekteerimisel (detailides olevad avad on viidud painutusjoonest piisavalt kaugele, et need ei muutuks painutamisel ovaalseks). Lisaks avadele tuleb „V" painutamisel arvestada ka detailile jäävate painutusjoontega, mis aga virnastaja puhul ei ole probleemiks (defektivaba ehk

ilma painutusjälgedeta ja/või painutusjoone lähedal olevate avade puhul tuleks toote valmistamiseks kasutada pöördpainutust, Joonis 50);

- Tööjoonistele on lisatud painutusnurga suund (Joonis 51. Euroopas enamasti *complementary*, USA's aga tavaliselt *supplementary*. Nurga suund on oluline segaduste vältimiseks mittetäisnurksete detailide painutamisel. Virnastajas on mittetäisnurksed andurite klambrid, painutusjoonise näide töö graafilises osas);
- Painutusraadiused on vastavuses materjali omaduste ja paksusega (virnastaja puhul on kõik painutusraadiused samad materjali paksusega);
- Detailidele on jäätud lähtuvalt painutuspingi nõuetest minimaalsest servapikkusest laiem serv;
- Detailid maksimaalselt on kooskõlas järjestikku painutamise reeglitega (paralleelsed paindejooned ei ole üksteisele liiga lähedal ja ebareaalsete nurkadega);
- Painded on viidud samale joonele (nt. virnastaja korpuse servad, kus flantside vahele on painutamise hõlbustamiseks jäätud vahed);
- Vastavalt materjalile ning selle paksusele ja painutuspingile ning painutusmeetodile on valitud korrektne painutusvaru ehk K-faktor, mis on näidatud ka tööjoonistel (vt painutusjoonise näidet töö graafilises osas).

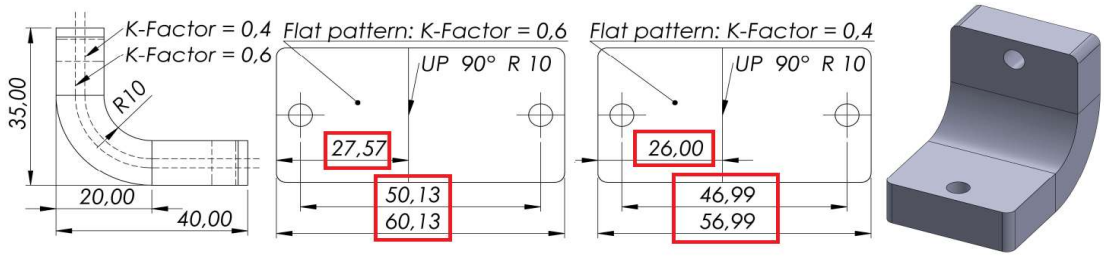


Joonis 50. Vasakul „V" ja pöördpainutamise erinevused (defektid ava servas), kui avad on detaili servas ning paremal kahe rulliga pöördpainutusmatriits [21]



Joonis 51. Painutusnurga suuna valiku olulisus tööjoonistel detaili valmistamiseks

Enne painutamist tuleb detailid esmalt välja lõigata. Painutatava detaili lõikamiseks vajaliku pinnalaotuse mõõdud sõltuvad aga otseselt ülaltoodud punktidest viimase, ehk K-faktori väärtusest (Joonis 52).



Joonis 52. K-faktori mõju neutraaljoone asukohale ja pinnalaotuse mõõtudele

Kuna K-faktor on materjali paksuse ja neutraaljoone asukoha omavaheline suhe, on just K-faktori korrektne määramine äärmiselt oluline, kui valmistatakse paksemaid (8+ mm) detaile, mille painutamisjärgne valmistamistäpsus on kriitiline.

Kuna K-faktorit mõjutab lisaks materjalile ja selle paksusele ka painutustehnoloogia valik (pink, tööriistad, meetod), siis on suure täpsusega valmistavate detailide tööjoonistel oluline näidata K-faktori väärtust tööjoonistel ning enne tellimist saada ka painutusteenust osutavast ettevõttest kinnitus, et detailid saab valmistada vastavalt määratud tolerantsidele (vajadusel tuleb K-faktor ettevõttega kooskõlastada ning vastavalt sellele anda pinnalaotuste mõõdud ja luua *.dxf failid laserlõikuseks).

7.1.4 Detailide keermestamine

Lähtuvalt teenusepakkuja võimalustest (kaasaegsed ja uued laserlõikuspingid) õnnestus kõik virnastaja keermestamiseks vajalikud avad ette lõigata laserlõikuspingis (ka need avad, kus materjali paksuse ja ava läbimõõdu suhe ei olnud laserlõikuse mõttes ideaalses proportsioonis).

Detaili keermestatavate avade lõikamiseks on kasutatud manuaalset keermestuspinki (Joonis 53). Et keermestada saaks otse (ilma avasid üle puurimata) laserist tulnud detaile, on keermestamisele kuuluvate ettelõigatavate avade mõõdud dxf failides valitud vastavalt väiksemad.

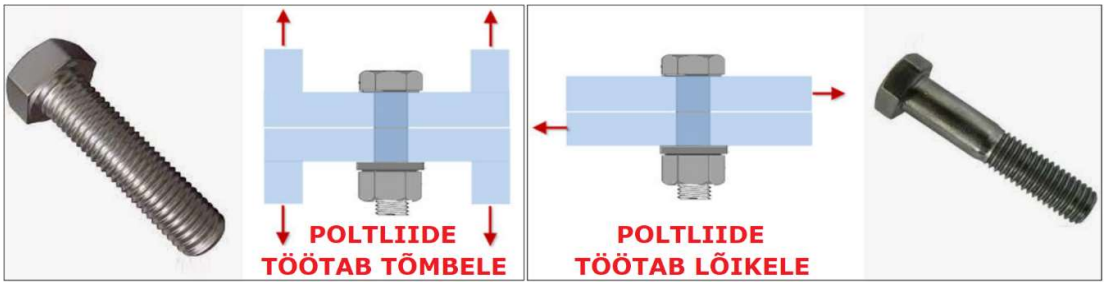
Joonis 53. Keermestaja Shark Roscamat [22]

7.2 Kruvi-, polt ning keevisliited

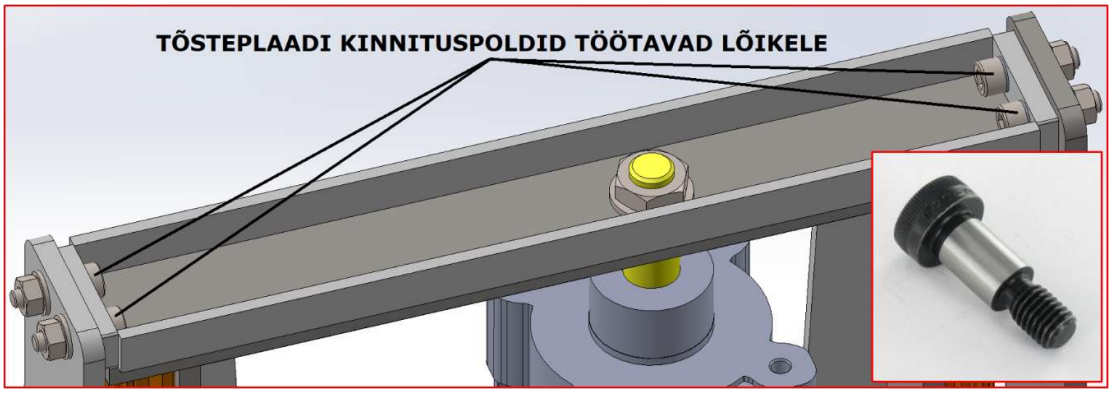
7.2.1 Kruvi- ja poltliited

Virnastaja polt- ja kruviliidete koostamisel ning kinnitusmeetodite ja kinnituskomponentide valimisel on arvestatud järgnevaga:

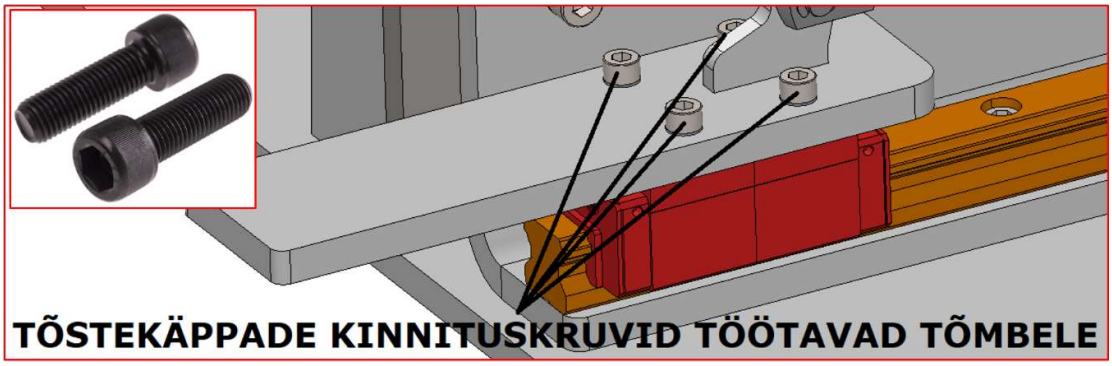
- Detailide iseloom, tööülesanded ja suurused, millest lähtuvalt on valitud avade ja kinnitusvahendite mõõdud, kinnitusvahendite arv, tugevusklassid ning keerme tüüp ja samm;
- Virnastaja töökeskkond, mis on kinnitusvahendite materjali ning pinnakattetüüpi valiku aluseks;
- Ligipääsetavus, mis määrab virnastaja poltide/kruvide pea tüübi (nt. joonisel 55 näidatud poltide päid ei saa asukohast lähtuvalt kinni hoida leht- või silmusvõtmega);
- Standardsus (kasutatud on võimalikult palju samatüübilisi kinnitusvahendeid, erinevuste vähendamiseks on mõningatesse positsioonidesse valitud ka suuremad poldid);
- Liite koormuse suund ja tüüp (töötab kas tõmbele või lõikele ning kas staatiline või dünaamiline koormus), millest lähtuvalt on valitud kas täis- või osakeermega poldid (joonised 54...56), seibide tüübid ning poltide tugevusklassid;



Joonis 54. Poltide keerme pikkuse valik vastavalt poltliite töötingimustele



Joonis 55. Näide lõikele töötava virnastaja liitest ja seal kasutatavatest poltidest

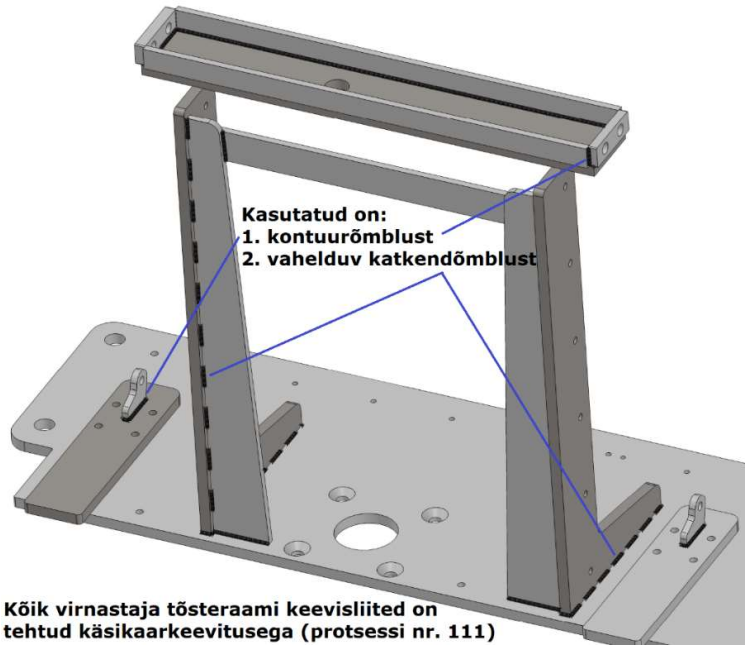


Joonis 56. Näide lõikele töötava virnastaja liitest ja seal kasutatavatest poltidest

Virnastaja polt- ja kruviliidete täpsemad koostamise juhendid ja eelpingutusjõud on toodud peatükis 9.5.

7.2.2 Keevisliited

Virnastaja valmistamiseks kasutatakse S355 ning DC01 klassi süsinikteraseid, mis tähendab, et keevisliidete tegemisel ei ole vaja detailide ette kuumutada. Virnastaja tõsteseadmel on eranditult kõik liited nurkõmblused (Joonis 57), kaitseraamil on aga ka palju põkkõmblusi. Kuna tõsteseadmel on paljude detailide paksus (10 mm), mis on poolautomaagiga keevitamiseks liiga paks, kasutatakse tõsteseadme keevitamisel käsikaarkeevitust (protsessi nr. 111) ning keevisliidete teostamiseks on valitud 4 mm läbimõõduga E42 2 R 11 elektrood.



Joonis 57. Virnastaja tõsteseadme kõikide keevisliidete asukohad ja õmbluse tüübid

Virnastaja kaitseraami (4 mm paksusega nelikanttorud, mille peal on 1 mm paksused teraslehed) detailide keevitamiseks kasutatakse aga poolautomaati koos täidistraadiga (protsessi nr. 136).

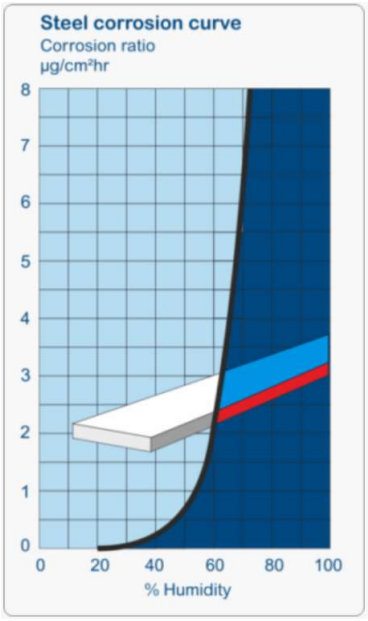
Virnastaja keevisliidete kvaliteediklassi ning kontrollimisnõuete määramisel on lähtutud seadme konkreetsete detailide ja sõlmede kasutuseesmärgist. Kuna seade on prototüüp ja mõeldud vaid ettevõtte sisemiseks kasutamiseks, teostatakse kõikidele keevisliidetele vaid 100% visuaalse kontroll. Keevisõmbluste kvaliteedinõuded erinevad sealjuures aga järgmiselt:

- Tõsteseade - õmblused vastavalt ISO-EN5817 standardi B klassi nõuetele;
- Kaitseraam - õmblused vastavalt ISO-EN5817 standardi C klassi nõuetele.

