

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
Infotehnoloogia teaduskond

Danel Tiitma 206841IACB

# **Põhjakõrgussensori arendamine tudengivormelile FEST23**

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Peeter Ellervee  
PhD  
Professor

Tallinn 2023

## **Autorideklaratsioon**

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Danel Tiitma

15.05.2023

## **Annotatsioon**

Antud bakalaureusetöö käsitleb põhjakõrgussensori arendust tudengivormelile FEST23. Tegemist on eemaldatava optilise sensoriga, mida saab kinnitada vormeli põhja alla, vajades ainult toite ja CAN-võrgu ühendust. Põhjakõrguse teadmine aitab kaasa vormeli dünaamika arendusele, eelkõige aerodünaamika simulatsioonide valideerimisele. Töö sisaldab kogu sensori arendusprotsessi, mõõtetulemuste valideerimist staatilises olukorras ja analüüsi. Töö käigus valmib isearendatud trükkplaat, veekindel 3D prinditud korpus ning sensoril olevale mikrokontrollerile tarkvara.

Sensor kalibreeritakse ja mõõtetulemused valideeritakse freespingsis, kus saab sensori seada kindlatele kaugustele. Kogu protsessi saab juhtida läbi CAN-võrgu, mis võimaldab lihtsasti muuta ka sensori seadeid. Valminud sensor ja selle mõõtetulemused vastavad püstitatud nõuetele.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 31 leheküljel, 5 peatükki, 20 joonist, 8 tabelit.

## **Abstract**

### **Development of a Ride Height Sensor for Formula Student Car FEST23**

This thesis describes the development process of a ride height sensor for a formula student car FEST23, including calibration and testing in static situation. Ride height of the car changes during driving, due to uneven road surface and aerodynamic forces. Ride height data aids the development of vehicle dynamics, by helping validate simulations.

Ride height sensor is a standalone unit, which can be attached to the underside of the car. Sensor only needs power and a connection to car's CAN-bus to function. Measurement data is sent through CAN-bus and logged in the car. Self-developed sensor PCB has two VL6180 time-of-flight distance sensors from STMicroelectronics for distance measurement and a Texas Instruments Tiva C series microcontroller for control. PCB is enclosed in a SLA 3D printed waterproof housing with windows for distance sensors and passthroughs for wires. Software is developed for the microcontroller.

Sensor is calibrated in a CNC machine, which allows to set the sensor at precise distances and set the correct offset and crosstalk compensation. Measurement validation and sensor optimization is also done in the CNC machine. Entire calibration and validation process is done through CAN bus, by transmitting commands and receiving measurement data. Measurement data is validated and is compliant with set requirements.

The thesis is in Estonian and contains 31 pages of text, 5 chapters, 20 figures, 8 tables.

## Lühendite ja mõistete sõnastik

CAN	<i>Controller area network</i> , autotööstuses levinud suhtlusstandard
PCB	<i>Printed circuit board</i> , trükkplaat
SLA	<i>Stereolithography</i> , 3D-printimise meetod
CNC	<i>Computer numerical Control</i> , Arvprogrammjuhtimisega freespink
FESTxx	Aastal xx valmistatud tudengivormeli nimi
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i> , analoog-digitaalmuundur
Time-of-flight	Kaugussensori tehnoloogia, mis põhineb lennuaja mõõtmisel
Footon	Valguskiirguse väikseim osake
API	<i>Application Programming Interface</i> , rakendusliides
LQFP	<i>Low-profile quad flat package</i> , mikrokontrolleri korpuse tüüp
EEPROM	Elektriliselt ümberprogrammeeritav püsिमälu
I2C	<i>Inter-integrated circuit</i> , suhtlusstandard
JTAG	Mikrokontrolleri programmeerimise standard
CANH/CANL	<i>CAN high/CAN low</i> , CAN-võrgu juhtmepaar
Läbikoste	<i>Crosstalk</i> , sensori klaasilt tagasi peegelduv valgus
Pollimine	Mikrokontrolleri poolt korduv andmete küsimine
Mcps	<i>Mega counts per second</i> , footonite arv ühes sekundis (ühik)
Andurisulandus	<i>Sensor fusion</i> , sensorite andmete kombineerimine

## Sisukord

Sissejuhatus .....	10
1 Teoreetilised alused .....	11
1.1 Tudengivormel.....	11
1.2 Alternatiivsed lahendused.....	12
1.3 Nõuded põhjakõrgussensorile.....	12
2 Riistvara arendus .....	14
2.1 Kaugussensor.....	14
2.2 Mikrokontroller .....	17
2.3 CAN transiiver.....	17
2.4 Toitesüsteem .....	18
2.5 Ühendused .....	19
3 Korpuse disain .....	21
3.1 Veekindlus .....	21
3.2 Optiline mõjutus .....	23
3.3 Põhjakõrgussensori kinnitamine.....	23
4 Tarkvara arendus .....	25
4.1 Sensoriga suhtlus .....	26
4.1.1 Mõõtmismeetodid.....	26
4.1.2 Seadistamine.....	28
4.2 Liidesed .....	30
5 Mõõtetulemuste valideerimine .....	31
5.1 Kalibreerimine .....	31
5.1.1 Nihke seadistamine.....	32
5.1.2 Läbikoste kompenseerimine .....	32
5.2 Testimine .....	33
5.2.1 Kaitseklaasi mõjutus.....	35
5.2.2 Mõõtmisrežiimide võrdlus.....	36
5.2.3 Sensori seadistus.....	38
5.3 Tulemuste analüüs .....	39

