



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
EESTI MEREAKADEEMIA  
Meremajanduse keskus

Urmo Koitla

## **Allveelaba edasiarendus**

Lõputöö

Juhendaja: MSc Kaarel Koppel

Kuressaare 2021

Olen koostanud töö iseseisvalt.

Töö koostamisel kasutatud kõikidele teiste autorite töödele, olulistele seisukohtadele ja andmetele on viidatud.

Urmo Koitla

.....

(allkiri, kuupäev)

Üliõpilase kood: 165102SDSR.....

Üliõpilase e-posti aadress: ukoitla@gmail.com.....

Juhendaja MSc Kaarel Koppel:

Töö vastab lõputööle esitatud nõuetele

.....

(allkiri, kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees: /tiitel, ees- ja perekonnanimi/

Lubatud kaitsmisele

.....

(ametikoht, nimi, allkiri, kuupäev)

# Sisukord

Annotatsioon.....	4
Sissejuhatus .....	5
1 Olemasolev süsteem ning uute komponentide valik .....	6
1.1 Uued komponendid .....	6
1.1.1 Rõhuandurid .....	7
1.1.2 Kontroller .....	9
1.1.3 Tühjenduspump ja veeandur.....	9
2 Mudeli valmistamine .....	15
2.1 Projekteerimine .....	16
2.2 Valmistamine .....	22
2.3 Komplekteerimine .....	23
3 Programm ja kasutajaliides.....	25
3.1 Programm andmeedastuse jaoks .....	25
3.2 Kasutajaliides programmis Labview .....	28
4 Katsed, et tõestada katsevalmidust .....	31
4.1 Laba katsetused .....	31
4.2 Tulemused.....	32
Kokkuvõte .....	35
Võõrkeelne lühikokkuvõte .....	36
Viidatud allikad .....	37
Lisa 1 Kasutatavate rõhuandurite seeria põhiandmed .....	39
Lisa 2 3Dprinterite andmeleht .....	40
Lisa 3 PLA filamendi andmeleht.....	41
Lisa 4 Koostatud programm .....	42
Lisa 5 Väljavõte salvestatud andmetest.....	46

## **Annotatsioon**

Käesoleva töö aluseks on Julian de Kati magistritöö [1] raames välja töötatud NACA 0025 profiiliga laba, millesse on integreeritud rõhuandurite süsteem. Süsteemi tööpõhimõte on mõõta rõhku laba pinnal selle liikumisel läbi vee ning rõhu muutumise järgi analüüsida veevoolu laba pinnal. Rõhu muutuste järgi on võimalik tuvastada näiteks laminaarse voolu üleminekut turbulentseks. Käesoleva uurimustöö raames viiakse läbi edasiarendus, mille eesmärgiks on täiustada juba olemasolevat laba, parendades näiteks veekindlust ja täiustades mõõtmisüsteemi. Töö käigus valmiva täiustatud laba abil on ühe võimaliku rakendusena paremini uurida kattumisvastase värvi efekti hõõrdetakistuse vähendamisel.

## Sissejuhatus

Käesoleva töö eesmärgiks on projekteerida ja valmistada pindmise rõhu uurimiseks kasutatav allveelaba. Laba kuju baseerub NACA0025 [2] profiilil ning mõõtmisüsteem põhineb kõige esimesel prototüübil, mille autor on Juan Francisco Fuentes-Pérez. Esimesest prototüübist tehtud edasiarendusest Julian de Kati poolt on lähtunud omakorda käesoleva töö tegemisel [1].

NACA profiil 0025 kuulub selles seerias laiema ristlõikega profiilide hulka, mida iseloomustab laba pinnal hilisem turbulentsse voolu esinemine võrreldes mõne teise standardse kitsama profiiliga [1].

Julian de Kati poolt koostatud uurimustöös jäi puudulikuks võrdlus kattumisvastase värviga (i.k. *antifouling paint*) mittekaetud ja kaetud laba katsete vahel, mille ebaõnnestumine oli põhjustatud vee lekkimisest laba sees asuvasse ruumi, kus paiknesid mitteveekindlad mõõteseadmed (andurid, kontrollid). Uurimustöö näitas siiski arendatud labasüsteemi perspektiivikust katsete sooritamisel ning sellest tulenes ka käesoleva lõputöö teema - arendada välja järgmine, parendatud omadustega laba versioon uurimaks võimalusi ja pinnakatte efektiivsust hõõrdejõu vähendamisel laba pinnal. Eesmärgini jõudmiseks püstitatakse järgmised ülesanded:

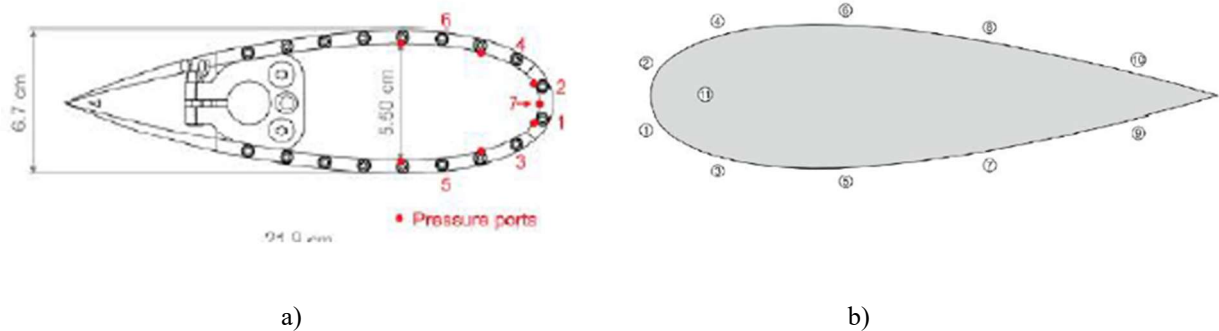
- Töö aluseks oleva varasema süsteemi analüüs ning arendusvajaduste määratlemine
- Sobilike elektroonikakomponentide, sh. rõhuandurite valik
- Uue laba konstruktsiooni välja töötamine ja valmistamine
- Katseandmeid koguva ning töötleva tarkvaralahenduse loomine
- Katsevalmidust tõestavate katsete sooritamine

Töö esimeses peatükis antakse lühiülevaade olemasolevast süsteemist, analüüsitakse selle probleeme, määratakse edasiarendust vajavad kohad ning teostatakse edasiarenduse raames hangitavate komponentide valik. Teises peatükis antakse ülevaade uue laba modelleerimisest ja valmistamisest. Kolmas peatükk keskendub tarkvarale ja kasutajaliidese loomisele. Neljandas peatükis antakse ülevaade katsevalmidust tõestavatest katsetest ning tulemuste esialgselt analüüsist.

Käesoleva lõputöö tulemusena teostatatakse edasiarendus uurimisvahendist, mis aitab hinnata näiteks pinnakatte mõju vees liikuva objekti hõõrdejõu vähendamisel.

# 1 Olemasolev süsteem ning uute komponentide valik

Antud töö alusteks on Julian de Kati magistritööna valmistatud laba ning sama süsteemi varasem prototüüp iRon, mille autoriks on Juan Francisco Fuentez-Pérez. Põhiliseks erinevuseks iRoni ja magistritööna edasi arendatud prototüübi vahel on andurite arv ja paigutus. Esimesel prototüübil (iRonil) oli vähem andureid ja need paiknesid ainult laba eesmises pooles, mis ei võimaldanud uurida muutusi kogu piirkihi (i.k. *boundary layer*) ulatuses. Käesoleva töö aluseks olevas magistritöös kajastatud andurite süsteem koosneb üheksast differentsiaalrõhuandurist (i.k. *differential pressure sensor*) ja ühest absoluutrõhku (i.k. *absolute pressure sensor*) mõõtvast andurist. Differentsiaalrõhu andurite mõõtepiirkond on vahemikus -2000 kuni 2000 Pa [1]. Joonisel 1 on näidatud kõige esimese prototüübi ja selle edasiarenduse andurite paigutuse skeem.



Joonis 1. Esimene prototüüp ja edasiarendus a) prototüüp b) edasiarendus magistritöö raames

Allikas: kuvatõmmised (de Kat 2019, lk 17,21)

Analüüsidest varasema magistritöö tulemusi ning laba konstruktsiooni tuvastati järgmised puudused: laba konstruktsioon, ebapiisav veekindlus, madal andmeedastuse kiirus. Lähtudes eelnevast otsustati edasiarenduse raames uuendada nii andureid, kontrolleri, programmi, konstruktsiooni kui ka laba üldmõõtmeid.

## 1.1 Uued komponendid

Olemasoleva laba rõhuandurite ja kontrolleri süsteemi veekindluse puudumine ei võimaldanud labaga järjepidevaid katsete seeriaid teha. Lisaks sooviti tõsta mõõtmisagedust, et saada täpsemaid katsetulemusi. Uute komponentide valikul on oluliseks kriteeriumiks, et vajalikud seadmed labaga sobituksid välispinna kuju olulisel määral mõjutamata. Laba füüsiliselt

suurendades vähenevad rõhkude mõõtmiseks vajalike andurite avade mõõtmed võrreldes kogu laba pindalaga. Kontrolleri valiku puhul hinnatakse muuhulgas ka sobivust anduritega (nt. toitepinge). Lisaks on oluline laba sisemuses tagada veeärastus selleks puhuks, kui vesi katsete käigus siiski korpuse sisse tungib, kuna andurite ühenduste veekindlust täielikult tagada on keeruline. Kompaktne ja lihtsasti teostatav lahendus on kasutada veetaseme andurit ja miniatuurset veepumpa, mida juhitakse sama controlleriga, millega andureidki.

### 1.1.1 Rõhuandurid

Katsete juures on võtmeteguriks võimalikult täpsed ja kvaliteetsed rõhuandurid.

Rõhuandur on seade, mis muundab rõhu kui füüsilise suuruse signaaliks, mida on võimalik võimendada, mõõta, edastada ja töödelda [3]. Tavaliselt põhineb rõhuanduri töö elastsete deformatsioonide mõõtmisel. Enamasti mõõdetakse gaaside või vedelike rõhku, kuid ka tahkete kehade jõudu. Rõhk väljendab jõudu, mida on vaja rakendada, et takistada vedeliku laialivalgumist. Tavaliselt esitatakse rõhu valem mõjuva jõu ja pindala, millele jõud mõjub, suhtena –  $N/m^2$ . Harilikult töötavad rõhuandurid muundurina – vastavalt hetkerõhule tekitatakse matemaatilisele funktsioonile vastav elektriline väljundsignaal.

Rõhuandureid saab liigitada mõõtepiirkonna, töötemperatuuri vahemiku ja mõõdetava rõhu tüübi järgi.

- Absoluutse mõõtmisega andur (i.k. *absolute pressure sensor*) mõõdab rõhku täiusliku vaakumi suhtes. Kuna täiusliku vaakumi rõhk on 0, siis andur näitab atmosfäärirõhu ja mõõdetava rõhu summat
- Näidikandur (i.k. *gauge pressure sensor*) mõõdab rõhku Maa atmosfäärirõhu suhtes.
- Differentiaalandur (i.k. *differential pressure sensor*) mõõdab kahe rõhuallika rõhkude erinevust. Seda tüüpi andurit kasutatakse sageli näiteks rõhulanguste mõõtmiseks filtrites, vedeliku taseme või voolukiiruse mõõtmiseks [4].

Rõhuandurite valiku puhul on kriteeriumiks mitmed omadused. Lühidalt võib välja tuua sobiva tüübi, mõõtevahemiku, suuruse, töökindluse, täpsuse ja reaktsiooniaja. Anduritootjate palett on äärmiselt lai ning täpse ja usaldusväärse mõõtmistulemuse saavutamiseks tuleb eelistada kvaliteetse tootja toodangut, et viia miinumini võimaliku tootmispraagi sattumine tellitud andurite partiisse. Järgnevas tabelis on ära toodud valikus olevate andurite võrdlus.

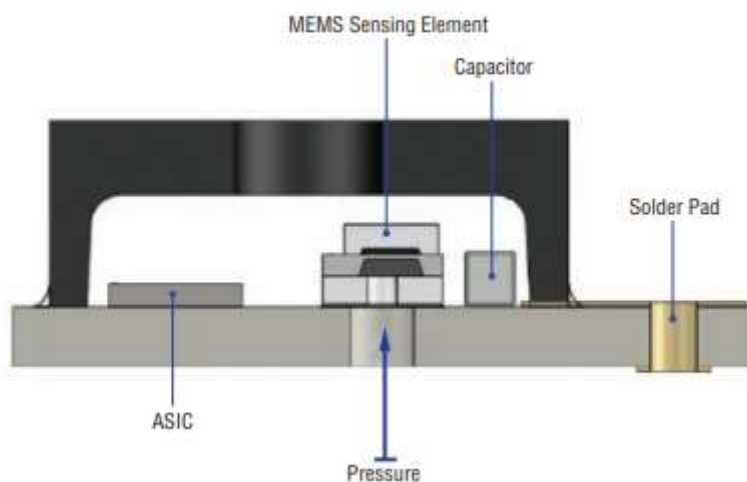
Tabel 1. Andurite võrdlus

Nimetus	Sisendpinge Vs	Väljundpinge tüüp	Mõõtevahemik	Tüüp	Mõõdetav keskkond	Paigaldustüüp
Bourns BPS 130	5Vdc	Analoog	0-30 PSI (0- ~207kPa)	Absoluutne	Vedelik, gaas	Plaadile, eraldiseisvana
Honeywell ABP2DRNT006	3.3Vdc	Digitaalne	0- 6 kPa	Näidik	Vedelik	Plaadile paigaldus
Amphenol 15PSI-G-4V- Mini	4.5 -5.5Vdc	Analoog	0-15PSI (0- ~103kPa)	Differentsiaal	Õhk	Plaadile paigaldus

Allikad: andmed viidetelt [5], [6] ja [7]

Selle projekti puhul osutus valituks tootja Bourns andurid BPS 130 [5], mis on absoluutse mõõtmisega andurid ning sobivad ka muid omadusi arvestades antud projektiga. Selle tooteperekonna andurid on väikeste mõõtmetega, eelkalibreeritud, neil on sisseehitatud temperatuurikompensatsioon, vähene voolutarve jne. Seda tüüpi andurid töötavad väljastades pinget, mis on korrelatsioonis rõhuga (rõhu muutudes muutub ka väljundpinge). Läbilõige andurist on ära toodud Joonisel 2.

### Cross Section



Joonis 2. Läbilõige Bourns BPS 130 seeria andurist

Allikas: kuvatõmmis tootelehel, Lisa 1

Antud anduritel on vajalik külge ühendada ainult 3 juhet, mis teeb paigalduse olusid arvestades võimalikult lihtsaks ja hoiab andurite ning kontrolleri vaheliste kaablite hulka minimaalsena.

Laba külge paigaldatakse kokku 15 rõhuandurit, mis ühendatakse juhtmetega kontrolleri külge.



Juhtmevabadel anduritel põhinev süsteem välistati eelplaneeringu käigus nii andmeedastuskiiruse kui ka potentsiaalsete häirete esinemiste tõttu. Arvestama peab, et katsebaasis on tehtavate katsete aeg ja kestus limiteeritud, st. korrektsete ja täpsete andmete registreerimine väga lühikese ajaperioodi jooksul on esmatähtis.

