



TALLINNA TEHNICAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Mehaanika ja tööstustehnika instituut

MOBIILSE ROBOTSÕIDUKI TÕSTE- JA VEOMEHHANISMI ARENDUS

AUTONOMOUS MOBILE ROBOT LIFTING AND DRIVING MECHANISM DESIGN

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Kalver Kahl
/nimi/

Üliõpilaskood 183658MATM

Juhendaja: Maarjus Kirs, teadur
/nimi, amet/

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.

“25” mai 2020

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“25” mai 2020

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”2020.

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Kalver Kahl (autori nimi) (sünnikuupäev: 04.11.1994)

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose

Mobiilse robotsõiduki tõste- ja veomehhanismi arendus,

mille juhendaja on, Maarjus Kirs,

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

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

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

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

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

_____ (allkiri)

25.05.2020 (kuupäev)

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Kalver Kahl 183658MATM

Õppekava, peeriala: MATM02/18, tootearendus ja tootmistehnika

Juhendaja(d): Maarjus Kirs, teadur

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Mobiilse robotsõiduki tõste- ja veomehhanismi arendus

(inglise keeles) Autonomous mobile robot lifting and driving mechanism design

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Tõstemehhanismi parendatud arendus
2. Veomehhanismi parendatud arendus
3. Konseptuaalne lahendus

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Olemasolevate lahenduste analüüs, nende eelised ning puudused.	15.03.2020
2.	Parima lahenduse leidmise analüüs	29.03.2002
3.	Tõstemehhanismi projekteerimine	12.04.2020
4.	Veomehhanismi projekteerimine	26.04.2020
5.	Jooniste vormistamine	10.05.2020
6.	Töö vormistamine ja köitmine	20.05.2020

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "25" mai 2020a

Üliõpilane: Kalver Kahl "25" mai 2020a
/allkiri/

Juhendaja: Maarjus Kirs "25" mai 2020a
/allkiri/

Programmijuht: Martin Eerme "25" mai 2020a
/allkiri/

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	7
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	8
SISSEJUHATUS	9
1. OLEMASOLEVATE SÜSTEEMIDE ANALÜÜS	11
1.1 Automaatjuhtimisega sõiduk	11
1.1.1 Automaatjuhtimisega sõiduk	11
1.1.2 Automaatjuhtimisega sõiduki liigitused	11
1.1.3 Automaatjuhtimisega sõiduki eelised [8]	13
1.2 Olemasolevad süsteemid	13
1.2.1 Erinevad tootjad	14
1.2.2 Patenteeritud lahendused	15
1.3 Olemasolevate süsteemide võrdlus	21
2. TÕSTE- JA VEOMEHCHANISMI PROJEKTEERIMINE	22
2.1 Süsteemi parameetrid	22
2.2 Funktsiooni struktuur	23
2.3 Morfoloogiline maatriks	24
2.4 Lahendusvariandid	25
2.4.1 Lahendus I	25
2.4.2 Lahendus II	26
2.4.3 Lahendus III	26
2.4.4 Lahendus IV	27
2.5 Hindamismaatriks	28
3. KOMPONENTIDE VALIK	29
3.1 Rataste valik	29
3.2 Vedav jõuülekanne	31
3.2.1 Ratta pöörlemisagedus	31
3.2.2 Robotile avalduvad jõud [24]	32
3.2.3 Ratta väändemoment [25]	33
3.2.4 Ajami vajalik võimsus	34
3.3 Tõstemehhanism	35
3.3.1 Keermestatud latt	35
3.3.2 Kuulkruvi	36
3.3.3 Lineaarne ajam	36
3.3.4 Vajalikud parameetrid	37
3.4 Kasutatavad materjalid	39
3.4.1 Konstruktsioon	39
3.4.2 Keredetailid	42

3.5	Elektronikakomponendid	42
3.5.1	Veojami juhtimiseks vajalikud moodulid	42
3.5.2	Tõstemehhanismi juhtimine.....	44
3.6	Komponentide valiku hinnang.....	44
4.	ROBOTI PROJEKTEERIMINE	45
4.1	Konstruksioon	45
4.1.1	Detail 1	46
4.1.2	Detail 2	47
4.1.3	Detail 3	47
4.1.4	Kinnitus 2	47
4.2	Tõstemehhanism	48
4.2.1	Tõsteplaat.....	48
4.3	Veomehhanism.....	50
4.4	Keredetailid	50
4.5	Roboti parameetrid	51
5.	TUGEVUSANALÜÜS	52
5.1	Tõsteplaat.....	52
5.2	Konstruksioon	54
6.	HINNA ANALÜÜS	57
	KOKKUVÕTE	59
	SUMMARY.....	60
	KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	61
	LISAD	64
	Lisa 1 Veosüsteemi juhtimiskeem [38]	65
	GRAAFILINE OSA.....	66
1.	AR702.00.00.00, Robot (A2).....	66
2.	AR702.01.00.00, Konstruksioon (A2).....	66
3.	AR702.01.00.01, Painutatud leht 166x440x166 t=4 (A3)	66
4.	AR702.01.00.03, Painutatud lehtmetsall 52,7 x 432,5 x 160 (A3)	66
5.	AR702.02.01.00, Tõsteplaat (A3)	66
6.	AR702.02.01.01, Painutatud leht 600x440x30 t=2 (A3)	66

EESSÕNA

Käesoleva magistritöö teema arenes välja Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnika instituudist, kontakteerudes professor Martin Eermega. Töö keskendub mobiilse robotsõiduki tõste- ja veomehhanismi arendusele.

Magistritööd juhendas Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnika instituudi teadur Maarjus Kirs.

Avaldan tänu järgnevatele isikutele:

- Martin Eerme ja Tarmo Velsker, kes aitasid lõputöö teema valikuga,
- Maarjus Kirsile, kes aitas lõputöö teema valikuga ning kellega konsulteeriti töö kirjutamise vältel.
- Evi Schults toetuse ja innustuse eest lõputöö kirjutamise vältel.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

- AGV – Automaatjuhtimisega sõiduk (ingl k *Automated Guided Vehicle*)
- AMR – Autonoomne mobiilne robot (ingl k *Autonomous Mobile Robot*)
- DC – Alalisvool (ingl k *Direct Current*)
- LEM – Lõplike elementide meetod (ingl k *Finite Element Method, FEM*)
- Pos – Positsioon

SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärgiks on välja töötada tootmislogistika jaoks sobilik mobiilne robot, mis aitaks robotiseerida ja optimeerida tehastes transpordilogistikat. Teematika olulisus seisneb selles, et tehastes vähendada kaupade transportimiseks kuluvat aega ning samuti vähendada inimeste füüsilist tegevust seoses kaupade liigutamisega. Seeläbi saaks väärtuslik inimressurss teha ettevõttele rohkem lisandväärtust loovaid ülesandeid.

Teema saadi Tallinna Tehnikaülikooli mehaanika ja tööstustehnika instituudist. Nimelt on projekti jaoks valminud juba esmane prototüüp, kuid antud töö sisu keskendub selle tõste- ja veomehhanismi parenduste väljatöötamisele. Teema sai valitud autori isiklikust huvist antud valdkonna vastu ning lõpplahenduse praktilisest ja reaalsest vajadusest.



Joonis 0.1 Mobiilne robotsõiduk TalTech 1. prototüüp [1]

Peamised puudused esimese prototüübi puhul olid ebaühtlane kiirendus, mis tekitab probleeme veetava kauba stabiilsuses, ning tõstesüsteemi kinni kiilumine ning ebaühtlane tõstmine. Antud töö käigus tekib kontseptuaalne lahend. Kui arendusest luuakse prototüüp, siis tuleks antud lahendust katsetada reaalses tingimustes ning teha mehhanismide sobivuse ja koostoitmise analüüs.

Käesoleva töö esimeses peatükis lähtutakse olemasolevate süsteemide leidmisele ja analüüsile. Selle eesmärk on informatsiooni kogumine ja erinevate võimaluste uurimine. Peatüki lõpus on toodud olemasolevate süsteemide analüüs.

Teine peatükk keskendub käesoleva töö raames väljamõeldava lahenduse algandmete kogumisele, roboti funktsioonistruktuuri ja morfoloogilise skeemi loomisele ja lõpplahenduse jaoks erinevate lahendusvariantide väljapakumisele. Peatüki võtab

kokku hindamismatriks. See meetod aitab leida parima lahenduse välja pakutud lahendusvariantide seast.

Kolmandas peatükis keskendutakse valitud lahenduse jaoks sobivate komponentide ja materjali valikule. Seal analüüsitakse valitud komponente ja tehakse esmased arvutused, mis on valikute tegemise aluseks.

Neljas peatükk keskendub projekteerimisele. Lisaks tuuakse välja tehtud optimeerimised ning projekteeritud lahenduse tulemid.

Viimane peatükk seisneb kuluarvestusele ning süsteemi analüüsile. Lisade alla esitab autor projekti käigus valminud joonistele.

Projekteerimine on teostatud *Solidworks 2019* programmi kasutades. Samuti on antud programmiga teostatud tugevusarvutused. Lisaks on kasutatud *Excel* tabelarvutusprogrammi projekti arvutuslahenduste tegemiseks.

1. OLEMASOLEVATE SÜSTEEMIDE ANALÜÜS

1.1 Automaatjuhtimisega sõiduk

1.1.1 Automaatjuhtimisega sõiduk

Automaatjuhtimisega sõiduk (ingl k *Automated Guided Vehicle, AGV*), mis liigub mööda ettemääratud teed ning täidab sealjuures sellele antud ülesannet. Kuna sõidukitele on rajad ette määratud, siis see tagab laadungi ja teda ümbritsevate objektide turvalisuse. Edasiarendus AGV'ist on autonoomsed mobiilsed robotid (ingl k *Autonomous Mobile Robot, AMR*). Robotitele on antud vabadus navigeerida mööda nende poolt valitud optimaalsemat teekonda, kuigi nad proovivad järgida neile etteantud rada kui selline peaks olemas olema. Sellist navigeerimisviisi kutsutakse ka naturaalseks või vabaks navigeerimiseks. [2] [3]

AGV ja AMR süsteeme kasutatakse laialdasel auto-, keemia-, toiduainetetööstustes, trükikodades, logistikas, meditsiinis ning paljus teistes valdkondades.

1.1.2 Automaatjuhtimisega sõiduki liigitused

Automaatjuhtimisega sõidukeid on oma otstarbe poolest peamiselt liigitatud järgnevalt:

- Automaatjuhtimisega kärud (ingl k *Automated Guided Carts AGC*) – Kõige tüüpilisemad AGV/AMR sõidukid, mis on mõeldud tegema lihtsaid ja monotoonseid ülesandeid. Nad on väikeste gabariitsete mõõtmetega. Väike kõrgus, võimaldab neil sõita laadungi alla, ühendada end laadungiga või tõsta see ülesse ning seejärel transpordida kaup soovitud kohta. Enamjaolt moodustavad nad ladudes terve süsteemi mitmest sõidukist. [2] [3]



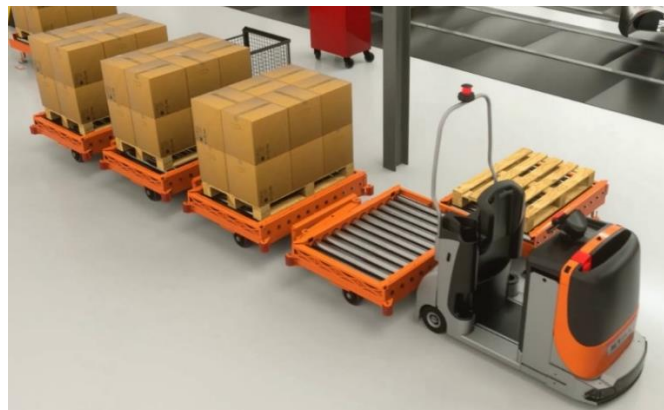
Joonis 1.1 Geek+ M100 AGC [4]

- Automatiseeritud kahveltõstukid (ingl k *Automated forklift AGV*) – sarnaneb tavapärase kahveltõstukitega, kuid nende opereerimine on automatiseeritud. Kasutavad ümbruskonnas navigeerimiseks laseril põhinevat süsteemi. [2] [3]



Joonis 1.2 Automatiseeritud kahveltõstuk [5]

- Automatiseeritud puksiir (ingl k *Tugger AGV*) – Motoriseeritud puksiir, millega on ühendatud üks või mitu veetavat kärü. Kasutusel on nii automatiseeritud kui ka manuaalne kärude ühendus puksiiriga, kuid veetavad kärud tuleb ühendada omavahel manuaalselt. Antud lahendus on väga kuluefektiivne, kuna saab vedada mitut lasti korraga. [2] [3]



Joonis 1.3 Automatiseeritud puksiir [6]

- Automatiseeritud ühiklaadung vedaja (ingl k *Unit Load AGV*) – Motoriseeritud kaupa vedav sõiduk. Kompaktse disainiga, kuid mõeldud suuremate ja raskemate kaupade vedamiseks. Enamjaolt varustatud konveieri või tõstetava tööalusega. [2] [3]



Joonis 1.4 Ühiklaadung AGV [7]

1.1.3 Automaatjuhtimisega sõiduki eelised [8]



- Tööjõukulude vähenemine – AGV sõidukid suudavad töötada 24/7 ning teha mitme inimese töö. Saab inimesed suunata produktiivsema töö peale
- Suurem produktiivsus – AGV süsteemid on väga täpsed ning nii jõuab õige kaup õigel ajal soovitud kohta
- Väheneb üldised kulud – Ladudes võivad sõidukid töötada iseseisvalt ning kasvõi pimedas, samuti ei soovi nad väga palju sooja.
- Paindlik süsteem – AGV süsteemile annab lisada ja eemaldada sõidukeid väga lihtsalt, samuti on tehase muudatustega kohaldumine lihtne
- Väiksemad kahjud – AGV süsteemid on väga täpsed ning enne kokkupõrget nad jäävad seisma, manuaalselt juhitud kahveltõstukiga on millelegi otsa sõitmise oht suur
- Rasketes oludes töötamine – külmladudes ja kuumades oludes materjalide transport

1.2 Olemasolevad süsteemid

Olemasolevate süsteemide leidmisel lähtuti teadaolevatest parameetritest, millega TalTechi arenduses olev süsteem peaks tööle hakkama. Erinevaid süsteeme otsiti väiksemate ja keskmiste suurustega automaatjuhtimisega sõidukite ja autonoomsete mobiilsete robotite seast. Esmalt otsiti tootjate seast erinevaid lahendusi ning seejärel uuriti erinevaid patente.

1.2.1 Erinevad tootjad

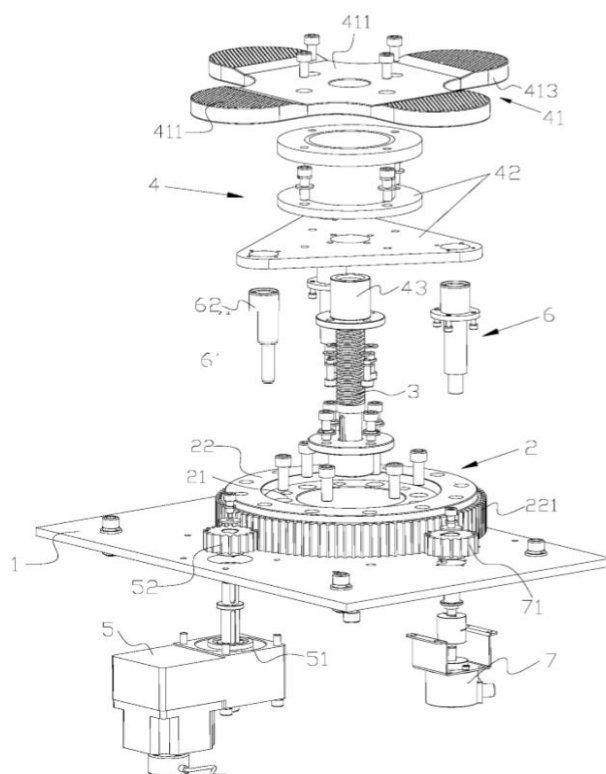
Tabel 1.1 Erinevate tootjate AGV süsteemid

Toode	Omadus	Mõõtmed (PxLxK)	Kandevõime	Liikumismehhanism	Liikumiskiirus	Tõstmehhanism
<p><i>Amazon Robotics (Kiva Systems)</i></p>  <p>Joonis 1.5 Amazon Robotics logistikarobot [9] [10]</p>		760 x 640 x 410 mm	435 kg	2 DC mootorit	1,3 m/s	Kruvimeetod Kuni 5 cm, Sõiduk pöörleb ümbes oma telje
<p><i>Geek+ M100</i></p>  <p>Joonis 1.6 Geek+ M100 [4]</p>		700 x 500 x 210 mm	200 kg	Kahe rattaline diferentsiaalne vedu	1,5 m/s	-
<p><i>Shenzhen Wellwit Robotics W500</i></p>  <p>Joonis 1.7 Shenzhen Wellwit Robotics W500 [11]</p>		860 x 680 x 285 mm	500 kg	Servomootor, kahe-rattaline diferentsiaalne vedu	1,5 m/s	Horisontaalne lineaarajam, tõstekõrgus 40 mm
<p><i>Scallog Boby</i></p>  <p>Joonis 1.8 Scallog Boby [12]</p>		1000 x 650 x 450 mm	600 kg		1,5 m/s	Käärmehhanism

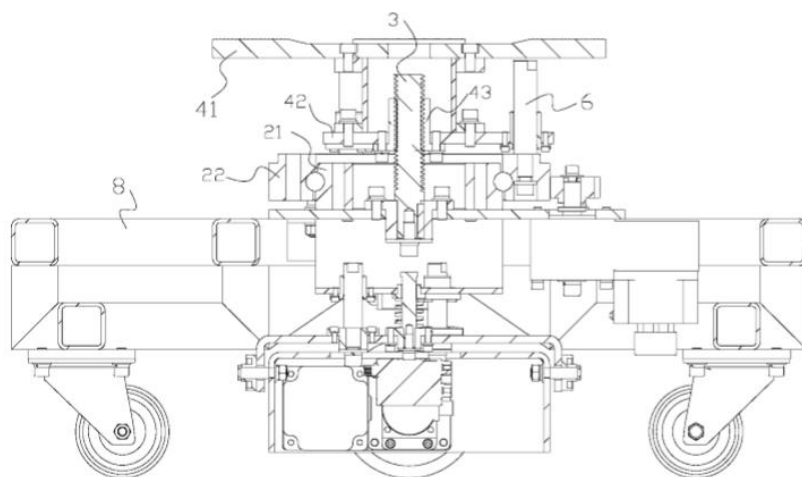
1.2.2 Patenteeritud lahendused

1.2.2.1 Kruvimeetod

CN205855908U patent kuulub ettevõttele *Guangdong Jaten Robot & Automation Co Ltd.* Ettevõttele on mitmeid erinevaid AVG roboteid ning antud patent hõlmab endas kruvimehhanismiga tõstmist. Mehhanism toimib jõukruvi meetodil ning roboti kere (vt Joonis 1.10 pos 8) pöörleb tõstemehhanismiga (vt Joonis 1.9 pos 4) vastastikus suunas, kuid sama kiirusega, mille tulemusel muutub pöördliikumine kruvimehhanismi abil vertikaalseks tõstmiseks või langetamiseks. Vastastikune liikumine kahe keha vahel saavutatakse DC mootori abil (vt Joonis 1.9 pos 5). [13]



