



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
INSENERITEADUSKOND
Instituudi nimetus

MEHITAMATA MAISMAASÕIDUKI TÜÜPI ROBOT MAASTIKU KLASSIFITSEERIMISEKS

UGV TYPE ROBOT FOR TERRAIN CLASSIFICATION

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Edvard Ehiloo

Üliõpilaskood 164512MAHB

Juhendaja: Mart Tamre, Professor

(Tiitellehe pöördel)

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: Edvard Ehiloo

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

25. mai 2020

Juhendaja: Mart Tamre

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Edvard Ehiloo (*autori nimi*) (sünnikuupäev: 27.01.1997)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Mehitamata maastikusõiduki tüüpo robot maastiku klassifitseerimiseks,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

Mart Tamre,

(juhendaja nimi)

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.

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

Edvard Ehiloo (*allkiri*)

25.05.2020 (*kuupäev*)

TalTech Instituudi nimetus

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Edvard Ehiloo, 164512MAHB (nimi, üliõpilaskood)
Õppekava, peeriala: MAHB Mehhatroonika (kood ja nimetus)
Juhendaja(d): Professor, Mart Tamre, 620 3202 (amet, nimi, telefon)
Konsultant:(nimi, amet)
..... (ettevõtte, telefon, e-post)

Lõputöö teema:

(eesti keeles) Mehitamata maismaasõiduki tüüpi robot maastiku klassifitseerimiseks

(inglise keeles) UGV type robot for terrain classification

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Kontrollida robotplatvormi tööseisukorda ja vajadusel muuta see tööväimeliseks.
2. Luua lahendus robotplatvormi kohandamiseks maastiku klassifitseerimise ülesannete täitmiseks.
3. Hinnata kohandamise lahenduse edukust ja vajadusel pakkuda lahendusele vajalikke muudatusi.

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Robotil olemasolevate elektroonikakomponentide töökorra kontroll	17.03.20
2.	Roboti elektriskeemi komponentide valimine	23.03.20
3.	Roboti elektriskeemi koostamine	27.03.20
4.	Elektroonika komponentide kokkupanek, seadistamine ja	03.04.20
5.	Kaamerate kinnituse projekteerimine ja valmistamine	10.04.20
6.	Maapinna kokkusurutavuse mõõtmisrakise projekteerimine	20.04.20
7.	Maapinna kokkusurutavuse mõõtmisrakise valmistamine	24.04.20
8.	Roboti katsetamine	01.05.20
9.	Lõputöö dokumentatsiooni täitmine ja roboti viimased täiendused	15.05.20

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "19" mai 2020.a

Üliõpilane: Edvard Ehiloo ".....".....201....a
/allkiri/

Juhendaja: Mart tamre ".....".....201....a
/allkiri/

Konsultant: ".....".....201....a

Programmijuht: Mart Tamre

/allkiri/

/allkiri/

".....".....201....a

Kinnise kaitsmise ja/või lõputöö avalikustamise piirangu tingimused formuleeritakse pöördel

SISUKORD

EESSÕNA	8
SISSEJUHATUS.....	9
1. Pinnasemehaanika alused	10
1.1 Pinnase mõiste.....	10
1.2 Pinnase koostis.....	10
1.3 Pinnaseosakeste suurus ja kuju	10
1.4 Mehaanilised omadused	11
1.5 Pinnase jäikus.....	11
1.6 Kokkusurutavuse määramine laboratoorteimidega	12
1.6.1 Ödomeeterteimiga kokkusurutavuse määramine.....	12
1.6.2 Kolmtelgse surveseadmega kokkusurutavuse määramine	13
1.7 Kokkusurutavuse välikatseline määramine.....	13
1.7.1 Koormusplaadi katse pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramiseks.....	14
1.7.2 Pressiomeetriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine	14
1.7.3 Dilatomeetriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine	15
1.7.4 Surupenetrometriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine	16
1.7.5 Löökpenetrometriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine	16
1.7.6 Keerdpenetrometriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine.....	17
1.8 Kokkusurutavuse meetodite võrdlus ja kasutus olemasolevatel mehitamata maastikusõidukitel	17
1.8.1 Kokkusurutavuse määramise meetodite võrdlus	18
1.8.2 Kokkusurutavuse määramise meetodite kasutus teistel mehitamata sõidukitel	18
1.8.3 Kokkusurutavuse määramise meetodi valik.....	20
2. Olemasoleva roboti kirjeldus.....	21
2.1 Roboti mehaanilise osa kirjeldus	21
2.1.1 Roboti alumine osa	21
2.1.2 Roboti ülemine osa	22
2.2 Roboti elektroonilise osa kirjeldus	22
2.2.1 Roomikute mootori kiiruskontroller.....	22

2.2.2 Roomikute mootorid.....	23
2.2.3 Robotplatvormi kontrolleri.....	23
2.2.4 Robotplatvormi akud	24
2.3 Roboti elektroonilise osa seisukorra määramine	24
2.3.1 Mootorite kiiruskontrolleri seisukorra määramine	24
2.3.2 Robotplatvormi kontrolleri seisukorra määramine	25
2.3.3 Roomikute mootorite seisukorra määramine	26
3. Kaamerate kinnitus	27
3.1 Kaamerate parameetrid.....	27
3.2 Kaamerate kinnitusviisi valik.....	27
3.3 Kaamerate kinnituse projekteerimine	29
4. Maapinna klassifitseerimise rakis	33
4.1 Maapinna klassifitseerimise rakise projekteerimine.....	33
4.1.1 Katseseadme otsak.....	33
4.1.2 Katsekeha liikumist juhtiv telg	34
5. Roboti komponendid.....	35
5.1 Roomikute mootori kiirusregulaator.....	35
5.2 Maapinna klassifitseerimise kaugusanduri valik	36
5.3 Globaalse positsioneerimissüsteemi mooduli valik.....	37
5.4 Robotplatvormi ja arvuti vaheline mikrokontroller	38
5.5 Trükkplaat	39
6. Programmikood.....	41
6.1 Processing kood	41
6.2 Arduino kood	41
7. Robotplatvormi katsetamine ja edasiarendamise võimalused.....	42
7.1 Robotplatvormi katsetamine	42
7.2 Robotplatvormi edasiarendamise võimalused	42
KOKKUVÕTE	43
SUMMARY	44
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	45
LISAD	48

EESSÕNA

Lõputöö teema sõnastati Tallinna Tehikaülikooli mehhatroonika ja autonoomsete süsteemide keskuse poolt. Töö eesmärgiks oli kontrollida olemasoleva lahenduse tööseisukorda, vajadusel parandada seda ja kohandada see maapinna klassifitseerimise ülesannete täitmiseks.

Võtmesõnad:

SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärgiks on kohandada olemasolev mehitamata robotplatvorm maastiku kokkusurutuse hindamise ülesandeks. Maapinna kokkusurutuse hindamise teel ja hindamistulemuste kaardistamisel on võimalik vähendada ajalisi ja majanduslike kulutusi ehitusel, põllumajanduses ja päästetöödel. Pinnase klassifitseerimine abistaks päästeoperatsioonidel õnnetuskohani viiva teekonna paremal planeerimise ja päästetöödeks vajaliku tehnika valikul. Põllumajanduses võimaldaks pinnase klassifitseerimine määrata alad rohkem kokkusurutud pinnasega, mis vajavad rohkem hoold suurema saagikuse saavutamiseks. Olemasolevad lahendused klassifitseerivad maastikku autonoomseks liikumiseks, et vähendada platvormi kinnijäämise võimalust. Antud lõputöö tulemusena valmiv platvorm kogub andmeid pinnase kokkusurutavuse kohta kaardistamiseks. Töö käigus tuleb leida lahendus robotplatvormile maapinna klassifitseerimise rakise paigaldamiseks, kaamerate kinnitamiseks, akude paigaldamiseks ja roboti kaugjuhtimiseks puldiga. Maapinna klassifitseerimise rakise kinnitus peab võimaldama rakise asetuse muutmist sõltuvalt pinnases reljeefist ja roboti asukohast reljeefi elementidel. Robotile kinnitatava Specim IQ spektraalkaamera ja Intel Real Sense D435i stereokaamera asend peab olema reguleeritav vastavalt pinna horisondile. Kaamerate kinnitusviis peab võimaldama kaamerate lihtsa ja kiire paigaldamise ja eemaldamise. Akud peavad olema lihtsalt ligipääsetavad ja eemaldatavad laadimise eesmärgil. Robotplatvormi 3d mudeli loomiseks kasutatakse Dassault Systemes Solidworks2019 tarkvara. Anduritega, robotplatvormi kontrolleri ja arvutiga suhtlemiseks valmistatava plaadi skeemi ja trükkplaadi disain tehakse KiCad elektroonika disainimise programmis. Arvuti ja robotplatvormi vahel suhtleva programmi kirjutamiseks kasutatakse Arduino IDE tarkvara. Arvuti ja suhtlusplaadi vaheliseks koostööks vajaliku rakenduse loomiseks kasutatakse Processing tarkvara. Töö alguses on tähtis määrata olemasoleva robotplatvormi seisukord, kuna sellest lähtuvalt toimub vajalike komponentide valik. Peale vajalike komponentide valikut on vajalik koostada elektriskeem ja 3D mudel detailide sobivuse kontrollimiseks.

1. Pinnasemehaanika alused

1.1 Pinnase mõiste

Pinnase mõiste on erialast sõltuvalt erineva tähendusega. Antud töös lähtutakse pinnase mõistele ja pinnase klassifitseerimisele pinnasemehaanika vaatenurgast. Pinnasemehaanikas tähistab pinnase mõiste looduslikke materjale, mis on moodustatud üksikutest omavahel nõrgalt seotud või sidumata teradest. Teradevahelise sideme olemasolul on sidemete tugevus oluliselt väiksem terade tugevusest [1].

1.2 Pinnase koostis

Pinnas koosneb mineraalsetest või orgaanilise päritoluga teradest, terade vahel asuvast vedelikust ja gaasist. Pinnase koostis liigitatakse sõltuvalt õhu ja vee esinemisest teradevahelistes poorides kolmefaasiliseks või kahefaasiliseks. Vesi võib pinnases esineda poorides vabas olekus, osakese pinnale adsorbunud olekus või difusiooniveena adsorbunud vee ümber. Gaaside osatähtsus on pinnase koostises tunduvalt väiksem. Kui gaas sisaldub pinnas, siis võib ta olla pinnases lahtiselt atmosfääriga ühendatud poorides, suletud poorides pinnasevee vahel või pinnasevee sees lahustunud kujul. Kuna pinnaseosakeste teke on põhjustatud aluspõhja kivimite mehaanilise või keemilise murenemise teel, siis nende suurus võib olla väga erinev. Pinnaseosakeste asukoht võib mõnikord asuda algse kivimi asukoha lähedal, kuid tavaliselt on terade tekkekoht terade lõplikust asukohast kaugel. Tekkinud terad enamike juhtude korral teisaldatakse tekkekohalt vee, jääliustike või tuule mõjul. Terade rändamise käigus jätkub keemiline ja mehaaniline murenemine. Peale murenemise jätkumise toimub ka terade segunemine teiste teisaldatud osakestega [1].

1.3 Pinnaseosakeste suurus ja kuju

Pinnaseosakeste suurus ja kuju on seoses nende tekkeviisiga oluliselt varieeruv. Pinnaseosakeste läbimõõt võib muutuda kümnetest sentimeetritest kuni kolloidosakesteni suurusega alla 0,001 millimeetri. Jämeda fraktsiooni või kivide kõrvale jätmisel kuuluvad pinnaseosakeste hulka kruusa, liiva mölli ja saue terad, mille nimetused on moodustatud nende osakeste suuruse järgi. Pinnaseosakeste nimetused on põhiliselt seotud nende mineroloogilise koostisega või pinnase mehaaniliste omadustega. Tabelis 1.1 on esitatud pinnaseosakeste fraktsioonide ja alafraktsioonide nimetused Eesti normide järgi ja nende osakeste mõõtmed. Kuna saueosakeste kuju on

erinev kruusa-, liiva- ja tolmuterade kujust, siis on saueosakeste suuruse puhul tegemist ekvivalentse mõõduga [1].

Tabel 1.1 Pinnaseosakeste nimetused ja suurus [1]

1. Fraktsioon	2. Alafraktsioon	Osakeste suurus d mm
Rahnud		>200
Veerised		60 kuni 200
Kruusaterad	Kruusa jämeterad	20 kuni 60
	Kruusa keskterad	6 kuni 20
	Kruusa peenterad	2 kuni 6
Liivaterad	Liiva jämeterad	0,6 kuni 2
	Liiva keskterad	0,2 kuni 0,6
	Liiva peenterad	0,06 kuni 0,2
Mölliosakesed	Mölli jämeosakesed	0,02 kuni 0,06
	Mölli keskosakesed	0,006 kuni 0,02
	Mölli peenosakesed	0,002 kuni 0,006
Saueosakesed		<0,002

1.4 Mehaanilised omadused

Pinnase mehaanilised omadused sõltuvad nii aeglaselt muutuvatest teguritest, milleks on näiteks osakeste mineroloogiline koostis, pinnase tekkeviis ja osakeste suurus, kui ka kiiresti muutuvatest teguritest nagu veesisaldus pinnases, keemilised ja mehaanilised mõjud pinnasele. Aeglaselt muutuvad tegurid määravad pinnasel terade tugevuse, teradevahelised hõõrdejõu, terade mõõtmete erinevuse mitmekesisuse. Pinnase mehaanilisi omadusi kirjeldavad pinnase jäikus, nihketugevus, ja pingejaotus [1].

1.5 Pinnase jäikus

Pinnase jäikus on pinnase omadus, mis määrab pinnase vastupanu deformeerumisele pingeseisundi muutudes. Pinnase jäikus määrab deformatsioonide ja pingete vahelistes seostes pinnase jäikuse. Teisisõnu määrab pinnase jäikus pinnase vajumise koormuse rakendamisel pinnasele. Pinnase vajumise põhjusteks on pinnase mahumuutumine ja väga suurte koormuste puhul ka nihkedeformatsioonide teke pinnases. Mahumuutus toimub pinnase puhul pinnase poorsuse vähenemisel ehk tihenemisel. Teisejärgulise osa mahumuutusest moodustab ka pinnaseosakeste deformeerumine, kuid selle eraldi arvestamine ei oma suurt tähtsust. Seepärast kasutatakse pinnase deformeeritavuse puhul jäikuse termini asemel kokkusurutavuse terminit. Kokkusurutavuse määramiseks

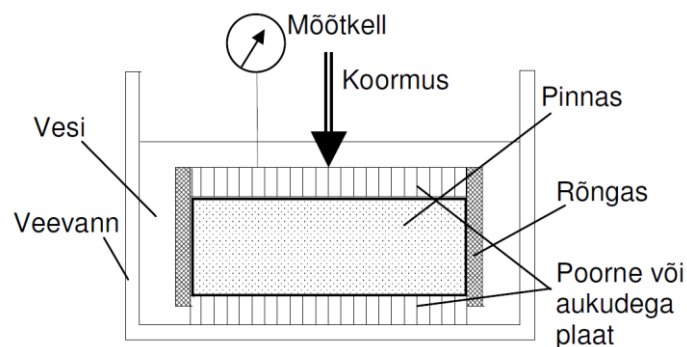
on võimalik kasutada laboriteime, välikatseid või empiirilisi seoseid. Empiiriliste seoste kasutamisel leitakse kokkusurutavus mõne lihtsamini määratava omadusega [1].

1.6 Kokkusurutavuse määramine laboratoorteimidega

Pinnase kokkusurutavuse laboratoorseks määramiseks tuleb uuritavalt alalt võtta pinnase proov, mis peab säilitama uuritava ala parameetrid, nagu niiskus, ajapikku tekkinud struktuursidemed, pinnase loodusliku tihenemise ja poorid. Proovid võetakse pinnase sisse surutud lõikerõnga abil, mille pinnasesse süvistamiseks ei tohi kasutada lööke ega vibreerimist. Vibreerimine või löögid kutsuvad esile proovide loodusliku tihenemise muutuse [1].

