



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**VOODILIPPIDE SORTERIMISMASINALE
OHUTUSAUTOMAATIKA JA -KATETE
DISAINIMINE**

**DESIGNING SAFETY COVERS AND AUTOMATION FOR A
BED SLAT SORTING MACHINE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Artur Valdeko Paavel

Üliõpilaskood: 213764EAAB

Juhendaja: Vahur Maask, teadur

Kaasjuhendaja: Ingmar Roosileht, insener

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

13. mai 2024

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

13. mai 2024

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaasjuhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Artur Valdeko Paavel

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Voodilippide sorteerimismasinale turvaautomaatika ja -katete disainimine“, mille juhendaja on Vahur Maask,

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

13. mai 2024

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

Elektroenergeetika ja Mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Artur Valdeko Paavel, 213764EAAB
Õppekava, peeriala: EAAB, Mehhatroonika
Juhendaja(d): Teadur, Vahur Maask, 6203703
Insener, Ingmar Roosileht, +37256287331

Lõputöö teema:

Voodilippide sorteerimismasinale turvaautomaatika ja -katete disainimine
Designing safety covers and automation for a bed slat sorting machine

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Masinadirektiivide ja ohutusstandarditega kursiviimine
2. Füüsiliste ohutuskatete disainimine
3. Ohutusandurite valimine ning implementeerimine lahendusse

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Tööülesande kirjeldamine	5.02.2024
2.	Materjalide uurimine. Asjakohaste standardite, ohutusnõuetega kursiviimine. Elektroonikaseadmete valik ja kirjeldamine.	1.03.2024
3.	Ohutuskatete esialgne disain.	15.03.2024
4.	Ohutuskatete disainimise viimased viimistlused, tugevusarvutuste tegemine.	10.04.2024
5.	Ohutusautomaatika protsessi kirjeldamine, elektriskeemi koostamine.	20.04.2024
6.	Töö lõplik vormistamine, väljatrükkimine ning köitmine.	1.05.2024

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** 13. mai 2024 a

Üliõpilane: Artur Valdeko Paavel ".....".....20.....a
/allkiri/

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

Kaasjuhendaja: Ingmar Roosileht ".....".....20.....a
/allkiri/

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

SISUKORD

AUTORIDEKLARATSIOON	2
SISUKORD	5
EESSÕNA	6
Lühendite ja tähiste loetelu	7
SISSEJUHATUS	8
1 OLEMASOLEV SORTEERIMISLIIN JA MUUDATUSED UUES LIINIS	9
1.1 Sorteerimisliin	9
1.1.1 Tehtavad muudatused uues liinis	11
1.2 Kvaliteediskänner	11
1.2.1 Tehtavad muudatused uues kvaliteediskänneris	12
2 OHUTUSNÕUDED	14
2.1 Nõutud suutlikkustase PLr (<i>Required Performance Level</i>)	14
2.1.1 Sorteerimisliini PLr taseme analüüs	15
2.2 Nõuded ohutuskatetele	16
2.3 IP (<i>Ingress Protection</i>) tase	18
3 OHUTUSKATETE PROJEKTEERIMINE	19
3.1 Liikuvad katted	19
3.1.1 Tõukuri väljundite liikuvad katted	20
3.1.2 Labadega söötja väljundite katted	22
3.2 Ohutuskatete kinnitused	26
4 OHUTUSAUTOMAATIKA	29
4.1 Ohutusandurid	29
4.1.1 Valitud ohutusandur	29
4.1.2 Magnetandurite kinnitused	31
4.2 Ohutuslahenduse protsessiskeem	32
4.3 Ohutuslahenduse elektriskeem	34
KOKKUVÕTE	36
SUMMARY	38
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	40
LISAD	41

EESSÕNA

Lõputöö teema tekkis firma Aramet OÜ poolt, kus hakati ehitama teist iteratsiooni voodilippide sorteerimisliinist, millele oli vaja juurde arendada integreeritud ohutuslahenduste süsteem CE märgise väljaandmiseks. Projekti idee käis välja Aramet OÜ juhatuse liige Ingmar Roosileht, kes defineeris algse ülesande ja andis esmased suunised. Siinkohal soovib autor tänada juhendajaid, Aramet OÜ teist juhatuse liiget Hendrik Rossi, kes andis nõu ohutuskatete projekteerimisel, Taimo Seemerit, kes tegeles projektijuhtimisega ning Aramet OÜ-d võimaluse eest nende projektist lõputöö kirjutada.

Lühendite ja tähiste loetelu

CE – vastab Euroopa nõuetele (*Conformite Europeenne*)

IP – ligipääsetavuse kaitse (*Ingress Protection*)

PL – suutlikkuse tase (*Performance Level*)

PLC – programmeeritav loogikakontroller (*Programmable Logic Controller*)

PLr – nõutud suutlikkuse tase (*Required Performance Level*)

RFID – Raadiosageduslik identifikaator (*Radio Frequency identifier*)

SISSEJUHATUS

Aramet OÜ on Eesti omakapitalil põhinev aastal 2012 asutatud inseneribüroo, mis tegeleb tootmisettevõtetele „võtmed kätte“ lahenduste pakkumisega vastavalt tellimusele, keskendudes tootmise automatiseerimisele, robotiseerimisele ning masinaehitusele. Autor on Aramet OÜ töötaja.

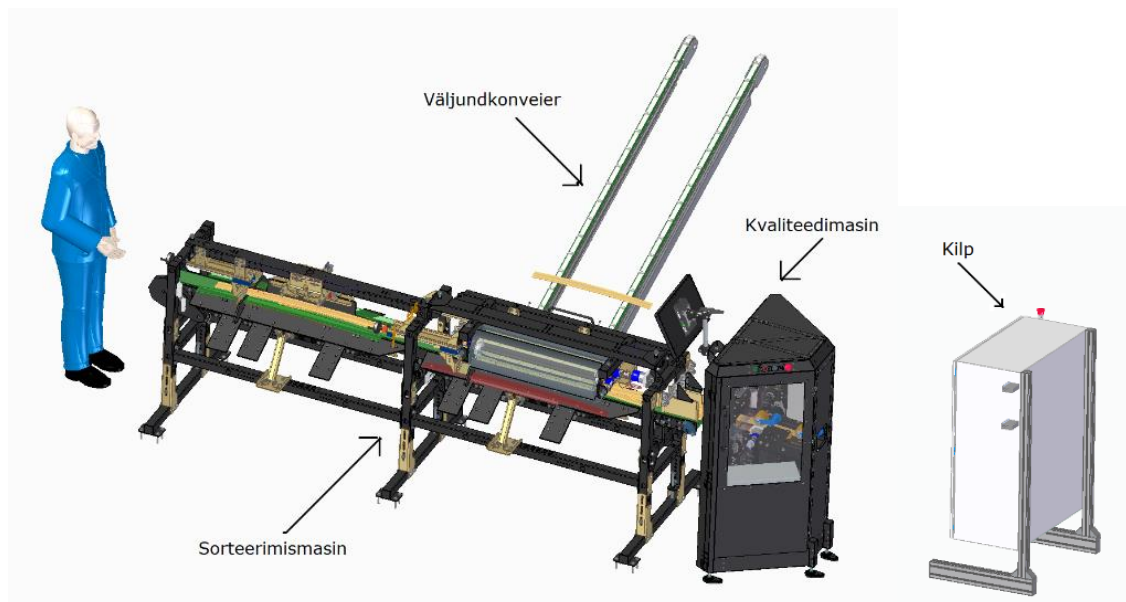
Aramet OÜ keskendub pakutavates lahendustes ennekõike füüsiliste masinate väljatöötamist, kuid, kuna masinates pakutakse tehisintellekti lahendusi ning erinevad tootmis- ja sorteerimisliinid hõlmavad endas ka palju elektroonikat, tehakse nendes valdkondades koostööd vastavalt Leanest OÜ ja Atemix OÜ-ga. Leanest OÜ valmistab tarkvaralahenduse ja programmi kvaliteediseadme tehisintellektile. Atemix OÜ poolt tulevad elektriskeemid, elektriseadmete programmeerimine ja seadistus.

Tihti peale arendatakse sorteerimis- ja tootmisliine selliselt, et neid oleks võimalik ehitada mitu tükki. Arendus on kõige aeganõudvam ja kulukam osa kogu protsessist ning liinide mitmekordne pakkumine võimaldab klientidele odavamalt hinda ja kiiremat paigaldust. Kohati on aga vaja teha muudatusi või lisada uutele liinidele kliendi poolt soovitud funktsionaalsusi, et masin töötaks vastavalt soovile.

Aramet OÜ poolt väljatöötavatel liinidel ja masinatel on kriitiliselt oluline, et need vastaksid kehtivatele nõuetele, standarditele ja Masinadirektiivile. Omakorda tähtis teema nende sees on ohutus. Käesolevas lõputöös käsitletakse ohutuslahenduste disainimist ja implementeerimist voodilippide sorteerimisliinile, millest hakatakse ehitama teist versiooni. Selleks, et tootjafirma saaks kohe CE (*Conformite Europeenne*) märgisega kliendile liini üle anda, peavad olema kõik eelmainitud nõuded täidetud. Vältimaks inimeste enese vigastamist liini opereerimise ajal, peavad kõik liikuvad osad olema kaetud ja käe või muu kehaosaga raskesti ligipääsetavad. Selle jaoks disainitakse integreeritud ohutussüsteem, mis hõlmab endas füüsilisi katteid, ohutusfunktsiooniga magnetandureid ning elektriskeemi arendamist andurite ühendamiseks olemasoleva ohutusreleega, et liin vastaks analüüsi käigus täpsustatud suutlikkustasemele.

1 OLEMASOLEV SORTTEERIMISLIIN JA MUUDATUSED UUES LIINIS

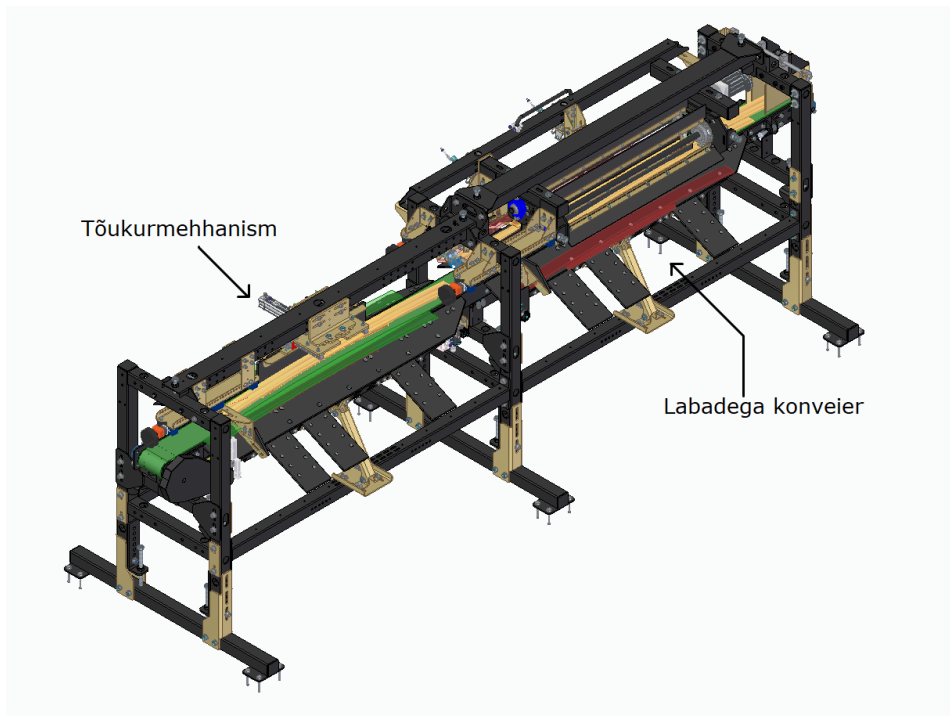
Olemasoleva sorteerimisliini näol on tegemist 2023 aasta esimeses pooles Aramet OÜ poolt arendatud kvaliteediskänneri tulemuste põhjal automaatsorteerimisliiniga, mis sorteerib voodilippe kuni viie väljundi vahel. Firma poolt on arendatud kilp ja selle sisu, kvaliteedimasin ning sorteerimismasin, viimane on integreeritud kliendi tehases olemasoleva väljundkonveieriga, mis on selguse huvides välja toodud (vt. Joonis 1.1). Üles pandud liin sorteerib kuni viie erineva väljundi vahel voodilippe. Neist üks väljund on kvaliteetsetele lippidele ning ülejäänud on erinevad praagiväljundid. Kvaliteetsed lipid liiguvad edasi 10 kaupa pakendamisesse ning praagid kogutakse vastavatesse kogumiskastidesse kokku. Need saadetakse võimalusel parandamisse või utiliseeritakse.



