

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tehnoloogiainstituut

Sander Saarpere

**Juhtimisliides pehmerobot-emakakaela õppevahendile**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Arvutitehnika

Juhendajad:

Indrek Must, PhD

Mona Küüts, Bsc

Tartu 2023

# Resümee/Abstract

## Juhtimisliides pehmerobot-emakakaela õppevahendile

Simulatsioon on levinud õppemeetod mitmes valdkonnas, kaasa arvatud tervishoius, kus enamasti mõeldakse inimese anatoomiat või kehaosa imiteeriva mannekeeni kasutamist õppevahendina. Sellised õppevahendid on olulisel kohal ka kitsamal erialal nagu ämmaemandus, aga olemasolevatel õppevahenditel esineb olulisi puudujääke. Olemasolevate õppevahendite emakakaelad, mille avatust kontrollitakse sünnituse ajal, on anatoomiliselt sarnased looduslikule, aga kaela dünaamiline avanemine sünnituse jooksul ei ole realiseeritud. Praegu kasutusel olevatel simulaatoritel jäljendatakse erinevaid emakakaela avatusastmeid suure hulga vahetatavate silikoonvalude abil, mis segab õppeprotsessi loomulikku käiku. Töös antakse ülevaade olemasolevatest simulatsioonõppe õppevahenditest ja eluskudede omadustest.

Bakalaureusetöö eesmärgiks on luua juhtimisliides, mis võimaldab Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi pehmerbootikagrupi poolt loodud tehisemakakaela kasutamist õppevahendina. Juhtimisliides võimaldab määrata tehisemakakaela avatusastet dünaamiliselt. Töö käigus valmis juhtimisliides, mis radiaalselt venitab tehisemakakaela ja mõõdab liikumise nihet ning venitamiseks kuluvat jõudu. Lisaks on loodud liidesprogramm arvutile. Juhtimisliidese arendamisel tehti koostööd tehisemakakaela arendajatega, mille käigus selgus, millised funktsionaalsused on optimaalne lahendada materjalitasandil ja millised mehaanika ja elektroonika tasandil. Lõputöö raames valminud juhtimisliides koos tehisemakakaelaga muudab õppeprotsessi loomulikumaks, mis omakorda tõstab ämmaemandate õppekvaliteeti.

**CERCS:** T120 Süsteemitehnoloogia; T125 Automatiseerimine, robotika, juhtimistehnika, T170 Elektroonika

**Märksõnad:** ekvibiaksiaalne venitamine, simulatsioonõpe, pehmerbootika, füsioloogia jäljendamine, robotemakakael

## **Control system for robotic cervix simulator**

Simulation is a common learning method in multiple fields, including healthcare, where usually it involves the use of manikins or part task trainers that imitate humans' anatomy. Simulators also have an important part in a more specific specialization like midwifery, but these simulators have drawbacks. Existing simulators' cervix's, for which cervical exams are done during labor, are anatomically similar to nature, but the dynamic opening of the cervix has not been realized. Currently used simulators imitate different cervix states with a large number of swappable silicone casts, that interferes with the natural learning process. The thesis gives an overview of existing simulation learning tools, properties of living tissue and the ways to assess these properties.

The aim of the bachelor's thesis is to create a control interface, that enables the use of an artificial cervix, developed by the soft robotics workgroup at the Institute of Technology of Tartu University, as a simulator. The control interface can change the state of the robotic cervix dynamically. During the thesis a control interface was created, that radially stretches the artificial cervix, measures the length of the stretch and measures the required force for the stretch. In addition, an interface program was made for computers. While developing the control interface in cooperation with the developers of the artificial cervix it was determined what functionalities would be optimal to solve on the material level and what functionalities on the mechanics and electronics level. The control interface created in the thesis with the artificial cervix makes the learning process more natural, which in turn improves the quality of training for midwives.

**CERCS:** T120 Systems engineering, computer technology; T125 Automation, robotics, control engineering, T170 Electronics

**Keywords:** equibiaxial stretching, simulation learning, soft robotics, imitation of physiology, robotic cervix

# Sisukord

<b>Resümee/Abstract.....</b>	<b>2</b>
<b>Lühendid, konstandid, mõisted.....</b>	<b>6</b>
<b>1 Sissejuhatus.....</b>	<b>7</b>
1.1 Probleemi tutvustus.....	7
1.2 Töö eesmärk ja ülevaade.....	7
<b>2 Pehmerbootika roll robotikas.....</b>	<b>8</b>
2.1 Pehmerbootikast üldiselt.....	8
2.2 Pehmerbootika rakendused.....	8
<b>3 Simulatsioonõpe.....</b>	<b>10</b>
3.1 Simulatsioonõpe tervishoius.....	10
3.2 Robotika lahendused simulatsioonõppes.....	11
3.3 Ämmaemanduse õppevahendite robotikalahendused.....	12
3.4 Ämmaemanduse osaülesande õppevahendid.....	14
<b>4 Eluskudesid iseloomustavad mehaanilised omadused.....</b>	<b>15</b>
4.1 Pehmed koed.....	15
4.2 Materjali omadused ja nende iseloomustamise meetodid.....	16
4.3 Ekvibiaktsiaalne mõõtmine.....	18
<b>5 Tööle esitatavad nõuded.....</b>	<b>19</b>
<b>6 Süsteemi disain.....</b>	<b>20</b>
6.1 Mehaanika.....	21
6.1.1 Venitamise mehhanism.....	21
6.1.2 Jõu mõõtmine.....	22
6.1.3 Poolide alamkoost.....	26
6.1.4 Loote pea imitatsioon.....	26
6.1.5 Mehaanika lõpplahendus.....	28
6.2 Elektroonika.....	29
6.2.1 Komponendid.....	29

6.2.2 Püsivara.....	30
6.2.3 Elektroonika valmislahendus.....	33
6.3 Liidesprogramm.....	34
6.4 Terviklahendus ja selle kasutamine.....	36
<b>7 Parametriseerimine.....</b>	<b>38</b>
7.1 Tehisemakakaela mõõtmised.....	38
7.2 Ilmnenud puudujäägid ja edasiarendused.....	40
<b>8 Kokkuvõte.....</b>	<b>41</b>
<b>Viited.....</b>	<b>43</b>
<b>Lisad.....</b>	<b>47</b>
A Püsivara ja liidesprogrammi koodifailid ja 3D-mudelite failid.....	47
B Elektroonika ja mehaanika dokumentatsioon.....	48
<b>Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks.....</b>	<b>53</b>

## Lühendid, konstandid, mõisted

I2C - *Inter-Integrated Circuit* ehk mitme võimaliku ülemaga jadasiin

UART - *Universal Asynchronous receiver-transmitter* ehk asünkroonne jadasiin

LED - *Light-emitting diode* ehk valgust kiirgav diood

GPIO - *General purpose input/output* ehk mitmeotstarbeline sisend/väljund

PWM - *Pulse Width Modulation* ehk pulsilaiusmodulatsioon

LSB - *Least significant bit* ehk arvu vähima kaaluga bitt

MSB - *Most significant bit* ehk arvu suurima kaaluga bitt

EEPROM - *Electrically erasable programmable read-only memory* ehk elektriliselt kustutatav püsimälu

MCU - *Microcontroller unit* ehk mikrokontroller

*SysTick* - *System Tick Timer* ehk perioodiline katkestus

*Checksum* - Paketi andmetest tuletatud väärtus, mida saab kasutada veahalduseks

# 1 Sissejuhatus

Simulatsioon on õppemeetod, mis leiab kasutust mitmes valdkonnas, näiteks lennunduses ja tervishoius. Simulatsioonõpe võimaldab läbida ohtlikke protseduure turvaliselt ja kinnistada tarvilikke oskusi. Tervishoiu kontekstis eeldab see tavaliselt patsienti imiteeriva mulaaži või mannekeeni kasutamist ja on tõendeid, et selliste vahendite kasutamine parandab õppijate tulemusi ja enesekindlust. [1]–[3]

## 1.1 Probleemi tutvustus

Mannekeene kasutatakse näiteks emakakaela avatuse kontrolli õppimiseks, mis on oluline protseduur sünnituse jooksul [4]. Tehisemakakael on enamasti silikoonvalu, mis on küll sarnane looduslikule anatoomiale, kuid ei imiteeri selle dünaamilist avanemist sünnituse jooksul. Avanemise simuleerimiseks on hetkel vajalik vahetada silikoonvalu, mis ei vasta reaalsusele ja võib olla ajakulukas. [5] Õppekvaliteedi parandamiseks on vaja dünaamilist õppevahendit.

## 1.2 Töö eesmärk ja ülevaade

Bakalaureusetöö eesmärk on luua juhtimisliides, mis võimaldab kasutada Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi pehmerobotika töögrupi poolt välja töötatud tehisemakakaela õppevahendina.

Töö alguses antakse ülevaade pehmerobotika rollist robotikas, simulatsioonõppest ja selle olemasolevatest lahendustest. Järgmisena antakse ülevaade pehmekudede omadustest ja materjalide omaduste mõõtmisest. Seejärel esitletakse tööle esitatavad nõuded ning viimasena loodud lahendust ja selle katsetamise tulemusi.

## 2 Pehmerbootika roll robotikas

### 2.1 Pehmerbootikast üldiselt

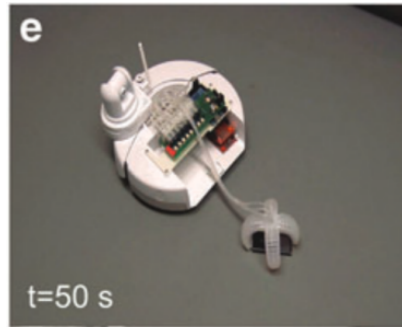
Robotika on “tehnikateaduse ja tehnoloogia valdkond, mis tegeleb kõigega, mis on vajalik robotite ehitamiseks: disain, konstrueerimine, algoritmide väljatöötamine, robotite valmistamine ja rakenduste leidmine. Robotika on tihedalt seotud mehaanika, informaatika, elektroonika ja muude teadusharudega”. [6]

Robotika lahendusi saab valmistada jäikadest materjalidest, nagu on traditsiooniliselt ka tehtud, aga on võimalik kasutada ka pehmeid materjale. Jäigad materjalid on näiteks erinevad metallid ja plastikud. Kasutades elektrimootoreid on jäikade materjalidega saavutatav suur tugevus ja kõrge täpsus. Pehmed materjalid on seevastu erinevad elastomeerid ehk elastsed polümeerid, millest valmistatud robotid on inimestega hästi ühilduvad, pehmed ja ohutud. [7] Selliseid lahendusi üldistavalt nimetatakse pehmerbootikaks ehk robotika haru, mis võtab inspiratsiooni bioloogiast [8], [9].

Pehmed materjalid annavad võimaluse varasemast erinevalt roboti tööpõhimõtet defineerida. Tavaliselt võtab robot vastu infot ümbritsevast maailmast, töötleb seda ja siis reageerib. Pehmed materjalid annavad võimaluse määrata roboti omadusi ja reaktsiooni keskkonnale materjali tasandil. [8] Näiteks kuju muutvad polümeerid, mis taastavad oma algse kuju välise stiimuli toimetel, nagu näiteks temperatuur [10].

### 2.2 Pehmerbootika rakendused

Üks projekt, mis kasutab mõlema uurimisvaldkonna tugevaid külgi, on eseme tagastamise süsteem (Joonis 2.2.1), mis töötati välja Harvardi Ülikoolis. Lahenduse peamine platvorm oli iRobot Create, mis võimaldab rataste abil kiiresti liikuda ja suuri raskusi transportida. Peamise platvormiga on ühendatud pehmerobot haarats, mis saab liikuda üle raskemini läbitava pinnase, aga aeglaselt. Haarats kasutab liikumiseks õhusurvet, mille jaoks on väikesemõõdulised kompressorid paigaldatud iRobot platvormile. Lahendusel oleks potentsiaali aidata vanuritel maast esemete üles korjamisel või tagastada objekte inimese jaoks ohtlikust keskkonnast. [11]



**Joonis 2.2.1.** Harvardi Ülikooli poolt arendatud pehmerobot, mis kombineerib erinevaid robotikatehnoloogiaid [11]

Sarnane on ettevõtte Soft Robotics toodang, kus valmistatakse pehmerobot haaratseid tööstusettevõtetele (Joonis 2.2.2). Ettevõtte toodangus on suur rõhk toiduainetööstusel, kus on vaja liigutada raskesti haaratavaid objekte, mis jäigast materjalist valmistatud robotkäe kasutamisel võivad kergesti kahjustuda. Lõpplahenduses on pehmed haaratsid ühendatud tööstusroboti külge nii, et ühel näitel suudab robotkäsi konveierilt eemaldada üle 70 taignapalli minutis. [12], [13]



**Joonis 2.2.2.** mGrip haarats ja seda kasutav konveier [12], [13]

Lisaks eelnevalt kirjeldatud näidetele on pehmerobotika laialt kasutusel ka meditsiinis ja tervishoius, sest pehmed materjalid ühilduvad inimese kehaga väga hästi. Näiteks saab valmistada realistlikke proteese või kunstorganeid, kuid ka realistlikke õppevahendeid. [7], [14], [15]

## 3 Simulatsioonõpe

### 3.1 Simulatsioonõpe tervishoius

Simulatsioon on õppeviis, kus harjutusel tekitatakse õppijale võimalikult reaalelulised tingimused. Teatud protseduuride harjutamine on muul viisilvõimatu, näiteks tervislikel või eetilistel põhjustel. Simulatsiooni käigus on aktsepteeritav vigade tegemine ja nendest omakorda õppimine. [1], [16] Simulatsiooni läbiviimiseks kasutatakse tervishoius erinevad tehnoloogilised abivahendeid:

- Mannekeenid, näiteks Laerdal Medicali SimMan® 3G [17].
- Arvuti rakendused, näiteks vSim for Nursing, kus on erinevad simulatsioonid patsientidega, kellel on programmeeritud reaktsioonid tudengi käitumisele [18].
- Augmented Reality (AR), näiteks HoloLensi abil naha all olevate lihaste ja veresoonte vaatamine, ilma et peaks patsiendi keha lahti lõikama [18].
- Osaülesande õppevahend, näiteks Laerdal Medicali SimPad, millega saab harjutada vererõhu mõõtmist [19].

Meditiinilises simulatsioonis on palju arenguruumi ja selle kohta on aastast aastasse tehtud järjest rohkem teadustöid [20]. Simulatsioonõppe õppevahendeid on vaja arendada, sest on leitud, et simulaatorite kasutamisel suureneb õppijate kriitiline mõtlemine ja nende enda rahulolu õppega ning neil on kõrgem enesekindlus ja paremad tulemused jooksva semestril [2], [21]. Kõrgetasemelise simulatsiooni jaoks aga ei piisa anatoomiat jäljendavast mulaažist. On vaja mannekeeni, mis annaks realistlikku tagasisidet ja lisaks õigele anatoomiale on füsioloogilistelt omadustelt sarnane inimkehale. [22]

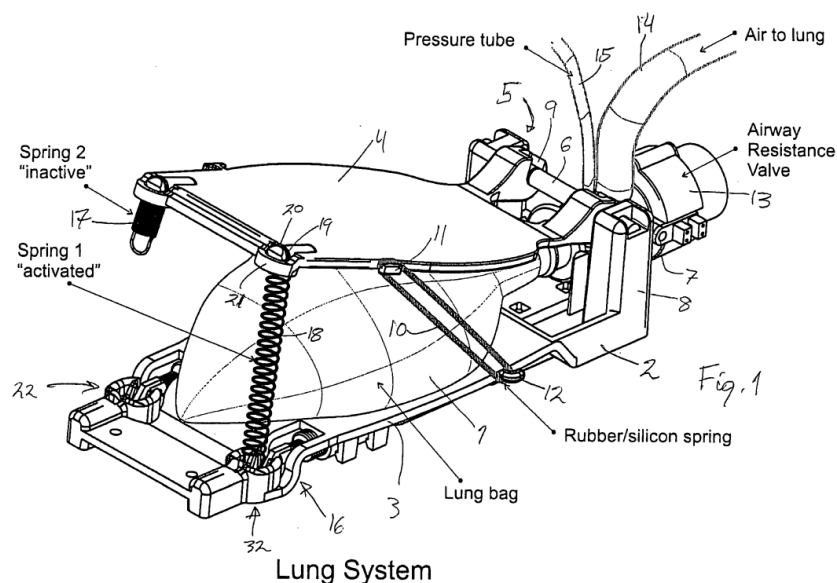
## 3.2 Robotika lahendused simulatsioonõppes

Üks olemasolevatest kõrgtehnoloogilisematest mannekeenidest on SimMan® 3G-d (Joonis 3.2.1).