7.3 Virnastaja värvimine

Kuna virnastaja komponendid on valmistatud süsinikterasest (S355 ja DC01), on oluline kõik seadme komponendid üle värvida. Virnastaja värvitakse järgmistel põhjustel:

- Soovitud esteetilise välimuse ja funktsionaalsuse andmine (läige ja toon ning lähtuvalt tööstusharust ka HACCP nõuete täitmiseks);
- Detailide korrosiooni ja kahjustuste eest kaitsmine tagades seadmele ettenähtud eluea. Virnastaja asub keskkonnas, kus keskmine õhuniiskus on pidevalt suurem kui 60%, mis tähendab, et korrosiooni eest kaitsmata süsinikteras korrodeerub väga kiiresti (Joonis 58). Eelnevast lähtuvalt on värvimise eesmärkidest korrosioonikaitse virnastaja puhul esmaoluline.



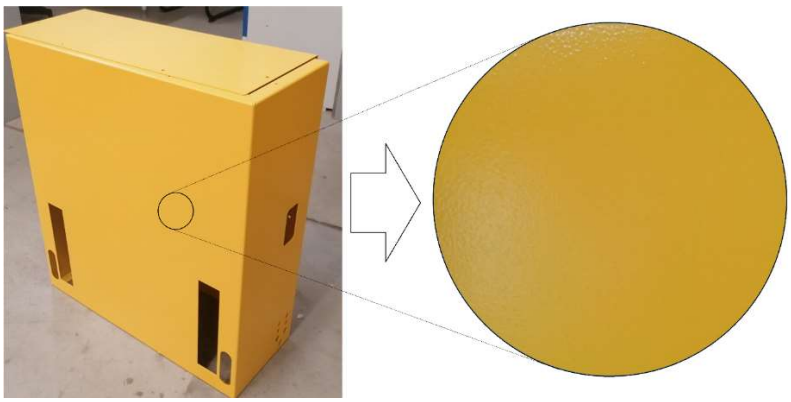
Joonis 58. Terase korrosiooni kiiruse sõltuvus suhtelisest õhuniiskusest [23]

Arvestades projekteerimistingimustes piiritletud seadme eelarvet ning lähtuvalt kokkukeevitatud detailide suurusest ja nende materjalist, jäi virnastajale lõppviimistluse (pinnakatte) tegemiseks valikusse vaid:

- Pulbervärvimine;
- Käsitsi märgvärvimine.

Virnastaja tõsteseadme liikumised põhinevad paralleelselt liikuvatel lineaarjuhikutel. Paralleelsed liikumised seavad aga ranged nõuded lineaarjuhikute paigaldamisele, mistõttu ei ole soovitav juhikute siine kinnitada värvitud detailide pinnale (koos juhiksiinidega tõsteseadet pulbervärvida aga ei tohi). Seetõttu ei saa virnastaja tõsteseadme kokkukeevitatud detaile värvida pulbervärvimisel, mis tähendab, et virnastaja tuleb värvida märgvärviga käsitsi.

Kuna virnastaja värvitakse käsitsi, tuleb kasutada hästi valguvaid värve, mis pintsli ja/või rulliga värvides ei jäta pinnale häirivaid pintsitõmbejooni (Joonis 59). Seetõttu osutus värvikalikus valituks ennast juba väga hästi tehase eelnevate komponentude ja seadmete katmiseks kasutatud metallikaitsevärvide sari „Hammerite" (kollane ja hall toon), mis põhineb akrüüdil ning on spetsiaalselt mõeldud metallpindade katmiseks. Nimetatud sarja värvid kuivavad kiiresti, on ilmasikukindlad ja dekoratiivsed ning tagavad pikaajalise (aastatepikkuse) korrosioonikaitse ka rasketes tingimistes (isegi mereveega kokkupuutes). Samuti on „Hammerite" eeliseks kasutuslihtsus, mis antud juhul tähendab, et värv ei nõua krundi ja alusvärvi kasutamist.



Joonis 59. Hammerite värviga kaetud virnastaja korpus ja rulliga värvimise kvaliteet

Et virnastaja detaile saaks hästi värvida, et värv pindalel hästi püsiks, ning et pinna alt ei kuvaks läbi erinevaid pinnadefekte (nt. keevituspritsmed), lähtutakse virnastaja värvitavate detailide ettevalmistusel järgmistest ISO standardi normidest:

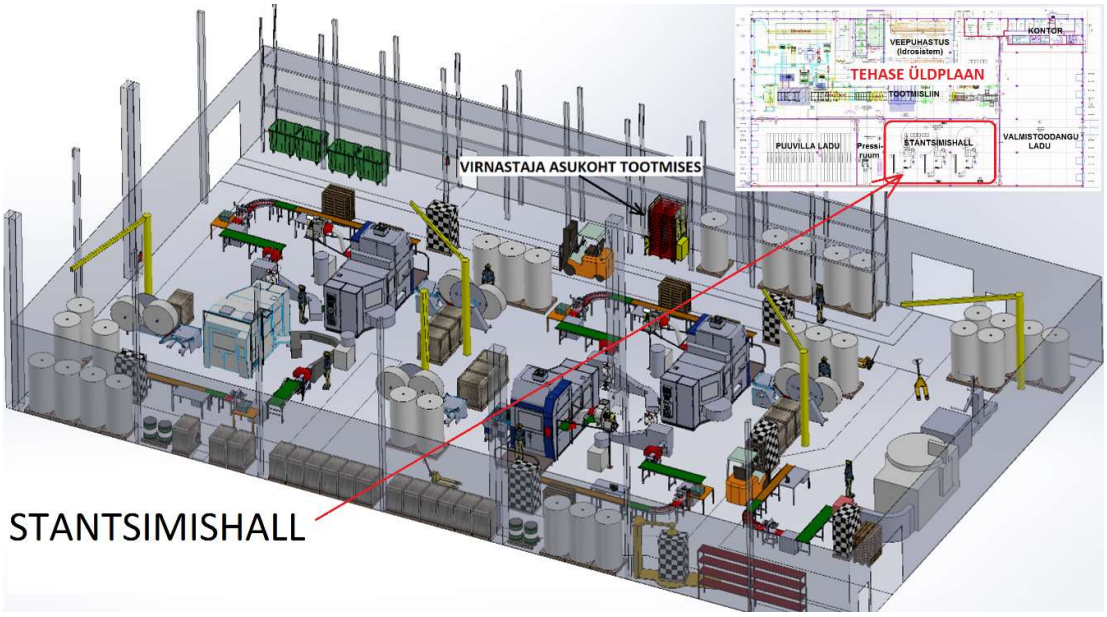
- ISO 12944 – üleüldised nõuded korrosioonikaitse tagamiseks ning metallpindade ettevalmistuspõhimõtted vastavalt standardi ISO 12944-4 st2 nõuetele (ISO 8501-1, Grade B);
- ISO 8501-3 (keevitatud pinnad vastavalt standardi P2 nõuetele).

8. VIRNASTAJA JUHTIMISLOOGIKA

8.1 Virnastaja integreerimine tootmisliinidega

Vastavalt projekteerimistingimuste nõuetele peab olema võimalik virnastaja integreerimine tehase erinevate tootmisliinidega ning märguannete saatmine tõstukijuhtidele, kui virnastaja on kas täis või tühi.

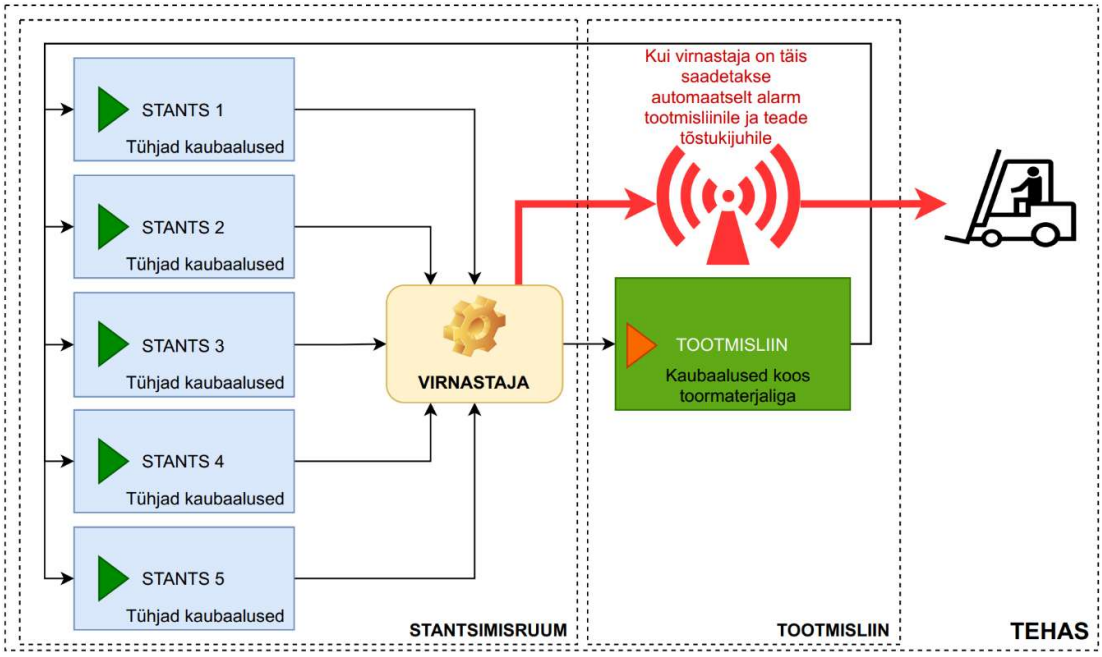
Joonise 60 paremas ülanurgas on näidatud *ca* 10000 m^2 põrandapinnaga tehase üldplaan koos stantsimisruumi asukohaga tehases, kuhu virnastaja paigutatakse.



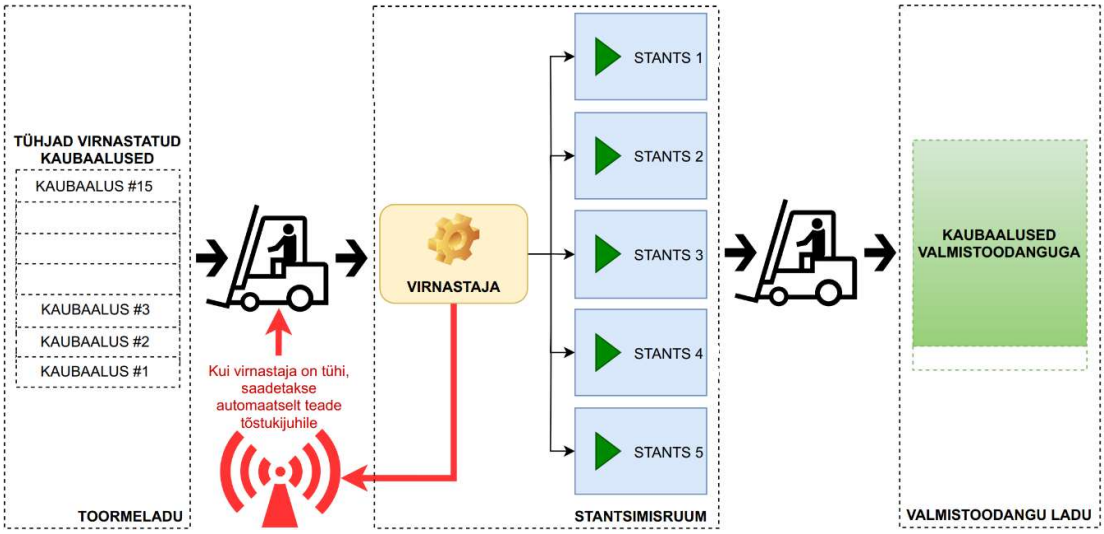
Joonis 60. Töö autori poolt loodud tehase stantsimisruumi 3D mudel, kus on näidatud ka virnastaja asukoht

Kuna tehasesse on installeeritud keskne alarmide ja märguannete süsteem, mis teavitab nii tootmisliini operaatoreid kui ka tõstukijuhte erinevatest olulisematest sündmustest, siis on virnastaja integreerimiseks olemasoleva süsteemiga vaja vaid ühte digitaalset väljundit häiresignaali edastamiseks (olemasolevale süsteemile sobib nii releeväljund kui ka transistorväljund).

Lähtuvalt virnastaja kasutusfunktsioonist tekib alarm ühel juhul siis, kui virnastaja on aluseid täis või juhul, kui virnastajas enam aluseid ei ole (Joonis 61, Joonis 62). Alarm tekib ka juhul, kui virnastaja on häires (vajab lähtestamist). Kõikidel juhtudel saadab virnastaja signaali tehase kesksesse märguannete juhtkontrollerisse, mis omakorda väljastab tehase erinevates piirkondades asuvatesse summeritesse eelnevalt määratud ja kõigile teadaoleva unikaalse helisignaali.