Joonis 1.1. Voodilippide sorteerija kõigi komponentidega.

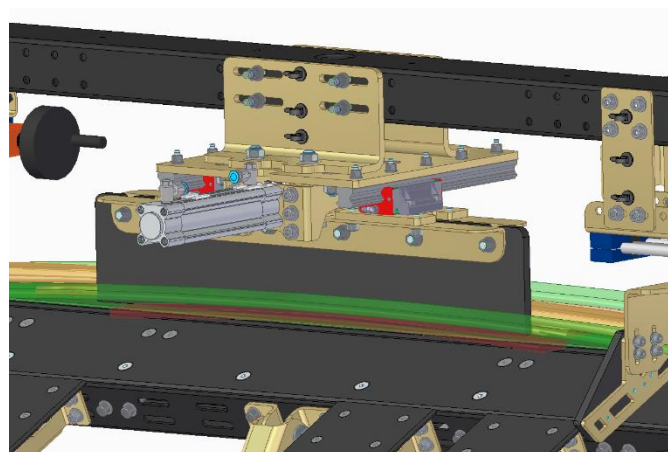
1.1 Sorteerimisliin

Sorteerimisliinis toimub sarnaselt eelnevalt mainitule kvaliteediskänneri otsuste põhjal lippide vastavatesse väljunditesse suunamine. Selle jaoks on masinal kaks erinevat sorteerimissüsteemi ning mitmed andurid lippide positsioonide teadmiseks (vt. Joonis 1.2).



Joonis 1.2. Sorteerimismasina isomeetiline vaade.

Kvaliteediskännerile lähemal on labadega söötja süsteem. Labadega söötjat ajab ringi servomootor, mis liigutab võlli külge kinnitatud hammasrataste peal olevaid kette. Kettide küljes omakorda on suured plastmassist plaadid, mis ulatuvad peaaegu konveierini. Vastavalt kvaliteediskänneri otsusele pöörab servomootor ennast kindlaksmääratud koguse mõlemas suunas ning saadab labadega lipi vajalikule poole. Teises seksioonis on rohkem aega reageerida kvaliteediskänneri otsusele ning seetõttu on sinna ehitatud tõukur, mida liigutab pneumosilinder edasi ja tagasi. Tõukuri enda puhul on kasutatud samasugust plastmassist laba nagu labadega söötja puhul. Suurim erinevus on see, et tõukuril on mainitud laba pandud mööda pneumosilindriga juhitud lineaartelgi libisema ja ei ole fikseeritud keti külge (vt. Joonis 1.3).



Joonis 1.3. Tõkursüsteem.

1.1.1 Tehtavad muudatused uues liinis

Kõige suurem muudatus on varasemalt mainitud ohutuslahenduse integreerimine tootmisliini. Esimese liiniga jäi kliendiga kokkulepe, et turvaelement jääb nende lahendada ning selle eeldusega anti välja ka CE märgis Aramet OÜ poolt. Selleks, et edaspidi ka teistele potentsiaalsetele klientidele kohe ohutut lahendust välja pakkuda ning CE märgise ilma lisatingimusteta väljastamiseks otsustati ohutuslahendus ise juurde ehitada. See hõlmab endas füüsilisi katteid, mis takistavad inimestele ligipääsu masina liikuvatele osadele ning automaatikat, mis katete avamisel liini kohe seiskab. Pikemalt on neid turvalahendusi koos kaasnevate nüanssidega käsitletud käesolevas bakalaureusetöös.

Väljaspool katteid on kõige suurem muudatus seotud sorteerimisliini jalgade ning toetusraamiga. Esimeses versioonis ulatuvad jalad liinist väljapoole, et püstise masina võnkumisi summutada ning vältida kaldumist või nihkumist suurte jõudude mõjul. Kuna teise liini asukoht on tehasehoone seinale ligidal ning liini ümber kasutatakse rataste peal liikuvaid kogumiskaste, tehakse raami jalad kitsamaks. Betoonpõranda külge kinnituvad tallad liigutatakse välimistest otstest raami keskele. See kõik hõlpsustab kastide liigutamist, mis mahuvad täpselt liini ja seina vahele (vt. Joonis 1.4).



Joonis 1.4. Sorteerimisliini raami vanad (vasakul) ja uued (paremal) jalad.

Ülejäänud muudatused on ennekõike peenhäälestamine, mis hõlmab endas näiteks paari lisaanduri panemist liinile, osade andurite vajaduspõhist vahetamist teise mudeli vastu ja muid pideva kasutamise käigus välja tulnud probleeme, mida on raske esimese versiooni projekteerimisel ette näha.

1.2 Kvaliteediskänner

Kvaliteediskänner (vt. Joonis 1.5) on sorteerimisliini algus, mille põhjal lippe erinevatesse väljunditesse liigutatakse. Tegemist on Aramet OÜ põhiartikliga, mida integreeritakse enim klientide tellitud automaatliinidesse. Kvaliteediskänneris

kontrollivad 4 kaamerat, millel on igaühel oma valgustus ja kaameraobjektiivi puhastussüsteem, iga läbiminevat voodilippi. Kaamerapildid saadetakse eraldi arvutile, mille sees jookseb väljatreenitud tehisintellekti programm. Sellele on selgeks õpetatud üle 20 erineva tuvastatava defekti ning nende hindamine 0 ... 100% ulatuses. Mõned defektid on näiteks: oksakohad, värvimuutus, liimijälg, puuduv spoon, lõhed, muljumised, pinnakaredus. Pärast otsuse tegemist liigub signaal läbi kvaliteediskänneri kilbi nii suurde kilpi kui ka sorteerimisliinile.



Joonis 1.5. Kvaliteediskänner.

1.2.1 Tehtavad muudatused uues kvaliteediskänneris

Ka kvaliteediskänneri puhul rakendatakse lisaohutusmeetmeid, et selle uksi oleks raskem avada. Sellest liiguvad voodilipid suurel kiirusel ja järsku läbi, esimeses versioonis saab ukse lahti teha ning liin jätkab enda tööd normaalselt. Seega tuleb kõrvaldada võimalus, et inimene paneb enda käe kaameratele ette või lippide liikumisteele. Selle jaoks lisatakse ustele lukud, mis on ainult võtmega lahtikeeratavad, et operaatorid saaksid vaid hädaolukorras sisule ligi.

Oluline teema on ka kaamerate ja nende valgustuse puhastus. Voodilipid käivad vahetult enne kvaliteediskännerini jõudmist freesmasinast läbi, millega kaasneb palju tolmu. Tolm koguneb tahes-tahtmata ka kaamerate peale, mis segab heade piltide tegemist.

Tolmuprobleemiga võitlemiseks on juba esimeses versioonis pandud kõikide kaamerate juurde õhuvoolikud, mis tolmu eemale puhuvad, kuid sellele vaatamata koguneb lippi alt vaatava kaamera peale liiga palju mustust, mida õhuvool ei suuda ära puhastada ning operaator peab iga paari tunni tagant käsitsi kaamera objektiivi puhastama. Tolmu vähendamiseks tervenisti pannakse kilbi sisendisse õhunuga, mis puhastab lipi peal olevat tolmu ja surub seda eemale. Lisaks suurendatakse õhuvoolu kaamerate objektiivide peale, et töötajad peaksid vähem selle peale aega kulutama ning liini seiskama.

Nende kõrval on ka kvaliteedimasinal väikesed muudatused, mis kasutuse käigus probleeme tekitavad või uue liini asukohast tulenevalt vajavad ümbertegemist. Näiteks on teine versioon kvaliteedikilbist peegelpildis esimesest, et operaator ei peaks pidevalt liikuma ümber liinide, vaid saab jälgida mõlema tööd korraga. Kilbile pannakse tugevamad jalad, muudetakse paari detaili disaini kasutusmugavuse huvides.

2 OHUTUSNÕUDED

Masinadirektiivis 2006/42/EÜ on öeldud, et see kohandub kõigile masinatele, mis ei ole seaduse kohaldusalast välja arvatud ja mis vastavad masina definitsioonile [1]. Kuna ehitatav sorteerimisliin kahtlemata kuulub sinna hulka, tuleb projekteerimisel esitatud nõuetest lähtuda. Masinadirektiiv reglementeerib tervet protsessi masinaga seotud riskide hindamisest läbi projekteerimise, tehnilise toimiku, tüübihindamise, vastavusdeklaratsiooni ning CE vastavusmargiga kinnitamiseni. Vastavusdeklaratsiooni annab välja tootja või tema volitatud esindaja. Selles loetletakse õigusaktid, millele vastavust deklareeritakse, sealhulgas standardid, kui neid on rakendatud [1].

Vastavusdeklaratsiooni allkirjastamisega kinnitatakse, et masin vastab kõigile deklareeritavate õigusaktide nõuetele. Pärast vastavusdeklaratsiooni allkirjastamist kinnitatakse masinale vastavusmärk, ehk CE märgis. Seejärel võib masina turule lasta. Iga müüdava masinaga peab vastavusdeklaratsioon kaasas olema [5].

Masinadirektiivi nõuete täitmiseks tuleb arvesse võtta EVS-EN ISO 12100:2010 standardit, milles on kirjeldatud üldiseid ohutu masina printsiipe A-normi tasemel ning EVS-EN ISO 14120:2015 standardit, mis käsitleb ohutuskatteid [2][4]. Masinadirektiivis nõutud ohutustaseme selgitamiseks kasutatakse standardit EVS-EN ISO 13849-1:2023 [3]. Mainitud standardis on toodud suutlikkustaseme analüüsiprotsess ja seda on pikemalt käsitletud Punktis 2.1.

Järgnevalt on välja toodud olulisemad punktid ja protsessi teoreetilised osad, millest juhindutakse turvakatete projekteerimisel, turvaautomaatika valimisel ning -süsteemi koostamisel.

2.1 Nõutud suutlikkustase PLr (*Required Performance Level*)

Vastavalt EVS-EN ISO 13849-1:2023 standardile kasutatakse iteratiivset meetodit masina riskide hindamiseks. Selgitatakse, kas masinaga kaasnevad riskid saab piirata aktsepteeritava jääktasemega läbi adekvaatsete ohutusfunktsioonide kasutamise [3].

Tegemist on hüpotees-analüüs valideerimistsükliga, mille lõpus saab demonstreerida, et iga valitud ohutusfunktsioon töötab vastava riski puhul. Eelmainitud standardis on kasutatud graafikut PLr iga masinafunktsiooniga kaasneva ohu hindamiseks. Sellega antakse ohutuskategooria asemel suutlikkustase [6].

Graafiku põhjal hindamine käib kolmes astmes, millest igaühes on kaks valikut. Esimene neist tähistatakse tähega S – vigastuse tõsidus. S1 valik tähistab väikest, enamasti ravitavat vigastust, S2 valik tähistab tõsist vigastust, mis ei ole tagasipööratav või on surmav. Järgmiseks on F – ohuga kokkupuutumise sagedus. F1 valik, ehk vähemohtlik variant, näitab ohtliku situatsiooni harva juhtumist ja/või lühikest kestust. F2 valik tähistab tihedat ja kestvat kokkupuudet ohuga. Viimaseks on P – ohu vältimine või vigastuse tõsiduse piiramine. Siinkohal märgib P1 variant piiramise ja vältimise võimalust spetsiifiliste tingimuste korral, P2 tähendab, et vältimine on harva võimalik. Vastavalt nende küsimuste analüüsile jõutakse PLr lahtrisse, kus määratakse PL (*Performance Level*) tase viie erineva valiku vahel. Kõige vähemohtlik on a tase, kõige ohtlikum on e [6]. Selle graafiku ja analüüsi põhjal saab planeerida edasisi meetodikaid, riistvara valikuid ja muud turvalahendustega kaasnevat.