Anduri täpsemad andmed on leitavad Lisast 1.

### 1.1.2 Kontroller

Esialguses prototüübis on kasutati mikrokontrolleri arendusplaati Arduino Micro ehk ATmega328P, mille taktsagedus on 16MHz. Edasiarenduse eesmärgiks on saavutada täpsem ja kiirem andmeedastus ning kontrollerite võrdluses pööratakse ka ühe olulise parameetrina sellele tähelepanu. Sobiva kontrolleri valikul lähtutatakse nii omadustest kui ka hinnaklassist.

Järgnevas tabelis on ära toodud kontrollerite peamiste omaduste võrdlus, mille alusel sobiv välja valitakse.

Tabel 2. Kontrollerite tähtsamate omaduste võrdlus

Kontroller	Taktsagedus	Tööpinge	Sisendpinge (soovituslik)	Sisendid	Väljundid
ArduinoMicro (ATmega328P)	16 MHz	5V	7-9V	12	20
ESP32	80-240 MHz	3-3.6V	3-3.6V	18	36
STM32F103C8T6	72MHz max.	3.3V	5V	10	37

Allikad: andmed viidetelt [8], [9], [10]

Valituks osutus ESP-WROOM-32 kontroller, mille valmistajapoolne lubatud taktsagedus on kuni 240Mhz.

### 1.1.3 Tühjenduspump ja veeandur

Esimese prototüübi katsete käigus selgus, et mitmetest anduri avadest ja prinditud materjali struktuurist tulenevalt on laba täieliku veekindluse tagamine raske. Mitmel juhul üritati olukorda

parandada, kuid kahjuks ei õnnestunud piisavat veekindlust saavutada. Joonisel 3 on näidatud, kuidas on proovitud silikooniga pealmine kaas veekindlaks teha.



Joonis 3. Kaas

Laba edasiarendatavale versioonile otsustati lisada väike pump, mis hoiab sisemuse kuivana, kui esinebki veelekked. Lisaks lihtsustab tühjenduspumba paigaldamine ka laba konstruktsiooni, kuna kaob vajadus konstrueerida laba täielikult veekindlana. Pumba käivitamiseks vajalik signaal saadakse veeandurilt ning läbi rõhuandurite väljundsignaale mõõtvast mikrokontrolleri juhitakse ka tühjenduspumpa.

Joonisel 4 on näidatud, millist tüüpi andurit ja pumba kasutatakse.



a)



b)

Joonis 4. Andur ja veepump a) andur b) veepump

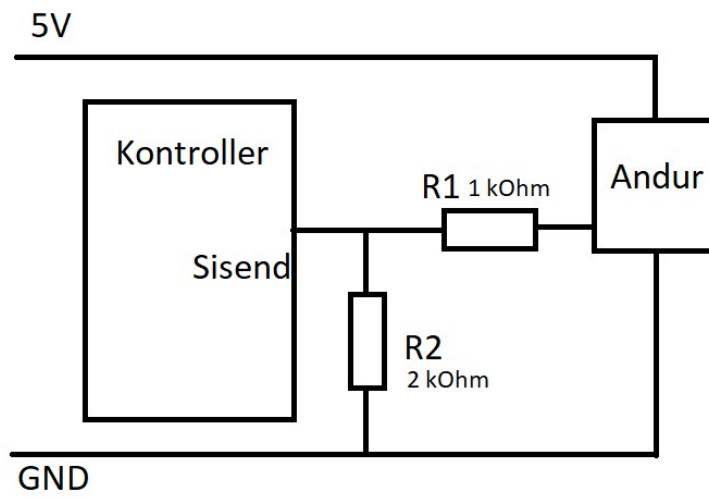
Allikad: kuvatõmmised allikatest a) [11] b) [12]

Kuna kasutatava veepumba nimipinge on 12V (kasutatud komponentidest suurim), määratakse süsteemi toitepingeks 12VDC, anduritele on ette nähtud 5V ja kontrolleri jaoks 5/3.3V. Kasutataval kontrolleri jaoks on olemas 2 sisendit – üks 3.3V ja teine 5V pinge jaoks. Sellest tulenevalt piisab süsteemis ühest konverterist, mis teeb 12V-st 5V. Andurite väljundsignaali 0-5V teisendamiseks kontrolleri jaoks sobivasse sisendpinge vahemikku 0-3.3V kasutatakse pinge alandamiseks pingejaguri skeemi ühendatud takisteid. Kasutatakse järgmist valemit:

$$U_{\text{Teisendatud}} = U_1 * R_2 / (R_1 + R_2)$$

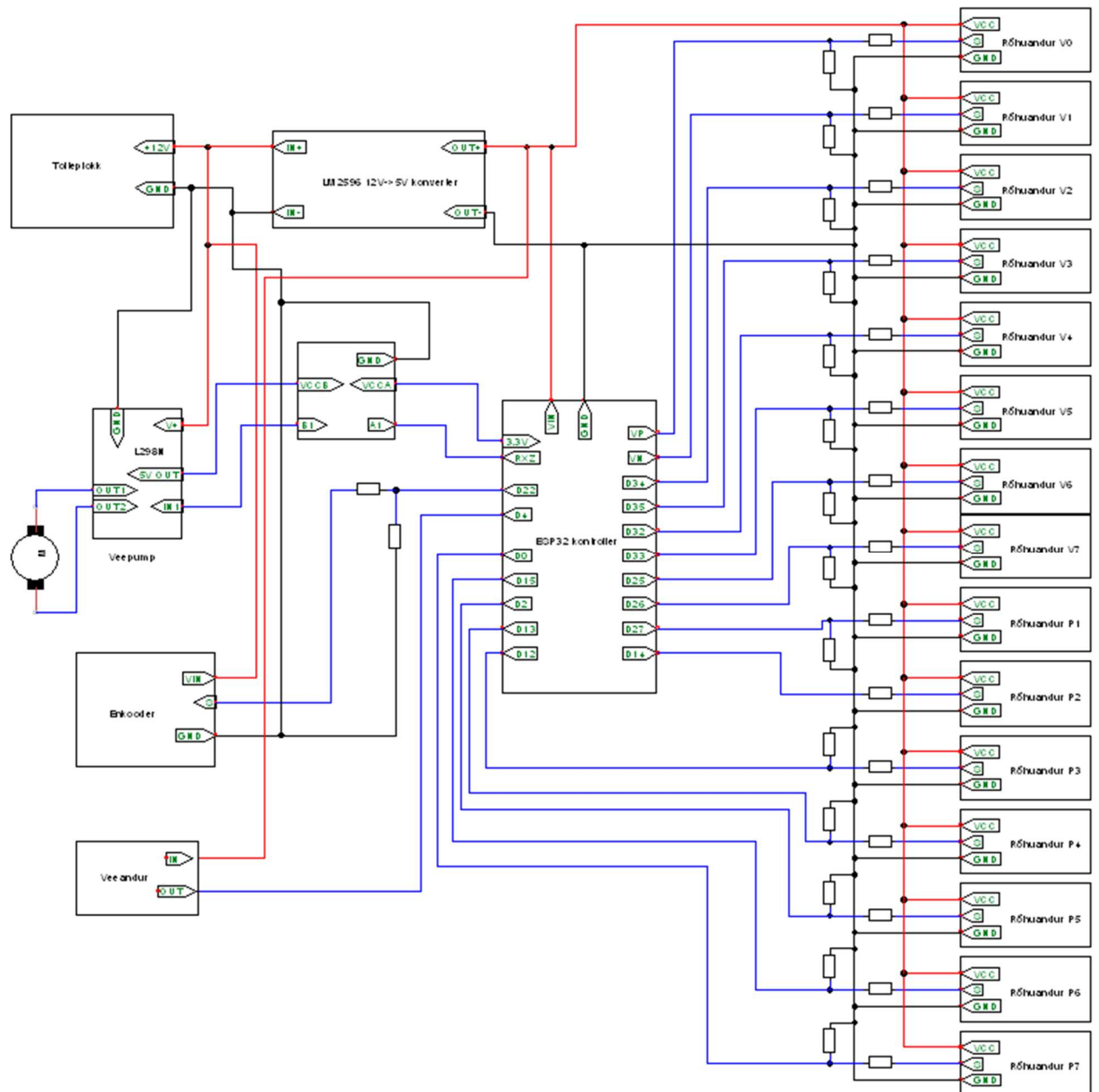
kus  $U$  – sobiv pinge väärtus,  $U_1$  – esialgne pinge,  $R_1$  – takisti 1,  $R_2$  – takisti 2

Illustreeriv skeem on ära näidatud Joonisel 5.



Joonis 5. Anduri väljundsignaali teisendamise elektriskeem

Komponentide elektriskeem on ära toodud kuvatõmmisena Joonisel 6.



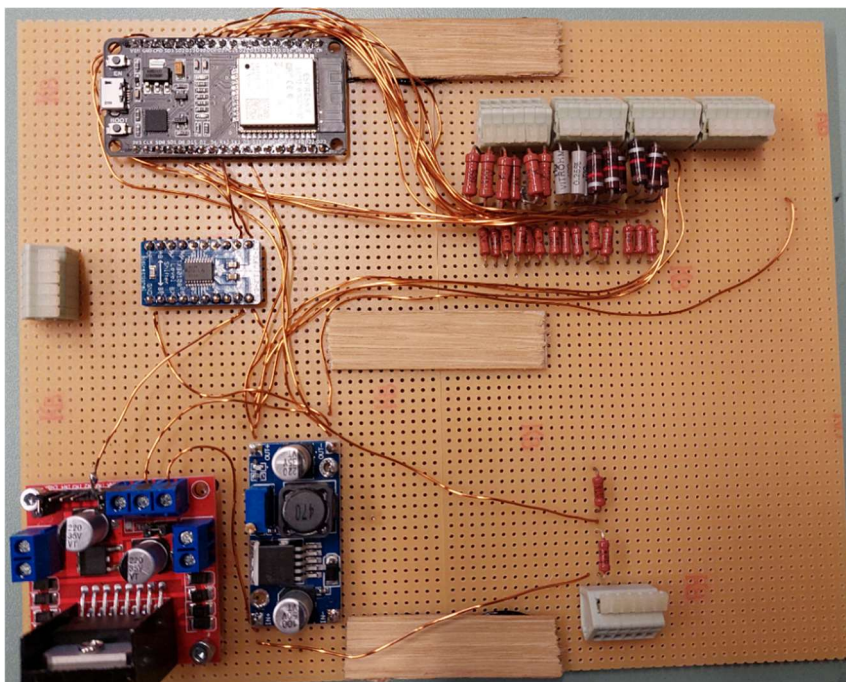
Joonis 6. Laba komponentide elektriskeem

Koondnimekiri kasutatud elektroonikakomponentidega on leitav Tabelist 2.

Tabel 3. Kasutatud elektroonikakomponendid

Komponent	Tk arv
Kontroller ESP32	1
Kahesuunaline konverter 12V - 5V LM2596	1
Mootori draiver L298N	1
Veepump 12V	1
Veeandur Amphenol BAF147	1
Rõhuandur Bourns BPS130-HA030P-1MG	15
Takisti 2kOhm	16
Takisti 1kOhm	16
Pistikud	8

Joonisel 6 näidatud elektriskeemi kohaselt ja Tabelis 2 näidatud komponentidega koostati elektriskeem makettplaadile (plaadi ja laba vahelisi kaableid fotol paigaldatud veel ei ole). Foto koostatud skeemist on ära toodud Joonisel 7.



Joonis 7. Elektriskeem makettplaadil

## 2 Mudeli valmistamine

Laba kuju põhineb NACA standardiseeritud profiilil 0025. Enne NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) põhjalikku uurimisprotsessi ei olnud labade kuju ja seost õhuvooludega täpselt uuritud ega kirja pandud. Põhjalikumaid uuringuid tehti 1930ndatel. Antud töös käsitletud laba profiil numbriga 0025 tähistab sirget, sümmeetriliste pooltega laba. Esimene number tähistab maksimaalset kumeruse protsenti laba kogu pikkuse suhtes, teine number tähistab maksimaalse kumeruse asukohta ja kolmas ning neljas tähistavad laiuse protsenti kogupikkuse suhtes [2].

Laba keskjoonest ülemise kuju määramise valem on:

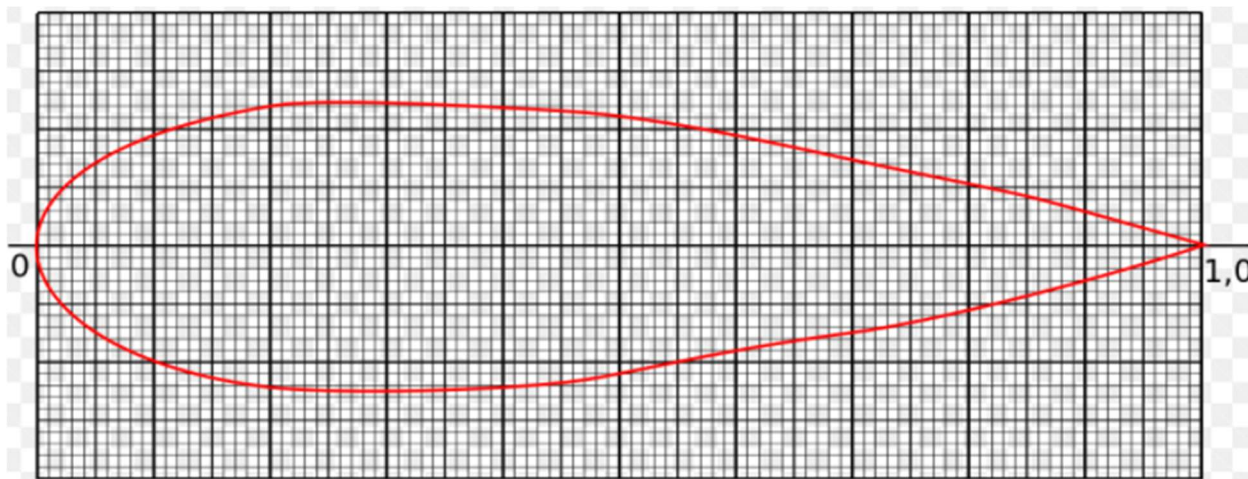
$$y = 5t(0.29690\sqrt{x} - 0.126x - 0.3516x^2 + 0.2843x^3 + 0.1015x^4) \quad (1)$$

kus  $y$  – poollaius keskjoonest,  $t$  – laba maksimaalne laius pikkusega võrreldes, siin 0.25,

$x$  – asukoht 0-1 (0 kuni 100%)

Antud juhul on tegemist sümmeetrilise labaga ja seetõttu kehtib sama valem nii ülemise kui ka alumise poole kohta.