Joonis 61. Virnastaja kasutusloogika ning integreerimine tootmisliiniga koos alarmsignaali tekkimise põhimõttega, kui kasutatakse kaubaaluste virnastamise funktsiooni

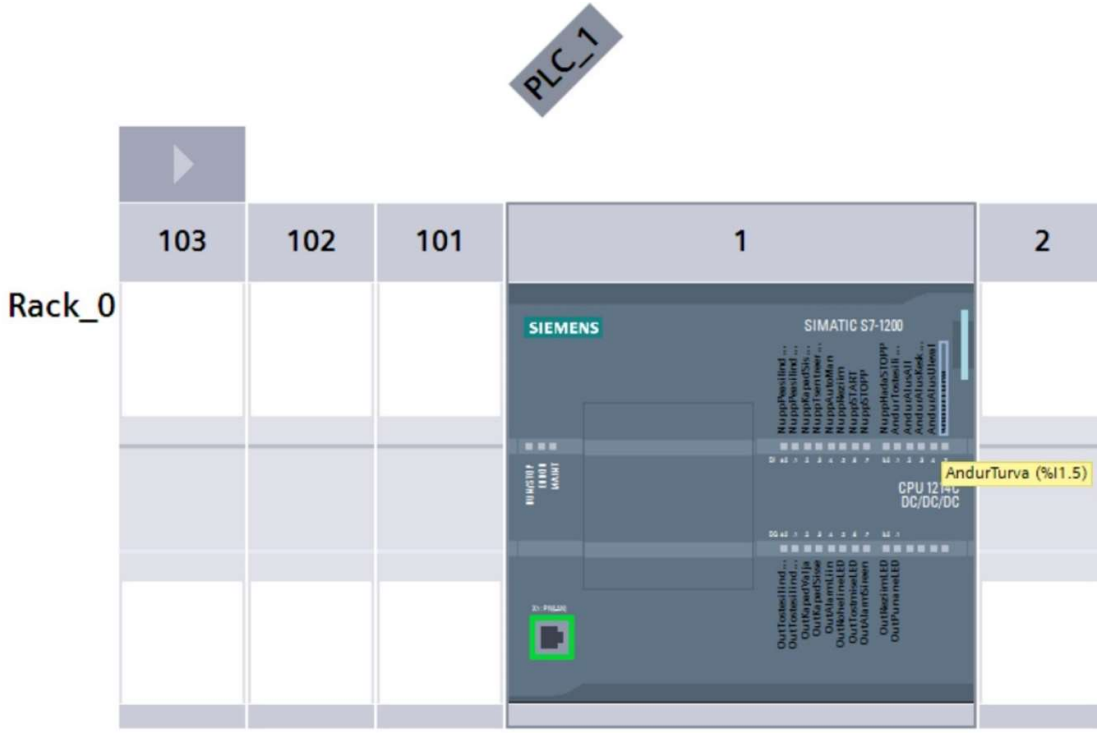


Joonis 62. Virnastaja kasutusloogika ning integreerimine tootmisliiniga koos alarmsignaali tekkimise põhimõttega, kui kasutatakse kaubaaluste etteandmise funktsiooni

8.2 Virnastaja kontrolleri juhtprogrammi koostamine

Virnastaja juhtprogrammi koostamine toimub tarkvarapaketis TIA Portal (Joonis 63). Virnastaja juhtprogrammi loomise olulisemad etapid on lihtsustatult järgmised:

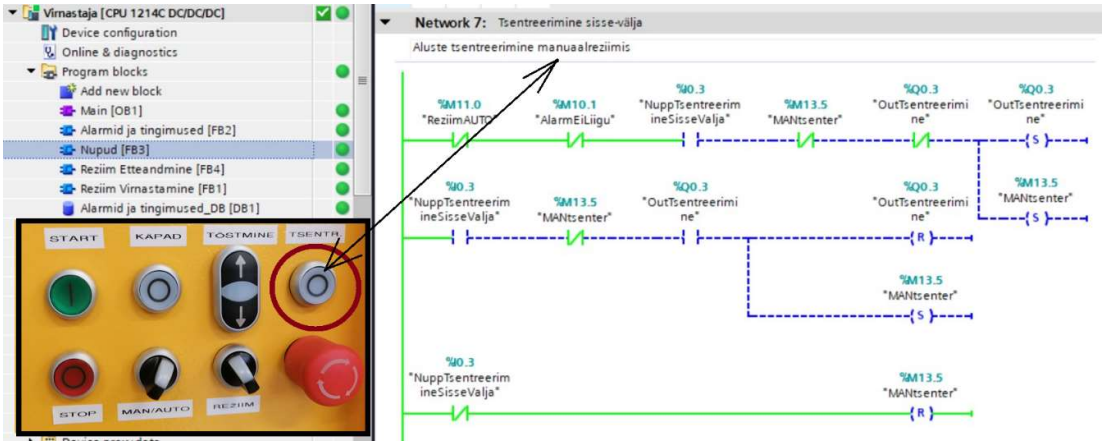
- Projekti loomine;
- Tarkvaras riistvara valimine ja konfigureerimine;
- Muutute loomine;
- Juhtprogrammi loomine (funktsioonide ning funktsiooniplokkide koostamine);
- HMI ekraani visualiseerimine (seadme olekud ja töötsüklite arv, millest lähtuvalt teostatakse virnastalale regulaarseid hoolduseid);
- Programmide üleslaadimine kontrollerisse ning HMI-sse;
- Programmi testimine ning paranduste tegemine.



Joonis 63. TIA Portal tarkvaras konfigureeritud virnastaja PLC Simatic S7-1200 CPU 1214C sisendid ja väljundid

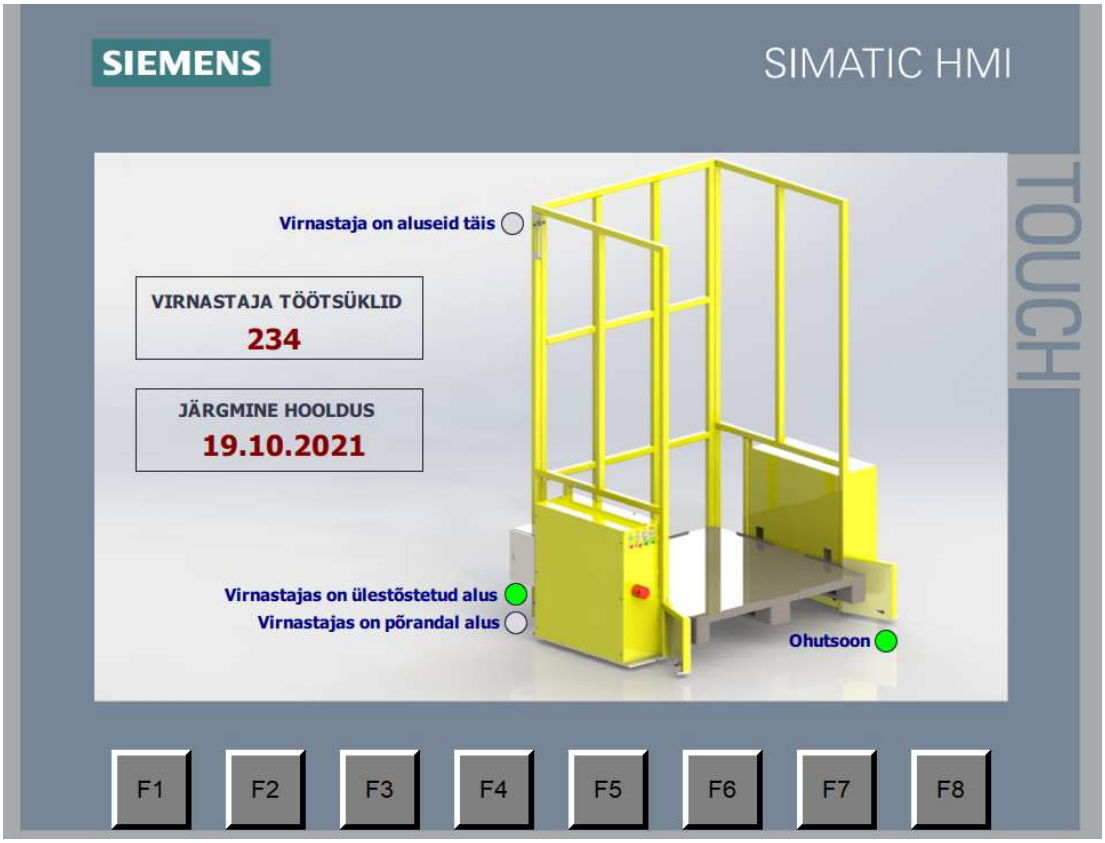
Virnastaja juhtprogramm ja selle funktsionaalsus on loodud vastavalt peatükis 3.4 toodud funktsiooniskeemidele (vt. joonised 10 ja 11). Programmeerimiskeeleks on valitud redeldiagramm (Ladder Logic ehk LAD, Joonis 64) ning seda lähtuvalt virnastaja

juhtprogrammi olemusest ning käesoleva töö autori suurest kogemusest LAD-i kasutamisel.



Joonis 64. LAD programmkoodi näide tsentreerimisnupu „*Flip-flop*" loogikaahelast

Kuna virnastajale ei ole ettenähtud HMI ekraani, on virnastaja visualiseering tehtud tehase kolmanda seadme HMI ekraanil (infovahetuseks kasutatakse Profinet protokolli ning *get* / *put* funktsioone), kus virnastaja aknas (Joonis 65) kuvatakse andurite olekud ning seadme töötsüklid, millest lähtuvalt arvutatakse ka järgmine hoolduskuupäev.



Joonis 65. Virnastaja HMI aken hooldusinfo ning andurite olekute kuvamiseks

9. VIRNASTAJA KASUTAMINE

9.1 Ohutusinformatsioon

Ettevaatust!
Virnastaja on mõeldud kasutamiseks vaid kaubaaluste tõstmiseks ja langetamiseks. Seadet tohib kasutada vaid vastavalt kasutusjuhendile (Peatükk 9 tervikuna).

Virnastaja kasutamisel on keelatud:
Virnastajat ei tohi kasutada inimeste tõstmiseks ega langetamiseks. Inimeste viibimine seadme sisemuses selle töötamise ajal on rangelt keelatud.

Riskide ja ohtude elimineerimine:
Virnastaja tõstemehhanismid peavad olema kaetud. Virnastajaga opereerimine eemaldatud või vigastatud katetega on rangelt keelatud.

Virnastaja on varustatud häda-stop nupuga (*Emergency Stop*), mis peab alati olema vabalt ligipääsetav ega tohi kunagi olla blokeeritud. Mittetöötava või vigastatud häda-stopp nupuga on virnastajaga opereerimine rangelt keelatud.

Plahvatusohtlik keskkond
Virnastaja ei ole sobilik töötamiseks plahvatusohtlikes keskkondades (ATEX puudub).

Virnastaja ohutusmärgid vastavalt EN ISO 7010 standardile on järgmised:

Ohuala

Seadme automaatne käivitumine

Elektrioht

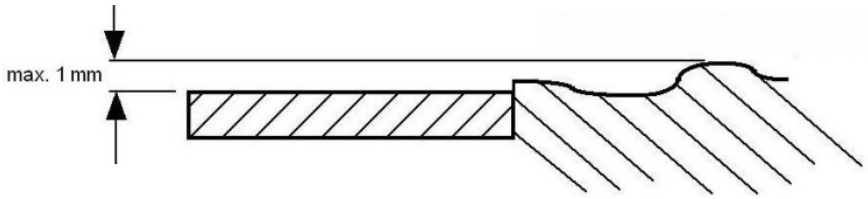
Muljumise oht

Kuna plastikust kaubaalused ei ole suure kandevõimega ning võivad puruneda juhul, kui alus on servadest üles tõstetud ja suurem koormus (inimene) on asub aluse keskel, paigaldatakse virnastaja raami külge hästi nähtavasse kohta spetsiaalselt virnastaja kasutajatele mõeldud A4 formaadis lamineeritud unikaalne keelumärk (Joonis 66).

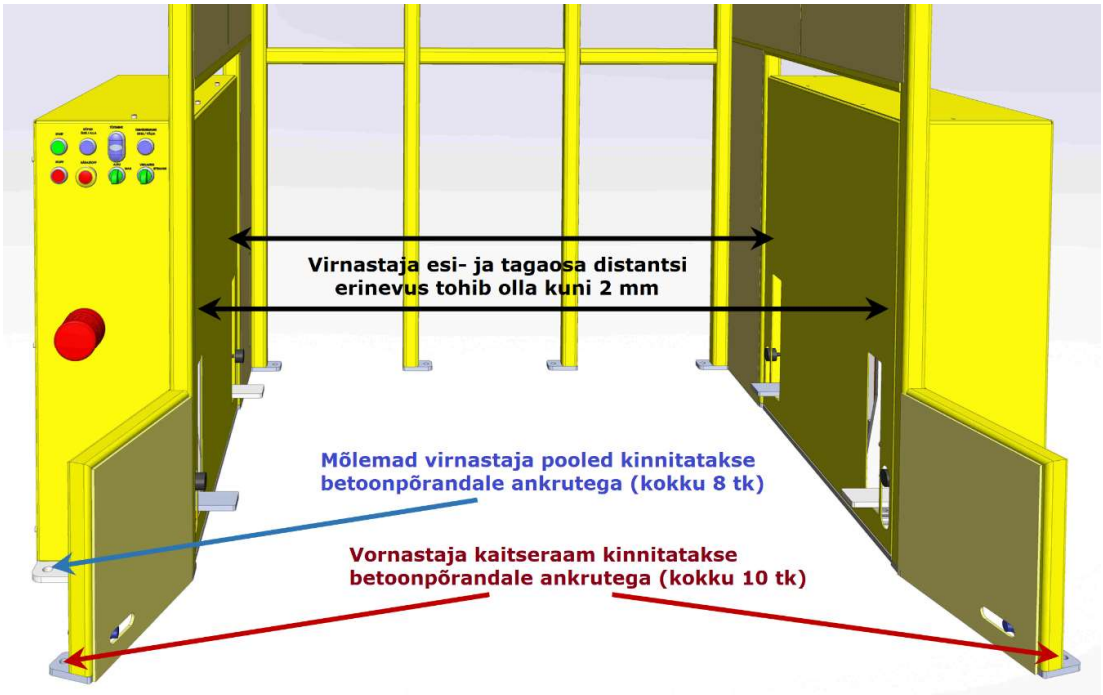
Joonis 66. Ülestõstetud plastikalustele astumist keelav keelumärk

9.2 Paigaldus, reguleerimine ning ühendamine

Virnastaja tuleb paigaldada betoonpõrandale, mille paksus on vähemalt 10 cm. Põrand peab olema loodis (±2 mm/m) ja sile (ebatasasused ±1 mm, Joonis 67) ning hõõrdeteguri vähendamiseks kaetud soovitavalt epokattega (nt Tikkurila Temafloor P300 kahekomponentne lahustivaba epoksüüdpinnakate, või midagi sarnast).