2.1.1 Sorteerimisliini PLr taseme analüüs

Bakalaureusetöös käsitletava ohutuslahenduse korral võeti planeeritud ohutuskatted koos -anduritega üheks üksuseks, kuna tegemist on terviklahendusega ja eraldi analüüsimine midagi juurde ei anna. Lisaks sellele kehtivad anduritele enda nõuded, mille eest vastutavad andurite tootjad. Süsteemi valiti piisava suutlikkustasemega andurid analüüsi tulemust silmas pidades.

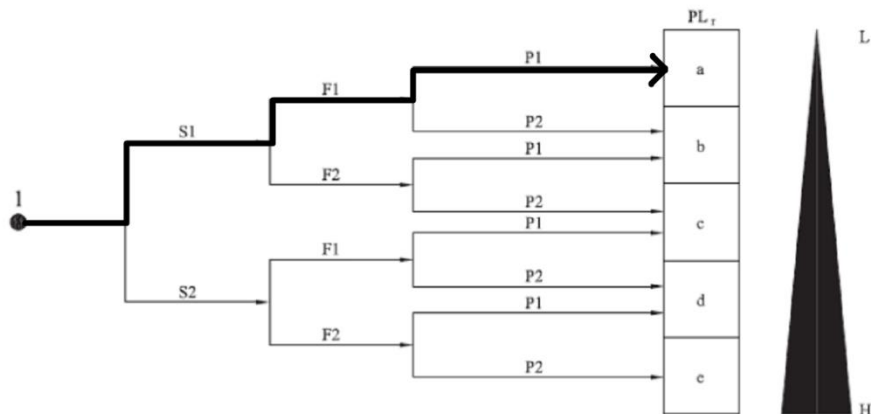
Vigastuse tõsiduse, ehk S tähe, juures valiti S1, kuna suurim probleem liini põhjal on käe labadega konveieri või tõukuri vahele jätmine, aga isegi sellisel juhul on mõlema lippe liigutava süsteemi liikumine väike ning suurimad vigastused on potentsiaalselt sinikad või põrutus. Lisaks eelnevale ei ole operaatoritel ühtegi objektiivset põhjust kummagi osa juurde enda käsi panna, kuna mõlemad labade sorteerimiseks väljatöötatud süsteemid on teatud nii, et lippide sattumist eripärastesse asenditesse juhtub minimaalselt.

Ohuga kokkupuutumise puhul valiti F1 valik. Operaatoritel on töö käigus vaja masina ligidal olla enamasti ainult seadistuse muutmiseks, kui muudetakse läbikäivate voodilippide pikkust. Ka sellisel juhul on töö sisuks reguleeritava rulli keeramine vastavale seadeväärtusele, mis võtab mõne minuti, kusjuures rullikud ise asuvad masinatest kõrgemal ja läbikäivate lippide vahetamiseks seisatakse terve liin igal juhul. Harvadel juhtudel võib tekkida sorteerimisliini kvaliteetses väljundis ummistusi, mille kordasättimine võtab mõne hetke.

Sarnaselt eelnevale kahele küsimusele, valiti ka ohu vältimise ja piiramise puhul P1 valik. Situatsioone, kus operaator peab sekkuma sorteerimisliini töösse, juhtub

üksikutel kordadel vahetuse jooksul või harvemini. Väljaspool seda pole operaatorid liinile lähemal, kui üks meeter ning neil pole ühtegi põhjust ka lähemale minna. Seega võib ohu vältimise lugeda kergeks. See-eest tuleb arvestada, et ennenägematud situatsioonid on ikkagi võimalikud ja vajalikud mõõtmised tuleb käsile võtta tahtmatu ohtusattumise vastu.

Kõik kolm kategooriat kokku võttes on käsitletava sorteerimisliini PL kõige madalam, ehk PLa. Sellegipoolest on ohutuslahendus liinile nõutud, aga näiteks potentsiaalsete eelarveliste ja lihtsustavate teguritega saab erinevaid variante kaaluda seadmete või näiteks disainifilosoofiate turvaklasside vahel, mis teevad elu lihtsamaks. PL taseme graafilist väljendust koos konkreetse seadme tulemusega on näha Joonisel 2.1.



Joonis 2.1. PLa graafik sorteerimisliinile.

2.2 Nõuded ohutuskatetele

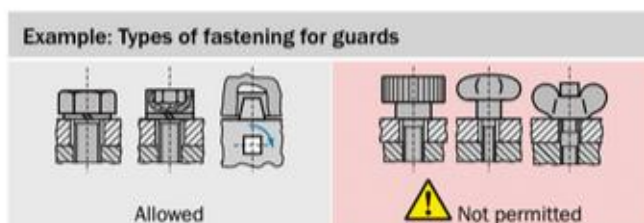
EVS-EN ISO 14120:2015 standardist tulevad välja võtmekomponendid, mida tuleb ohutuskatete disainimisel arvesse võtta. Selles on fikseeritud ja liikuvate katete omadused ning omavahelised erisused koos muude tähtsate detailidega [4].

Kate kui selline on defineeritud füüsilise barjäärina, mis on disainitud osana masinast, et takistada operaatori pääsemist ohtliku ala lähedale. Kui turvaeedade eesmärk on inimest tervikuna eemale hoida masina juurest, siis katete funktsioon on ära hoida tahtmatut käelist või muud keha kokkupuutumist ohukohtadega. Katted jagunevad standardis kaheks: fikseeritud ja teisaldatavad katted [4].

Üldised nõuded katetele hõlmavad endas adekvaatset robustsust, mis kindlustab, et katted püsivad ühes tükis ning töövõimelised kogu nende kasutamise ajal. Katted ei tohi tekitada mingisuguseid lisaohтусid. Katetest ei tohi lihtsasti mööda pääseda, mis teeks

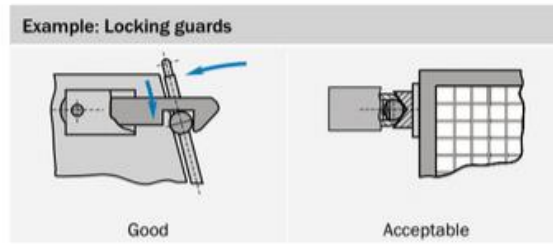
need kasutuks. Katted ei tohi piirata tööprotsessi vaatlemist rohkem, kui on hädavajalik. Katted peavad olema jäigalt omas kohas ja kas tööriistadega avatavad või hõlmama endas niinimetatud ohtliku masinaseisundi funktsiooni. Nii palju kui võimalik, ei tohi katted jääda kinnitamata olekus turvaasendisse [4].

Standardi põhjal arvatakse staatilised katted või kinnituskatted selliseks, mida avatakse harva, näiteks hoolduste tegemiseks, ning seetõttu tohivad need olla ainult tööriistadega (nutrivõti vms) eemaldatavad. Katete eemaldamise protsess peab olema sarnane kokkupanemise protsessile. Kinnituselemendid maha võetaval katetel või tihti eemaldataval katetel peavad olema disainitud nii, et neid ei saa ära kaotada [4]. Joonisel 2.2 on toodud näiteid lubatud ja mittelubatud kinnitusvahendites.



Joonis 2.2. Näide fikseeritud katetele sobivatest ja mittesobivatest kinnitustest [7].

Teisaldatavad katted on need, mida tuleb tihti või regulaarselt avada ilma tööriistad kasutamata. Vastavalt standardile on tegemist tiheda katte avamisega, kui seda tuleb teha vähemalt üks kord vahetuse jooksul. Siinkohal on nõutud, et liigutatavad katted on ühendatud ohtliku masina funktsiooniga, mis tähendab, et katete avamisel peab liin seiskuma ning inimestel pole võimalik liikuvate osadega ennast vigastada. Lisaks sellele peavad liigutatavad katted olema ergonoomilised, et mitte põhjustada operaatoritele suurt koormust või viia neid katete avamist vältima nende raskuse tõttu. Siinkohal saavad ka töötajad mingil määral oma sõna sekka öelda ning võivad standardikohaselt katted aktsepteerida, kui need ei sega häälestamist, hooldamist või muid sarnaseid tegevusi rohkem, kui on hädavajalik. Lisaks eelnevale on avatavate katete puhul oluline nende lahtises positsioonis fikseeritult püsimine nii palju kui võimalik. See on tehtav läbi hingede, kinnituste või juhikute. Standardis ei ole soovitatud kasutada hõõrdumise põhjal toimivaid kinnitusi, kuna need kuluvad. Katte lahtises olekus peavad olema täidetud järgmised nõuded: lahtises olekus ei tohi liini või masina ohtlikud funktsioonid olla käivituvad ning katete avamisel liini ohtlikud protsessid seiskuvad [4]. Näide sobivast ja aktsepteeritavast lahtisesse positsiooni kinnitamisest on toodud Joonisel 2.3.



Joonis 2.3. Näide sobivast ja aktsepteeritavast liikuva katte kinnitamisest [7].

2.3 IP (*Ingress Protection*) tase

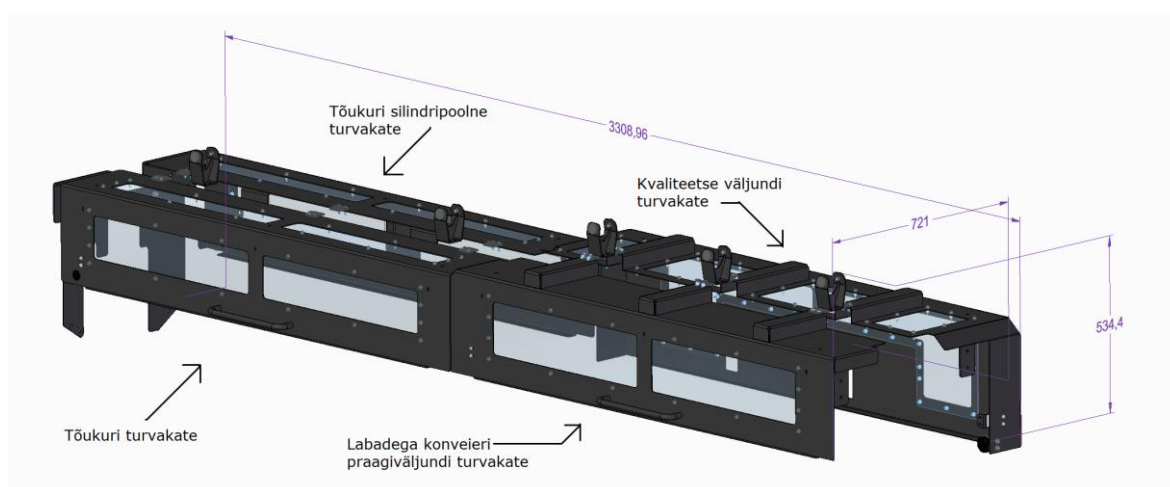
IP taseme puhul vaadatakse kahte erinevat komponenti: tahkete esemete ligipääsemine ning vee ligipääsemine. Kuna sorteerimisliini kontekstis ei ole veekindlus oluline, uuritakse ainult tahkete osade ligipääsemist.

Tahkete osade puhul jagunevad klassid kuueks. Kõige madalam, ehk esimene, klass antakse seadmetele, mis suudavad takistada suuremat kui 50 mm laia objekti, näiteks kätt. Teine klass on määratud 12,5 mm või suurema objekti takistamisega, näiteks sõrm. Kolmanda klassi puhul ei tohi ligi pääseda 2,5 mm väiksema objektiga, ehk näiteks kruvikeerajaga seadmes surkida pole võimalik. Neljas klass määratakse ligipääsutakistusega objektidele, mis on suuremad kui 1 mm. Viies ja kuues on juba peenemad klassid, millega määratakse osalist või täielikku tolmukindlust [12].