**Joonis 3.2.1.** SimMan® 3G mannekeen [17]

SimMan® on mõeldud üldotstarbeliseks ja täielikult iseseisvaks patsiendi simulaatoriks. Iseseisvaks kasutamiseks on mannekeenil olemas sisemised akud ja mannekeeni seisu saab jälgida traadita ühendusega. Mannekeenil on olemas mitmed kehaosad, nagu jäsemed, silmad, süda ja kopsud ning keha katab kunstnahk. Mannekeeni sisemised funktsioonid ei pruugi jäljendada anatoomiat täielikult, näiteks südametuksete simuleerimiseks on südame asukohas olemas kõlar.



**Joonis 3.2.2.** Laerdal Medicali patenteeritud varieeruva jäikusega tehiskops [23]

Hingamisraskuste jälgendamiseks on tehiskopsude jäikus varieeruv (Joonis 3.2.2). Kops ise on valmistatud plastmaterjalist ning selle all ja peal asetseb jäik plaat. Kui mannekeeni hingamine on normaalne, siis avaldab kopsudele rõhku mannekeeni rinda kattev nahk ja elastikpaelad, mis ühendavad omavahel kahte kopsuplaati. Jäikuse suurendamiseks saab ühendada plaadid omavahel vedrudega, mis avaldavad vastujõudu tehiskopsu paisumisele. Sõltuvalt vedrude arvust saab neid omavahel kombineerida, et saavutada erinevaid hingamisraskuste astmeid. [17], [23], [24]

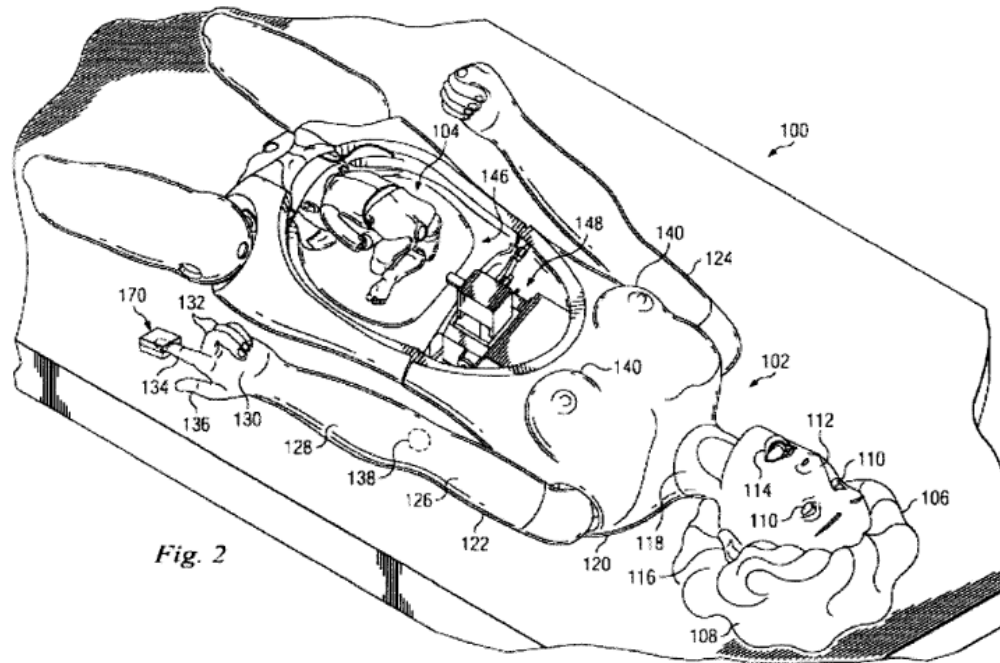
Kuigi SimMan® on erakorralise abi simulaator, on valdkondi nagu näiteks ämmaemandus, kus on vaja rohkem eriala spetsiifilisemaid mannekeene.

### 3.3 Ämmaemanduse õppevahendite robotikalahendused



*Joonis 3.3.1. Gaumard Victoria® sünnitussimulaator*

Ämmaemanda vajalik oskus on sünnituse läbiviimine [4], [25]. Üks kõrgtehnoloogiline õppevahend on Gaumard Victoria® S2200 (Joonis 3.3.1), mis lisaks mannekeenile hõlmab ka kaugjuhtimiseks vajalikku kontrollpaneeli ja vastsündinu mannekeeni. Sarnaselt SimMani® mannekeenile on ka Victoria® võimeline iseseisvalt töötama sisemiste akude pealt. [26]



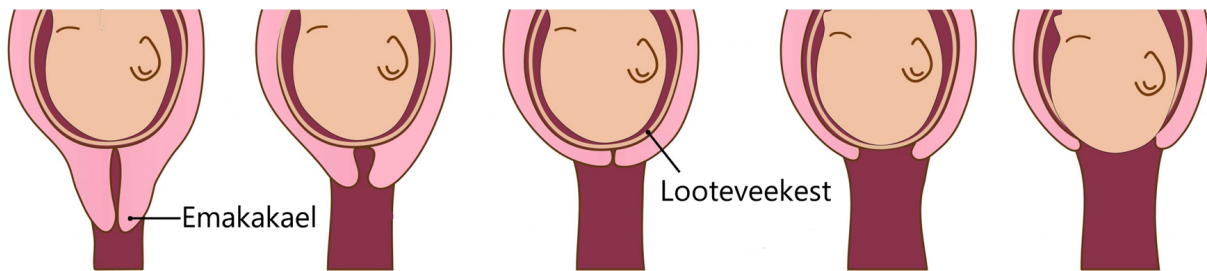
**Joonis 3.3.2.** Gaumardi poolt patenteeritud sünnitussimulaatori patendikirjeldus [27]

Erinevalt SimManist® on Victorial® tühi kõhuõõnsus ja suur eemaldatav kõhukate (Joonis 3.3.2), millest on erinevaid versioone, näiteks tavalise sünnituse ja keisrilõike jaoks. Kõhukate on ka muutuva jäikusega, simuleerimaks lihaste kokkutõmbeid. Selle saavutamiseks on naha all õhukott, mille rõhku muudetakse.

Sünnituse läbiviimiseks on kõhuõõnes olemas mehhanism, mille külge kinnitub loote mannekeen. Mehhanism võimaldab loote mannekeeni välja suruda, keerata erineva nurga alla ja avaldada vastupanu eemaldamisele. Sarnaselt SimMani® südametukse loomisele ei jäljenda see mehhanism bioloogiat. [27]

Üheks Victoria® innovaativsemaks elemendiks on liikuvad ja valgusele reageerivad silmad. Selleks efekti saavutamiseks kasutab Victoria® elektrimootoreid ja valgussensoreid. Seade ei jäljenda muskleid, mis silmamuna asendit ja selle sees pupilli suurust muudavad. [28], [29]

### 3.4 Ämmaemanduse osaülesande õppevahendid



**Joonis 3.4.1.** Emakakaela avanemine sünnituse jooksul, kohandatud allikast [30]

Lisaks loote vastuvõtmisele tehakse sünnituse jooksul emakakaela avatuse kontrolli, kus vaadatakse vastavalt Bishopi skaalale emakakaela pikkust, avatust, konsistentsi ja aetsust (Joonis 3.4.1) [4], [31]. Avatuse kontrolli õppimiseks on müügil õppevahendeid (Joonis 3.4.2), millel on erinevad avatusastmed lahendatud suure hulga silikoonvaludega. [32], [33]



**Joonis 3.4.2.** MW35 ja Health Edco simulaatorid ja nende emakakaela imiteerivad silikoonvalud [32], [33]

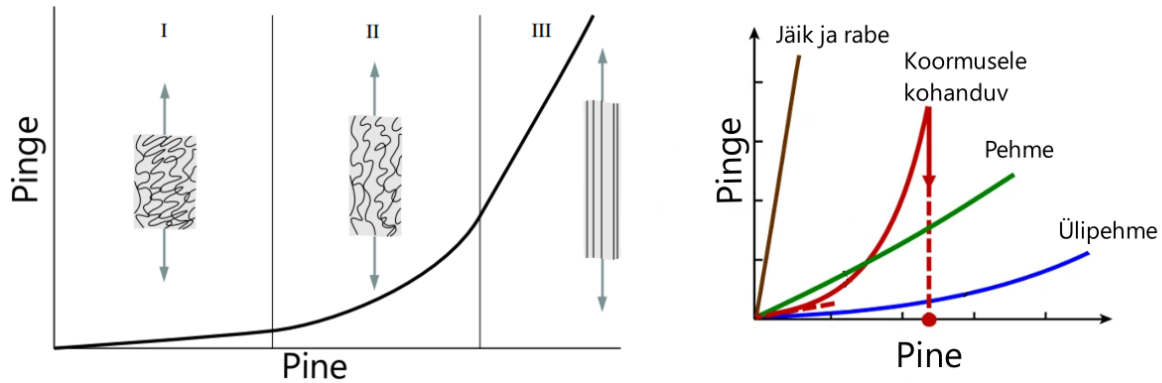
Need silikoonvalud aga ei jäljenda looduse dünaamilisust ja takistavad õppeprotsessi loomulikku käiku [5], [34], [35].

Vesteldes Tallinna Tervishoiu Kõrgkooli õppejõududega sai autor kinnitust, et olemasolevatel vahenditel on puudujäägid. Õppejõudude jaoks on tähtis, et ämmaemandatel oleks käelised oskused kontrolli läbiviimiseks.

Emakakael on sarnane pehmetele kudedele nagu nahk ja emakakaela imiteerimiseks peab pehmete kudede omadusi lähemalt vaatama.

## 4 Eluskudesid iseloomustavad mehaanilised omadused

### 4.1 Pehmed koed



**Joonis 4.1.1.** Kollageeni kiud nahas ja nende mõju jõukõverale (vasakul), kohandatud allikast [34]. Eluskoe jõukõvera (punane) võrdlus teiste materjalidega (paremal), kohandatud allikast [36].

Pehmetel kudedel on iseloomulik J-kujuline kõver (Joonis 4.1.1, vasakul), kus sirgjoonelisel venitamisel jõu suurenedes venib kude järjest vähem, mis tuleneb nahas olevatest kollageenikiududest. Koed on erinevad teistest materjalidest, millel J-kujuline kõver puudub (Joonis 4.1.1, paremal). Luues realistlikke kunstnaha komponentetuleb silmas pidada, et jõu ja venivuse suhe oleks sarnane loodusliku koe omadustele. [34] Emakakaela pingepinge graafik on sarnane joonis 4.1.1 vasakul pool toodule [35]. Veendumaks, et eelnev väide on tõene, on vaja elus kude karakteriseerida.

## 4.2 Materjali omadused ja nende iseloomustamise meetodid

Materjalitehnika I õpik iseloomustab materjali jäikust ja elastsust järgnevalt:

“ Materjali elastsust või jäikust iseloomustavad elastsuskonstandid:

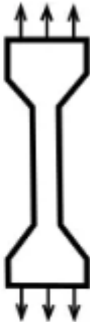

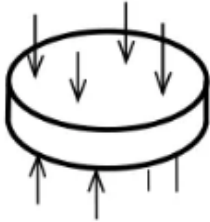

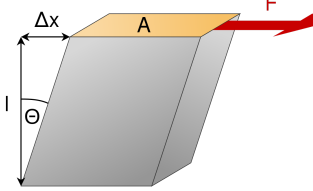

- Normaalelastsusmoodul - joonpinguse korral normaalpinge ( $\sigma$ ) ja sellele vastava suhtelise deformatsiooni ( $\epsilon$ ) suhet  $E = \sigma/\epsilon$
- Kuju- ehk nihkeelastsusmoodul (Coulomb's modulus, modulus of elasticity in shear)  $G$  iseloomustab materjali nihkejäikust  $G = W/J$ , kus  $W$  – tangentsiaalpinge,  $J$  – nihkenurk.
- Maht- ehk ruumelastsusmoodul (bulk modulus)  $K$  iseloomustab materjali jäikust mahumuutuse suhtes  $K = V'/\epsilon$ , (1.3) kus  $V$  – rõhk,  $\epsilon$  – suhteline mahumuutus. “ [37]

Tartu Ülikoolis olev kommertslahendus mõõtmaks materjali omadusi on Netzsch DMA 242 E Artemis (Joonis 4.2.1).



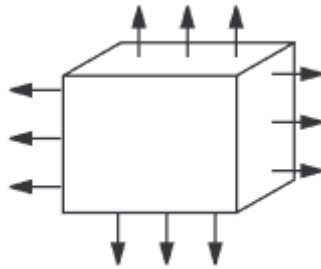
**Joonis 4.2.1.** Netzsch DMA 242 E Artemis [38]

Seade kasutab mõõtmiseks DMA (Dynamic Mechanical Analysis) meetodit, kus tuletatakse materjali omadused, avaldades katseobjektile sinusoidset jõukõverat. Selle tagajärjel materjali deformeerumisest avalduv vastujõud on faasinihkega avaldatavale jõule. [38] Elastomeeride mõõtmismeetodid ja vastavad DMA 242 E rakised on kujutatud tabelis 4.2.1. DMA 242 E abil venitavad katseobjektid on tunduvalt väiksemad kui emakakael, mis välis suue täielikult avatud olekus venib 10 sentimeetri laiuseks.