1.6.1 Ödomeeterteimiga kokkusurutavuse määramine

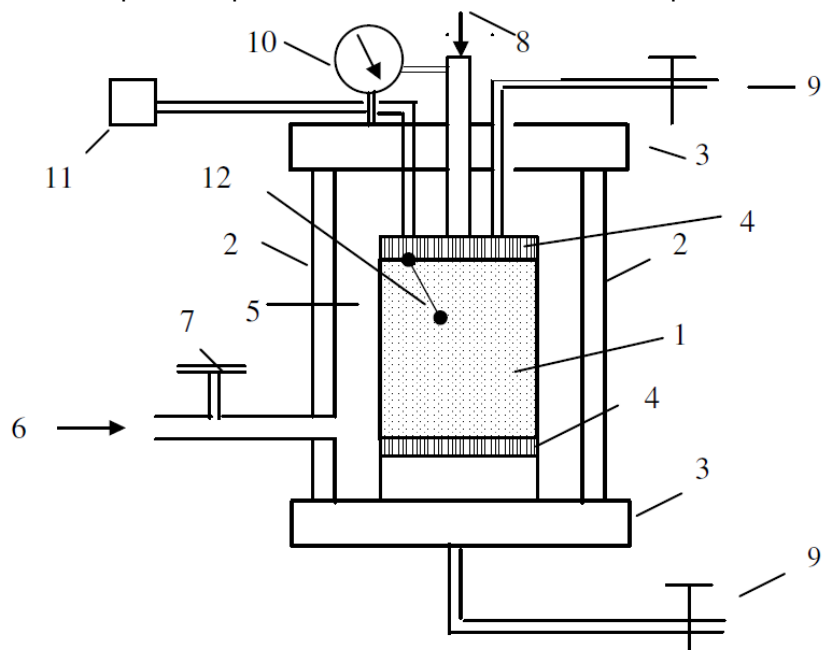
Ödomeeterteim on seade kokkusurutavuse laboratoorseks määramiseks, mis väldib pinnaseosakeste liikumist horisontaalselt ja võimaldab osakestel liikuda ainult vertikaalsuunaliselt. Seade koosneb jäigast rõngast, mille sisse asetatakse proov. Rõnga otsad suletakse poorse plaadiga. Pinnase katsetamiseks pingestatakse proov koormisseadmes, milleks tavaliselt on kangisüsteem, kuid mõnikord ka hüdraulika. Proovi koormamisel tekkiva mahumuutusest tingitud kõrguse vahe mõõdetakse mõõteseadmega teatud ajavahemike tagant. Mõõtkella näitude stabiliseerumisel suurendatakse koormis ja mõõdetakse kõrgust uuesti. Koormise suurendamist jätkatakse vajaliku lõppkoormuse saavutamiseni. Peale lõppkoormuse saavutamist vähendatakse koormust sammude kaupa, fikseerides samal ajal mõõtekella näite. Koormuse vähendamise ehk dekompressiooni lõppemisel viiakse läbi vajadusel lisa rekompresiooni ja dekompressiooni tsüklid. Kasutades elastsusteooria seoseid ruumipinge olukorraga arvutatakse horisontaalsuunalised pinged. Teades horisontaalsuunaliste pingete väärtuseid ja vertikaalsuunalise pinge väärtust, avaldatakse deformatsioonimoodul E Poisson'i tegurist sõltuva suuruse ja suhtelise deformatsiooni pinge ühikulise muutuse kaudu [1].



Joonis 1.2 Ödomeetri skeem [1]

1.6.2 Kolmetelgse surveseadmega kokkusurutavuse määramine

Kolmetelgse surve seadmel on hermeetiline vedelikuga täidetud kamber, mis võimaldab survestada pinnaseproovi külgedest vajaliku surveni, jättes vertikaalsuunalise surve eraldi muudetavaks. Kolmetelgse surve seadmega kokkusurutavuse määramisel suurendatakse külgsurve soovitatava tasemeni, milleks on tavaliselt geostaatiline surve proovi võtmise sügavusel. Kuna külgsurve muutumine on võimalik vertikaalsurve tõttu, siis võib vertikaalsurvet vaadelda igas suunas mõjuva hüdostaatilisest pingest ja deviaatoripingest koosneva survena. Peale külgsurve rakendamist viiakse läbi vertikaalsurve astmeline tõstmine ja langetamine ödomeetriga kokkusurutavuse määramisega sarnasel viisil. Kolmetelgse surve seadme ehitus on ödomeetri ehitusega võrreldes tunduvalt keerukam ja koosneb rohkematest osades, kuid külgsurve rakendamise ja muutumise esinemine võimaldab katsetada pinnase omadusi võimalikult ligilähedaselt otseselt pinnasemassiivis esinevate mahumuutustega. Osadel veelgi keerukama ehitusega kolmetelgse surve seadmetel on võimalik mõõta vertikaalsuunalise muutuse kõrval ka pinnase proovi läbimõõdu muutumist või pinnase mahu muutust [1].



Joonis 1.2 Kolmetelgse surveaparaadi skeem: 1 – proovikeha, 2 – kambri läbipaistvad seinad, 3 – kambri otsad, 4 – poorsed plaadid, 5 – kambrit täitev vedelik, 6 – külgsurve, 7 – külgsurvehoidja, 8 – vertikaalkoormus, 9 – vee väljavoolu torud, 10 – mõõtekell, 11 – poorirõhu mõõtur, 12 – poorirõhu andur [1]

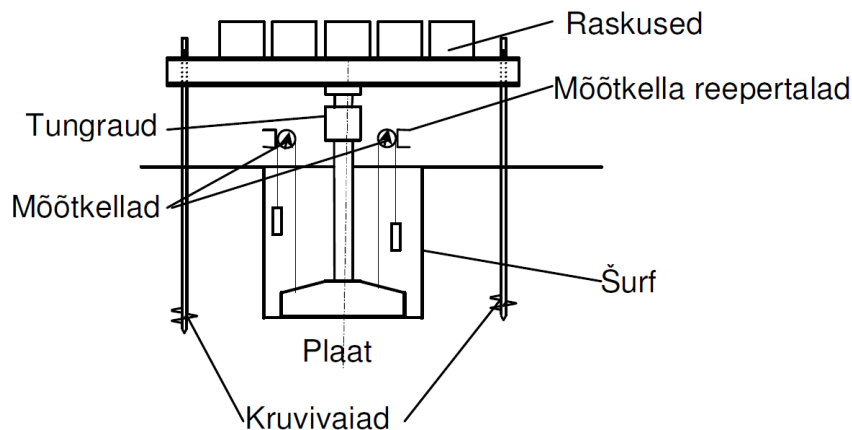
1.7 Kokkusurutavuse välikatseline määramine

Kokkusurutavuse välikatselisel määramisel mõõdetakse vajalik väärtus otseselt pinnasemassiivis, rikkumata pinnaseproovide struktuuri, mis on laboratoorse teimimisega võrreldes välikatselise meetodi eeliseks. Kokkusurutavuse määramiseks

välikatselise meetodiga on võimalik kasutada koormusplaadi katset, pressiomeetrit, dilatomeetrit või seismilist meetodit. Peale eelnevalt mainitud seadmete kasutatakse ehitusgeoloogilistel uuringutel ka suru-, löök-, ja keerdpennetromeetreid [1].

1.7.1 Koormusplaadi katse pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramiseks

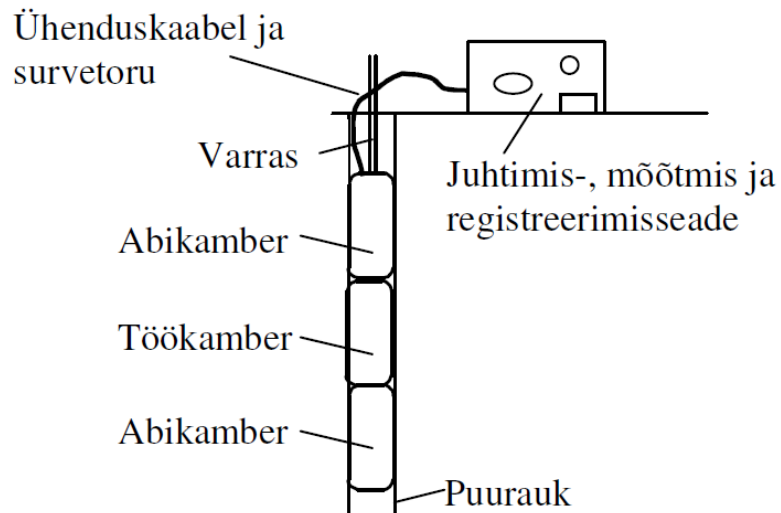
Koormusplaadi katsega pinnase deformeeritavuse määramiseks kasutatakse sisuliselt väikest vundamendi mudelit, mille koormamisel leitakse vajumise sõltuvus koormusest vundamendi peal. Pinnase pealmisel kihil katsetamisel kasutatakse tavaliselt koormisplaadina 0,5 ruutmeetrise pindalaga sõõri ja puuraugus katsetamise puhul kasutatakse 0,03 ruutmeetrise pindalaga plaati. Koormuse rakendamine toimub raskuste asetamisega koormatavale platvormile või tungraua kaudu, mis toetub kruvivaiade külge kinnitatud taladele. Tungrauaga koormuse rakendamise puhul on tarvis pidevalt korrigeerida selle poolt tekitatud jõudu, kuna plaadi vajumisel hakkab jõud vähenema. Kuna jõu vähenemine plaadi vajumisel toimub pidevalt ja selle korrigeerimine vajab suurt täpsust, siis käsitsi jõu reguleerimise asemel kasutatakse koormuse püsivuse tagamiseks elektroonilisi või hüdraulilisi lisaseadmeid [1].



Joonis 1.3 Koormusplaadi katse skeem [1]

1.7.2 Pressiomeetriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine

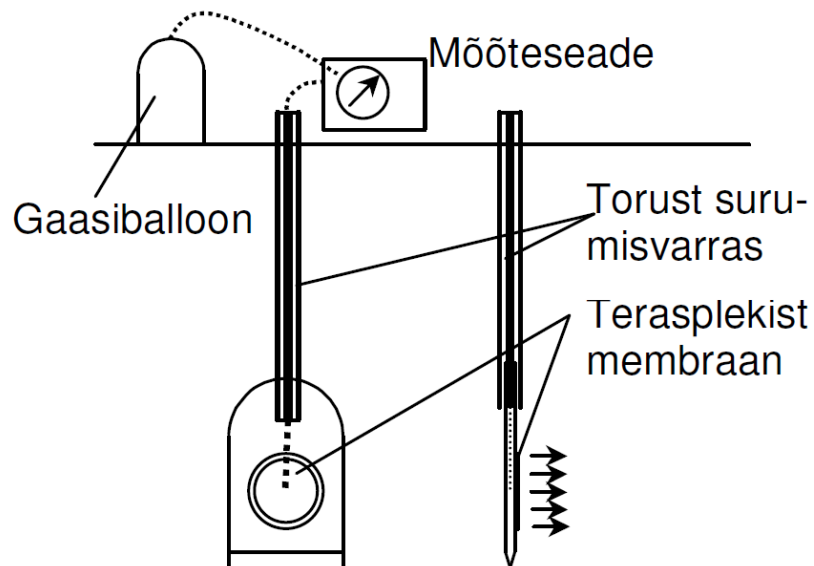
Deformatsioonimooduli määramiseks sügavamal asuvatel pinnakihtidel kasutatakse pressiomeetrit. Pressiomeetrite hulgas on kõige rohkem tunnustatud Menard tüüpi pressiomeetrid, mis koosnevad vee rõhu all laienevast silindrist. Silinder lastakse eelnevalt valmistatud puurauku. Sellele järgneb vee rõhu järk-järguline suurendamine silindris, tekitades ümbritseva pinnase deformatsiooni. Pressiomeetriga mõõdetav kokkusurutavus on radiaalsuunaline, mitte vertikaalne. Seoses pinnase anisotroopsusega pole deformeeritavuse väärtus eri suundades ühesugune [1].



Joonis 1.4 Pressiomeetri skeem [1]

1.7.3 Dilatomeetriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine

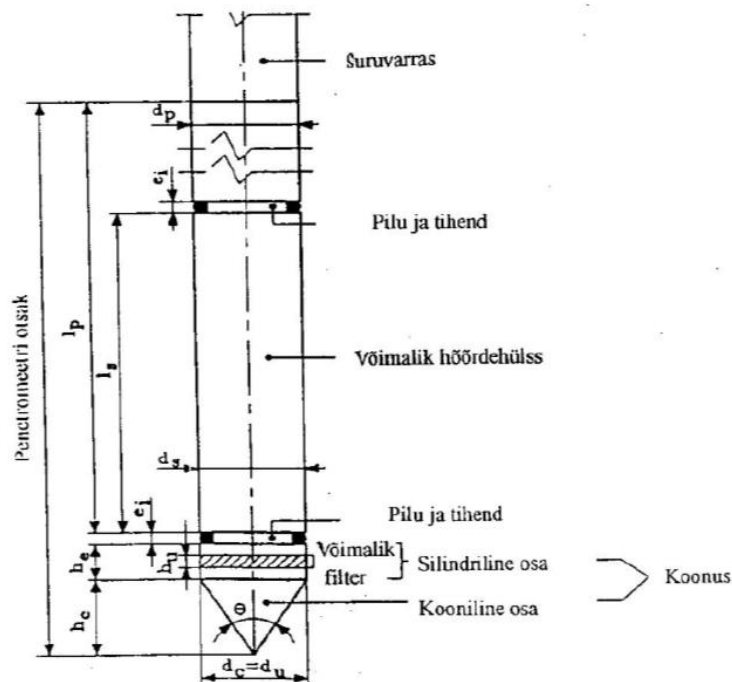
Dilatomeeter on pinnase deformeeritavust määrav seade, mis koosneb deformatsioonimõõturist, teraslehest ja teraslehe sisse monteeritud terasest survekambrist. Deformatsioonimooduli määramiseks kasutatakse survekaamera membraani surve tõstmisel tingitud pinge ja kambri paisumise vahelist seost. Pressiomeetriga sarnaselt mõõdab dilatomeeter deformatsioonimoodulit ainult horisontaalsuunas [1].



Joonis 1.5 Dilatomeetri skeem [1]

1.7.4 Surupenetromeetriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine

Surupenetromeetriga mõõtes mõõdetakse surumiseks vajalikku jõudu. Mobiilsetel mõõteplatvormidel kasutatavate surupenetromeetriga mõõtmisel surutakse varda otsik pinnase sisse hüdraulika abil püsiva kiirusega. Hüdraulika kasutamisel on tavaliselt surupenetromeetri otsak elektriline ja saab mõõta peale koonustakistuse ka erikülghõõrdumist ja pooriveerõhku. Kätsiti kasutatava mõõteriista puhul pole otsakul elektrilisi andureid ja surumiseks kasutatava jõu mõõtmiseks kasutatakse mehaanilist dünamomeetrit [2].