5.3.1 Sensori vastavus nõuetele .....	39
5.3.2 Edasised arendused.....	40
Kokkuvõte .....	42
Kasutatud kirjandus .....	43
Lisa 1 – Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks .....	45
Lisa 2 Põhjakõrgussensori trükkplaadi elektriskeem .....	46
Lisa 3 Põhjakõrgussensori trükkplaadi kihid.....	48
Lisa 4 Põhjakõrgussensori trükkplaadi 3D vaated .....	49
Lisa 5 Põhjakõrgussensori korpuse joonised.....	50

## Jooniste loetelu

Joonis 1. Põhjakõrgussensori trükkplaadi plokk skeem. ....	14
Joonis 2. Lennuaja sensori tööpõhimõte [9]. ....	16
Joonis 3. VL6180 kaugussensori saatja ja vastuvõtja valguskoonus [7]. ....	16
Joonis 4. CAN-transiiveri skeem koos terminatsiooniga takistitega. ....	18
Joonis 5. Põhjakõrgussensori toiteskeem. ....	19
Joonis 6. Põhjakõrgussensori trükkplaadil olevad komponendid ja ühendused. ....	20
Joonis 7. Põhjakõrgussensori trükkplaat koos korpusega. ....	21
Joonis 8. Põhjakõrgussensori lähivaade. Korpuse ülemine pool on pooleks lõigatud. ...	22
Joonis 9. Põhjakõrgussensori alt vaade. ....	22
Joonis 10. Lähivaade sensori kiibist ja kaitseklaasidest. ....	23
Joonis 11. Põhjakõrgussensor koos kinnitusega esitiiva otsaplaadi küljes. Must – sensor, tume hall – kinnitus, hele hall – esitiib. ....	24
Joonis 12. Põhjakõrgussensori tarkvara struktuur. ....	25
Joonis 13. Kood ühekordse mõõtmise režiimis mõõtmiste tegemiseks. ....	28
Joonis 14. Loetelu kalibreerimiseks kasutatud sõnumitest. ....	29
Joonis 15. VL6180 sensori mõõtmisprotsessi ajaline jaotus. Paksus kirjas on seadistatavad parameetrid. ....	29
Joonis 16. Sensori kalibreerimisprotsess freespingis. ....	31
Joonis 17. Läbikoste kompenseerimine vahemaa suurenedes [7]. ....	32
Joonis 18. VL6180 sensori ja kaitseklaasi vahelise kauguse mõju läbikostele [7]. ....	33
Joonis 19. Sensori mõõtevea sõltuvus kaitseklaasist. ....	36
Joonis 20. Sensori mõõtesagedused erinevates mõõtmisrežiimides. ....	37



## Tabelite loetelu

Tabel 1. Põhjakõrgussensori nõuded .....	13
Tabel 2. Kolme eritehnoloogiat kasutava kaugussensori võrdlus. ....	15
Tabel 3. Trükkplaadil olevate komponentide tarbimine.....	18
Tabel 4. Lineaarregulaatorite võimsuskadu ja efektiivsus. ....	19
Tabel 5. Sensori mõõtmistulemused peale esialgset testimist. ....	34
Tabel 6. Kaitseklaasilt tagasi peegeldunud osakeste arvu sõltuvus kaitseklaasist. ....	35
Tabel 7. Sensori mõõtetulemused pärast optimeerimist. Sulgudes on võrdlus esimese kalibreerimisega.....	38
Tabel 8. Põhjakõrgussensori nõuetele vastavus .....	40

## Sissejuhatus

Bakalaureusetöö eesmärk on arendada tudengivormelile FEST23 põhjakõrgussensor. Sensorit peab saama kinnitada igale poole vormeli põhja alla või aerodünaamika elementidele, võimaldades mõõta eri kohtades vormeli põhjakõrgust ning selle muutu sõidu ajal. Sensor vajab toimimiseks ainult toite ja CAN-võrgu ühendust vormeliga. Põhjakõrgusel on suur mõju vormeli dünaamikale, mistõttu sensorilt saadud andmed aitavad kaasa vormeli dünaamika arendusele ja simulatsioonide valideerimisele

Töö kirjeldab kogu sensori arendusprotsessi, kalibreerimist ja testimist staatilises olukorras. Töö kirjutamise ajaks vormeli mitte valmimise tõttu ei ole sensorit testitud dünaamilises olukorras. Töö on jaotatud viieks osaks. Esimeses osas on ülevaade tudengivormeli, põhjakõrguse teadmise vajaduse ja sensori teoreetilisest taustast. Samuti on defineeritud põhjakõrgussensori nõuded. Järgnevates osades on käsitletud sensori trükkplaadi, korpuse ja tarkvara arendust. Iga osa juures on täpsemalt kirjeldatud protsessi, teoreetilisi aluseid, kasutatud tööriistasid ning kindlate disainiotsuste põhjuseid. Viimane osa käsitleb sensori testimist, mis koosneb sensori kalibreerimisest, staatilist testimisest ning mõõtetulemuste analüüsist.