Joonis 67. Lubatud betoonpõranda ebatasasused virnastaja all

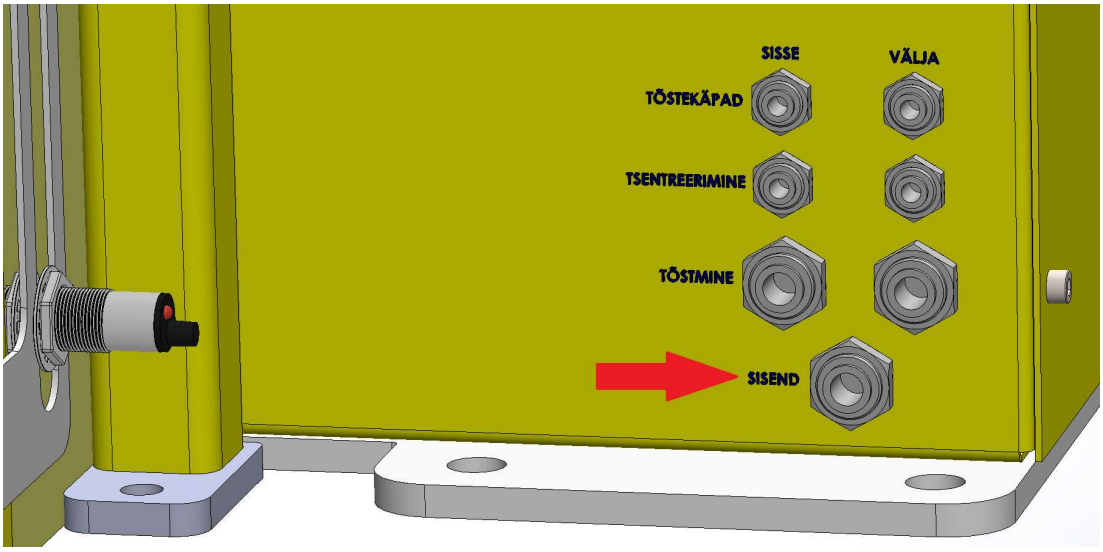


Joonis 68. Virnastaja kinnitamine põrandale

Esmalt kinnitatakse nt kiilankrutega (12 x 120 mm, 10 tk) põrandale virnastaja kaitseraam. Seejärel paigaldatakse kaitseraamiga samale joonele ja paralleelselt (±1 mm) vasak- ja parempoolne tõsteseade (Joonis 68). Tõsteseadmed kinnitatakse põrandale nt kiilankrutega (16 mm x 120 mm) kokku kaheksast punktist.

Virnastaja elektriline ühendamine toimub vasakpoolse tõsteseadme korpuse küljes olevas elektrikilbis vastavalt elektriskeemile (vt Lisa 4). Ühenduskaablina on sobilik nt viiesooneline ja 1,5 mm^2 juhtme ristlõikepindalaga paindkaabel (nt H05VV-F 5G1,5).

Virnastaja pneumaatiline ühendamine toimub vasakpoolsesse tõsteseadmesse, kus on 10 mm läbimõõduga kiirliide tähistusega „SISEND" suruõhumagistraaliga ühendamiseks (Joonis 69). Tõsteseadmete omavaheliseks ühendamiseks tuleb paigaldada „TÕSTMINE" liitmikesse 10 mm voolikud (2 tk) ning „TÕSTEKÄPAD" ja „TSENTREERIMINE" liitmikesse 6 mm läbimõõduga voolikud (kokku 4 tk). Suruõhutorud tuleb ühendada nii vasak- kui ka parempoolsel seadmel ühtemoodi „SISSE" ja „VÄLJA" liitmikesse.



Joonis 69. Virnastaja suruõhutrassiga ning tõsteseadmete omavaheline ühendamine

9.3 Ohutus enne seadme kasutamist

Enne virnastaja kasutama hakkamist peab veenduma, et seadme kõik ohutust tagavad andurid ja hädastopp nupp toimivad ning samuti peavad olema paigaldatud kõik seadme katted ja kaitsepiirded.

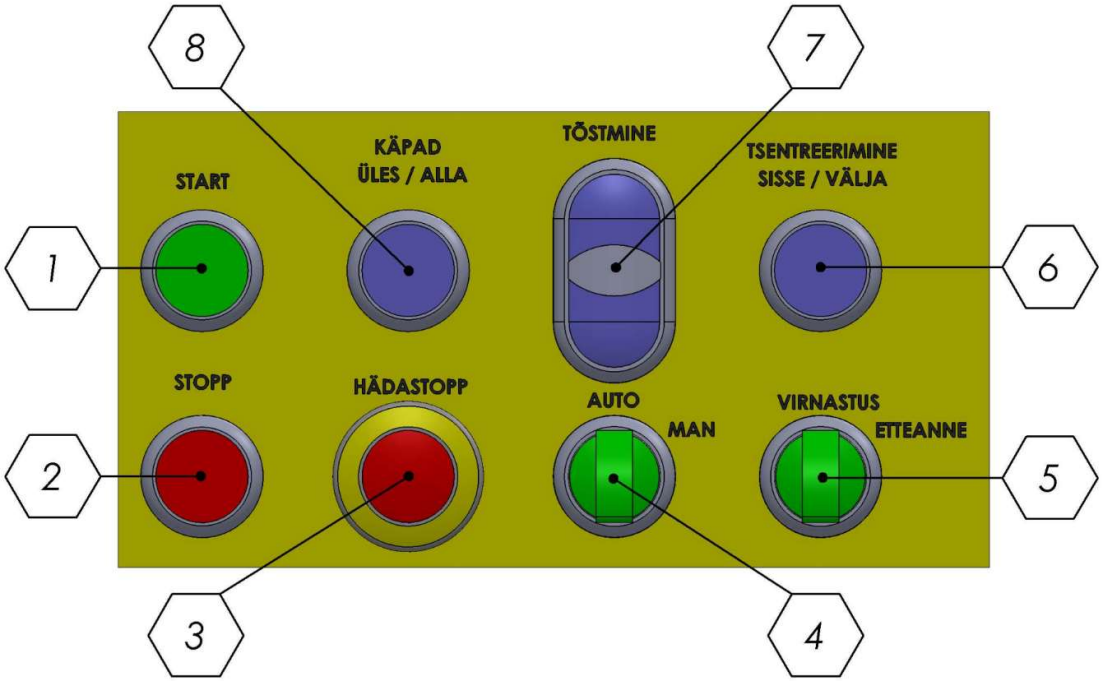
9.4 Virnastajaga opereerimine

Virnastajat saab juhtida manuaalses režiimis, kuid seadmega opereerimine toimub peamiselt automaatses režiimis. Manuaalse režiimi kasutamine on vajalik regulaarse hoolduse käigus virnastaja erinevate liikumiste kontrollimiseks ning vajadusel peale alarmi või elektrikatkestust seadme viimiseks algasendisse.

Märkus!

Manuaalses režiimis võivad virnastajat kasutada või sellega opereerida vaid eriväljaõppe saanud operaatorid või hoolduspersonal, kuna manuaalses režiimis on võimalik virnastaja käpad sisse tõmmata ka siis, kui kaubaaluste virn on üles tõstetud.

Virnastaja opereerimiseks kasutatavate nuppude selgitused on toodud joonisel 70.



Joonis 70. Virnastaja opereerimisnupud

Virnastaja nuppude funktsioonid on järgmised:

1. **START** – Seade hakkab AUTO režiimis tööle kas virnastamise või etteandmise režiimis. START funktsioonist indikeerib nupu all põlema hakkav roheline LED.
2. **STOPP** – Automaatne töörežiim peatatakse ning seiskub. STOPP funktsioonist indikeerib nupu all põlema hakkav punane LED. Seadet saab liigutada stopp režiimis vaid juhul, kui sisse on lülitatud manuaalrežiim. STOPP nuppu 3 sekundit all hoides lähtestatakse kõik seadme alarmid ning signaalid (seiskub sireen ning lõpetatakse tootmisliinile saadetavad signaalid).
3. **HÄDASTOPP** – Seade seiskub, kõik liikumised on peatatud, STOPP nupu all vilgub punane LED.
4. **AUTO / MAN** – töörežiimide valik. Seadmega opereerimine toimub üldjuhul alati AUTO režiimis, kus liikumised toimuvad automaatselt. AUTO režiimi aktiveerimisel põleb nupu all roheline LED. Kui objekt on ohutsoonis, LED vilgub.
5. **VIRNASTUS / ETTEANNE** – Virnastaja tööpõhimõtte valik, mis aktiveerub vaid AUTO režiimis. „VIRNASUTS": aluseid virnastatakse, „ETTEANNE": aluseid saab

virnast ükshaaval välja võtta. VIRNASTUS režiimi aktiveerimisel põleb nupu all roheline LED. Kui objekt on ohutsoonis, LED vilgub.

6. **TSENTREERIMINE SISSE / VÄLJA** – nupule vajutamisel tulevad tsentreerimissilindrid kas välja või lähevad sisse (liikumise suund oleneb tsentreerijate hetkeasendist). Nuppu saab kasutada vaid manuaalses režiimis.
7. **TÕSTMINE** – tõstesilindri tõstmine või langetamine. Liikumised toimuvad vaid ajal, kui nuppe (vastavalt kas ülemist või alumist) hoitakse all. VIRNASUTS ja AUTO režiimis nupu all hoidmisel 3 s lastakse virnastajasse kogutud kaubaalused põrandale ning tõmmatakse välja tõstekõpad.
8. **KÄPAD SISSE / VÄLJA** – nupule vajutamisel tulevad tõsteкäpad kas välja või tõmbuvad virnastajasse sisse (liikumise suund oleneb käppade hetkeasendist). Nuppu saab kasutada vaid manuaalses režiimis.

Virnastaja virnastamise ning kaubaaluste etteandmise töörežiimide detailsed kirjeldused on funktsiooniskeemidena toodud peatükkis 3.4 vastavalt joonistel 10 ja 11.

9.5 Virnastaja hooldus ja puhastamine

Kuna virnastaja on mõeldud töötama väga tolmuses keskkonnas, on oluline virnastajat regulaarselt puhastada ning hooldada. Seadme igapäevane kontroll ja puhastamine tuleb läbi viia optimaalselt vastavalt seadme asukohas valitsevatele oludele.

Virnastaja plaanilise hoolduse eesmärkideks on:

- hoida masinat heas seisukorras;
- tagada optimaalne töökindlus ja eluiga;
- vähendada ootamatute rikete võimalust.

Plaaniline hooldus koosneb peamiselt:

- seadete kontrollimisest;
- kulumise kontrollimisest;
- määrimisest.

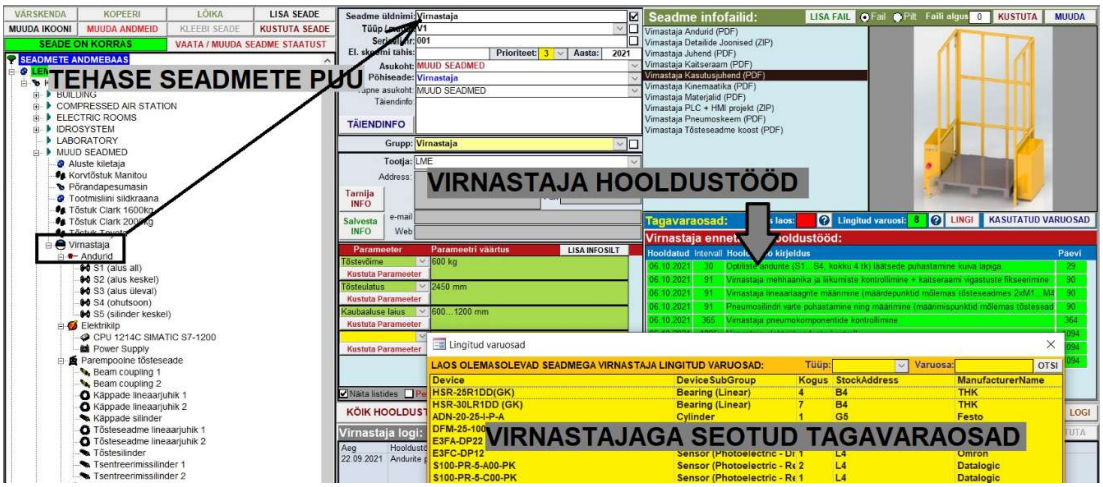
Plaanilist hooldust tuleb teha regulaarselt ning vastavalt hooldusjuhendis näidatule. Tabelis 12 näidatud tegevuste loetelu koos hooldusintervallidega on sisestatud ka tehase hooldustarkvarasse, mis annab automaatselt ennetava teavituse hooldustegevuste saabumisest. Kuna hooldustegevused põhinevad aga reaalsetel töötsüklitel, mida kuvatakse virnastaja HMI ekraanil, tuleb tehnikutel siiski regulaarselt (kord nädalas) vaadata ka virnastaja HMI aknasse, kus kuvatakse järgmise hoolduse täpne kuupäev.