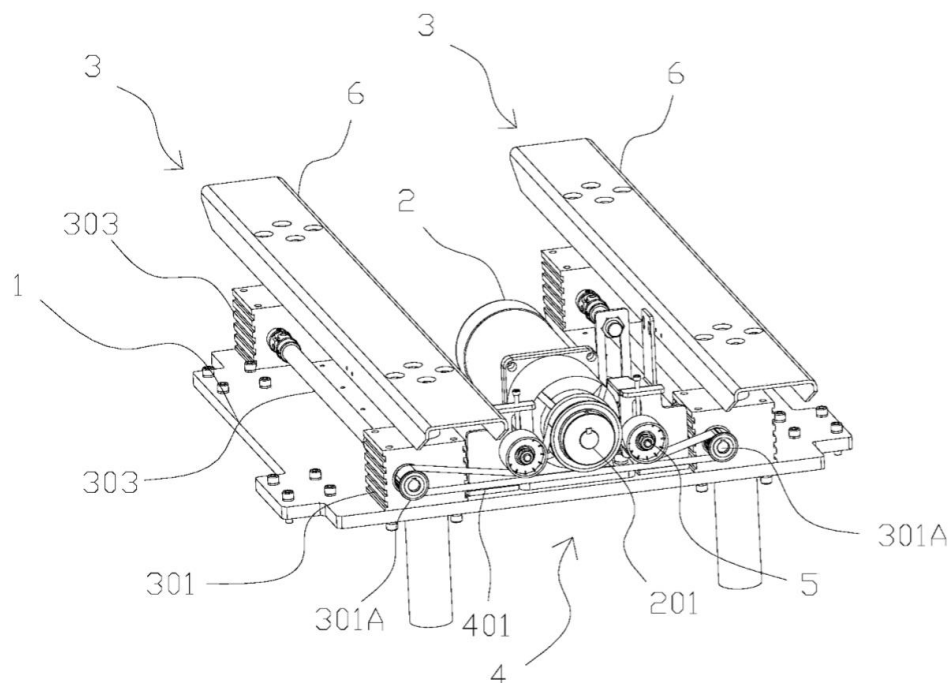
Joonis 1.9 Pöörlev tõstemehhanism [13]



Joonis 1.10 Roboti tõstemehhanismi lõige [13]

1.2.2.2 Tungraua meetod

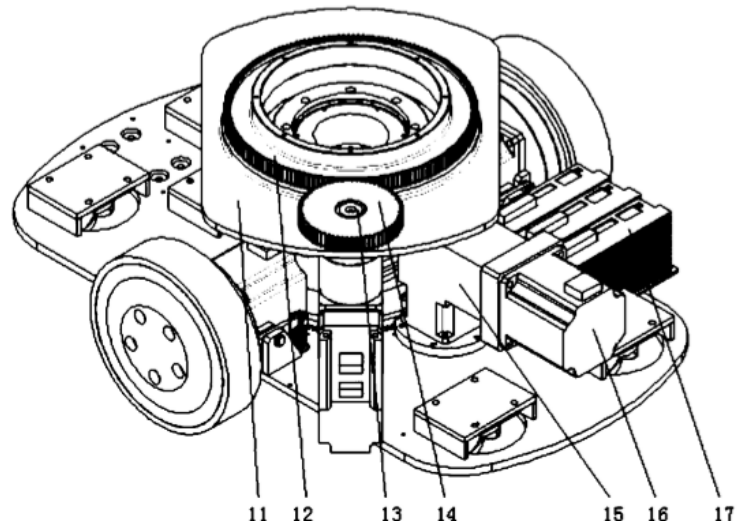
Sarnaselt eelmisele, kuulub CN205709673U patent ettevõttele *Guangdong Jaten Robot & Automation Co Ltd*. See patent põhineb tungraua meetodil tõstmisele. Mehhanism koosneb mootorist, rihmülekandest (vt Joonis 1.11 pos 2) ning kahest tõstemoodulist (vt Joonis 1.11 pos 3). Tõstemoodul omakorda koosneb kahest tungraua mehhanismist ning neid ühendavast vardast. Varras tagab kahe mooduli omavahelise sünkroonse liikumise. Tõstemoodulit ajab ringi rihmülekanne, ning see on ühenduses mõlema mooduliga, mis tagab sünkroonse liikumise. Rihmale on lisatud pingutuse jaoks rihmarattad, et vähendada rihma libisemist. Mootorist tulev pöörliikumine kantakse rihmaga üle tõstemoodulites ning seal muutub pöördliikumine vertikaalseks tõstmiseks või langetamiseks. Vertikaalse liikumise suuna määrab ära mootori pöörlemise suund. [14]



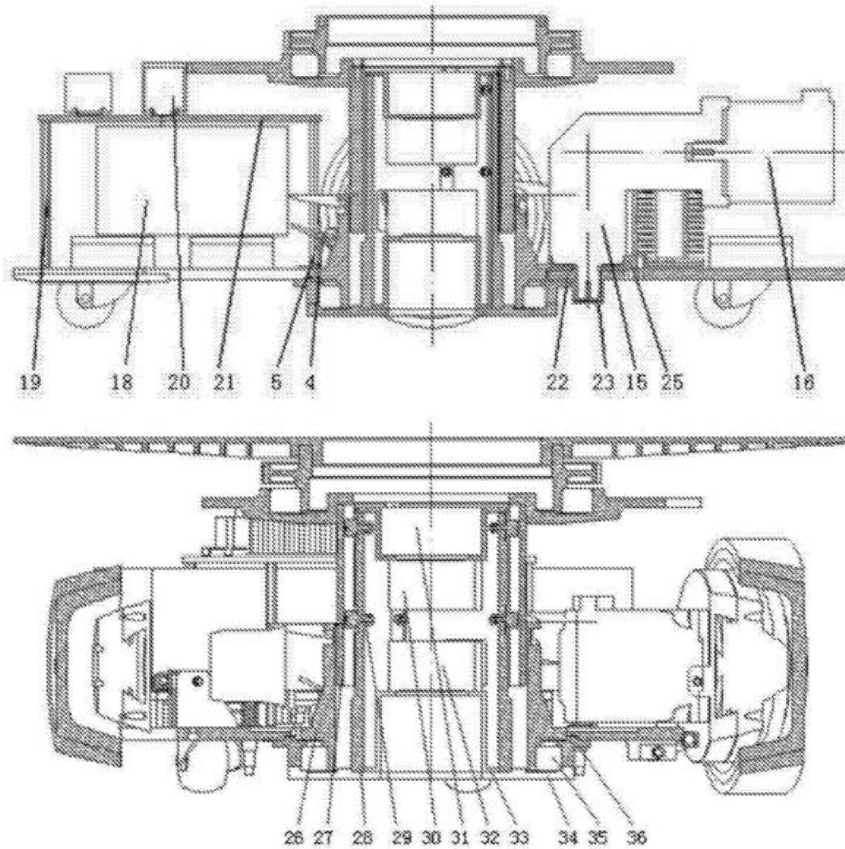
Joonis 1.11 Tungraua tõstemehhanism [14]

1.2.2.3 Kuulkruvi meetod

Hiinas väljatöötatud lahendus, mille tõstesüsteem toimib kruvimeetodil. Patent CN208559595U kuulub ettevõttele nimega *Huzhou Jiuzhou Yuncang Technology Development Co., Ltd*. Antud patendiga on tegemist kuulkruvi meetodiga. Mootorist tulev liikumine kantakse üle Joonis 1.13 pos 26 detaili pöörlemiseks. Selle tulemusel tahab pöörlema hakata ka detail 27. Tõstemehhanism koosneb fikseeritud sisemisest ning liikuvast välimisest silindrist ning nende vahel olevatest kuulidest ning kuulid on need, mis aitavad juhtida välimist silindrit vertikaalsele liikumisele ning takistab välimise silindri pöörlemist. [15]



Joonis 1.12 Tõstemehhanism [15]

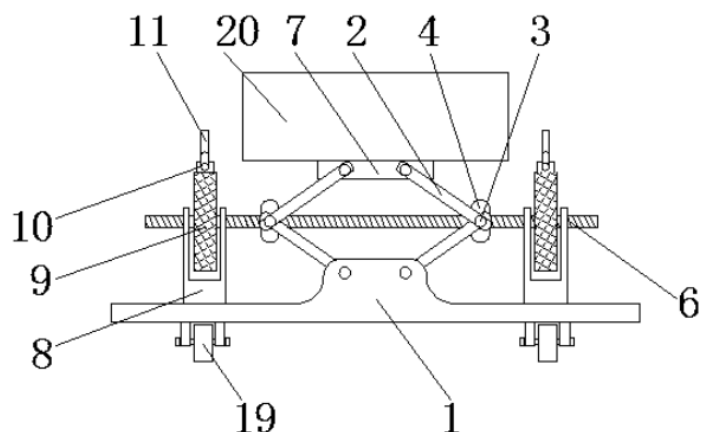


Joonis 1.13 Tõstemehhanism [15]

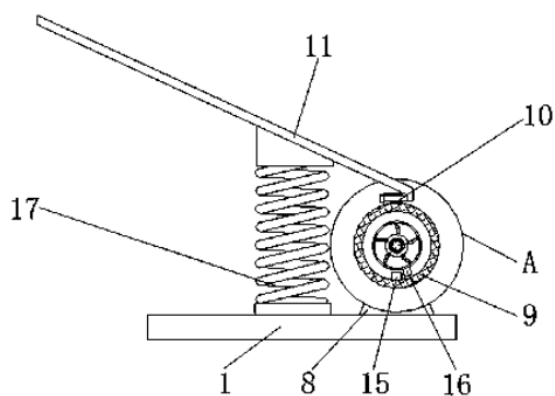
1.2.2.4 Trapets-tungraud meetod

Hiinas välja töötatud lahendus, kus on kasutusel tungraua põhimõte. Patent CN208500212U kuulub *University Dongguan Technology* ülikoolile. Lahendus toimib nagu autode lisavarustuses olevad tungrauad. Pöörates kruvivarrast detail 6, siis

trapetsi moodustavad detailid 3 liiguvad üksteise suhtes kokku või lahku. Selle tulemusel mehhanism tõstab või langetab tõstealust. [16]



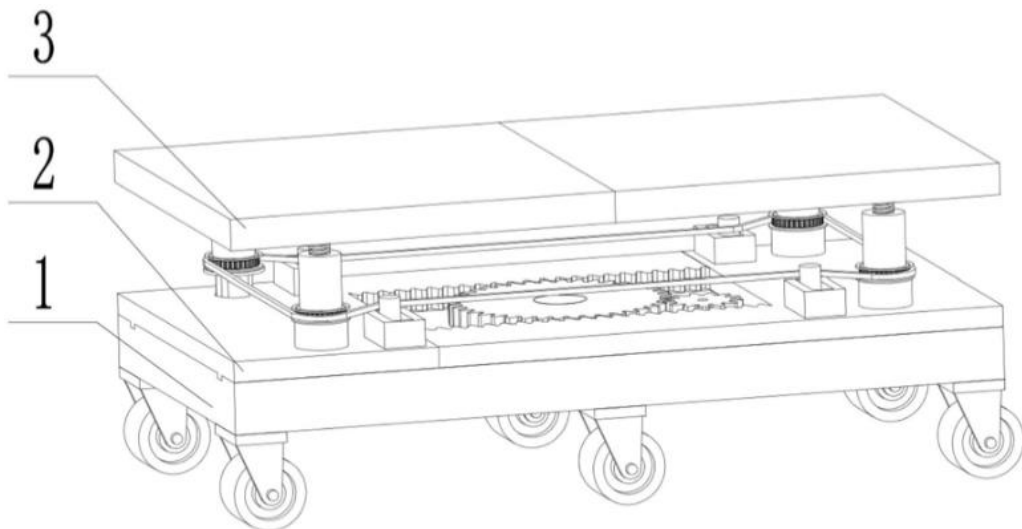
Joonis 1.14 Tungraua tõstemehhanismi eestvaade [16]



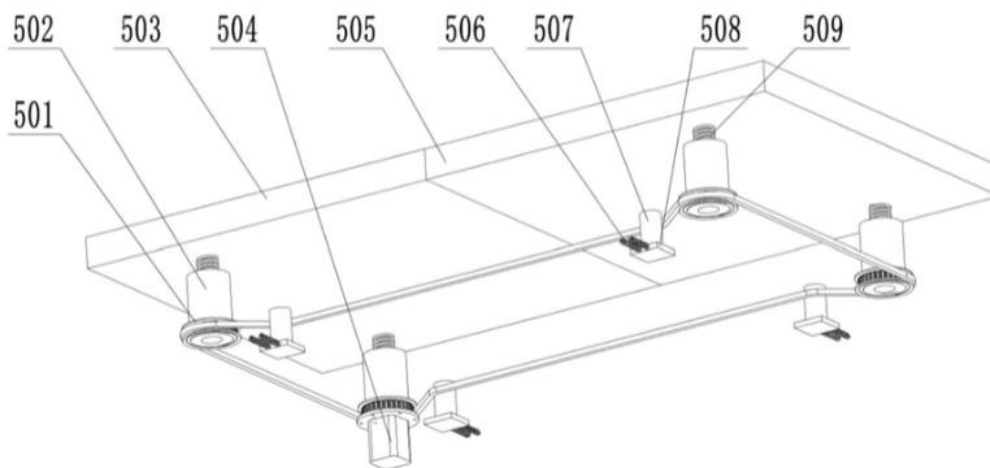
Joonis 1.15 Tungraua tõstemehhanismi külgsaade [16]

1.2.2.5 Rihmülekanedega sünkroniseeritud kruvimeetod

Järgmine hiina ülikoolile kuuluv patent CN110526167A. Seekord on tegemist *University Zhejiang Technology* kooliga ning nende väljatöötatud lahendus hõlmab lisaks tõstmisele ka pikendatavat kere lahendust. Tõstmine toimub kruvimehhanismi abil. Jõukruvid on tõsteplaadi neljas nurgas ning nende sünkroniseeritud liikumine on tagatud rihmülekanedega. Ühes nurgas on mootor otse ühendatud keerrestatud puksiga ning ülejäänud kolm nurka on kaasaveetavad kruvirakendused. Rihma pingsus on tagatud automaatsete pingutitega, et kere pikkuse muutumisest sõltumatult oleks rihm pingestatud igal momendil. AGV kere pikenedamine on tagatud Joonis 1.16 positsioon 2 detailidega, mis on L-kujulised ning hammastatud servadega. Hammasratta pöörlemisel liiguvad plaadid teineteise suhtes vastastikusel suunas ning toimub seadme pikenedamine või lühenemine. [17]



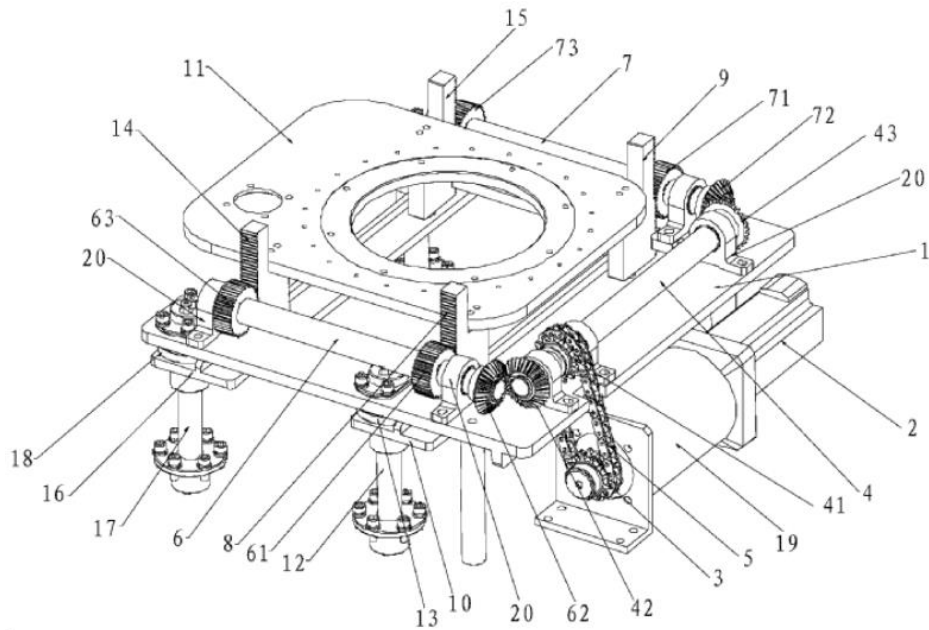
Joonis 1.16 Pikendatava kerega tõstemehhanism [17]



Joonis 1.17 Tõstemehhanismi ülevaade [17]

1.2.2.6 Hammasrataste ja -lattide meetod

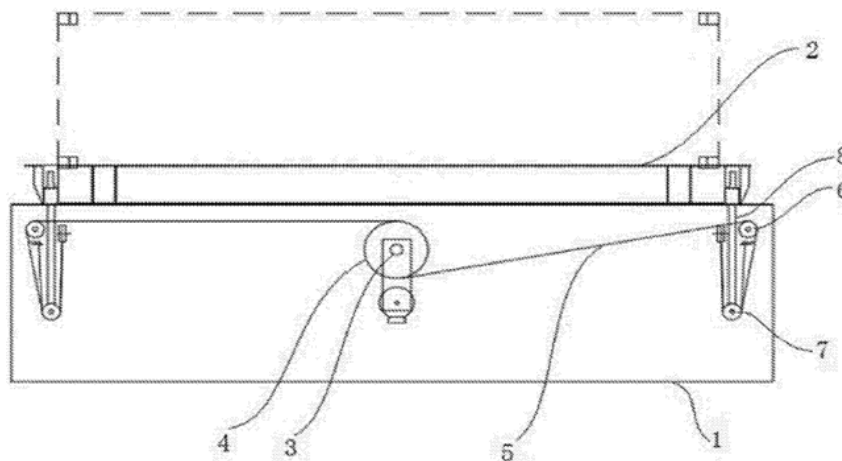
Guangdong Fitkits Tech Co Ltd poolt väljatöötatud lahendus CN208327265U, mis baseerub hammasrataste ja -lattide põhimõttel. Lahenduse puhul kantakse mootori võlli pöördumine üle ülekandekastile, millest omakorda kantakse pöördeline liikumine kettülekanne abil võllile, mille mõlemas otsas on koonushammasratas. Selle võlli otstes on risti teised võllid millele liikumine üle kandub ning millede küljes on kaks sirget hammasratast. Need on omakorda ühenduses hammaslattidega, mis on ühendatud tõsteplatvormiga ning mille tulemusel muundub mootorist ülekantud pöördliikumine lineaarseks liikumiseks. [18]



Joonis 1.18 Kettülekanega ning hammasratastega tõstemehhanism [18]

1.2.2.7 Liitplokk ülekande meetod

CN109095387A patenteeritud lahendus seisneb plokküsteemi kasutamises. Nimelt koosneb süsteem neljast plokküsteemist, mis tõstavad või langetavad tugivardaid sünkroonselt. Plokküsteem koosneb fikseeritud ning liikuvatest plokiratastest. Plokirattaid läbib 4 trossi, mis on ühendatud kõik keskele võllile. Võlli paneb pöörlema elektrimootor ning selle tulemusena platvormi tõstetakse või langetatakse. Lisaks on tugivardad hammastatud ning süsteemile on lisatud turvalisuse huvides lukustusmehhanism. Ülesse tõstmise puhul libiseb lukustus üle hammaste. Trossi purunemise korral jääb tugivardad lukustatud positsiooni ning see väldib tahtmatu tõsteplatvormi langemise. Kui tõsteplatvormi soovitakse langetada, siis juhtkontroller vabastab lukustusmehhanismi ning platvorm saab vabalt langeda. [19]



Joonis 1.19 Plokkidega tõstemehhanism [19]

1.3 Olemasolevate süsteemide võrdlus

Tabel 1.2 Olemasolevate süsteemide võrdlus

Meetod	Eelised	Puudused
Kruvimeetod	<ul style="list-style-type: none"> • Pikkuse ja laiuse suunas kompaktne • Kruvi tagab hea jõuülekanne • Kruvimehhanism on olemuselt odav • Ei ole vaja sünkroniseerimist 	<ul style="list-style-type: none"> • Süsteem on kõrge ehitusega • Raskuskese soovituslikult asetseb keskel • Tõstmiseks vajalik terve seadme pöörlemine ümber oma telje
Tungraua meetod	<ul style="list-style-type: none"> • Võimalik suur koormus • Lihtne disain • Võimalik suur tõstmiskõrgus 	<ul style="list-style-type: none"> • 2 poole omavaheline sünkroniseerimine
Kuulkrui meetod	<ul style="list-style-type: none"> • Väike hõõrdetegur • Võimalik suur jõuülekanne • Ei vaja kere pöörlemist ümber oma telje 	<ul style="list-style-type: none"> • Laagrid vajavad mäaret • Keeruline disain
Trapets-tungraud meetod	<ul style="list-style-type: none"> • Võimalik suur koormus • Lihtne konstruktsioon • Võimalik suur tõstmiskõrgus 	<ul style="list-style-type: none"> • Vajalik kahe poole omavaheline sünkroniseerimine
Rihmülekandega sünkroniseeritud kruvimeetod	<ul style="list-style-type: none"> • Lihtne konstruktsioon • Madala ehitusega • Kruvi- ja rihmmehhanismi odavus 	<ul style="list-style-type: none"> • Vajalik 4 nurga üheaegne tõõtmine • Rihma tõttu väike jõuülekanne
Hammasrataste ja -lattide meetod	<ul style="list-style-type: none"> • Võimalik suur koormus • Sünkroniseerimine on täpne 	<ul style="list-style-type: none"> • Hammasrataste ja lattide vaheline lõtk • Vaja mitut hammaslatti ja -ratast
Liitplokk ülekanne meetod	<ul style="list-style-type: none"> • Võimalik liigutada suurt koormust väikese jõuga • Lihtne konstruktsioon 	<ul style="list-style-type: none"> • Palju komponente • Plokielementide lisades pikeneb ka trossi liikumistee

Võrdlustabelist võime järeldada, et kruvimeetodil toimivad süsteemid on kompaktsed ning nad on oma olemuse poolest võrdlemisi odavad. Olemasolevates süsteemides olevaid kruvimeetodeid annaks mõneti lihtsustada ning selle tulemusel annaks nende puudused kõrvaldada ja saavutada hea tulemus.