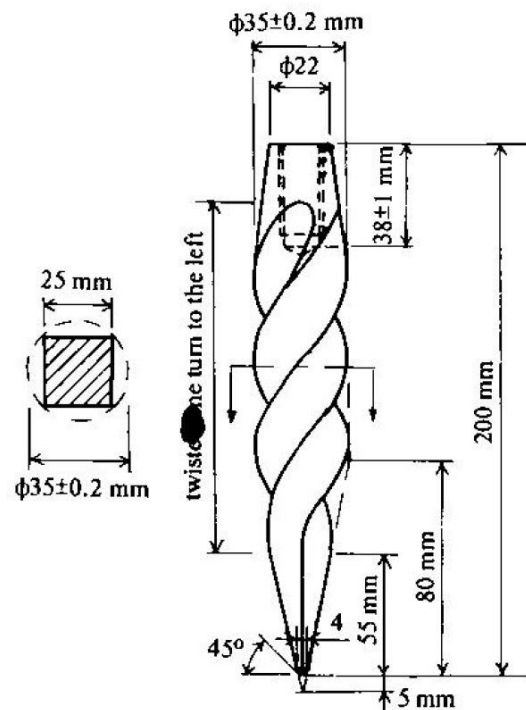
Joonis 1.6 Elektrilise surupenetromeetri otsak [2]

1.7.5 Löökpenetromeetriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine

Löökpenetromeetriga penetratsioonitakistuse määramiseks mõõdetakse haamri löökide arvu, mis kulub kindla pikkusega proovi süvistamiseks pinnasesse. Võrreldes surupenetromeetritega on löökpenetromeetrite tüüpe rohkem. Löökpenetromeetrid erinevad üksteisest peamiselt mõõtmete ja otsiku pinnasesse rammimiseks kasutatava haamri kaalu poolest [2].

1.7.6 Keerdpenetromeetriga pinnase kokkusurutavuse välikatseline määramine

Penetratsioonitakistuse määramisel keerdpenetromeetriga registreeritakse poolpöörete arv kindla sügavuse saavutamiseks. Liialt nõrga pinnase puhul, kus penetratsioonitakistus on väiksem kui 1000 njuutonit, tekib probleem mõõteriista süvistumisega pinnasesse. Sellise probleemi ilmnemisel kasutatakse keerdpenetromeetrit surupenetromeetrina ja surutakse mõõteotsak pinnasesse. Pinnasesse otsaku surumise ebaõnnestumisel keeratakse otsak edasi pinnasesse ja mõõdetakse 0,2 meetri võrra otsiku süvistamiseks vajalike poolpöörete arv. Keerdpenetromeeter koosneb kruvikujulisest otsakust, varrastest, rasukustest ja käepidemest või muust pööramiseadme [2].



Joonis 1.8 Keerdpenetromeetri otsak [2]

1.8 Kokkusurutavuse meetodite võrdlus ja kasutus olemasolevatel mehitamata maastikusõidukitel

Kokkusurutavuse meetodite valikuks võrreldakse kokkusurutavuse meetodeid üksteisega ja lisaks võrreldakse teistel mehitamata maastikusõidukitel kasutusel olevaid lahendusi.

1.8.1 Kokkusurutavuse määramise meetodite võrdlus

Kokkusurutavuse meetodite võrdlusel analüüsitakse mõõtelahenduse keerukust, mobiilsust ja osalise või täieliku automatiseerimise võimalust. Osade meetodite puhul saadakse kokkusurutavuse väärtus mitte otsesel mõõtmisel, vaid kaudsel mõõtmisel. Kokkusurutavuse meetodite võrdluse tulemusel valitakse meetod, mida kasutatakse robotil pinnase kokkusurutavuse hindamiseks. Võrreldavate omaduste tähtsus on vasakult paremale kasvavas reastuses, ehk vasakul on vähema tähtsusega omadused ja paremal suurema tähtsusega omadused. Samasugust omaduste reastamise loogikat kasutatakse ka järgnevatel omadusi võrdlevatel tabelitel.

Tabel 1.2 Kokkusurutavuse määramise meetodite võrdlus

Katsemeetodi nimetus	Katsemeetodi tüüp	Katsemeetodi seadme keerukus	Katsemeetodi seadme mobiilsus	Automatiseerimise võimalus
Ödomeetriga mõõtmine	Laboratoorne	Keeruline	Piiratud	Väga raske
Kolmtelgse surve mõõtmine	Laboratoorne	Väga keeruline	Oluliselt piiratud	Väga raske
Koormusplaadiga mõõtmine (pinnasepealne)	Välikatse	Kerge	Piiratud	Raske
Pressiomeetriga mõõtmine	Välikatse	Keeruline	Piiratud	Väga raske
Dilatomeetriga mõõtmine	Välikatse	Keeruline	Piiratud	Keskmine
Surupenetromeetriga mõõtmine	Välikatse	Keskmine	Väga hea	Kerge
Löökpenetromeetriga mõõtmine	Välikatse	Kerge	Väga hea	Kerge
Keerdpenetromeetriga mõõtmine	Välikatse	Keskmine	Väga hea	Keskmine

1.8.2 Kokkusurutavuse määramise meetodite kasutus teistel mehitamata sõidukitel

Tuginedes antud töö tegemisel läbitöötatud allikatele [3]-[6] jagunevad pinnase klassifitseerimisel robotplatvormid määramismeetodi järgi kahte gruppi. Esimesse gruppi kuuluvad robotplatvormid jälgivad sõiduparameetrite muutust ja pinnase mõju robotplatvormile [3][4]. Teine robotplatvormide grupp teostab pinnase

klassifitseerimiseks mõõtmisi spetsiaalsete mõõteseadmetega [5][6]. Antud töös kohandatav robotplatvorm ei sobi esimese grupiga, kuna need robotplatvormid on kiire sõidukiirusega ratastel liikuvad robotplatvormid. Seepärast keskendutakse teises grupis olevate robotplatvormidele. Kokkusurutavuse määramiseks kasutatavate meetodite võrdluseks valiti kaks mehitamata sõidukit, mis mõõdavad pinnase kokkusurutavust selleks mõeldud katseseadmega.

Bonirob on põldude viljaridade vaheliseks liiklemiseks arendatud universaalne mehitamata robotplatvorm. Robotplatvormi kere keskel on lisaseadmete paigaldamiseks mõeldud õõnsus. Paigaldades õõnsusesse pinnase penetreerimise takistuse mõõtmiseks väljatöötatud lisaseade, automatiseeriti pinnase kokkusurutavuse mõõtmine ja vähendati pinnase klassifitseerimiseks vajaliku inimese töötundide arvu. Lisaseade võimaldab pinnase proovimise asukohta täpse positsioneerimise GPS-i järgi. Katsel rakendatava surumisjõu turvalise väärtuse ületamisel peatatakse katse ja korratakse katse uues punktis. Katse nurjumisel uue katse tegemiseks ei vaja robot uude asukohta sõitmist, kuna katseseadme asukoht on lisaseadme mooduli sees mootorite abil muudetav. Lisaks horisontaalpinnas reguleerimisvabadusele on võimalik ka katseseadme vertikaalsuse muutmine katsepinna suhtes [5].

Mobiilse pinnaseproovimise robotiplatvormi arendamise eesmärgiks oli automatiseerida pinnase kokkusurutavuse määramine sõjalistes tingimustes inimohvrite vältimiseks. Pinnase kokkusurutavuse omaduse määramine sõjalistes tingimustes on vajalik maapinna kasutuskõlblikkuse hindamiseks lennuki maandumiseks. Lennuki maandumisväljaks sobivale alale võivad olla paigaldatud miinid või ala võib olla snaperi jälgimise all. Roboti kasutamine selliseks ülesandeks vähendab ka inimlike faktoritega tekitatud vigu mõõtmiste läbiviimisel [6].

Tabel 1.3 Kokkusurutavuse määramismeetodite kasutus teistel robotplatvormidel

Robotplatvorm	Katseseadme asendi reguleerimine	Proovimise maksimaalne sügavus	Katseseadme asukoht robotplatvormi küljes	Katseseadme tüüp
Bonirob	Vertikaalne ja horisontaalne	0,8 meetrit	Keskel	Surupenetromeeter
Lightweight UGV	Puudub	0,06 meetrit	Keskel	Surupenetromeeter

Tabelist 1.3 saab järeldada, et kokkusurutavuse määramisel kasutatakse pigem surupenetromeetriga mõõtmist. Surupenetromeetri soodsaim asukoht robotplatvormil on robotplatvormi keskpunkt. Roboti keskele katseseadme paigutamisel on võimalik kasutada võimalikul suurt surumisjõudu, kuna surumisjõule mõjub vastu kogu roboti kaal. Katseseadme surumisjõu valikul ei ole soovitatav ületada roboti kaalu, kuna muidu võib katseseade kokkusurutavuse määramise käigus tõsta roboti maapinnast lahti. Surupenetromeetri puhul on tähtis valida õige proovi asetus ja tähtis on ka robotplatvormi mass, kuna need parameetrid mõjuvad otseselt pinna proovimise võimalustele.

1.8.3 Kokkusurutavuse määramise meetodi valik

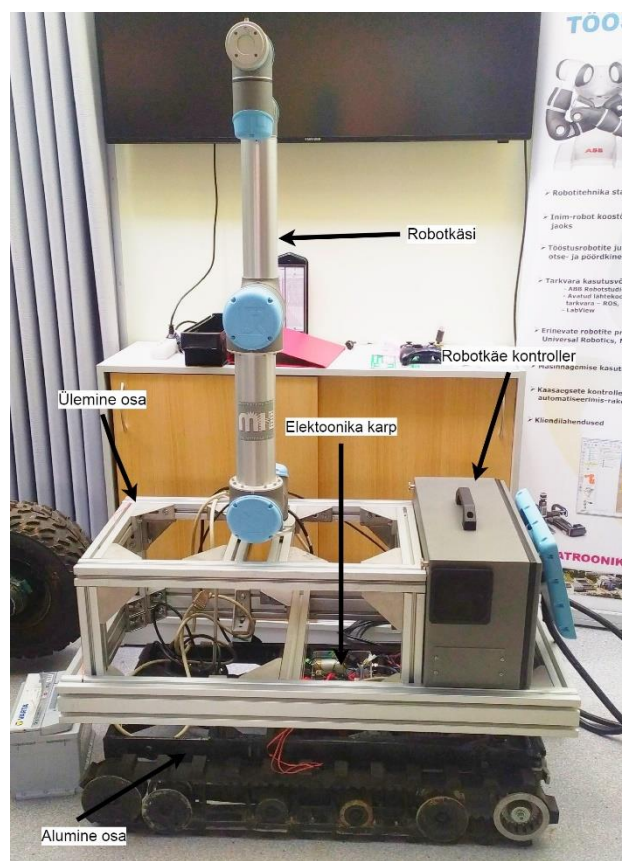
Kokkusurutavuse meetodite võrdlustabelist on kõige paremini sobivad penetromeetriga mõõtmiste tegemine. Sama on näha ka tabelis 1.3. Peale penetromeetriga mõõtmiste tegemist tuleb pinnase kokkusurutavuse arvutamiseks kasutada pinnaseliigist sõltuvat tegurit, mida oleks võimalik määrata kaamerate abil. Kolme erineva penetromeetriga mõõtmisviisi vahel on võrdlustabeli järgi parimaks löökpenetromeetriga mõõtmine, kuna katsemeetodi jaoks kasutatava seadme keerukus kolme penetromeetri seas on madalaim. Löökpeneetromeetri mobiilsus on võrreldes surupenetromeetri ja keerdpenetromeetriga parem, kuna automatiseerimiseks kasutatavaid andureid ja täitureid on vähem. Teistel robotplatvormidel kasutatav surupenetromeetriga pinnase kokkusurutavuse määramisviis eeldab katseseadme paigutamist roboti keskele. Antud töös kohandatava robotplatvormi peal oleks roboti keskele katseseadme paigutamine oluliselt raskendatud seoses robotplatvormi veermikuga. Veermik jääks katseseadmele ette või kui katseseade mahuks veermiku kõrvale, siis oleks katseseadme vertikaalsuse reguleerimine oluliselt piiratud. Seepärast kasutatakse löökpenetromeetriga mõõtmist, mis kohandatakse robotplatvormil kasutamise jaoks sobivaks.

2. Olemasoleva roboti kirjeldus

Kohandamiseks kasutatav robotplatvorm on 2006-2009 aastal arendatud universaalne liikurplatvorm demineerimiskonstruktsioonideks [7]. 2019 aastal kohandati robotplatvorm tööstuslikus keskkonnas erinevate ülesannete täitmiseks [8]. Nende ülesannete täitmiseks lisati roboti raamile ülemine osa, mille külge kinnitati tööülesannete täitmiseks vajalikud täiturid. Roboti elektroonika seisukord oli ebakindel ja vajas komponentide töökorra kontrollimist.

2.1 Roboti mehaanilise osa kirjeldus

Roboti raam koosneb kahest suuremast osast: alumisest osast ja ülemisest osast. Alumine ja ülemine osa on üksteisega ühendatud poltliitega. Ülemise osa alumiinium ekstrudeeritud profiilide paigutust on võimalik vajadusel muuta.



Joonis 2.1 Robot töö alguses

2.1.1 Roboti alumine osa

Alumine osa on keeviskoostatud raam, koosneb põhiliselt nelikant terasprofiilidest, mille külge poltliidetega kinnitati roboti veermik ja mootorid. Veermik võimaldab elektrimootori abil muuta roomikute tugirataste asetust. Rataste asetuse muutmisel

muutub platvormi kliirens. Muudetav kliirens võimaldab robotil ületada kuni 0,5 meetri kõrguseid tõkkeid [7]. Roomikute liikumiseks kasutatakse harjadega alalisvoolumootorit. Mootor on ühendatud tigureduktoriga rihmülekande teel. Tigureduktori kasutamine eemaldab vajaduse pidurite kasutamiseks, kuna tigureduktori väljundvõlli liikumine on võimalik ainult sisendvõlli pöörlemisel. Tigureduktor vähendab roomikuid vedava rihmaratta pöörlemiskiirust, tõstes sellega rihmarattale mõjuva maksimaalse pöördemomendi väärtust.

2.1.2 Roboti ülemine osa

Ülemine osa on valmistatud ekstrudeeritud alumiiniumprofiilidest, mis on omavahel kokku ühendatud nurkade abil. Ülemine raam on loodud UR5 robotkäe ja selle kontrolleri paigutamiseks raami peale. Raam koosneb Rexorth 45x45L ja 45x90L profiilidest. Raami pikkus on 1,1 meetrit, laius 5,17 meetrit ja kõrgus 0,3 meetrit. Kuna maastikul sõitmisel on madalam kaal kasuks ja kuna pinnase klassifitseerimisel ei plaanita kaasata UR5 robotkätt, siis roboti kaalu vähendamiseks ja raskuskeskme maapinnale lähemale viimiseks eemaldatakse robotkäsi selle kontrolleriiga roboti pealt ära.

2.2 Roboti elektroonilise osa kirjeldus

Robotplatvormi esialgsel valmistamisel paigaldatud elektroonikast on jäänud Robot Power Sidewinder mootori kiirusregulaator, harjadega alalisvoolu mootorid roomikute liigutamiseks, mootor roboti kliirensi muutmiseks ja robotplatvormi kontrolleri. Töö juhendaja sõnul polnud robot liikumisvõimeline ja seetõttu tuli alguses kontrollida olemasoleva elektroonika seisukorda.

2.2.1 Roomikute mootori kiiruskontroller

Robot Power Sidewinder mootori kiirusregulaator on kahekanaliline kiirusregulaator harjatud alalisvoolumootoritele, mis saab kanali kohta juhtida 2kW võimsust mootorit. Tabelis 2.1 on märgitud kiiruskontrolleri parameetrid [9].

Tabel 2.1 Robot Power Sidewinder mootori kiiruskontrolleri parameetrid [9]

Sisendpinge	Minimaalne 6 V*	Minimaalne 14 V	Maksimaalne 48 V
Mõõtmed	Pikkus 108 mm	Laius 82 mm	Kõrgus 28 mm
Nominaalvool		80 A	
Maksimaalvool			150 A
Voolu piiramine kanali kohta	Minimaalne 10 A		Maksimaalne 130 A
Töötemperatuur			93 °C

Kiiruskontrolleri esipaneelile paigaldatud indikaatorite abil saab jälgida ja kontrollida mootori kiirusregulaatori töötamist. Vasaku ja parema kanali valgusdiodid näitavad enda heledusega mootori pöörlemiskiirust ja indikaatorite värvi muutmisega kuvatakse mootorite sõidusuunda. Esipaneelil asuvad ka voolu piiramise potentsiomeeter ja mootori kiirenduse reguleerimise potentsiomeeter [9].