Käesolevate ohutuskatete IP klassi määramise korral tehti suur mööndus seoses katete alumise küljega. Sealt on suure küündimise korral võimalik masinale ligi pääseda, aga, kuna turvakatete eesmärk on peamiselt raami sees olevate liikuvate sorteerimismasinatega tahtmatu kontakti ja teataval määral otsakukkumise vältimine, keskenduti püstiseisva inimese liikumisele. Ka pikalikukkumise korral sorteerimisliini ligidal on kogemata käe liikuvate osade juurde panemine vähetõenäoline. Vaatamata suurele avale on ohtliku ala ees sorteerimisliini raam ning mitmed muud detailid, millest peaks sihipäraselt käe mööda liigutama ja seega ei kujuta ava otsest ohtu. Lisaks eelmainitule on enamasti liini läheduses üks väljatreenitud operaator, tavainimestele pole see ligipääsetav. Seda kõike arvesse võttes disainiti katted arvestatud alale IP klassi 2 tasemel, ehk suuremad kui 12,5 mm objektid ei tohi kuskilt vahelt läbi mahtuda. Sorteerimisliini juures ei ole vajalik tihe tööriistade kasutus. Tavatöö ajal on ainuke katete alla pääsemise olukord masina seadistamine, mis juhul on vajalik kasutada kõigest ühte kätt. Seega loeti piisavaks kaitseks näppude ligipääsemise ärahoidmine. Hoolduse korral on masin igal juhul seisatud ja katted avatud.

3 OHUTUSKATETE PROJEKTEERIMINE

Inimeste käte ja muude kehaosade liini liikuvate osade juurde sattumise vältimiseks on ohutuslahenduse kõige olulisemad komponendid füüsilised katted. Need katavad tavatöö ajal sorteerimisliini liikuvate komponentidega sisu, et seda töötajatest eraldada. Katteid arendati kahte erinevat tüüpi – staatilised katted, mis on poltide ja mutritega fikseeritud, ning liikuvad katted, mida saab operaator iga hetk avada. Liikuvate katete avamine peab samal ajal seiskama liini töö. Kõik katted peale kvaliteedi väljundi on tehtud 3 mm paksust teraslehest, mille voolavuspiir on 355 MPa. Peatükis olevatel joonistel olevad selgituslikud mõõdud on antud millimeetrites.



Joonis 3.1. Ohutuskatted.

3.1 Liikuvad katted

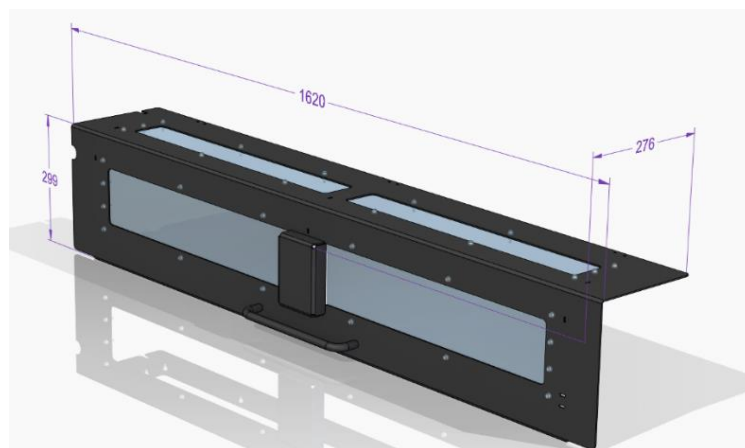
Nagu eelnevalt mainitud, on liikuvad katted inimeste poolt kinni ja lahti tehtavad. Selleks, et lahtiste katete korral oleks olukord alati inimestele ohutu, on pandud katete külge firma Pilz poolt toodetud magnetilised ohutusandurid, mis näevad katete lahtitegemist ning seiskavad läbi ohutusrelee selle peale liini. Pikem seletus ohutusautomaatika ja andurite töötamise kohta on toodud Peatükis 4. Ka liikuvad katted jagunevad omavahel kaheks, tulenevalt sellest, et sorteerimisliinil on neli väljundit ja kaks sorteerimismasinat, mida katavad lahtitehtavad katted. Kuna erinevad väljundid ja neid ümbritsev ehitus varieerub omavahel, vajasid need ka erinevaid disainilahendusi. Kõikide liikuvate katete puhul on kasutatud magnetitega kronsteine, et katted püsiksid lahtises asendis, neid on pikemalt käsitletud Punktis 3.2. Kaaluti ka katetele gaasisilindrite mehhanismi lisamist, aga silindrite asetus ja kinnitamine osutus liiga raskeks ülesandeks, mistõttu jäeti selle arendamine pooleli ja vahetati magnetkinnituste vastu. Ohutuskatetele on teatud kohtadesse juurde disainitud

toestused, mille peal need seisavad, kui katted on kinnises asendis. Nende külge kinnituvad ka ohutusandurid ning on käsitletud Punktis 4.1.2. Kõik liikuvad katted on tehtud ühe suure detailina, millel on keskel 90° paine. Vastavalt võimalustele lisati polükarbonaadist läbipaistvaid plaate katetele juurde liini töö jälgimiseks.

3.1.1 Tõukuri väljundite liikuvad katted

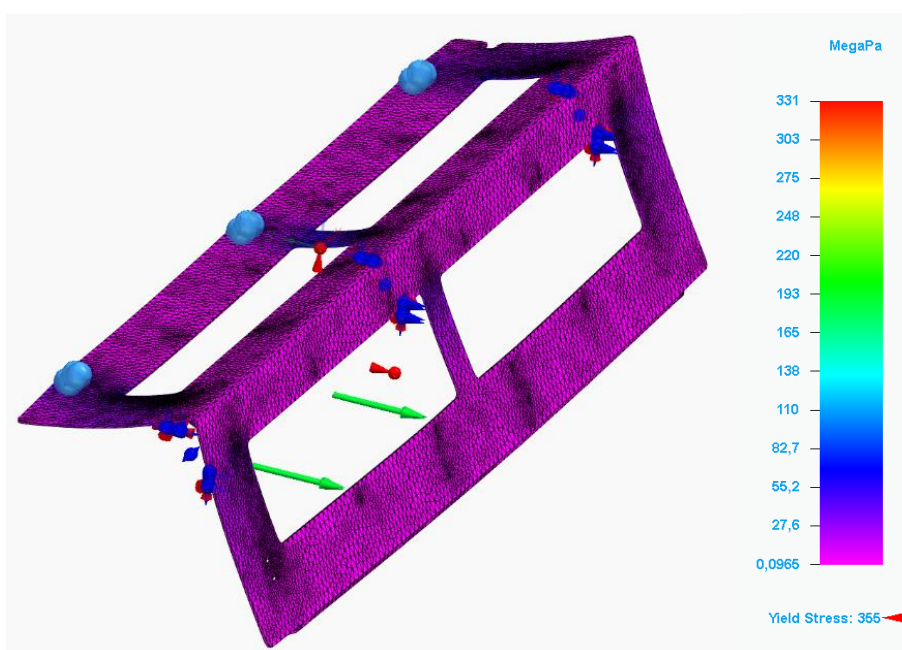
Tõukuripoolsetel katetel on võrreldes labadega konveieri juures olevate katetega vähem takistusi, millega peab projekteerimisel arvestama. Seetõttu projekteeriti need esimesena ja neid kasutati hiljem alusena labadega konveieri katete disainimiseks.

Oluline asi, mida projekteerimisel tuli arvesse võtta, oli see, et tootmisliin on inimese suhtes võrdlemisi madalal. Raami kõige kõrgem punkt ulatub umbes 1,2 m kõrgusele. Seetõttu peavad katted tulema võimalikult lahti, tagamaks operaatorile kerge ligipääsu hoolduste või tekkinud hädaolukordade kõrvaldamiseks. Algselt läbi käinud mõtete seas olid juhikutel peale ja maha libistatavad katted, mis käivad täiesti raami küljest lahti. Seejärel arendati versiooni, kus katte pealmine horisontaalne osa on raami külge poltidega fikseeritud ja vertikaalne osa kattest käib gaasilindrite abil lahti. Kuna ükski neist mõtetest ei oleks olnud piisavalt mugava kasutusega või tagaks piisavat ligipääsu, otsustati katted teha ühe suure detailina, mis on eelmainituna keskelt painutatud ja avanevad tervenisti võimalikult kõrgele. Ainuke erinevus kahe tõukuripoolse katte vahel on ühel pool väljaulatuva pneumosilindri jaoks tehtud kõrgendus, muus osas on katted samasugused (vt. Joonis 3.2). Selleks, et katteid võimalikult vähe avada ning sorteerimisliini tööd natukene paremini näha, projekteeriti katetele mõlemale küljele ka avad sisse, mille ees on polükarbonaadist läbipaistvad plaadid. Nende abil saab võimalikke ohuolukordi ka vaadates täheldada ning nendele reageerida. Katted kinnituvad sorteerimisliini keskmise raamitala külge kolme hinge abil.



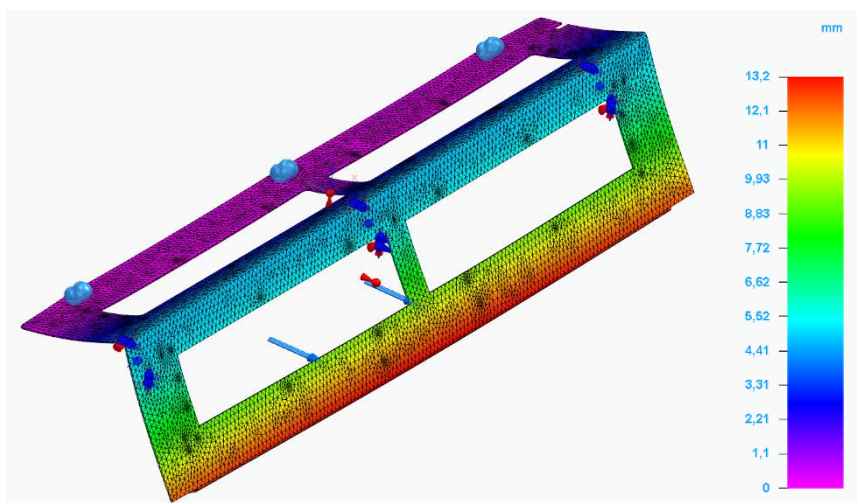
Joonis 3.2. Tõukuripoolne turvakate koos pneumosilindri jaoks tehtud kõrgendusega.

Ohutuskatete disaini kinnitamiseks tehti ühele katele kahest tugevusarvutused. Kuna katted on piisavalt sarnased, saab ühe arvutusega valideerida mõlemad. Arvutuse läbiviimiseks seoti kate horisontaalsel küljel olevad hingede kinnitamiseks tehtud kuus poldiava kinni ning kate käepideme jaoks tehtud poldiavadele rakendati 150 N jõud. Kuna kate mass on ligikaudu 15 kg ning see on ühest otsast hingede küljes, tõstab operaator tulenevalt massikese kate keskel asumisest umbes 10 kg. Seda arvestades on rakendatud jõud pandud paindumise analüüsiks teatava varuga. Varu jätmine annab kindlustunnet, et disain peab töötingimustes vastu. Mõlemal tulemusi illustreerival joonisel on tulemuste paremaks visualiseerimiseks detailide moondumine võimendatud ega peegelda tegelikku olukorda (vt. Joonised 3.3 ja 3.4).



Joonis 3.3. Tõukuri turvakatte tugevusarvutuse tulemus megapaskalites.

Rõhu põhjal on näha, et rakendatud jõuga ei ületa kate volavuspiiri 355 MPa, ehk turvakate peab struktuurselt vastu rakendatud jõule, mis on esimene eeldus disaini valideerimiseks.

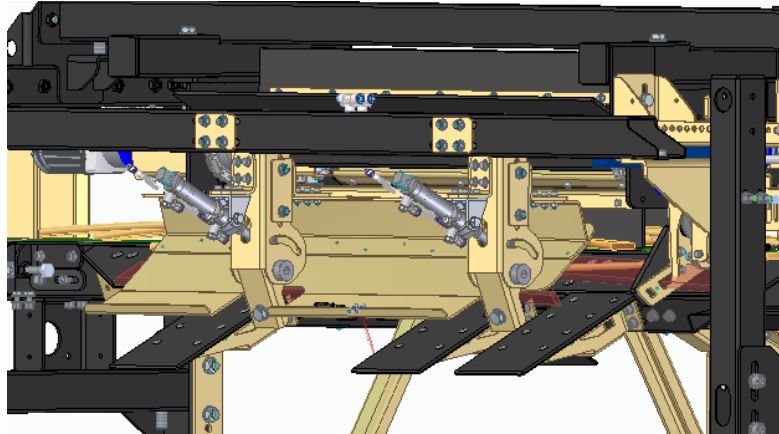


Joonis 3.4. Tõukuri turvakatte tugevusarvutuse nihke tulemus millimeetrites.