Mõõtmise tüüp	Skeem	DMA 242 E Artemis rakis	Katseobjekti mõõtmed
Uniaksiaalne venitamine - Normaaelastsuse mõõtmine	 <p>[39]</p>	 <p>[38]</p>	Pikkus >15mm Paksus <6.8mm
Uniaksiaalne kokkusurumine - Mahtelastsusmooduli mõõtmine	 <p>[39]</p>	 <p>[38]</p>	Läbimõõt max 15/30mm Paksus <6mm
Kujuelastsusmooduli mõõtmine	 <p>[40]</p>	 <p>[38]</p>	Läbimõõt max 15mm Paksus <6mm

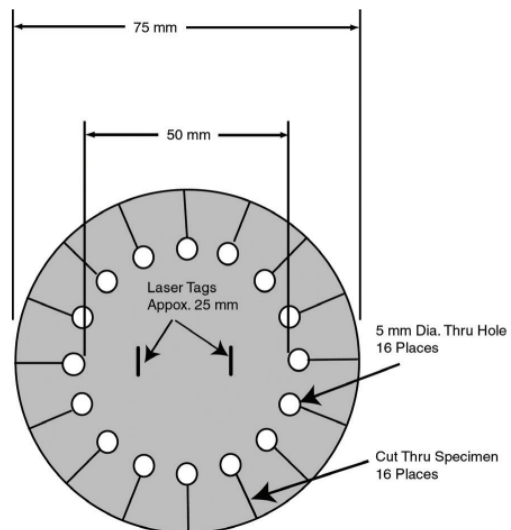
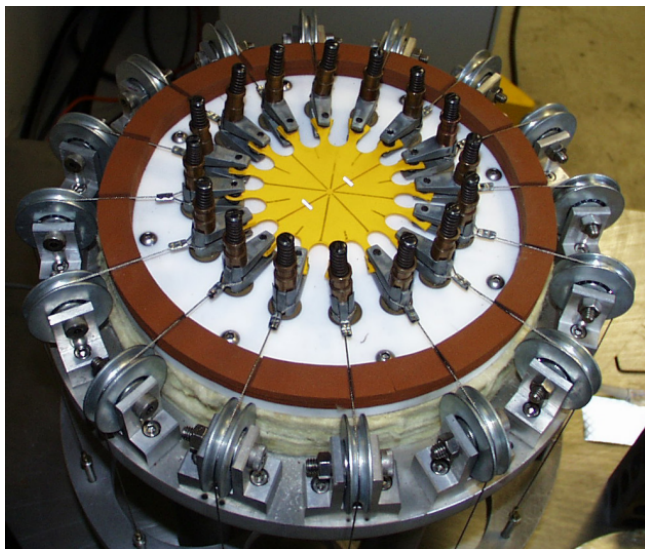
**Tabel 4.2.1.** Elastomeeride mõõtmise tüübid ja rakised

### 4.3 Ekvibiaktsiaalne mõõtmine



**Joonis 4.3.1.** Ekvibiaktsiaalne venitamine [39]

Elastomeeride uniaktsiaalse kokkusurumise puuduseks on kokkupuutepindadel tekkiv hõõrdejõud, mis mõjutab mõõtetulemust. Selle puuduse eemaldamiseks saab asendada uniaktsiaalse kokkusurumise ekvibiaktsiaalse venitamisega (Joonis 4.3.1), millel pole hõõrdejõust tulenevat mõju. [41] Sellel eesmärgil on Axel Products Inc arendanud mõõteseadme (Joonis 4.3.2).



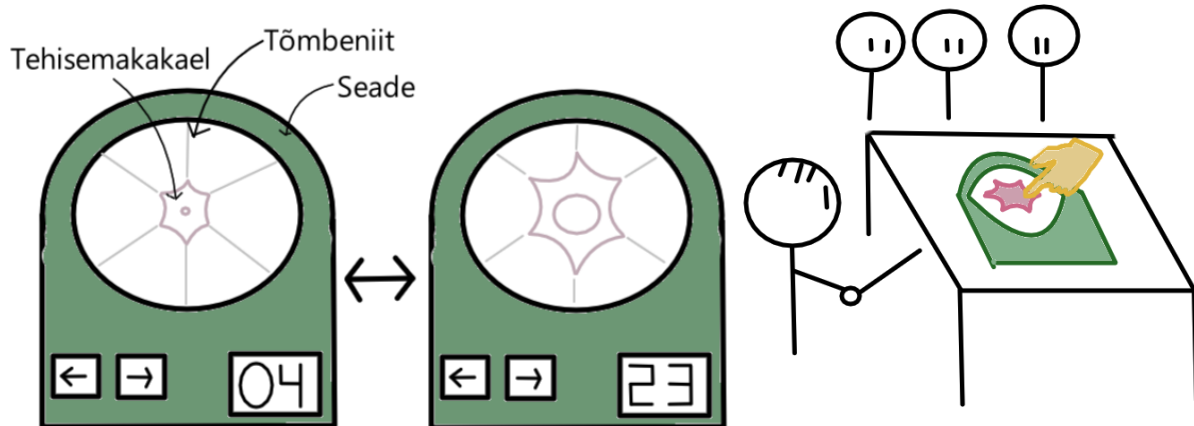
**Joonis 4.3.2.** Axel Products mõõteseadme [42]

**Joonis 4.3.3.** Venitav katseobjekt [42]

Seade venitab katseobjekti (Joonis 4.3.3) 16 punktist, kasutades DMA-d sarnaselt Netzchi seadmele. Katseobjekt on ühendatud trossidega all oleva plaadi külge, mida liigutatakse vertikaalsel teljel. Plaadi küljes omakorda on survesensor, mis mõõdab katseobjekti poolt rakendatavat jõudu. [42]

Selline venitamine on väga sarnane emakakaela avanemisele – emakakaelal on radiaalsed kiud ja sünnituse ajal see venib radiaalselt. [5]

## 5 Tööle esitatavad nõuded



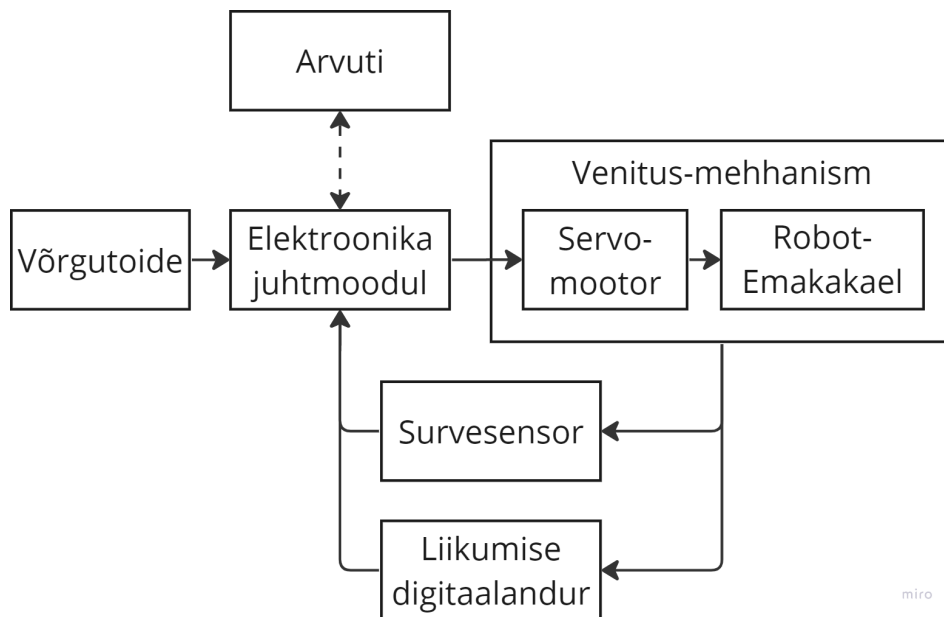
*Joonis 5.1. Seadme kontseptsioon ja selle kasutamine. Nupud määravad avatusastme ja kuvar näitab kontekstipõhist parameetrit (avatusaste).*

TÜ tehnoloogiainstituudis pehmerobotika töögrupi poolt on välja töötatud tehisemakakael. Sellel on maksimaalselt 16 väljaulatuvat tõmbeniiti, tehisemakakaela diameeter tõmbeniitide otsast on umbes 18cm. Tehisemakakael arendati eesmärgil olla realistlikum õppevahend.

Bakalaureusetöö eesmärk on luua juhtimisliides (Joonis 5.1), mis võimaldab pehmerobot-emakakaela kasutamist õppevahendina. Süsteemil on järgmised nõuded:

- Liidestub paralleelselt arendatava tehisemakakaelaga ja suudab seda venitada radiaalselt ja sünkroonselt
- Kompaktne ja vaikne
- Tehisemakakael on kergesti ligipääsetav
- On võimalik mõõta ja määrata venitamiseks kuluv jõud
- On võimalik mõõta ja määrata deformatsiooni määra
- Seadmel on võimaliktöötada iseseisvalt, ilma arvuti ühenduseta
- Kontekstipõhise parameetri kuvamine vastavalt deformatsiooni määrale, jõule või nende seosele
- Liidesprogramm, millega saab lugeda seadme andmeid ja salvestada avatusastmeid

## 6 Süsteemi disain



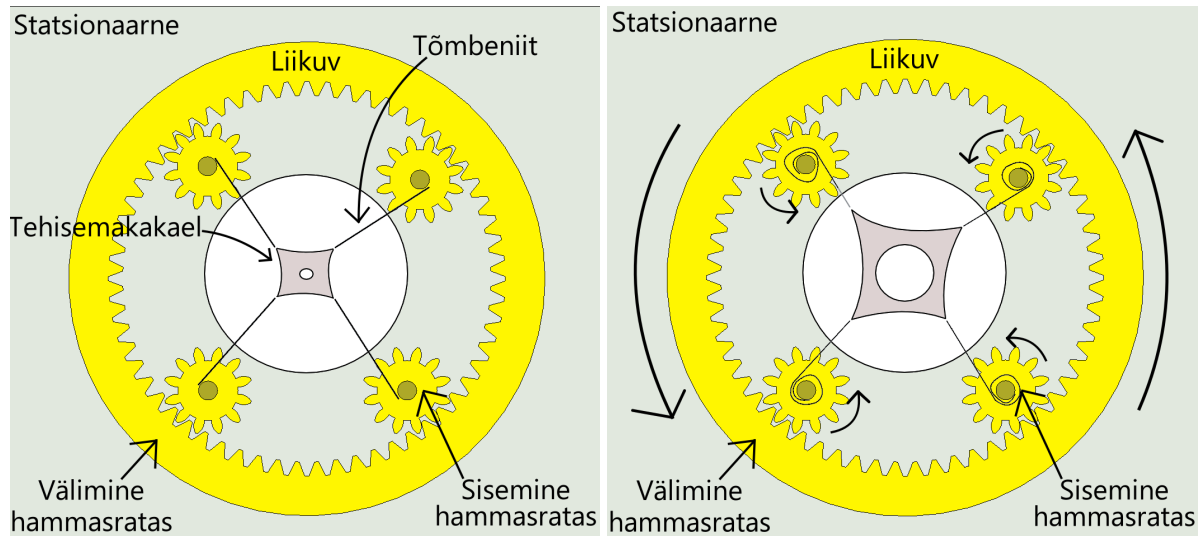
*Joonis 6.1. Süsteemi komponendid*

Arendatav süsteem (Joonis 6.1) koosneb kolmest osast:

- Mehaanika – Liidestab tehisemakakaela ja elektroonika. Võimaldab venitada emakakaela radiaalselt kuni 16-st punktist võrdse tõmbejõuga. (Peatükk 6.1)
- Elektroonika – Juhib venitamise mehhanismi. Mõõdab jõudu ja venituse pikkust. Ühildub arvutiga. Saab kasutajalt sisendit nuppude kaudu. (Peatükk 6.2)
- Liidesprogramm – Ühildub seadmega. Võimaldab salvestada avatusastmeid. (Peatükk 6.3)

## 6.1 Mehaanika

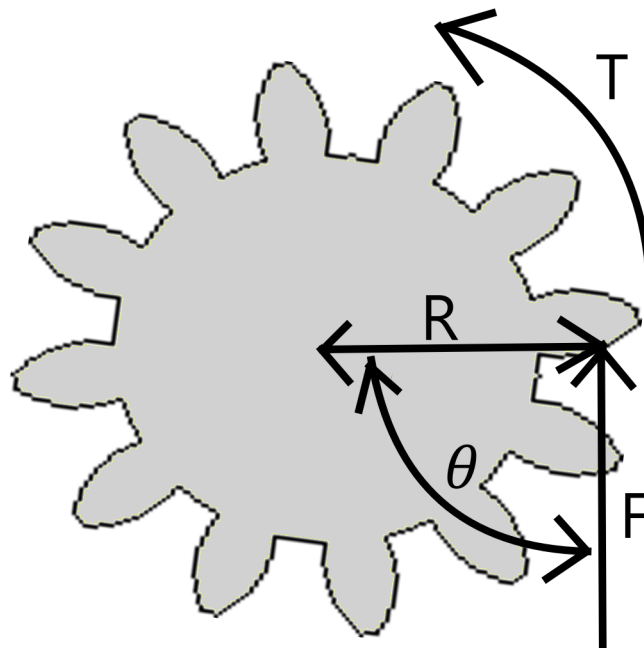
### 6.1.1 Venitamise mehhanism



**Joonis 6.1.1.1.** Seadme venitusmehhanismi lihtsustatud kinemaatika. Siin ja edaspidi on halliga märgitud statsionaarsed elemendid, kollasega on märgitud liikuvad elemendid. Tehisemakakael on kahes eri avatusastmes ja kinnitatud tõmbeniitidega sisemiste hammasrataste võllide külge. Saavutamaks sünkroonset radiaalset venitust, transleeritakse üks pöördetelg mitme tõmbeniidi sünkroonseks radiaalseks tõmbeks

Süsteem saavutab radiaalse ja sünkroonse venituse kahte tüüpi hammasratastega (Joonis 6.1.1.1): 16 väiksema raadiusega sisemist hammasratas ja üks välimine hammasratas, mille hambad on seespool ja kontaktis sisemiste hammasratastega. Mõlemad hammasrattad on ühildumiseks sama hamba suurusega. Kui pöörata välimist hammasratas, siis sisemised hammasrattad pöörlevad sünkroonselt. Tehisemakakaela tõmbeniidid on kinnitatud sisemiste hammasrataste võlli külge ja kui need pöörlevad, siis võll käitub kui pool, mille ümber tõmbeniit mässitakse.