Tabel 12. Virnastaja hooldusjuhend

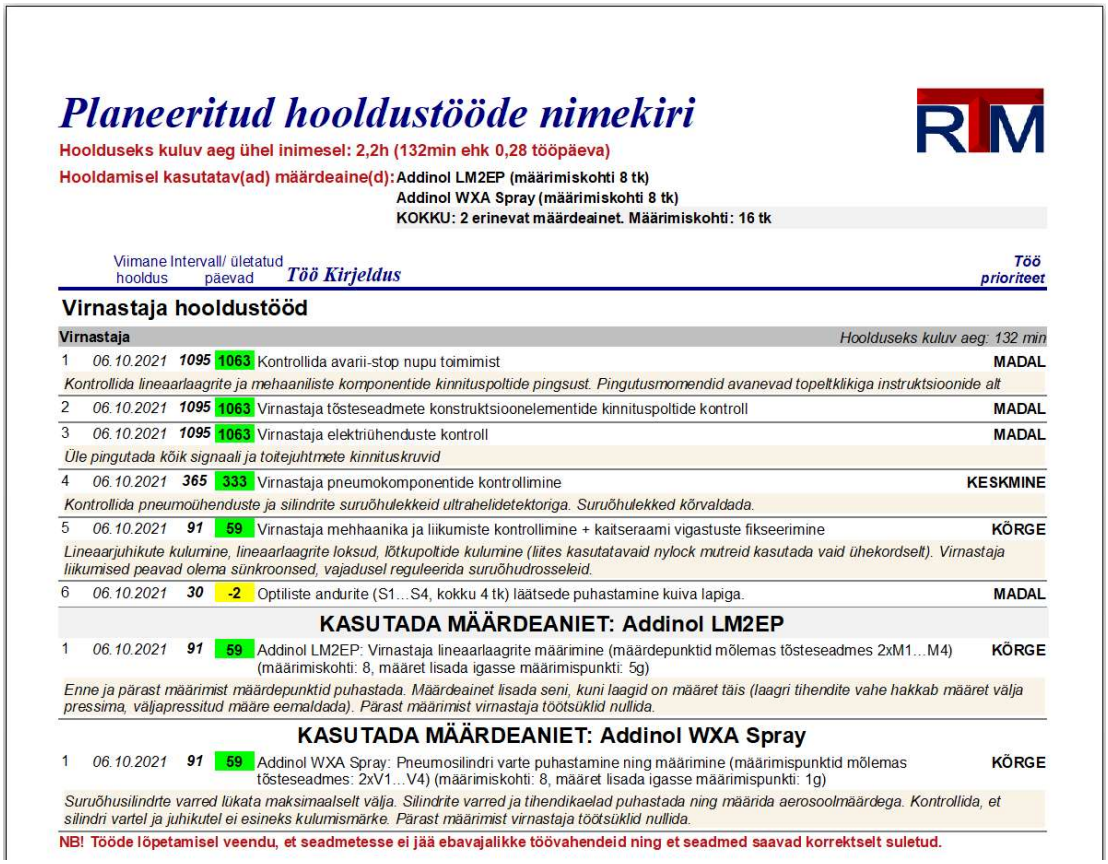
Hooldustöö	Kommentaar / protseduur	3000 tsüklit	10000 tsüklit	20000 tsüklit	3 aastat
Optiliste andurite (4 tk) läätsede puhastamine kuiva lapiga.	Samal ajal kontrollida, et andurid ei oleks vigastatud ning et andurid ja nende signaalkaablid oleksid korrektselt kinnitatud. Andurite toimimist kontrollida (indikaator LED peab hakkama põlema, kui anduri ette tuleb objekt).	X			
Virnastaja visuaalne inspektsioon	Virnastaja ja tema kaitseraami füüsilised vigastused	X			
Virnastaja mehhaanika ja liikumiste kontrollimine	Lineaarjuhikute kulumine, lineaarlaagrite loksud, lõtkupoltide kulumine (liites kasutatavaid nylock mutreid kasutada vaid ühekordselt). Virnastaja liikumised peavad olema sünkroonsed, vajadusel reguleerida suruõhudrosseleid.	X			
Virnastaja lineaarlaagrite määrimine (joonis 73 - vasakpoolse ja parempoolse tõsteseadme määrimispunktid on tähistatud identselt).	Määrdepunktid M1...M4. Kasutada mineraalõli baasil ja liitiumtahkestiga NLGI 2 klassi määrdeainet (nt. Addinol LM2EP). Enne ja pärast määrimist määrdepunktid puhastada. Määrdeainet lisada seni, kuni laagid on määret täis (laagri tihendite vahe hakkab määret välja pressima, väljapressitud määre eemaldada)		X		
Pneumosilindri varte puhastamine ning määrimine	Määrdepunktid V1…V4. Suruõhusilindrte varred lükata maksimaalselt välja. Silindrite varred ja tihendikaelad puhastada ning määrida aerosoolmäärdega Addinol WXA Spray (või analoog). Kontrollida, et silindri vartel ja juhikutel ei esineks kulumismärke.		X		
Virnastaja pneumokomponentide kontrollimine	Kontrollida pneumoühenduste ja silindrite suruõhulekkeid ultrahelidetektoriga. Suruõhulekked kõrvaldada.			X	
Virnastaja elektriühenduste kontroll	Üle pingutada kõik signaali ja toitejuhtmete kinnituskruvid				X
Virnastaja kinnituspoltide kontroll	Kontrollida lineaarlaagrite ja mehaaniliste komponentide kinnituspoltide pingsust. Pingutusmomendid võtta tabelist 13.				X
Kontrollida avarii-stop nupu toimimist		X			

Virnastaja hooldusplaanis (Tabel 12) näidatud intervallid on optimaalsed vaid juhul, kui seade teeb *ca* 100 töötsüklit ööpäevas. Vastavalt seadme kasutamise intensiivsusele võib hooldusplaani intervalle lineaarselt töökoormusele korrigeerida.

Plaanilist hooldust võib teha vaid kvalifitseeritud hooldustöötajad. Kõik virnastajaga seonduvad infomaterjalid (joonised, tagavaraosad, hooldustööd, jne) sisestatakse tehase hooldustarkvarasse R.T.M (Joonis 71), kust vastavalt hooldustöödele (Joonis 72) ning kontrolltegevustele tekib virnastajale (hooldus)logi koos varuosade kasutusega.



Joonis 71. Ekraanitõmmis virnastaja andmetest töö autori poolt loodud (arendatud ja programmeeritud) Eesti ainsas TPM/RCM toega hooldustarkvaras RTM



Planeeritud hooldustööde nimekiri

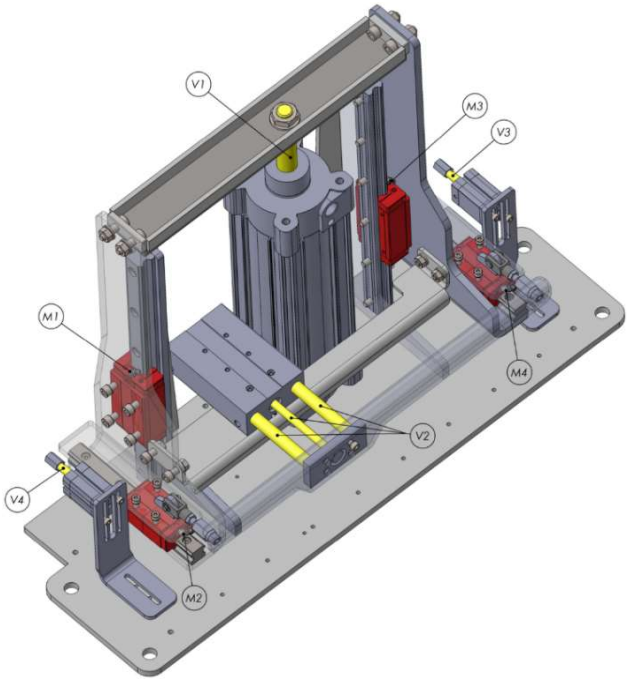
Hoolduseks kuluv aeg ühel inimesel: 2,2h (132min ehk 0,28 tööpäeva)

Hooldamisel kasutatav(ad) määrdeaine(d): Addinol LM2EP (määrimiskohti 8 tk)
Addinol WXA Spray (määrimiskohti 8 tk)
KOKKU: 2 erinevat määrdeainet. Määrimiskohti: 16 tk

	Viimane hooldus	Intervall/ päevad		Töö Kirjeldus	Töö prioriteet
Virnastaja hooldustööd					
Virnastaja				*Hoolduseks kuluv aeg: 132 min*	
1	06.10.2021	1095	1063	Kontrollida avarii-stop nupu toimimist	MADAL
				Kontrollida lineaarlaagrite ja mehaaniliste komponentide kinnituspoltide pingsust. Pingutusmomendid avanevad topeltklikiga instruktsioonide alt	
2	06.10.2021	1095	1063	Virnastaja tõsteseadmete konstruktsioonelementide kinnituspoltide kontroll	MADAL
3	06.10.2021	1095	1063	Virnastaja elektriühenduste kontroll	MADAL
				Üle pingutada kõik signaali ja toitejuhtmete kinnituskruvid	
4	06.10.2021	365	333	Virnastaja pneumokomponentide kontrollimine	KESKMINE
				Kontrollida pneumoühenduste ja silindrite suruõhulekkeid ultrahelidetektoriga. Suruõhulekked kõrvaldada.	
5	06.10.2021	91	59	Virnastaja mehhaanika ja liikumiste kontrollimine + kaitseraami vigastuste fikseerimine	KÕRGE
				Lineaarjuhikute kulumine, lineaarlaagrite loksud, lõtkupoltide kulumine (liites kasutatavaid nylock mutreid kasutada vaid ühekordselt). Virnastaja liikumised peavad olema sünkroonsed, vajadusel reguleerida suruõhudrosseleid.	
6	06.10.2021	30	-2	Optiliste andurite (S1…S4, kokku 4 tk) läätsede puhastamine kuiva lapiga.	MADAL
KASUTADA MÄÄRDEANIET: Addinol LM2EP					
1	06.10.2021	91	59	Addinol LM2EP: Virnastaja lineaarlaagrite määrimine (määrdepunktid mõlemas tõsteseadmes 2xM1…M4) (määrimiskohti: 8, määret lisada igasse määrimispunkti: 5g)	KÕRGE
				Enne ja pärast määrimist määrdepunktid puhastada. Määrdeainet lisada seni, kuni laagid on määret täis (laagri tihendite vahe hakkab määret välja pressima, väljapressitud määre eemaldada). Pärast määrimist virnastaja töötsüklid nullida.	
KASUTADA MÄÄRDEANIET: Addinol WXA Spray					
1	06.10.2021	91	59	Addinol WXA Spray: Pneumosilindri varte puhastamine ning määrimine (määrimispunktid mõlemas tõsteseadmes: 2xV1…V4) (määrimiskohti: 8, määret lisada igasse määrimispunkti: 1g)	KÕRGE
				Suruõhusilindrte varred lükata maksimaalselt välja. Silindrite varred ja tihendikaelad puhastada ning määrida aerosoolmäärdega. Kontrollida, et silindri vartel ja juhikutel ei esineks kulumismärke. Pärast määrimist virnastaja töötsüklid nullida.	

NB! Tööde lõpetamisel veendu, et seadmetesse ei jää ebavajalikke töövahendeid ning et seadmed saavad korrektselt suletud.

Joonis 72. RTM hooldustarkvara poolt genereeritav virnastaja hooldustööde raport



Joonis 73. Virnastaja määrdepunktid (kollastel pindadel kasutada WXA Spray, punastena tähistatud lineaarjuhikud määrida Addinol LM2EP liitiummäärdega)

Tabel 13. Virnastaja poltide pingutusmomendid

	Standard			Special									
DIN	DIN933/912		DIN7991	DIN933/912		DIN933/912		DIN933/912			DIN7991	DIN916	
ISO	ISO4017/4762			ISO4017/4762		ISO4017/4762		ISO4017/4762		ISO7379		ISO4029	
Qual.	8,8		10,9	10,9		12,9		SS Class 70		12,9	8,8	45H	
	Nm			Nm		Nm		Nm		Nm	Nm	Nm	
M4	2,9	*3,5*		4,1	*4,9*	4,8	*5,7*	2,2	*2,6*	-	2,3	1,8	
M5	5,9	*7,1*		8,1	*9,7*	9,5	*11,4*	4,2	*5,1*	6,5	4,7	3,5	
M6	9,9	*12*		14	*17*	16,5	*19,8*	7,4	*8,9*	12	7,9	6	
M8	24	*29*		34	*41*	40	*48*	17,8	*21,4*	30	19	14	
M10	47	*56*		68	*81*	79	*95*	36	*43*	60	37	28	
M12	82	*100*		117	*140*	135	*160*	62	*74*	105	65	45	
M16	200	*240*		280	*330*	330	*390*	150	*180*	250	160	110	
M20	390	*470*		560	*670*	650	*780*	300	*360*	480	312	210	

Kui poldi pea või mutri all kasutatakse Nord-Lock seibe, tuleb pingutusmomendile lisada 20%

Virnastaja detailide kinnitamisel poltide või kruvidega tuleb jälgida, et keermed ei oleks vigastatud või kaetud mustusega. Kuna pingutusmomendid sõltuvad poldi/kruvi pinnakattest/hõõrdetegurist, kehtivad tabelis toodud väärtused vaid õlitatud elektriktsink nn „black oxi" poltide kinnikeeramisel, mistõttu tuleb enne poldi kinnikeeramist kontrollida, et keermed oleksid määritud selleks ettenähtud õliga. Kõikide virnastaja kruviliidetes tuleb keermed enne kinnikeeramist katta Anti-Corrosion Grease SW 2 (Addinol) määrdeainega (sel juhul kasutada pingutusmomendi parandustegurit 0,86).

9.6 Virnastaja konserveerimine, kui seadet ei kasutata pikaajaliselt

Kui virnastaja eemaldatakse tootmisest ning seadet ei soovita kasutata pikema aja jooksul, tuleb esmalt puhastada kõik juhiklaagrite siinid ning pneumosilindrite vardad, misjärel tuleb need korrosiooni eest kaitsmiseks katta selleks ettenähtud määrdeainetega (vt Peatükk 9.5 – Virnastaja hooldus ja puhastamine). Kõik seadme liikuvad osad tuleb fikseerida algasendis. Pneumosisendid tuleb sulgeda selleks ettenähtud sulguritega.

9.7 Toote utiliseerimine

Kui virnastajat enam ei kasutata ning tekib vajadus seadme utiliseerimiseks, tuleb seade võimalusel osadeks võtta viimases kohas, kus seda kasutati. Seadme peavad käigust maha võtma kvalifitseeritud tehnikud järgmiselt:

- Peatoide ning suruõhuvarustus lahutada;
- Arvestada silindrites ja muudes pneumoseadmetes oleva jääkrõhuga;
- Enne demonteerimist toestada suuremad ja rasked masinaosad, et need ei kukuks maha.

Kui seadme demonteerimine viimases kasutuskohas on võimatu, tuleb virnastaja muuta transpordikindlaks selliselt, et oleks välistatud oht inimestele või varale.

Pärast virnastaja täielikku osadeks võtmist tuleb erinevad materjalid ja komponendid sorteerida ning mis võimalik, taaskasutusse suunata.

Virnastaja romud sisaldavad väärtuslikke materjale ja komponente ning seepärast ei tohiks neid olmeprügi hulka visata.

Virnastaja valmistamiseks ei ole kasutatud ohtlikke kemikaale ega materjale.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli leida lahendus tootmisettevõttes 31,5 kg kaaluvate erikujuliste tühjade plastikaluste üksteise otsa tõstmise ehk virnastamise protsessi mehhaniseerimiseks ning automatiseerimiseks.