Nihke tulemus on praeguses kontekstis olulisem, kuna rõhu põhjal tulemus peale detaili läbipaindumise rakendatud jõuga muud infot ei anna. Siinkohal on näha 13,2 mm nihkumist, kui hingede külge kinnitamiseks tehtud avad on paigale fikseeritud. Kuna suurima töö katte paindumise vastu teevad ära tugevdusribid katte sees, mis on võrdlemisi väikesed, on sellises mahus nihkumine eeldatav. Arvestades, et terve kate liigub ühe detailina hingedega koos vabalt, võib arvutuse põhjal lugeda katte disaini eelduste kohaselt töötavaks ja piisavalt vastupidavaks.

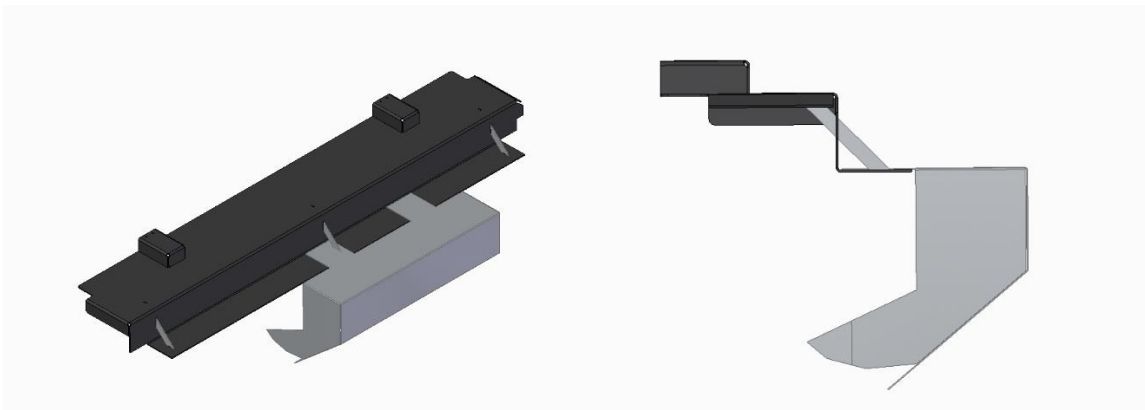
3.1.2 Labadega söötja väljundite katted

Labadega söötja kvaliteetsete lippide väljund on teistest väljunditest kõige omapärasem. Suur erinevus tuleb peamiselt asjaolust, et mainitud väljundi puhul lähevad voodilipid edasi konveieri peale, mis on maapinna suhtes umbes 45° üles tõstetud (vt. Joonis 1.1), ning väljaarendatud lippide peatamissüsteemist enne mainitud konveierile laskmist (vt. Joonis 3.5). Teiste väljundite puhul langevad lipid lihtsalt kogumiskastidesse. Lippide peatamissüsteem teeb kindlaks, et lipp on ristiasendis konveieriga enne sinna peale liikumist, et esineks minimaalselt mahakukkumisi ja lippide viltuses asendis konveierile liikumist.



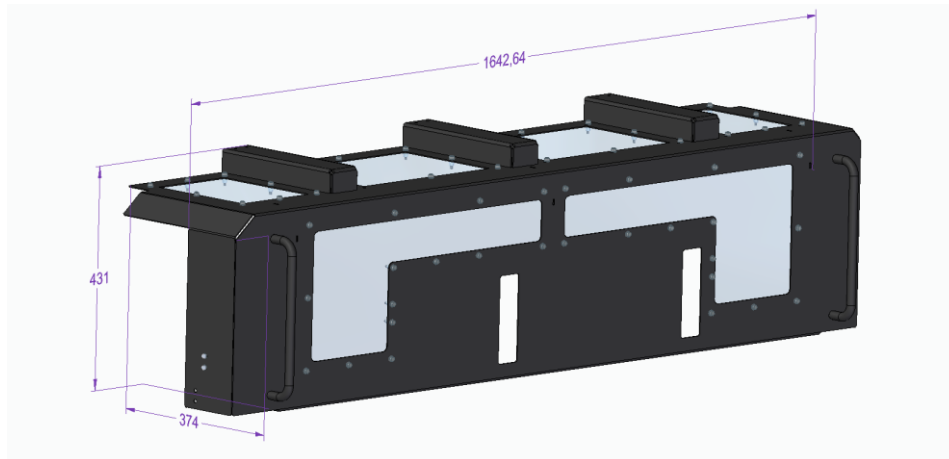
Joonis 3.5. Esiplaanil kvaliteetse väljundi lippide peatamissüsteem ja voolikutetala silindrite kohal.

Peamiseks takistuseks on suur juhtmete ja pneumovoolikute vedamise jaoks tehtud tala (vt. Joonis 3.5), mis jagab väljundi piltlikult öeldes kaheks. Kaaluti mitmeid erinevaid disainivariante. Näiteks ülejäänud katetest radikaalselt erinevat kolme paindega põhiosa, millele kinnitub õhem, 1,5 mm DC01 teraslehest, lisakate silindrite varjamiseks (vt. Joonis 3.6).



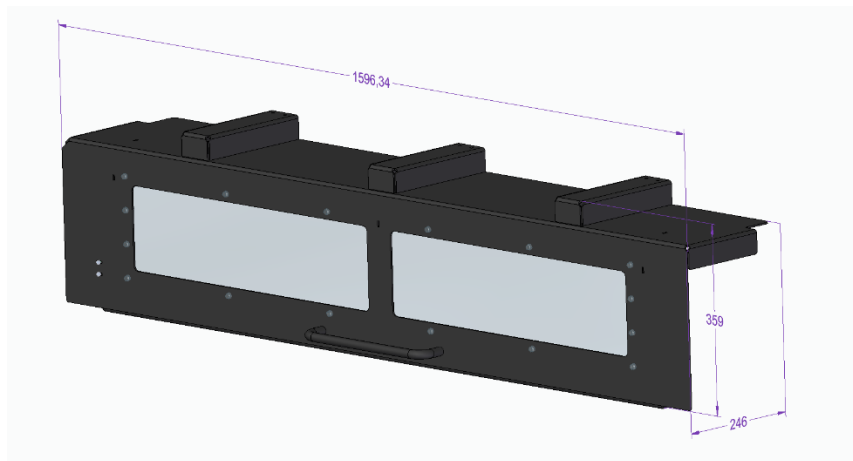
Joonis 3.6. Kvaliteetse väljundi kontseptkate isomeetriselises ja külgvaates.

Lõpuks otsustati teistele katetele sarnase disaini kasuks. Tehti suur 90°-se paindega kate, mis ulatub pneumosilindritest kaugemale, et kõik ära katta. Lisaks on kattel küljeseinad, et kate ulatuks raamitaladeni. Selline üledimensioneeritud disain teeb katte väga raskeks, 3 mm paksuse lehtmetailiga on mass ligikaudu 30 kg. Operaatorite elu teeb niivõrd suure massiga kate keeruliseks, mistõttu vahetati katte materjal 2 mm DC01 lehtmetailiks 3 mm asemel, lõigati kattesse sisse mitmed avad ja avade taha pandi polükarbonaadist plaat, mis on umbes seitse korda kergem ning võimaldab liini tööd jälgida. Nende meetodite rakendamisel langes katte kaal 15 kg juurde (vt. Joonis 3.7).



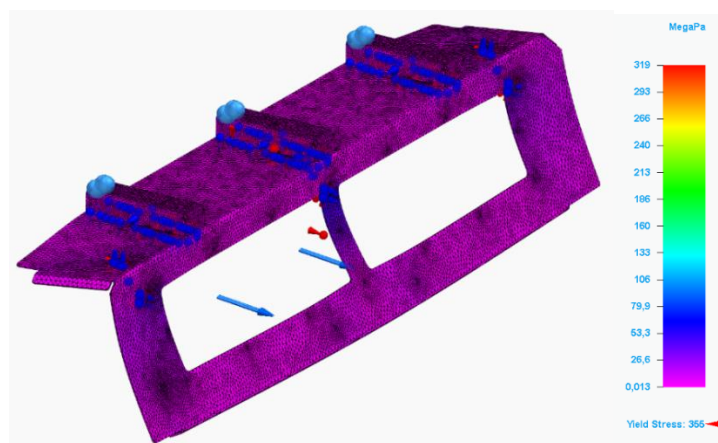
Joonis 3.7. Labadega konveieri kvaliteetse väljundi turvakate.

Labadega söötja praagi väljundi kate on suuruse ja seetõttu ka disaini poolest sarnasem tõukuri väljundite liikuvate katetega, mis on kirjeldatud Punktis 3.1.1, aga sama raami küljes asetsemise tõttu on ka eelmises alapunktis käsitletud kattega samu modelleerimisideesid kasutatud. Peamiselt on samamoodi lahendatud lisadetailide keevitamine suurema plaadi külge, et tagada katte sujuv liikumine ja vältida kuhugi pihta minemist. Kattelt leiab samuti sisselõigatud ava koos plastmassist plaadiga massi vähendamiseks ning liini töö jälgimiseks (vt. Joonis 3.8).



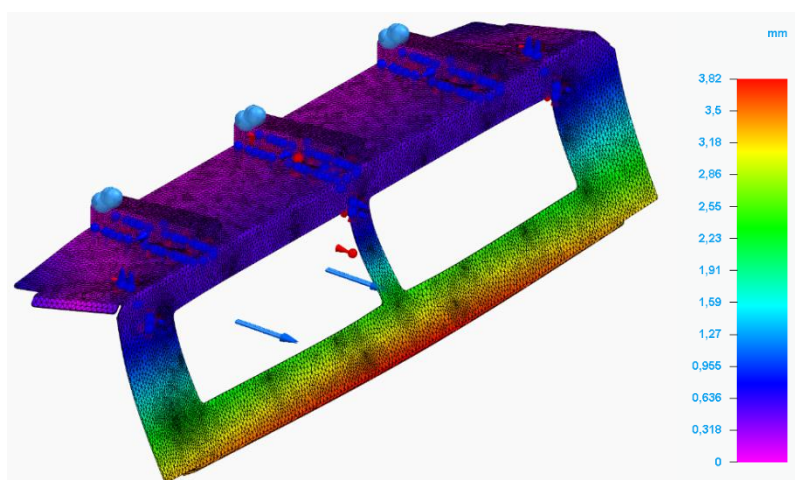
Joonis 3.8. Labadega söötja praagipoolne kate.

Käsitletavale katele tehti sarnaselt tõukuri katele tugevusarvutus, et analüüsida läbipainet katte tõstmisel. Selle jaoks pandi raami külge kinnitumiseks tehtud kõrgenduste poldiavadele seos, mis ei lase neil paigast liikuda. Teisel pool katet olevatele käepideme poldiavadele pandi sarnaselt tõukuri katele tehtud arvutusele jõud 150 N võrreldava kaalu tõttu. Mõlemal tulemusi illustreerival joonisel on tulemuste paremaks visualiseerimiseks detailide moondumine mitmekordistatud ega peegelda tegelikku olukorda (vt. Joonised 3.9 ja 3.10).



Joonis 3.9. Labadega konveieri praagipoolse väljundi turvakatte tugevusarvutuse tulemus megapaskalites.

Tulemuste uurimine rõhu perspektiivist näitab, et katetele rakendatud jõu puhul on kõige suurema pingega kohad voolavuspiirile lähedal, aga ei ületa seda. See näitab, et päriselus püsib kate ühes tükis ja ei paindu läbi. Siinkohal aitab kaasa ka kogu katte ühine liikumine ning ülemiste kõrgenduste kinnitamine on puhtalt teoreetiliseks disaini kinnitamiseks.