## 6.1.2 Jõu mõõtmine



**Joonis 6.1.2.1.** Pöördemoment hammasrattal.  $T$  - pöördemoment,  $F$  - avaldatav jõud,  $R$  - jõu avaldumise kaugus keskpunktist,  $\theta$  - nurk avaldatava jõu ja raadiuse vahel

Hammasrattale rakendatava jõu ja selle keskpunktist kauguse suhte kirjeldamiseks kasutatakse mõistet pöördemoment  $T$ , ühikuks njuutonmoment (Nm) (Joonis 6.1.2.1). Kaugust keskpunktist nimetatakse jõu õlaks. Pöördemoment väljendub valemiga:

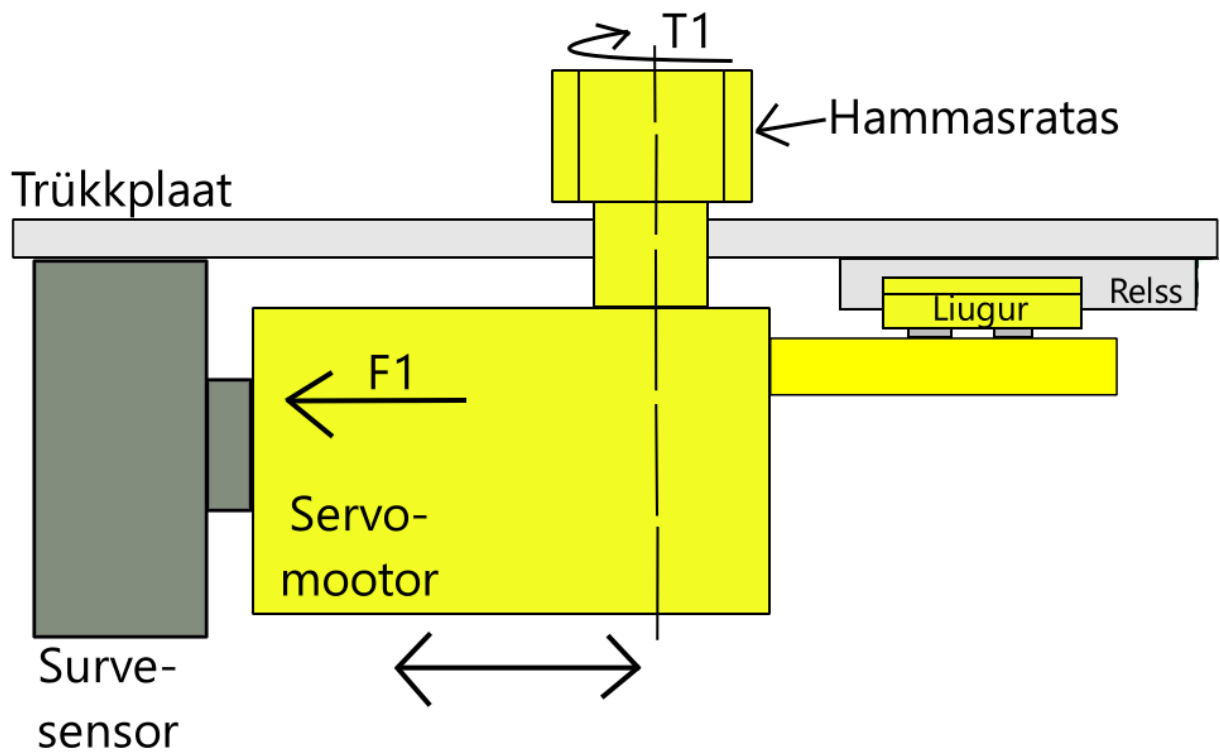
$$T = F * r * \sin\theta \quad (1)$$

kus  $F$  on rakendatav jõud njuutonites (N) ja  $r$  on jõu õlg. [43]

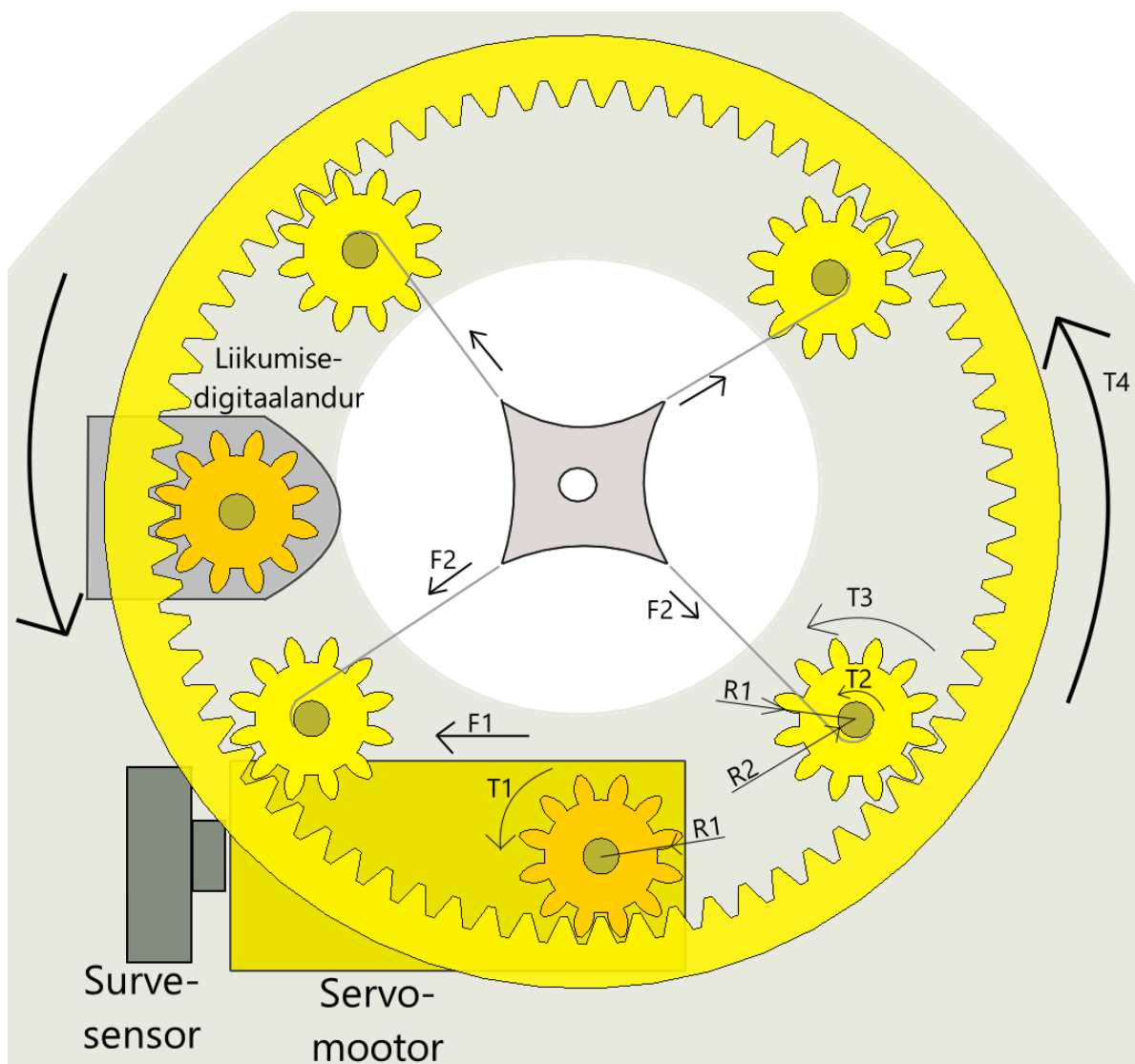
Kui arvestada, et  $\theta$  on 90 kraadi, saab valemit lihtsustada:

$$\sin(90^\circ) = 1 \quad (2)$$

$$T = F * r \quad (3)$$



*Joonis 6.1.2.2. Servomootori rakise läbilõige. Kollased komponendid on liikuvad, ülejäänud on fikseeritud. Servomootor on ühendatud relsiga, mis kindlustab, et see liigub ainult ühte telge mööda.*



**Joonis 6.1.2.3.** Venitamismehhanism. Tehisemakakael on tõmbeniitidega ühendatud sisemiste hammasrataste võlli külge, millel on väiksem raadius. Joonise allosas on servomootor, mis liigub horisontaalsel teljel ja mille võll on ühendatud välimise hammasrattaga. Servomootori kest on komponent, mis surub jõusensori vastu. Nooltega on näidatud jõud ( $F$ ), raadiused ( $R$ ) ja pöördemomendid ( $T$ ).

Servomootor ei ole oma rakises fikseeritud, vaid sel on lubatud liikumine risti teljes, mis on saadud liuguri kasutamisega (Joonis 6.1.2.2). Kui servomootorile rakendub jõud, siis see saab liikuda sirgjooneliselt vastu jõusensorit. Väline hammasratas ei hakka märkimisväärselt servomootori asendit muutma, sest jõusensori kontaktpind liigub oma maksimaalse jõu taluvuse, 50N juures 0.03mm. [44]

Mehhanismi liigutamiseks peab tööle panema lineaarse servomootori (DF15RSMG). Servomootori loodud pöördemoment on sümboliga  $T_1$ . Andmelehe järgi on selle maksimaalne pöördemoment 19 kg\*cm. [45]

Servomootori võlli küljes olev hammasratta on identne ülejäänute sisemiste hammasrattastega ja kuna need asuvad välimise hammasratta suhtes samal raadiusel, on servomootori poolt tekitatud pöördemoment jaotunud võrdselt kõikidele sisemistele hammasrattastele. Sisemiste hammasrattaste arvu märgib sümboliga  $n$ .

$$T_3 = T_1/n \quad (4)$$

Sisemise hammasratta hamba raadius:

$$R_1 = 4.1mm \quad (5)$$

Sisemise hammasratta pooli raadius:

$$R_2 = 2.5mm \quad (6)$$

$F_2$ , mis on ühele tõmbeniidile rakendatav jõud, avaldub järgnevalt:

$$T_2 * R_2 = T_3 * R_1 \quad (7)$$

$$T_2 = T_3 * R_1 / R_2 \quad (8)$$

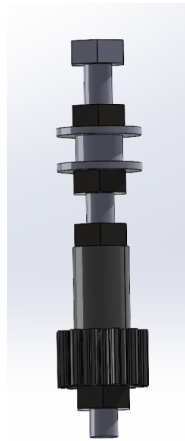
$$T_2 = 1.6 * T_3 \quad (9)$$

$$T_2 = 1.6/n * T_1 \quad (10)$$

$$F_2 = 1.6/n * F_1 \quad (11)$$

Newtoni kolmas seadus: kaks keha mõjutavad teineteist suuruselt võrdselt vastassuunaliste jõududega. Sellest saame järeldada, et kui servomootor hakkab liigutama välimist hammasrattast, siis servomootorile endale mõjub vastassuunaline jõud. Seda jõudu mõõdetakse survesensoriga. Valem 11 seob survesensori näidu iga tõmbeniidi tõmbejõuga.

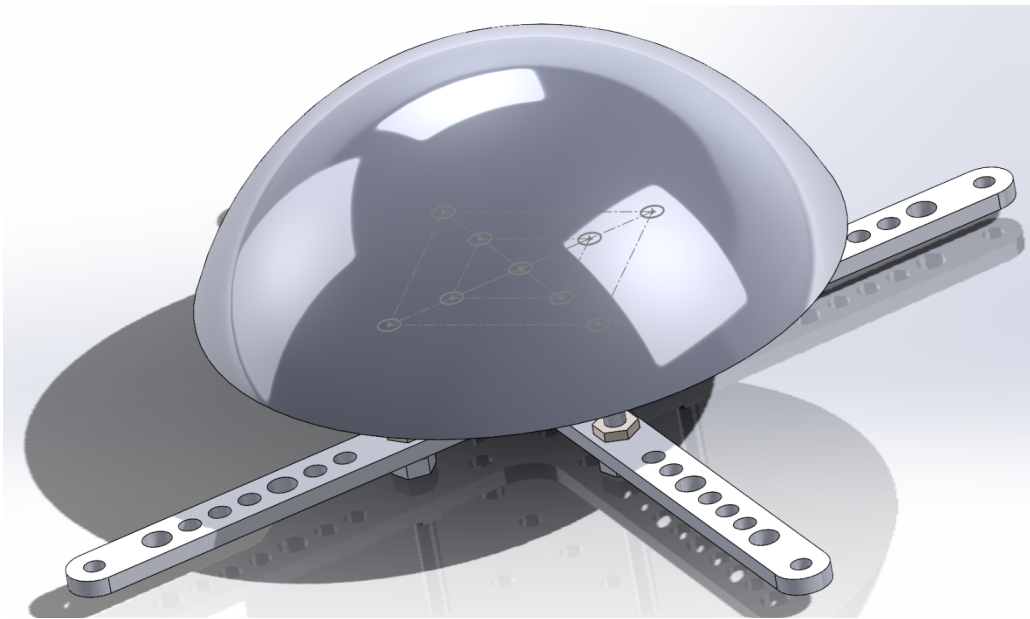
### 6.1.3 Poolide alamkoost



*Joonis 6.1.3.1. Sisemiste hammasrataste alamkoostu külgsuuna vaade.*

Tõmbeniitide kinnitamiseks ja välimise hammasratta mehaanilise liikumise edasikandmiseks on pooli alamkoostud. Poolide läbivaks võlliks on 40mm pikkune M3 polt (Joonis 6.1.3.1). Sellel on ühes otsas tõmbeniidipool, mis koosneb kahest seibist, kahest mutrist ja 3D-prinditud vahepuksist. Tehisemakakaela tõmbeniit kinnitatakse ülemise seibi ja vahepuksi vahele, mille järel surutakse see mutritega kokku. Seibide eesmärk lisaks tõmbeniidi kinnitamisele on ka kindlustada, et tõmbeniit mässiks end ümber vahepuksi, mitte teiste komponentide. Sarnaselt on ühendatud poldi külge hammasratas. Hammasrattal on keskel läbiv ava ja see fikseeritakse poldi külge mõlemalt poolt ühe mutriga.

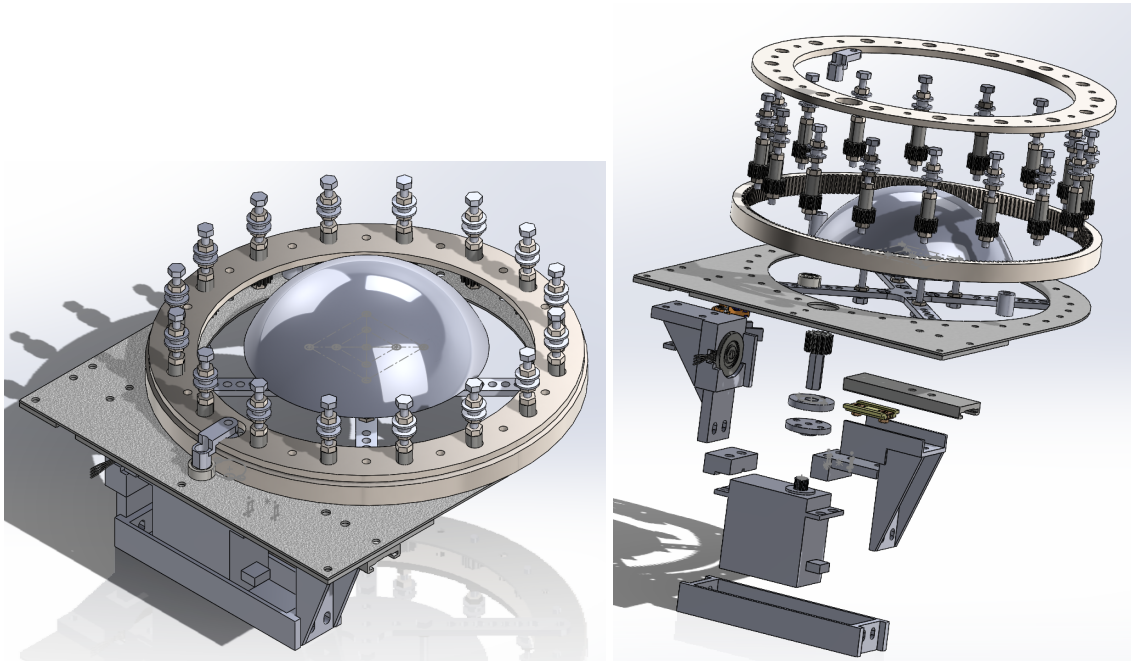
### 6.1.4 Loote pea imitatsioon



*Joonis 6.1.4.1. Loote pea imitatsiooni alamkoost.*

Loote pea imiteerimiseks on eraldi alamkoost (Joonis 6.1.4.1), mis koosneb kuplist, mille põhja diameeter on 90 mm, kõrgus keskpunktist 30 mm, ja raamist, mis ühildub ülejäänud seadmega poltidega. Kuppel ja raam ühilduvad omavahel samuti poltidega. Raamis on varuga avasid, et vajadusel lisada erineva suuruse ja asendiga komponente.