Tulemuseks on Joonisel 8 nähtav profiil:



Joonis 8 NACA 0025 profiil

## 2.1 Projekteerimine

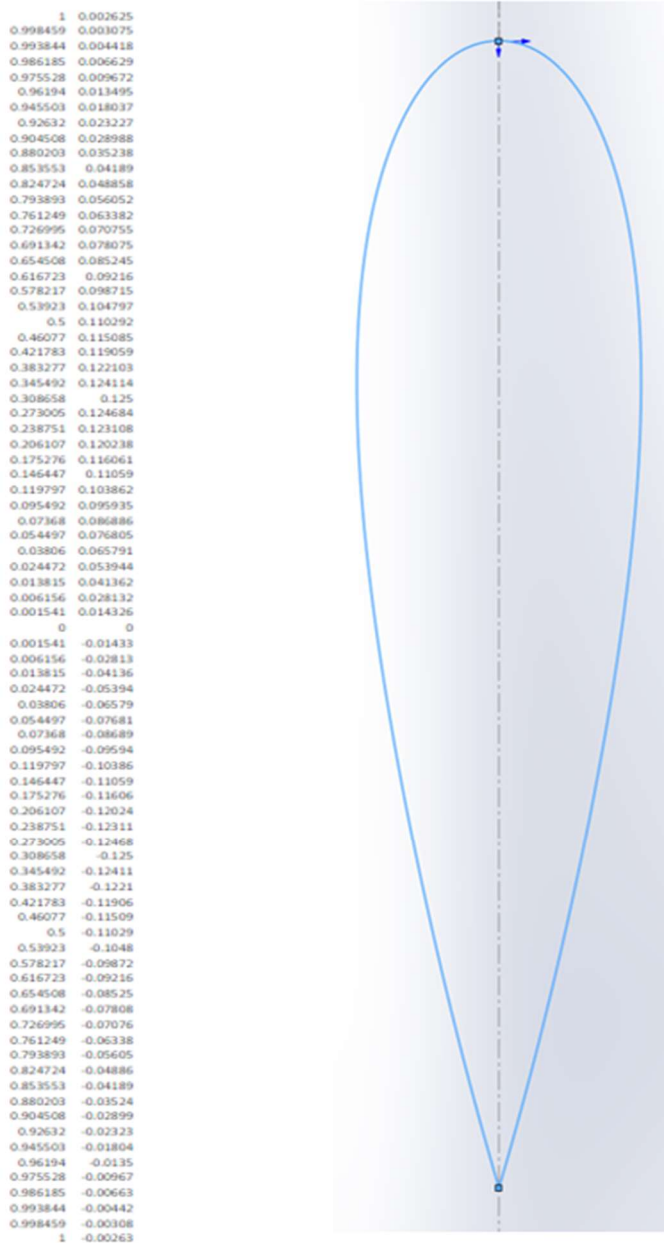
Projekteerimisel võetakse arvesse laba eelnevalt välja töötatud kuju ja andurite süsteemi põhimõtteid, kuid tehes vajalikke parandusi tagamaks täpsem mõõtmine, veele vastupidavus ja seeläbi saavutada võimalus läbi viia pikemaid katsete seeriaid. Tähtis on koostada mudel võimaldades samade parameetritega katsekeha taasloomist, ehk tagada katsekeha ja katsete korratavus. Paremaks tulemuste analüüsiks ja komponentide paigutuseks suurendatakse laba mõõtmeid maksimaalselt arvestades kasutatava 3D printeri töömahtu. Olulise muudatusena lisaks komponentidele ei kasutata enam andurite süsteemi, kus andurid on paigaldatud korpuse sisse ning nendest on laba välispinnani juhitud võrdlemisi pikad torustikud. Häirete vältimiseks ja täpsemate mõõtetulemuste saamiseks laba pinnalt paigaldatakse andurid laba pinnale võimalikult lähedale ja sellega viiakse torustiku pikkusest tekkiv võimalik mõju miinimumini ning saavutatakse veega otsekontakt. Eelmiste andurite puhul selline võimalus puudus – anduri ja vee vahel oli torustikus õhk ning andurid olid algselt mõeldud ainult kuivas keskkonnas kasutamiseks.

Mudeli projekteerimisel kasutatakse programmi Solidworks. Programm võimaldab projekteerimisel kasutada koostu tervikuna modelleerimist, mis hõlbustab oluliselt mitmetest eri osadest koosnevate mudelite projekteerimist. Lisaks on programmis võimalik mudel kiiresti salvestada 3D printimiseks sobivasse formaati (.STL).

Täpset ja standardiseeritud laba kuju on kõige otstarbekam Solidworksis kujundada importides koordinaadid programmi MS Exceli .xlsx failina. Koordinaatide saamiseks kasutatakse internetis leiduvat punktide generaatorit lehelt [www.airfoiltools.com](http://www.airfoiltools.com) ja seejärel Excelisse kopeerides on võimalik täpne kuju koordinaatidena Solidworksi importida [13].

Joonisel 9 on ära näidatud kuvatõmmis koordinaatidest ning vastav genereeritud laba kuju programmis Solidworks.





Joonis 9. Koordinaadid xy teljel ja koordinaatidele vastav kuju

Peale laba põhikuju importimist rakendatakse projekteerimisel tavapäraseid töövõtteid. Andurite laba külge paigaldamise lihtsustamiseks ning vähendamaks nende kinnituskohtade põhjustatud moonutust laba välispinnale, suurendatakse laba mõõtmeid olusid arvesse võttes maksimaalselt. Mõõtmete suurendamisega seoses tehakse muudatused ka laba katsebasseini vankri külge kinnitamisest. Vankri külge kinnitamine lahendatakse vertikaalse kinnitustoru abil, sama kinnitustoru kasutatakse ühtlasi ka kaablite ning tühjenduspumba vooliku läbiviiguks laba kaanest.

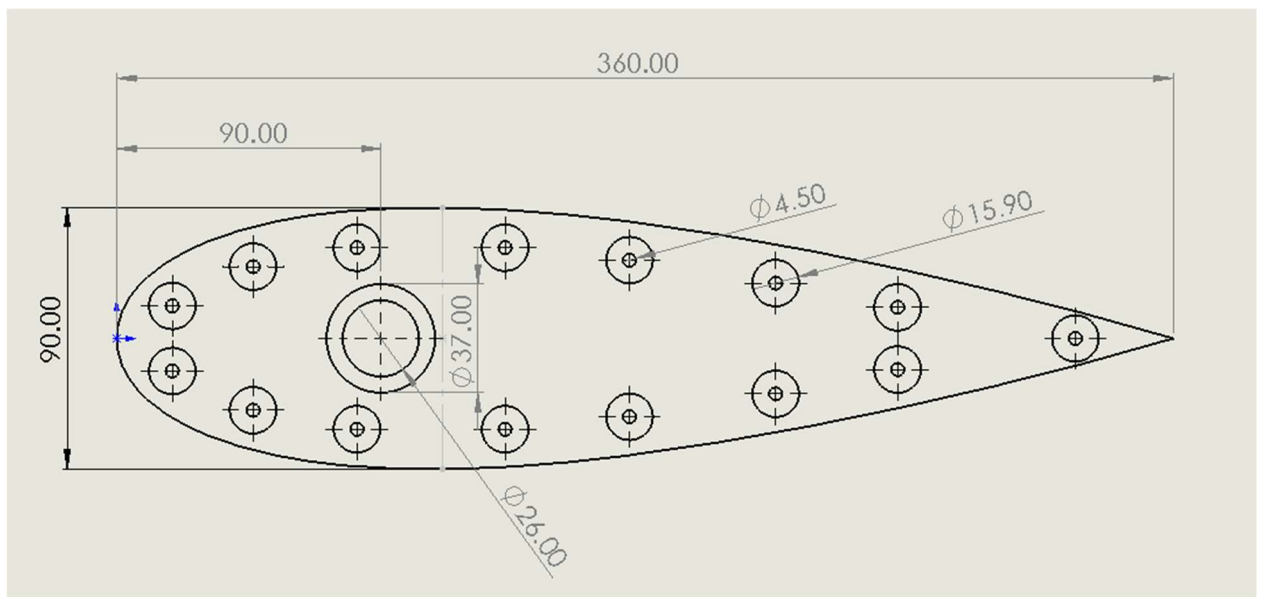
Kinnituse tsepter on rõhukeskmes, sümmeetriliste labade puhul leitakse rõhukese valemiga

$$x = c/4$$

kus  $x$  – rõhukese (i.k. center of pressure).  $c$  – laba kogupikkus

Antud laba puhul on kogupikkus 360mm, seega on kinnituse tsepter 90mm kaugusel tipust.

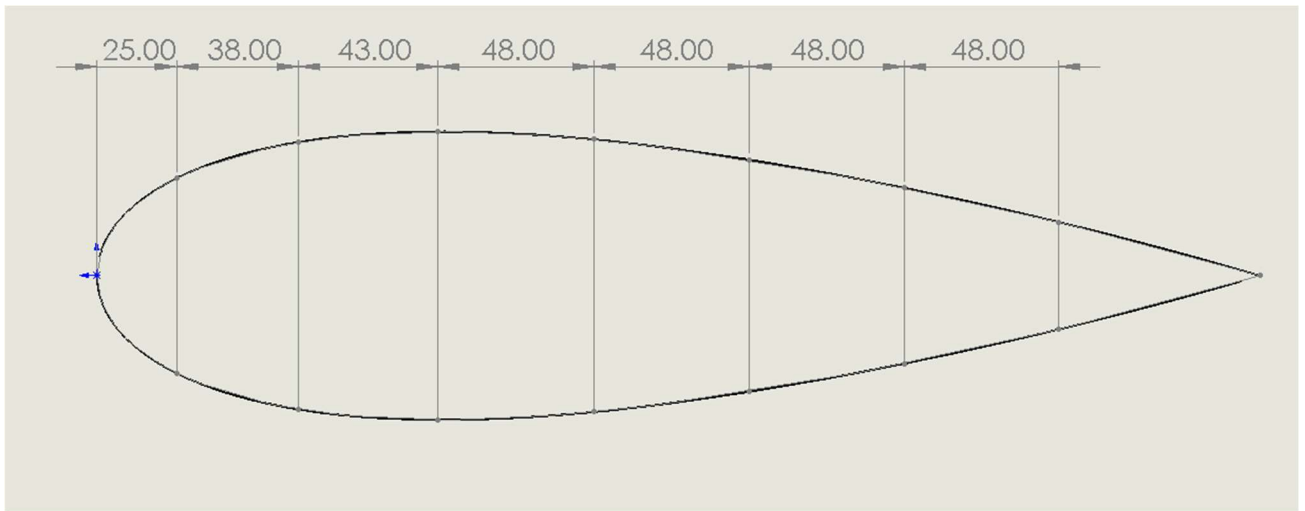
Illustreeriv skeem pealtvaates on näha Joonisel 10.



Joonis 10. Laba joonis pealtvaates

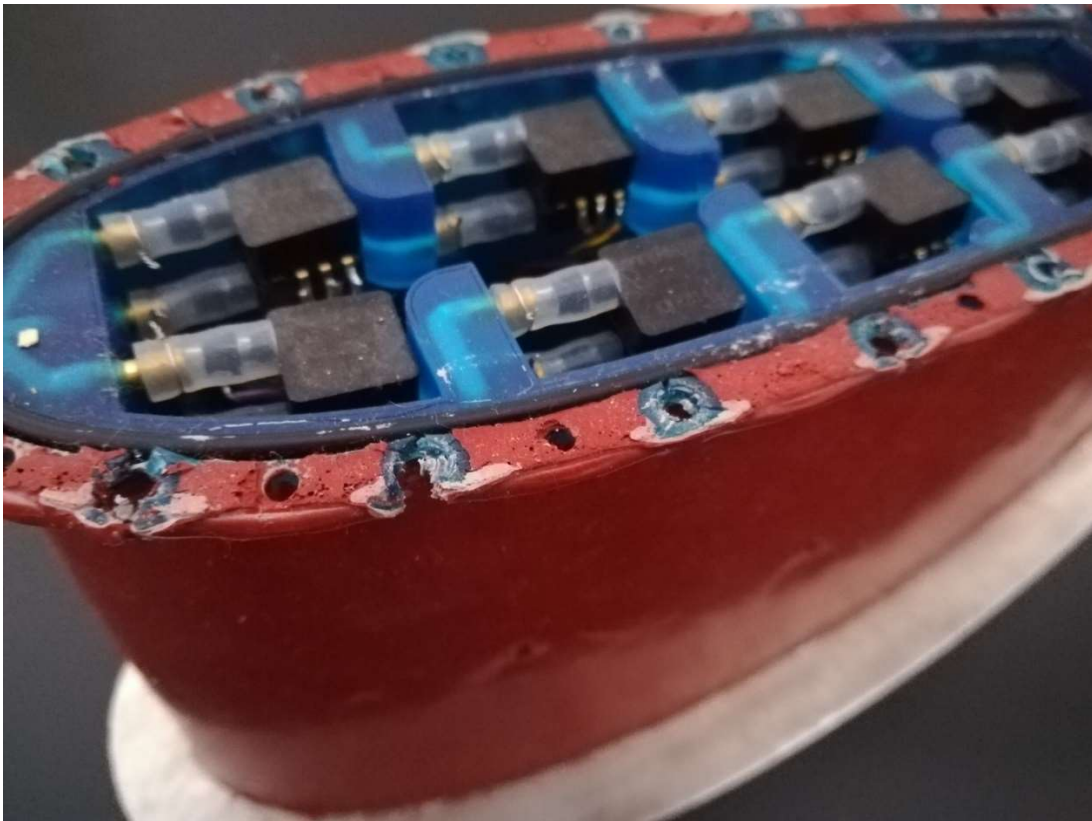
Töö käigus viidi lihtsamaks ligipääsuks ja laba enda tugevdavast sisekonstruktsioonist tulenevalt kontrolleri labast väljapoole ning paigutati katsebaseini vankri peale eraldiseisva karbi sisse. Seeläbi saavutati ka hõlpsam ühendusviis kelgu liikumist kiiruseks teisendava enkoodriga (i.k. *encoder*) [14] ning tulemina saab kiirust kuvada nii reaajas kasutajaliidese ekraanil kui ka salvestatuna katsetulemustes.

Projekti algusfaasis võeti sihiks paigutada rõhkude mõõtmiseks erinevates laba punktides kokku 15 andurit. Selleks, et laba eesmisel osas toimuvaid rõhumuutusi täpsemini jälgida, paigutati esimese mõttelise kolmandiku ulatuses laba tipust kuni kõige laiema kohani andureid tihedamalt, kui ülejäänud laba ulatuses, Anduripaaride asukohtade skeem on nähtav Joonisel 11.