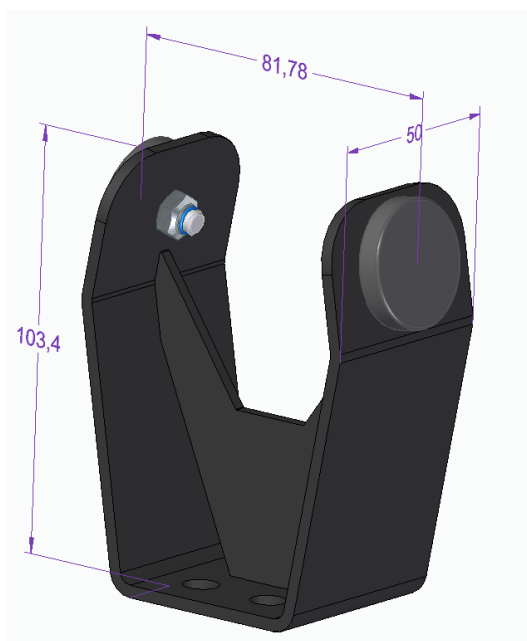
Joonis 3.10. Labadega konveieri praagipoolse väljundi turvakatte tugevusarvutuse nihkumise tulemus millimeetrites.

Hetkel palju olulisem parameeter, ehk nihkumine, näitab eelduspärast tulemust. Kuna kate on ülevalt seotud ja jõud rakendatakse alla, teevad suurema osa tööst paindumise takistamiseks tugevdusribid katte painde lähedal sarnaselt tükuri katetele. Tugevdusribid on väiksed ja seetõttu tekib 4 mm nihkumine. Arvestades tugevusarvutustes rakendatud tegelikust suuremat jõudu, võib arvutuste põhjal lugeda katte disaini pädevaks ja kasutatavaks, sest antud mastaabis nihkumine ei takista operaatoritel katete avamist ega sulgemist.

3.2 Ohutuskatete kinnitused

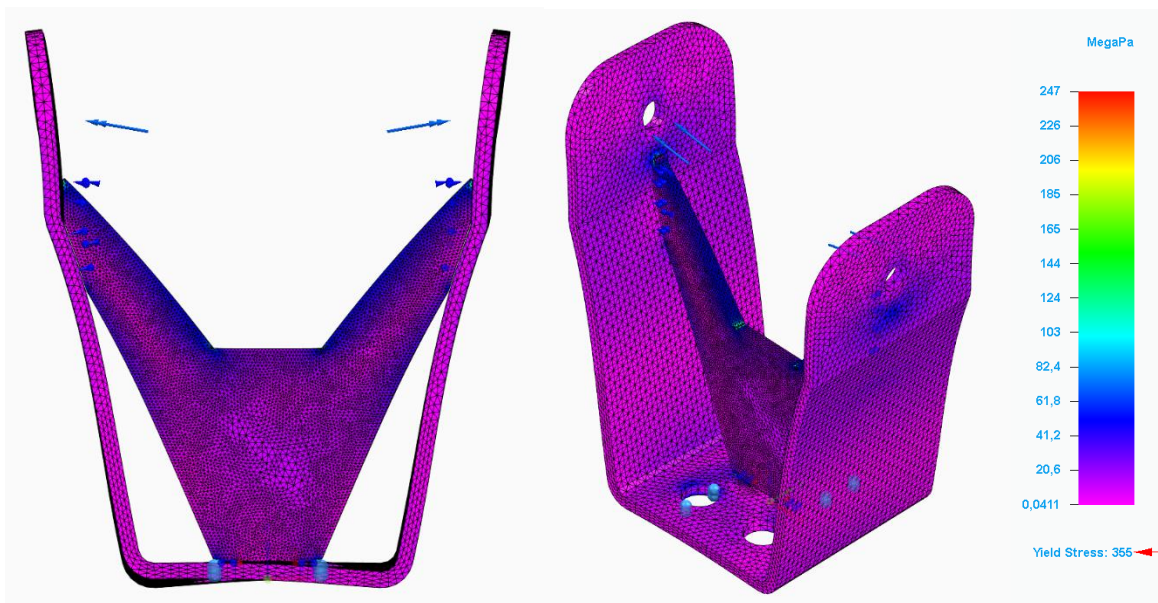
Ohutuskatete kinnitused kinnituvad keskmisele raamitalale, mis jookseb samas suunas konveieriga. Kinnituste eesmärk on katted fikseerida lahtisesse asendisse ning vältida olukorda, kus operaator peab ebakorrapäraste olukordade taastamiseks või seadistusemuudatuste tegemiseks ise katet samal ajal lahti hoidma. Niisugune talitus muutub väga kurnavaks ning võib tekitada olukorra, kus hakatakse vältima ohuolukordade kõrvaldamist või üritatakse kätt toppida katte alt liini juurde. Viimase meetodikaga saab tekkida ka laiskus operaatori poolt liini väljalülitamise kohta selleks ajaks ning üldine oht kasvab eksponentsiaalselt. Sellise situatsiooni vältimiseks on katete fikseerumine lahtiasendisse ühtlasi nõutud ka EVS-EN ISO 14120:2015 standardis, mida käsitleti Punktis 2.2.

Katete avanemiseks võimalikult palju samal ajal üksteisega kokku puutumata võeti nende avanemisnurgaks algasendi suhtes 100° , mille jaoks tehti ka kinnitus painutatud nurgaga. Kuna magnetile kontaktpinnaks on tehtud kinnituse põhiosa lai ning metallileht jookseb pikki suuri katteid, projekteeriti tugevdusribi, mis keevitatakse magnetit hoidva osa vahele. See tugevdab kinnitust oluliselt ja kindlustab detaili vastupidamise. Eelnevalt mainitud paine 100° avanemisnurga jaoks tähendab seda, et tugevdusribi tuleb ka teha painutatud osale ulatuvalt. Seega tehti ribi laserlõikuses väljalõigatava nurgaga, et see mõlema pinna külge keevitada (vt. Joonis 3.12). Vastasel juhul peab kinnituse põhikonstruktsioon hästi vastu, aga ülemised painutatud osad deformeeruvad katete sulgemisel kinnituse küljest lahti tõmmates rakendatava jõuga kiiresti.



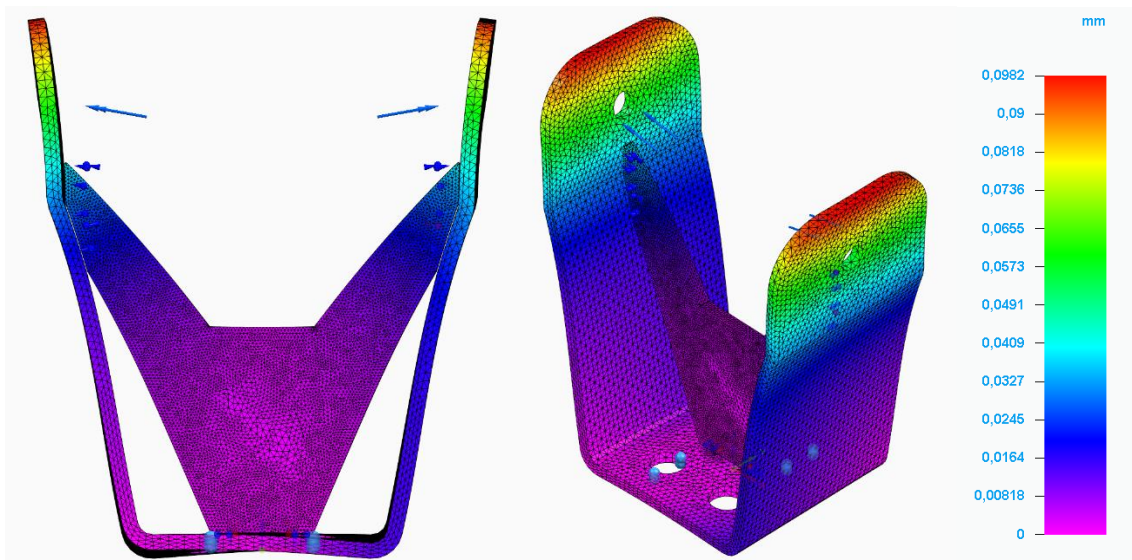
Joonis 3.12. Katete lahtiasendisse fikseerimise kinnitus.

Disaini vastupidavuse kinnitamiseks tehti sellele sarnaselt ohutuskatetele tugevusarvutus. Kuigi labadega konveieri ja tõukuri juurde pannakse vastavalt kinnitusi kolm ja kaks tükki, simuleeriti ühe kinnituse peal kogu katte raskuse hoidmist ning selle mõju. Kuna katete kaal on enamjaolt 15 kg juures, pandi disaini varuga kinnitamiseks mõlemale magnetit kinnitava poldiava juurde jõud 200 N. Vajadus varu jätmisele tuleneb ka asjaolust, et katete avamisel mõjub kinnitusele suurem jõud, kui seda on lihtsalt katte enda mass. Tugevusarvutuse visuaalsed tulemused on nähtavad Joonistel 3.13 ja 3.14.



Joonis 3.13. Magnetkinnituste tugevusarvutuse tulemus megapaskalites.

Rõhul põhinev tulemus näitab jällegi seda, et disain on turvaliselt alla voolavuspiiri ning peab hästi igapäevakasutusele vastu. Kuna jõudu rakendati varuga, võib kindel olla ka magnetite küljest lahti tõmbamisel kinnituse vastupidavuses.



Joonis 3.14. Magnetkinnituse tugevusarvutuse tulemus millimeetrites.

Nihkumist vaadates on samuti näha, et detail disainiti vastupidavalt ning see hoiab üksinda ilma raskusteta katteid üleval, pidades vastu ka magneti küljest lahti tõmbamisele. Turvalisuse huvides mitme kinnituse lisamine disainile annab kindlustunnet disaini kauakestvuse osas.

4 OHUTUSAUTOMAATIKA

Lisaks ohutuskatetele on ohutuslahenduse integraalne osa ka ohutusautomaatika. Kuna katted on igal ajahetkel operaatori poolt avatavad, tuleb vastavalt ohutusstandarditele ja masinadirektiivile tagada ohutus nende avamisel. See on saavutatav andurite lisamisega, mis reageerivad katete avamisel ning annavad signaali ohutusreleele, mis seejärel liini töö seiskab.

4.1 Ohutusandurid

Ohutusandurite valikul tuli lähtuda sellest, et katete liigutamine tuleb tuvastada võimalikult ruttu. Vastasel juhul, kui tuvastus toimuks alles katte pooleldi avanemise ajal, võib tekkida situatsioon, kus operaator küündib samal ajal liini poole ning tekib ohuolukord.

Üldiselt on andurite valikuid erinevaid, näiteks: erinevate tööpõhimõtetega kaugusandurid, magnettuvastusega andurid, liikumisandurid jt. Kõige olulisem detail käesolevas projektis anduri valimiseks on nõue, et tegemist peab olema spetsiifiliselt ohutusfunktsioonideks suunitletud anduriga. Sellistele anduritele kehtivad kõrgemad töökindlusnõuded, need on enamasti erksat kollast või oranži värvi, et nad oleksid märgatavamad. Ilma ohutuskontrolli tasemeta andurite kasutamise korral ei saa lahendust lugeda ohutuks või ohutust tagavaks ning seeläbi anda CE märgist. Seega kitseneb anduri valik ohutusanduritele, ehk kontaktivabadele ohutuslülititele või -kontaktidele, mis tuvastavad vaadeldava objekti liikumist või avanemist.

4.1.1 Valitud ohutusandur

Konsulterides välise asjatundjaga Leedu firmast Boplalit, otsustati Pilzi poolt toodetava magnetilise ohutusanduri komplekti PSEN 2.1a-20 ja PSEN 2.1-20 kasuks (vt. Joonis 4.1), millest esimene on magnetiline aktuaator ja teine on andur, mis edastab signaali ahelasse [8]. Kuna tegemist on võrdlemisi madalate turvanõuetega masinaga, piisab ühe kanaliga andurist, mida pole vaja eraldi programmeerida. Võrreldes näiteks RFID (*radio frequency identification*) anduritega on see suur eelis, kuna muidu tuleks kulutada lisa-aega arendusele ja automaatikatööle sama eesmärgi saavutamiseks. Igale katile on üks andur ja need on omavahel ühendatud jadamisi. Nii pääseb signaal terveist ahelast läbi ainult juhul, kui kõik katted on suletud. Valitud komplektis tuleb iga anduriga kaasa ka 5 m juhet, et kõik saaks kokku ühendada ühendusmoodulisse PSEN i1 Interface for 4 PSEN 2 [9] (vt. Joonis 4.2). Tegemist on samuti Pilzi poolt toodetava mooduliga, mille eesmärk on jadaühenduse tegemise lihtsustamine. Selle mooduli

lisamisel saavad kõikide andurite juhtmed ühes kohas kokku ning ülejäänud kaabeldus I/O (*Input/Output*) pistikute ja suure kilbi vahel saab toimuda ühe juhtmega. Selline andurite valik on PLC või kõrgemal suutlikustasemel, ehk lahendab kahtlemata püstitatud ülesande ja sobib käesolevasse ohutuslahendusse.