Kuigi kaubaaluste virnastajate valmistajaid on turul mitmeid, ei saanud antud juhul kasutada pakutavaid standardlahendusi lähtuvalt eelkõige kasutatavate plastikaluste erilisest kujust, millest tuleneb nõue enne aluste üksteise otsa tõstmist need väga täpset tsentreerida. Lisaks võimetusele kaubaaluseid tsentreerida, tingis standardlahendustest loobumise ning uue ja konkurentidest võimekama seadme projekteerimise vajaduse ka kõikide turul olevate seadmete ebamõistlikult kõrge hind.

Lõputöö esimene osa annab ülevaate olulisematest turul pakutavatest standardsetest kaubaaluste virnastamisseadmetest ning nende tootjatest koos loeteluga toodete konfigureerimisvõimalustest.

Järgnev, kaubaaluste virnastaja projekteerimise peatükk, annab esmalt põhjaliku ülevaate kõikidest nõuetest uuele seadmele. Seejärel pakutakse lähtuvalt projekteerimistingimustele välja tõsteseadme erinevad võimalikud lahendusvariandid ning luuakse nendest realistlikud 3D mudelid, mille edasisel analüüsimisel leitakse hindamismaatriksi abil parim lahendus.

Edasi teostatakse eelneva ideekorje ning analüüsi tulemusel leitud tõsteseadme parima lahenduse mudelis kõikidele olulisematele detailele ning sõlmedele tugevusarvutused, millest lähtuvalt valitakse vajalikud standardkomponendid ning optimeeritakse koostedetailide kuju ja materjali paksus.

Lisaks ülevaatele kaubaaluste virnastamisseadme projekteerimisprotsessist annab käesolev magistritöö ülevaate ka kõikidest projekteeritud masinas kasutatavatest standardkomponentidest koos komponentide valikute aluspõhimõtetest. Seega on käesolevas töös läbivalt väga tähtsal kohal kõikide seadmes kasutatavate detailide ja komponentide valiku põhjendamine (et miks tehtud valik on antud detaili/komponendi) jaoks kõige õigem ja optimaalsem.

Virnastaja detailide valmistamise peatükis antakse ülevaade kõikidest seadme eridetailide valmistamisprotsessidest (laserlõikus, painutamine, keermestamine keevitamine, värvimine) ning eeltingimustest, millele on projekteerimisel ja tööjooniste koostamisel tähelepanu pööratud, et detailide valmistamine oleks kolmandale osapoolele võimalikult lihtne ja tellijale võimalikult soodne.

Kuna käesoleva lõputöö raames on loodud reaalne ja toimiv masin, mida tootmisettevõttes edaspidiselt igapäevaselt kasutatakse, on töö lõpuosas toodud ka ülevaade, milline on seadme juhtimisloogika ning kuidas on virnastaja integreeritud tehase tootmisprotsessidesse.

Lõputöö viimane peatükk annab läbi erinevate juhendite detailse ülevaate, millised on virnastajaga seonduvad ohud ja riskid, kuidas seadet paigaldada, kuidas temaga opereerida ning kuidas masinat hooldada ning vajadusel konserveerida või utiliseerida.

Lisaks seadme projekteerimise ja valmistamise erinevate etappide kirjeldamisele on käesoleva lõputöö teravas fookuses just kõikide virnastajas kasutatavate detailide ning komponentide valikute detailne põhjendamine, millega töö autor soovib rõhutada, et isegi suhteliselt lihtsate masinate loomisel ei tohiks kunagi mitte ükski masinasõlm või mitte ühegi komponendi valik põhineda nn juhusliku valikul, mis tähendab, et ka kõige väiksema/lihtsama komponendi/detaili valiku või loomise aluseid peab insener alati oskama maksimaalselt detailselt põhjendada. Tooteloomes kõikide aspektide arvesse võtmisel ning optimaalsete lahenduste leidmisel olid virnastaja projekteerimisel suureks abiks TRIZ ja X-keskne projekteerimismetoodika.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to find a solution for a production companie to replace hard mechanical human work of stacking empty plastic pallets against automated machine.

Although there are several manufacturers of pallet stackers already on the market, the standard solutions does not have pallet centering function, which is very important due to the specific shape of the plastic pallets, which requires pallets to be centered very accurately before being stacked. In addition to the inability to center pallets, the abandonment of excisting solutions and the need to design a new and more capable machine was also caused by the unreasonably high price of all stacking machines available on the market.

The first part of the thesis provides an overview of the standard pallet stacking machines and their manufacturers available on the market together with standard pallet stacking machinees configuration options.

Chapter about pallet stacker designing process gives an overview of all the requirements for the machine which will be built. Different possible solutions are proposed and realistic 3D designe models were created, which will be analyzed further to find the best solution.

After finding best solution for pallet stacking machine desing, strength calculations were performed for most important parts and assemblies. Based on analysis, assembly components will be optimized.

In addition to an overview of the pallet stacker design process, the thesis also provides an overview of selection process of all standard components used inside of the machine, together with explanation, why each specific part is most suitable and optimum solution for the machine.

The chapter about designed parts manufacturing methods provides an overview of all the production processes (laser cutting, bending, threading, welding, painting) and requirements, which have been taken into account during designing and making technical drawings.

A real and functional pallet stacking machine, which is used on a daily basis in the production company, has been created during the framework of this masters thesis. The final part of the work provides an overview how machine is integrated into the factory, where it is lockated.

Last chapter of the thesis also provides a detailed overview of the hazards and risks associated with the machine together with an information, how to install the machine, how to operate with it and how to the maintenance and, if needed, how to preserve or utilize of the machine.

In addition to describing the various stages of the pallet stacking machine desingning process, this master's thesis also focuses on a machine components selection principles and describes how and why all used parts where selected. The author would like to emphasize, that even while developing simple machines or construction parts, or selecting small component, there should never be so-called random selection, which means that details desing principles and components selection must always be justified. TRIZ and DFX methodologies were a great help of in taking into account of all aspects during pallet stacking machine development and component selection process.

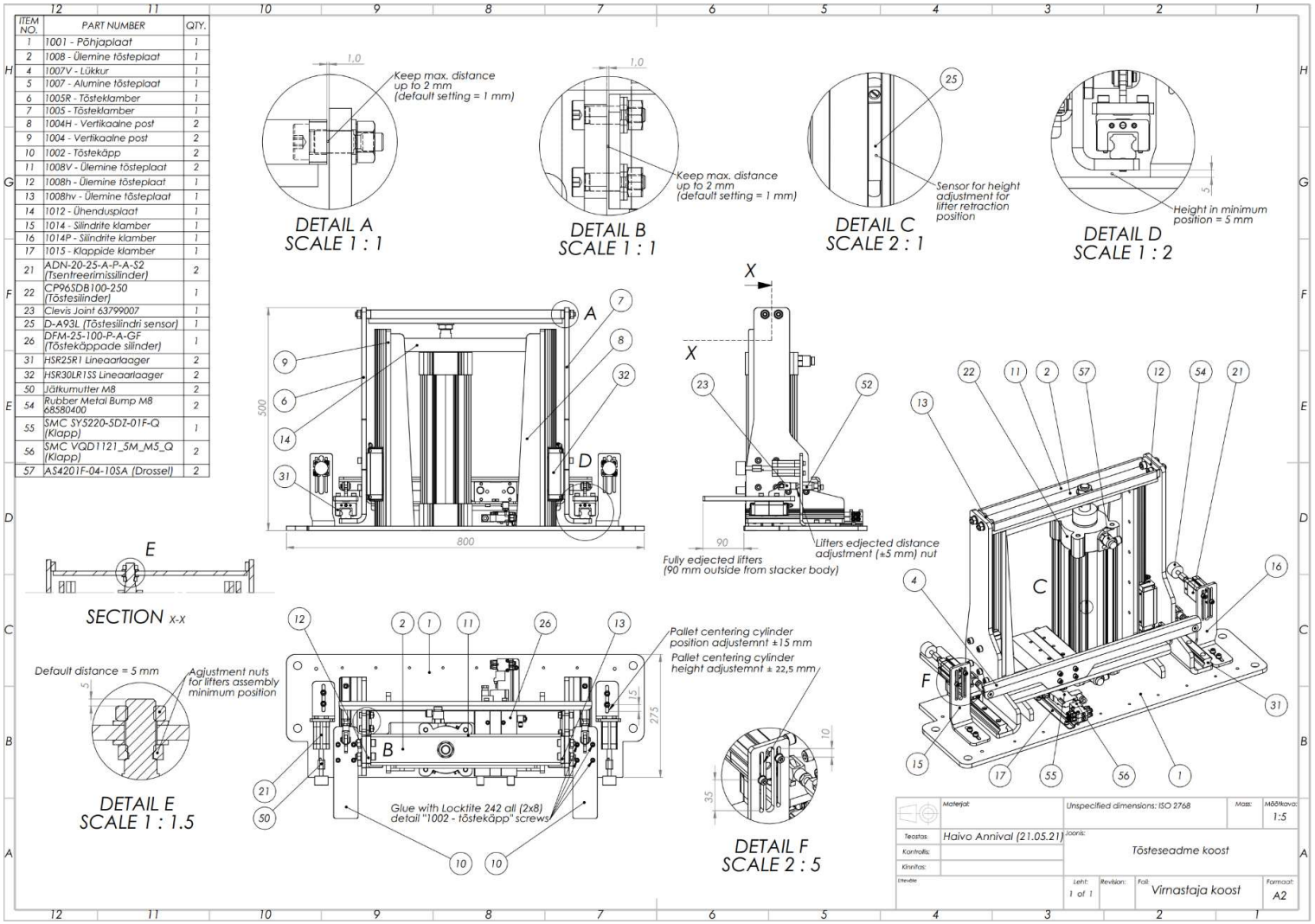
KASUTATUD KIRJANDUS

1. [Online]. Available: https://www.palomat.com [Accessed 26.08.2021]
2. [Online]. Available: https://www.proven.ee/kaubaaluste-kasitlemine/ [Accessed 26.08.2021]
3. [Online]. Available: https://www.triax-securite.com/contact.php [Accessed 26.08.2021]
4. [Online]. Available: https://www.industry-plaza.com/magapal-the-autonomous-pallet-stacker-p3507.html [Accessed 26.08.2021]
5. [Online]. Available: https://www.newcastleco.com/ [Accessed 26.08.2021]
6. [Online]. Available: https://marceau.fr/en/autonomous-pallet-store.html [Accessed 26.08.2021]
7. [Online]. https://www.socosystem.com/world/products/pallet-handling [Accessed 26.08.2021]
8. [Online]. Available: https://www.mccourier.com/global-mechanical-actuator-component-market-2021-industry-insights-and-drivers-eaton-weber-hydraulik-bosch-rexroth-hydratech-industries/ [Accessed 26.08.2021]
9. [Online]. Available: https://www.grantadesign.com/education/students/charts/ [Accessed 26.08.2021]
10. LM Guide. THK General Catalog.pdf, THK
11. [Online]. Available: https://www.tthk.ee/MEH/Taiturid_11.html [Accessed 26.08.2021]
12. [Online]. Available: https://www.pneumatictips.com/right-sized-pneumatic-cylinders-ensure-performance-and-efficiency/ [Accessed 26.08.2021]
13. [Online]. Available: https://www.powertransmissionworld.com/analysis-of-friction-in-pneumatic-systems/ [Accessed 26.08.2021]
14. [Online]. Available: https://mae.ufl.edu/designlab/Class%20Projects/Background%20Information/Friction%20coefficients.htm [Accessed 26.08.2021]
15. Air Cylinders Model Selection.pdf, SMC
16. [Online]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/air-flow-compressed-air-pipe-line-d_1280.html [Accessed 26.08.2021]
17. [Online]. Available: https://www.smcworld.com/products/select_guide/en-jp/solenoid_valve/100mm.html [Accessed 26.08.2021]
18. [Online]. Available: https://support.nimbix.net/hc/en-us/articles/360044738671-ANSYS-Fluent-Tips-Tricks-and-Troubleshooting [Accessed 26.08.2021]

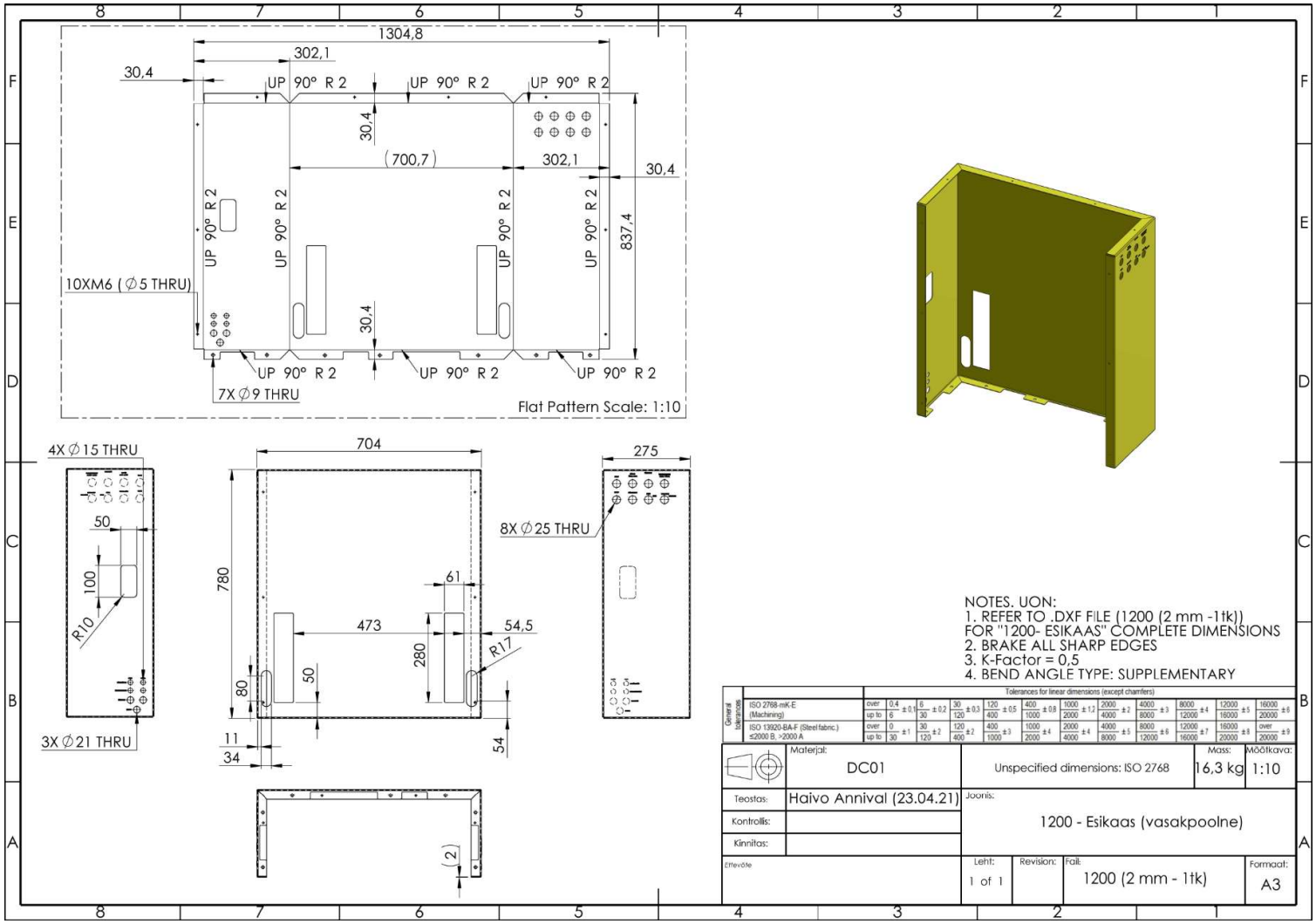
19. [Online]. Available: https://www.esabna.com/us/en/education/blog/what-is-cutting-kerf.cfm [Accessed 11.09.2021]
20. Influence Of Cutting Technology On Properties Of The Cut Edge. M.S. Węglowski, T. Pfeifer, 2014
21. [Online]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=rAWryQ0HBfg&t=1631s Accessed 26.08.2021]
22. [Online]. Available: https://www.tecnospiromt.com/en/product.cfm/f/72/sf/96/shark.htm [Accessed 26.08.2021]
23. [Online]. Available: https://fisair.com/fr/dessicant-rotor-for-metal-protection/ [Accessed 26.08.2021]