Tungraua meetodite puhul on nende eeliseks saavutatav suur tõstekõrgus, kuid arenduses olevale robotile ei ole see määrav ning seetõttu ei ole ka suureks eeliseks.

Hammasrataste ja - lattide ning liitplokk ülekanne meetodite puhul on eeliseks suur saavutatav tõstevõime, kuid see nõuab ka palju komponente. Selle tulemusel ei ole tegu kompaksete lahendustega.

2. TÕSTE- JA VEOMEHCHANISMI PROJEKTEERIMINE

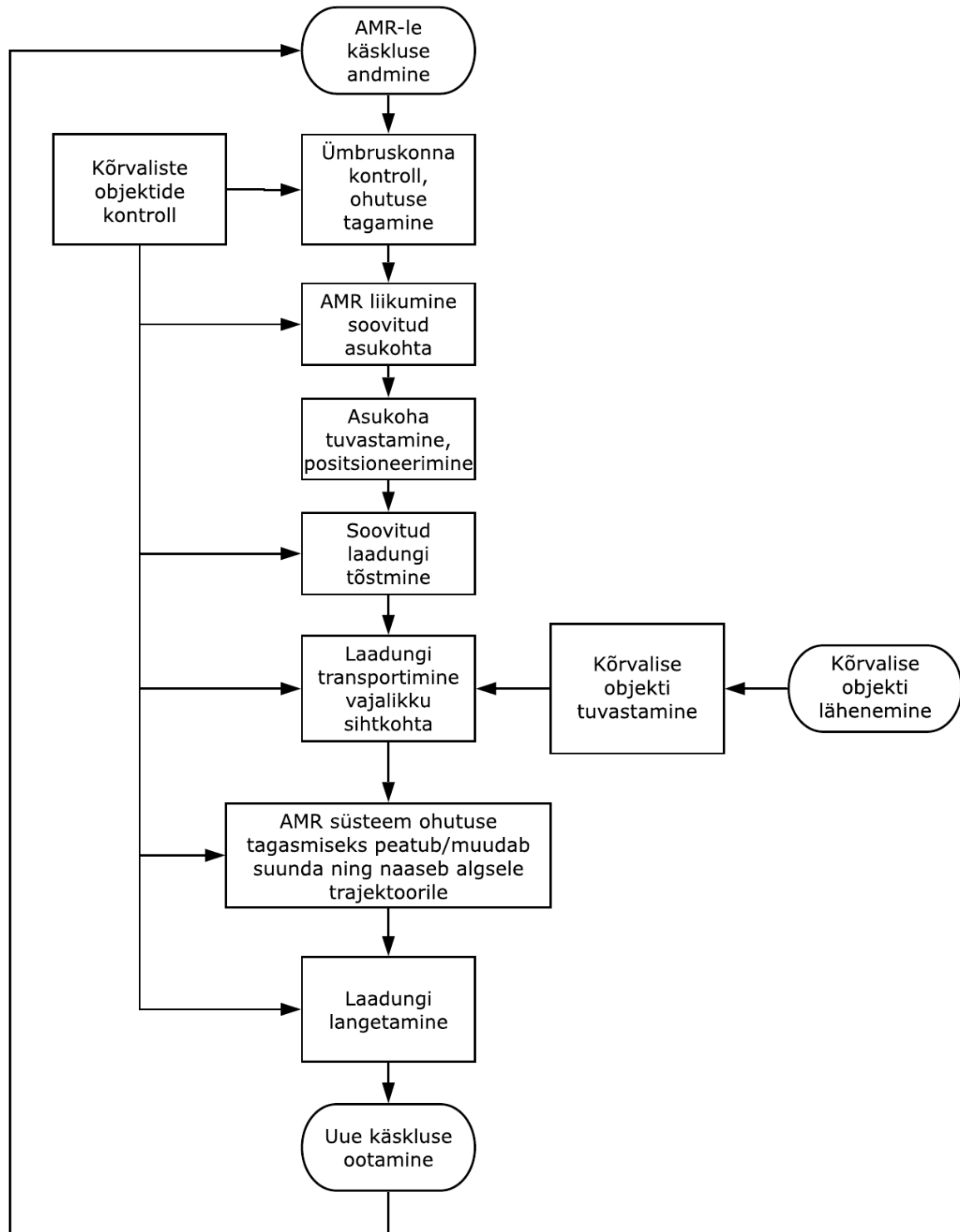
2.1 Süsteemi parameetrid

Tabel 2.1 Nõuete loetelu

Spetsifikatsioon		Projekt: AGV seadme projekteerimine	Fikseeritud nõue	Soovituslik nõue
	Leht 1/1			
1. Funktsioon				
B2 ja B4 tüüpi kastide transport			X	
Kasti raamide tõstmine			X	
Autonoomne liikumine punktist A punkti B			X	
Operaatori poolt juhitud liikumine			X	
Päevas liigub keskmiselt 5000 B2 kasti			X	
2. Tehnilise protsessi tingimused				
a) Mõõtmed				
Laius: 500 mm			X	
Pikkus: 600...650 mm			X	
Kõrgus 300 mm			X	
Tõstekõrgus: < 30 mm			X	
b) Tugevus				
Tõstevõime: 100 kg			X	
Kandevõime: 100 kg			X	
c) Muud nõuded			X	
Pöörderaadius: 0°				X
Liikumissuund: 360°				X
Liikumiskiirus: 1,5...2 m/s			X	
Akutoide: 24V			X	
Tööaeg: kuni 6h			X	
Hädastopp lüliti			X	
Töötajate ohutuse tagamine/kokkupõrke tuvastamine			X	
3. Keskkond				
Sisetingimused			X	
Kuiv			X	
4. Käsitlemine				
Vastupidav			X	
Vähene hooldus				X
Kerge ja kompaktn				X
Sujuv kiirendus			X	

2.2 Funktsiooni struktuur

Funktsioonistruktuuris tuuakse välja kaardistamiseks roboti funktsioonid koos alamfunktsioonidega. See on oluline, et vältida mõne probleemi tekkimist ja tegevuse projekteerimisprotsessist välja jäämist. Funktsiooni struktuuri järgi genereeritakse morfoloogiline maatriks.



Joonis 2.1 Funktsiooni struktuur

2.3 Morfoloogiline maatriks

Morfoloogiline maatriksi eesmärk on leida funktsioonistruktuurist saadud funktsioonidele nende kandjad. Projekteeritava roboti sõlmedele leitakse erinevad lahendused ning need võetakse aluseks hindamisskeemi loomisel.

Tabel 2.2 Morfoloogiline maatriks

Osafunktsioon		Lahendused			
1.	Liikumine	Ühesuunaline	Kahesuunaline	Diferentsiaalne	Holonoomiline
2.	AMRi vedav mehhanism	<i>Mecanum</i> rattad 	Lihtsad rattad 	Roomikud 	Omni rattad 
3.	AMRi vedav jõuülekanne	Hüdrauliline	Elektrimootor	Kett	Rihm
4.	Kaasaliikuvad rattad	Pöörlevad rattad 	Fikseeritud rattad 	Omni rattad 	Kuul rattad 
5.	Kere materjal	Teras	Puit	Plastik	Alumiinium
		Roostevaba	Süsinikkomposiit		
6.	Konstruksiooni materjal	Teras	Alumiinium	Plastik	Puit
		Roostevaba	Süsinikkomposiit		
7.	Tõstemehhanism	Kruvimeetod	Tungraua meetod	Käärmehhanism	Trapets-tungraua meetod
		Hammasrattad ja hammaslatid	Liitplokkide süsteem		
8.	Jõu ülekanne	Elektrimootor	Hüdrauliline	Kett	Pneumaatiline
		Tross	Hammasrattad		
9.	Navigeerimine	Laser	Referentspunktidega	Magnetriba	Ruudustik
		Naturaalne	Juhtmega	Optiline	
10.	Ohutus	Helisignaali	Avariilüliti	Optilised sensorid	Mehaanilised sensorid
		Laser sensorid	Kombineeritud		

2.4 Lahendusvariandid

Morfoloogilisest skeemist tulenevalt leian 4 erinevat lahendusvarianti. Eesmärk on leida kõige sobilikum ja optimaalsem lahendus antud ülesande jaoks. Kuna soovitud on luua AMR tüüpi robot, siis navigeerimise osafunktsioon on valitud kõikidel mehhanismidel „naturaalne“. Samuti on avariilüliti kõikidel seadmetel kohustuslik, seega on see kõikidele konfiguratsioonidele lisatud.

2.4.1 Lahendus I

- | | |
|------------------------------|--|
| 1. Liikumine: | Ühesuunaline |
| 2. AMRi vedav mehhanism: | Lihtsad rattad |
| 3. AMRi vedav jõuülekanne: | Hüdrauliline |
| 4. Kaasaliikuvad rattad: | Fikseeritud rattad |
| 5. Kere materjal: | Alumiinium |
| 6. Konstruktsiooni materjal: | Alumiinium |
| 7. Tõstemehhanism: | Käärmehhanism |
| 8. Jõu ülekanne: | Hüdrauliline |
| 9. Navigeerimine: | Naturaalne |
| 10. Ohutus: | Avariilüliti + helisignaal + mehaanilised sensorid |

Roboti liikumine on lahendatud ühesuunaliselt. Seda aitavad tagada tavalised lihtsad rattad, millele on lisatud pööramise funktsioon. Robotile on lisatud hüdraulika ning selle abil toimivad veo- ja tõstemehhanismi jõuülekanded. Roboti konstruktsiooni ja kere materjalidena on kasutusel alumiinium. Tõstmine toimub käärmehhanismi abil. Ohutuse tagamisele aitavad kaasa helisignaalid ja mehaanilised sensorid, mis tuvastavad kokkupõrke objektidega. Mehaanilised sensorid on efektiivsed madalatel kiirustel.

2.4.2 Lahendus II

1. Liikumine: Holonoomiline
2. AMRi vedav mehhanism: *Mecanum* rattad
3. AMRi vedav jõuülekanne: Elektrimootor
4. Kaasaliikuvad rattad: -
5. Kere materjal: Plastik
6. Konstruktsiooni materjal: Teras
7. Tõstemehhanism: Kruvimeetod
8. Jõu ülekanne: Elektrimootor
9. Navigeerimine: Naturaalne
10. Ohutus: Avariilüliti + optilised sensorid + laser sensorid

Robot liigub holonoomiliselt, see tähendab, et see on võimeline liikuma vabalt igas suunas. Selle liikumise tagavad *Mecanum* rattad, mis on robotile ühendatud paremakäelise ja vasakukäelise ratta paaridena. Rattaid ajab ringi elektrimootor ning lisa rattaid vaja ei ole. Konstruktsioon on valmistatud jäikuse huvides terasest ning roboti kere kerguse huvides plastikust. Tõstmine on lahendatud kruvimeetodi abil, mis on ühenduses elektrimootoriga. Lisaks avariilülitile on kasutusel optilised ja laser sensorid.

2.4.3 Lahendus III

1. Liikumine: Diferentsiaalne
2. AMRi vedav mehhanism: Lihtsad rattad
3. AMRi vedav jõuülekanne: Elektrimootor
4. Kaasaliikuvad rattad: Omni rattad
5. Kere materjal: Teras
6. Konstruktsiooni materjal: Süsinikkomposiit

- | | |
|--------------------|---|
| 7. Tõstemehhanism: | Hammasrattad ja hammaslatid |
| 8. Jõu ülekanne: | Elektrimootor |
| 9. Navigeerimine: | Naturaalne |
| 10. Ohutus: | Avariilüliti + helisignaal + optilised sensorid |

Roboti liikumine on teostatud diferentsiaalse veoga. Kahte vedavat rattast panevad liikuma elektrimootorid. Vedavad rattad asuvad keskel ning see lubab robotile pöörata ümber oma telje. Et vähendada vabalt liikuvate rataste külgsuunalist takistust pöörlemisel on kasutusel omni rattad. Konstruktsioon on valmistatud terasest ning kere süsinikkomposiidist. Tõstemehhanismis on kasutusel elektrimootoriga juhitud hammasrattad, mis liigutavad hammaslatte. Ohutuse tagamiseks kasutatakse optilisi sensoreid.

2.4.4 Lahendus IV

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Liikumine: | Kahesuunaline |
| 2. AMRi vedav mehhanism: | Roomikud |
| 3. AMRi vedav jõuülekanne: | Rihm |
| 4. Kaasaliikuvad rattad: | - |
| 5. Kere materjal: | Puit |
| 6. Konstruktsiooni materjal: | Plastik |
| 7. Tõstemehhanism: | Liitplokk |
| 8. Jõu ülekanne: | Tross |
| 9. Navigeerimine: | Naturaalne |
| 10. Ohutus: | Avariilüliti + optilised sensorid |

Viimase lahenduse puhul on robotil liigutamiseks kasutusel roomikud. Roboti konstruktsioonis on kasutusel puit ja keredetailid on valmistatud plastikust. Tõstmisel on kasutusel liitplokk süsteem ja turvalisus tagatud optiliste sensoritega.

2.5 Hindamismatriks

Eelmises peatükis väljamõeldud lahendused hinnatakse hindamismatriksi abil. Hindamismatriks sisaldab erinevaid omadusi, mis on lõpplahenduse jaoks olulised ning nendele on antud erinev kaal, mis kujutab omaduse tähtsust. Igat lahendust hinnatakse omaduse põhjal skaalal 1 – 5. Suurima skoori saanud lahendusega jätkatakse tööd ning alustatakse lõpplahenduse projekteerimist.

Tabel 2.3 Hindamismatriks

Omadus:	Kaal:	Lahendus I	Lahendus II	Lahendus III	Lahendus IV
Töökindlus	0,2	$2 \times 0,2 = 0,4$	$4 \times 0,2 = 0,8$	$4 \times 0,2 = 0,8$	$2 \times 0,2 = 0,4$
Teostatavuse kergus	0,2	$4 \times 0,2 = 0,8$	$3 \times 0,2 = 0,6$	$3 \times 0,2 = 0,6$	$4 \times 0,2 = 0,8$
Ohutus	0,2	$2 \times 0,2 = 0,4$	$5 \times 0,2 = 1,0$	$4 \times 0,2 = 0,8$	$3 \times 0,2 = 0,6$
Lihtsasti manööverdav	0,2	$2 \times 0,2 = 0,4$	$5 \times 0,2 = 1,0$	$4 \times 0,2 = 0,8$	$3 \times 0,2 = 0,6$
Maksumus	0,1	$4 \times 0,1 = 0,4$	$2 \times 0,1 = 0,2$	$1 \times 0,1 = 0,1$	$4 \times 0,1 = 0,4$
Vähene hooldus	0,1	$2 \times 0,1 = 0,2$	$3 \times 0,1 = 0,3$	$3 \times 0,1 = 0,3$	$4 \times 0,1 = 0,4$
Summa:	1	2,6	3,9	3,4	3,2

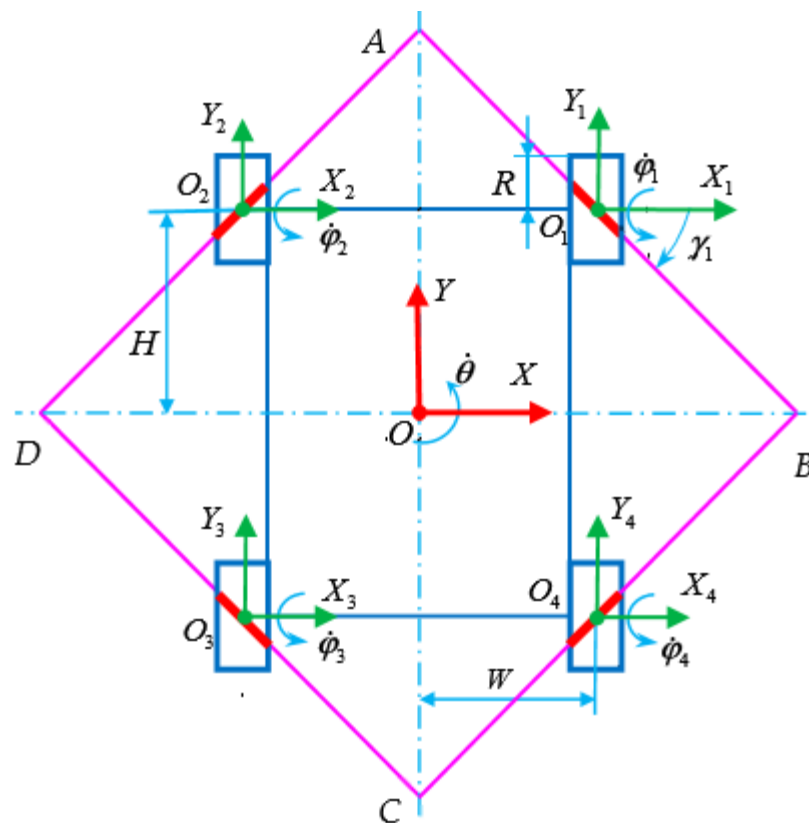
Hindamismatriksi tulemuste põhjal võime öelda, et parimaks osutus teine lahendusvariant. Peamiseks eeliseks teiste lahendusvariantide ees on töökindlus ning holonoomilise liikumise tõttu tagatud lihtsasti manööverdatav liikumine. Lahenduse puuduseks on selle kõrgem hind, kuna igale rattale on vaja eraldi vedavat ajamit.

Lähtudes saadud tulemusest jätkame tööd teise lahendusvariandiga ning leiame järgmises peatükis lahendusele sobivad komponendid.