Joonis 2.2 Robot Power Sidewinder kiirusregulaatori esipaneel [9]

2.2.2 Roomikute mootorid

Roomikute liigutamiseks kasutatakse Unitemotor MY1020 harjadega alalisvoolu mootorit. Iga roomiku kohta on üks mootor. Mootorite pöördemomendi suurendamiseks roomikutel on mootor ühendatud reduktoriga, mis suurendab ülekandetegurit, võimaldades roomiku rihmaratta aeglasemal pöörlemisel robotil kergelt maastikupinnal liikuda. Mootori parameetrid on toodud tabelis.

Tabel 2.2 Unitemotor MY1020 parameetrid [10]

Nominaalpinge	Nominaalvool	Võimsus	Pöörlemiskiirus	Pöördemoment	Kaal
24V	27,4A	500W	2500RPM	1,91Nm	4,1 kg

2.2.3 Robotplatvormi kontrollid

Robotplatvormi kontrollid kasutatakse juhtsignaalide genereerimiseks mootorite jaoks. Mootorite töötamiseks vajalikke signaale peaks elektriskeemi järgi genereerima ATmega168p mikrokontroller, kuid realsuses on selle asemel ATmega8-16PU. Mikrokontroller saab vajalikud andmed I2C suhtlusprotokolli kaudu juhtseadmelt ja süsteemis töötab alluvana. Roomikute mootorite jaoks genereerib robotplatvormi

kontroller pulsipositsiooni modulatsiooni signaali. Veermiku kliirensi mootorit juhib plaat lülitades sisse või välja transistoreid, mis on võrreldes mikrokontrolleriga vastupidavamad suurte voolude vastu.

2.2.4 Robotplatvormi akud

Robotplatvormil on akudeks kaks Varta D15 akut, mis valiti 2019. aastal valminud bakalaureusetöös [8]. Akud ühendatakse jadamisi ja saadakse mootori jaoks vajalikud 24 volti. Akude mahtuvuseks on 63 ampertundi. See võimaldaks robotil liikuda täiskiirusel umbes tund aega.

Tabel 2.3 Aku andmed [11]

Mõõtmed	Pinge	Mahtuvus	Käivitusvool	Kaal
242 mm x 175 mm x 190 mm	12 V	63 Ah	610 A	15,3 kg

2.3 Roboti elektroonilise osa seisukorra määramine

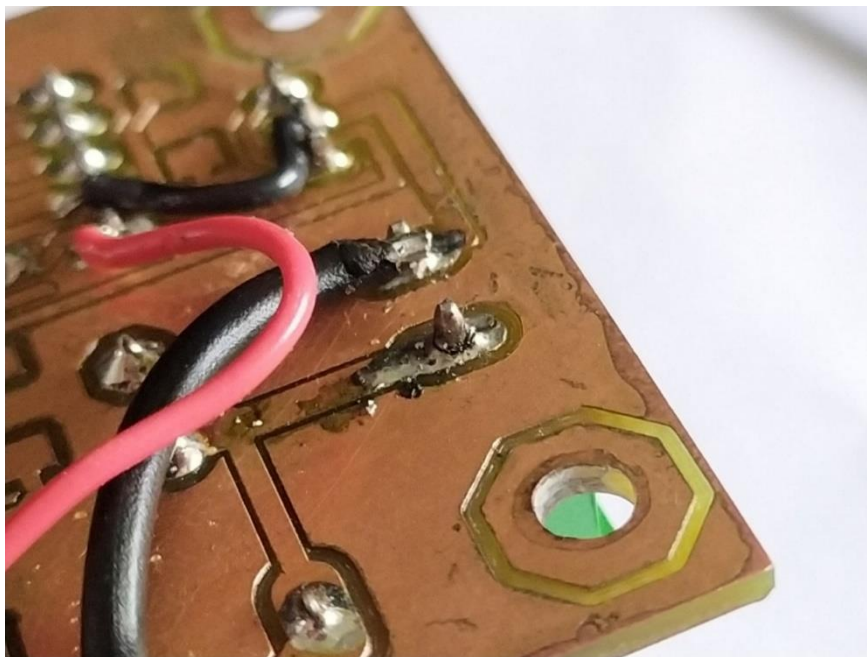
2.3.1 Mootorite kiiruskontrolleri seisukorra määramine

Kiirusregulaatori seisundi kontrollimiseks kalibreeriti ära alguses mootori sisendsignaali töövahemiku. Sisendsignaali vahemiku kalibreerimiseks tuleb eemaldada kiirusregulaatori esipaneel, kruvides välja neli esipaneeli äärtes asuvat kruvi. Peale paneeli eemaldamist tuleb vajutada mootori kiirenduse reguleerimise potentsiomeetrist paremal asuvat kalibratsiooninuppu ja hoida seda all vähemalt kolm sekundit. Kui eelnev on tehtud õigesti, siis peab hakkama vilkuma nupust paremal asuv oleku valgusdiod. Järgnevalt tuleb kaugjuhtimispuldil liigutada juhtkange täisulatuses mitu korda. Kalibratsiooni lõpetamiseks on vajalik vajutada üks kord kalibratsiooninuppu. Kaugjuhtimispuldi ja vastuvõtja puudumise tõttu kasutati kalibreerimiseks ja sisendsignaali genereerimiseks Arduino Uno't. Kalibreerimiseks kasutati selleks loodud Arduino programmi, mis muutis genereeritud pulsipositsiooni modulatsiooni täisulatuses. Peale kalibratsiooni läbiviimist kasutati kiirusregulaatori juhtimiseks kirjutatud Arduino koodi, mis luges juhtkangi mooduli potentsiomeetrite väärtuseid ja vastavalt loetud väärtustele genereeris vajaliku pulsi positsiooniga signaali digitaalsetel väljunditel. Algul katsetati koodi toimimist kiiruskontrollerile sisendpinget rakendamata. Pinge rakendamata katsetamise tulemusel muutsid kiiruskontrolleri vasaku ja parema kanali valgusdiodid värvust ja heledust vastavalt saadud sisendsignaali. Edasi liikumise signaali puhul muutusid valgusdiodid roheliseks ja tagasi liikumise signaaliga muutusid nad punaseks. Diodide heledus muutus suurema

kiiruse sisendiga heledamaks ja väiksema kiiruse sisendiga tumedamaks. Järgmise sammuna rakendati kiiruskontrolleri toiteklemmidele vajalik toitepinge kasutades laboratoorset toiteploki. Toitepinge seati 24 voldi peale ja vool seati alguses suhteliselt madalale tasemele. Kuna midagi halba madala vooluga ei toimunud, siis suurendati laboratoorse toiteploki voolupiirajat. Voolu madalal püsimise asemel muutus tarbitav vool maksimaalse vooluga koos. See asjaolu viitas kiiruskontrolleris olevale defektile või lühisele. Kiiruskontrolleri alumiiniumist korpus muutus umbes poole minuti pikkuse aja jooksul väga kuumaks. See viitas samuti kiiruskontrolleris esinevale veale. Seades toiteploki voolupiiraja 15 ampri peale anti kiiruskontrollerile sisendsignaal, mille tagajärjel mootorite liikumist ei toimunud. Seega oli kiiruskontroller kahjustatud ja kasutuskõlbmatu. Trükkplaadi eemaldamine ja parandamine oleks raskendatud, kuna ühe trükkplaadi korpuse külge kinnitava poldi sisemine kuuskant oli kahjustatud. Kahjustatud poldi eemaldamiseks oleks algul vajalik välja puurida poldi pea, et saaks eemaldada trükkplaat korpuse seest. Peale seda tuleks kahjustatud poldi keermeosa välja puurida või lämmastikhappega ära söövitada alumiiniumlati seest.

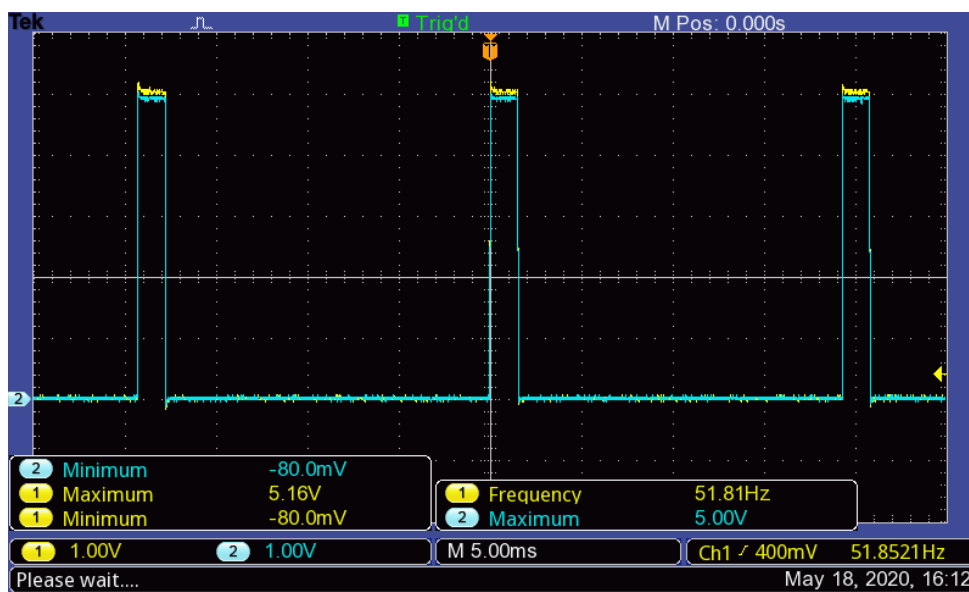
2.3.2 Robotplatvormi kontrolleri seisukorra määramine

Robotplatvormi kontrolleri tööseisundi määramiseks eemaldati plaat roboti elektroonikakarbist ja anti skeemile toide laboratoorselt toiteploki. Peale toite rakendamist plaadi töötamist inditseeriv valgusdiod ei süttinud ja toiteploki ampermeetri järgi ei tarbinud skeem voolu. Trükkplaadi lähemal vaatlusel leiti toitepinge pistikul katkenud jooteliidesega kontakt.



Joonis 2.3 Robotplatvormi kontrolleri toitepistiku kontakt

Peale jooteliidese parandust sai trükkplaat vajaliku toite. Mootorite kiirusregulaatorit juhtiv pulsipositsiooni modulatsiooni väljundsignaal oli ostsillograafiga kontrollimisel korras, mida saab ka näha joonisel 2.4.



Joonis 2.4 Mootori kiirusregulaatori juhtsignaal ostsillograafiga mõõtmisel

Trükkplaadi I2C suhtlusvõimelisuse kontrollil selgus aga, et I2C siini juhtivseade ei saa näe alluvseadet ja ei saa sellega suhelda. Mikroregulaatoril kasutatava koodi laadimisel teisele samasugusele mikroregulaatorile toimus juhtivseadme suhtlus alluvseadmega tõrkevabalt. Seega on robotplatvormi regulaatori mikroregulaator kahjustatud ja vajab vahetust töötava vastu.

2.3.3 Roomikute mootorite seisukorra määramine

Mootorite seisukorra määramiseks ühendati mootorite elektroonikakarbi ühendusest lahti ja mõõdeti digitaalse multimeetriga mootori takistuse väärtus. Kuna mootorite takistused olid mõõdetavad ja üksteisega võrreldes sarnased, siis saab järeldada, et mootorid on töötavas seisukorras. Mootorite kahjustused tekivad tavaliselt mootori mähiste või harjade ülekuumenemise tõttu. Mähiste ülekuumenemisel hävineb mähise juhtmeid kattev isolatsioonikiht. Isolatsioonikihi puudumisel tekib mähises lühis, mis tekitab mähist läbiva voolu tõusmise. Kõrgema voolu tõttu sulab mähise nõrgeimas punktis mähise juhe ära ja tekib katkestus. Harjade ülekuumenemise puhul väheneb harjade tööiga. Kui harjahoidjad on plastmassist, siis harjade ülekuumenemisel sulavad harjahoidjad ära, mistõttu kaob harjade kontakt kommutaatoriga.

3. Kaamerate kinnitus

Kaamerate kinnituse projekteerimisel on tähtis arvestada kaamerate mõõtmeid ja nende kaalu. Valitav kinnitusviis peab võimaldama kaamerate lihtsat paigaldamist ja eelmaldamist robotplatvormilt. Kaamera kinnitus peab võimaldama muuta kaamerate nurka maapinna suhtes kaameratele vajaliku vaatevälja tagamiseks.

3.1 Kaamerate parameetrid

Robotile paigaldatakse hüperspektraalkaamera ja sügavuskaamera. Kaamerad ühendatakse robotile paigaldatava arvutiga, mis teostab pildi töötlust kaameratelt ja analüüsib saadud andmeid.

Specim IQ kaamera on hüperspektraal kaamera, mis võimaldab andmete kogumist, töötlust ja töötlust tulemuse visualiseerimist kaamera riistvara abil. Kaamera kaal on 1,3 kilogrammi. Kaamera on 207 millimeetrit lai, 91 millimeetrit kõrge ja 125,5 millimeetrit pikk [12].

Intel Realsense D435i on sügavuskaamera, mis stereonägemise, värvianduri ja projektori abil saab määrata kauguse kaamera vaatevälja sattuvate objektide ruumilise asukoha ja kauguse kaamerast. Kaamera pikkuseks on 90 millimeetrit, kõrguseks 25 millimeetrit ja laiuks 25 millimeetrit. Kaamera kaalub 72 grammi [13].

3.2 Kaamerate kinnitusviisi valik

Kaamerate kinnitamisel on võimalik kinnitada kaamerad otse kaamerate nurga muutmist võimaldava mehhanismi külge või kasutada vahelüli kaamerate ja mehhanismi vahel.

Tabel 4.1 Kaamerate kinnitusviisi võrdlus

Kinnitusviis	Kinnituse mass	Kinnituse ehituse keerukus	Kaamerate kinnitamise aeg
Otsene mehhanismi külge	Madalam	Madalam	Kõrgem
Vahelüliga kinnitamine	Kõrgem	Kõrgem	Madalam

Kaamerate kinnitamine otse nurga muutmise mehhanismi külge võimaldab vähendada kogu mehhanismi kaalu, kuid kogu roboti kaaluga võrreldes on kaaluvõit väike. Otsese kinnitusviisi madalam keerukus võimaldab vähendada ajakulu kinnituse projekteerimisel, mis on keskmise tähtsusega. Kaamerate otsese kinnitusviisi kasutusmugavus on kaudse kinnitusviisiga võrreldes madalam, kuna kaamerad peab üksteisest eraldi kinnitama ja seejärel tuleb kaamerad reguleerida kasutamiseks sobivasse asendisse. Kaudne kinnitamine vahelüliga on suurema massiga ja kinnituse projekteerimisele kuluks rohkem ajalist ressursi, kuid kaamerate kinnitamisele kuluv aeg ja parem kasutusmugavus omavad suuremat tähtsust ning on määravad kinnitusviisi valikul. Kaudse kinnitusviisi kasutamisel väheneb oluliselt vajadus kaamerate reguleerimiseks, kui vahelüli võimaldab kaamerate kinnitamise piisava jõuga, et kaamerad ei nihkuks roboti liikumise käigus. Seepärast valitakse kaamerate kinnitamiseks vahelüliga kinnitusviis.

Kaamerate kinnitamisel vajaliku vahelüli on võimalik projekteerida ja valmistada iseseisvalt. Teiseks võimaluseks on kasutada poest saadavat ostutoodet.