## 6.1.5 Mehaanika lõpplahendus



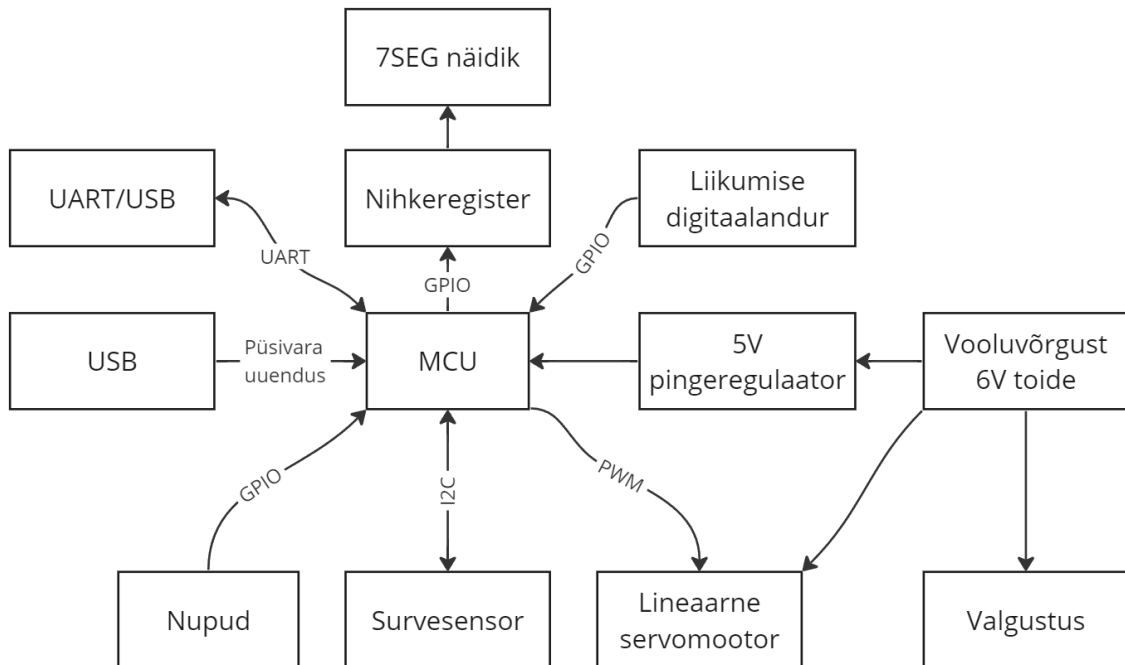
*Joonis 6.1.5.1. Süsteemi terviklik ja laialitõmmatud mudel*

Mehaanika disainiks kasutati Solidworksi tarkvara [46] (ver. 2022-2023). Lisaks trükkplaadile koosneb seade IGUS-st [47] tellitud komponentidest, 3D prinditud komponentidest ja peamiselt M3 poltideist. 3D-mudeli failid on toodud Lisas A ja tellitud komponentide nimekiri on toodud Lisa B Tabelis B.2. Valmis süsteemi mudel on kujutatud Joonisel 6.1.5.1, mille tähtsamad alamkomponendid on:

- Trükkplaat, mille külge kinnituvad ülejäänud komponendid
- Trükkplaadi peal olev venitamise mehhanism koos 16 pooliga
- Trükkplaadi all olev servomootori rakis koos survesensoriga
- Trükkplaadi alla kinnitatud kuppel imiteerimaks loote pead

## 6.2 Elektroonika

### 6.2.1 Komponentid



Joonis 6.2.1.1. Elektroonika plokkskeem

Elektroonika komponendid ja nende ühendusliidesed on kujutatud Joonisel 6.2.1.1.

Komponentide nimekiri on Lisas B Tabelis B.1.

Põhikomponendid on järgnevad:

- 1tk ATMEGA32U4-AU mikrokontroller (MCU)
- 1tk FX29K0-100A-0010-L survesensor
- 1tk DF15RSMG lineaarne servomootor
- 1tk CD74ACT164M96 2-kohaline 7SEG näidik
- 2tk CD74ACT164M96 nihkeregister
- 5tk EVQQ2D03W surunupp
- 1tk FT234XD-R USB/UART sild
- 1tk EC10E1220501 liikumise digitaalandur
- 1tk WR9MB2000CCPIMFR6B toiteplokk

Elektroonika toiteks kasutatakse 6V ja 12W toiteadapterit (WR9MB2000CCPIMFR6B), mis on otse ühendatud servomootoriga (DF15RSMG) ja valgustusega. Ülejäänud elektroonika kasutab toitepinget 5V, mis saadakse pingeregulaatorilt (LD1117S50TR).

Arvutiga ühendamiseks on seadmel kaks micro-USB pesa, millest üks on mikrokontroller (ATMEGA32U4-AU) programmeerimiseks ja teine suhtlemiseks üle USB/UART liidese (FT234XD-R).

Tehisemakakaal peab olema hästi nähtav, kui seadet kasutatakse demo eesmärgil, selle jaoks on trükkplaadil LEDid.

Kasutajalt sisendi saamiseks on 5 nuppu (EVQQ2D03W):

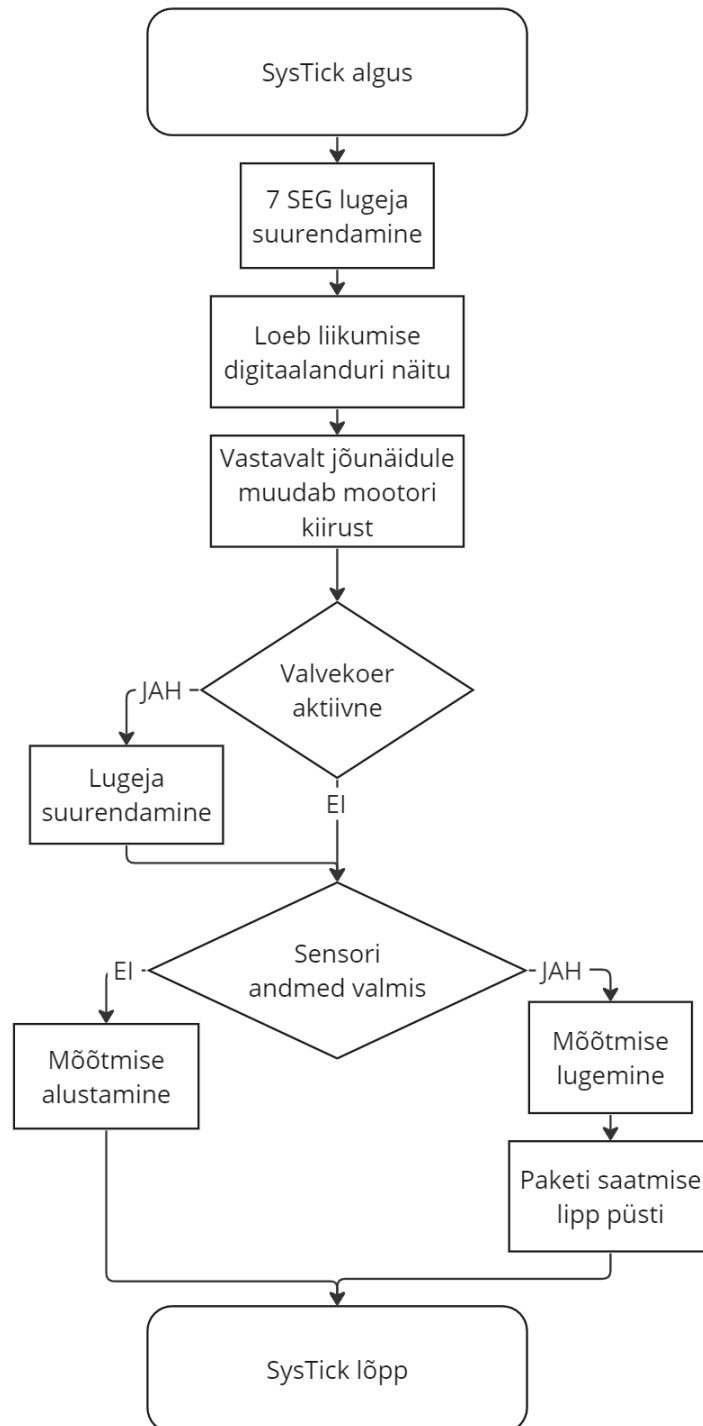
- RESET – Taaskäivitab mikrokontrolleri.
- AUTO, DEFAULT – Pingutavad tehisemakakaela eelnevalt määratud nivoole.
- →, ← – Kas venitab või lõdvendab tehisemakakaela.

### 6.2.2 Püsivara

Seadme püsivara kirjutati C keeles, kasutades Microchip Studio tarkvara (versioon 7.0.2594) [48]. Koodifailid on Lisas A. Püsivaras on järgmised elemendid:

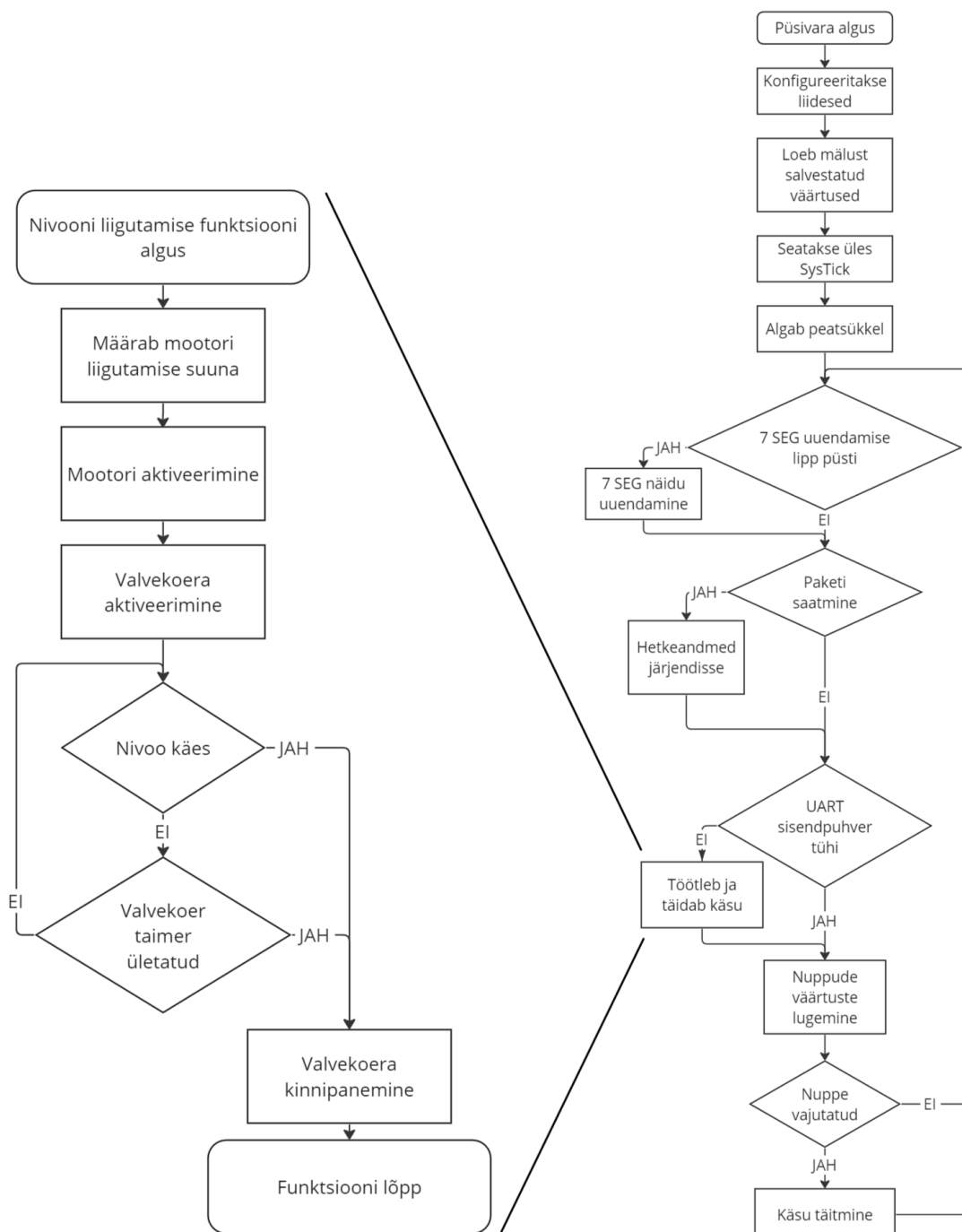
- Survesensoriga suhtlemiseks on I<sup>2</sup>C moodul, mis sooritab ka njuutoni teisendust
- Servomootori juhtimismoodul, mis kasutab riistvaralist taimerit PWM signaali loomiseks
- Mälumoodul, mis kirjutab ja loeb kasutaja poolt määratud nivood mikrokontrolleri EEPROM mälust.
- Liikumise digitaalanduri moodul, mis loeb deformatsiooni määra
- Valvekoer taimer, mis nivoole liikumisel kindlustab, et vea korral ei jää seade lõpmatusse tsüklisse
- 7-segmendilise näidiku juhtimismoodul
- UART moodul, kus on sisendi ja väljundi salvestamiseks ringpuhvrid ning töötamise eraldamiseks peatsüklilist väljundi saatmise ja sisendi vastuvõtmise katkestused
- GPIO moodul, mis loeb nuppude seisu ja juhib staatuse LEDi
- Süsteemi moodul, kus on süsteemi juhtimisloogika

Süsteemi mooduli juhtimisloogika saab jaotada kaheks: peatsükkel ja *SysTick* [49]. *SysTick* on 100Hz sagedusega riistvaralise taimeriga loodud katkestus, kus loetakse liikumise digitaalandurit, survesensori näitu ja suurendatakse erinevate lugejate väärtusi, nagu valvekoer taimer. Selle täpsem vooludiagramm on kujutatud Joonisel 6.2.2.1.