3. KOMPONENTIDE VALIK

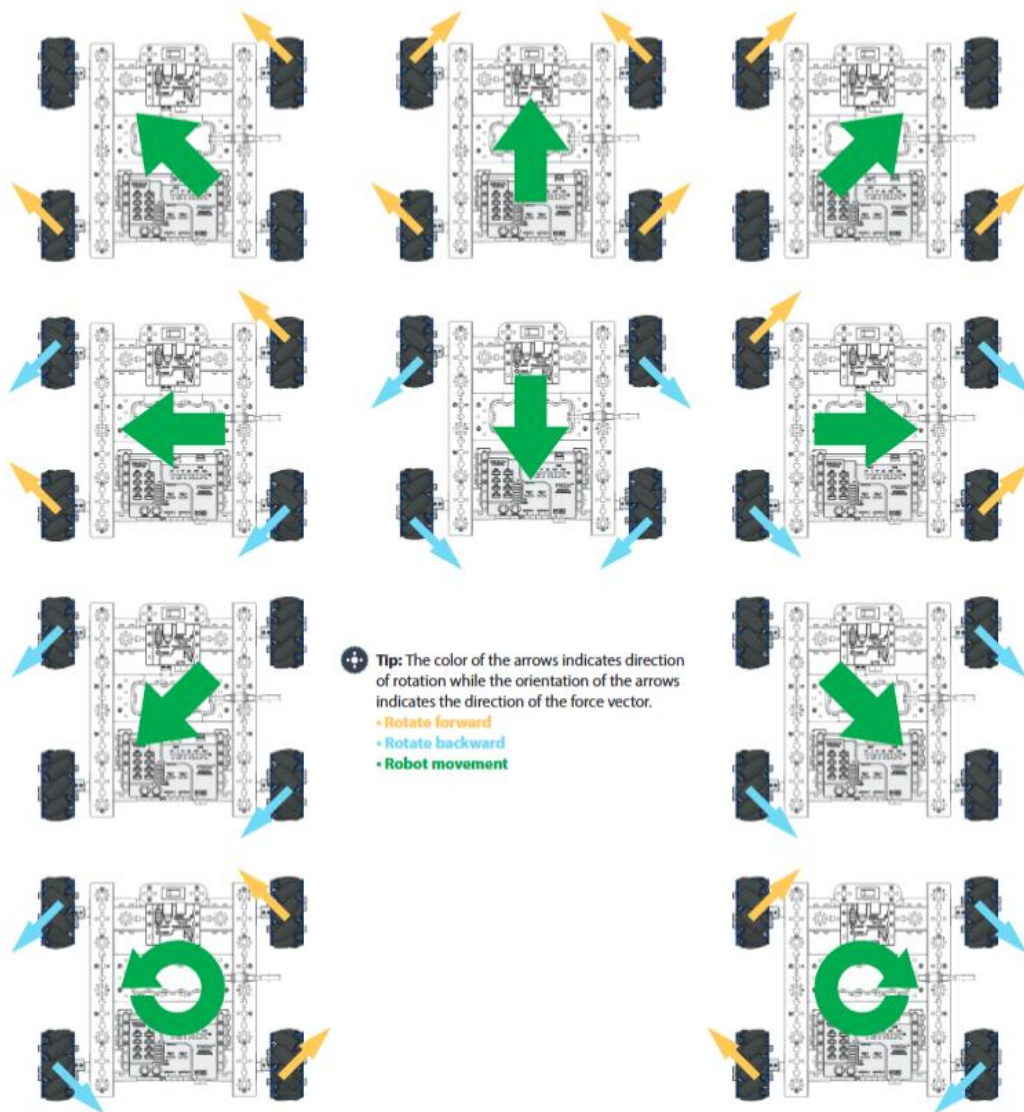
3.1 Rataste valik

Roboti holonoomilise liikumise tagamiseks on valitud *Mecanum* rattad, mis tagavad vabaduse liikuda kõikides suundades ning pöörelda ümber oma telje. Ratta kontseptsiooni taga on rootslane Bengt Erland Ilon töötades *Mecanum AB* ettevõttes. Ratas koosneb perimeetril olevatest rullikutest. Need on asetatud 45° kraadise nurga alla ratta telje suhtes. Nelja *Mecanum* ratta kombineerimisel saadaksegi tulemus, kus iga ratta kiiruse ja pöörlemissuuna reguleerimise tulemusel saadakse holonoomiline sõiduk. Komplekteerimisel tuleb tähelepanu pöörata sellele, et sama käelisusega rattad asetseksid roboti suhtes diagonaalselt. [20]



Joonis 3.1 *Mecanum* ratastega sõiduki liikumisvektorid [21]

Roboti liikumiseks on mitmeid eri mooduseid. Lihtsale edasi-tagasi ja pööramise funktsioonidele on võimalik liikuda diagonaalselt ja küljelt-küljele. Lisaks on võimalus pöörata ümber oma telje 0° pöörderaadiusega, mis teeb kitsastes oludes manööverdamise väga lihtsaks. Täpsemad võimalikud liikumised on näha alloleval joonisel (Joonis 3.2). [22]



Joonis 3.2 Mecanum ratastega roboti liikumisvõimalused [22]

Sobilikuks osutus Nexus Industry valmistatavad viie tollised rattad. Seda seetõttu, et komplekti lubatud koormus on 200 kg, mis on sobilik arenduses oleva robotiga. [23]



Joonis 3.3 Viie tolliste Mecanum rataste komplekt

3.2 Vedav jõuülekanne

Vedavaks jõuülekaneks on valitud elektrimootor. Kuna tegemist on akutoitelt töötava robotiga, siis on mõistlik kasutada sellisel juhul alalisvoolu (DC - *Direct Current*) mootoreid. Selle jaoks on vaja teostada arvutused ja leida orientiiriks parameetrid, milledega robot igapäevaselt kokku hakkab puutuma. Mootorite valiku tähtsaimad parameetrid on: pöörlemiskiirus, väändemoment ja võimus. Nende kolme parameetri järgi toimub mootori täpsem valik. Kuna täpsem spetsifikatsioon puudub, siis mõned andmed on võetud esialgu hinnanguliselt.

Andmed:

Roboti täismass: $m = 200 \text{ kg}$

Vedavate rataste arv: $n = 4 \text{ tk}$

Roboti kiirus: $v = 1,5 \text{ m/s} = 90 \text{ m/min}$

Kiiruse saavutamise aeg: $t = 5 \text{ s}$

Ratta diameeter: $d = 0,127 \text{ m}$

Ratta raadius: $r = d / 2 = 0,0635 \text{ m}$

Maksimaalne tõus: $\alpha = 10^\circ$

Ajami kasutegur: $\eta = 75 \%$

3.2.1 Ratta pöörlemissagedus

Esmalt leiame rataste pöörlemissageduse

$$v = \pi * d * n \Rightarrow n = \frac{v}{\pi * d}, \quad (3.1)$$

Kus: n – pöörlemissagedus, rpm (1/min)

Tähele tuleb panna, et mõõdud oleks SI süsteemis.

$$n = \frac{90}{\pi * 0,127} = 225,7 \text{ rpm}$$

3.2.2 Robotile avalduvad jõud [24]

Eeldame, et robot töötab enamuse ajast horisontaalselt sirgel tasapinnal ning 10 % ajast võib ette tulla tõuse, seega leian roboti jaoks normaaltingimustes vajaminevad jõud ning äärmuslikel tingimustel jõud, kus robot peab tõusust ülesse kiirendama. Kuna roboti kiirus on piisavalt väike, siis õhu poolt tekitatav takistusjõud on märkimisväärselt väike ning seda ei arvesta.

3.2.2.1 Kiirendav jõud

Keha kiirendamiseks vajaminev jõud.

$$F_A = m * a, \quad (3.2)$$

Kus: F_A – kiirendav jõud, N

m – keha mass, kg

a – keha kiirendus $a = \frac{v}{t}$, m/s²

3.2.2.2 Gravitatsioonijõud

Gravitatsiooni poolt avaldatud jõud robotile.

$$F_G = m * g, \quad (3.3)$$

Kus: F_G – gravitatsioonijõud, N

g – raskuskiirendus, 9,8 m/s²

3.2.2.3 Veeretakistusjõud

Roboti liikumiseks vajaminev jõud ratta ja maapinna vahelisest veeretakistusest.

$$F_f = F_G * \mu, \quad (3.4)$$

Kus: F_f – veeretakistusjõud, N

μ – veeretakistustegur, 0,01...0,02

3.2.2.4 Roboti normaaltingimustes kogujõud

Leian roboti kogujõu ühtlasel kiirenduse horisontaalsel tasapinnal.

$$F_N = F_A + F_f, \quad (3.5)$$

Kus: F_N – Normaalne kogujõud, N

$$F_N = 200 * \frac{1,5}{5} + 200 * 9,81 * 0,015 = 89,4 \text{ N}$$

3.2.2.5 Roboti maksimaalne kogujõud

Kuna roboti liikumise teekonnal võib ette tulla ka tõuse, siis see on roboti liikumiseks raskendav tegur. Seega leian robotile vajalikud maksimaalsed parameetrid. Tõusu jaoks on vaja jagada jõud xy-telje sihilisteks komponentideks.

$$F_{max} = F_A + F_G * \sin\alpha + F_F * \cos\alpha, \quad (3.6)$$

Kus: F_{max} – maksimaalne kogujõud, N

$$F_{max} = F_A + mg(\sin\alpha + \mu * \cos\alpha) = 200 * \frac{1,5}{5} + 200 * 9,81 * (\sin 10 + 0,015 * \cos 10) = 430,9 \text{ N}$$

3.2.3 Ratta väändemoment [25]

Momendi leidmisel saame kasutada kangireegli põhimõtet, kuid kangi pikkuse asemel kasutame ratta raadiust. Kuna mootoreid tuleb iga ratta kohta üks, siis leian momendid juba üksiku ratta kohta. Lisaks ei ole mootorite ja reduktorite ülekanded 100% efektiivsed, siis arvestan juurde ka süsteemi kasuteguri

$$T_N = \frac{F_N}{n} * r * \frac{1}{\eta}, \quad (3.7)$$

Kus: T_N – Väändemoment, Nm

Leian roboti normaalseks liikumiseks vajaliku momendi

$$T_N = \frac{89,4}{4} * 0,0635 * \frac{1}{75\%} = 1,9 \text{ Nm}.$$

Järgnevaks leian roboti maksimaalse väändemomendi.

$$T_{max} = \frac{F_{max}}{n} * r * \frac{1}{\eta}, \quad (3.8)$$

Kus: T_{max} – Maksimaalne väändemoment, Nm

$$T_{max} = \frac{430,9}{4} * 0,0635 * \frac{1}{75\%} = 9,1 \text{ Nm},$$

3.2.4 Ajami vajalik võimsus

Mootorajami vajamineva võimsuse leiame järgnevalt.

$$P_N = F_N * v = T_N * \omega, \quad (3.9)$$

Kus: P_N – mootori võimsus, W

$$\omega - \text{nurkkiirus } \omega = \frac{v}{r}, \frac{1}{s}$$

$$P_N = 1,9 * \frac{1,5}{0,0635} = 44,7 \text{ W}$$

Maksimaalse vajamineva võimsuse leiame järgmise valemi abil.

$$P_{max} = F_{max} * v = T_{max} * \omega, \quad (3.10)$$

$$P_{max} = 9,1 * \frac{1,5}{0,0635} = 215,5 \text{ W}$$

Veojameid otsin järgnevate parameetrite alusel:

Pöörlemissagedus: $n = 225,7 \text{ rpm}$

Väändemoment: $T_N = 1,9 \text{ Nm}$ $T_{max} = 9,1 \text{ Nm}$,

Võimus: $P_N = 44,7 \text{ W}$ $P_{max} = 215,5 \text{ W}$

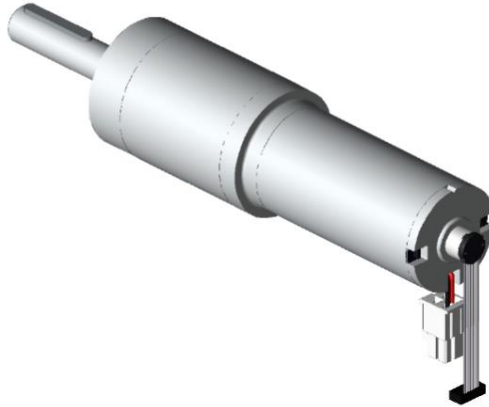
Nendele parameetritele vastava kombinatsiooni mootorist ja reduktorist leidsin *Maxon Group* tootevalikust. Konfiguraatori abil sai kokku komplekteeritud järgnev ajam:

Pöörlemissagedus: $n = 231 \text{ rpm}$

Väändemoment: $T_N = 2,93 \text{ Nm}$ $T_{max} = 9 \text{ Nm}$,

Võimus: $P_N = 70,8 \text{ W}$ $P_{max} = 207,2 \text{ W}$

Lisaks on spetsifikatsioonis välja toodud, et lühiajaliselt võib mootorit üle koormata 43 sekundit. Peatükis 3.2.2 tehtud eelduse kohaselt saame, et umbes 7 minuti jooksul võib sõidukile ette tulla ühekordne tõusu pealt kiirendamine, mis ei kesta kauem kui lühiajaline lubatud ülekoormamise kestus.



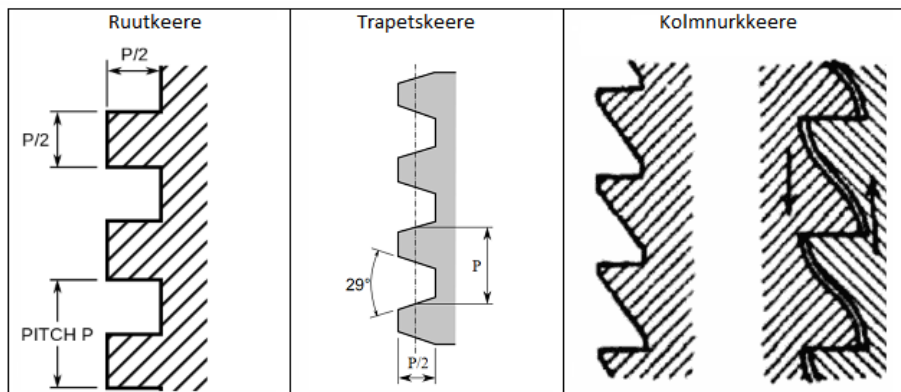
Joonis 3.4 Maxon mootor DCX GB KL 24V, reduktor GPX42UP 26:1 [26]

3.3 Tõstemehhanism

Tõstemehhanismina on mõeldud kasutada kruvimeetodil toimivat lahendust. Kruvi tööpõhimõte seisneb pöördliikumise muutmisel lineaarseks liikumiseks. Kasutusel on erinevaid meetodeid.

3.3.1 Keermestatud latt

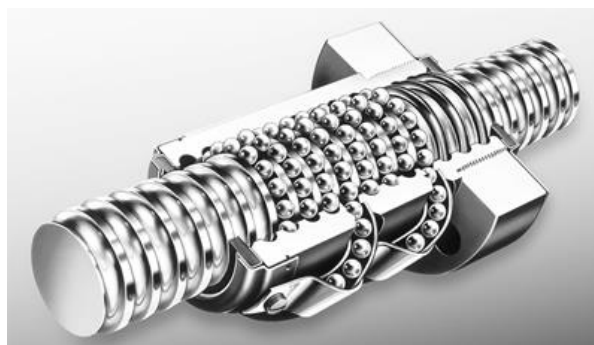
Tegu on meetodiga, mis koosneb kahes komponendist: väljast keermestatud latist ning seesmiselt keermestatud mutrist. Kui üks komponentidest on fikseeritud, ning teist pöörata, siis tekitab see lineaarse liikumise. Kasutusel on erinevate keermetega latte. Nendest levinumad on trapets-, ruut- ja kolmnurkkere. Igale keermetüübiga latile peab olema ka sobilik mutter. Keermestatud lati eelisteks on hea jõuülekanne, suur saavutatav kiirus ja odavus. Puuduseks võib pidada hõõrdumisest tekkinud kulumist. [27]



Joonis 3.5 Kruviliigid [27]

3.3.2 Kuulkruvi

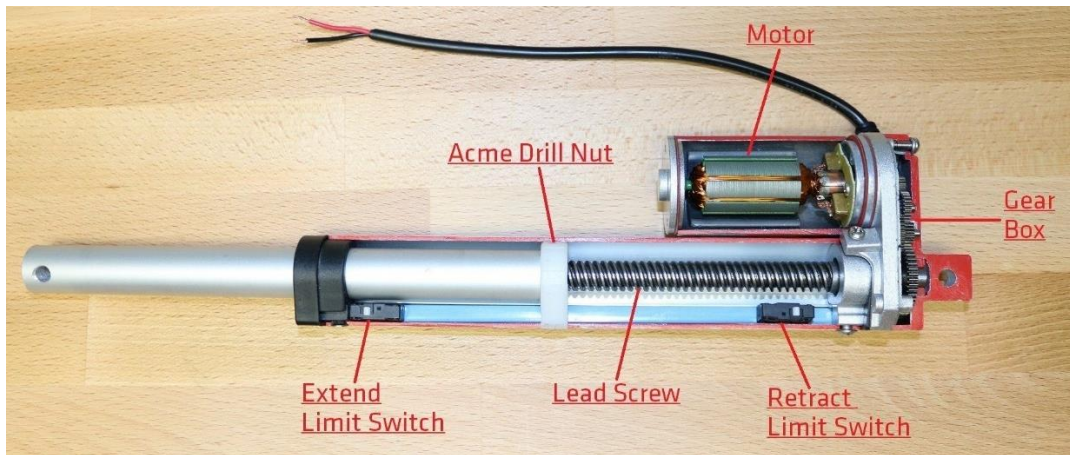
Kuulkruvi meetod on oma ehituselt mõneti sarnane keermestatud lattidele, kuid lati ja mutri keermestusel on kasutatud ümarkeeret, mille vahele on lisatud kuulid. Need aitavad kruvil vähendada hõõrdumist ning tagavad väga suure täpsuse. Lisaks võimaldab kuulkruvi üle kanda suuri jõudusid [28]



Joonis 3.6 Kuulkruvi [28]

3.3.3 Lineaarne ajam

Lihtsa kruvimeetodi puhul on vaja lisaks välist pöörliikumist tekitavat komponenti. Lineaarne ajam on oma olemuselt kruvimeetodil toimiv mehhanism, kuid sellel puhul on ajamisse sisse ehitatud jõukomponent, mis tekitab pöörliikumist. Jõukomponente on väga erinevaid, näiteks mehaaniline, hüdrauliline, pneumaatiline, piesoelektriline ja elektromehaaniline. Tüüpilise elektri jõul toimiva lahenduse puhul on kaks silindrilist toru asetatud üksteise sisse. Pöörliikumise tekitamiseks on kasutusel elektrimootor. Kuna elektrimootorite väljundvõlli pöörlemiskiirus on suur ning jõud väike, siis on see ühenduses ülekandemehhanismiga. Viimane neist võib olla hammasülekandega või rihmaratastega. Ülekande väljundvõll on ühenduses kruvi latiga, mis annab edasi mootorist tulenevat pöörliikumist, kuid nüüd juba väiksemal kiirusel kuid suurema jõuga. Väiksema silindri üks ots on mõeldud kinnitamiseks välise mehhanismi külge, kuid teise otsa on kinnitatud mutter. Mutri küljes on juhik, mis takistab mutril pöörlemist. Mutri ja kruvilati koostoimel toimub pöörliikumise muundumine lineaarseks liikumiseks. Lisaks on suurema silindri sisse paigaldatud lõpulülitid, milleni jõudmisel edastatakse mootorile signaal ning pöörlemine peatatakse. [29]



Joonis 3.7 Elektromehaaniline lineaarne ajam

3.3.4 Vajalikud parameetrid

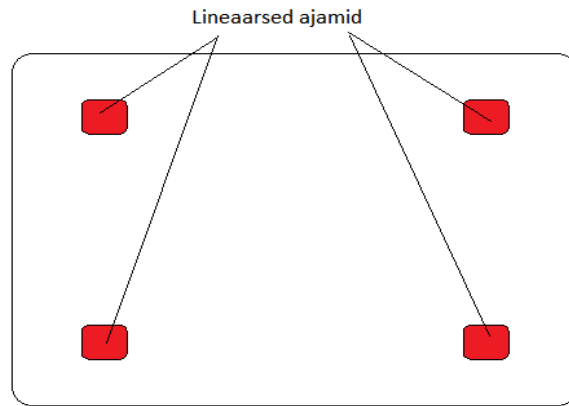
Kuna lineaarseid ajameid müüakse valmistoodetena, ning täidab meie süsteemi jaoks vajaliku lineaarset liikumist, siis on hea seda lahendust kasutada. Meie süsteemi parameetrite kohaselt sobib kasutada 24 V alalisvoolul töötavaid elektrimootoriga lineaarajameid. Komponenti valiku jaoks on meie jaoks olulised järgnevad parameetrid:

- Vajaminev tõstejõud
- Käigupikkus
- Kiirus

Vajamineva tõstejõu leiame juba eespool kasutada valemist 3.3, kuid kogu eeldatava massi asendame sellel korral robotile esitatud kandevõimega.

$$F_G = m * g = 100 * 9,81 = 981 \text{ N}$$

Kuna eelmises prototüübis esines ebaühtlast tõstmist, siis hetkel on plaanis kasutada 4 lineaarset ajamit, mis on paigaldatud tõsteplaadi igasse nurka. Tõstmisel või ette juhtuda olukordi, et kaup ei ole kastidesse pakendatud ühtlaselt. See põhjustada massi ebaühtlast jaotumist tõsteplaadile. Seetõttu võtame äärmuslikuks tingimuseks selle, et kauba raskuskese jääb kõik ühele servale või äärelle. Nii saame, et tõstmiseks vajaminev jõud tuleb rakendada kahel ajamil.