# 1 Teoreetilised alused

Vormeli põhjakõrguse teadmine on oluline vormeli dünaamika arenduseks ja simulatsioonide valideerimiseks. Aerodünaamika elementidele mõjuv survejõud mõjutab vormeli põhjakõrgust. Vormeli esi- ja tagaosade põhjakõrgust võrreldes saab valideerida aerodünaamika balanssi ehk esi- ja tagaosade mõjuva survejõu suhet. Samuti on võimalik mõõta esitiiva või difuusori põhjakõrgust eri asukohtades ning läbi selle leida vastava aerodünaamika elemendi läbipaine. Reaalse paindumise järgi saab valideerida elementide tugevusanalüüsi ja tootmiskvaliteeti.

Põhjakõrgussensori andmeid on võimalik kombineerida ka teiste sensoritega. Vedrustuse küljes on lineaarpotentsiomeetrid, mis mõõdavad vedrustuse liikumist. Võrreldes põhjakõrgussensori mõõtetulemusi ja vedrustuse liikumist, on võimalik leida rehvide läbipaine. Läbipainde järgi saab leida rehvidele eri suundades mõjuvad jõud, mida saab kasutada simulatsioonides.

## 1.1 Tudengivormel

Tudengivormeli võistlussari on rahvusvaheline disainivõistlus, millest võtavad osa tudengite meeskonnad eri ülikoolidest üle maailma. Võistlussarja eesmärk on disainida ja ehitada vormel-stiilis ühekohaline võidusõiduauto, millega võisteldakse suvel toimuvatel võistlustel ning läbi selle suurendada tudengite praktilisi oskusi ja teadmisi. Võistlustel on nii dünaamilised kui ka staatilised alad. Dünaamilisteks aladeks on erinevad raja peal sõidetavad alad, kus on oluline vormeli kiirus ja kurvisuutlikkus. Staatilisteks aladeks on disainikaitsmine, kuluaruanne ning äriplaan, kus tudengid peavad näitama oma teadmisi ja põhjendama tehtud disainiotsuseid [1].

Tudengivormeli meeskond *Formula Student Team Tallinn* [2] loodi aastal 2006 ning koosneb Tallinna Tehnikaülikooli ja Tallinna Tehnikakõrgkooli tudengitest. 2008 valmis esimene sisepõlemismootoriga tudengivormel FEST08 ning alates 2013. aastast on ehitatud elektrivormeleid. 2023. aastal valmib meeskonna 11. elektrivormel FEST23.

Valdav enamus vormeli elektroonika süstemist on isearendatud: trükkplaadid, juhtmestus ja tarkvara. Läbi aastate on arendatud ka erinevaid sensoreid.

## **1.2 Alternatiivsed lahendused**

Tudengivormeli FEST23 küljes on kasutusel 2 sensorit, mille abil on võimalik otseselt või kaudselt mõõta vormeli põhjakõrgust. Mõlemal on aga puudused, mistõttu on vajadus spetsiaalse põhjakõrgussensori järele. Vedrustuse küljes on lineaar potentsiomeetrid, millega saab mõõta vormeli igas nurgas vedrustuse liikumist, mille põhjal on võimalik leida põhjakõrgust ja selle muut. Rehvide läbipaine tekitab aga sellises mõõtmises palju ebatäpsusi.

Vormelil on isearendatud maakiirussensor [3], mis mõõdab kahes sihis vormeli kiirust maapinna suhtes. Kiiruse mõõtmiseks on sensoril ka integreeritud kõrgussensor, kuna täpsete mõõtetulemuste saamiseks on vajalik teada põhjakõrgust. Sensor kasutab põhjakõrguse mõõtmiseks väikese nurga all olevaid lasereid ja kaamerat. Maapinnast tehtud kaamerapildil oleva laseri asukoha järgi saab leida põhjakõrguse. Staatilises olukorras on kõrgussensori täpsus 0,2 mm. Sensor on aga kinnitatud vormeli esitelje keskkohta, seega saab põhjakõrgust mõõta ainult ühest kohast.

Lisaks vormeli küljes olevatele lahendusele on turul olemas mitmeid põhjakõrgussensoreid, mis on spetsiaalselt mõeldud võidusõiduautodele dünaamika arenduseks ja valideerimiseks. Näiteks KA Sensors RHL4 põhjakõrgussensor [4]. Sensoril on täpsus 0,02 mm, linearsus 0,1% ja sagedus kuni 4 kHz, mis tagab väga täpse põhjakõrguse mõõtmise. Samas on minimaalne mõõtevahemik 60 mm, mis tähendab, et sensorit ei saa kinnitada otse vormeli põhja alla. Sensori hind on samuti >1000 € ning täpse põhjakõrguse saamiseks, kogu vormeli põhja ulatuses, on vaja mitut sensorit. Seetõttu ei ole ostutoote kasutamine mõistlik.

## **1.3 Nõuded põhjakõrgussensorile**

Põhjakõrgussensori arendusel on mitmeid piiranguid ja nõudeid, millega peab arvestama (Tabel 1). Vormeli madalpingesüsteemis on kasutusel 3 toitepinget, mida saab sensori jaoks kasutada: 24 V, 12 V ja 5 V. Vormel kasutab CAN-võrku komponentide vaheliseks suhtluseks, mistõttu on vajalik CAN liidese olemasolu.