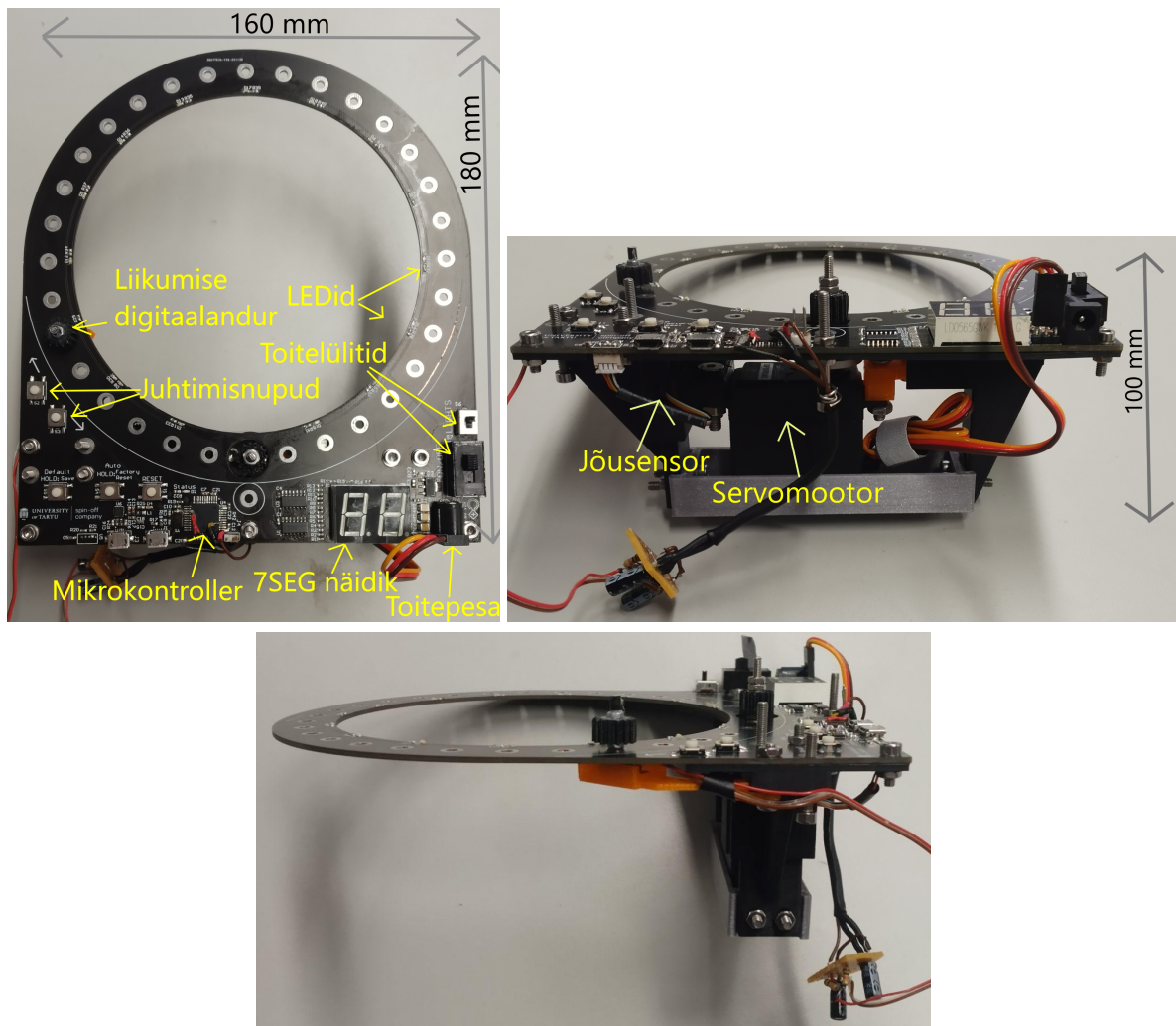
**Joonis 6.2.2.1.** Mikrokontrolleri perioodilise katkestuse (*Systick*) vooludiagramm

Teine juhtimisloogika komponent on peatsükkel (Joonis 6.2.2.2). Peatsükli 8 Hz sagedusega uuendatakse 7-segmendil jõusensori näitu njuutonites. 20 Hz sagedusega lisatakse UARTi väljundpuhvrise pakett jõusensori hetke näidu ja deformatsiooni määraga. Kui UARTi sisendpuhver pole tühi, töödeldakse sealt saadud käsk, näiteks seadme määratud nivoole liigutamine. Lisaks loetakse nuppude seis ja kui tuvastatakse nupuvajutus, täidetakse nendele vastav funktsioon.



Joonis 6.2.2.2. Püsivara peatsükli vooludiagramm

### 6.2.3 Elektroonika valmislahendus



*Joonis 6.2.3.1. Valminud elektroonika pealtvaade, eestvaade ja külgvaade*

Valmis elektroonika on kujutatud Joonisel 6.2.3.1. Elektroonika disainiks kasutati Altium (ver. 22.10.1) tarkvara [50]. Komponentid hangiti Farnelli [51], Mouser [52] ja Digi-Key veebipoodidest [53]. Disain valmis kursuse “Riistvaraprojekt LTAT.05.022” raames. Trükkplaat telliti firmast JLCPCB [54]. Dokumentatsioon on Lisas B joonistel B.1, B.2 ja B.3.

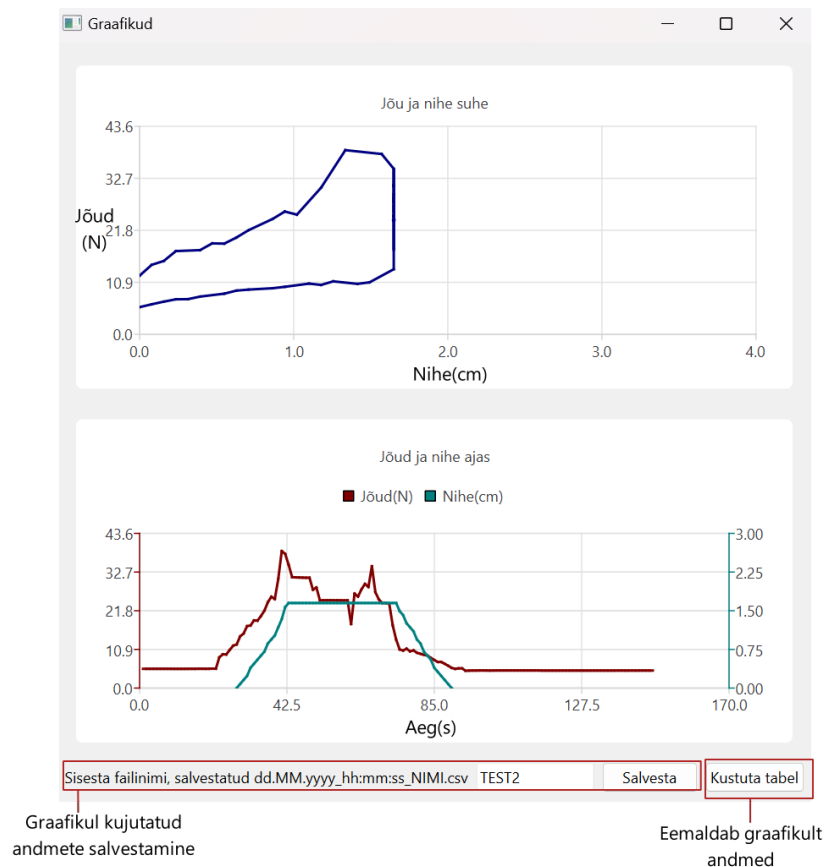
## 6.3 Liidesprogramm

Näitavad hetkeandmeid

Salvestab seadme hetkeiseisu mälusse

Terminaliaken, mis annab tagasisidet programmi kasutamisel

Avab teise akna, kus on graafikud



**Joonis 6.3.1.** Liideprogrammi peaken ja graafikute aken. Graafikuteakna ülemisel graafikul on jõu ja nihke suhe. Alumisel graafikul on jõud ja nihe ajas

Liidesprogramm on tehtud Qt Creator [55] (ver. 9.0.1) tarkvaraga ja QT [56] (ver. 6.4.0) teegiga keeles C++. Koodifailid on Lisas A. Liidesprogramm võimaldab kasutajal teha järgnevat:

- Lugeda reaajas seadme jõusensori ja enkooderi väärtusi
- Muuta seadme erinevate avatusastmete vaikeväärtusi
- Salvestada seadme poolt saadud andmed komaga eraldatult CSV(ingl k. *comma separated values*) faili
- Esitab jõu ja nihke andmed graafikul

Programm koosneb kahest komponendist (Joonis 6.3.1) :

- peaaken
- graafikute aken

Peaaknas kuvatakse info hetkeseisu kohta, näiteks hetke jõud ja nihe, nupud seadmele käskude saatmiseks ja terminal, kus jooksvalt kuvatakse infot, mis programmi töö jooksul tekib.

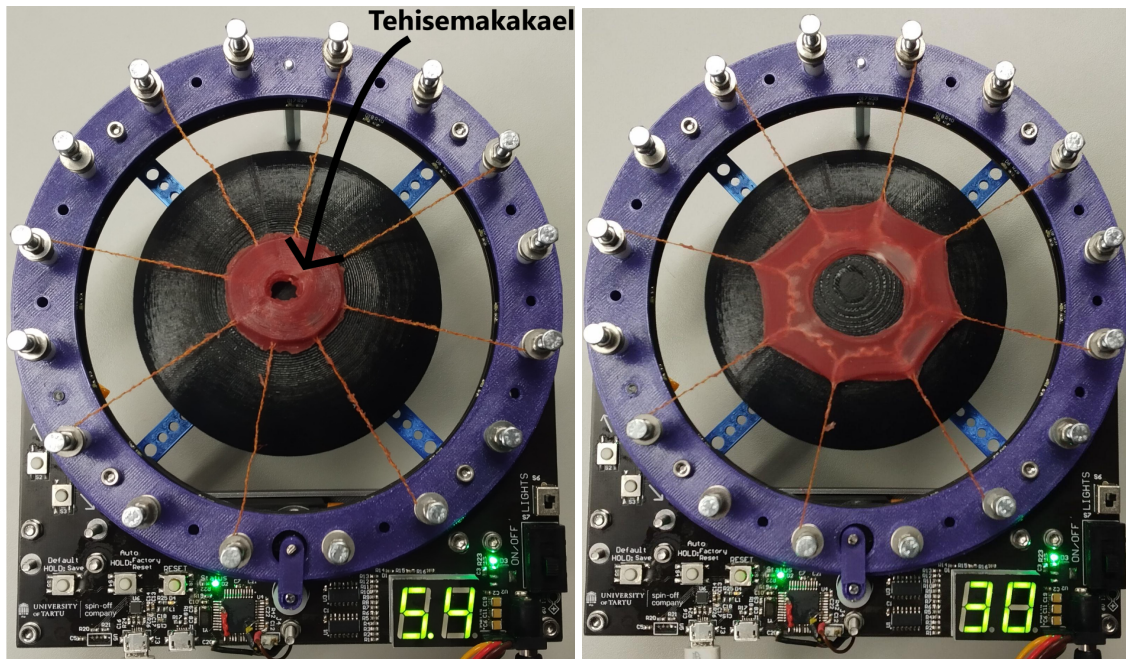
Graafikute aknas on 2 graafikut, üks on jõu ja nihke omavaheline suhe ja teine on mõlema näidu muutumine ajas. Graafikute aknal on oma puhver, kus hoitakse jõu ja nihke andmeid, mida saab tühjendada. Puhver annab võimaluse spetsiifilisemaid andmeid salvestada eraldi faili, mille jaoks on akna all real vastavad sisendid.

Suhtluseks seadmega kasutab programm üle USB jadasiini 7 baidi suurust andmepaketti (Joonis 6.3.2). Paketi alguseks on 0 väärtus, seejärel paketi tüübi kood, jõu ja nihke andmed ja kõige lõpus *checksum*. *Checksum* saadakse, kui kõik paketi, v.a paketi algus, baidid on omavahel bitikaupa XOR tehte läbinud.



**Joonis 6.3.2.** Kasutatava paketi formaat baithaaval

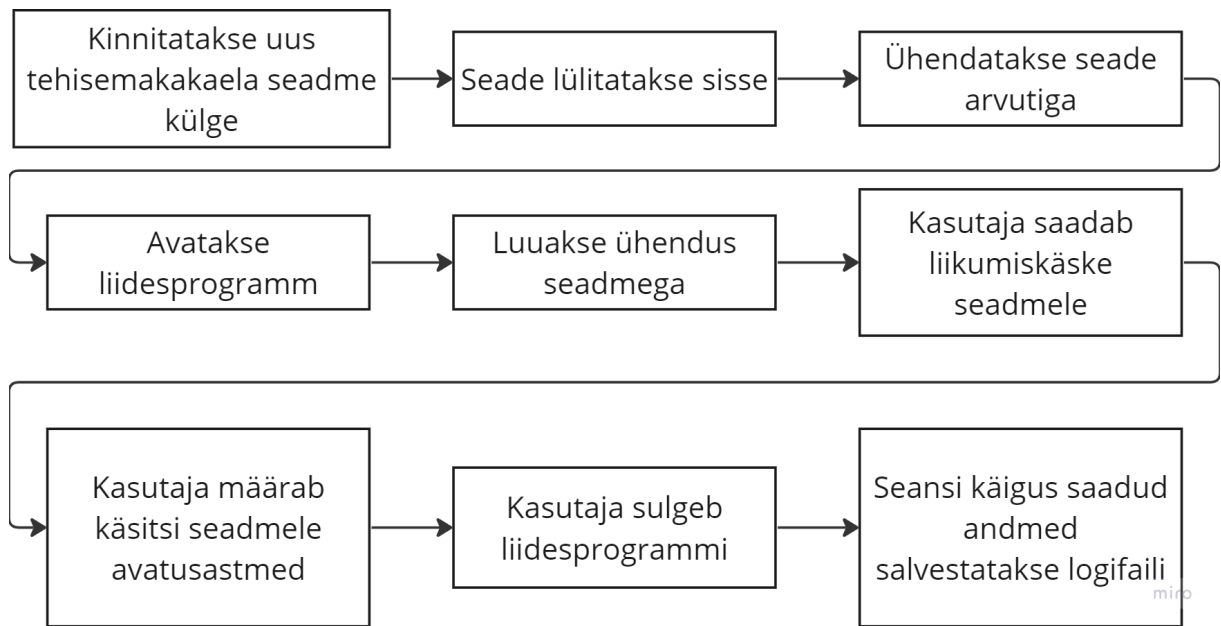
## 6.4 Terviklahendus ja selle kasutamine



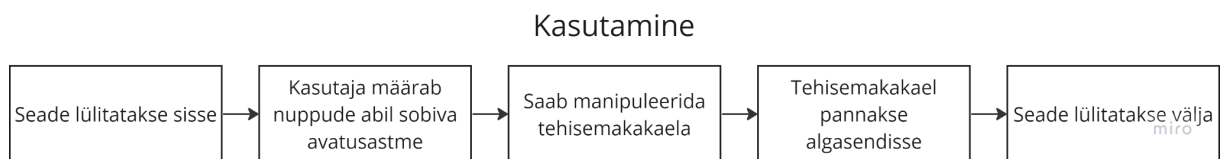
*Joonis 6.4.1. Terviklahenduse pealtvaade koos seadme paigaldatud tehisemakakaelaga eri avatusastmetes*

Bakalaureusetöö käigus valminud seade on kujutatud Joonisel 6.4.1. Seadme mõõtmed on 160x181x98 mm. Loodud seade on 5. tehnoloogia valmidusastmega ehk seade on töötav prototüüp simuleeritud keskkonnas [57].

Süsteemi disainimise ajal vaadati kahte kasutusjuhtu: uue tehisemakakaela paigaldamisel avatusastmete määramine (Joonis 6.4.2), mis nõuab spetsialisti, ja õppetingsimustes kasutamine (Joonis 6.4.3). Esiteks määratakse ja salvestatakse tehisemakakaela avatusastmed, millele järgnevalt, saab seadet kasutada õppetingsimustes.



**Joonis 6.4.2.** Uue tehisemakakaela kinnitamisel avastuste määramine

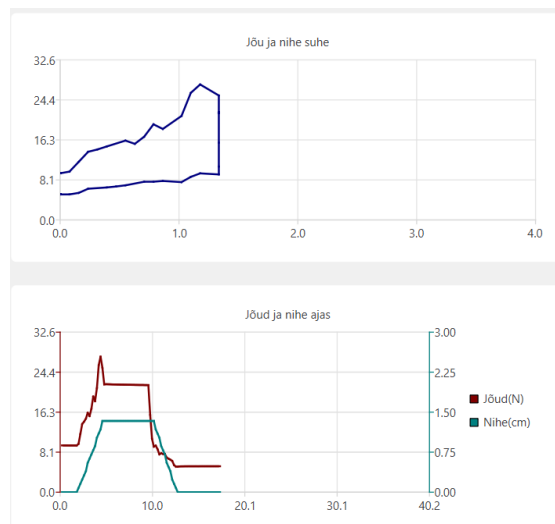


**Joonis 6.4.3.** Seadme kasutamine simulatsiooni olukorras

# 7 Parametriseerimine

## 7.1 Tehisemakakaela mõõtmised

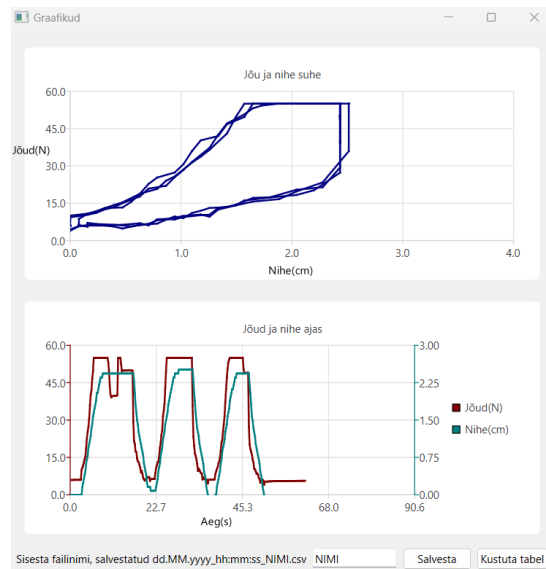
Seadme peal on katsetatud 2 erinevat tehisemakakaela. Esimese versiooni mõõtmised kupli peale tasaselt tõmmatud olekus on järgnevad: välimine diameeter 35 mm, sisemise ava diameeter 5 mm ja kõrgus 10 mm. Seade paigaldatud tehisemakakaelaga, mis on minimaalse ja maksimaalse saavutatava avatusastmega, on Joonisel 6.4.1.