Joonis 3.8 Lineaarsete ajamite asukohad roboti pealtvaates

Leiame ajami kohta minimaalse nõutava tõstejõu.

$$F = \frac{F_G}{2} = \frac{981}{2} = 490,5 \text{ N}$$

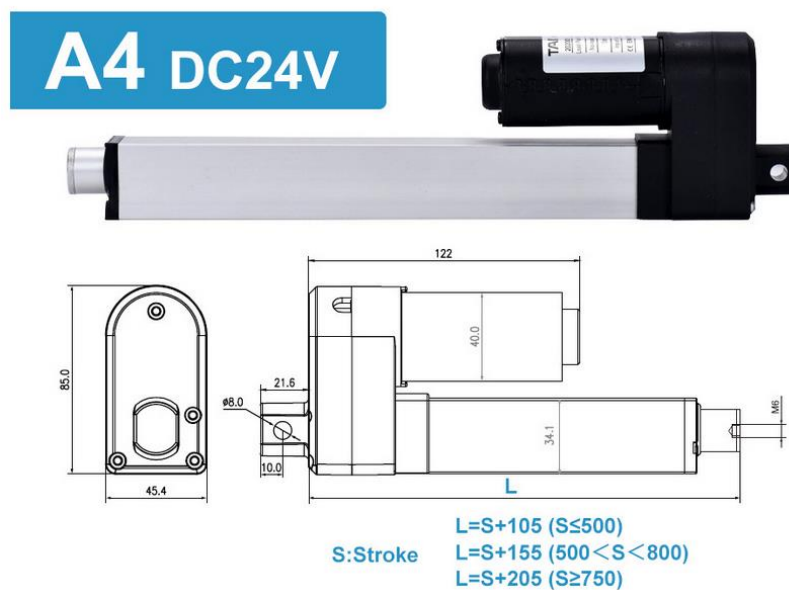
Otsitavale lineaarajamile esitatavad parameetrid:

Tõstejõud $F = 490,5 \text{ N}$

Käigupikkus: $l = 30 \dots 50 \text{ mm}$

Kiirus $v > 10 \text{ mm/s}$

Antud parameetritele vastavad ajamid leiti *Aliexpress* müügikeskkonnast.



Joonis 3.9 Lineaarajam *Taixi* A4 50 mm 500 N 25 mm/s [30]

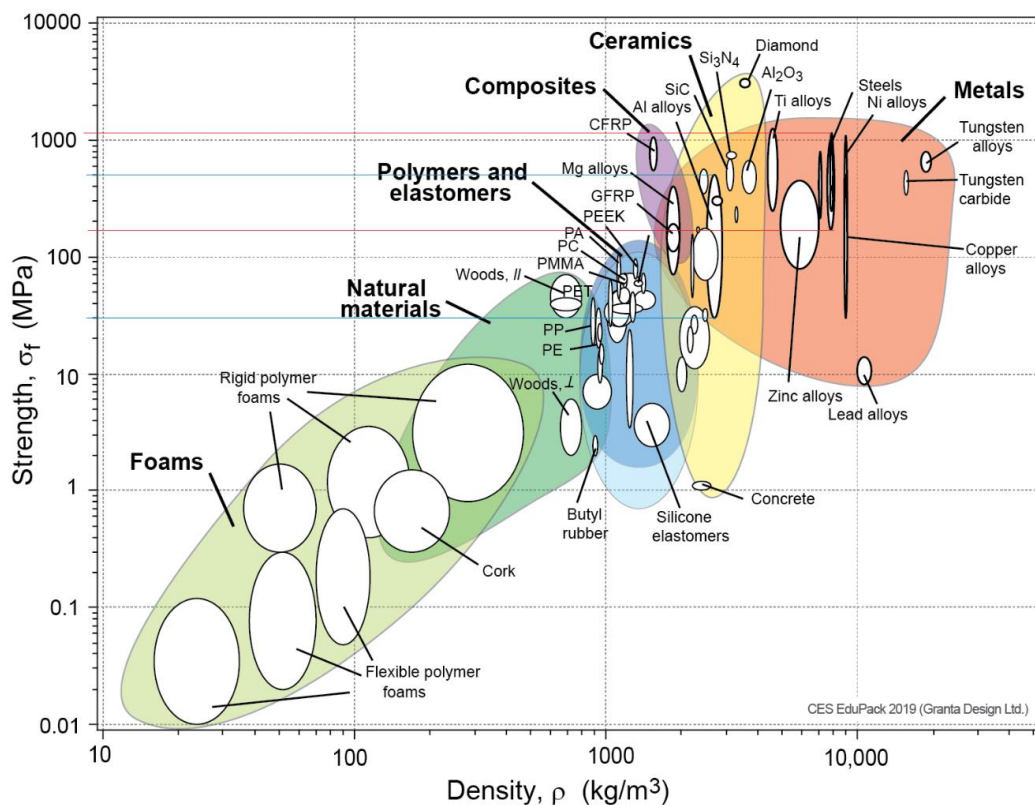
3.4 Kasutatavad materjalid

Kasutatavate materjalide valikul on olulised järgnevad kriteeriumid:

- Materjali saadavus
- Projektile sobivad materjali tugevusnäitajad
- Materjali hind
- Taaskasutatavus ja ümbertöödeldavus

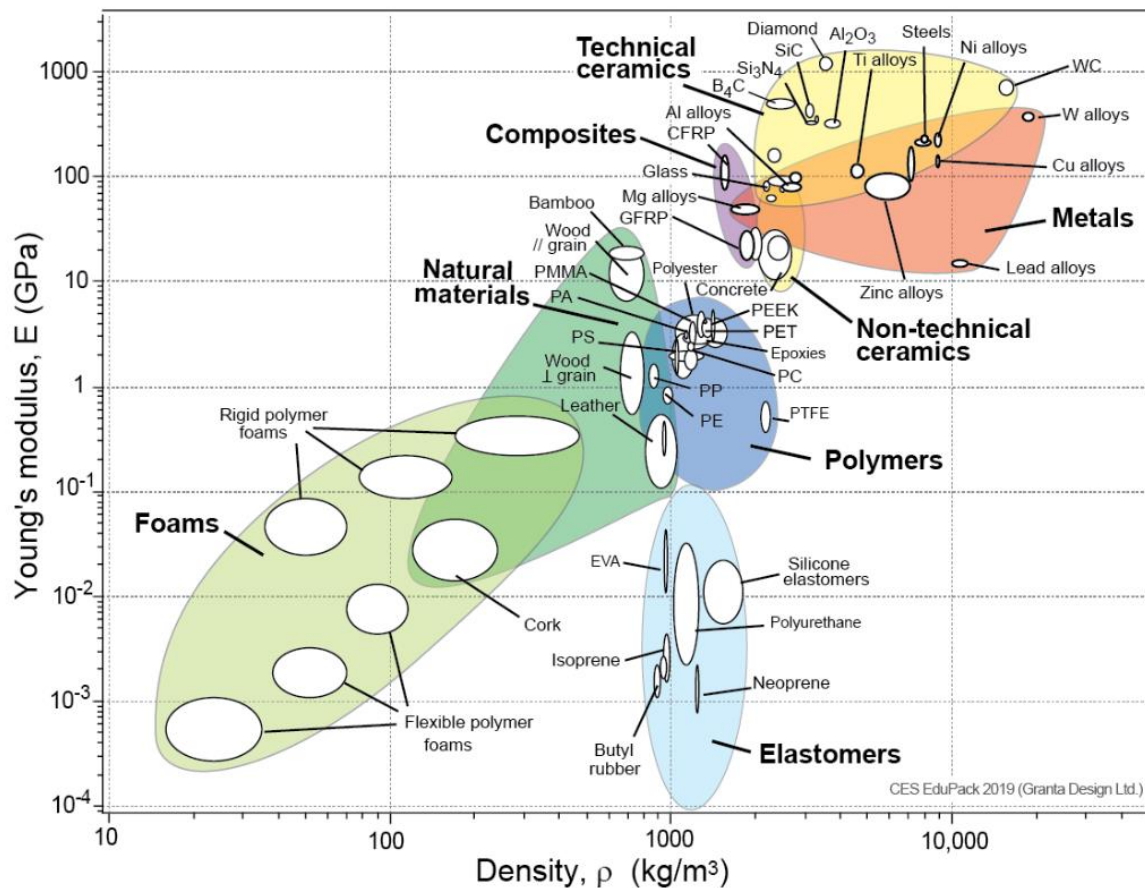
3.4.1 Konstruksioon

Konstruksiooni materjali valikul sai lahendusvariandi alusel teras. Kontrollitud on terase otstarbekus ja sobilikus järgnevate kriteeriumite alusel. Esmalt hinnatakse terase tugevust võrreldes teiste materjalidega. Joonis 3.10 järgi on terase tõmbetugevusnäitajad vahemikus 200...1300 MPa ja alumiiniumsulamite vastavad näitajad 30...500 MPa. Samuti saab lugeda graafikult terase tiheduseks 7800kg/m^3 ning alumiiniumsulamitel 2700 kg/m^3 . Selle põhjal võib öelda, et terased on võrreldes alumiiniumsulamitega tugevamad, kuid ka ligi kolm korda raskemad.



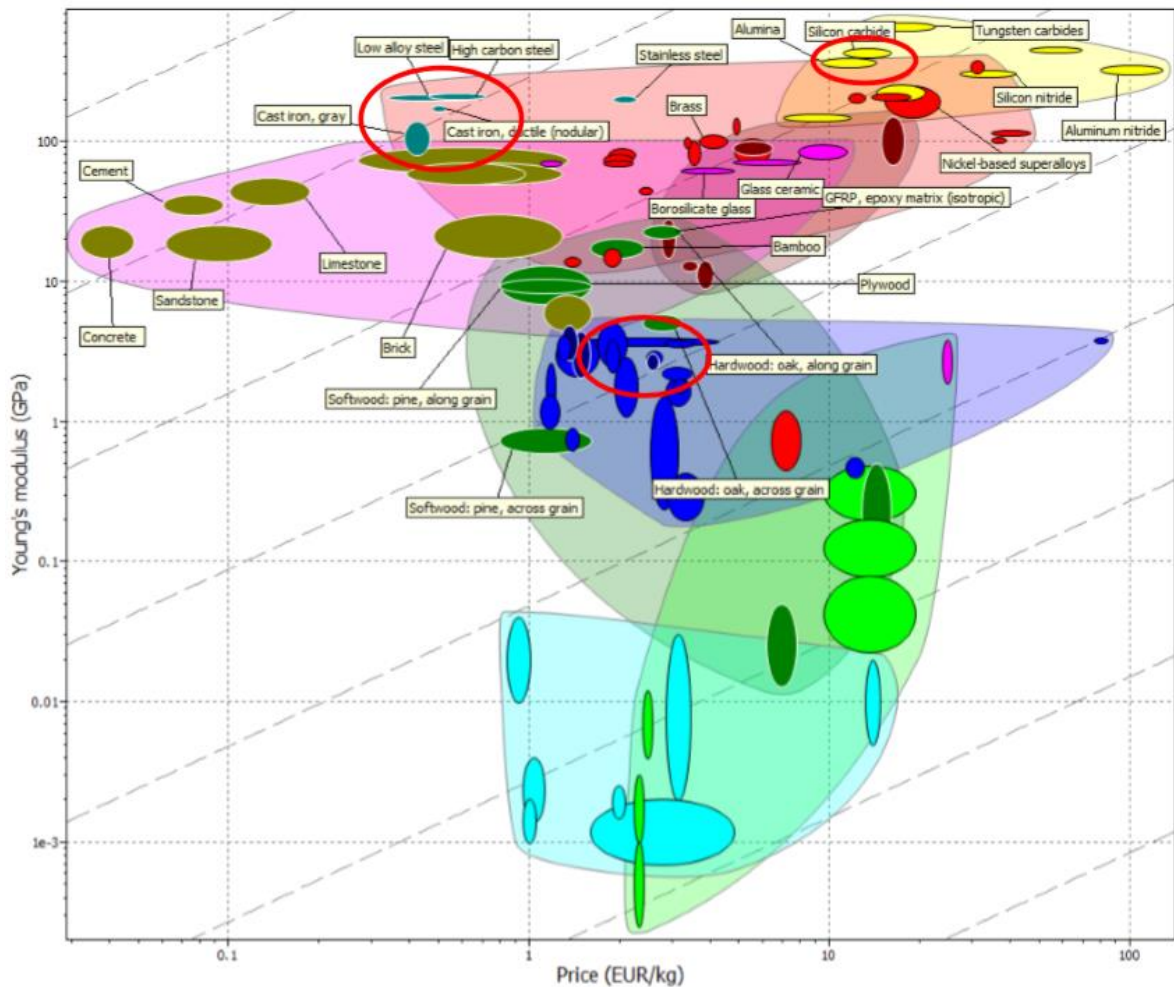
Joonis 3.10 Materjalide tugevuse (MPa) – tiheduse (kg/m^3) graafik [31]

Järgnevalt võrdleme erinevate materjalide elastsusnäitajaid. Hooke'i seaduse kohaselt kehtib reegel, et mida suurem on materjali elastsusmoodul, seda kõrgem on ka materjali jäikus. Meie süsteemi jaoks on jäikus oluline, et robotile avalduvad jõud jaotuksid ühtlaselt ning samuti jäik töstemehhanism on roboti jaoks oluline. Joonis 3.11 põhjal on näha, et terase elastsusmoodul on 190...200 GPa ja alumiiniumsulamite puhul on väärtuseks 70...80 GPa. Selle näitaja põhjal võib kinnitada, et terase valik on olnud õige.



Joonis 3.11 Elastsusmoodul (GPa) - tiheduse (kg/m³) graafik [31]

Kolmanda faktorina vaataks materjali hinda. Seda on näha Joonis 3.12 pealt. Hinna telje pealt annab välja lugeda, et terase hind jääb vahemikku 0,6...0,7 €/kg kohta ning alumiiniumi hind on 7...10 €/kg. Märkimisväärne hinnaerinevus materjalide puhul annab terasele veelgi suurema eelise.



Joonis 3.12 Elastsusmooduli (GPa) ja hinna (eur/kg) graafik [31]

Eelnevalt analüüsitud parameetrite alusel võib öelda, et terase valik on roboti kerekonstruktsiooni osana õigustatud. Antud projektis kasutatakse ehitusterast S355J2. Seda seetõttu, et sellel on head tugevusnäitajad ning hea keevitavus. Terasse omaduste kohta näeb väärtuseid alljärgneval joonisel.

Margi-tähis	Koostis %, max			Omadused, min	
	C ¹⁾	Si		R _{eH} N/mm ²	KU T, °C/J
S185	-	-	-	175	- -
S235JR S235J2	0,2	-	1,4	235...175	+20 27 -20 27..23
S275JR S275J2	0,2	-	1,4	275...205	+20 27..23 27..23
S355JR S355J2	0,22	-	1,6	355...275	+20 27..23 -20 27..23

¹⁾ keskmine

Joonis 3.13 Tavaehitusterased (EN10025) [32]

3.4.2 Keredetailid

Keredetailides on plaanitud kasutada termoplastide rühma kuuluvat akrüülnitriil-butadieen-stürool (ABS) plastikut. Seda seetõttu, et seda iseloomustavad järgmised omadused:

- head mehaanilised omadused,
- kõrge löögisitkus,
- hea kujupüsivus,
- keemiliselt vastupidav hapetes, leelistes, lahustes
- kergesti vormitav.

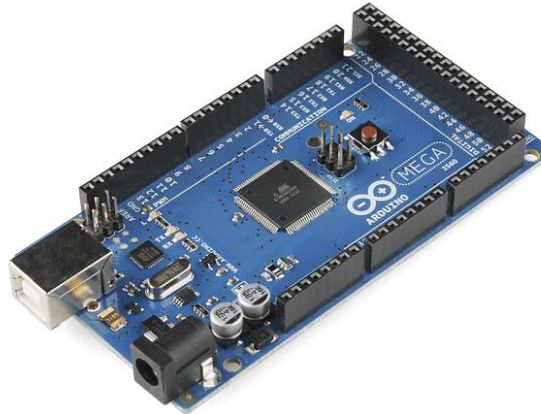
Lisaks on võimalik ABS plastikut 3D printida, mis on prototüübi ehitamise jaoks hea omadus. Sellisel viisil saab võrdlemisi odavalt testida komponendi sobivust ning vajadusel sisse viia parendusi. [33]

3.5 Elektroonikakomponendid

3.5.1 Veoajami juhtimiseks vajalikud moodulid

Kuna kasutusel on *Mecanum* rattad, siis holonoomilise liikumise jaoks igat veoajamit juhtida eraldi sisendsignaalidega. Kuna täpse liikumise jaoks tuleks kasutada suletud ahelaga juhtimissüsteeme, ning analüüsida igalt mootori sensorilt saadud infot ja võrrelda seda soovitud sisendparameetritega, siis selle jaoks on vaja neid juhtida läbi kontrollmoodulite. Üks võimalus selleks on komplekteerida komponentidest kokku juhtloogika. Elementide ühenduskeemi kohta saab täpsemalt vaadata LISA 1. Skeem koosneb järgnevatest komponentidest.

- Juhtmoodul, mis kontrollib roboti liikumist ja hetkeolukorda. Juhtimismooduli külge ühendatakse tavaliselt erinevaid lisamooduleid ja täitureid. Antud robotil sobiks kasutada *Arduino Mega* mikrokontrollerit. Kuna juhtmoodulit on vaja ka teiste operatsioonide jaoks, siis saab kasutada mitme funktsiooni jaoks sedasama moodulit. [34]



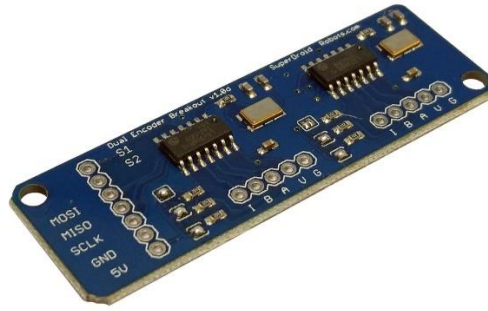
Joonis 3.14 Arduino Mega 2560 R3 [34]

- Signaalimoodul, mis genereerib mootori jaoks vajaliku elektrisignaali. Antud roboti jaoks sobiks kasutada *Sabertooth Dual 60A motor driver* moodulit, mis suudab eraldi juhtida kahte mootorit. [35]



Joonis 3.15 Sabertooth Dual 60A motor driver [35]

- Mootori tagasisidesensor ja signaali tõlgendamiseks trükkplaat. Käesoleva roboti puhul oleks võimalik kasutada mootori tootja poolt pakutavad Halli sensorit ja *Dual LS7366R Quadrature Encoder Buffer* trükkplaati, mis sensorist tulenevaid signaale tõlgendab ja juhtimise moodulile tagasisidet annab. Sellisel viisil saab süsteem korrigeerida kõrvalekalded soovitud väärtustest ning tagab iga mootori õige juhtimise.