Tabel 4.2 Vahelülide võrdlus

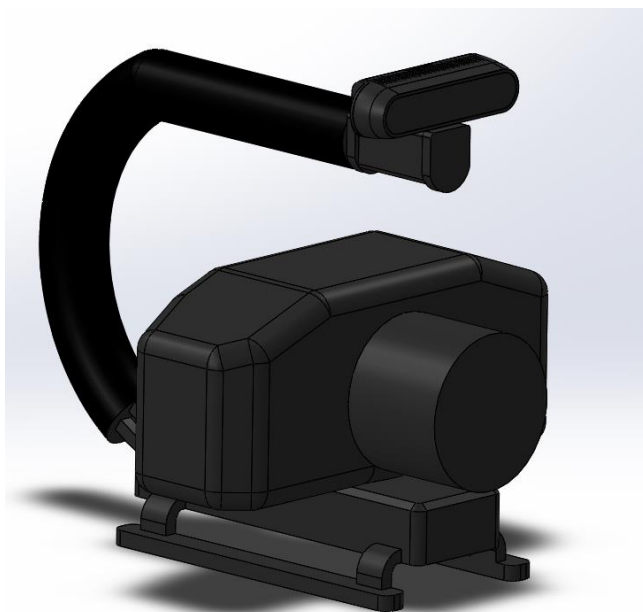
Vahelüli tüüp	Vahelüli mass	Vahelüli mõõtmed	Vahelüli kasutusmugavus
Omavalmistatud	Kõrgem	Madalam	Madalam
Ostutoode	Madalam	Kõrgem	Kõrgem

Omavalmistatud vahelüli oleks väiksemate mõõtmetega, kuna vahelüli oleks võimalik projekteerida võimalikult täpselt sobivaks kasutatavate kaameratega. Samas tõuseks vahelüli mass, kuna ostutootega võrreldes samasuguse tugevuse tagamiseks on vajalik lisamaterjali kasutamine või metalli kasutamine materjalina vahelüli valmistamisel. Metall kasutamine tõstaks vahelüli valmistamise hinda, eriti mehaanilise töötamise esinemisel. Kuna ostutoodetene müüdivad vahelülid kaamerate fikseerimise tootjad on tunduvalt kauem kokku puutunud nende projekteerimisega, siis ka nende kasutusmugavus oleks parem võtteldes omavalmistatud vahelüliga. Kasutatavaks vahelülis valiti poest ostetav vahelüli suurema kasutusmugavuse ja madalama massi tõttu.

Vahelülina kasutati ülikoolis kohal olemasolevat Zeadio Metal 3 vahelüli, mis võimaldab raskema hüperspektraalkaamera paigutamise peamisele kinnitusplaadile ja väiksema ning kergema sügavuskaamera spektraalkaamera kohal oleval kaamera tarvikute kinnituse asemel. Vahelüli pikkus on 0,25 meetrit, laius 0,09 meetrit ja kõrgus on 0,21 meetrit. Vahelüli kaaluks on umbes 0,35 kilogrammi. [14]

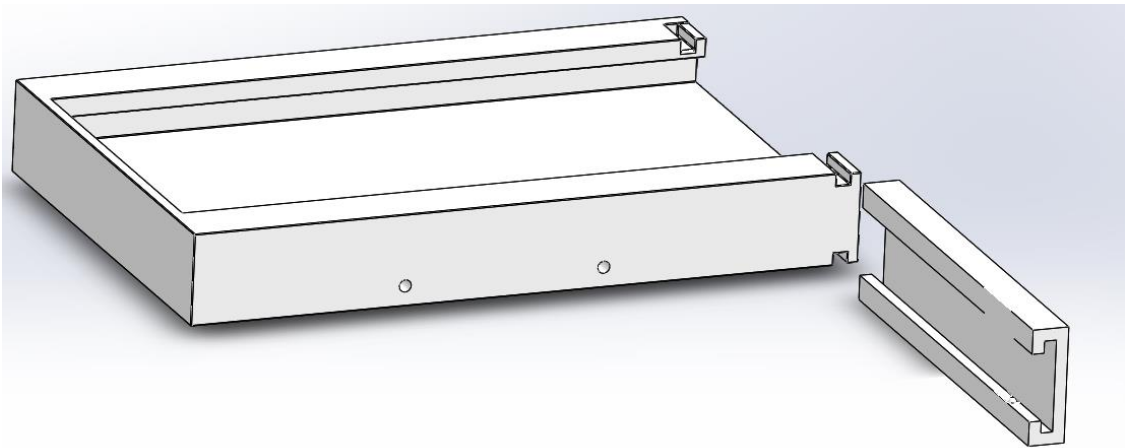
3.3 Kaamerate kinnituse projekteerimine

Kaamera kinnituse projekteerimise jaoks modelleeriti vahelüli hüperspektraalkaamera ja sügavuskaamera ruumiline mudel SolidWorks 2019 tarkvaras. Specim IQ kaamera ja vahelüli mudelid modelleeriti iseseisvalt, kuna tootja ei pakkunud nende mudeleid. Intel Realsense sügavuskaamera mudel oli tootja kodulehel olemas ja seda mudelit ka kasutati koostudes. Mudelitele määrati nende andmelehtedes leitud massid, et raskuskeskme asukoha määramine oleks võimalikult täpne. Raskuskeskme asukoha täpne määramine vähendab koormust kaamerate kaldenurka reguleerivale mootorile ja aitab süsteemi esialgse tasakaalustamise puhul.



Joonis 3.1 Vahelüli kaameratega

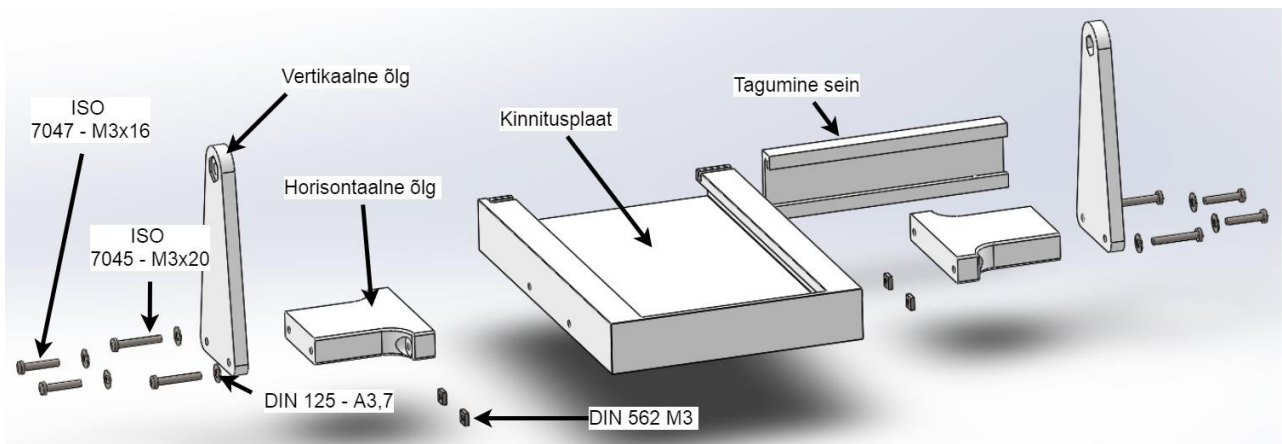
Kaamerate ja vahelüli mudeli ümber hakati modelleerima kaamerate nurka muutva mehhanismi liikuvat osa. Algul modelleeriti lihtne ja kiire viis vahelüli paigaldamiseks liikuvasse osasse. Vahelüli libistatakse kinnitusplaadis asuvate soonte vahele ja vahelüli väljakukkumise vältimiseks lükatakse kinnitusplaadi tagumisel osal olevatest soontest sisse tagumine sein. Tagumise seina fikseerimiseks on sellesse modelleeritud pinnast välja ulatuv poolsfäär. Kinnitusplaadis on poolsfäärile vastav nõgusus, millesse poolsfääri sattumisel fikseerub tagumine sein.



Joonis 3.2 Kinnitusplaat ja tagumine sein

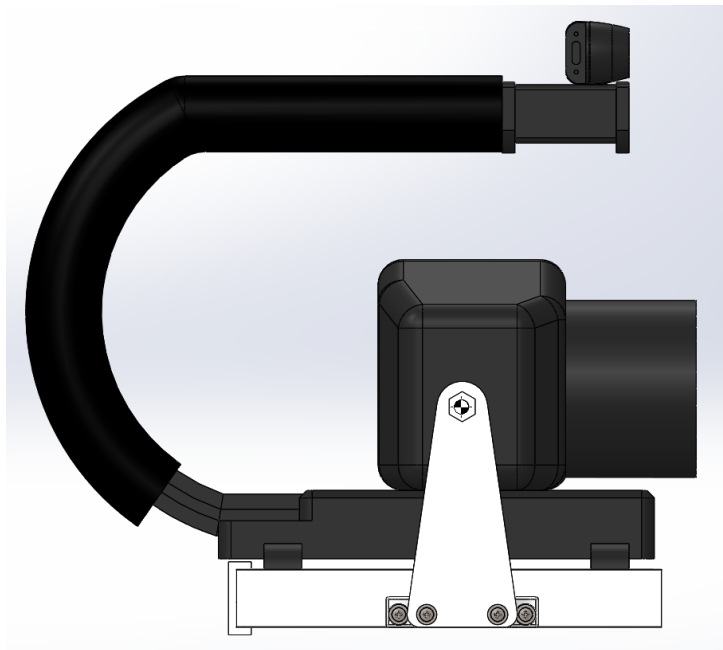
Kuna detailide valmistamiseks plaaniti kasutada 3d printimist, siis oli tähtis jälgida detailidele mõjuvate jõudude suundasid. 3d printitud detailide tugevus on horisontaalsuunas ja vertikaalsuunas erinev. Kuna vertikaalse mõõdu moodustavad kihid prinditakse ühekaupa, jõuavad kihid vahepeal jahtuda ja uue kihi printimisel jahtunud kihi peale ei sulandu kihid täielikult kokku. Selle pärast jaotatakse kaamerate kinnituse liikuv ja liikumatu osa eraldi väiksemateks detailideks. Lisaks koostu jagamisel väiksemateks detailideks kulub printimise ebaõnnestumisel vähem materjali. Detailide muutumisel väheneb uuesti printimist vajavate detailide kogus. Detailide kinnitamisel üksteisega kasutatakse mutreid ja polte.

Kinnitusplaadi külge kinnituvad horisontaalsed õlad on sümmeetrilised ja väldivad kokkupuudet statsionaarsel osal asuva mootoriga. Järgmisena modelleeriti vertikaalsed õlad.



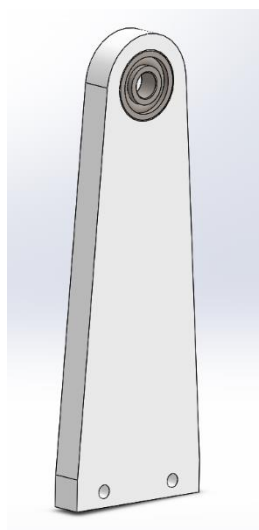
Joonis 3.3 Liikuva osa komponendid ja nende nimetused

Peale liikuva osa horisontaalsete ja vertikaalsete õlgade modelleerimist hakati muutma õlgade asukohta raskuskeskmega ühtimiseks. Kokkuvõttes saadi peaaegu täielik samatsentrilisus liikuva osa pöörlemistelje ja selle massikeskme vahel.



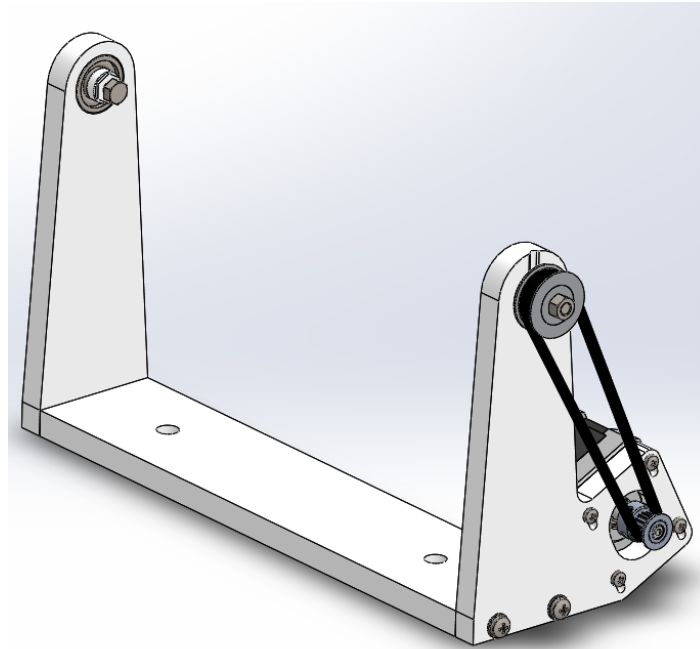
Joonis 3.4 Raskuskeskme asukoht pöörlemistelje suhtes

Järgnevalt modelleeriti statsionaarne alumine osa, mis koosneb alusest ja kahest vertikaalsest õlast, kinnitusvahenditest, kahest hammasrattast, rihmast ja pöörleva osa pööramise mootorist. Vertikaalsete õlgade pikkus valiti minimaalne võimalik, millega vahelüli kinnitusplaat mahtus statsionaarse osa alumisest plaadist. Sujuva pöörlemise tagamiseks on statsionaarse osa vertikaalsetesse õlgadesse modelleeritud paigalduskoht SKF-608 laagri jaoks.



Joonis 3.5 Statsionaarse osa vertikaalne õlg

Kaamera nurga reguleerimiseks kasutatakse NEMA17 mõõdus sammootorit. Sammootor uhendatakse kaamera kinnituse liikuva osaga rihmulekande abil. Mootori hammasratas on 16 hambaline ja GT2 rihma jaoks. Liikuva osa pool asuval hammasrattal on 32 hammast. Kasutatava rihma pikkuseks on 276 millimeetrit.



Joonis 3.6 Statsionaarne osa

Kaamera kinnitus kinnitub kahe poldi ja profiilmutriga robotiplatvormi profiili kulge.

4. Maapinna klassifitseerimise rakis

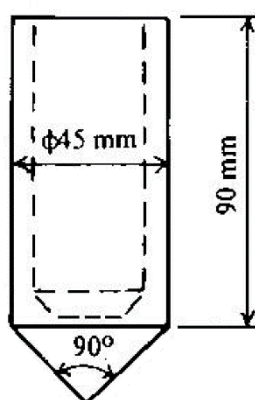
Alapeatükis 1.8 valiti maapinna klassifitseerimise eesmärgiks löökpenetratsiooni mõõtesead. Robotplatvormile sobiva maapinna klassifitseerimiseks kasutatava rakise projekteerimisel lähtutakse löökpenetromeetri tööpõhimõttest. Maapinna klassifitseerimise rakis peab olema katseseadme vertikaalsuse reguleerimise võimalusega ja katseseadme töö peab olema täielikult või vähemalt osaliselt automatiseeritud. Seadme valmistamiseks kuluv detailide ja vajaliku tööluse kogumaksumus võiks olla pigem madal.

4.1 Maapinna klassifitseerimise rakise projekteerimine

Löökpenetromeetril toimub otsaku maasse süvistumine liikuva haamri abil. Vertikaalsus tagatakse löökpenetromeetri ülemises otsas asuva mullloodiga. Kogu katseseade liigub madalamale otsaku süvistumisel pinnasesse. Robotplatvormile tavalise löökpenetromeetri kinnitamisel oleks vajalik tagada seadme vertikaalsuse reguleerimine selle lukustamisega vajaliku vertikaalsuse saavutamisel. Vertikaalsuunaline telg peaks olema täiesti vabalt liikuv, et mitte mõjutada mõõtmistulemusi. Robotplatvormile loodava katseseadme ehitus lihtsustati ja muudeti kergemaks.