GRAAFILINE OSA

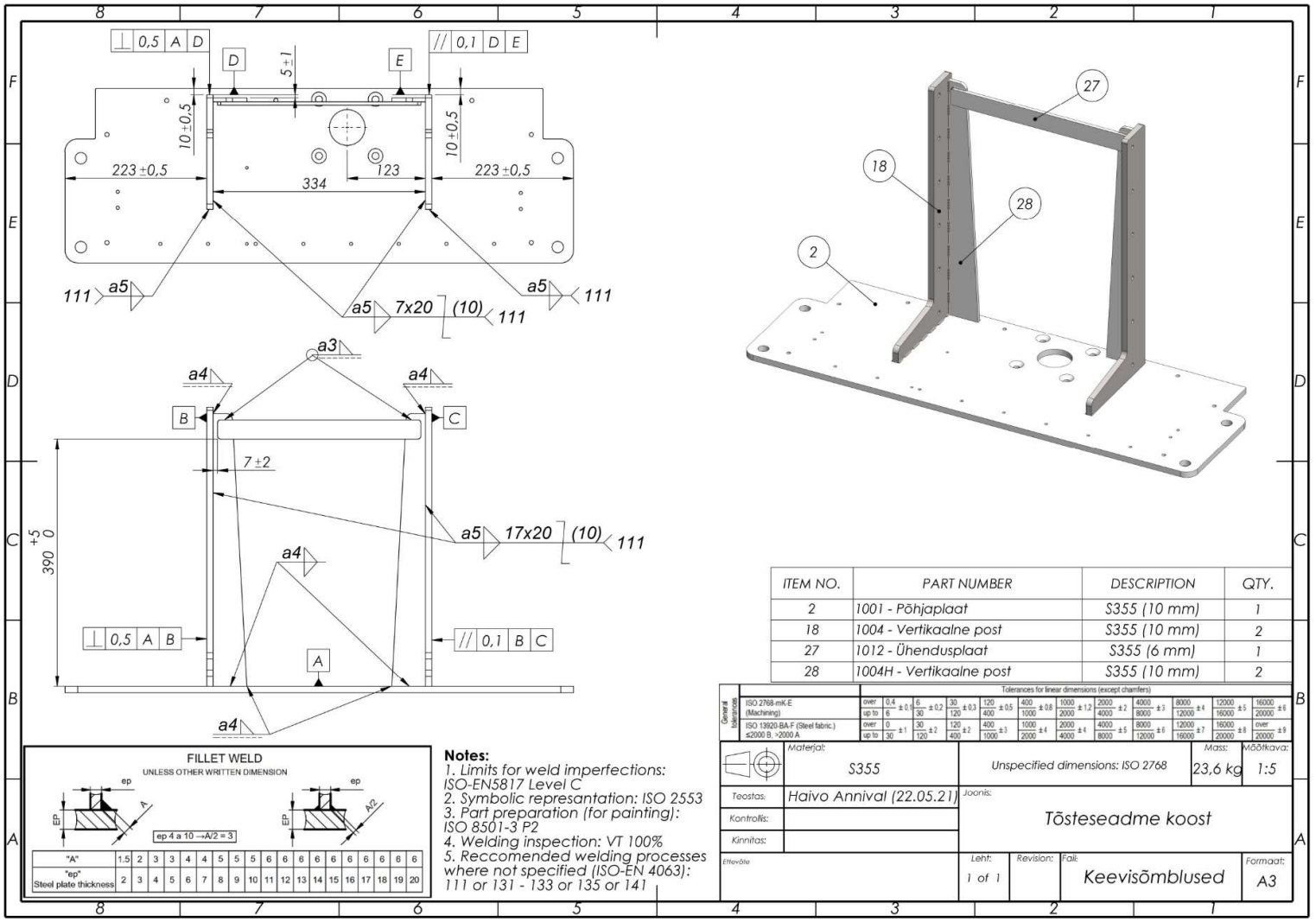
Koostejooniste näide



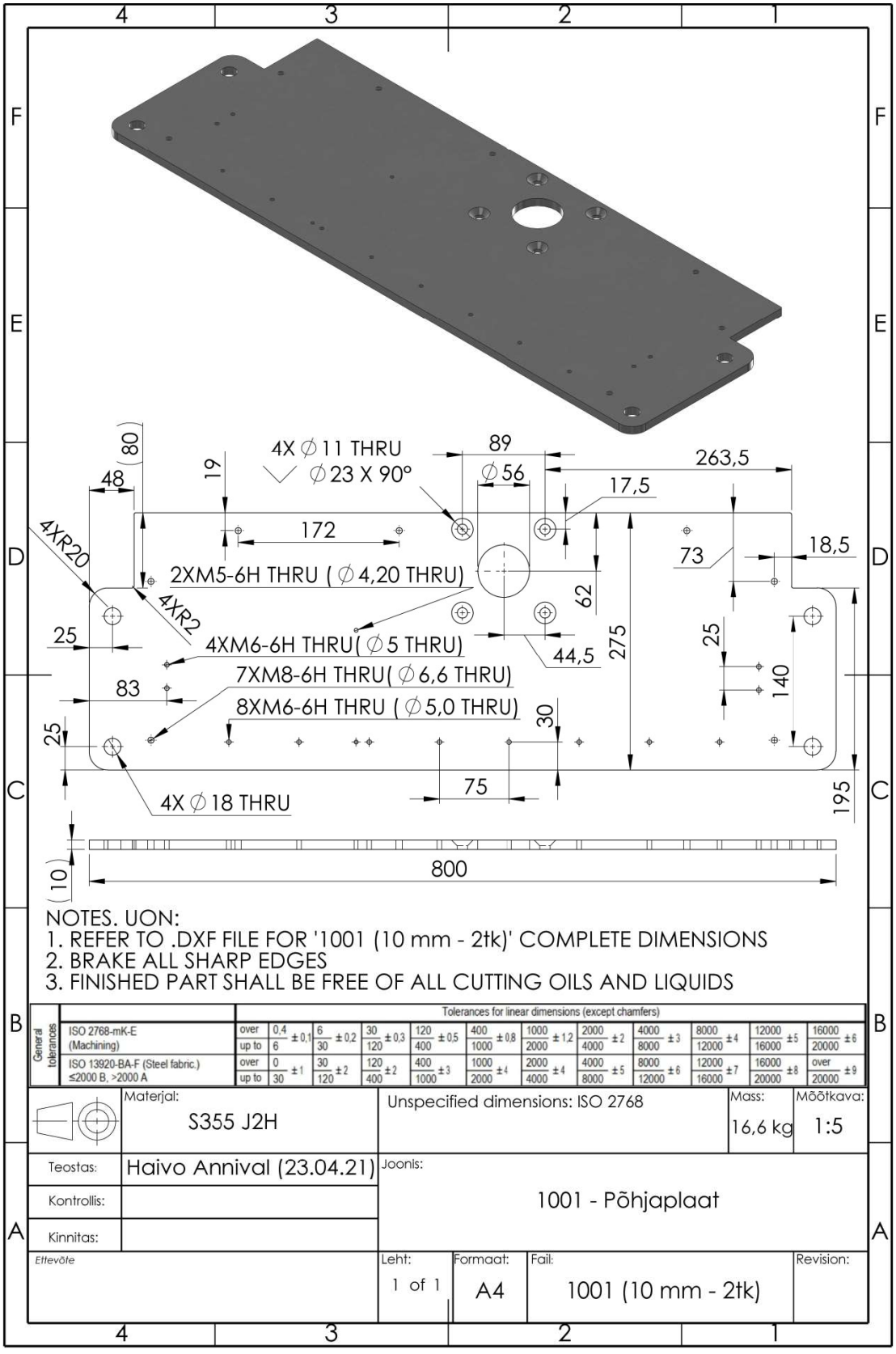
Tööjoonise näide detailide lõikamiseks ja painutamiseks



Tööjoonise näide konstruktsiooni keevitamiseks ja värvimistöödeks



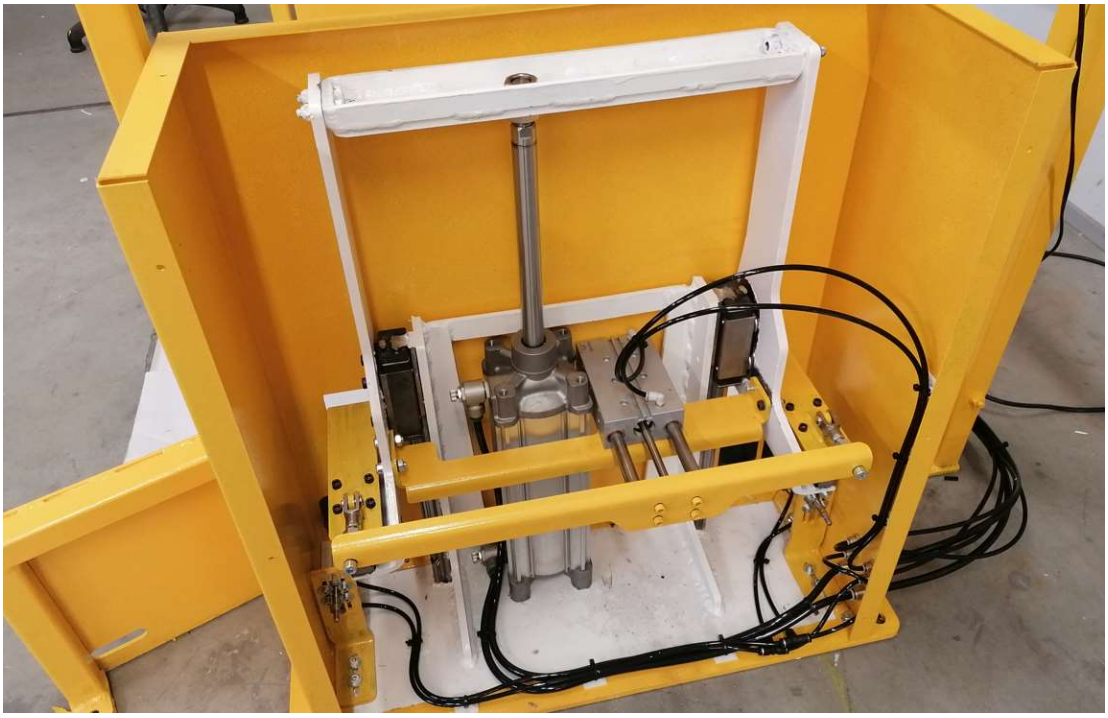
Tööjoonise näide detaili lõikamiseks ja avade keermestamiseks