Joonis 3.16 Dual LS7366R Quadrature Encoder Buffer [36]

3.5.2 Tõstemehhanismi juhtimine

Kuna veomehhanismi juhtimise juhtmooduliks sai valitud *Arduino Mega*, siis on võimalik ka tõstemehhanismi juhtida läbi sama kontrolleri. Lisades lineaarajamile Halli sensori, saame erinevate ajamite kohta tagasisidet. Sellisel viisil saame suletud tagasisideahelaga juhtimissüsteemi, millega on tagatud sujuv tõstmise. Lineaarajami liikumise suuna muutmine toimub ajami mootori klemmide pooluste muutmisega. Selle jaoks on vaja kasutada releemoodulitest koosnevat lülitusahelat, et vastavalt soovitud liikumissuunale saaks edastatud ajami mootorile õige poolusega vool.

3.6 Komponentide valiku hinnang

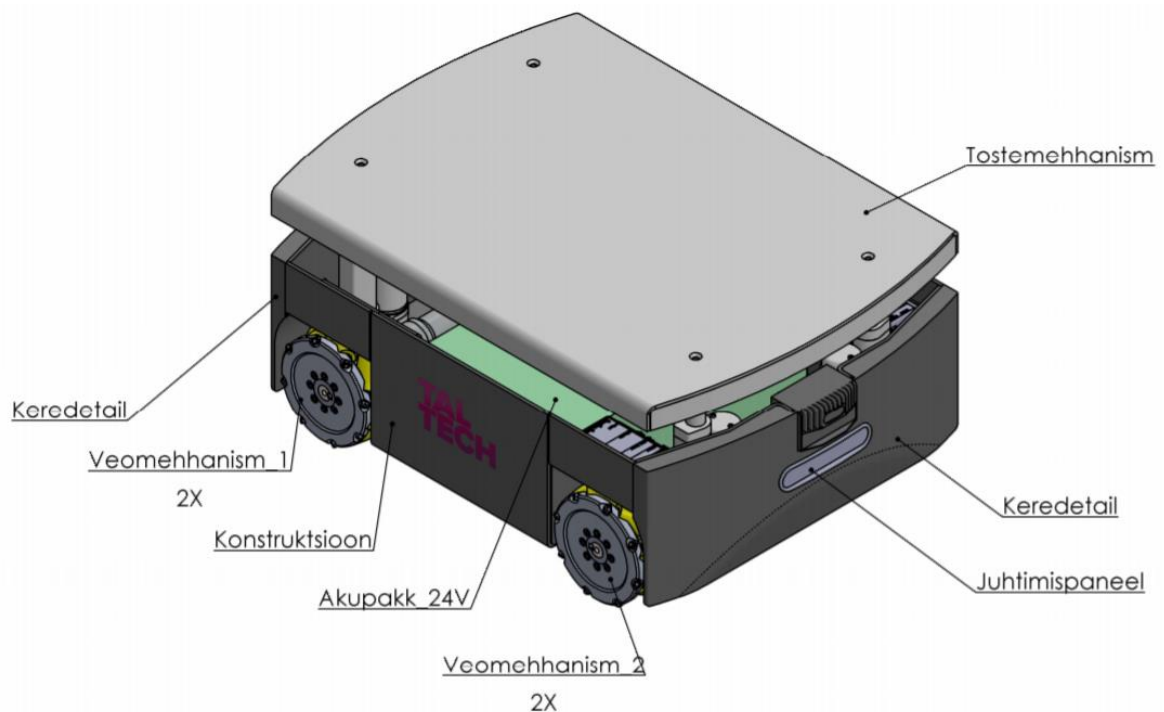
Valitud komponendid on kooskõlas peatükis 2.1 välja toodud parameetritega. Valitud veoajamiga saavutatakse soovitud kiirus ning tõsteajam tagab soovitud tõstevõime. Komponentide valiku puhul oli oluline leida kompaktsed lahendused, mis võimaldaks roboti projekteerimisel saavutada väikesed gabariitmõõtmed. Antud komponendid võetakse kasutusele ning vastavalt neile alustatakse projekteerimist.

Elektronikakomponentide puhul on kindlasti lisandumas roboti jaoks vajalikke komponente, millele antud töö ei keskendu (nt navigeerimise juhtimine ja ümbruse kaardistamine). Selle tõttu tuleb roboti projekteerimisel silmas pidada asjaolu, et roboti sees oleks lisaruumi võimalike lisanduvate komponentide jaoks.

4. ROBOTI PROJEKTEERIMINE

Mobiilse roboti projekteerimist alustati komponentide otsinguga. Peatükis 3 leitud komponentide põhjal seati paika üldised mõõtmed, mille puhul kõik komponendid roboti sisse ära mahuks. Esmalt konstrueeriti roboti konstruktsioon, seejärel tõstemehhanism ja veomehhanism. Projekteeimise käigus prooviti leida lahendused, mis arvestavad roboti valmimise erinevaid etappe. Selleks kasutati erinevaid projekteerimismeetodeid hõlmavat meetodit DFX, nendest peamised:

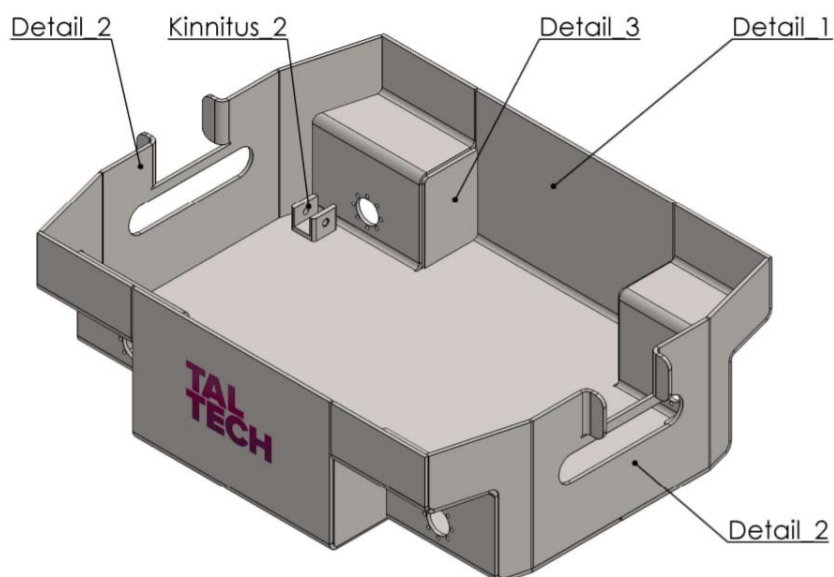
- Tootmiskeskne projekteerimine (DFM – *Disain for Manufacturing*)
- Koostamiskeskne projekteerimine (DFA – *Disain for Assembly*)



Joonis 4.1 Mobiilne robot

4.1 Konstruktsioon

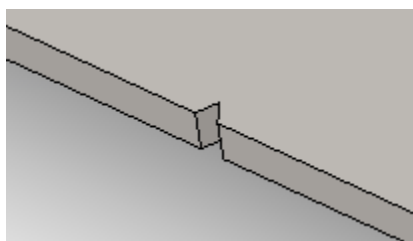
Roboti konstruktsioon on tehtud sümmeetriliselt. See teeb hiljem lihtsamaks roboti komplekteerimise, kuna ei ole vaja tähelepanu pöörata esimesele või tagumisele küljele. Konstruktsiooni erinevad detailid on liidetud keevitamise teel. See tagab detailide liikumatuse ning liitmine aitab muuta kere jäigemaks. Kasutusel on peatükis 3.4.1 välja toodud ehitusterast S355J2. Keevitamis protsessiks sobiks kasutada täistraatkeevitust, kuna see on odavam ja kiirem kui elektrodkeevitus.



Joonis 4.2 Mobiilse roboti konstruktsioon

4.1.1 Detail 1

Detail ühe puhul on kasutatud 4mm paksust lehtmetsalli. Detaili kuju saadakse painutamise teel. Painutamiseks vajalik toorik lõigatakse välja laserlõikuse teel. See tagab parema täpsuse võrreldes plasmalõikusega. Lisaks on pikkuse sihis sümmeetriateljele lisatud sisselõiked, mis lihtsustavad painutamise jaoks vajalike mõõtmete märkimist.



Joonis 4.3 Sümmeetriatelje märgistus

Samuti on laserlõikuse käigus lõigatud sisse ka mootori kinnitamiseks vajalikud avad. Prototüübi jaoks on selle täpsus piisav, et saaks katsetada roboti komponentide kokkusobivust. Kui prototüübi analüüsi käigus tuleb hinnata mootoriavade täpsust ning kui leitakse, et avad ei ole täpsed ja see mõjutab oluliselt roboti tööd, siis tuleb avad masindada peale konstruktsiooni keevitamist.

4.1.2 Detail 2

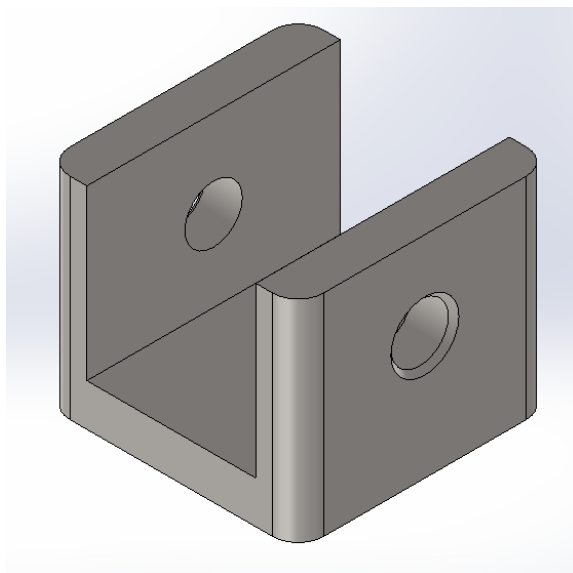
Sarnaselt detail ühele on ka antud detail lõigatud välja laseriga ning seejärel painutatud. Keeviskoostus „konstruktsioon“ on neid kaks tükki ja tänu robotis kasutavale sümmeetriale on neid lihtne koostada. Paksus selle jaoks on valitud 2 mm. Detailist välja poole eenduvad kõrvad on mõeldud lidari kinnitamiseks. Ovaalne sisselõige on aga mõeldud kaamera ja juhtimispaneeli komponentide jaoks.

4.1.3 Detail 3

Detail 3 puhul on tegu lihtsa plaadiga, mis on välja lõigatud lehtmetailist ja keevitatud detail 1 külge tühimikude täitmiseks. Koost sisaldab nelja plaati, millede paksuses on 2 mm.

4.1.4 Kinnitus 2

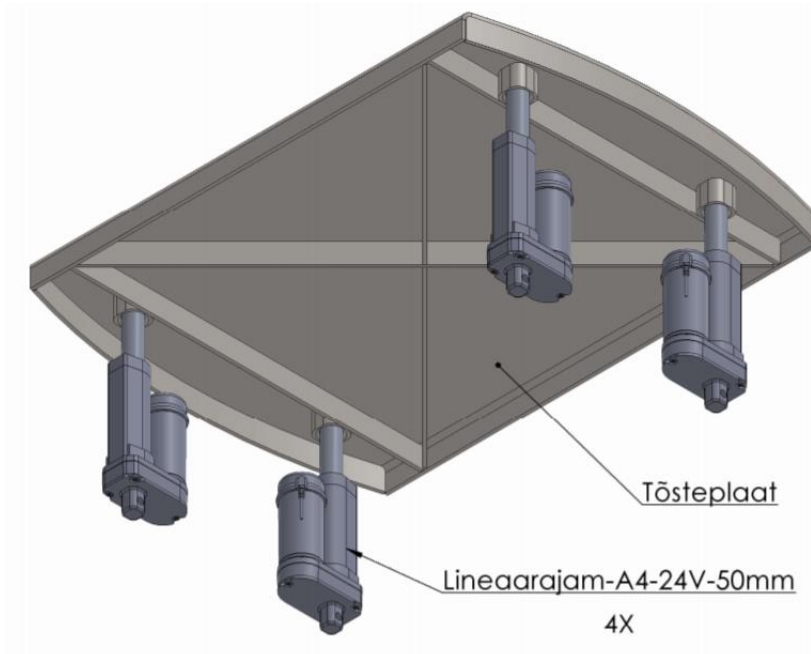
Antud detail on mõeldud tõstemehhanismi lineaarajami kinnitamiseks konstruktsiooni külge. Need asuvad konstruktsiooni neljas nurgas. Paiknemine on välja toodud Joonis 3.8 peal. Detailid on valmistatud masintöölusega ning omab läbivat M8 meeterkeermeestusega ava.



Joonis 4.4 Kinnitusdetail 2

4.2 Tõstemehhanism

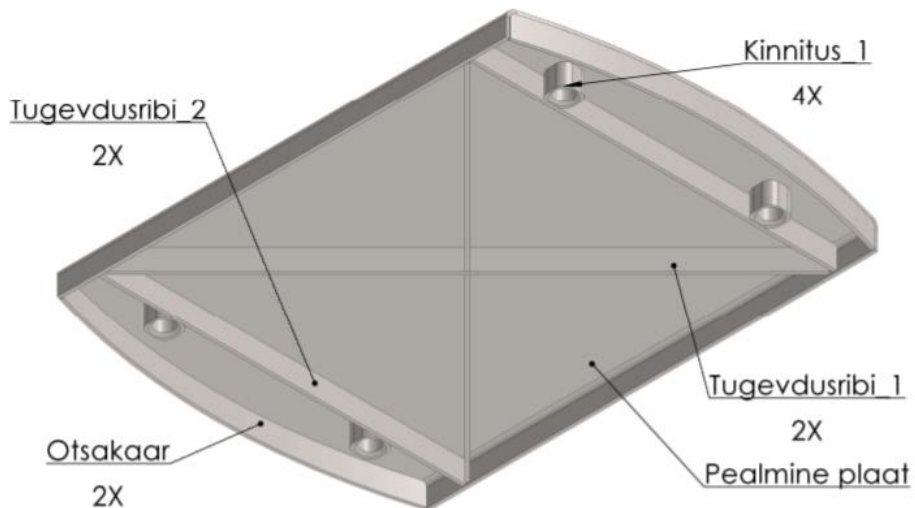
Tõstemehhanism koosneb neljast lineaarajamist ning tõsteplaadist. Kuna ajamid on ostutooted, siis nende kohta oli leida ka erinevaid valmis CAD mudeleid. Vähese modifitseerimisega viidi mudel vastavusse peatükis 3.3 valitud komponendiga. Peamiselt keskenduti tõsteplaadi projekteerimisele.



Joonis 4.5 Tõstemehhanism

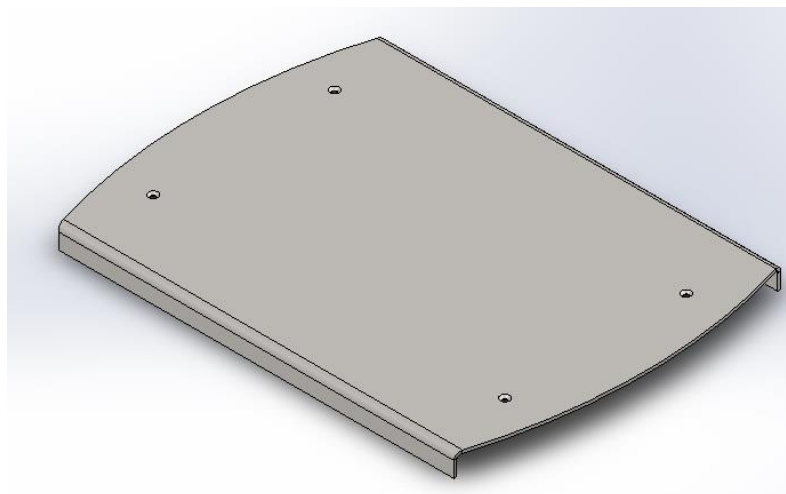
4.2.1 Tõsteplaat

Tõsteplaat koosneb viiest erinevast positsioonist. Sarnaselt konstruktsioonile on ka tõsteplaadi projekteerimisel lähtutud sümmeetrisusest. See lihtsustab tootmist ja hiljem on robotit komplekteerimisel vähem probleeme. Kasutusel on neli masindatud kinnitusdetaili, mis asetsevad igas nurgas. See kannab edasi lineaarajamist tulevat tõstejõudu tõsteplaadile. Tõsteplaadile jäikuse tagamiseks on kasutatud kahte tugevdusribi, mis moodustavad tõsteplaadi alla diagonaali, et jaotada plaadil rakenduvaid jõude ühtlaselt. Lisaks kaks lühemat tugevdusribi, mis ühendavad kinnitusdetailide. Tõsteplaadi otstes on otsakaared ning need tuleb valmistada valtsimise teel. Lehtmetaili paksuseks oli arvestatud esialgu 4 mm, kui tugevusanalüüsi käigus leiti, et sobib kasutada 2 mm paksust lehte.



Joonis 4.6 Tõsteplaat

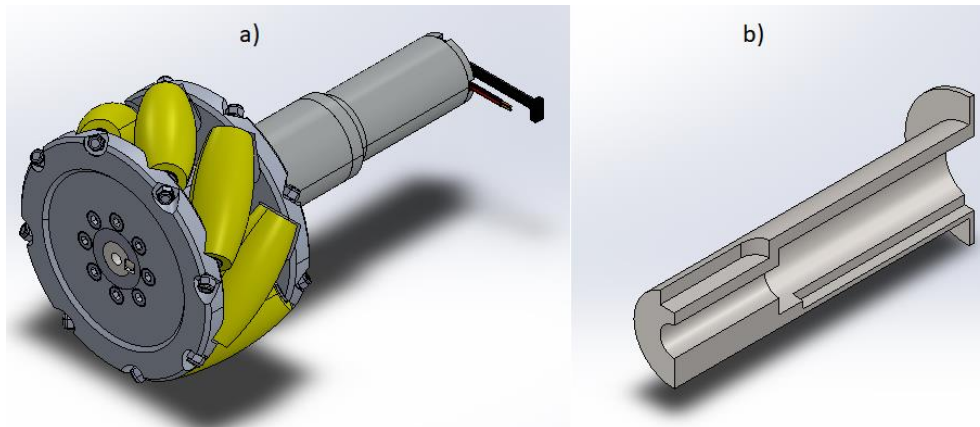
Pealmine plaat on projekteeritud lehtmetailist ning mille pikemad servad on alla poole painutatud. Sellega võidetakse toomises ajaliselt kuna ei ole vaja külgedele tugevdusribisid keevitada. Plaat lõigatakse välja laserlõikamise teel ja hiljem käsipuuriga tuleb avadele teha faasid. Läbi avade lähevad M6 peitepeaga poldid, mis kinnituvad lineaarajami külge. Peitepeaga poldi kasutamine tagab tõsteplaadi pealmise pinna sileda tasapinna.



Joonis 4.7 Pealmine plaat

4.3 Veomehhanism

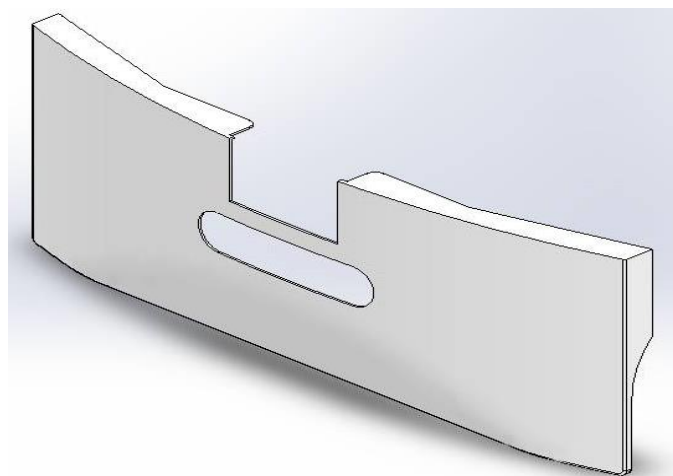
Veomehhanismi jaoks leiti internetist tootja poolt pakutavad CAD mudelid [23] [26]. Kuna veoajami ja ratta võllide diameetrid olid erinevad. Oli vaja projekteerida vahepuks. Mille abil sobitati ajam võll ja ratta rummu osa. Pöördemomendi ülekandmiseks on kasutusel DIN 6886 standardi järgsed kiilud. Veomehhanismi kinnitamiseks on konstruktsiooni detailidele lõigatud avad.