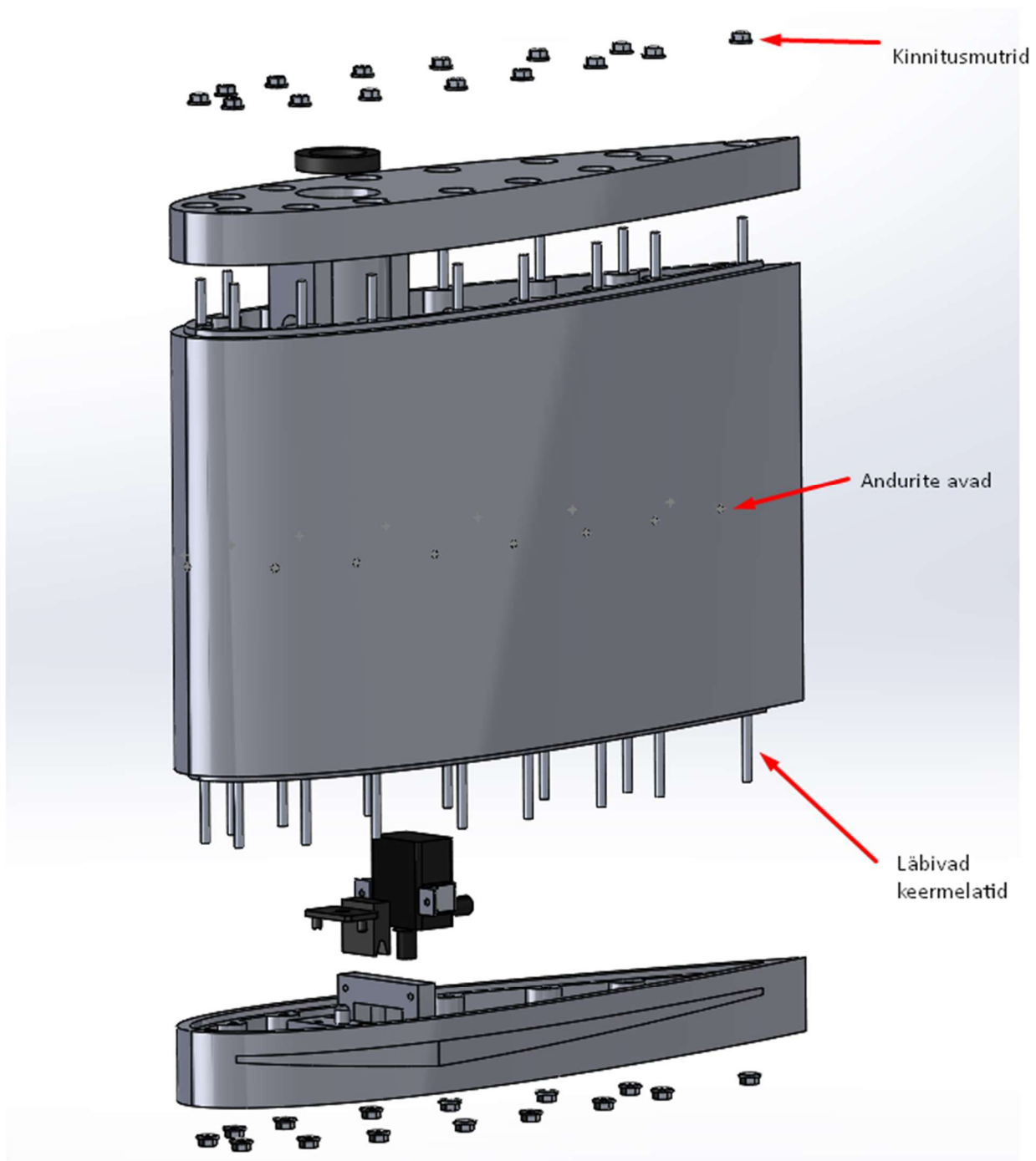
Joonis 11. Anduripaaride paigutuse skeem

Laba sisekonstruktsiooni ja kinnitust vankri külge täiustatakse olulisel määral, et vähendada katsete käigus valmistusmaterjalist ja -viisist tulenevaid delaminatsiooni riske vees liikumise ajal. Kaane puhul on oluline, et saaks pinnad tugevasti kokku suruda ja kinni pingutada ilma, et mudel või tema osad katki läheks. Joonisel 12 näeme, et eelmise laba pealmise kaane kinnituseks kujundatud läbivate avadega serv on polte pingutades purunenud, kuna on kasutatud ülemäärast jõudu ja kokkuvõttes lahendus ei võimaldanudki kaant kinni pingutada.



Joonis 12. Purunenud kaane kinnitused

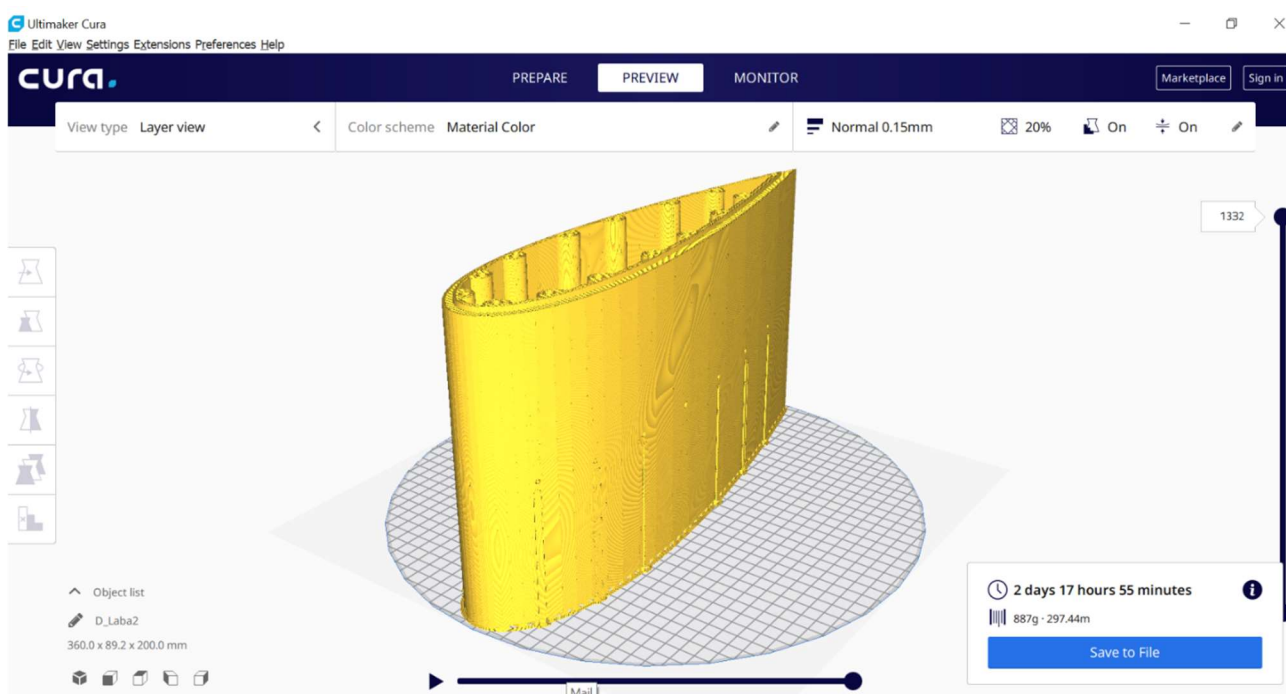
Konstruksiooni parendamiseks lisatakse sisemised tugevdused ning laba kinnituse tüüp muudetakse senise ainult kaane külge kinnitamise asemel läbivaks. Kasutatakse kogu korpust läbivaid M4 keermelatte, mida pingutatakse võrdselt ülevalt ja alt. Seeläbi saavutatakse olukord, kus kogu laba korpusest moodustub terviklik kinnitus ning deformatsioonipinged jaotuvad ühtlasemalt võrreldes ainult kaane külge kinnitamisega. Ülemise ja alumise kaane ning põhiosa kontaktpinnad plaanitakse tihendada lisaks täiendavalt tihendusmassiga. Joonisel 13 näeme lahendusest illustreerivat kuvatõmmist.



Joonis 13. Ülevaade korpust läbivast kinnituslahendusest

## 2.2 Valmistamine

Mudeli printimiseks kasutatakse SCC-s olevat FDM (i.k. *fused deposition modeling* / ka FFF ehk *fused filament fabrication*) printerit, mis lühidalt tähendab materjali sulatamist kihtidena üksteise peale. Kasutatava Anycubic Predator printeri maksimaalne töömaht on silinder läbimõõduga 370mm ja kõrgusega 445mm, andmeleht on leitav Lisas 2 [15]. Printimismaterjalina kasutatakse PLA (i.k. *polylactic acid*) filamenti [16], mille andmeleht on leitav Lisas 3 [17]. Printimise ettevalmistamiseks kasutatakse programmi Cura, kus valitakse printimiskiirus, temperatuur jne. Kuvatõmmis programmist on leitav Joonisel 14.

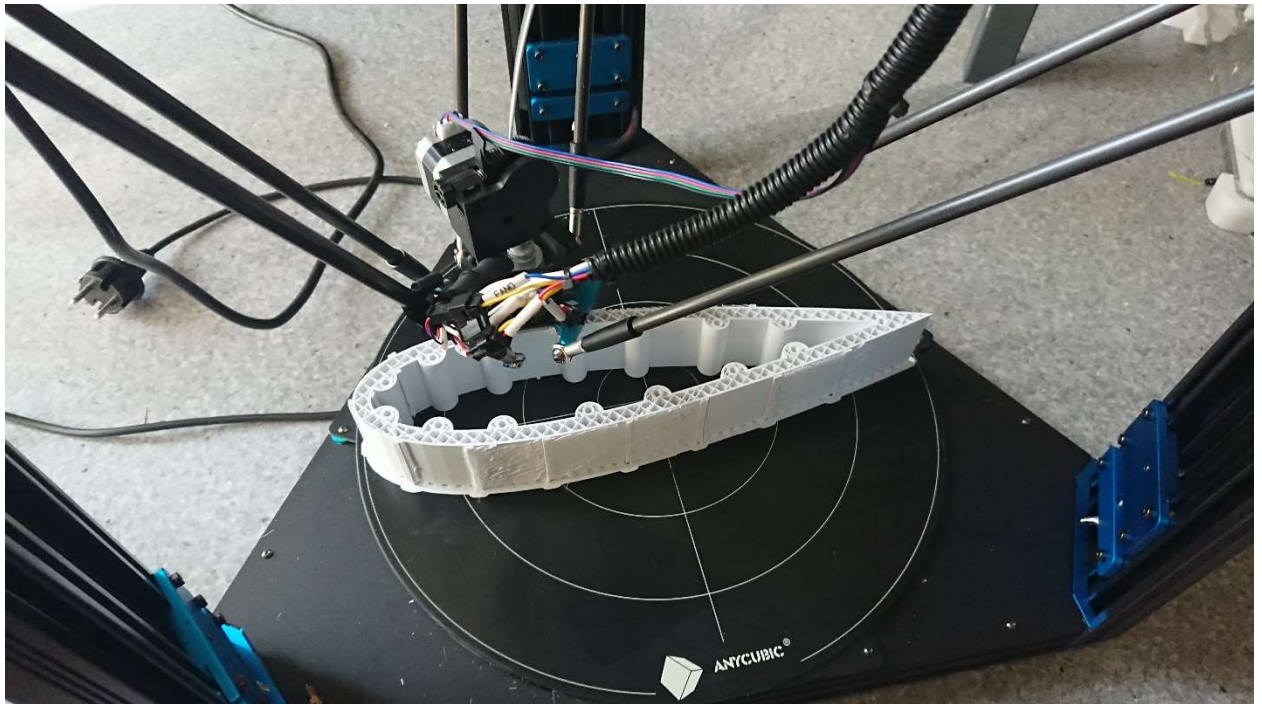


Joonis 14. Mudel programmis Cura

Allikas: kuvatõmmis programmist Cura

Seejärel asutakse mudelit printima, ajaline kestus optimaalse kiiruse ja 20 täiteprotsendi juures on antud laba puhul hinnanguliselt 65h. Tõstes täiteprotsenti pikeneb vastavalt ka printimise protsess, 100% täidise juures võib kestus peaaegu viiekordistuda.

Käimasolevast printimisprotsessist on nähtav foto Joonisel 15.



Joonis 15. Käimasolev laba printimise protsess 3D printeril.

### 2.3 Komplekteerimine

Kõikide prinditavate detailide valmis saamise järel oli võimalik laba ja vajalikud seadmed komplekteerida. Komplekteerimise juures osutus kõige keerukamaks laba kujust tulenevates kitsastes tingimustes andurite paigaldus. Andurite kinnitamine laba korpuse külge lahendati liimimise teel. Nii laba kaane kui ka põhja puhul kasutati lisaks projekteeritud liiteservale ka tihendusmassi, mis tõstab eeldatavat veekindlust. Komplekteeritud laba foto on nähtav Joonisel 16.



Joonis 16. Komplekteeritud laba



### 3 Programm ja kasutajaliides

Analüüsidest varasema laba süsteemi puudusi, otsustati koostada uus programm ning lisada kasutajamugavust läbi selgema kasutajaliidese, mis võimaldaks juba katsete käigus jälgida reaalsajas anduritelt saadavaid andmeid.

Lisaks integreeritakse süsteemi ka siirdevankri kiirus, et saavutada veelgi täpsem andmete kogum. Eelmisel mudelil sellised funktsionaalsused puudusid.

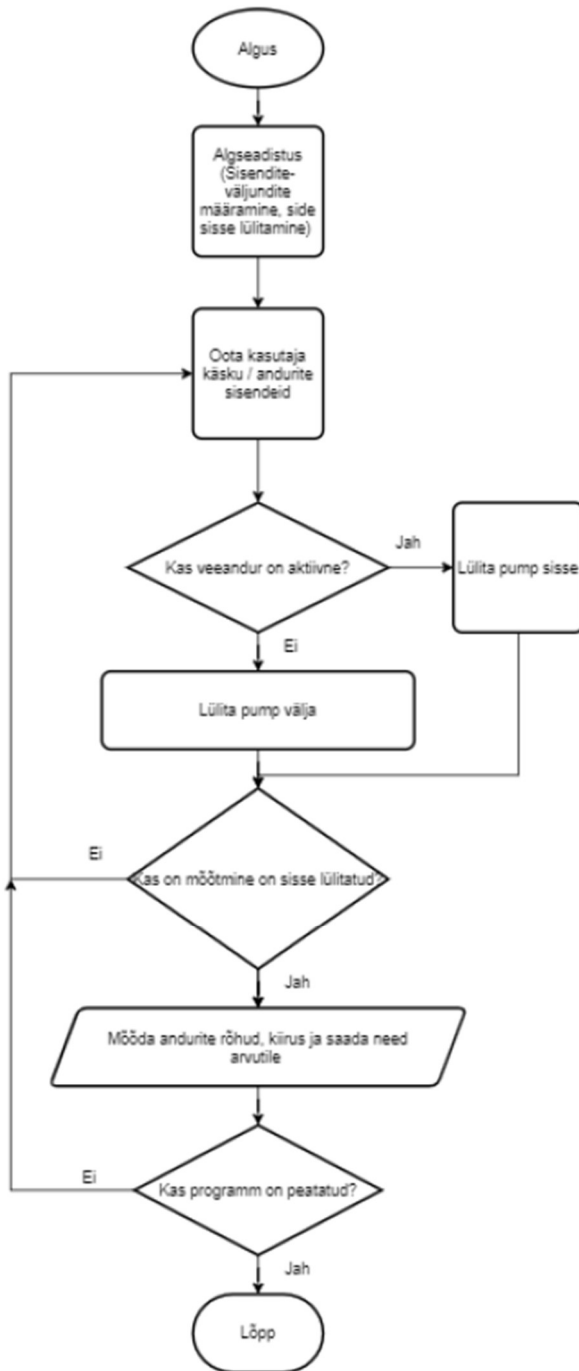
#### 3.1 Programm andmeedastuse jaoks

Andmete edastuse jaoks koostatakse ja laetakse kontrollerrisse programm, mis on leitav Lisast 4. Anduritest signaali kontrollerrisse saamiseks ning seeläbi sobivateks arvudeks teisendamiseks koostatakse vastav käsk programmi sees. Andurid väljastavad analoogsignaali vahemikus 0-5V, kus väärtus 0V on vastavalt 0PSI ja väärtus 5V on vastavalt 30PSI. Kontrollerr teisendab andurist saadud pinget sisendi täisarvuks 0 kuni 4096. Andurite andmelehelts saame valemi, et teisendada anduri väljastatav signaal rõhuks ning vastav näit kuvatakse kasutajaliidese ekraanile:

$$P_{PSI} = (P_{max} - P_{min}) * \left( \frac{V_{out} - V_{minComp}}{V_{maxComp} - V_{minComp}} \right) + P_{min}$$

kus  $P_{PSI}$  – rõhk PSI-des,  $P_{max}$  – maksimaalne rõhk,  $P_{min}$  – minimaalne rõhk,  $V_{minComp}$  – minimaalne vooltugevus,  $V_{maxComp}$  – maksimaalne vooltugevus,  $V_{out}$  – väljundvõimsus