LISAD

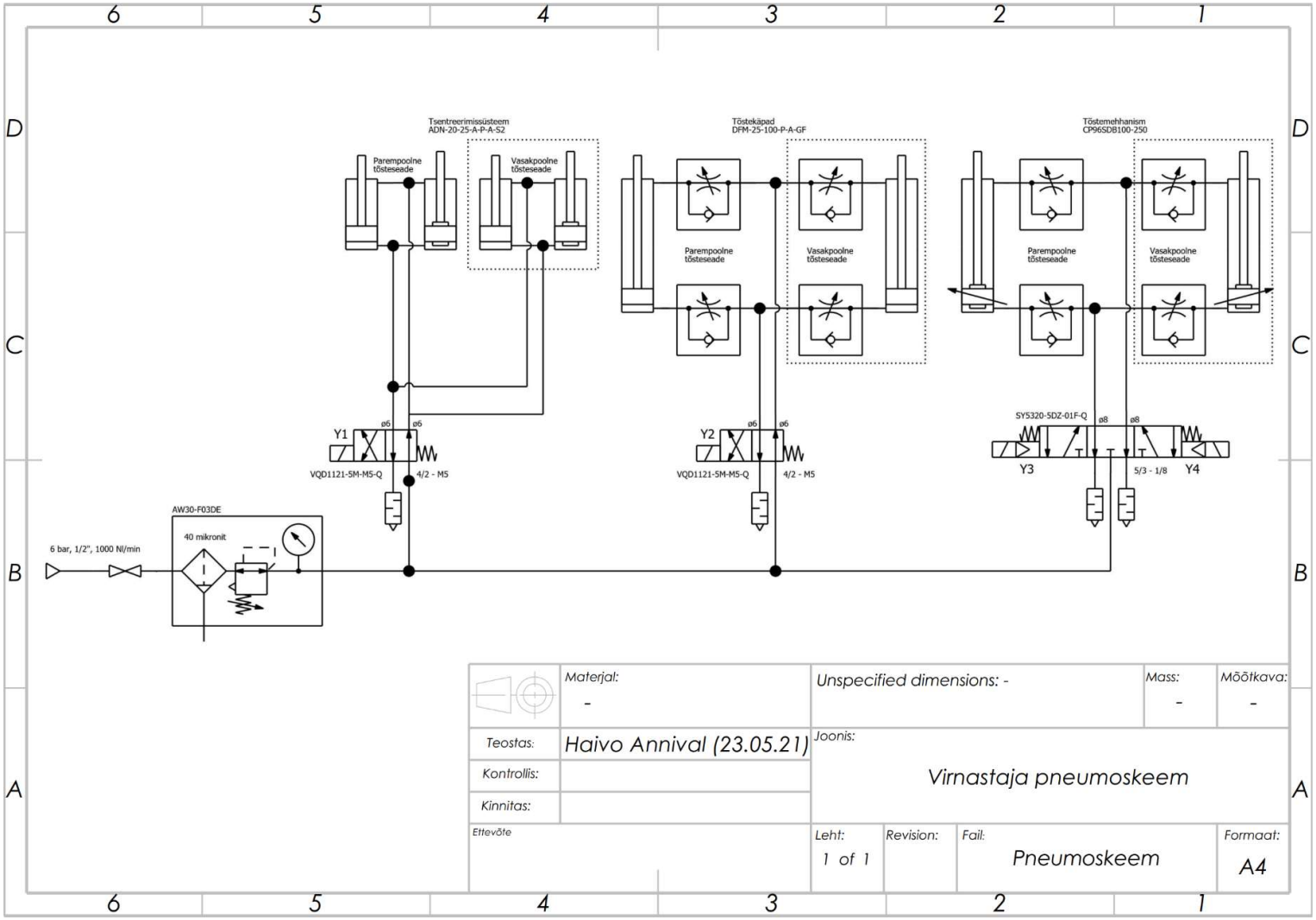
Lisa 1. Pildid virnastaja erinevatest valmistusetappidest

MECHANIC

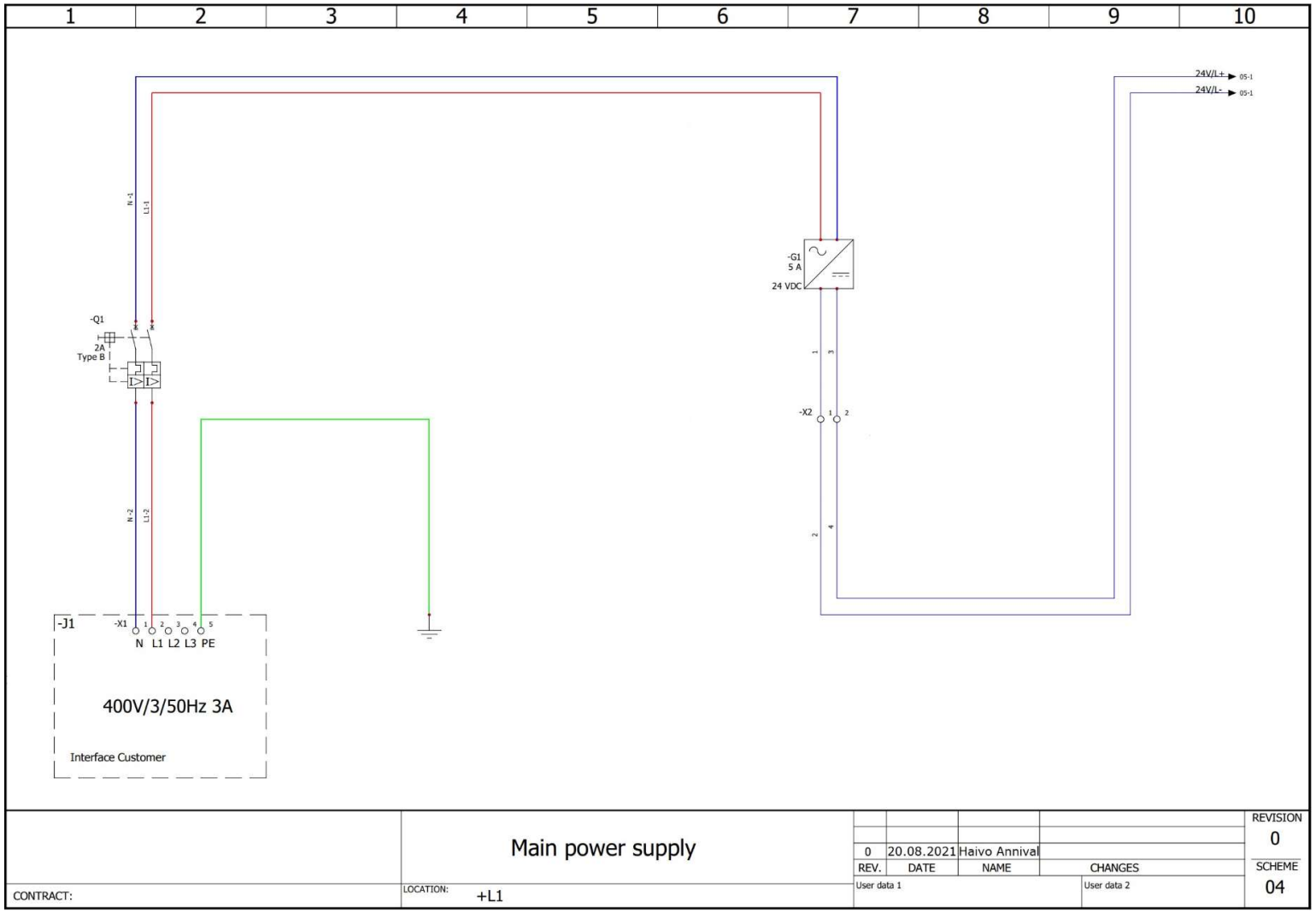


Lisa 2. Pilt tootmisettevõttesse paigaldatud töötavast virnastajast

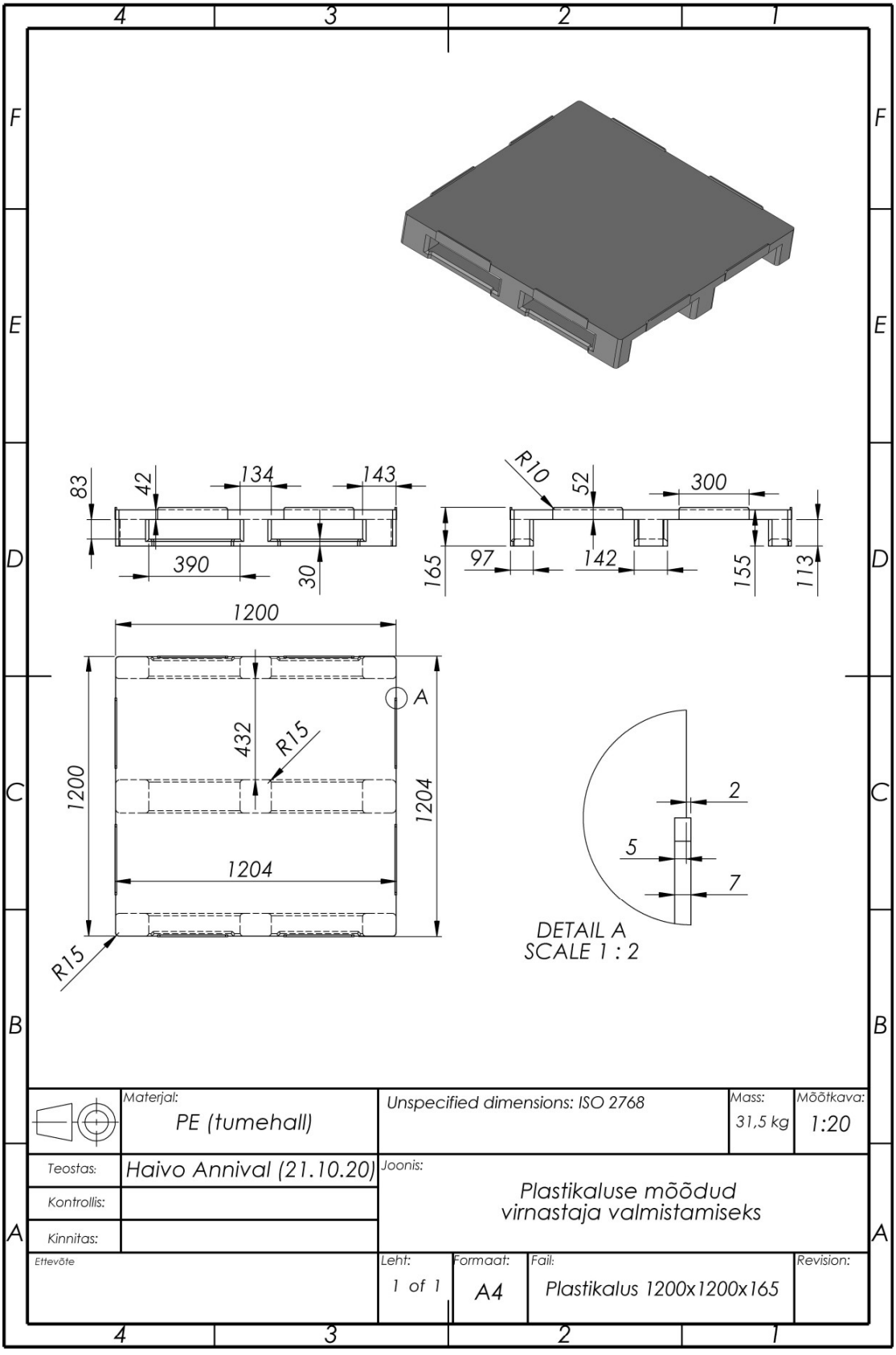
Lisa 3. Virnastaja pneumoskeem

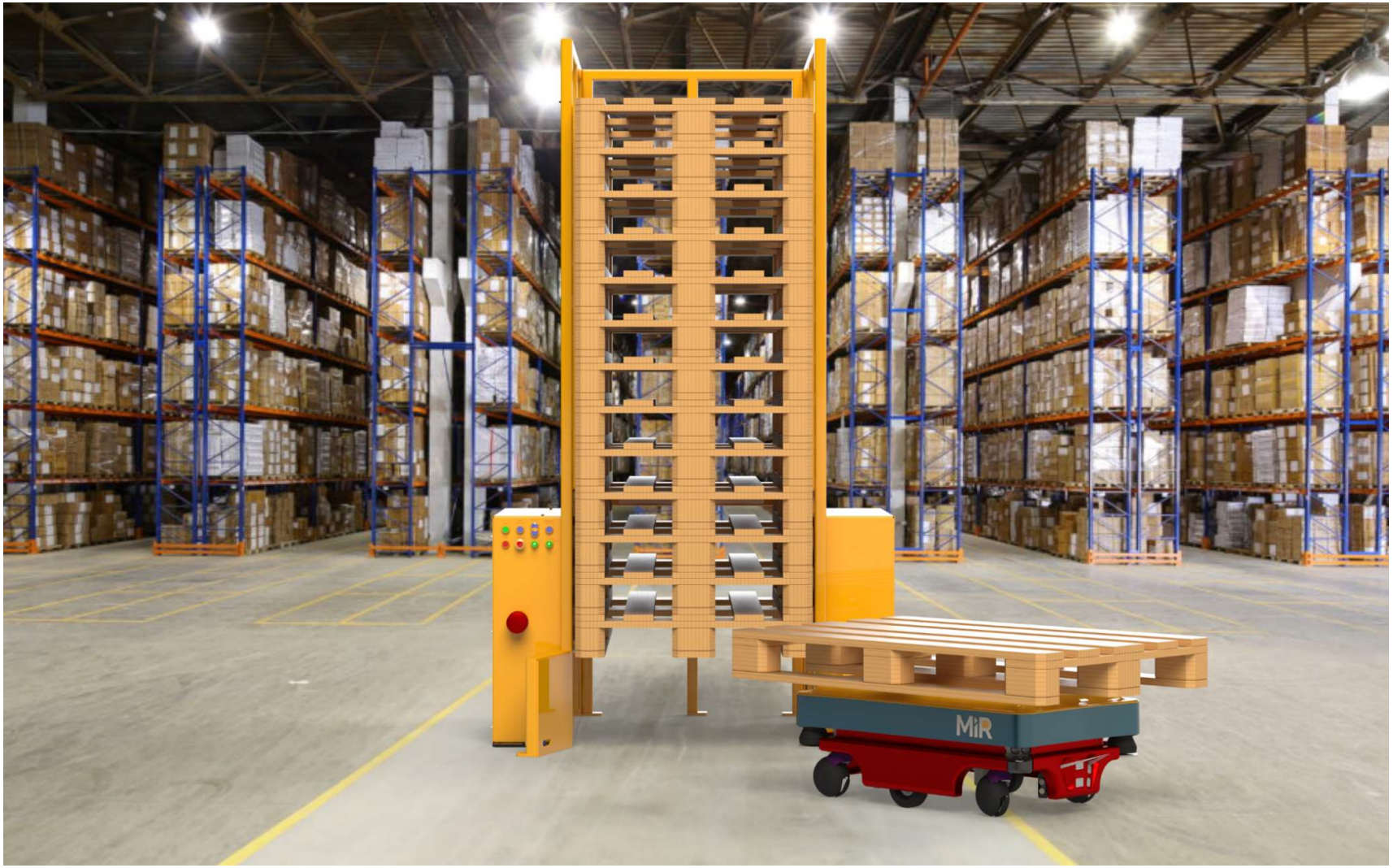


Lisa 4. Virnastaja elektriskeem (näitena esitatud vaid toiteploki lehekülg)



Lisa 5. Plastikaluse mõõdud



Lisa 6. Virnastaja visualiseering (1200 mm x 1200 mm x 165 mm plastikaluste virnastamine)

Lisa 7. Virnastaja visualiseering (1200 mm x 800 mm x 144 mm euroaluste etteandmine)