**Joonis 7.1.1.** Liidesprogrammi graafikute aken, kui on tehisemakakaela esimest versiooni venitatud maksimaalsele avatusastmele ja siis tagasi

Esimese versiooni venitamisel saadud andmed on kujutatud Joonisel 7.1.1. Tehisemakakael oli eelnevalt venitatud laiali piisavalt, et alumine külg oleks kupliga kokkupuutes, mille järel nihe nulliti. On näha, et venitamisel muutub vastavalt jõud suuremaks. Pole aga selgelt näha elavkoele sarnast J-kujulist kõverat. Kui avatusaste on saavutatud, on näha jõunäidu vähenemist, mille põhjuseks on mootori seiskumine. Seejärel jõu näit stabiliseerub. Hüsterees on materjali omadus, kus materjal peale deformeerumist ei liigu koheselt algolekusse ja seda on ka näha graafikul, kui tehisemakakael viiakse tagasi algasendisse. Piiravaks elemendiks on mehaanika. Kui jõud läheneb joonisel kujutatud maksimumini, siis välimine hammasratas on piisavalt painduv, et sisemised hammasrattad hakkavad libisema. Selle tagajärjel välimine hammasratas võib küll liikuda, aga sisemised hammasrattad jäävad paigale.

Tehisemakakaela teine versioon on märgatavalt suurem. Venitamata olekus on selle diameetriks 60 mm ja selle kõrgus on 35mm. Esimest versiooni saab vaadelda kui teise versiooni pealmist kihti. Samuti on teisel versioonil 16 tõmbeniiti, millest 8 on ühendatud emakakaela põhjaga ja 8 on ühendatud emakakaela välissuudmega.



**Joonis 7.1.2.** Liidesprogrammi graafikute aken, kui on tehisemakakaela teist versiooni venitatud maksimaalsele avatusastele ja siis tagasi korduvalt

Võrreldes esimese versiooniga on maksimaalne saavutatav deformatsiooni määr 10mm võrra suurem (Joonis 7.1.2). Põhjuseks võib pidada 16 kinnituspunkti 8 asemel, sest siis on jõud rohkem jaotunud ja ei esine hammasrataste libisemist. Piiravaks oli mootori võimsus. Joonisel on näha ka jõu peatumist 50 N juures, mis tuleneb survesensori enda piirangust. Sarnaselt esimesele versioonile, on näha teise versiooni puhul hüstereesisilmus.

## 7.2 Ilmnenud puudujäägid ja edasiarendused

Üheks puuduseks on seadmega saavutatav deformatsioon, mis tehisemakakaela esimese versiooni ava puhul on maksimaalselt 3cm. Venitamise jätkamisel hakkavad hammasrattad libisema ja kokkuvõttes ava ei suurene. Töö tegemisel ei olnud see kriitiline puudus, sest maksimaalse avatusastme korral hakkas silikoon rebenema või siis sellesse põimitud niidid rebitakse silikoonist välja.

Maksimaalset avatusastet saab suurendada mitmel viisil. Üks võimalus oleks muuta kasutatavaid sisemisi hammasrattaid suurema diameetriga hammasrataste vastu, mis on Iguse tootevalikus olemas. Sellega muutub jõuõlg ja omakorda pooli peal rakendatav pöördemoment suuremaks. Teine võimalus oleks välise hammasratta jäikuse suurendamine kas materjali vahetamisega või välimise hammasratta paksuse suurendamisega. Kirjeldatud muudatuste tegemisel oleks vaja suure tõenäosusega valmistada uus versioon trükkplaadist, mis on keskne komponent.

Tehisemakakaela teise versiooni puhul seevastu oli piiranguks servomootori võimsus ja survesensori mõõtevahemik. Suurendamiseks servomootori võimsust, saab lisada servomootori ja välimise hammasratta vahele käigukasti. Survesensori saab vahetada sama kesta, kuid suurema mõõtevahemikuga sensori vastu.

Edasiarendus oleks seadme arendamine tavakasutajale sobivaks. See hõlmaks seadmele kesta tegemist, vajadusel lisada aku ja muuta loote pea imitatsioon anatoomiliselt korrektseks.

## 8 Kokkuvõte

Bakalaureusetöö eesmärk oli luua juhtimisliides, mis võimaldab Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudi pehmerobootikagrupi poolt loodud tehisemakakaela kasutamist õppevahendina. Töö alguses anti ülevaade pehmerobootikast, olemasolevatest tervishoiu simulatsioonõppe õppevahenditest ning elastomeeride omaduste mõõtmisest. Seejärel kirjeldati tööle esitatavad nõuded, süsteemi disain ja lahenduse analüüs.

Töö tulemusena valmis juhtimisliides, mis ühildub olemasolevate tehisemakakaela prototüüpidega. Juhtimisliides võimaldab venitada tehisemakakaela radiaalselt, simuleerides emakakaela erinevaid avatusastmeid sünnituse käigus. Järgmine samm oleks juhtimisliidese arendamine tavakasutajale sobivaks. Lõputöö raames valminud juhtimisliides koos tehisemakakaelaga muudab õppeprotsessi loomulikumaks, mis omakorda tõstab ämmaemandate õppekvaliteeti.

# Tänuavaldused

Indrek Must ja Mona Kүүts teema tutvustamise, juhendamise ja nõu eest.

Leonid Zinatullin koostöö eest.

Riistvaraprojekti aine õppejõud nõu ja abi eest elektroonika disainimisel.

*Scarpere*

## Viited

- [1] D. Gaba, „The Future Vision of Simulation in Health Care“, *Qual. Saf. Health Care*, kd 13 Suppl 1, lk i2-10, nov 2004, doi: 10.1136/qhc.13.suppl\_1.i2.
- [2] S. Lapkin, T. Levett-Jones, H. Bellchambers, ja R. Fernandez, „Effectiveness of Patient Simulation Manikins in Teaching Clinical Reasoning Skills to Undergraduate Nursing Students: A Systematic Review“, *Clin. Simul. Nurs.*, kd 6, nr 6, lk e207–e222, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecns.2010.05.005>.
- [3] R. Cant ja S. Cooper, „Simulation-based learning in nurse education: Systematic review“, *J. Adv. Nurs.*, kd 66, lk 3–15, jaan 2010, doi: 10.1111/j.1365-2648.2009.05240.x.
- [4] Pille Vaas, „Juhend normaalse sünnituse käsitlemiseks“. <http://synnitusejuhend.weebly.com/> (vaadatud 13. mai 2023).
- [5] J. P. Nott, E. A. Bonney, J. D. Pickering, ja N. A. B. Simpson, „The structure and function of the cervix during pregnancy“, *Transl. Res. Anat.*, kd 2, lk 1–7, märts 2016, doi: 10.1016/j.tria.2016.02.001.
- [6] Heilo Altin *et al.*, „Robootika sõnastik“, *Robootika sõnastik*. [Online]. Available at: <https://www.robootika.ee/kasulikku/robootika-sonastik/>
- [7] S. Coyle, C. Majidi, P. LeDuc, ja K. J. Hsia, „Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design“, *Extreme Mech. Lett.*, kd 22, lk 51–59, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eml.2018.05.003>.
- [8] G. Alici, „Softer is Harder: What Differentiates Soft Robotics from Hard Robotics?“, *MRS Adv.*, kd 3, lk 1–12, veebr 2018, doi: 10.1557/adv.2018.159.
- [9] W. Sire, „Soft Robot – A review“, *Elveflow*, veebr 2021, Vaadatud: 30. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://www.elveflow.com/microfluidic-reviews/general-microfluidics/soft-robot/>
- [10] Z. Shen, F. Chen, X. Zhu, K.-T. Yong, ja G. Gu, „Stimuli-responsive functional materials for soft robotics“, *J. Mater. Chem. B*, kd 8, nr 39, lk 8972–8991, 2020, doi: 10.1039/D0TB01585G.
- [11] A. A. Stokes, R. F. Shepherd, S. A. Morin, F. Ilievski, ja G. M. Whitesides, „A Hybrid Combining Hard and Soft Robots“, *Soft Robot.*, kd 1, nr 1, lk 70–74, 2014, doi: 10.1089/soro.2013.0002.
- [12] „Customer Success Story“, Vaadatud: 12. aprill 2023. [Online]. Available at: [https://www.softroboticsinc.com/uploads/2021/10/ABI\\_CaseStudy\\_LR.pdf](https://www.softroboticsinc.com/uploads/2021/10/ABI_CaseStudy_LR.pdf)
- [13] D. I. Labs, „mGrip: mGrip™ Modular Gripping System“, *Soft Robotics*. <https://www.softroboticsinc.com/products/mgrip-modular-gripping-solution-for-food-automation/> (vaadatud 12. aprill 2023).
- [14] Z. Tse *et al.*, „Soft Robotics in Medical Applications“, *J. Med. Robot. Res.*, kd 03, mai 2018, doi: 10.1142/S2424905X18410064.

- [15] M. A. Horvath *et al.*, „An organosynthetic soft robotic respiratory simulator“, *APL Bioeng.*, kd 4, nr 2, lk 026108, juuni 2020, doi: 10.1063/1.5140760.
- [16] „About Simulation“. <https://www.ssih.org/About-SSH/About-Simulation> (vaadatud 15. aprill 2023).
- [17] „SimMan 3G“, *Laerdal Medical*.  
<https://laerdal.com/us/products/simulation-training/emergency-care-trauma/simman/> (vaadatud 22. aprill 2023).
- [18] C. Foronda *et al.*, „Virtually Nursing: Emerging Technologies in Nursing Education“, *Nurse Educ.*, kd 42, lk 1, juuli 2016, doi: 10.1097/NNE.000000000000295.
- [19] „SimPad® Blood Pressure Trainer“, *Laerdal Medical*.  
<https://laerdal.com/us/products/skills-proficiency/defibrillation-cardiology/simpad-blood-pressure-trainer/> (vaadatud 12. aprill 2023).
- [20] Y. Wang, X. Li, Y. Liu, ja B. Shi, „Mapping the research hotspots and theme trends of simulation in nursing education: A bibliometric analysis from 2005 to 2019“, *Nurse Educ. Today*, kd 116, lk 105426, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2022.105426>.
- [21] S. Fuglsang, C. W. Bloch, ja H. Selberg, „Simulation training and professional self-confidence: A large-scale study of third year nursing students“, *Nurse Educ. Today*, kd 108, lk 105175, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nedt.2021.105175>.
- [22] H. Delingette, „Toward realistic soft-tissue modeling in medical simulation“, *Proc. IEEE*, kd 86, nr 3, lk 512–523, märts 1998, doi: 10.1109/5.662876.
- [23] E. Egelanddal, O. Gomo, ja E. Mestad, „A device for simulating variable lung compliance“, AU2009203223B2, 14. november 2013 Vaadatud: 22. aprill 2023.  
[Online]. Available at:  
[https://patents.google.com/patent/AU2009203223B2/en?q=\(simulating+variable\)&assignee=laerdal+medical&oq=laerdal+medical+simulating+variable](https://patents.google.com/patent/AU2009203223B2/en?q=(simulating+variable)&assignee=laerdal+medical&oq=laerdal+medical+simulating+variable)
- [24] O. Gomo, „Medical patient simulator“, AU2004277841B2, 5. august 2010 Vaadatud: 22. aprill 2023. [Online]. Available at:  
<https://patents.google.com/patent/AU2004277841B2/en>
- [25] „Standards for pre-registration midwifery education - The Nursing and Midwifery Council“.  
<https://www.nmc.org.uk/standards/standards-for-midwives/pre-2018-standards/standards-for-pre-registration-midwifery-education/> (vaadatud 13. aprill 2023).
- [26] „VICTORIA® S220“.  
<https://gaumard-downloads.s3.amazonaws.com/brochures/11190041E-VICTORIA-S220-2021-brochure.pdf>
- [27] T. N. Trotta, S. Lowe, A. Rodriguez, M. E. Carvajal, ja V. I. Fernandez, „Interactive education system for teaching patient care“, EP2537150B1, 11. aprill 2018 Vaadatud: 24. aprill 2023. [Online]. Available at:  
[https://patents.google.com/patent/EP2537150B1/en?q=\(maternal\)&assignee=gaumard&oq=gaumard+maternal](https://patents.google.com/patent/EP2537150B1/en?q=(maternal)&assignee=gaumard&oq=gaumard+maternal)
- [28] A. R. Kirchhoff ja R. R. Robaina, „Apparatus, systems, and methods for simulating life-like human emotional states“, US20220044594A1, 10. veebruar 2022 Vaadatud: 24. aprill 2023. [Online]. Available at:

- [https://patents.google.com/patent/US20220044594A1/en?q=\(victoria\)&assignee=gaumard&oq=gaumard+victoria](https://patents.google.com/patent/US20220044594A1/en?q=(victoria)&assignee=gaumard&oq=gaumard+victoria)
- [29] Russel Lazarus, „How Does the Eye Work?“, *Optometrists.org*, 11. oktoober 2020. <https://www.optometrists.org/general-practice-optometry/guide-to-eye-health/how-does-the-eye-work/> (vaadatud 25. aprill 2023).
- [30] B. Neupert, „What is Dilation in Pregnancy?“, *American Pregnancy Association*, 11. november 2021. <https://americanpregnancy.org/healthy-pregnancy/labor-and-birth/what-is-dilation-in-pregnancy/> (vaadatud 14. mai 2023).
- [31] „Info sünnitajale | Pärnu Haigla“. <https://www.ph.ee/et/patsiendile-ja-kulastajale/patsiendiinfomaterjalid/tervis/info-sunnitajale> (vaadatud 22. aprill 2023).
- [32] „Cervical Assessment Simulator | KYOTO KAGAKU“. [https://www.kyotokagaku.com/en/products\\_data/mw35/](https://www.kyotokagaku.com/en/products_data/mw35/) (vaadatud 13. aprill 2023).
- [33] „Fetal Monitoring and Labor Progress Model Set“, *GTSimulators.com*. <https://www.gtsimulators.com/products/fetal-monitoring-and-labor-progress-model-set-h-e-79851> (vaadatud 13. aprill 2023).
- [34] G. A. Holzapfel, „Biomechanics of Soft Tissue“, 2000.
- [35] K. M. Myers, A. P. Paskaleva, M. House, ja S. Socrate, „Mechanical and biochemical properties of human cervical tissue“, *Acta Biomater.*, kd 4, nr 1, lk 104–116, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2007.04.009>.
- [36] M. Vatankhah-Varnosfaderani *et al.*, „Mimicking biological stress–strain behaviour with synthetic elastomers“, *Nature*, kd 549, nr 7673, lk 497–501, 2017.
- [37] Priit Kulu, Jakob Kübarsepp, Andres Laansoo, ja Renno Veinthal, „Materjalitehnika I“, 2015, [Online]. Available at: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjm5fPppKX-AhWUr4sKHZYOD-0QFnoECAoQAQ&url=https%3A%2F%2Fdigikogu.taltech.ee%2Fen%2FDownload%2F90459b4f-868e-4329-90a2-2b040ea6faec&usg=AOvVaw0T2NoZFkp6a\\_eUUCjMVS4N](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjm5fPppKX-AhWUr4sKHZYOD-0QFnoECAoQAQ&url=https%3A%2F%2Fdigikogu.taltech.ee%2Fen%2FDownload%2F90459b4f-868e-4329-90a2-2b040ea6faec&usg=AOvVaw0T2NoZFkp6a_eUUCjMVS4N)
- [38] „Dynamic Mechanical Analysis – DMA 242 E Artemis“. Vaadatud: 16. aprill 2023. [Online]. Available at: [https://analyzing-testing.netzsch.com/\\_Resources/Persistent/2/1/b/b/21bb1b0383e162585bda03bfe901bde4c25b3a24/DMA\\_242\\_E\\_Artemis\\_en\\_web\\_01.pdf](https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/2/1/b/b/21bb1b0383e162585bda03bfe901bde4c25b3a24/DMA_242_E_Artemis_en_web_01.pdf)
- [39] WELSIM-Engineering Simulation Software, „Hyperelastic Material Models and Curve Fitting“, *Medium*, 25. juuli 2020. <https://getwelsim.medium.com/hyperelastic-material-models-and-curve-fitting-22e5ac4f9eb1> (vaadatud 13. aprill 2023).
- [40] Nipun, „Difference Between Shear Stress and Tensile Stress“, *Pediaa.Com*, 29. oktoober 2015. <https://pediaa.com/difference-between-shear-stress-and-tensile-stress/> (vaadatud 13. aprill 2023).
- [41] huaan luo, Y.-L. Zhu, H.-F. Zhao, ja J.-J. Zhang, *Analysis of Equibiaxial Tension Tests for Hyperelastic EAP Film*. 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-402426/v1.

- [42] K. Miller ja Axel Products, Inc, „Measuring the Dynamic Properties of Elastomers for Analysis“.
- [43] Kuno Janson ja Ants Kallaste, „Elektrimasinate alused“, Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2017, lk 21–23. Vaadatud: 17. aprill 2023. [Online]. Available at: <https://digikogu.taltech.ee/et/Item/eb44ad2b-8758-41cd-9483-f8fdb1d40a1c>
- [44] „FX29K0-100A-0010-L : MEAS Compact Compression Load Cell“, *TE Connectivity*. <https://www.te.com/usa-en/product-20009605-20.html> (vaadatud 23. aprill 2023).
- [45] „DF15RSMG 360 Degree Servo Motor“. <https://www.dfrobot.com/product-959.html> (vaadatud 20. aprill 2023).
- [46] „3D CAD Design Software | SOLIDWORKS“. <https://www.solidworks.com/home-page-2021> (vaadatud 11. aprill 2023).
- [47] „High-performance polymers for motion“, *IGUS*. <https://www.igus.eu/> (vaadatud 13. aprill 2023).
- [48] „Microchip Studio for AVR® and SAM Devices | Microchip Technology“. <https://www.microchip.com/en-us/tools-resources/develop/microchip-studio> (vaadatud 23. aprill 2023).
- [49] „Systick Timer (SYSTICK)“. [https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/Core/html/group\\_\\_SysTick\\_\\_gr.html](https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/Core/html/group__SysTick__gr.html) (vaadatud 23. aprill 2023).
- [50] „Altium Designer - PCB Design Software“. <https://www.altium.com/altium-designer> (vaadatud 12. aprill 2023).
- [51] „Farnell Eesti - elektroonikakomponentide edasimüüja“. <https://ee.farnell.com/> (vaadatud 12. aprill 2023).
- [52] „Electronic Components Distributor - Mouser Electronics Estonia“. <https://www.mouser.ee/> (vaadatud 12. aprill 2023).
- [53] „DigiKey Electronics Estonia - Electronic Components Distributor“. <https://www.digikey.ee/> (vaadatud 12. aprill 2023).
- [54] „PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB“. <https://jlcpcb.com/> (vaadatud 16. aprill 2023).
- [55] „Embedded Software Development Tools & Cross Platform IDE | Qt Creator“. <https://www.qt.io/product/development-tools> (vaadatud 13. aprill 2023).
- [56] „Qt 6 - The latest version of Qt“. <https://www.qt.io/product/qt6> (vaadatud 13. aprill 2023).
- [57] I. Tzinis, „Technology Readiness Level“, *NASA*, 6. mai 2015. [http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level](http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level) (vaadatud 24. aprill 2023).

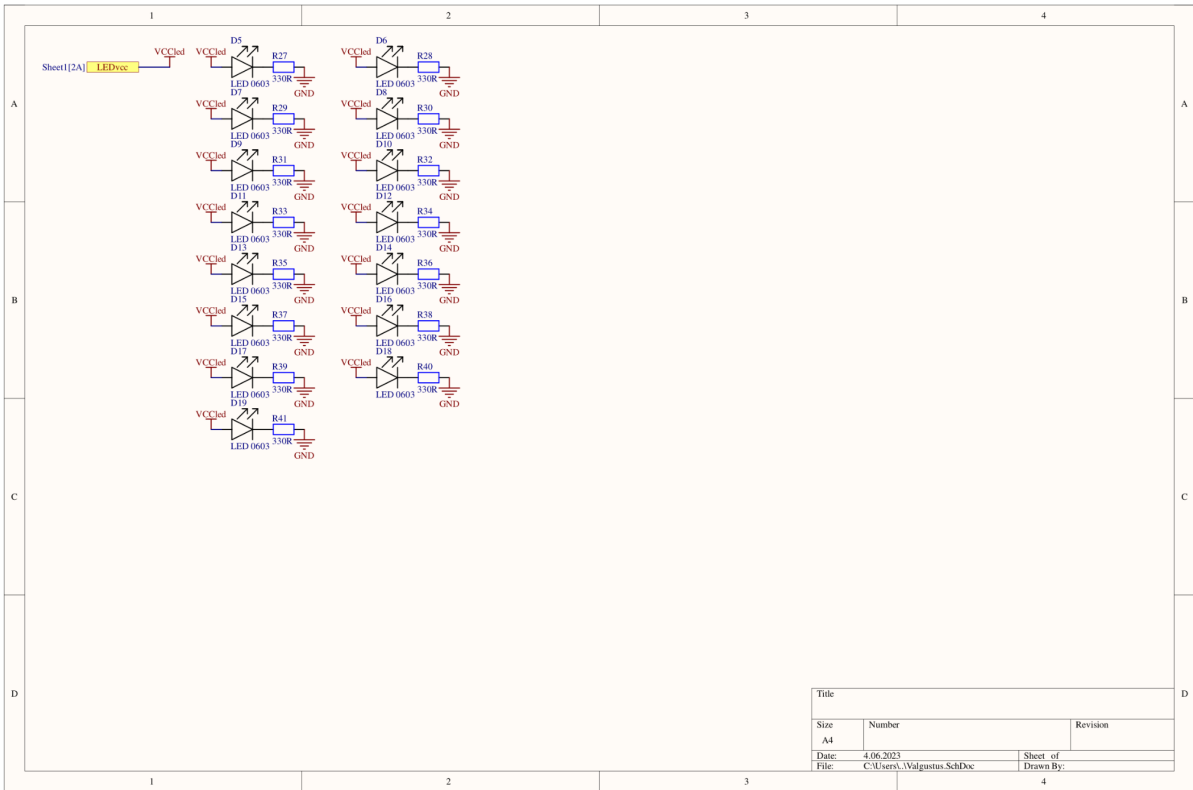
## **Lisad**

### **A Püsivara ja liidesprogrammi koodifailid ja 3D-mudelite failid**

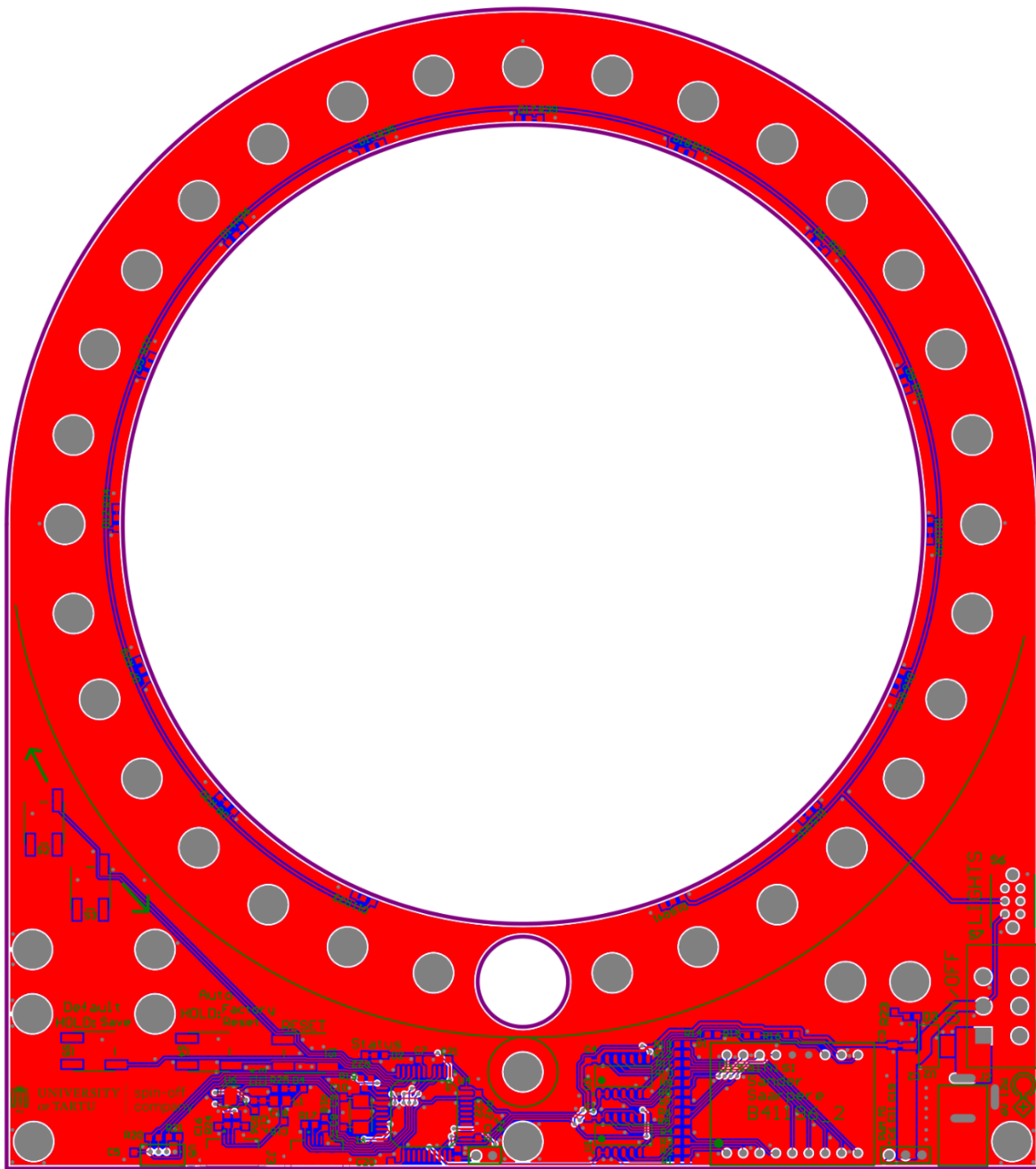
Selle bakalaureusetöö käigus valminud 3D-failid ja koodifailid on ligipääsetavad järgneval aadressil:

[https://drive.google.com/drive/folders/1TXp92Eo\\_vZm1fo7-25phSoVO2kB0xCQb?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1TXp92Eo_vZm1fo7-25phSoVO2kB0xCQb?usp=sharing)





**Joonis B.2.** *Elektronikaskeem lk 2*



*Joonis B.3. Trükkplaadi disain*

Selgitus	Tootekood	Kogus	Farnell	Digi-Key	Mouser
7 SEG	LD0565GWK	1	2627648	-	-
Nihkeregister	CD74ACT164M96	2	2499901	296-14493-1-ND	595-CD74ACT164M96
Jõusensori ühenduspesa	53047-0410	1	9733060	WM1733-ND	538-53047-0410
Mootori toitekondensaat	GRM32EC81C476KE15L	3	1907527	490-10531-1-ND	81-GRM32EC81C476KE5L
Toitepistikupesa	FC68148	1	224959	-	-
Servo ühenduse viigu päis	42375-1856	1	3049570	WM20124-ND	538-42375-1856
Valgustuse lüliti	OS202011MS2QN1	1	2435095	CKN9545-ND	611-OS202011MS2QN1
Ferriit kivi	MI0805K601R-10	1	2292460	240-2390-1-ND	875-MI0805K601R-10
Jõusensori pistik	51021-0400	1	9733116	WM1722-ND	538-51021-0400
Alglaaduri viigu päised	22-03-2021	1	9731075	WM4000-ND	538-22-03-2021
Jõusensori pistiku terminalid	1734193-1	4	3398909	A98721CT-ND	571-1734193-1
Enkooder	EC10E1220501	1	2064975	-	688-EC10E1220501
MCU	ATMEGA32U4-AU	1	1748525	-	556-ATMEGA32U4-AU
microUSB pesa	10104110-0001LF	2	2293753	609-4052-1-ND	649-10104110-0001LF
Surunupp	EVQQ2D03W	5	1821244	P12935STR-ND	667-EVQ-Q2D03W

5V LDO	LD1117S50TR	1	1467781	497-6447-2-ND	511-LD1117S50
16MHz kristall-ostsillaator	ABM3-16.000MHZ-B2-T	1	1611806	535-9103-2-ND	815-ABM3-16-B2-T
Jõusensor	FX29K0-100A-0010-L	1	3290105	223-FX29K0-100A-0010-L-ND	824-FX29K0-100A0010L
Toiteadapter	WR9MB2000CCPIMFR6B	1	-	1939-WR9MB2000CCPIMFR6B-ND	-
USB/UART	FT234XD-R	1	2419911	768-1178-1-ND	895-FT234XD-R
Toitelüliti	L101011MS02Q	1	2931769	CKC5106-ND	611-L101011MS02Q
Servomootor	SER0035	1	-	1738-1245-ND	426-SER0035

**Tabel B.1.** Elektroonika komponendid

Selgitus	Kogus	Tootekood
Hammasrattad	16	S270GM-ST-070-015-00-030-R
Kuullaager	1	BB-623-B180-30-ES
Liugur	1	NW-02-17
Relss	200mm	NS-01-17

**Tabel B.2.** Iguse mehaanika komponendid

# **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Sander Saarpere,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

## **Juhtimisliides pehmerobot-emakakaela õppevahendile**

mille juhendajad on Indrek Must ja Mona Küüts,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates **20.05.2026** kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Sander Saarpere*

**20.05.2023**