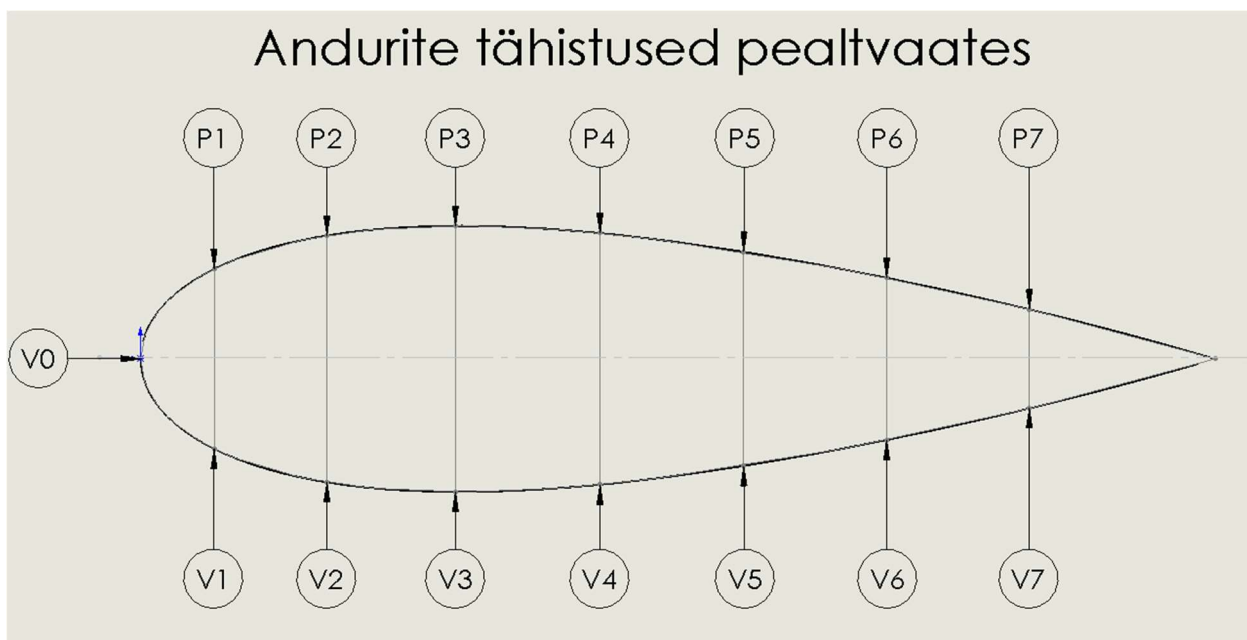
Andurite ning kontrolleri töötamise põhimõtet iseloomustab Joonisel 17 olev voodiagramm.



Joonis 17. Kontrolleri voodiagramm

Andurite ühendamiseks kontrolleri külge omistatakse igale andurile oma nimetus, mille järgi saab katseid tehes saab omavahel ära siduda vastavas asukohas paikneva anduri ja saadud mõõtetulemuse. Pealtvaates parema poole andurid algavad vastavalt tähisega „P“ ja vasaku poole andurid vastavalt tähisega „V“. Lisaks on laba eesmisel tipus üksik andur tähisega V0 tulenevalt

asjaolust, et antud anduri signaalkaabel kulgeb kontrollerrisse koos vasaku poole andurite signaalkaablitega. Andurite signaalkaablid on samuti tähistatud vastavalt „P“ ja „V“ga. Andurite asukohad ja vastavad tähistused on nähtavad Joonisel 18.



Joonis 18. Andurite tähistused pealtvaates

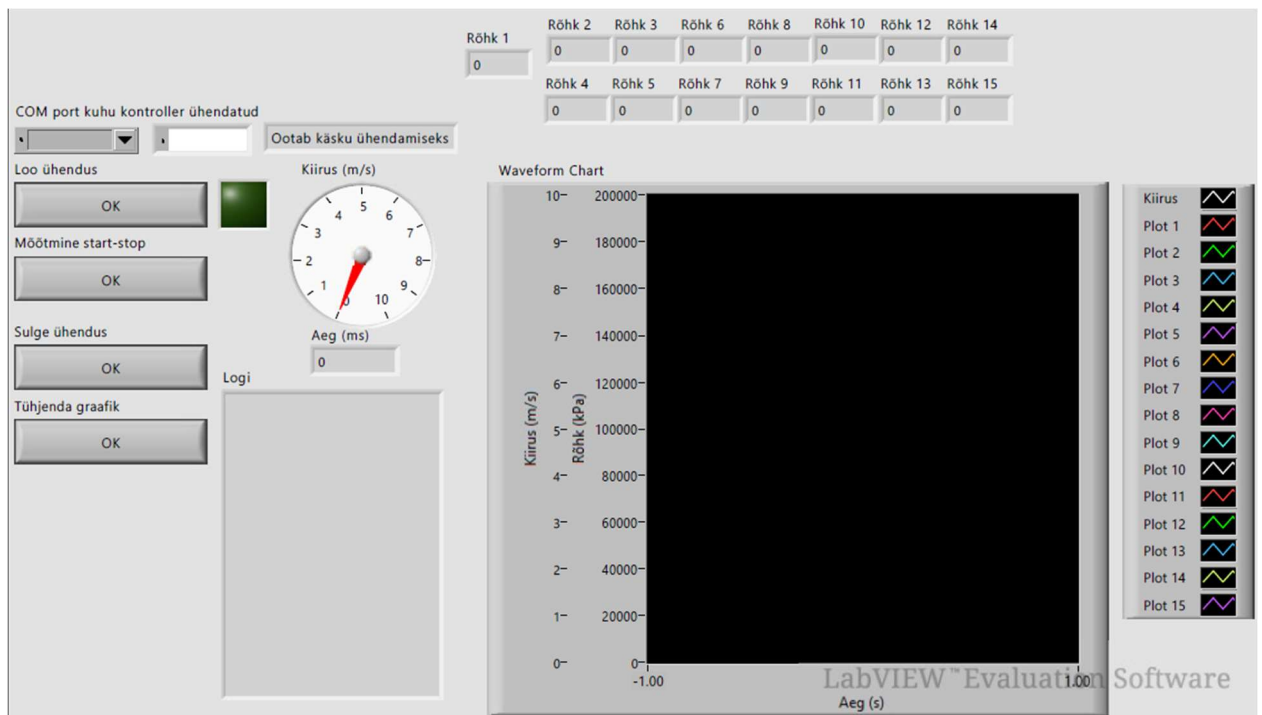
Selleks, et katsetulemusi korrektselt analüüsida, on vaja iga andur vastava signaalkaabliga kontrolleri külge sobiva klemmi alla ühendada, järgnev tabel annab ühendustest ülevaate.

Tabel 4. Andurite ja signaalkaablite ühendamise tähistused

Kaabel	Anduri tähis	Kaabli värvus	Kontrolleri klemm
V	V0	valge	VP
V	V1	punane	VN
V	V2	sinine	D34
V	V3	roheline	D35
V	V4	lilla	D32
V	V5	kollane	D33
V	V6	must	D25
V	V7	roosa	D26
P	P1	punane	D27
P	P2	sinine	D14
P	P3	roheline	D12
P	P4	lilla	D13
P	P5	kollane	D2
P	P6	must	D15
P	P7	roosa	D0

### 3.2 Kasutajaliides programmis Labview

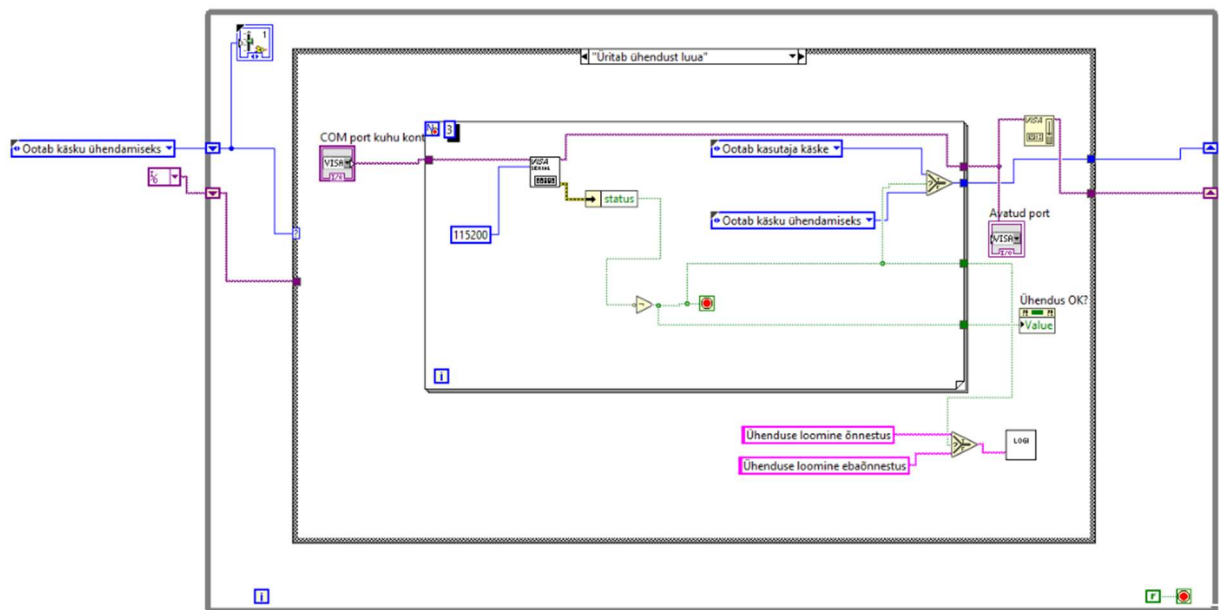
Ülevaatlikkuse ning lihtsama käsitlemise huvides koostatakse katsete andmete monitoorimiseks kasutajaliides, kus on võimalik reaalajas jälgida nii rõhuandureid kui ka tühjenduspumpa. Lisaks on välja toodud ka liikumiskiirus ning võimalus mõõtmist käivitada ja peatada kasutajaliidese ekraanilt. Kasutajaliidese koostamisel kasutatakse abivahendina vastava programmi jaoks koostatud juhendmaterjali [18]. Joonisel 19 on välja toodud kuvatõmmis kasutajaliidese ekraanilt.



Joonis 19. Kasutajaliides

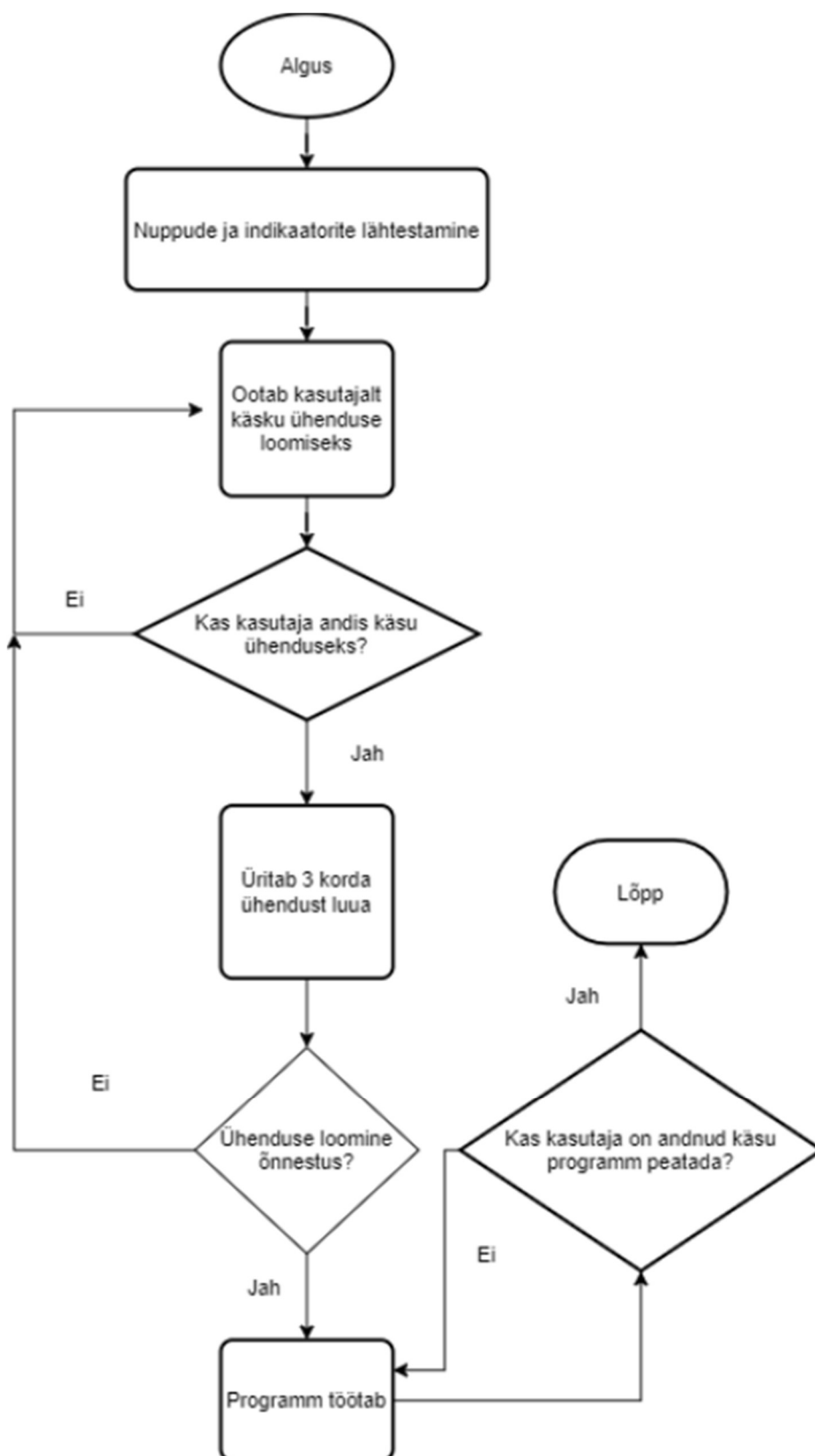
Allikas: kuvatõmmis programmist Labview

Kasutajaliidese käskluste järjekorrast on kuvatõmmis toodud ära Joonisel 20.