4.1.1 Katseseadme otsak

Katseseadme otsak ja haamer ühendati ühte katsekehasse, mis süvistub katse käigus pinnasesse. Otsaku kuju on modelleeritud Rootsisis kasutatava HfA otsaku järgi, kuid väikeste muudatustega.



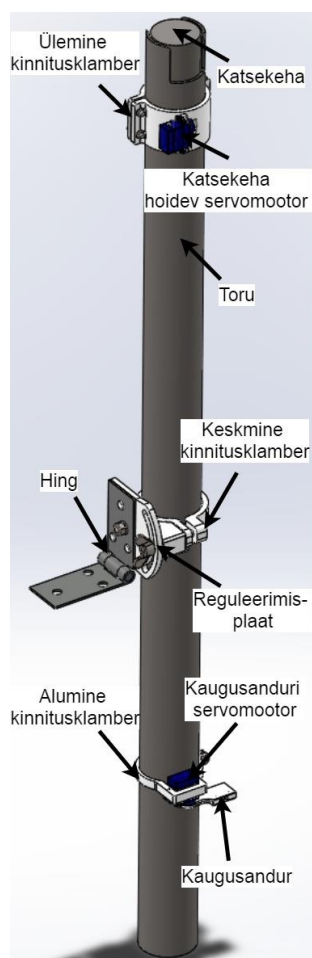
Joonis 4.1 Rootsisis kasutatav HfA otsak [2]

Katsekeha läbimõõtu vähendati 42 millimeetri peale ja silindrilise osa pikkus vähendati 78 millimeetri peale. Katsekeha koonuse nurk jäi samaks nagu Hfa otsakul. Katsekeha

kaaluks on 0,93 kilogrammi ja katsekeha valmistatakse 42 millimeetrise läbimõõduga ümarterasest.

4.1.2 Katsekeha liikumist juhtiv telg

Katsekeha liigub 45 millimeetrise siseläbimõõduga polüpropüleenist valmistatud toru, mille pikkus on 0,9 meetrit. Polüpropüleenist toru on valitud hea kättesaadavuse ja lihtsa mehaanilise töötlemise tõttu. Toru ülemises osas on tehtud väljalõige katsekeha mugavamaks paigaldamiseks toru sisse. Ülemisest otsast 70 millimeetri kaugusel paikneb väljalõige katsekeha hoidva servomootori jaoks. Katsekeha hoidmiseks valitud SG-90 servomootor kinnitub klambriga toru külge. Toru alumisest otsast 150 millimeetri kaugusel asub teine ava kaugusanduri jaoks. Töödeldud toru joonis avade mõõtmete ja asukohtadega asub lisade hulgas (lisa 1). Kaugusandur kinnitub toru külge 3d printitava klambriga, mille külge kinnitub ka kaugusandurit pöörav teine SG-90 servomootor. Toru vertikaalsust reguleeritavuse tagab poes saadav hind koos 3d printitud reguleerimisplaadiga. Hing võimaldab roboti liikumise ajal asetada katseseade horisontaalasendisse. Toru kinnitub reguleerimisplaadi külge klambri abil. Reguleerimisplaadis asuv pesa võimaldab reguleerida toru vertikaalsust 45° mõlemas suunas.



Joonis 4.2 Maapinna klassifitseerimise rakis

5. Roboti komponendid

5.1 Roomikute mootori kiirusregulaator

Roboti roomikute kiirusregulaatori valimisel tuleb jälgida, et nominaalvool olema üle 27,4 ampri, mis on mootori nominaalvooluks. Kiiruskontrolleri tööea pikendamiseks oleks hea valida kiiruskontroller, mille nominaalvool on vähemalt 30% suurem kui mootori nominaalvool. Lisaks annab see võimalusel paigaldada hiljem võimsamad mootorid. Regeneratiivset pidurdamist antud robotiga pole võimalik kasutada, kuna tigureduktor ei võimalda edastada võimsust väljundvõllilt sisendvõllile. Seepärast regeneratiivse pidurdamise olemasolu kiiruskontrolleri valikul pole tähtis. Kolme kiiruskontrollerit võrreldi tabelis 5.1. Kõik tabelis toodud kiiruskontrollerid on ühekanalilised. Hinnad on toodud kahe kiiruskontrolleri kohta postikuludega ja käibemaksuga.

Tabel 5.1 Mootori kiiruskontrolleri valik [15]-[17]

Kiiruskontrolleri nimetus	Hind	Nominaalpinge	Nominaalvool
Cytron MD30C	82,61 €	5-30 V	30 A
Robot Power MegaMoto GT	128,38 €	6-35 V	35 A
DFRobot DRI0048	72 €	7-24 V	40 A

Cytron MD30C R2 kiiruskontroller on 30 amprise nominaalvooluga ja kuni 30 voldise nominaalpingega. Kontrolleril on lai valik sisendsignaali jaoks. Lisaks on kaitse toitejuhtmete polaarsuse vahetuse vastu. Sisendsignaali on võimalik anda väliselt plaadilt või otse kiiruskontrolleri plaadi pealt nuppude ja potentsiomeetriga. Teist signaali andmise meetodit kasutades on võimalik kasutada ka väliseid nuppe ja potentsiomeetrit. Üle 20 amprise voolu puhul on trükkplaadi kruviga klemmühendused liiga nõrgad ja seepärast soovitatakse tinutada toite ja mootori juhtmed otse trükkplaadile. Plaadi väljatransistorite jahutamiseks kasutatakse radiaatorita passiivjahutust [15].

Robot Power MegaMoto GT on 35 amprise nominaalvooluga ja kuni 35 voldise nominaalpingega kiiruskontroller. Kiiruskontrolleri saab juhtida pulsilaiusmodulatsiooni ja suuna signaali abil. Kiiruskontroller on valmistatud Arduino Uno või Mega peale kinnitatava lisamoodulina. Kontrolleril on isoleeritud paisuga väljatransistorite jahutamiseks aktiivjahutus, mis koosneb radiaatorist ja ventilaatorist. Kui jahutusest jääb ikkagi puudu, siis väljatransistorites on sisseehitatud väljunvõimsuse piiramine liialt kõrge temperatuuri saavutamise puhul. Lisaks võimaldab kiiruskontroller mõõta

mootoritele minevat voolu. Juhtmete kinnitamiseks kasutatakse kruviga klemmühendusi [16].

DFRobot DRI0048 kiiruskontrolleri on 40 amprise nominaalvooluga ja kuni 24 voldise nominaalpingega. Kasutatavaks juhtsignaaliks on pulsilaiusmodulatsioon asemel pulsipositsioonimodulatsioon ehk PPM, mis on rohkem kasutuses raadioteel juhitud mudelitel. Mootri ja toite ühendamiseks kontrolleriga kasutatakse XT60 pistikuid, mis on kindlalt võimelised taluma suurt voolu. Kiiruskontrollerit jahutatakse passiivselt radiaatoriga [17].

Kolmest kiiruskontrollerist valiti DFRobot DRI0048 kiiruskontroller, kuna sellel oli piisavalt suur nominaalvool ja see oli ainus võimalike probleemideta kättesaadav kiiruskontroller. Seoses koroonaviiruse pandeemiaga maailmas oleks välismaalt kiiruskontrolleri tellimisel tõenäoliselt probleeme kiiruskontrollerite kohale jõudmisega vajalikuks ajaks. Cytron kontrollerit polnud laos üldse ja Robot Power kiiruskontrolleri tellimisel Ameerikast tekiksid tõenäoliselt probleemid postiga. Seepärast valiti Eestis kohal olevad DFRobot DRI0048 kiiruskontrollerid.

5.2 Maapinna klassifitseerimise kaugusanduri valik

Kaugusanduri valimisel võimalike andurite hulga vähendamiseks tuli algul valida kindel kaugusanduri tüüp, mis oleks kõige sobivam. Kuna mõõtmised oleks tarvis viia läbi toru sees, mille läbimõõt on 45 millimeetrit, siis on tähtis, et anduri vaateväli oleks väikse nurgaga. Suure nurga puhul hakkab andur tegema valemõõtmisi, mõõtes katsekeha või maapinna kauguse asemel toru seinadest peegeldunud signaale. Tähtsaks on ka anduri mõõtmised ja mõõtemääramatus. Kui andur on suurte mõõtmetega, siis ava anduri sisestamiseks torusse on samuti suur. Suure ava tõttu võib katsekeha langemisel osa energiast kulutada kaugusanduri ava riivamisele.

Tabel 5.2 Kaugusandurite tüüpide võrdlus [18]-[22]

Anduri nimetus	Anduri tüüp	Hind, €	Mõõtmed, mm	Mõõtevahemik, cm	Vaateväli
HC-SR04	Ultraheli-andur	5,46	45 x 20 x 15	2 - 400	15°
Sharp GP2Y0A21YK	Infrapuna-andur	12,79	44,5 x 18,9 x 13,5	10 - 80	-
ST VL53L1X	Lidar	10,63	17,8 x 12,7 x 2,2	4 - 400	15°-25°
ST VL6180	Lidar	7,79	17,8 x 12,7 x 2,2	0 - 10	42°
LIDAR-Lite v3	Lidar	119,2	48 x 20 x 40	0 - 4000	0,5°

Võrreldud anduritest lähevad valikust välja kohe Sharp infrapunaandur ja ST VL6180 andur nende vaatevälja mitte sobimise tõttu. Jäänud kolm andurit on sobivate mõõtevahemikega ja vaateväljadega. Kõige väiksema vaateväljaga Garmin'i andur on jäänud anduritest kõige suuremate mõõtmetega ja kõige suurema hinnaga. HC-SR04 anduri ja VL53L1X anduri vaateväli on võrdne, kuid VL53L1X anduri mõõtmed on tunduvalt väiksemad.

Tabel 5.3 Andurite mõõtemääramatus [18], [20], [22]

Anduri nimetus	HC-SR04	VL53L1X	LIDAR-Lite v3
Mõõtemääramatus	+ - 3mm	+ -20 mm	+ - 25mm

HC-SR04 mõõtemääramatus tundub olevat teiste anduritega võrreldes liiga madal, arvestades anduri hinda. Ülejäänud kahe lidar anduri mõõtemääramatus peaks olema oluliselt parem peale nende kalibreerimist. Kuna VL53L1X andur väiksemate mõõtmetega ja väiksema hinnaga, siis valitakse see andur.

5.3 Globaalse positsioneerimissüsteemi mooduli valik

GPS mooduli valikul oleks hea kasutada moodulit, mis toimib 5 voldise pingega ja võimalikult väikse mõõtemääramatusega asukoha suhtes.

Tabel 5.4 Globaalse positsioneerimissüsteemi moodulid [23]-[26]

Mooduli nimetus	Hind	Tööpinge	Positsioneerimise täpsus
NEO-6M	28,85	5 V	2,5 m
SIM808	34,28	4,4 V	2,5 m
SAM-M8Q	44,35	3,3 V	2,5 m
NEO-7M	44,39	5 V	2,5 m

Sobiva tööpingega töötavad NEO-6M ja NEO-7M moodulid. Madalama hinna ja parema kättesaadavuse tõttu valiti NEO-6M moodul. NEO-6M moodulil puudub GALILEO sateliitsüsteemi tugi, kuid sellele vaatamata on sellel sama hea positsioneerimise täpsus.

5.4 Robotplatvormi ja arvuti vaheline mikrokontroller

Arvutile andurite andmete saatmiseks, andurite andmete saamiseks ja robotplatvormi liikumiseks vajalike andmete saatmiseks tuli kasutada robotplatvormi ja arvuti vahel asuvat kontrolleri. Mikrokontrolleri valikul on tähtis, et kõikide andurite ja teiste komponentide jaoks jätkuks sisend- ja väljundühendusi. Kogu platvormil läheb tarvis kokku vähemalt 9 sisend/väljund ühendust, millest 3 väljundit peavad olema pulsilaiusmodulatsiooni võimelised, 2 peavad olema I2C protokolliga järgi suhtlusvõimelised, 2 peavad olema jadasuhtluse võimelised ja 2 tavalist digitaalväljundit. Kasuks tuleb ka programmikoodi kirjutamist lihtsustavad komponentide raamatukogud. Laia raamatukogude valiku tõttu otsustati leida sobiv plaat Arduino arendusplaatide seast. Arvutiga jadasuhtluseks kasutatava USB ühenduse suurem mõõt on samuti kasuks, kuna suurem port talub rohkem mehaanilisi mõjusid ja ühenduse kaotamise võimalus on madalam. Juhtme korduva ühendamise tõttu võib väiksem ühendusliides saada kahjustada. Sobiva plaadi valikul oleks samuti hea kasutada ära peaaegu kõik ühendused, jättes mõned analoog- ja digitaalväljundid varuks. Väljundite väike varu osutub vajalikuks kui hiljem soovitakse süsteemi võimaluste laiendamise eesmärgil lisada uusi komponente. Toiteskeemi komponentide hulga vähendamiseks järgnevalt projekteeritava trükkplaadil vaadeldakse ainult 5 voldise tööpingega Arduino arendusplaatide.

Tabel 5.4 Mikrokontrolleri valik [27]

Plaadi nimetus	USB pordi tüüp	Väljundid jadasuhtluseks	PWM väljundid	Vabaks jäävate väljundite arv
Arduino Lilypad USB	Micro B	1	4	0
Arduino Mega 2560	Type B	4	15	61
Arduino Micro	Micro B	1	7	11
Arduino Uno	Type B	1	6	11
Arduino Leonardo	Micro B	1	7	11
Arduino Mega ADK	Type B,	4	15	61
Arduino Nano	Mini B	1	6	13
Arduino Yùn	Micro B	1	7	11

Tabelis võrreldud arendusplaatide seas jätavad liialt palju vabu ühendusi Arduino Mega 2560 ja Arduino Mega ADK. Ülejäänud plaadid, mille puhul jääb vabaks väljundeid, on suurema USB pordiga ainult Arduino Uno. Seepärast jääb Arduino Uno parimaks valikuks võrreldud arendusplaatide seas.

5.5 Trükkplaat

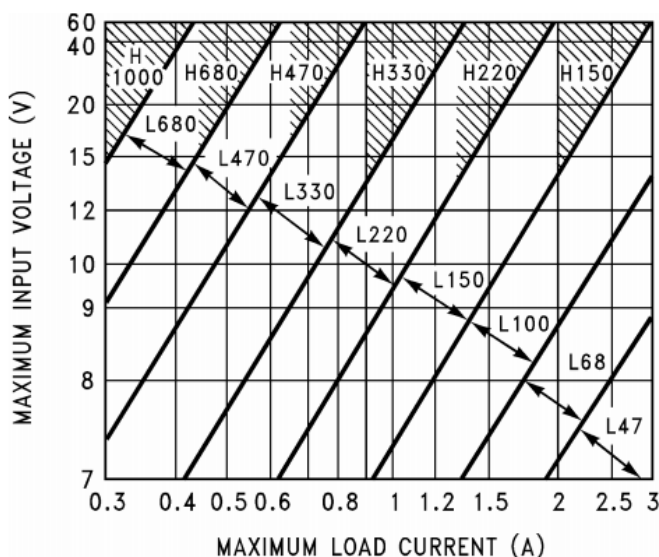
Robotplatvormi ja arvuti vahelise kontrolleri ja komponentide kindlama ühenduse tagamiseks koostati elektriskeem ja projekteeriti trükkplaat, millega ühendub Arduino Uno arendusplaat, VL53L1X kaugusandur, kaks SG-90 servomootorit, NEO-6M globaalse positsioneerimise moodul, mootori draiver kaamerate kalde mootori jaoks.