Sensorit peab saama kinnitada igale poole vormeli põhja alla kui ka aerodünaamika elementide külge. Vastavalt võistlussarja reeglitele on vormeli minimaalne põhjakõrgus 35 mm [1] ning tudengivormeli FEST23 maksimaalne põhjakõrgus kõige kõrgemas kohas on 125 mm. Sõidu ajal aga põhjakõrgus muutub, mistõttu on vajalik suurem mõõtevahemik ning samuti on oluline sensori madal profiil, et vältida sensori kokkupuudet maaga. Tulenevalt sensori asukohast, on vajalik veekindlus. IP-koodi [5] järgi on piisav veekindluse tase IPx5.

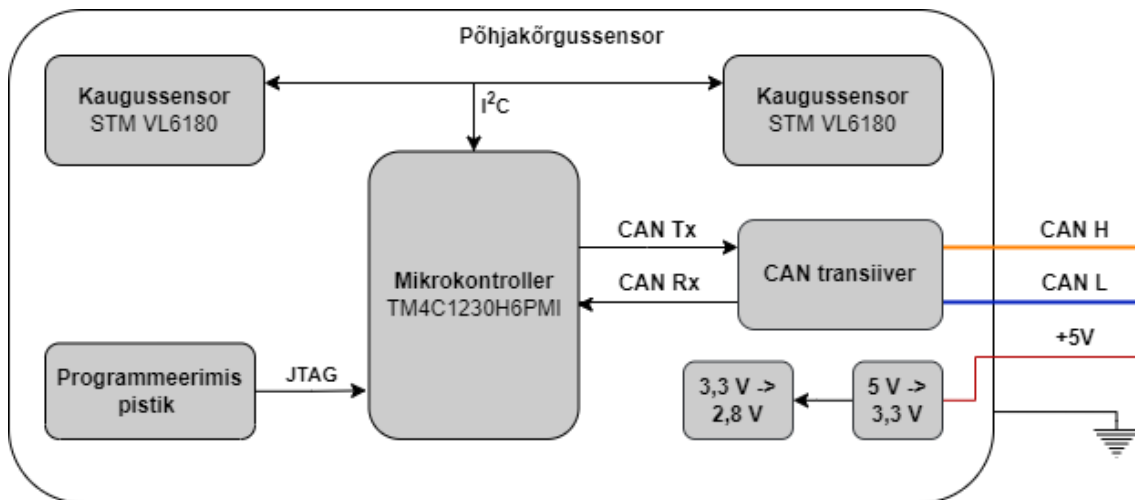
Mõõtetulemuste nõuete juures on arvestatud dünaamika alammeeskonna nõudmistega ja võimalike sensorite võimekusega. Kokku on vaja nelja sensorit, kuna teades vormeli põhjakõrgust igas nurgas on võimalik leida põhjakõrgus igas vormeli punktis. Sensorite arvu tõttu on oluline lihtne ja kiire kalibreerimis- ning seadistamisprotsess.

Tabel 1. Põhjakõrgussensori nõuded

Nõue		Väärtus
Ühilduvus	Toitepinge	24 V / 12 V / 5 V
	Liidesed	CAN-võrk
Füüsilised nõuded	Korpuse kõrgus	< 10 mm
	Veekindlus	IPx5
	Asukoht	Igale poole vormeli põhja alla
Nõuded mõõtetulemustele	Mõõtevahemik	25 mm – 135 mm
	Mõõtetäpsus	2 mm
	Lineaarsus	2%
	Mõõtesagedus	> 50 Hz
	Standard hälve	< 1,5 mm
Mitte-funktsionaalsed nõuded	Sensorite arv	4
	Kalibreeritavus	Sensorid on lihtsasti ja kiiresti kalibreeritavad

## 2 Riistvara arendus

Sensori trükkplaat on arendatud kasutades Altium Designer tarkvara. Sensori trükkplaadi plokk skeem on toodud Joonisel 1. Elektriskeem on Lisas 2. Sensor vajab toimimiseks vormelilt toitepinget ja ühendust CAN võrguga. Trükkplaadil on 2 kaugussensorit ja neid juhtiv mikrokontroller. Trükkplaat on nelja kihiline, et lihtsustada trükkplaadi disaini ning tagada ühtlased toite ja maa vasekihid. Trükkplaadi kihid on toodud Lisas 3 ja trükkplaadi 3D vaated Lisas 4. Järgnevates peatükkides on põhjendatud erinevate komponentide valik ja arhitektuur.



Joonis 1. Põhjakõrgussensori trükkplaadi plokk skeem.