Joonis 20. Kuvatõmmis programmist Labview

Tegemist on visuaalse programmiga ja selle esitlemine dokumendina on komplitseeritud. Selgitamaks programmi tööpõhimõtet ja käskluste järjestust, on Joonisel 21 ära toodud kasutajaliidese käskluste voodiagramm.



Joonis 21. Kasutajaliidese voodiagramm

## 4 Katsed, et tõestada katsevalmidust

Valminud laba katsetused sooritati 19.05.21 Väikelaevaehituse Kompetentsikeskuse katsebasseinis. Veenduti, et süsteem töötab ja saadi teada, millele peab veel enne põhjalikumaid katseid tähelepanu pöörama.

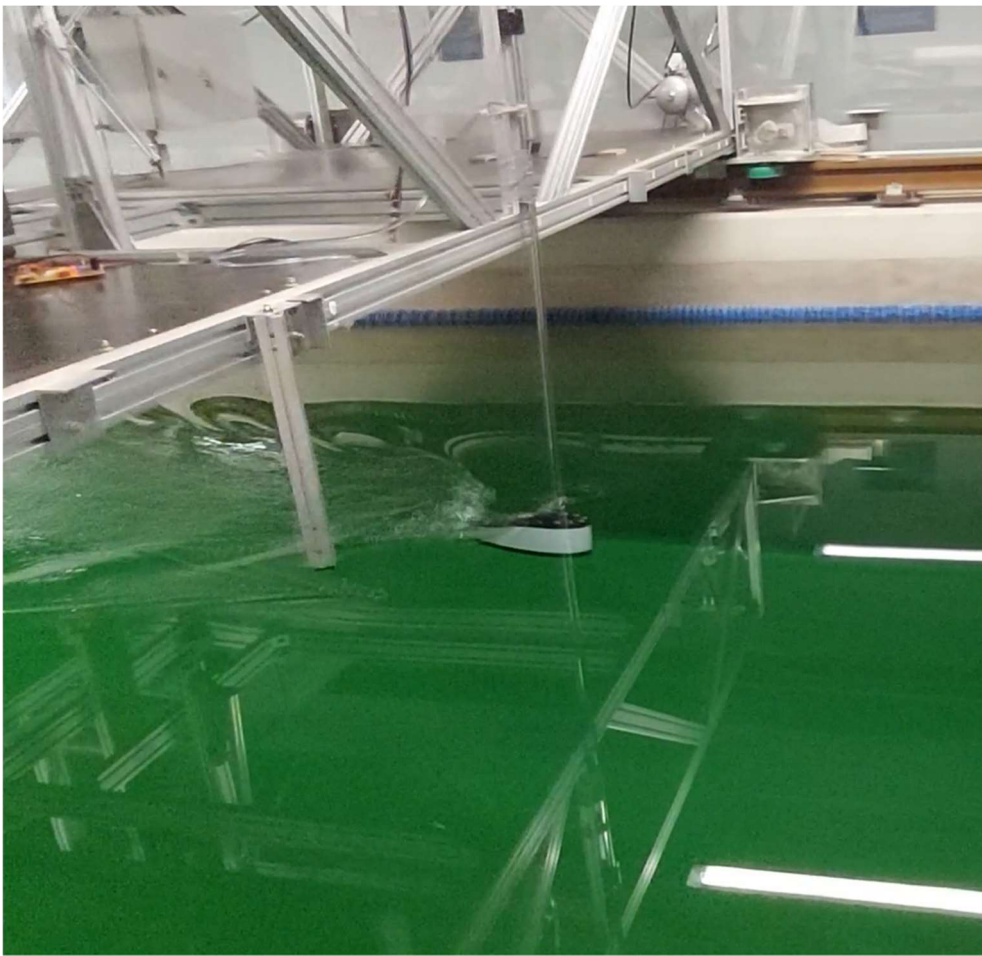
### 4.1 Laba katsetused

Katsed sooritati Väikelaevaehituse Kompetentsikeskuses asuvas mudelkatsebasseinis.

Selleks, et tõestada esialgne katsevalmidus, tehti kaks katset, vastavalt kiirustel 1 ja 2m/s.

Katsed viidi läbi laba 0 kraadise nurga all liikumissuuna suhtes. Mõlema katse puhul salvestati andurite logiandmed tabelisse. Lisas 5 on näha kuvatõmmist osast saadud näitudest.

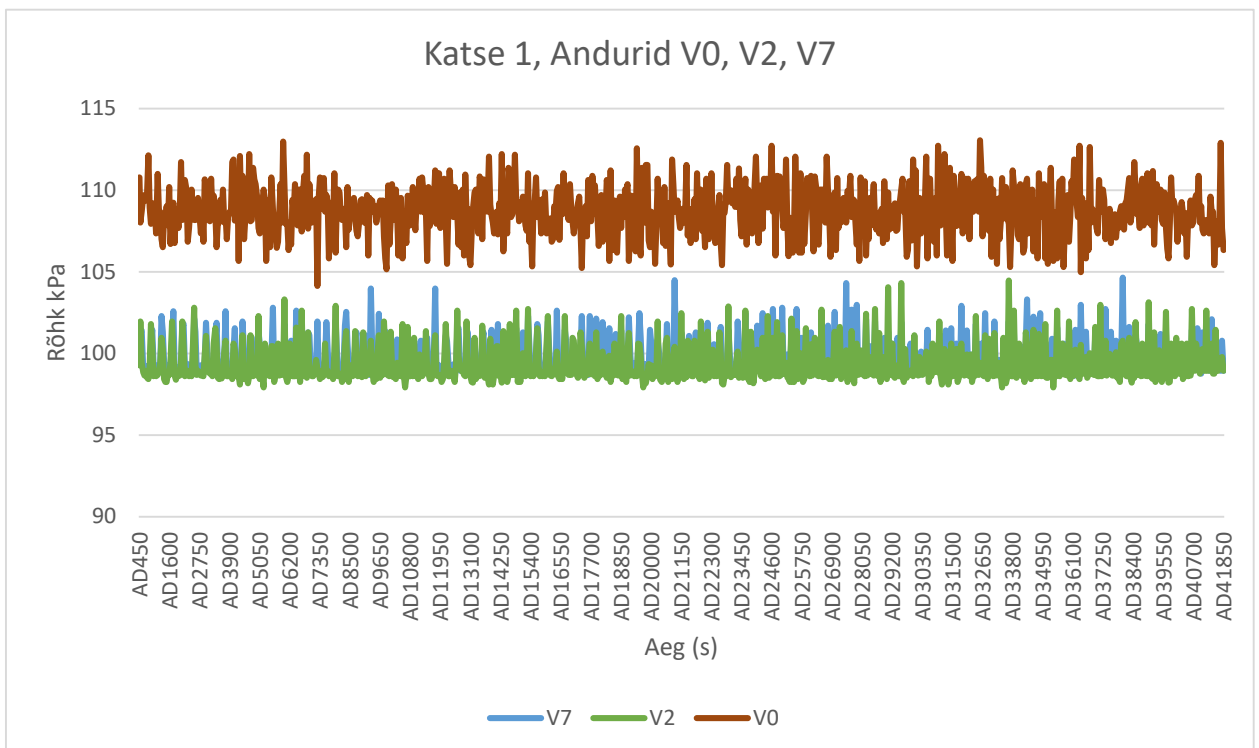
Katse tegemise ajal tehtud fotot on näha Joonisel 22.



Joonis 22. Laba katsetamine mudelkatsebasseinis

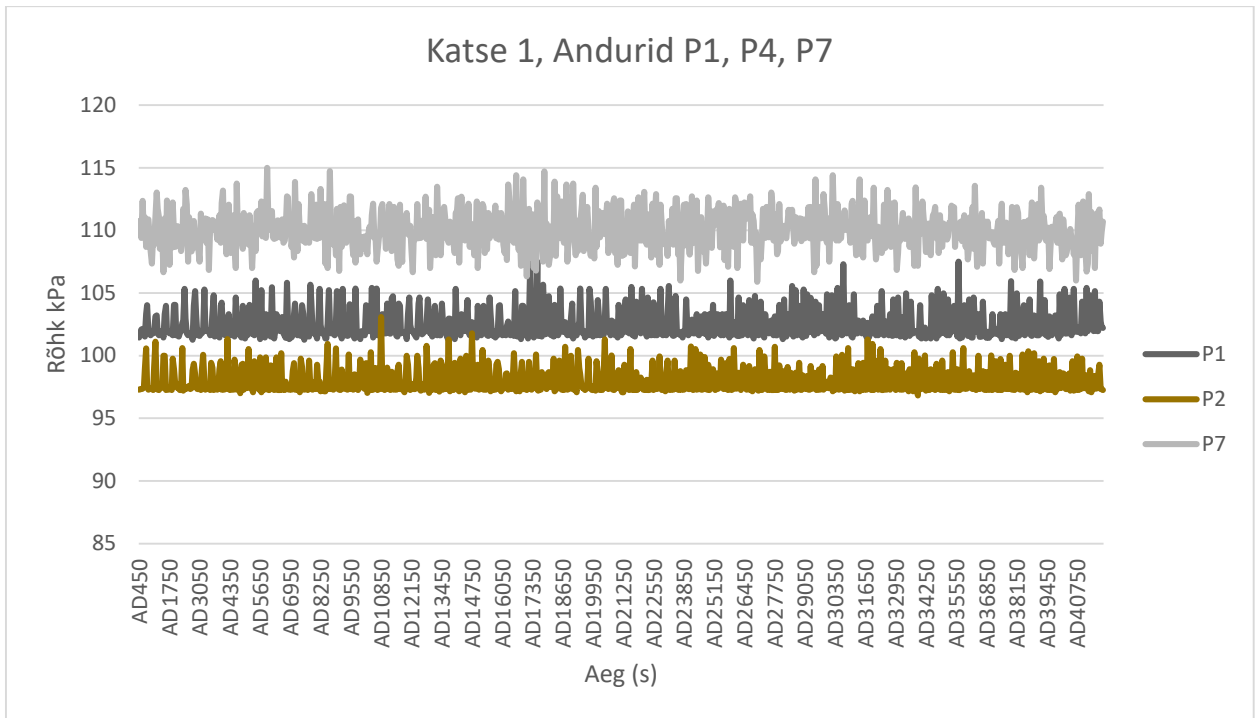
## 4.2 Tulemused

Katsete käigus selgus, et laba kontrolleriga ühendatud sülearvutis ei olnud võimalik kasutajaliidest käivitada, seega katset kasutajaliidese ekraanilt reaajas monitoorida ei õnnestunud. Peale katseid kontrolliks kontrolleri külge ühendatud lauaarvutis kasutajaliides töötas korrektselt, seega oli probleem sülearvutipoolne. Teadmata põhjusel ei edastanud andmeid 3 rõhuandurit, kuid ülejäänud anduritest saadavad näidud viitavad, et süsteem on funktsionaalne. Kahjuks ei olnud testkatsete tegemise käigus võimalik vankri kiirust edastavat enkoodrit süsteemi ühendada, seega kiiruse näite saadud andmetes ei kajastatud. Andurite arvu ja saadud näitude küllaltki ühesugustest vahemikest tingituna ei ole selguse huvides mõistlik kõikide andurite tulemusi ühte graafikusse sisestada, tulemuste tutvustamiseks on järgnevalt ära toodud kolme anduri näitel nii parema kui ka vasakul laba poolel salvestatud andmed. Rõhu ühikud on ära toodud kPa-des.