Kuna komponentide valikul jälgiti, et komponentide tööpinge oleks 5 volti, siis sai toitekaks kasutada ühte pingemuundurit. Pinge muundamiseks kasutati TO-220-5 pakendis LM2576T-5 mikroskeemi, koos sellele vajalike komponentidega. Vajalike komponentide hulka kuuluvad induktor, Schottky diod, 3 elektrolüüt-kondensaatorit ja üks resistor. Induktori valikul tuli lähtuda sisendpingest ja vajalikust väljundvoolust. Vajaliku väljundvoolu arvutamiseks liideti kokku kõikide kasutatavate komponentide voolude väärtused.

$$I_{SUM} = I_{Arduino} + I_{Kaug.andur} + I_{GPS} + I_{Servo 1} + I_{Servo 2} =$$

$$= 0,014 + 0,015 + 0,067 + 0,500 + 0,500 = 1,096 \approx 1,1 \text{ A}$$

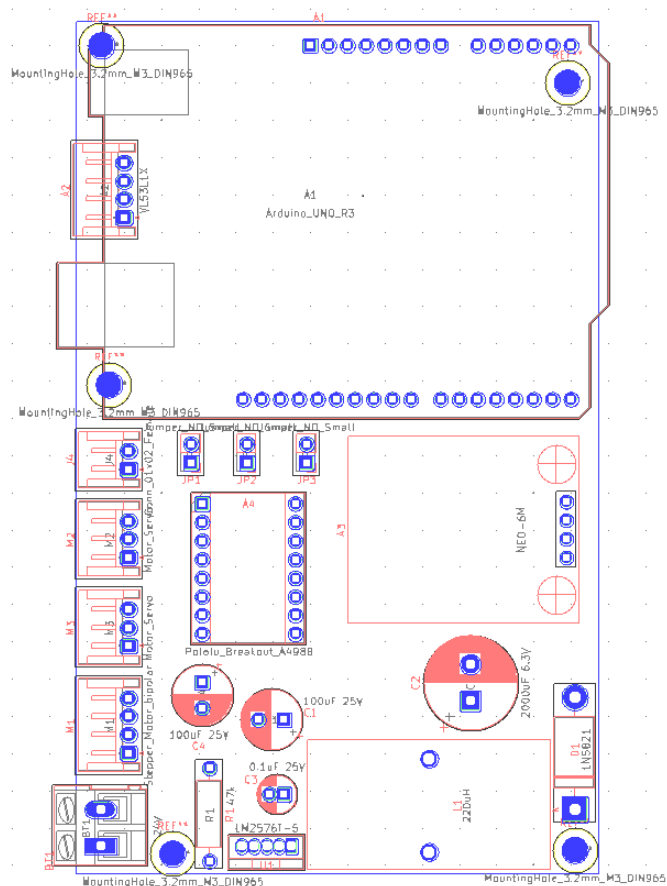
Igaks juhuks võetakse induktori väärtuse valimisel suurem vool 1,3 amprit. Induktori valik tehakse joonise 5.1 abil.



Joonis 5.1 Induktori valik [28]

Joonise järgi valitakse induktor väärtusega 220 millihenrit. Schottky diodid valitakse tabeli järgi 1N5821, kuna akude pinge ei ületa 30 volti ja piisab 30 voldisest diodist. Sisendkondensaator valitakse andmetelehes [28] toodud tüüpilise kasutuse diagrammilt, millel on kujutatud 5 voldise väljundiga pingeregulaatori skeem. Väljundkondensaatori mahtuvus valitakse suurem, et vähendada väljundpinge kõikumist. Koostatud skeemi saab näha lisade hulgas (lisa 2).

Peale pingeregulaatori komponentide valiku ja komponentidele vajalike korpuste formaatide valimise paigutati komponendid trükkplaadile. Komponentide paigutamisel jälgiti, et ühte moodulisse kuuluvad komponendid oleksid lähestikku. Plaadile lisati äärtesse M3 mõõduga poltide jaoks kinnitusavad trükkplaadi kinnitamiseks robotplatvormi elektroonikakarpi.



Joonis 5.2 Trükkplaat komponentidega

Järgmisena alustati radade trasseerimisega. Trasseerimiseks kasutati automaatset trasseerijat, peale mida muudeti raja laiuseid toite jaoks ja kohandati vajadusel rajade asetust. Rajade trasseerimisel kasutati Freerouting [29] tarkvara. Peale radade kohandamist tühjad alad radade vahel täideti trükkplaadi mõlemalt poolt maandusega.

6. Programmikood

Robotplatvormi tööks vajalik kood jaguneb kaheks osaks. Osa koodist on Processing tarkvaras. Teine osa koodist on Arduino Uno arendusplaadil. Programmeerimisega suhteliselt madala kokkupuute tõttu koodi kirjutamine oli aega nõudev ja kahjuks selle katsetamine pole osade komponentide hilinemise tõttu võimalik. Kogu süsteemi tööalgoritm on lisade hulgas (lisa 3).

6.1 Processing kood

Processing on avatud lähtekoodiga tarkvara, milles programmeeritakse Java programmeerimiskeeles. Antud programm sai valitud mängupuldiga ühendamist lihtsustava raamatukogu tõttu. Kuna programm töötab arvutis, siis kõik andmetöötlus on otstarbekas teha arvutis. Programm saab algul mängupuldi väärtused ja kontrollib hädapeatamise nupu vajutust. Kui nupp pole vajutatud, siis toimub sõltuvalt kasutaja sisendist mõõtmise läbiviimine või mootorite kiiruste arvutamine. Programmi akna värvuse muutub vastavalt liikumise sisendväärtustele. See annab kasutajale tagasiside, et pult toimib ja väärtused muutuvad. Peale mootorikiiruste arvutamist saadetakse need Arduino arendusplaadile.

6.2 Arduino kood

Arduino koodis algselt seadistatakse sisend-, väljundühendused, suhtlus erinevate komponentide vahel ja seadistatakse andurid. Peale seadistamist jääb Arduino ootama UART sideme kaudu arvutilt saadetud käsklusi. Kui käskluseks on mõõtmise läbiviimine, siis liigutatakse mõõteandur mõõteasendisse ja mõõdetakse kaugust andurist maapinnani. Mõõtmise andmed saadetakse kohe arvutisse. Täpsuse parandamiseks tehakse 5 mõõtmist järjest. Peale seda kukutatakse katsekeha ja korratakse mõõtmist, kuid juba katsekeha ülemise otsani. Peale mõõtmist liigutatakse andur tagasi ooteasendisse. Kuna katsekeha pikkus on teada, siis saab arvutada kaugus, mille võrra katsekeha pinnasesse süvistus. Selleks lahutatakse teise mõõtmise ja katsekeha pikkuse summast esimese mõõtmise väärtus. Kui mõõtmise läbiviimise käsu asemel tulevad mootorite kiiruse väärtused, siis muudetakse need õigesse formati ja saadetakse I2C protokolliga kaudu need edasi robotplatvormi kontrolleriile. Robotplatvormi kontrolleri genereerib mootoritele vajalikud signaalid.

7. Robotplatvormi katsetamine ja edasiarendamise võimalused

7.1 Robotplatvormi katsetamine

Seoses komponentide hilinemisega ei osutunud robotplatvormi katsetamine võimalikuks. Komponentide kohale jõudmisel ka peale töö valmis kirjutamist viiakse läbi koodi ja komponentide katsetamine. Probleemide tekkimisel eemaldatakse need muutes elektriskeemi, koodi või valitud komponente. Kui katsetamisel ei teki probleeme, siis täiendatakse Processing koodi parema kasutajaliidese loomiseks.

7.2 Robotplatvormi edasiarendamise võimalused

Robotplatvormi jaoks projekteeritud maapinna klassifitseerimise katseseade on hetkel ainult osaliselt automatiseeritud. Praegu on automaatne ainult mõõtmise läbiviimise osa. Katseseadme vertikaalse asetamise eest ja katsekeha katseseadme ülemisse osasse tagastamise eest vastutab robotplatvormi operaator. Kui automatiseerida vertikaalse asendi otsimine, katsekeha tagastamine katseseadme ülemisse osasse ja suurendada robotplatvormi kaugjuhitavuse kaugust, siis poleks robotplatvormi operaatoril vaja selle läheduses asuda.

Kuna robotplatvormi akud paigutati selle tagumisse osasse, kus asuvad ka mootorid ja nende reduktorid, siis tagumise osa ülekaalu tõttu võib langeda roboti läbitavus maastikul. Roboti akude paigutust tuleks analüüsida ja leida akude jaoks asukoht, mis tagaks võimalikult neutraalse kaalujaotuse roboti roomikutele.

Seoses arvuti vajalikkusega kaamerate andmete töötlemiseks ja Arduino arendusplatvormile andmete saatmiseks, oleks hea kasutatavale arvutile projekteerida ilmastikukindel paigutuskoht, mis tagaks ka arvutile vajaliku jahutuse. Hetkel kasutatava sülearvuti oleks hea asendada robotplatvormile statsionaarselt paigaldatud arvutiga. Statsionaarselt paigaldatud arvuti kasutamine lihtsustaks ka ilmastikukindluse tagamist, kuna statsionaarse arvutiga puuduks vajadus arvuti eemaldamiseks robotplatvormilt.

KOKKUVÕTE

Lõputöö tegemise käigus tutvuti pinnasemehaanikagaga, pinnase kokkusurutavusega ja selle määramiseks kasutatavate katseseadmetega. Viidi läbi kokkusurutavuse määramiseks kasutatavate katseseadmete võrdlus ja võrreldi mehitamata robotplatvormidel kasutatavaid mõõteviise pinnase klassifitseerimiseks. Võrdluse tulemusena valiti antud lõputöös kohandatava robotplatvormil kasutatav katseseade.

Järgnevalt vaadeldi roboti mehaanilist ja elektroonilist ehitust. Kuna elektroonilise osa seisukord polnud kindel, siis määrati kõikide komponentide tööseisukord. Peale tööseisukorra määramist ja osade komponentide parandamist otsustati, millised komponendid vajavad täielikku välja vahetamist ja millised ainult osalist.

Seejärel vaadeldi robotile paigaldatavate kaamerate andmeid ja nende kinnitamiseks võimalikke viise. Peale kinnitusviiside analüüsi ja parima kinnitusviisi valikut, valmistati kaamerate ja kaamerate kinnituse 3d mudel Solidworks 2019 tarkvaras.

Peale kaamerate kinnituse valikut ja projekteerimist keskenduti maapinna klassifitseerimiseks loodavale katseseadmele. Peale katseseadme ehituse tingimuste määratlemist valmistati katseseadme mudel modelleerimise tarkvaras.

Järgmisena valiti süsteemi tööks vajalikud elektroonilised komponendid. Nende hulka kuulusid uus mootorite kiirusregulaator, kaugusandur, globaalse positsioneerimissüsteemi moodul ja robotplatvormi kontrolleri ning arvuti vaheliseks suhtlemiseks vajalik mikrokontrolleriga suhtlusplaat. Loodavale süsteemile tehti elektriskeem ja trükkplaat, kuhu paigutus suur osa valitud komponente.

Arvuti, robotplatvormi ja nendevahelise suhtlusplaadi koostöök loodi Processing ja Arduino tarkvaras programmid. Processing programm saab vajaliku sisendi kasutajalt ja suhtleb UART suhtlusprotokolli teel suhtlusplaadiga. Arduino tarkvaras loodud programm töötab Arduino Uno plaadil, mida kasutatakse arvuti ja robotplatvormi vahelise suhtlusplaadina. Arduino programm saab Processing programmist sisendi ja toimib sellele vastavalt, saates robotplatvormi kontrolleri vajalikud andmed sellele edasi.

Töö viimasel peatükil oleks pidanud kirjeldama robotplatvormi katsetamisest tekkinud probleeme ja robotplatvormi edasiarendamise võimalusi, kuid koroonaviiruse leviku tõttu ei jõudnud osa komponente kohale ja süsteemi katsetamine jäi tegemata. Sellele vaatamata pakuti välja robotplatvormi edasiarendamise võimalusi.

SUMMARY

During the making of this thesis soil mechanics, soil compactability and the tools for measuring it were examined. A comparison between different tools for measuring soil compactability was carried out. Also a comparison between tools for soil compaction measuring used on unmanned ground vehicles was carried out. As a result of the comparison a tool for the robotplatform was chosen for the measurement of the soil compaction.

Subsequently the construction of robots mechanics and electronics was examined. Due to the unsure condition of the robot's electronics the working condition of all the parts was assessed. After the assesment and repair of some of the components, a decision for the replacement of some components was made.

After that data of the cameras, that were supposed to be mounted on the robotplatform, was examined and possible solutions for mounting the cameras were analysed. After choosing the best solution for mounting the cameras, a 3d model of cameras and mounting system was made.

After choosing mounting solution for the cameras the soil classification tool conditions were defined. A tool following these defined conditions was engineered and modelled in Solidworks 2019 software.

When the soil classification modelling was done, electrical components for the system were chosen. In the list of the new components were motor speedcontroller, distance sensor, gps module and intermediate board for communication between computer and robotplatform controller. An electric schematic and a printed circuitboard design was made for placement of the parts on the board.

For the cooperation of the computer, robotplatform controller board and the intermediate board a program in Processing and Arduino software was made. The Processing program is getting the input from the user, calculating needed outputs and sending them thorough UART communication to the intermediate communication board. Arduino program receives these outputs, decides what it is supposed to do and and sends them to the robotplatform controller.

In the last chapter of the thesis testing of the robotplatform should have been carried out, but due to the coronavirus outbreak some of the components did not arrive on time and testing without them was not possible. Regardless of that the improvements and expansion of the robotplatform capabilities was proposed.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