### 2.1 Kaugussensor

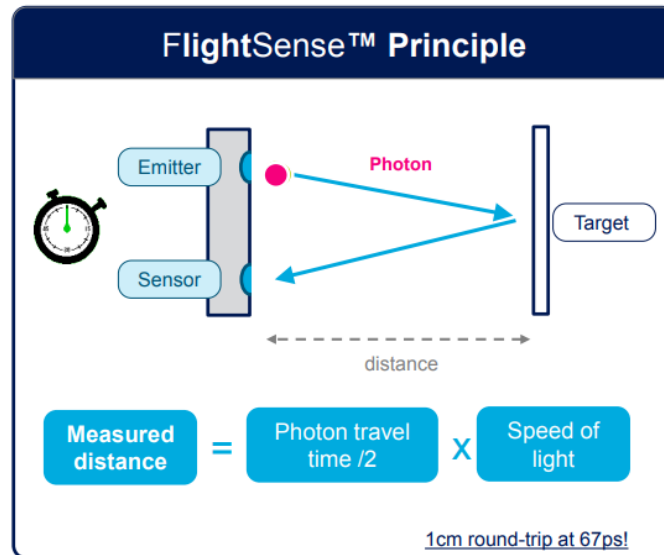
Kauguse mõõtmiseks on mitmeid eri sensoreid ja tehnoloogiaid. Sensori valikul on tähtsaimad parameetrid kompaktsus, mõõtetäpsus, mõõtesagedus ja madal minimaalne mõõtekaugus. Tabelis 2 on toodud kolme erineva sensori võrdlus, mis kasutavad mõõtmiseks eri tehnoloogiaid.

Tabel 2. Kolme eritehnoloogiat kasutava kaugussensori võrdlus.

Tehnoloogia	Ultraheli sensor	Optiline lennuaja sensor	Infrapuna
Sensor	TDK CH101 [6]	STM VL6180 [7]	Sharp GP2Y0A51SK0F [8]
Liides	I <sup>2</sup> C	I <sup>2</sup> C	Analoog väljund
Toitepinge	1,8 V	2,8 V	5 V
Mõõtevahemik	40 – 1200 mm	0 – 620 mm	20 – 150 mm
Sensori kõrgus	1,26 mm	1 mm	12 mm
Mõõtesagedus	100 Hz	-	60 Hz
Täpsus	1 mm @ 30cm	2mm @ 5cm	-

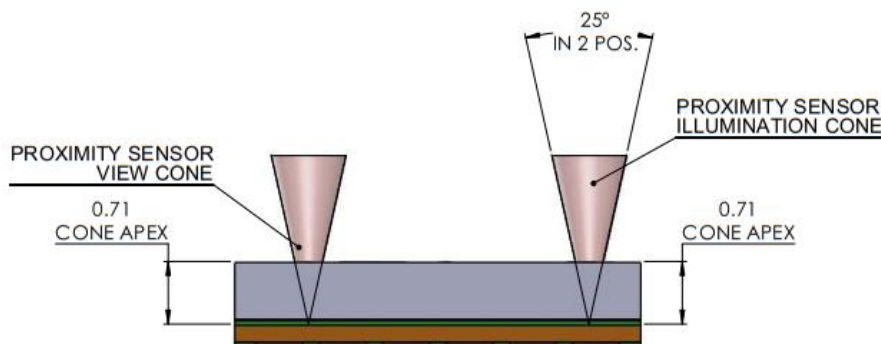
TDK CH101 ultrahelisensoril on väike korpus, kõrge mõõtesagedus ja täpsus, aga minimaalne mõõdetav vahemaa on 40 mm. VL6180 sensoril on madalam täpsus ja pole täpsustatud mõõtesagedust, aga võimaldab teha mõõtmisi väiksema distantsi pealt. Infrapuna sensoril on analoog väljund, mis tähendab et mikrokontrolleril olev ADC täpsus mõjutab mõõtetulemust. Sensori väljund ei ole ka lineaarselt sõltuv kaugusest ning kuna andmelehes ei ole antud sensori mõõtetäpsust, siis on raske ennustada sensori reaalselt täpsust. Samuti on sensor teistest suurem.

Trükkplaadi peal on kasutuses STMicrocontroller'i VL6180 kaugussensor. Kiibi eelis on väiksem miinimum mõõtekaugus. Samuti on sensoril olemas API ja palju dokumentatsiooni. Sensor toimib *time-of-flight* ehk lennuaja mõõtmise tehnoloogial. Sensoril on saatja ja vastuvõtja. Saatja ehk *emitter* saadab välja footonid, mis sihtmärgilt tagasi peegelduvad ja jõuavad vastuvõtjani. Footonite tagasijõudmiseks kulunud aja põhjal saab arvutada vahemaa (Joonis 2).



Joonis 2. Lennuaja sensori tööpõhimõte [9].

Trükkplaadil on kaks VL6180 sensorit, mis tagab parema töökindluse kui üks sensor peaks toimimise lõpetama. Samuti võimaldab see kahe sensori tulemust keskmestada. Kahte sensorit kasutades peab aga arvestama nende omavahelise kaugusega, et sensorid ei mõjutaks üksteise mõõtetulemusi. Joonisel 3 on toodud sensori saatja ja vastuvõtja valguskoonus. Sensori kiipide vahemaa peab olema piisav, et ühe kiibi saatja koonus ei kattuks teise kiibi vastuvõtja koonusega.



Joonis 3. VL6180 kaugussensori saatja ja vastuvõtja valguskoonus [7].