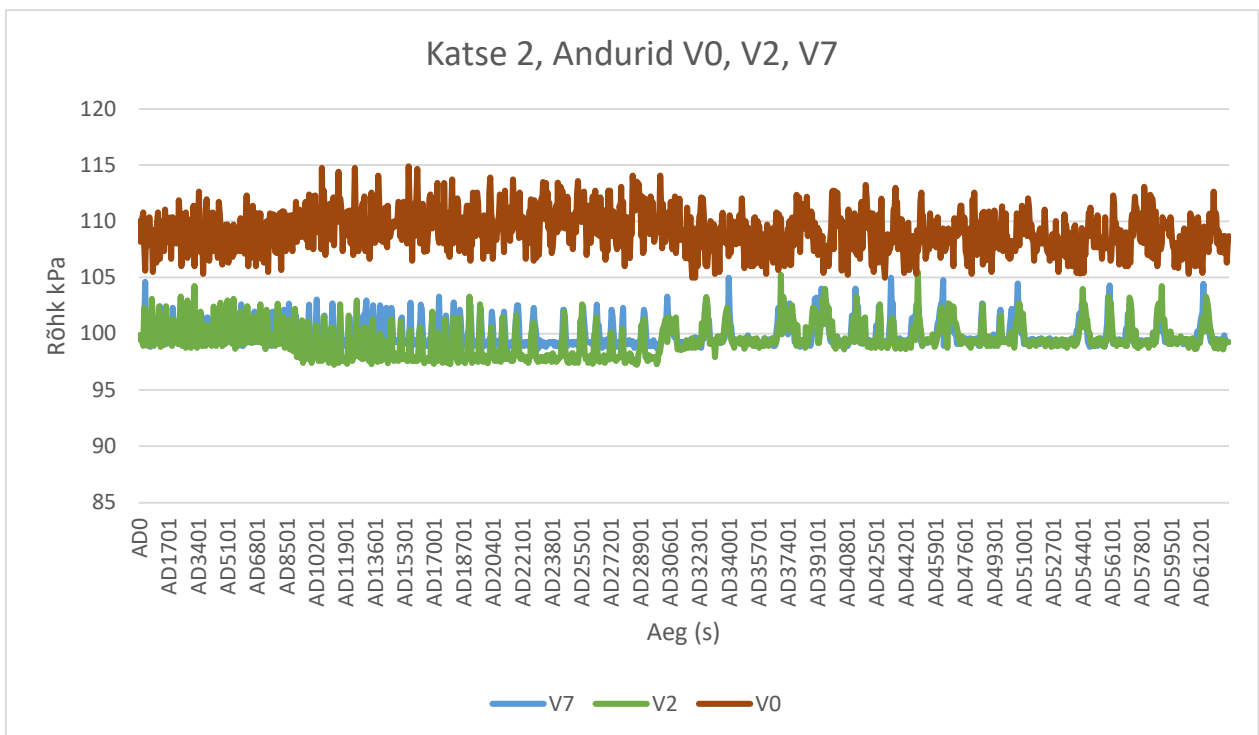


Joonis 23. Andurite V0, V2, V7 näidud esimesest katsest

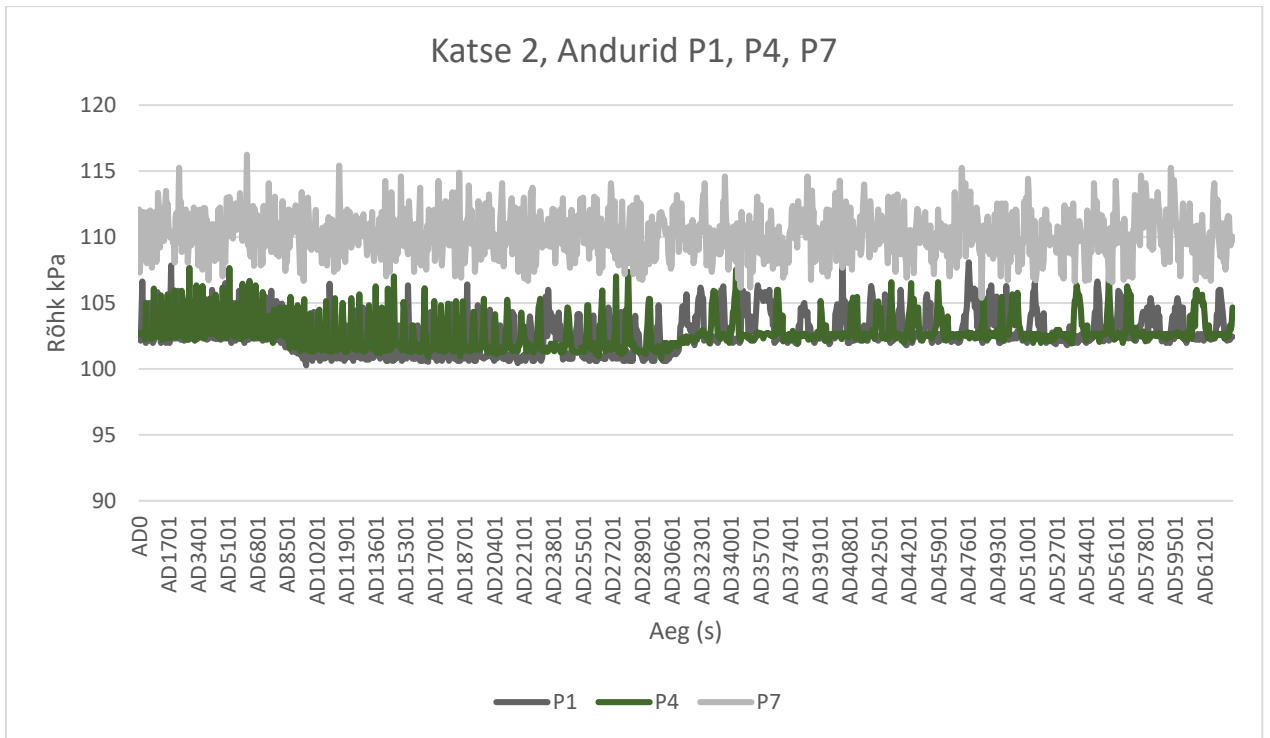




Joonis 24. Andurite P1, P2, P7 näidud esimesest katsest



Joonis 25. Andurite V0, V2, V7 näidud teisest katsest



Joonis 26. Andurite P1, P4, P7 näidud teisest katses

## Kokkuvõte

Lõputöö eesmärk oli edasi arendada vees liikumise analüüsimiseks teiste autorite poolt konstrueeritud NACA0025 profiiliga laba, mille külge on paigutatud rõhuandurid ja kontrollid.

Püstitatud eesmärkideks oli:

- Töö aluseks oleva varasema süsteemi analüüs ning arendusvajaduste määratlemine
- Sobilike elektroonikakomponentide, sh. rõhuandurite valik
- Uue laba konstruktsiooni välja töötamine ja valmistamine
- Katseandmeid koguva ning töötleva tarkvaralahenduse loomine
- Katsevalmidust tõestavate katsete sooritamine
- 

Komponentide valikul lähtuti nii omadustest kui ka omavahelise integreerimise võimalikkusest. Valiti välja ning paigaldati täpsemad rõhuandurid, kiiremat andmeedastussüsteemi toetav kontrollid, laba sisse lisati vee ärastuseks veeandur ning tühjenduspump. Koostati programm kontrolleri juhtimiseks ja tekitati kasutajaliides, mis võimaldab hõlpsamat süsteemi käsitlemist, andmeid on võimalik katsete tegemise hetkel reaalajas jälgida. Laba disaini puhul suurendati füüsilisi mõõtmeid vähendamaks andurite mõõteaukudest tekkivaid mõõtehälbeid ja täiustati kinnitussüsteemi.

Katsevalmidust tõestavad katsed sooritati Väikelaevaehituse Kompetentsikeskuse mudelkatsebaseinis ning saavutati püstitatud eesmärgid.

Laba valmistamise käigus kasutati kiiruse huvides printimisel 20% täidist, mis lühendas printimise aega. Katsetuste käigus selgus, et sellise täiteprotsendi juures on veelekked kerged tekkima ja tulevikus on soovituslik printimisel kasutada tihedamat täidisstruktuuri. Edaspidi tuleks täiustada ka laba liikumisnurga fikseerimise süsteemi ning välja selgitada, mis põhjusel mõningad andurid näite ei edastanud. Tähelepanu tuleb pöörata saadavate andmete kalibreerimisele, et tagada adekvaatsed mõõtmis- ja uurimistulemused.

## **Võõrkeelne lühikokkuvõte**

This study is based on Julian de Kat's Master's Thesis „The Importance of Friction Reduction in Boundary Layers“. The aim of this thesis is to furthermore develop already existing water pressure measuring device – airfoil with NACA 0025 profile which had problems with carrying out consistent tests in the towing tank because of water leaks inside the housing of the foil and had malfunctioning components as a result. Objects of this study were to find suitable components, upgrade design of the foil, develop new program for controller and to perform first initial tests to find out if the system operates as planned.

All of these goals were achieved and first tests were carried out. First test results implicated that some of the sensors did not transfer data to the controller unit for unknown reason. In order to have accurate measurements in future studies, calibration of the data measurement is mandatory.

## Viidatud allikad

- [1] J. de Kat, Master`s Thesis. The Importance of Friction Reduction in Boundary Layers, 2019.
- [2] "The Naca Airfoil Series," [Online]. Available: <https://lin-web.clarkson.edu/~pmarzocc/AE429/The%20NACA%20airfoil%20series.pdf>. [Accessed 02 03 2021].
- [3] T.Lehtla, „Andurid,“ 1996.
- [4] "Avnet Abacus - Pressure Sensor Types," [Online]. Available: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/types>. [Accessed 03 03 21].
- [5] "Bourns BPS130 series pressure sensors," [Online]. Available: <https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/bps130.pdf>. [Accessed 03 02 2021].
- [6] "Honeywell ABP2," [Online]. Available: [https://www.mouser.ee/datasheet/2/187/Honeywell\\_01292021\\_ABP2\\_Series\\_Datasheet\\_Issue\\_C-1991028.pdf](https://www.mouser.ee/datasheet/2/187/Honeywell_01292021_ABP2_Series_Datasheet_Issue_C-1991028.pdf). [Accessed 12 05 2021].
- [7] "Amphenol Mini Sensors," [Online]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/18/1/DS-0103-Rev-A-1499253.pdf>. [Accessed 12 05 2021].
- [8] "Arduino Store," [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/arduino-micro>. [Accessed 22 01 2021].
- [9] "Espressif," [Online]. Available: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf). [Accessed 22 01 2021].
- [10] "Components 101," [Online]. Available: <https://components101.com/microcontrollers/stm32f103c8t8-blue-pill-development-board>. [Accessed 22 01 2021].
- [11] "Mouser Electronics," [Online]. Available: <https://www.mouser.ee/ProductDetail/Amphenol-Advanced-Sensors/BAF147B002-00A0/?qs=wnTfsH77Xs4wQlD%252BmiruLw%3D%3D>. [Accessed 03 03 2021].
- [12] "Robolabor," [Online]. Available: <https://robolabor.ee/et/harjadeta-dc-mootorid/852-harjadeta-uputatav-veepump-12v.html>. [Accessed 03 03 2021].

- [13] "Airfoiltools," [Online]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>. [Accessed 09 03 2021].
- [14] "Kübler Encoders Incremental," [Online]. Available: <https://www.kuebler.com/en/products/measurement/encoders/product-finder/product-details/5000>. [Accessed 23 05 2021].
- [15] "Anycubic," [Online]. Available: <https://www.anycubic.com/products/anycubic-predator-fdm-printer>. [Accessed 27 04 2021].
- [16] "3D Hubs," [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference/#what-are-abs-and-pla>. [Accessed 27 04 2021].
- [17] "Gembird Filaments," [Online]. Available: <https://gembird.com/item.aspx?id=8854>. [Accessed 27 04 2021].
- [18] Bitter, Mohiuddin and Nawrocki, Labview Advanced Programming Techniques, 2007.

# Lisa 1 Kasutatavate rõhuandurite seeria põhiandmed



## Features

- Compensated output
- Direct-media monitoring
- Gauge and absolute types
- Isolated onboard electronics
- Gold-plated Kovar™ port option
- RoHS compliant\*

## Applications

- Industrial:
- Refrigerant systems
  - Water level & pressure monitoring
- \*\* Medical Devices (low/medium risk):
- Diagnostic/analysis equipment
- \*\*\* Heavy Equipment:
- Oil & fuel systems
  - Exhaust gas pressure sensing

## BPS130 Series - 10 mm Analog High Pressure Sensor

### Electrical Characteristics

Supply Voltage ( $V_S$ )	4.5 V minimum, 5 V typical, 5.5 V maximum
Supply Current	10 mA
Output Current	2.5 mA
Short Circuit Current	±25 mA
Reverse Polarity Protection	-33 V
Overvoltage Protection	33 V

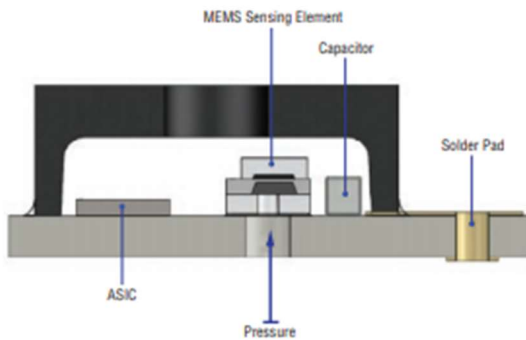
### Performance Characteristics

Operating Temperature	-40 °C to +150 °C (-40 °F to +302 °F)
Storage Temperature	-55 °C to +150 °C (-67 °C to +302 °F)
Output Range $V_{out}$ ****	10 % to 90 % $V_S$
Output Clamping Limit $V_{out}$ ****	5 % to 95 % $V_S$
Resolution (>12 bit DAC)	0.02 % FS
Accuracy @ 25 °C	±0.25 % FS
Total Error Band @ -40 °C to +150 °C (-40 °F to +302 °F)	±2.5 % FS
Static Proof Pressure	2X full scale PSIA
Burst Pressure	3X full scale PSIA
Lifetime Drift	±0.5 % FS

### Product Characteristics

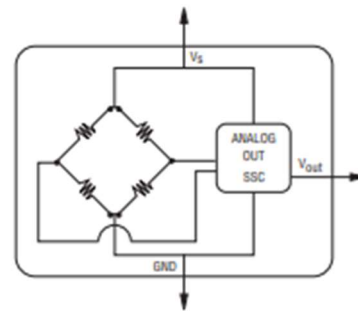
Media Compatibility	Harsh media (air, liquid and gas)
Moisture Sensitivity Level	1
ESD Classification (HBM)	>4 kV
Marking	Partial model number, media compatibility, pressure type, pressure rating, lot code
Standard Packaging	250 pcs./13-inch reel or 100 pcs./tray
Weight	1.080 grams (0.038 oz)

### Cross Section



"Wetted" Materials: Silicon, glass, Au/Sn, ceramic  
(Ported version also contains Au and solder)  
Any material in contact with the media is considered a "wetted" material.

### Basic Circuit Schematic



Note: Power supply decoupling and output filtering included.  
Consult factory for custom options such as supply voltage, temperature calibration range, output range accuracy specification, and update rate.

## BOURNS®

Asia-Pacific: Tel: +886-2 2562-4117 • Email: asiacus@bourns.com  
EMEA: Tel: +36 88 885 877 • Email: eurocus@bourns.com  
The Americas: Tel: +1-951 781-5500 • Email: americus@bourns.com  
www.bourns.com

\* RoHS3 Directive 2015/863 Amendments of Annex II on March 31, 2015  
\*\* Bourns® products have not been designed for and are not intended for use in "lifesaving," "life-critical" or "life-sustaining" applications nor any other applications where failure or malfunction of the Bourns® product may result in personal injury or death. See Legal Disclaimer Notice on the last page of this document, and at [www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf](http://www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf).

\*\*\* Custom engineered solutions. Check with factory for availability.  
\*\*\*\* 5 V input voltage.

"Kovar" is a trademark of CRS Holdings, Inc., Delaware.  
Specifications are subject to change without notice.

Users should verify actual device performance in their specific applications.  
The products described herein and this document are subject to specific legal disclaimers as set forth on the last page of this document, and at [www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf](http://www.bourns.com/docs/legal/disclaimer.pdf).

## Lisa 2 3Dprinteri andmeleht



### Technical Specifications

- Printing Technology: FDM (Fused Deposition Modeling)
- Printing volume : 370×370×455mm
- Layer Resolution: 0.05-0.3 mm
- Positioning Accuracy: X/Y/Z 0.0125mm
- Extruder Quantity: Single
- Nozzle/Filament Diameter: 0.4 mm/1.75mm
- Print Speed: 20~150mm/s (suggested 60mm/s)
- Supported Materials: PLA, ABS,TPU, HIPS, Wood
- Ambient Operating Temperature: 8°C - 40°C
- Operational Extruder Temperature: max 250°C
- Software Input Formats: .STL, .OBJ, JPG, PNG
- Connectivity: Memory card; Data cable(expert users only)
- Package Weight: 19.2kg



# Lisa 3 PLA filamenti andmeleht



**gembird®**

*Shaping the perfection*

## Filament, PLA White, 1.75 mm, 1 kg

3DP-PLA1.75-01-W

### VERSATILE & EASY TO USE

- PLA (polylactide) is a biodegradable thermoplastic polyester, which is easy to print for variety 3D printers.
- It has no odor, a lower melting point and good flowability, no need to post-treatment.