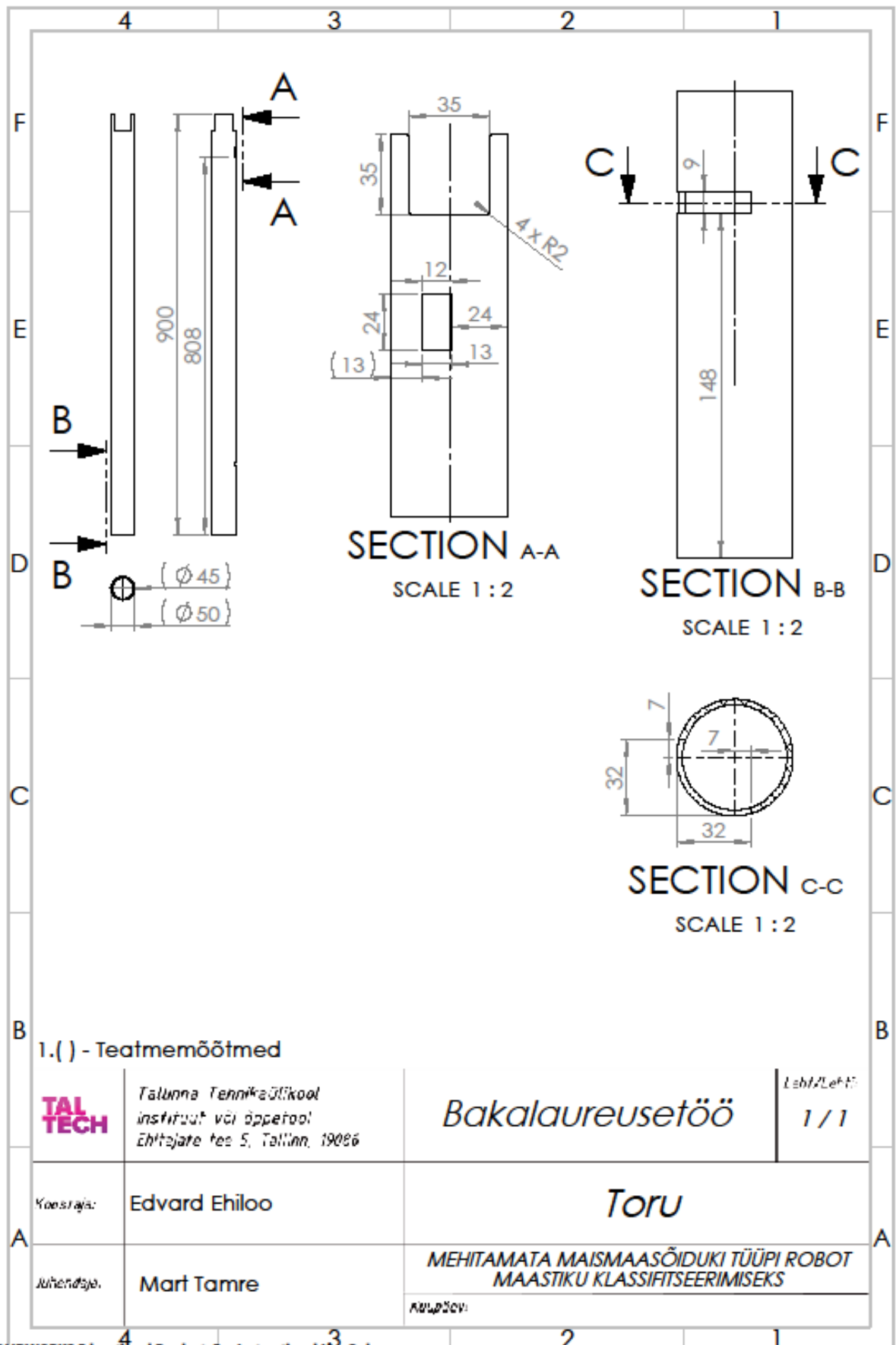
- [1] V. Jaaniso, *Pinnasemehaanika*, Tallinn, Eesti: Tallinna Ülikool, 2011. [Online]. Available: <https://digikogu.taltech.ee/et/item/d099c5e6-1624-4023-9adf-5fd92dafd836>. Accessed on: 20.03.2020.
- [2] V. Jaaniso, *Ehitusgeoloogilised uuringud*. [Online]. Available: https://www.ttu.ee/public/e/ehitusteaduskond/Instituudid/Ehitiste_projekteerimise_instituut/Oppematerjalid/Valdo_Jaaniso/Ehitusgeoloogilised_uuringud_pm_11.pdf. Accessed on: 20.03.2020
- [3] S. Odedra, "Using unmanned ground vehicle performance measurements as a unique method of terrain classification," 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6095143>. Accessed on: 18.04.2020
- [4] Ojeda, Lauro & Borenstein, Johann & Witus, Gary & Karlsen, Robert, "Terrain characterization and classification with a mobile robot, " *Journal of Field Robotics.*, vol 20, no. 2, pp 103-122, February 2006. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/30851429_Terrain_characterization_and_classification_with_a_mobile_robot. Accessed on 19.04.2020
- [5] Scholz, Christian & Möller, Kim & Ruckelshausen, Arno & Hinck, Stefan & Göttinger, Matthias, "Automatic soil penetrometer measurements and GIS-based documentation with the autonomous field robot platform Bonirob, " 2014 12th International Conference on Precision Agriculture, Sacramento CA, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/276936947_AUTOMATIC_SOIL_PENETROMETER_MEASUREMENTS_AND_GIS-BASED_DOCUMENTATION_WITH_THE_AUTONOMOUS_FIELD_ROBOT_PLATFORM_BONIROB. Accessed on: 17.04.2020
- [6] Cao, Peter & Hall, Ernest & Zhang, Evan, "Soil Sampling Sensor System on a Mobile Robot, " 2003 SPIE Intelligent Robots and Computer Vision XXI: Algorithms, Techniques, and Active Vision, Providence, RI, 2003, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/235679988_Soil_Sampling_Sensor_System_on_a_Mobile_Robot. Accessed on: 19.04.2020

- [7] M. Tamre, M. Hiiemaa, M. Leini, P. Salong, R. Hudjakov, "Universaalne liikurplatvorm demineerimisrakendusteks," Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, 2009 [Online]. Available: https://www.etis.ee/Portal/Projects/Display/9535249e-0899-4c4e-adc1-3180954e6092?tabId=tab_GeneralData. Accessed on: 18.05.2020
- [8] T. Turro, Siseruumides liikuv tööstusrobot, B.A thesis, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, Eesti, 2019
- [9] Robot Power [Online] Available: http://www.robotpower.com/products/sidewinder_info.html. Loetud: 15.03.2020
- [10] Unite Motors [Online] Available: http://unitemotor.com/index.php/Home/Index/product_detail/id/265. Accessed on: 15.03.2020
- [11] Varta [Online] Available: <https://www.varta-automotive.com/en-gb/products/varta-silver-dynamic/563-400-061>. Accessed on: 29.03.2020
- [12] Specim IQ [Online] Available: <https://www.specim.fi/iq/>. Accessed on: 25.04.2020
- [13] Intel [Online] Available: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435i/>. Accessed on: 15.03.2020
- [14] Zeadio [Online] Available: <https://zeadio.com/products/zeadio-video-action-stabilizing-handle-grip-handheld-stabilizer-with-hot-shoe-mount-for-canon-nikon-sony-panasonic-pentax-olympus-dslr-camera-camcorder>. Accessed on 25.04.2020
- [15] Cytron Technologies [Online] Available: <https://www.robotshop.com/eu/en/cytron-30a-5-30v-single-brushed-dc-motor-driver.html>. Accessed on: 20.04.2020
- [16] Robot Power [Online] Available: http://www.robotpower.com/products/MegaMotoGT_info.html. Accessed on: 20.04.2020
- [17] DFRobot [Online] Available: <https://www.dfrobot.com/product-1770.html>. Accessed on: 23.03.2020
- [18] HC-SR04 [Online] Available: <https://www.sparkfun.com/products/15569>. Accessed on: 26.04.2020

- [19] Sharp GP2Y0A21YK0F [Online] Available: <https://www.robotshop.com/en/sharp-gp2y0a21yk0f-ir-range-sensor.html>. Accessed on: 26.04.2020
- [20] ST VL53L1X [Online] Available: <https://www.robotshop.com/en/tof-range-finder-sensor-breakout-board-voltage-regulator-vl53l1x.html>. Accessed on: 26.04.2020
- [21] ST VL6180 [Online] Available: <https://www.robotshop.com/en/tof-range-finder-sensor-breakout-board-voltage-regulator-vl6180.html>. Accessed on: 26.04.2020
- [22] Garmin LIDAR-Lite 3 [Online] Available: <https://www.robotshop.com/en/lidar-lite-3-laser-rangefinder.html>. Accessed on: 26.04.2020
- [23] NEO-6M [Online] Available: <https://www.robotshop.com/eu/en/u-blox-neo-6m-gps-receiver-module.html>. Accessed on: 28.04.2020
- [24] SIM808 [Online] Available: <https://www.robotshop.com/eu/en/elecrow-crowtail-sim808-gsm-gps-module.html>. Accessed on: 28.04.2020
- [25] SAM-M8Q [Online] Available: <https://www.robotshop.com/eu/en/sparkfun-gps-breakout-board-sam-m8q-qwiic.html>. Accessed on: 28.04.2020
- [26] NEO-7M [Online] Available: <https://www.robotshop.com/eu/en/velleman-neo-7m-gps-module-arduino.html>. Accessed on: 28.04.2020
- [27] Arduino Comparison [Online] Available: <https://www.arduino.cc/en/products.compare>. Accessed on: 28.04.2020
- [28] LM2576 [Online] Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf>. Accessed on: 30.04.2020
- [29] Freerouting [Computer software] Available: <http://www.freerouting.eu/wpress/download-and-run/>. Accessed on: 30.04.2020

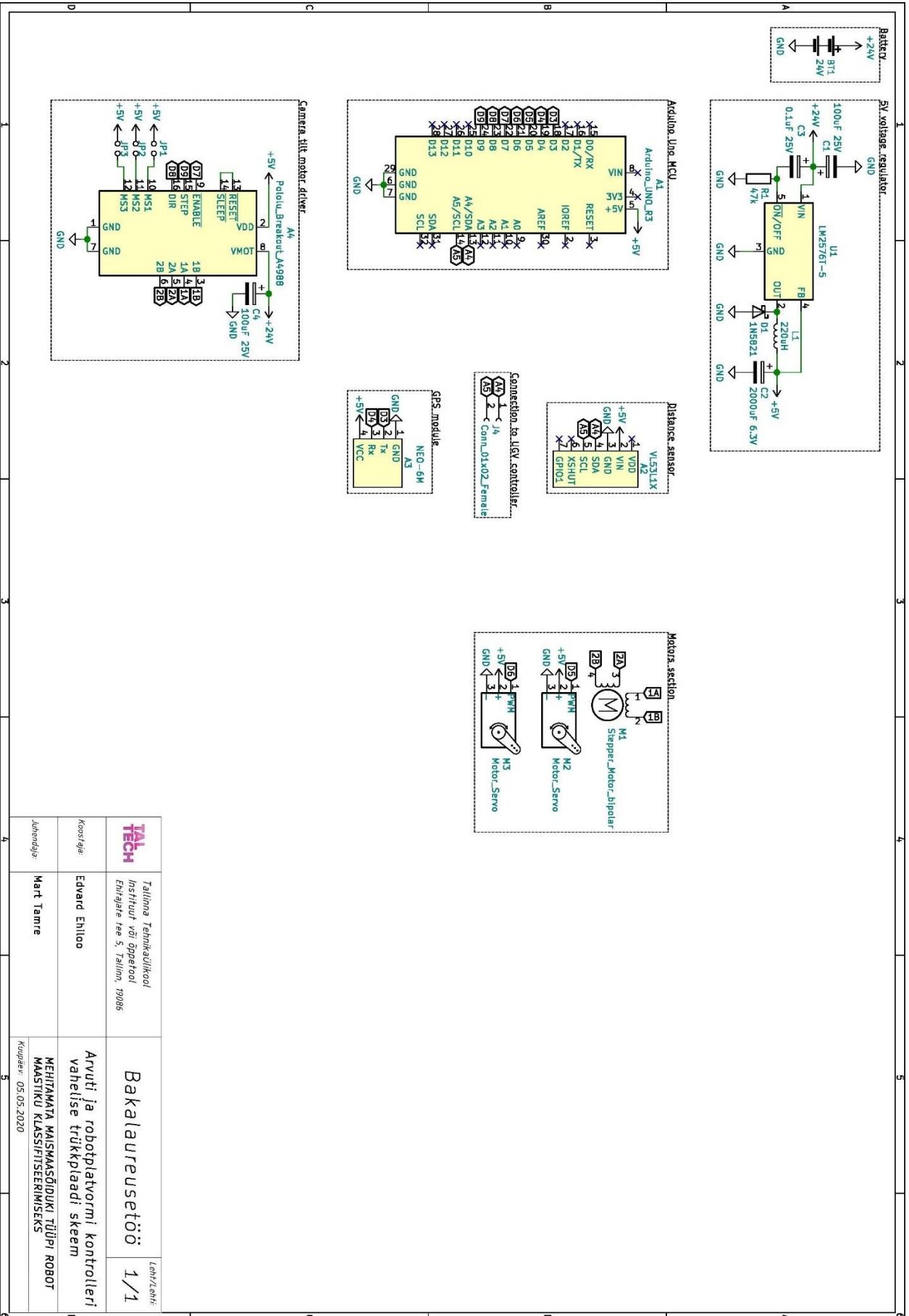
LISAD

Lisa 1 Toru maapinna klassifitseerimise rakise toru



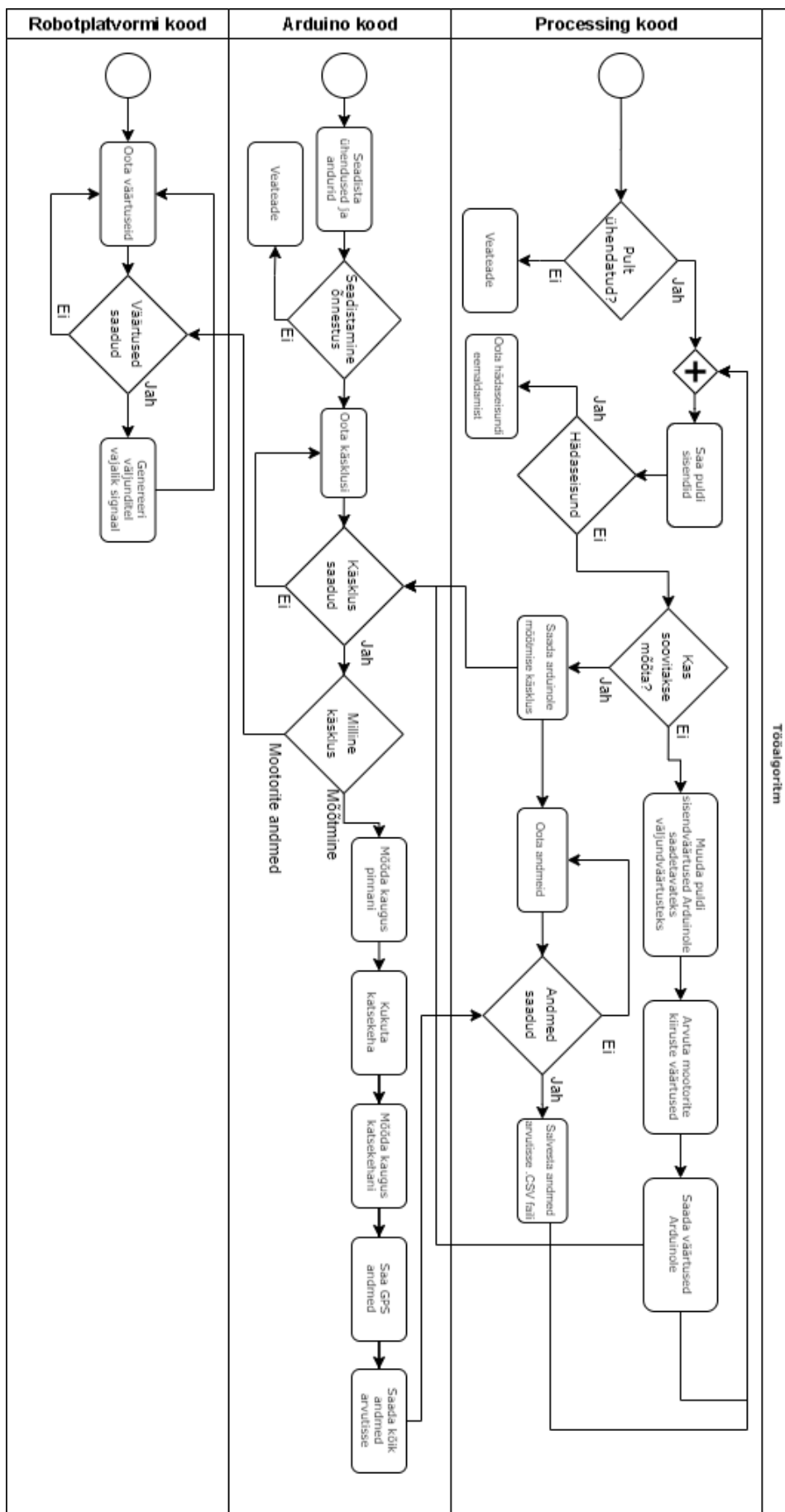
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

LISA 2 Arvuti ja robotplatvormi kontrolleri vahelise trükkplaadi skeem



TAH	Tallinna Tehnikaülikool Instituut või õppetool Ehitajate tee 5, Tallinn, 19086	Bakalauureusetöö	Leht/Lehti: 1/1
Koostaja:	Edward Ehilo	Arvuti ja robotplatvormi kontrolleri vahelise trükkplaadi skeem	
Auhindaja:	Mart Tamre	MEHTAMATA MAISMASOJUDUKI TÜÜPI ROBOT MAASTIKU KLASIFITSEERIMISEKS	
		Kuupäev: 05.05.2020	

Lisa 3 Süsteemi tööalgoritm



Tööalgoritm