Arvestades maksimaalseks mõõdetavaks kauguseks  $h$  135 mm Valem (1) abil on võimalik leida minimaalne sensori kiipide vahemaa  $l$ , kus  $\alpha$  on koonuse tipunurk. 135 mm kauguse mõõtmiseks on piisav kiipide vaheline kaugus 60 mm.

$$l = 2 \cdot h \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$



## 2.2 Mikrokontroller

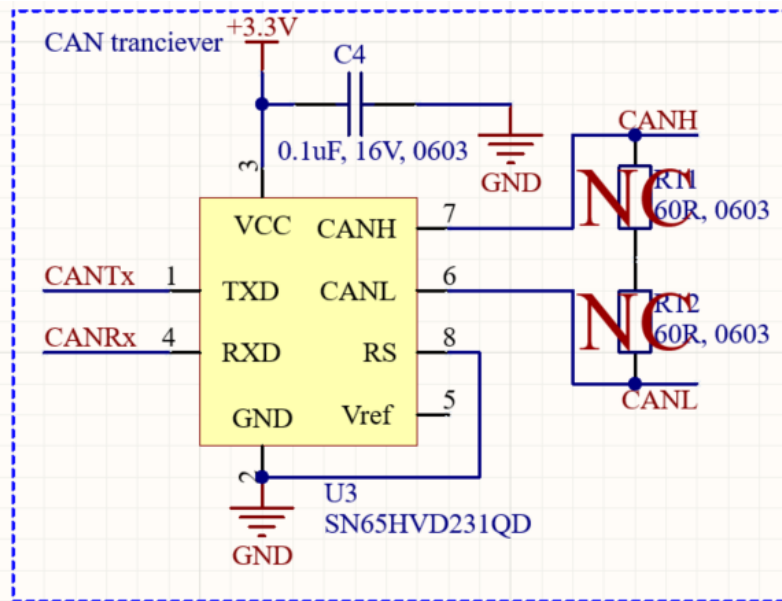
Mikrokontrolleri valiku peamised kriteeriumid on vajalike liideste olemasolu, füüsilised parameetrid, tarkvara arenduseks vajalikud tööriistad ning kiibikriisi tõttu saadavus. Tudengivormelis on laialdaselt kasutusel STMicroelectronics'i poolt pakutavad STM32 F-seeria mikrokontrollerid ning kogu nendega kaasnev ökosüsteem: integreeritud programmeerimiskeskond, programmaator ja teegid. VL6180 sensori jaoks pakutav API [10] on samuti disainitud STM32 mikrokontrolleritele. Samuti on STM32 seerias palju mikrokontrollereid, mis on sobivate parameetritega. Kiibikriisi tõttu ei olnud aga ühtegi sobivat STM32 seeria mikrokontrollerit saadaval

Trükkplaadil on Texas Instruments'i Tiva C seeria mikrokontroller TM4C1230HPM [11]. Mikrokontroller on 64 väljaviiguga LQFP korpuses ning millel on 256 kB välmälu, 32 kB muutmälu ja 2 kB EEPROM ehk elektriliselt programmeeritavat püsimälu. VL6180 sensoriga suhtluseks on mikrokontrolleril I<sup>2</sup>C liides ja CAN liides vormeli CAN-võrguga suhtluseks. Mikrokontrolleri programmeerimine toimub üle JTAG liidese.

## 2.3 CAN-transiiver

Vormelis kasutatakse CAN-võrku elektroonika komponentide vaheliseks suhtluseks. CAN-võrk on autotööstuses laialdaselt kasutusel oma mürakindluse tõttu. CAN võrk kasutab andmete edastamiseks diferentsiaalsignaali, mis vajab ainult kahte juhet: CANH ja CANL. Trükkplaadil on kõikide signaalide pingeniivod ühise maa suhtes. CAN-transiiverit on vaja, et mikrokontrolleri poolt välja saadetud andmed teisendada diferentsiaalsignaali ja andmete vastu võtmisel vastupidi.

Trükkplaadile on samuti lisatud kohad kahe 60 oomise takisti jootmiseks CANH ja CANL liinide vahele, mida saab vajadusele plaadile joota. CAN-siini mõlemas otsas peab olema 120 oomine takistus, ehk liini kogutakistus peab olema 60 oomi (Joonis 4).



Joonis 4. CAN-transiiveri skeem koos terminatsiooni takistitega.

## 2.4 Toitesüsteem

Trükkplaadil on vaja kahte erinevat toitepinget: 2,8 V ja 3,3 V. Esimest sensori kiipide jaoks ning teist mikrokontrolleri ja CAN-transiiveri jaoks. Vormeli madalpingesüsteemis on kasutusel 3 pingetaset: 24 V, 12 V ja 5 V. Seetõttu tuleb sobivad pinged trükkplaadi peal muundada. Toitepinge muundamiseks saab kasutada madaldavat pingemuundurit (*buck converter*) või lineaarregulaatorit. Muundur on efektiivsem, aga koosneb rohkematest komponentidest ehk vajab suuremat pindala. Lineaarregulaator on kompaktsem, aga ebaefektiivsem. Sensori puhul on oluline eelkõige kompaktsus. Samuti on tarbitav vool madal (Tabel 3). Seetõttu on kasutatud kahte lineaarregulaatorit. Valemi (2) abil on leitud lineaarregulaatorite võimsuskadu, mis on toodud Tabelis 4. Valemist (2) on näha, et sisendpinge on võrdeline regulaatori võimsuskadudega. Seetõttu on sisendpingeks valitud kõige madalam pingeline ehk 5 V.