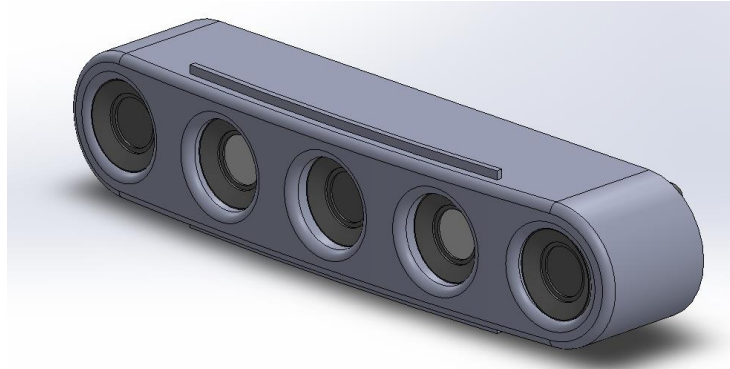
Joonis 4.8 a) Veomehhanism; b) Puks

4.4 Keredetailid

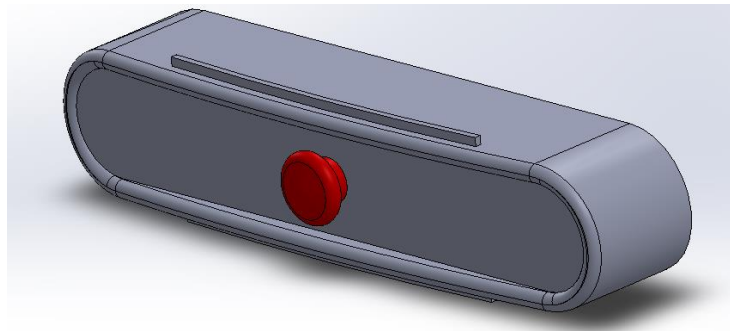
Roboti mõlemasse otsa on projekteeritud plastikust keredetail. Keredetail on prototüübi jaoks valmistatav 3D printimise teel. Keredetail sobib mõlemale poole robotit, kuid detaili keskel olevasse avasse saab ühendada erineva mooduli. Ühele poole on mõeldud ühendada robotit valgustavad LED tuled ja kaamera ning teisele küljele juhtimispaneel. Samuti on plastikust ava lidari jaoks.



Joonis 4.9 Plastikust keredetail



Joonis 4.10 Ledide ja kaamera hoidja



Joonis 4.11 Juhtimispaneel koos hädastopp lülitiga

4.5 Roboti parameetrid

Tabel 4.1 Projekteeritud roboti lõplikud parameetrid

Parameeter	Väärtus
Mõõtmed (P x L x K)	625 x 440 x 225 mm
Kiirus:	1,5 m/s
Mass:	47 kg
Tõstevõime:	100 kg
Tõstekõrgus:	50 mm
Pöörderaadius:	0°
Maksimaalne tõusunurk:	10°

Projekteeritud robot vastab 2.1 välja toodud süsteemile esitatud fikseeritud ning soovituslikele nõuetele. Lisaks on kõrvaldatud esimese prototüübi tõstemehhanismi puudused ning veomehhanismi komponentide valikuga tagatud sujuv kiirendus. Projekteeritud lahendustele teostatakse tugevusarvutused, et hinnata lahenduse sobivust.

5. TUGEVUSANALÜÜS

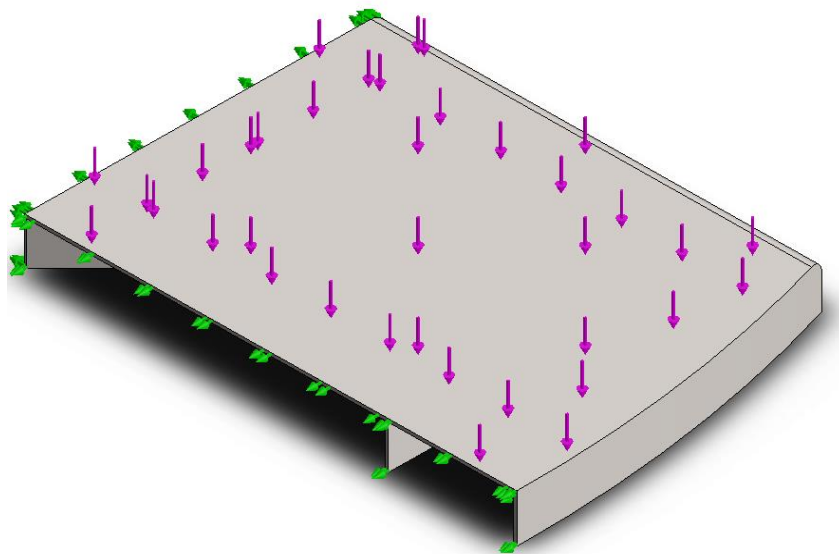
Tugevuse analüüs teostatakse roboti kahele komponendile, mis võtavad vastu koormust. Ostutoodete tugevusele antud töös ei keskenduta ning lähtutakse tootjate poolt antud kriteeriumitest. Tugevusarvutused teostatakse *Solidworks Simulation* keskkonnas ja kasutatakse lõplike elementide meetodit (LEM, Inglis k - FEM). Samuti kasutatakse lihtsustamist, et kiirendada arvutustele kuluvat aega ja vähendada riistvara ressursside nõudlikust. Lihtsustamise teeb võimalikuks asjaolu, et roboti osadel on lähtunud sümmeetrisusest.

Tugevustingimused on määratud järgnevalt:

- Maksimaalne pinge (*von Mises*) – 180 MPa
- Maksimaalne deformatsioon – 0,5 mm

5.1 Tõsteplaat

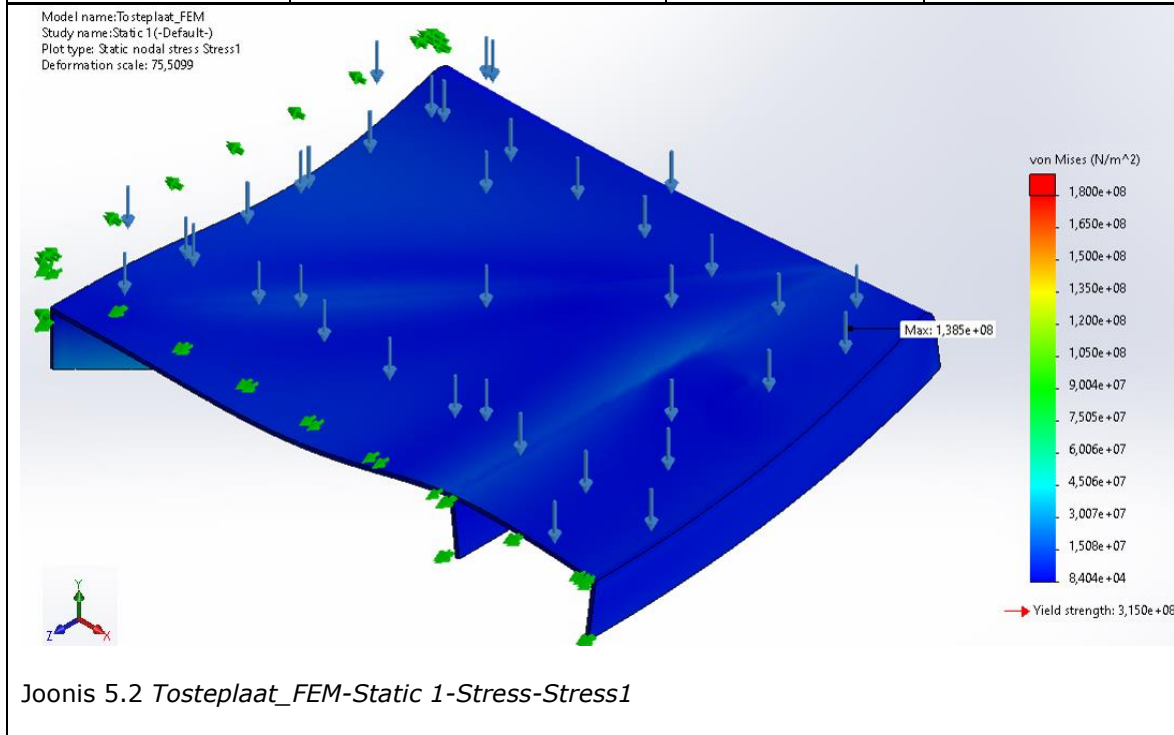
Tõsteplaadi analüüsil on kasutatud lihtsustamise huvides ühte neljandikku. Lihtsustus on võimalik, kuna tegu on sümmeetrilise detailiga. Tõsteplaadile on määratud ära pealmine pind, millele avaldub ühtlane jõud 500 N (Joonis 5.1 lillad nooled) ning küljed mille tasapinda mööda saab detail liikuda (Joonis 5.1 rohelised nooled). Fikseeritud on Joonis 4.6 peal oleva „kinnitus_1” sisemine pind. Jõu valikul lähtuti peatükis 3.3.4 tehtud äärmustingimuse kohaselt.



Joonis 5.1 1/4 tõsteplaadist lillad nooled – jõu vektorid, rohelised nooled – kinnituste asukohad

Tabel 5.1 Tõsteplaadi pingeanalüüs

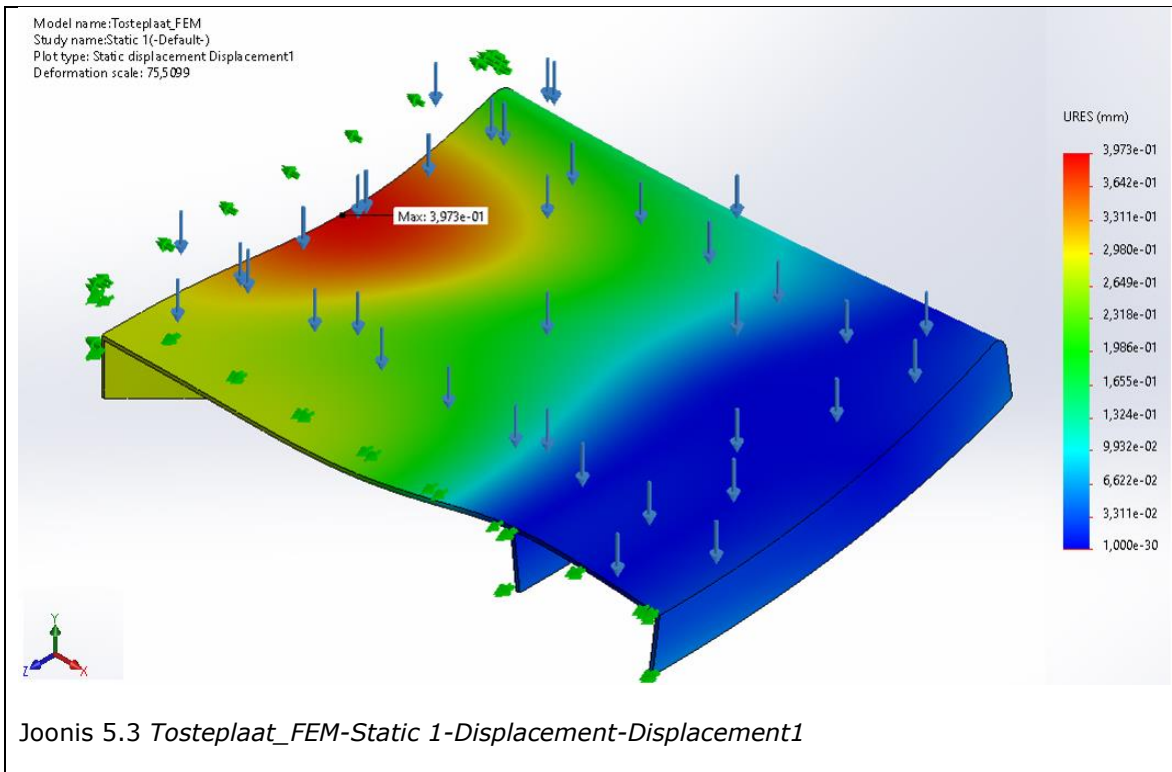
Nimi	Liik	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	8,404e+04 N/m ² Node: 19579	1,385e+08 N/m ² Node: 61745



Nagu analüüsi tulemusest on näha, siis 2 mm kokku keevitatud teraslehtedest tõsteplaat on piisavalt tugev, et vastu pidada 500 N tõstmiseks ning lubatud maksimaalne pinge jääb alla lubatud piiri 138 MPa < 180 MPa.

Tabel 5.2 Tõsteplaadi deformatsioonianalüüs

Nimi	Liik	Min	Max
Deformatsioon (Displacement1)	URES: Resultant Displacement	0,000e+00 mm Node: 29	3,973e-01 mm Node: 54676

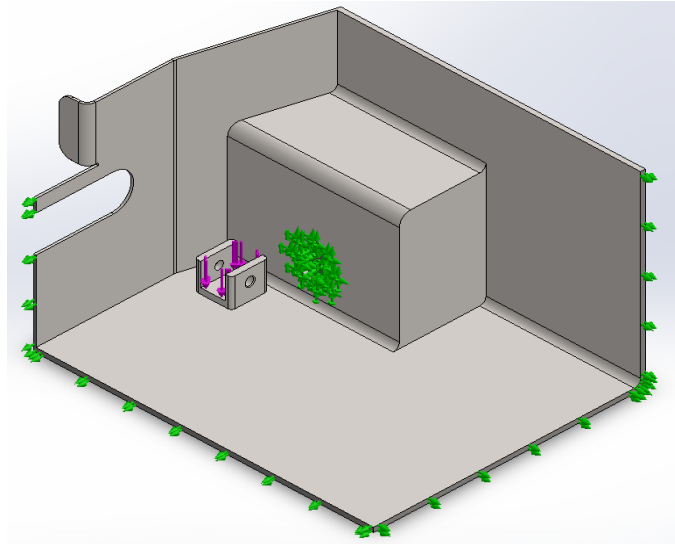


Samuti on deformatsiooni analüüsi tulemus projekti seisukohalt sobilik. Maksimaalne elastne deformatsioon $0,4 \text{ mm} < 0,5 \text{ mm}$.

Sellega on tõsteplaadi tugevus ning piisav jäikus tagatud ning sobilik 100 kg tõstmiseks.

5.2 Konstruksioon

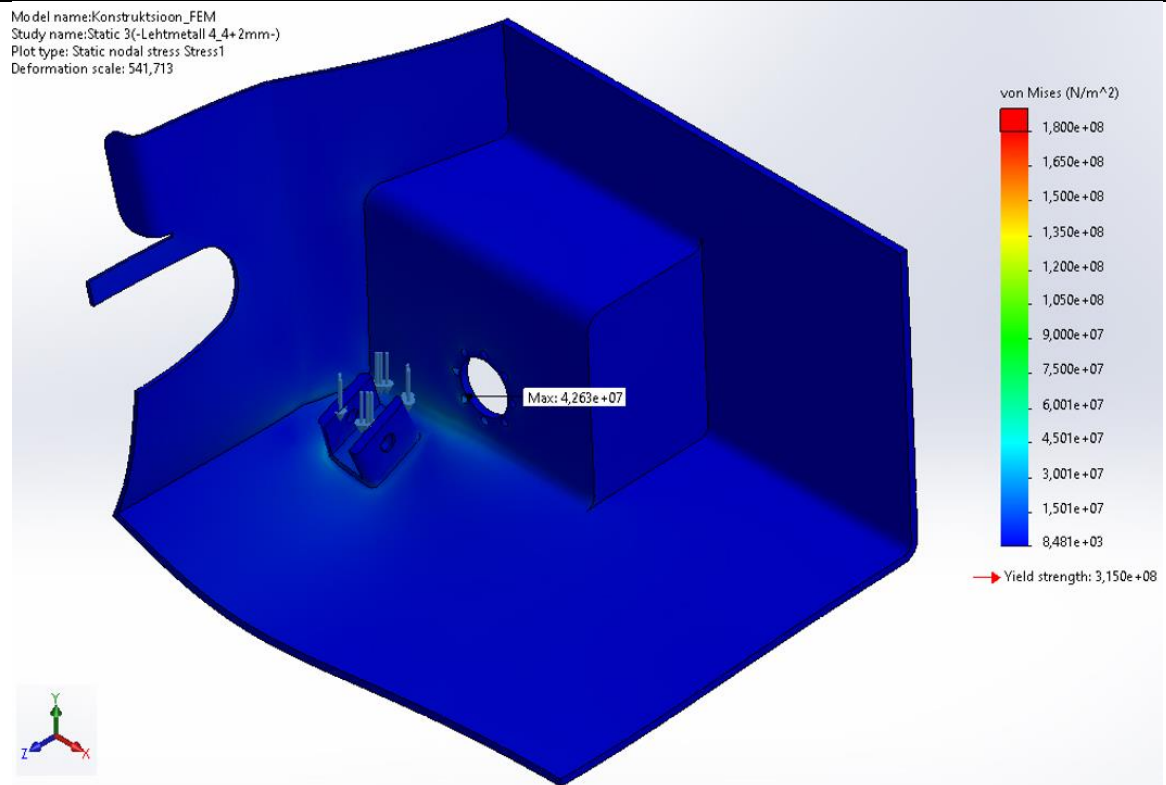
Sarnaselt tõsteplaadil on ka konstruksioon mööda sümmeetriatelgi jagatud neljaks. Detail on fikseeritud veojami kinnituskohadest (Joonis 5.4 rohelised nooled) ning lõiketelgede pealt on kasutusel tasapinnalist kinnitamist (Joonis 5.4 rohelised nooled). Jõu asukoht on Joonis 4.2 „kinnitus_2” detaili sisepinnal (Joonis 5.4 lillad nooled).