Joonis 4.1. Pilz PSEN 2.1a-20/PSEN 2.1-20/8mm /5m/1unit magnetandur [8].

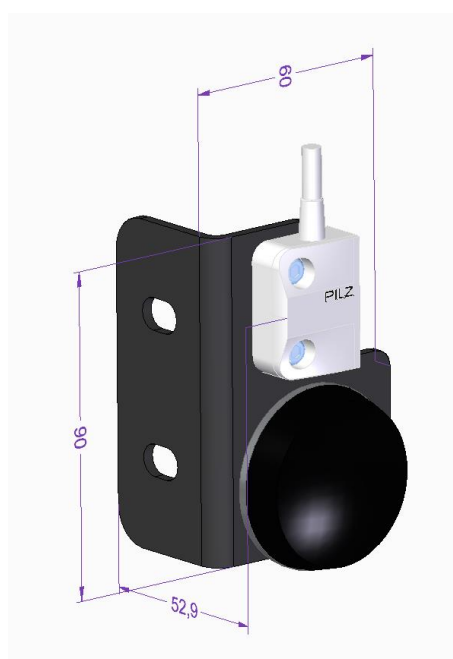


Joonis 4.2. Pilz PSEN i1 Interface for 4 PSEN 2 jadaühenduse moodul [9].

Terviklahendusena ühenduvad andurid läbi jadaühenduse juba olemasoleva ohutusrelee külge. Sama relee on näiteks ka kvaliteedikänneri hädastopp nupu küljes, mis seiskab liini töö, võttes toite ära 75 VDC toiteplokiilt ja seeläbi kõigilt liini elektrimootoritelt. Pikemalt on ohuseisundi protsessi kirjeldatud Punktis 4.2.

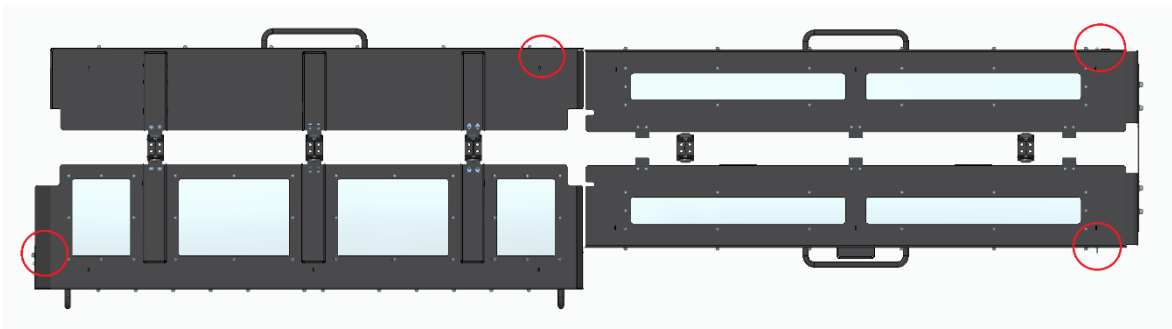
4.1.2 Magnetandurite kinnitused

Ohutusandurite kinnitused on enamjaolt pandud sorteerimisliini raami külge koos ohutuskatteid toetava koonusekujulise kummist pehmendusega (vt. Joonis 4.3). Kinnitus terve detailina on pandud katte suhtes võimalikult madalale, et katte avamise korral aktuaatori nihkumine anduri kõrvalt ära fikseeritakse võimalikult kiiresti. Vastasel juhul võib kate olla juba pooleldi lahti ning operaator selle alla küündimas, kui andur teistsuguse oleku tuvastab. Esimene prioriteet andurite kasutamisega on ohutu keskkonna loomine operaatoritele, mistõttu ei oleks selline asetus standarditele vastav ega üldmõistuslikult vastuvõetav.



Joonis 4.3. Ohutusanduri kinnitus koos kummist pehmenduse ja anduriga.

Eelmainituna on iga ohutuskatte juures üks andur, need asuvad kõikide katete puhul Joonisel 4.4 punase ringiga märgitud kohtades. Magnetaktuaatorid asuvad katete küljes kinnises asendis kohe andurikinnituste kõrval. Katete külge on need fikseeritud poltidega ning aktuaatori ja katte vahel on 2 mm paks vaheplaat, mis annab reguleerimisvõimalust ning väldib koostöös kummipuksiga vajadust katte ohtlikult lähedal asumisele anduri suhtes.

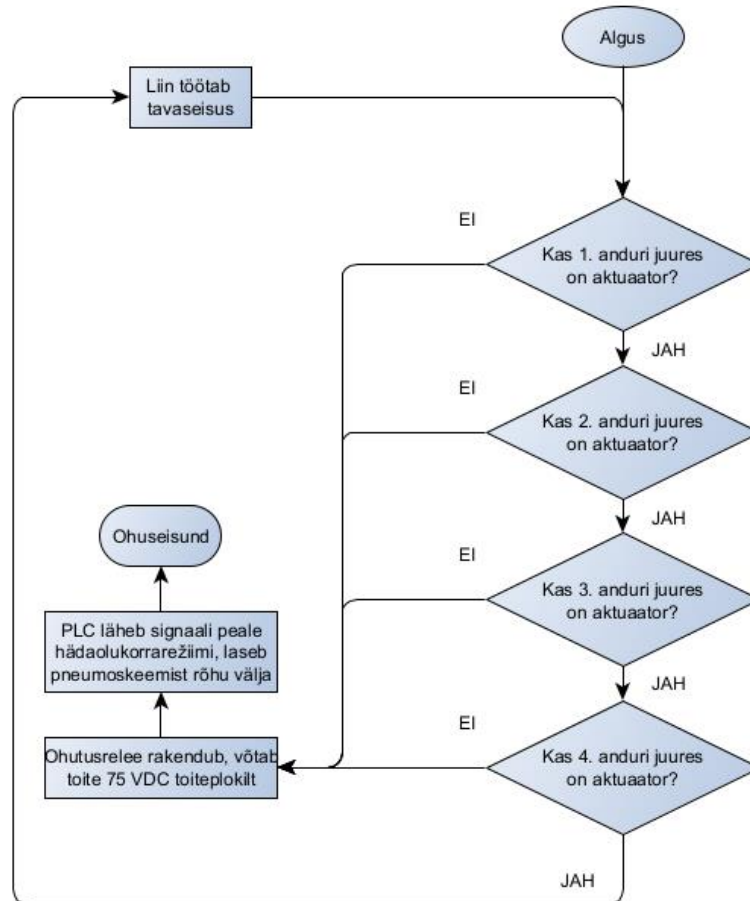


Joonis 4.4. Andurikinnitusete asukohad pealtvaates.

Jooniselt kajastub, et 3 andurit asuvad samal pool katteid ning nende puhul on kasutatud ka varasemalt nähaolevat andurikinnitust. Kvaliteedipoolse väljundi puhul on tegemist raamitaladest kaugemale eemale ulatuva disainiga, mille vertikaalne osa ei jää kinnises asendis ühegi tala ligidale ning seetõttu tuli kasutada teistest erinevat lahendust. Selle katte puhul on andur kinnitatud raamitala külge ning pehmendus kummipuhvri näol asetseb turvakatte küljes. Kõiki nelja andurit ühendav jadaühenduse moodul asub nelja katte keskel raami alumise osa küljes koos I/O moodulite, pneumoklappide ja -regulaatoriga.

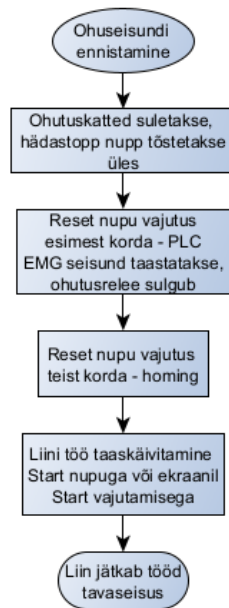
4.2 Ohutuslahenduse protsessiskeem

Järgnevalt on kirjeldatud plokkiskeemina Joonises 4.5 automaatikaprotsessi, mis näitab süsteemi talitlemist, kui mõni anduritest annab signaali, et aktuaator ei ole enam anduri juures. Kuna kõik magnetandurid on ühendatud jadamisi, tuleb ka nende kontroll teha järkjärguliselt. Sellisel viisil on iga katte lahtitegemisega kohe hädaseisund tuvastatav, kui anduri juurest liigub aktuaator ära. Magnetandurid on ühendatud olemasoleva ohutusrelee külge, kuhu ühendub ka hädastopi nupp. Nisugune lahendus vähendab kulusid uue liini seiskamise süsteemi väljatöötamise arvelt ning lisanduvaid ohutusandureid on kergem integreerida olemasoleva liini ja lahendusega. Kui ükski andur enam signaali ei anna, rakendub koheselt ohutusrelee, mis võtab voolu ära 75 VDC toiteploki, sellega kaob toide kõikidelt servo- ja elektrimootoritelt. Nii hädastopi lüliti koos anduritelt tuleva signaaliga kui ka *Reset* nupp on ühendatud otse ohutusrelee külge ja samaaegselt PLC külge. Selliselt aktiveerub relee koheselt ohuseisundile ja kontrolleri saab samal ajal informatsiooni, et ohuseisund on tekkinud. Ohuseisundis on kontrolleri samuti hädarežiim, millega võetakse surve ära pneumosüsteemilt ning enne uue info laekumist ei lase kontrolleri ühtegi masinat uuesti tööle.



Joonis 4.5. Turvalahenduse protsessiskeem.

Kui hädastopi nupp on uuesti üles tõmmatud, kõik katted on suletud ja sellega ohuseisund taastatud, tuleb vajutada 2 korda Reset nuppu. Esimene vajutus taastab arvutikilbis turvarelee, see annab ka kontrolleri märku, et ohuseisund on lõppenud ja kõik on korras. Teine vajutus teeb kontrolleri *homingu*, ehk algpositsiooni liigutamise ning koodi algusest pihta hakkamise. Selle käigus liigutatakse ka tõukur ja labadega konveier koduasenditesse. Koodis on ühtlasi olemas kontroll *homingu* õnnestumisele. Kui kontrolli ei läbita, tuleb Reset nuppu veel vajutada. Pärast neid samme on liin uuesti valmis tavatöök, selle alustamiseks saab vajutada *Reset* ja hädastopp nuppude kõrval olevat rohelist käivitamisnuppu (vt. Joonis 4.7) või alternatiivselt arvutiekraanilt *Start* nuppu. Seejärel jätkub tavapärane sorteerimistö. Kirjeldatud protsessi graafiline esitus on toodud Joonisel 4.6.



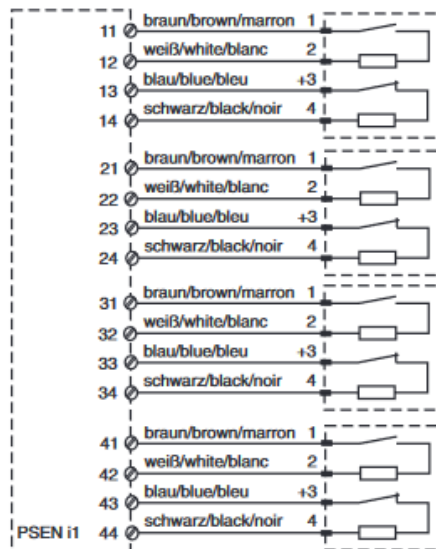
Joonis 4.6. Ohuseisundi ennistamise protsessiskeem.



Joonis 4.7. Erinevate nuppude asetus kvaliteedikänneri peal. Vasakult paremale: Start, Stop, *Reset*, Hädastopp.