Tabel 3. Trükkplaadil olevate komponentide tarbimine.

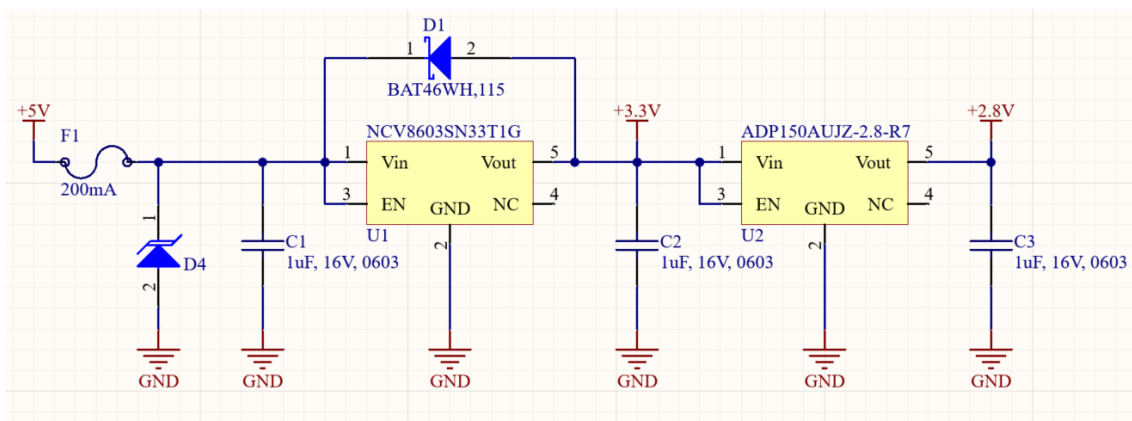
Tarbija	Pinge $U$	Vool $I$	Tarbitav võimsus $P$
Mikrokontroller	3,3 V	0,055 A	0,182 W
2x Sensorit	2,8 V	0,007 A	0,020 W
CAN transiiver	3,3 V	0,010 A	0,033 W

$$P_{\text{eralduv}} = (U_{\text{sis}} - U_{\text{välj}}) \cdot I_{\text{välj}} = P_{\text{välj}} \left( \frac{U_{\text{sis}}}{U_{\text{välj}}} - 1 \right) \quad (2)$$

Tabel 4. Lineaarregulaatorite võimsuskadu ja efektiivsus.

Lineaar regulaator	Sisend pinge	Väljundpinge	Tarbitav võimsus	Eralduv võimsus	Kogu võimsus
ADP150AUJZ-2.8-R7	3,3 V	2,8 V	0,020 W	0,004 W	0,024 W
NCV8603SN33T1G	5 V	3,3 V	0,239 W	0,123 W	0,362 W

Regulaatoreid on võimalik asetada paralleelselt või jadamisi. Jadamisi ühendades on esimese regulaatori kaod suuremad kui teisel. Paralleelselt ühendades on kaod regulaatorite vahel võrdsemalt jagatud. Jadamisi ühendusel on aga suur eelis, et sensorit saab kasutada mikrokontrolleri programmeerimise ajal välise toite puudumisel. Mikrokontrolleri programmeerimiseks on vaja 3,3 V toidet, mille saab programmaatorilt. Sellisel juhul on sensori kiipide jaoks olemas ka 2,8 V toide (Joonis 5).

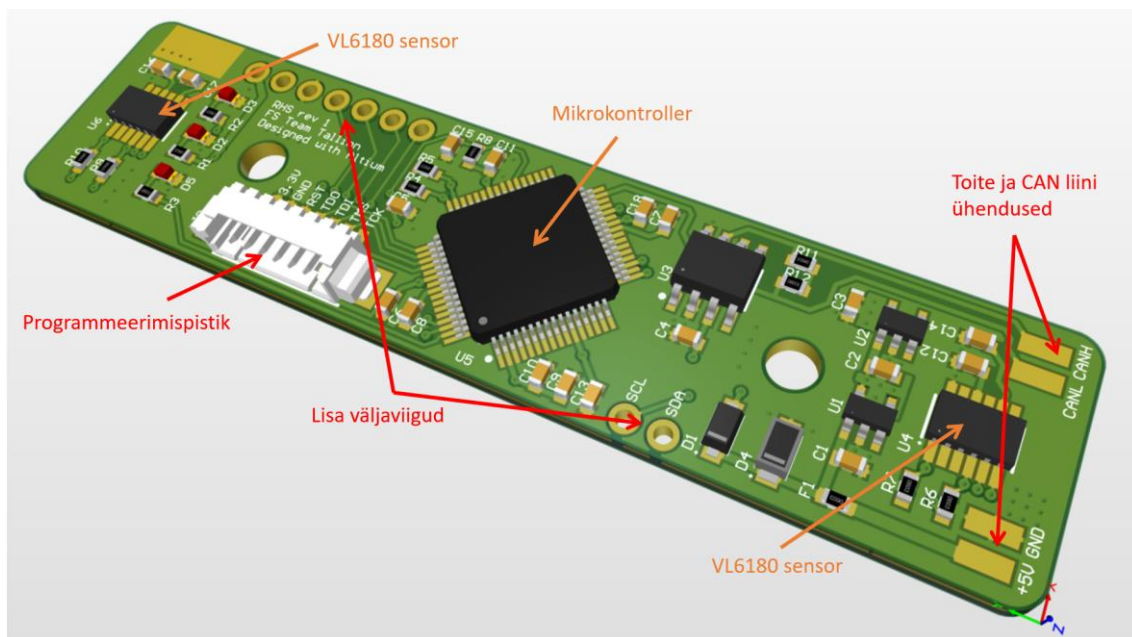


Joonis 5. Põhjakõrgussensori toiteskeem.