Joonis 5.4 1/4 konstruktsioonist; lillad nooled – jõu vektorid, rohelised nooled – kinnituste asukohad

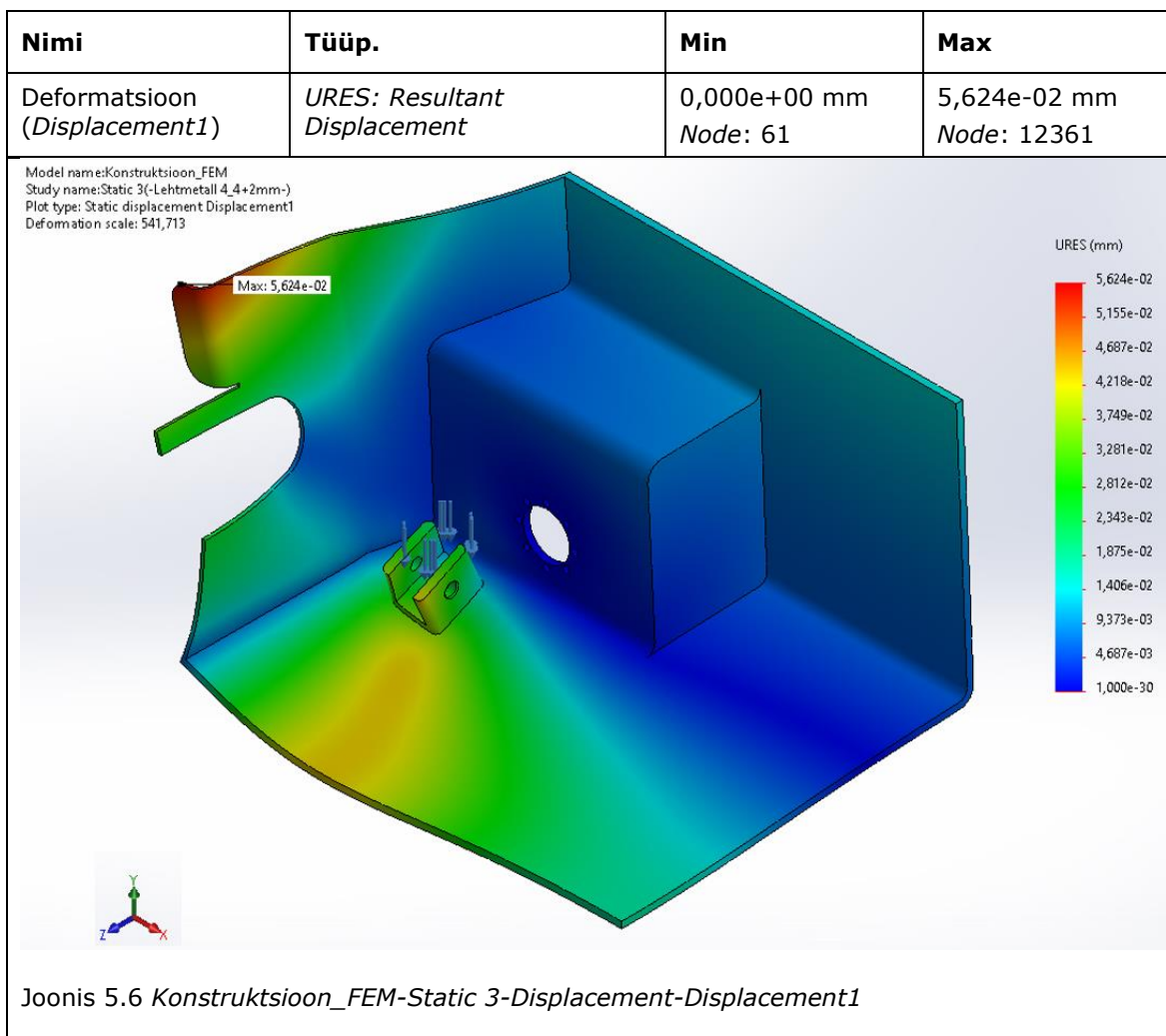
Tabel 5.3 Konstruktsiooni pingeanalüüs

Nimi	Liik	Min	Max
Stress1	VON: von Mises Stress	8,481e+03 N/m ² Node: 46889	4,263e+07 N/m ² Node: 64287



Joonis 5.5 Konstruktsioon_FEM-Static 3-Stress-Stress1

Tabel 5.4 Konstruktsiooni deformatsioonianalüüs



Konstruktsiooni katsetati erinevate lehtmetsallide paksuste puhul. Tugevuse seisukohast sobiks terves konstruktsioonis kasutada 2 mm paksust lehtmetsalli, kuid valmistamisel on kasutusel painutuse tehnoloogia ja detailil on 2 mm laiused tehnoloogilised sisselõiked, siis Joonis 4.2 „detail_1“ puhul on kasutusel siiski 4 mm paksune lehtmetsall, et hiljem oleks võimalik tehnoloogilised sisselõiked täis keevitada. Teised detailid on 2 mm paksusest lehest. Tänu paksema detail_1 lehtmetsalli kasutamisele on konstruktsiooni tugevus kordades suurem kui ettemääratud tingimused seda nõuavad.

6. HINNA ANALÜÜS

Tabel 6.1 Hinna analüüs

Tootegrupp	Toode	Kogus, tk	Hind, €/tk	Hind, €	
Veojam:	Mootor	<i>Maxon DCX GB KL 24 V</i>	4	644	2576
	Reduktor	<i>Maxon GPX42UP 26:1</i>	4	371	1484
	Halli sensor	<i>ENX10 Easy 512IMP</i>	4	87	348
	Rattad	<i>Nexus Mecanum 127A komplekt</i>	1	360	360
	Puks	Masindatud detail, teras C45	4	25	100
Veojami juhtkontroller	<i>Arduino Mega</i>	1	40	40	
	<i>Sabertooth Dual 60A motor driver</i>	2	174	348	
	<i>Dual LS7366R Quadrature Encoder Buffer</i>	2	42	84	
Lineaarajam	<i>Taixi A4 24 V</i>	4	24	96	
Lineaarajami juhtimine	Releemoodul	1	50	50	
Erinevad komponendid	Lidar CE30C	2	880	1760	
	Kaamera Zed Mini	1	410	410	
	Led valgustus	3	15	45	
	Aku 24 V	1	300	300	
	Muud komponendid	1	300	300	
Konstruktsiooni detailid [37]	Detail_1 (550 x 164 x 440)	1	32,6	32,6	
	Detail_2 (52,7 x 432,5 x 160)	2	9,02	18,04	
	Detail_3 (68 x 99 x 2)	4	1,34	5,36	
	Kinnitus_2 (30 x 30 x 20)	4	25	100	
Tõsteplaadi detailid [37]	Pealmine plaat (440 x 30 x 600)	1	15,44	15,44	
	Otsakaar (422,7 x 28 x 2)	2	1,12	2,24	
	Tugevdusribi_1 (614 x 25 x 2)	2	1,32	2,64	
	Tugevdusribi_2 (436 x 25 x 2)	2	1,09	2,18	
	Kinnitus_1 (30 x 30 x 20)	4	25	100	
Keredetailid	Keredetail_1	2	50	100	
	Ledide hoidja	1	50	50	
	Juhtimispaneel	1	50	50	
Kinnitusvahendid	Polidid, mutrid, seibid (kmpl)	1	100	100	
			Kokku	8879,5	

Hinna leidmisel ei ole suudetud arvestada kõikide komponentidega. Lisaks ei ole arvestatud roboti valmistamiseks kuluvat tootmis- ning tööjõukulusid. Tuleb ka ära märkida, et hinnad on arvestatud üksikute koguste pealt. Kui tükkide arv suureneb, siis rakenduvad detailidele soodsamad hinnad. Eriti hästi oli seda näha terase hinnastamises, kus üksikute detailide puhul koguse ühe võrra suurendamine andis umbes 30% odavama hinna.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli mobiilsele logistikaroboti tõste- ja veomehhanismi arendus. Selle käigus tehti vajalikud arvutused, leiti sobivad komponendid ning projekteeriti sobiv konstruktsioon. Lõplik roboti lahendus täidab sellele esitatud nõudmisi.

Esimeses peatükis tutvustatakse automaatjuhtimisega sõidukeid üldisemalt. Analüüsitakse olemasolevaid lahendusi ning võrreldakse neid.

Teises peatükis fikseeritakse arendatavale süsteemile vajaminevad parameetrid. Nendele vastavalt luuakse funktsioonistruktuur. Seejärel on kasutatud morfoloogilist maatriksit, et selle abil välja pakkuda erinevad lahendusvariandid. Peatüki võtab kokku hindamismaatriks, mille abil leitakse sobivaimad funktsioonitäitjad arendatavale robotile.

Kolmandas peatükis leitakse projekteeritavale robotile sobivad komponendid. Teostatakse vajalikud arvutused vedavale jõuülekandele ning tõstemehhanismile. Hinnatud on materjali valikut ning välja toodud mehhanismide juhtimiseks vajalikud elektroonikakomponendid.

Neljas peatükk kirjeldab roboti projekteerimise käigus leitud lahendusi. Tuuakse välja erinevad koostud ning nendesse kuuluvad detailid. Projekteerimise jätkuks on viiendas peatükis hinnatud konstruktsiooni ning tõsteplaadi tugevusnäitajaid. Selleks on kasutatud lõplike elementide meetodit.

Kuues peatükk on hõlmab endas valitud komponentide ning projekteeritud lahenduste hinnangulist maksumust.

SUMMARY

The aim of this work was to develop a lifting and driving mechanism for an autonomous mobile robot used in logistics. In this process, the necessary calculations were made. Suitable components were found, and a suitable structure was designed. The final robot solutions meet the requirements set in the beginning.

The first chapter introduces overall automated guided vehicles. Existing solutions are analyzed and compared.

In the second chapter, the parameters required for the system are fixed. This is an input for the system being developed. Accordingly, a function structure is created followed by morphological matrix. It is used to suggest different solutions. The chapter is summarized in an evaluation matrix, which is used to find the most suitable elements for different functions the robot needs to perform.

In the third chapter, the suitable components for designing robot are found. The necessary calculations are made for drive mechanism and for lifting unit. The choice of material is described, and the electronic components required to control the mechanisms have been identified.

The fourth chapter describes the solutions found during the design process. Different assemblies and their sub-assemblies and parts are presented. As a continuation of the design, the strength analyses have been evaluated in the fifth chapter. The finite element method has been used for this purpose.

The sixth chapter covers the estimated cost of the selected components and designed solutions.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

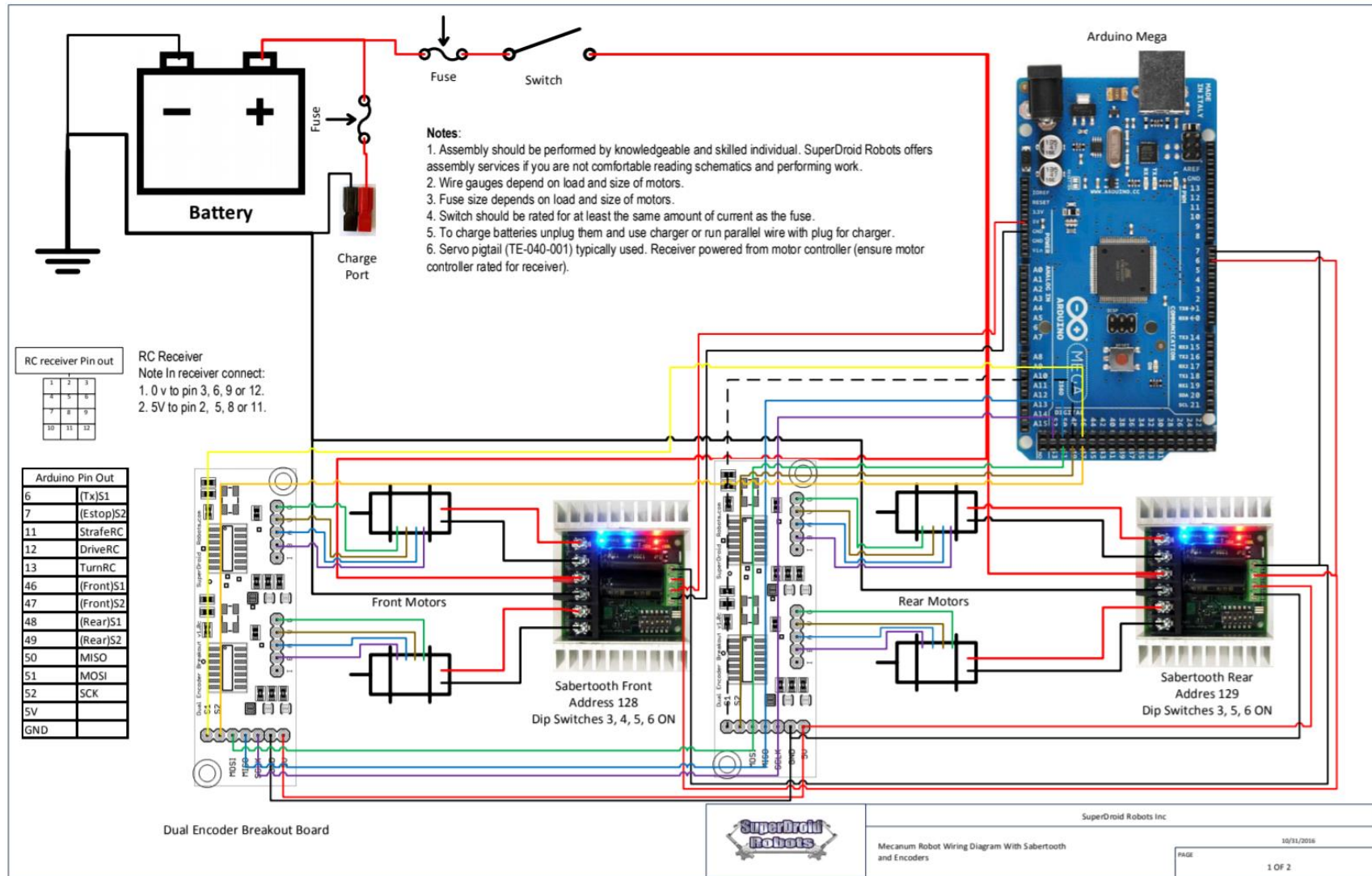
- [1] VIDEO: TalTech esitles mobiilset robotit tootmislogistika parandamiseks [WWW], <https://www.ttu.ee/taltech-esitles-mobiilset-robotit-tootmislogistika-parandamiseks>, (24.04.2020).
- [2] Types of Automated Guided Vehicles [WWW], <https://www.agvnetwork.com/types-of-automated-guided-vehicles#agv-manufacturers-in-eu>, (28.03.2020).
- [3] Automatic Guided Vehicles [WWW], <http://www.mhi.org/fundamentals/automatic-guided-vehicles>, (28.03.2020).
- [4] Intelligent Robot Solutions for Logistics [WWW], <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5868638/Geek+%20Product%20Catalogue-2019.pdf>, (25.03.2020).
- [5] EK Automation Blocklager [WWW], https://ek-automation.com/fileadmin/media/02_loesungen/01_blocklager/ek_automat_01_blocklager.jpg, (28.03.2020).
- [6] Tugger train [WWW], <https://i.ytimg.com/vi/4mAVdAJPTu8/maxresdefault.jpg>, (28.03.2020).
- [7] KUKA omniMove [WWW], https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/images/products/mobility/kuka_omnimove_header.jpg?rev=7952e3356ca349218ae55d018a0c7aab&w=1400&hash=8E72C04645CD2799E83D523772C621A9, (28.03.2020).
- [8] Why would I want an AGV [WWW], <http://www.mhi.org/downloads/industrygroups/agvs/elessons/why-would-i-want-an-agv.pdf>, (28.03.2020).
- [9] Design Optimization of Amazon Robotics [WWW], <http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.acis.20160402.17.html>, (22.03.2020).
- [10] Three Engineers, Hundreds of Robots, One Warehouse [WWW], <https://web.archive.org/web/20160917221846/http://spectrum.ieee.org/robotics/robotics-software/three-engineers-hundreds-of-robots-one-warehouse>, (22.03.2020).
- [11] Shenzhen Wellwit Robotics Co.,Ltd W500 [WWW], 1.1.4 Shenzhen Wellwit Robotics Co.,Ltd W500, (25.03.2020).
- [12] Scallog Bobby [WWW], <https://www.scallog.com/en/mobile-bobby-robot/>, (25.03.2020).
- [13] A kind of rotating lifting mechanism and AGV carrier [WWW], <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057648469/publication/CN205855908U?q=pn%3DCN205855908U>, (29.06.2020).
- [14] AGV Lifting mechanism [WWW], <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/057333563/publication/CN205709673U?q=pn%3DCN205709673U>, (29.03.2020).
- [15] AGV lift and rotary mechanism and AGV [WWW], <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/065449141/publication/CN208559595U?q=pn%3DCN208559595U>, (29.03.2020).
- [16] AGV elevating gear [WWW], <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/065282536/publication/CN208500212U?q=pn%3DCN208500212U>, (29.03.2020).
- [17] Extensible AGV lifting device [WWW], <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/068668834/publication/CN110526167A?q=pn%3DCN110526167A>, (30.03.2020).

- [18] AGV Lifting Devices [WWW], <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/064785828/publication/CN208327265U?q=pn%3DCN208327265U>, (31.03.2020).
- [19] L-AGV and L-AGV lifting platform control method [WWW], <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/064870075/publication/CN109095387A?q=pn%3DCN109095387A>, (31.03.2020).
- [20] Brief introduction of Mecanum wheel [WWW], <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/mecanum-wheels-introduction-10009.pdf>, (24.04.2020).
- [21] Topological Design Methods for Mecanum Wheel Configurations of an Omnidirectional Mobile Robot [WWW], <file:///C:/Users/Kahl/Downloads/symmetry-11-01268.pdf>, (24.04.2020).
- [22] TETRIX MAX Mecanum Wheel [WWW], https://asset.pitsco.com/sharedimages/resources/mecanumwheel_resourcepage.pdf, (24.04.2020).
- [23] NM1227A ratas [WWW], <https://ozrobotics.com/shop/5-inch-heavy-duty-industrial-mecanum-wheel-nm127a/>, (24.04.2020).
- [24] Motor sizing calculations [WWW], <https://www.orientalmotor.com/technology/motor-sizing-calculations.html?hsCtaTracking=7d24f772-0c8b-454c-96cf-04692c17a204%7C0d406f05-bb2c-4cfc-b93f-8639aeabaaa2>, (24.04.2020).
- [25] Mehaanikainseneri käsiraamat, üldtoimetaja Priit Kulu., TTÜ Kirjastus, 2012.
- [26] Maxon configured drive [WWW], https://www.maxongroup.com/camroot/pdf/b7b8f9b47fe2_4.pdf, (24.04.2020).
- [27] Leadscrew [WWW], <https://en.wikipedia.org/wiki/Leadscrew>, (25.04.2020).
- [28] Ball Screws – A High Load Motion Control Solution [WWW], <https://www.thomsonlinear.com/en/support/20160104-na>, (25.04.2020).
- [29] Linear Actuator Guide [WWW], <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/linear-actuator-guide.php#sthash.dLxoWbWk.dpbs>, (25.04.2020).
- [30] A4 50mm Linear actuator [WWW], <https://www.aliexpress.com/item/4000844526213.html?spm=a2g0o.detail.1000023.15.4dfe79fd4zVBUz>, (24.04.2020).
- [31] Strength vs Density. Level 2 Materials Chart [WWW], <https://grantadesign.com/education/students/charts/>, (25.04.2020).
- [32] Materjalid, Tallinn: P. Kulu, J. Kübarsepp, E. Hendre, T. Metusala, O. Tapupere, 2001.
- [33] Teaching Engineering Materials [WWW], http://web.mit.edu/course/3/3.225/refs/Teaching_Engineering_Materials.pdf, (25.04.2020).
- [34] Arduino Mega 2560 R3 [WWW], <https://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/arduino-mega-2560-r3/1292/>, (05.05.2020).
- [35] Sabertooth Dual 60A motor drive [WWW], <https://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/sabertooth-dual-60a-motor-driver/1225/>, (05.05.2020).
- [36] Dual LS7366R Quadrature Encoder Buffer [WWW], <https://www.superdroidrobots.com/shop/item.aspx/dual-ls7366r-quadrature-encoder-buffer/1523/>, (05.05.2020).
- [37] Sheet Metal Fabrication [WWW], <https://fractory.com/>, (20.05.2020).

- [38] Schematic_Mecanum_wheel_Sabertooth_encoders [WWW], https://www.superdroidrobots.com/product_info/Schematics/Schematic_Mecanum_wheel_Sabertooth_encoders.pdf, (05.05.2020).
- [39] Kiva-Systems-New-Bot [WWW], <https://nocalabs.com/wp-content/uploads/Kiva-Systems-New-Bot-Closeup-Small-1024x624.png>, (22.03.2020).
- [40] Quicktron Zhuque M60C [WWW], <http://www.flashhold.com/english.php/product-info/4/20>, (22.03.2020).

LISAD

Lisa 1 Veosüsteemi juhtimisskeem [38]



GRAAFILINE OSA

- 1. AR702.00.00.00, Robot (A2)**
- 2. AR702.01.00.00, Konstruktsioon (A2)**
- 3. AR702.01.00.01, Painutatud leht 166x440x166
t=4 (A3)**
- 4. AR702.01.00.03, Painutatud lehtmetall 52,7 x
432,5 x 160 (A3)**
- 5. AR702.02.01.00, Tõsteplaat (A3)**
- 6. AR702.02.01.01, Painutatud leht 600x440x30 t=2
(A3)**