### Features

- High precision roundness enables higher printing quality
- No bubbles, vivid colors
- Can be applied to a variety of 3D printers

### Packaging

Q'ty in crtn, pcs	8
Crtn volume, CUM	0.036
Crtn weight, kgs	11.46
Individual package size LxWxH:	210x210x85 mm
Carton size LxWxH:	440x440x185 mm
Country of origin	CN
Barcode	8716309088541
Customs code	3916909000

### Specifications

Material: PLA, 1.75 mm diameter  
Weight: 1 kg/spool (2.2 lbs)  
Length: approx. 330 m  
Density at 21.5 °C: 1.25 g/cm<sup>3</sup>  
Melt Flow Index at 10min, 2.16kg: 5  
Melt Point: 190 220 °C  
Heat-Deflection-Temperature at 0.455 MPa: 50 °C  
Yield Strength at 5mm/min: 45 MPa  
Impact Strength: 5 KJ/m<sup>2</sup>  
Elongation at Break: 20 %  
Diameter: 1.75 ± 0.05 mm

### System requirements

A 3D printer with 1.75 mm extruder of temperature around 200 °, suitable for PLA filament

### Certificates



## Lisa 4 Koostatud programm

```
char sisend = 0; // saabuvate käskude jaoks

bool saatmine = false; //saada ei saada

int impulsid = 0; //muutujad vankri kiiruse mõõtmiseks
const int imp_1poore = 5000;
const float rattaraadius = 0.10;
long int kiirusmillis;
float kiirus = 0;

long int algusmillis=0;
int tsyklid = 0;
const int tsyklite_arv = 10;
long int mooteaeg = 0;
int veeandur_ADC= 0;

//määrame anduri ja klemmi paarid

#define p1 27
#define p2 14
#define p3 12
#define p4 13
#define p5 2
#define p6 15
#define p7 0
#define v0 36
#define v1 39
#define v2 34
#define v3 35
#define v4 327
#define v5 33
```

```

#define v6 25
#define v7 26

#define testandur 4
#define enkooder 22
#define pump 16
#define veeandur 4
int andurid[] = {v7,v6,v5,v4,v3,v2,v1,v0,p1,p2,p3,p4,p5,p6,p7}; //loome array, kus andurid järjest
kirjas
//int andurid[]={testandur};
const int array_suurus = sizeof(andurid) / sizeof(andurid[0])-1; //andurite arrayse lisatud numbrite
arv
void enkf() {
    impulsid++;
}
void setup() {
    pinMode(pump,OUTPUT);
    digitalWrite(pump,LOW);
    pinMode(veeandur,INPUT);
    attachInterrupt(enkooder, enkf, RISING);
    for (int i=0;i<=array_suurus; i++) //anduriga seotud klemmi määramine sisendiks
    {
        pinMode(andurid[i],INPUT);
    }
    Serial.begin(115200);
}
void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        sisend = Serial.read();
        if (sisend == 'A')
        {
            saatmine=!saatmine;
        }
    }
}

```

```

}
veeandur_ADC=analogRead(veeandur);
  if (veeandur_ADC<2048)
  {
digitalWrite(pump,HIGH);
  }
  if(!veeandur_ADC>2048)
  {
digitalWrite(pump,LOW);
  }

if(!saatmine)
{
  tsyklid = 0;
  algusmillis=millis();
  return;
}
mooteaeg=millis()-algusmillis;
Serial.print("AD");
Serial.print(mooteaeg);
Serial.print(";");
tsyklid++;
if(tsyklid>=tsyklite_arv)
{
  tsyklid=0;
  kiirus=2*(impulsid/imp_1poore)*3.14*rattaraadius;
  impulsid=0;
  kiirusmillis=millis();
}

```

```
Serial.print(kiirus);  
Serial.print(";");  
for (int i=0;i<=array_suurus; i++)  
{  
  Serial.print(analogRead(andurid[i]));  
  Serial.print(";");  
}  
Serial.println("L");  
delay(50);  
}
```

## Lisa 5 Vāļjavōte salvestatud andmetest

	V7	V6	V5	V4	V3	V2	V1	V0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
AD0	99.85608	99.26727	98.9308	-25.8553	99.77196	99.51962	100.2767	109.9921	102.4216	99.51962	104.0619	102.716	-25.8553	103.9778	112.095
AD51	99.77196	99.72991	98.9308	-25.8553	99.26727	99.85608	100.0243	108.9406	102.6319	99.51962	104.0198	102.674	-25.8553	101.3281	107.3003
AD101	99.68785	99.60373	98.88875	-25.8553	99.60373	99.60373	100.1925	108.1836	102.1272	99.51962	103.3048	102.6319	-25.8553	101.5384	108.6041
AD151	99.60373	99.26727	98.67846	-25.8553	99.4355	99.51962	99.9402	109.0247	104.6507	99.35138	101.7907	102.5478	-25.8553	101.959	111.7164
AD201	99.4355	99.4355	101.6225	-25.8553	98.76257	99.26727	100.4449	110.2865	106.6274	97.50083	101.9169	102.6319	-25.8553	101.7907	108.52
AD251	99.09904	101.4543	101.3702	-25.8553	99.26727	98.9308	101.9169	110.7912	103.2628	97.41672	101.959	102.716	-25.8553	103.2207	111.8847
AD301	100.7814	101.3281	99.09904	-25.8553	100.2767	102.2954	103.3048	107.8471	102.674	97.50083	101.959	102.6319	-25.8553	104.9872	110.707
AD351	104.6086	99.26727	98.88875	-25.8553	102.9684	101.959	100.1925	105.618	102.5899	97.92141	102.2113	102.2534	-25.8553	103.3048	109.3612
AD401	100.6131	99.01492	98.76257	-25.8553	101.1178	99.26727	100.6131	108.0574	101.959	97.58495	101.959	104.9872	-25.8553	101.3702	109.3612
AD451	99.35138	99.4355	98.9308	-25.8553	99.26727	99.26727	99.60373	109.0247	102.2534	97.75318	105.1554	102.8001	-25.8553	102.6319	108.0153
AD501	99.22521	99.85608	98.76257	-25.8553	99.51962	98.9308	99.89814	107.8471	102.2534	98.38405	103.3048	102.4637	-25.8553	102.4637	111.8847
AD551	99.4355	99.6373	98.6364	-25.8553	99.26727	99.77196	100.1925	108.3518	102.1272	100.2346	102.9263	102.716	-25.8553	101.4543	110.3706
AD601	99.18315	99.60373	99.9402	-25.8553	98.76257	99.4355	99.98225	110.3706	104.9872	99.18315	101.7907	102.6319	-25.8553	102.3796	108.52
AD651	98.84669	100.7814	102.716	-25.8553	99.18315	99.22521	101.3702	108.3518	103.3048	97.41672	101.959	102.4216	-25.8553	101.7907	112.0108
AD701	99.72991	102.674	99.77196	-25.8553	99.09904	101.2861	103.3048	109.3612	102.5478	97.58495	101.959	102.2954	-25.8553	103.3048	110.8753
AD751	101.8749	100.4028	98.76257	-25.8553	101.4543	103.0945	102.2534	109.193	102.1272	97.41672	101.959	102.9684	-25.8553	106.7115	107.6789
AD801	101.3702	99.18315	98.6364	-25.8553	102.5478	100.2346	100.1084	105.4919	101.959	97.3326	101.7487	102.9684	-25.8553	103.2207	110.5388
AD851	99.26727	99.60373	99.18315	-25.8553	99.4355	98.9308	99.77196	108.6883	102.1272	97.3326	102.1272	106.0807	-25.8553	101.959	111.0435
AD901	99.09904	99.4355	98.9308	-25.8553	98.9308	99.26727	100.2767	108.9827	102.4637	97.50083	105.1974	102.674	-25.8553	102.4637	110.9594
AD951	99.4355	99.4355	98.76257	-25.8553	99.4355	99.26727	99.89814	109.0247	102.8001	100.7393	102.2534	102.5478	-25.8553	102.4637	111.8847
AD1001	99.60373	99.26727	98.9308	-25.8553	99.26727	99.26727	100.4449	106.333	104.2301	100.0243	101.8749	102.4216	-25.8553	102.2954	108.0995
AD1051	99.18315	99.60373	101.959	-25.8553	99.51962	99.26727	99.9402	109.8659	105.8283	97.24848	101.959	102.4637	-25.8553	102.2954	109.6977
AD1101	99.4355	101.7907	101.2861	-25.8553	98.9308	99.77196	102.674	110.7912	102.674	97.41672	102.2113	102.6319	-25.8553	102.9263	113.3567
AD1151	101.1178	100.9496	99.05698	-25.8553	100.529	102.4216	103.3048	107.3424	102.5478	97.8373	101.7066	102.4637	-25.8553	105.6601	112.2211
AD1201	102.4637	99.18315	99.09904	-25.8553	102.2113	100.6131	100.2767	106.6695	102.6319	97.3326	101.7907	103.3048	-25.8553	102.8001	109.193
AD1251	99.72991	99.26727	98.9308	-25.8553	100.2767	98.84669	100.2346	108.0995	101.959	97.37466	101.5384	105.576	-25.8553	102.2954	110.0341
AD1301	99.01492	99.4355	98.9308	-25.8553	99.56167	98.9308	100.0243	109.9921	102.5899	97.58495	103.9778	104.4825	-25.8553	102.2954	112.137
AD1351	99.56167	99.4355	98.76257	-25.8553	99.18315	99.56167	99.98225	107.8471	102.2113	99.09904	105.2395	102.2113	-25.8553	102.2534	111.0015
AD1401	99.9402	99.60373	98.67846	-25.8553	99.09904	99.60373	100.1925	108.1836	103.3048	98.9308	101.8749	102.8001	-25.8553	101.6225	110.2024
AD1451	99.4355	100.1925	102.2954	-25.8553	98.9308	99.01492	100.8655	107.3424	104.4825	97.75318	101.7907	102.4637	-25.8553	101.3702	109.6977
AD1501	99.51962	101.7066	101.959	-25.8553	99.09904	99.51962	102.2954	111.0435	102.9263	97.54289	101.959	102.5478	-25.8553	102.4637	112.1791
AD1551	100.529	102.5478	98.67846	-25.8553	99.9402	102.4637	103.3048	109.4453	101.959	97.71112	102.1272	102.5899	-25.8553	105.3236	113.4829
AD1601	99.09904	99.60373	98.76257	-25.8553	102.6319	101.4543	100.2767	110.0341	102.5478	97.37466	101.6225	102.2954	-25.8553	104.4825	110.9594
AD1651	99.4355	99.26727	99.60373	-25.8553	100.0243	99.26727	100.1084	109.0247	102.6319	97.87935	101.7907	105.6601	-25.8553	102.2113	112.5155
AD1701	99.26727	99.26727	98.9308	-25.8553	98.76257	99.60373	100.1084	108.1836	102.4216	97.29054	104.4825	103.3048	-25.8553	102.1272	110.7491
AD1751	99.4355	99.60373	98.88875	-25.8553	99.4355	99.4355	99.89814	109.4033	101.959	99.39344	103.3048	102.2954	-25.8553	102.0852	110.3706
AD1801	99.26727	99.51962	98.59434	-25.8553	99.4355	99.35138	100.0243	110.3285	103.9778	99.9402	101.959	102.2954	-25.8553	102.5899	109.95
AD1851	99.26727	99.26727	101.4543	-25.8553	99.26727	99.09904	99.77196	106.6695	107.8471	97.58495	101.5384	102.8001	-25.8553	101.9169	110.3706
AD1901	99.60373	101.4122	101.3281	-25.8553	99.26727	98.9308	102.6319	110.3285	102.9684	97.50083	101.959	102.4637	-25.8553	102.4637	110.3706
AD1951	102.2954	100.0243	98.42611	-25.8553	101.959	101.2861	100.6131	110.3706	102.2954	97.92141	101.7907	102.5478	-25.8553	103.3048	109.5294
AD2001	101.1178	99.35138	99.09904	-25.8553	103.3048	101.2861	100.1084	108.8565	102.7581	97.50083	101.5384	102.674	-25.8553	104.3142	110.3285
AD2051	99.60373	99.05698	98.88875	-25.8553	99.9402	99.4355	99.9402	108.0995	102.2954	97.41672	102.1272	105.9545	-25.8553	102.4637	108.0574
AD2101	99.22521	99.68785	98.9308	-25.8553	99.09904	99.26727	99.9402	109.95	102.4637	97.92141	105.2395	103.2207	-25.8553	102.2534	111.5482
AD2151	99.4355	99.18315	98.88875	-25.8553	99.60373	99.51962	100.1084	108.0153	102.2954	99.26727	104.5666	102.3796	-25.8553	101.959	111.8426
AD2201	99.4355	99.60373	98.67846	-25.8553	99.77196	99.26727	99.98225	108.2677	103.3048	100.5711	101.7066	102.5478	-25.8553	101.9169	109.5294
AD2251	99.26727	99.26727	101.2861	-25.8553	99.4355	99.09904	99.60373	108.2677	105.9124	97.92141	101.8749	102.716	-25.8553	101.1599	111.0435
AD2301	99.05698	101.4543	101.8749	-25.8553	99.26727	99.09904	101.959	111.8847	102.9684	97.29054	101.7907	102.5478	-25.8553	101.7487	115.2493
AD2351	100.3608	103.3048	99.68785	-25.8553	99.26727	100.9496	102.9684	110.3706	102.5057	97.50083	102.0431	102.5478	-25.8553	104.146	112.095
AD2401	102.1272	100.2346	98.9308	-25.8553	101.959	103.3048	101.7907	108.0995	102.2113	97.50083	101.8749	102.6319	-25.8553	106.8377	112.7258
AD2451	99.18315	99.4355	98.84669	-25.8553	100.1084	99.4355	99.60373	105.9966	102.674	97.71112	101.959	105.9124	-25.8553	101.3281	108.8565
AD2501	99.26727	99.4355	98.6364	-25.8553	98.76257	98.9308	100.1084	106.9218	102.4637	97.37466	103.3048	105.3657	-25.8553	101.2861	109.8659
AD2551	99.26727	99.56167	98.9308	-25.8553	99.4355	99.09904	100.0243	110.6229	102.2534	97.8373	105.618	102.8843	-25.8553	102.0431	109.6135
AD2601	99.4355	99.26727	98.88875	-25.8553	99.22521	99.77196	99.77196	109.0247	102.1272	100.1084	102.6319	102.2954	-25.8553	101.2861	109.3612
AD2651	99.26727	99.26727	100.2346	-25.8553	99.60373	99.4355	99.77196	108.6883	105.1554	98.88875	101.6225	102.4637	-25.8553	102.2534	109.6556
AD2701	99.26727	100.7814	105.4077	-25.8553	99.51962	98.76257	100.7814	110.7912	104.0619	97.24848	101.8749	102.6319	-25.8553	101.2861	112.095
AD2751	99.18315	102.8001	99.89814	-25.8553	99.09904	100.9496	103.3048	108.0153	102.2954	97.29054	101.6225	102.5478	-25.8553	104.6507	111.7164
AD2801	102.6319	99.85608	98.42611	-25.8553	101.959	102.9684	101.3281	106.7536	102.6319	97.41672	101.8749	102.2113	-25.8553	104.6507	108.0574
AD2851	101.244	99.39344	98.9308	-25.8553	102.8843	100.1084	99.26727	108.0574	102.2113	97.50083	101.959	103.8937	-25.8553	102.8843	109.4033
AD2901	99.26727	99.39344	98.84669	-25.8553	98.76257	99.26727	100.1925	107.1742	102.6319	97.58495	102.9684	107.6789	-25.8553	101.3702	109.8659
AD2951	99.26727	99.35138	99.												

**Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina \_\_\_\_\_ Urmo Koitla \_\_\_\_\_ (autori nimi)

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose  
Allveelaba edasiarendus

(lõputöö pealkiri)

mille juhendaja on

Kaarel Koppel

(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.

---

\_\_\_\_\_ 24.05.2021 \_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

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