4.3 Ohutuslahenduse elektriskeem

Komponentide omavaheliste seoste ja vastavate ühenduste paremaks väljenduseks koostati ohutuslahendusest eraldiseisev elektriskeem, kus on ohutusandurid, neid ühendav jadaühendusmoodul, ohutusrelee, hädastopi nupp, *Reset* nupp ning Tecnicu poolt toodetav Clearcore PLC [6], mida kasutatakse liini juhtimiseks. Nii PLC kui ka andurid töötavad 24 V peal. Magnetandurid on ühendatud jadaühendusmooduli külge mooduli kasutusjuhendist leitud näiteskeemi järgi (vt. Joonis 4.8).



Joonis 4.8. Jadaühendusmooduli ühendamisskeem nelja anduriga [11].

Eelmainituna võtab ohutusreleeräa voolu 75 V toiteploki, mis toidab kõiki elektrimootoreid ja servomootoreid masinas. Nii seiskub liin ning kvaliteedikilbis olevad rullikud, labadega söötja. Kui kontrolleri saadakse signaal, lülitab see muuhulgas ka pneumoahela välja, millega ei saa enam ükski komponent liikuda ja operaatorile ohtu ei ole. Elektriskeem on toodud Lisas 1.

KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöös käsitleti ohutuskatete disainimist ja sellele ohutusautomaatika lisamist voodilippide sorteerimisliinile, millest Aramet OÜ inseneribüroo ehitab teist versiooni.

Vaadeldi olemasolevat liini tutvustavalt, mis hõlmab endas peamiselt kvaliteediskannerit ja sorteerimisliini. Kvaliteediskanner vaatab nelja kaameraga igat voodilippi ning hindab seejärel nende kvaliteeti üle 20 erineva defekti osas. Vastavalt skänneri otsusele jaotab sorteerimisliin lipid viie väljundi vahel, millest üks on kvaliteetne väljund. Kvaliteetsed lipid lähevad konveieri peale edasi ja need pakitakse kümnekesi kokku. Praagid kogutakse kogumiskastidesse ja saadetakse parandusse või utiliseerimisse. Sorteerimist teostatakse kahe masinaga – labadega konveier, mis tõukab kettide peal jooksvate labadega ja servomootoriga ringikäivana lippe ühele või teisele poole ning tõukur, kus on üks laba lineaartelgede peal ja mis on juhitud pneumosilindri poolt. Mõlemas neist tehakse uue liini ehitamisega paar muudatust, mis esimese liini kasutamisel on välja tulnud. Peamine neist on ohutuslahenduse integreerimine sorteerimisliinile.

Tutvuti ka erinevate nõuetega, mis rakenduvad sellisele masinale ja mida peab arvesse võtma ohutuskatete disainimisel. Kõige tähtsam neist on Masinadirektiiv 2006/42/EÜ, kuna see kohaldub kõigile masinatele. Seal on esitatud terve masina disainimise protsessi nõuded kuni vastavusdeklaratsiooni esitamise ja selle CE märgisega kinnitamiseni välja. Järgmiseks kohalduvad masinale ja katetele EVS-EN ISO 12100:2010 ja EVS-EN ISO 14120:2015 standardid, mis reglementeerivad vastavalt A-normi ohutu masina printsiipe ja eraldi turvakatteid. Ohutuskatete vajalikud ohutustasemed selgitati välja EVS-EN 13849-1:2023 standardi abil, millega seoses analüüsiti PLr taset. Eraldiseisvalt lisati IP taseme analüüs katetele. Tulemused olid vastavalt PLa, ehk kõige madalam suutlikkustase ning IP 2, ehk suuremad, kui 12,5 mm objektid ei tohi kuskilt vahel läbi mahtuda. Nendest juhindudes disainiti katted, mille peamine eesmärk on ära hoida tahtmatut kontakti inimeste poolt masina liikuvate osadega.

Selle kindlustamiseks disainiti ohutuskatted. Igale väljundile disainiti natukene omapärane kate tulenevalt juuresolevate masinate ja teiste objektide eripärast. Üldiselt aga järgisid need ühte ja sama filosoofiat – keskelt 90° painutatud katted, mis ulatuvad keskmisest raamitalast äärmiseni ning on avatavad. Paremaks jälgimiseks tehti katetele sisse polükarbonaadiga kaetud avad. Kuna tulenevalt ohutuskatete standardis nõutust

peavad katted lahtises asendis fikseeritult püsima, lisati disaini ka magnetitega kinnitused, mis lahti püsimist kindlustavad. Kõigi detailide disainide kinnitamiseks tehti neile tugevusarvutused. Tulemusi uuriti rõhuga ning nihkumisega. Esimene neist annab teada, kas toimub läbipaine, mis juhul detail ei peaks vastu, teine neist annab sisulise deformatsiooni kohta märku. Kõiki katteid uuriti reaalsusest suurema jõuga, et jääks sisse teatav varu ning kõikide katete tugevusarvutuse tulemused viitasid disaini toimimisele.

Ohutuskatete standardis on nõutud ka seda, et kui katted on avatavad või teisaldatavad, peab nendele juurde arendama ohuseisundi. See tähendab, et kui katted avatakse, reageerivad neid vaatavad andurid ja annavad ohutusreleele signaali, mille tulemusel masina ohtlikud protsessid seisatakse. Nõude täitmiseks valiti katetele juurde kõrgendatud töökindlusega PLC või kõrgema suutlikkustasemega magnetandurid, mis on ühendatud süsteemis olemasoleva ohutusrelee ja hädastopp nupuga. Kirjeldati ka hädastopi protsessi ning selle ennistamist, ohutuslahendusele tehti elektriskeem.

Disainitud ohutuskatted koos valitud magnetanduritega on töötav lahendus sorteerimisliinile lisaohutusastme kindlustamiseks. Nende lisamisel disaini saab Aramet OÜ väljastada CE märgise masinale ning klient ei pea ise ohutuskatete pärast muretsema. Katted lähevad koos liiniga ehitusse ning hakkavad nägema igapäevast kasutust.

SUMMARY

The purpose of this thesis was to design safety covers and safety automation onto a bed slat sorting machine built by Aramet OÜ. The safety solution will go on the second version of this machine. The main purpose for integrating these solutions is to sell the machine with a CE sign without any extra requirements to the client.

Firstly, an overview of the existing sorting machine was provided, which consists of a Quality Scanner and a Sorting Line. The Quality Scanner looks at each bed slat with four cameras, to cover all angles, and grades their quality in regard to over 20 different aspects, using artificial intelligence. Based on the decisions of the Quality Scanner, the bed slats are then sorted into five different outputs, one of which is for bed slats, that passed the quality checks. These slats go on to a conveyer and are packaged in tens. The rest of the slats are collected into scrap collecting boxes and will either be fixed or thrown away. The sorting is accomplished with two different systems – a conveyer with plastic blades, that pushes said blades around atop the conveyer with a servo motor, and a pushing mechanism that uses one blade, pushed back and forth by a pneumatic cylinder with the blade being attached to linear axes. Both machines will see several changes in the second version, that have risen from using the first one over an extended period of time. The main change is integrating a safety solution into the Sorting Line.

In order to create a solution in correlation with current regulations and standards, they were first analysed and the most important parts were brought out. The most important document is the Machine Directive 2006/42/EC, because it applies to all machines built and sold in the European Union. It describes the entire design process, from identifying risks, the designing itself and eventually the type approval and Declaration of Conformity. The last of which is most important to issue a CE badge with the machine. The Machine Directive gives several standards, that also must be followed. For this machine, a few of the most important are EVS-EN ISO 12100:2010, describing the basic principles of safe machines to the A-level. To enforce that, standards EVS-EN ISO 14120:2015, describing safety covers, and EVS-EN ISO 13849:2023, describing the Performance Level analysis, were used. According to the PL standard, the covers and safety system described in this thesis have to be designed to the Pla level, the lowest in the scale. In addition, the IP level was assessed. Since there is no danger of water to the sorting machine, only protection from physical objects was analysed. It was decided to design the covers to IP level 2, meaning, that nothing bigger than 12,5 mm can get past the covers. With these requirements in mind, the covers were designed so that unwanted contact by humans to any of the moving machines can be avoided.

To ensure this, the physical covers were designed to every output of the Sorting Line. Though with a few variances, the covers shared basic design principles – one big sheet metal cover, that is bent 90° from the middle and reaches from the central frame pillar to the edge pillar and all are openable. For better observation of the line working, holes were designed into the covers, that are closed with polycarbonate plates. Since the ISO standard describing safety covers says, that openable covers must be fixated into the opened position, magnetic fasteners were designed. To confirm the adequacy of all designs, strength calculations were made. Results were observed in pressure or stress and displacement. The stress results show, if any details will bend through or hold together structurally with the applied force. The displacement shows actual deformation in millimetres and is the more important of the two in this case. Big displacement would mean, that the detail will deform and not go back to its preliminary state, which would render the detail unusable. All covers and fasteners were tested with a force bigger than they will experience in actual application, to ensure their reliability.

The standard describing safety covers also states, that in the case of openable covers, they have to include a "state of emergency" function. This means that, when the covers are opened, all the dangerous processes of the machine are stopped. The covers are constantly looked at by safety sensors, and send a signal to the safety relay, if any of the covers have been opened. To fulfill the requirement, magnetic sensors were selected, with a security level of higher than PLc. The sensors were connected to an existing safety relay and emergency stop button. The emergency procedure and restoring to normal work state processes were also described.

The designed safety covers along with the chosen magnetic sensors are a working addition to the sorting machine, that add an extra layer of safety. With these Aramet OÜ can issue a CE badge with the machine without any extra requirements to the client. The covers will see application and soon be built together with the rest of the bed slat sorting machine.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] Euroopa Liidu Teataja. Euroopa Parlamendi ja Nõukogu direktiiv 2006/42/EÜ. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/ALL/?uri=celex:32006L0042>
- [2] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. EVS-EN ISO 12100:2010 – Safety of machinery – General Principles for design – Risk assessment and risk reduction. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.evs.ee/en/evs-en-iso-12100-2010>
- [3] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. EVS-EN ISO 13849-1:2023 – Safety of machinery – Safety-related parts of Control systems – Part 1: General principles of design. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.evs.ee/en/evs-en-iso-13849-1-2023>
- [4] Eesti Standardimis- ja Akrediteerimiskeskus. EVS-EN ISO 14120:2015 – Safety of machinery – Guards – General requirements for the design and construction of fixed and movable guards. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.evs.ee/en/evs-en-iso-14120-2015>
- [5] Tehnilise järelevalve amet. Masinaohutus: riski hindamisest tüübikinnituseni.
- [6] Wide Automation. CALCULATION OF THE PERFORMANCE LEVEL. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.wideautomation.com/media/uploads/2021/03/CALCOLO-PERFORMANCE-LEVEL-EN.pdf>
- [7] Max Dietrich, Rolf Schumacher, Doris Lilienthal, Harald Schmidt, Hans-Jörg Stubenrauch, Otto Görneman, Mathhias Kurrus. SICK. Guide for safe machinery. Six steps to a safe machine.
- [8] Pilz. PSEN 2.1a-20/PSEN 2.1-20/8mm /5m /1unit 502226. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.pilz.com/en-INT/eshop/Sensor-technology/Safety-switches/PSENmagne-non-contact-magnetic-safety-switches/PSENmagne-for-electronic-relays/PSEN-2-1a-20-PSEN-2-1-20-8mm-5m-1unit/p/502226>
- [9] Pilz. PSEN i1 Interface for 4 PSEN 2 535110. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.pilz.com/en-INT/eshop/Sensor-technology/Safety-switches/PSENmagne-non-contact-magnetic-safety-switches/Accessories-PSENmagne/PSEN-i1-Interface-for-4-PSEN-2/p/535110>
- [10] Tecnic. Clearcore Hardware and Wiring Manual. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://tecnico.com/files/downloads/clearcore_user_manual.pdf
- [11] Pilz. 20 776-05 PSEN i1 Operating Instructions. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.pilz.com/download/open/PSEN_i1_Operating_Manual_20776-3FR-05.pdf
- [12] Blue sea systems. IP (Ingress Protection) Ratings. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: https://www.blueseasystems.com/support/reference/117/IP_%5BIngress_Protection%5D_Ratings

Lisa 1 Ohutuslahenduse elektriskeem