Regulaatoriga U1 on paralleelselt paigutatud diod D1. Mikrokontrolleri programmeerimisel ja välise 5V toitepinge puudumisel on regulaatori väljundis kõrgem pinge kui sisendis. U1 maksimaalne väljundpinge on  $U_{\text{välj}} = U_{\text{sis}} + 0,3 \text{ V}$  [12], mis tähendab, et sellises olukorras oleks väljundpinge väljaspool lubatud piire. Diod D1 abil erineb sisend ja väljundpinge ainult diodi päripingelangu võrra, mis on 175 mV [13]. Tänu diodile ei kahjusta sisendpinge puudumine regulaatorit U1.

## 2.5 Ühendused

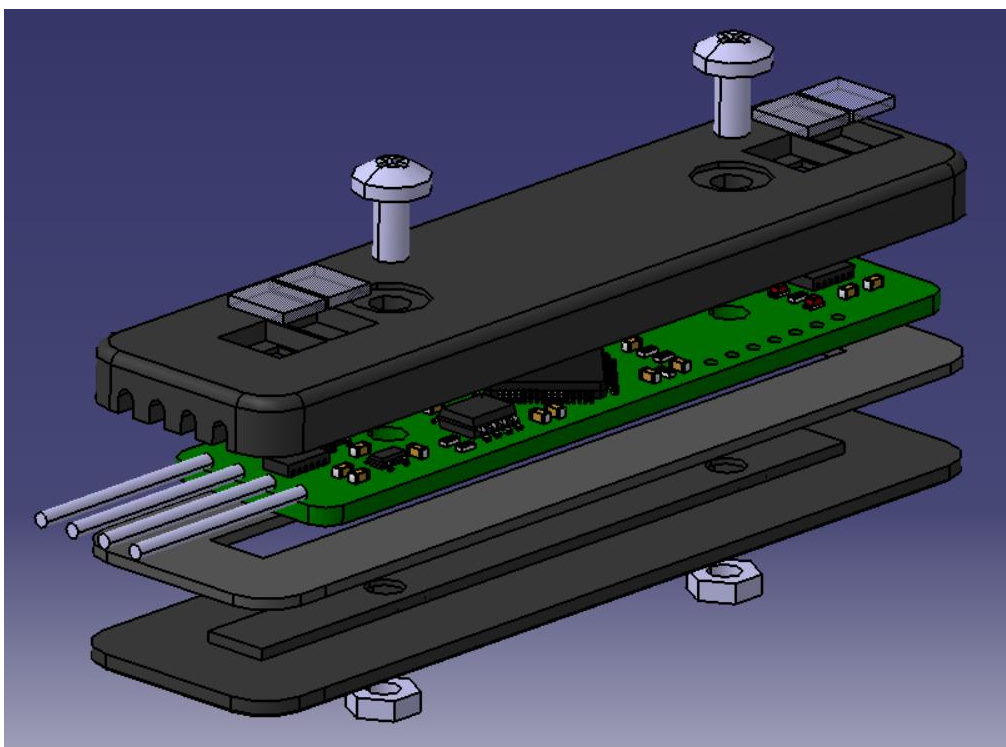
Sensor on vormeli elektrisüsteemi ühendatud 4 juhtmega: 5 V, Maa, CANH ja CANL. Juhtmed on otse trükkplaadi külge joodetud. Sensori kompaktsuse ja veekindluse nõue ei võimalda lisada plaadile pistikut, mis mõlemad tingimused täidaks. Mikrokontrolleri programmeerimiseks on trükkplaadil pistik. Pistikut ei pea saama kasutada, kui sensor on korpuses, seega ei pea olema tagatud veekindlus. Pistikus on kõik signaalid JTAG liidese toimimiseks. Lisaks nõutud ühendustele on trükkplaadil veel mitmeid mikrokontrolleriga ühendatud väljaviike testimiseks (Joonis 6).



Joonis 6. Põhjakõrgussensori trükkplaadil olevad komponendid ja ühendused.

### 3 Korpuse disain

Sensori korpus on disainitud kasutades CATIA V5 CAD tarkvara ning prinditud SLA 3D printeriga. Sensori trükkplaat koos korpusega on näha Joonisel 7. Sensori korpuse disaini peamised kriteeriumid on veekindlus, madal profiil ning minimaalne sensori mõõtmise optiline mõjutus. Korpus koosneb kahest osast. Alumise poole peal asub trükkplaat. Pealmises pooles on avad sensorite jaoks ning juhtmete läbiviigud. Sensori avades on kaitseklaasid, mis kaitsevad kaugussensori kiipe ja tagavad veekindluse. Korpuse pooled on ühendatud kahe poldiga. Korpuse joonised on Lisas 5.

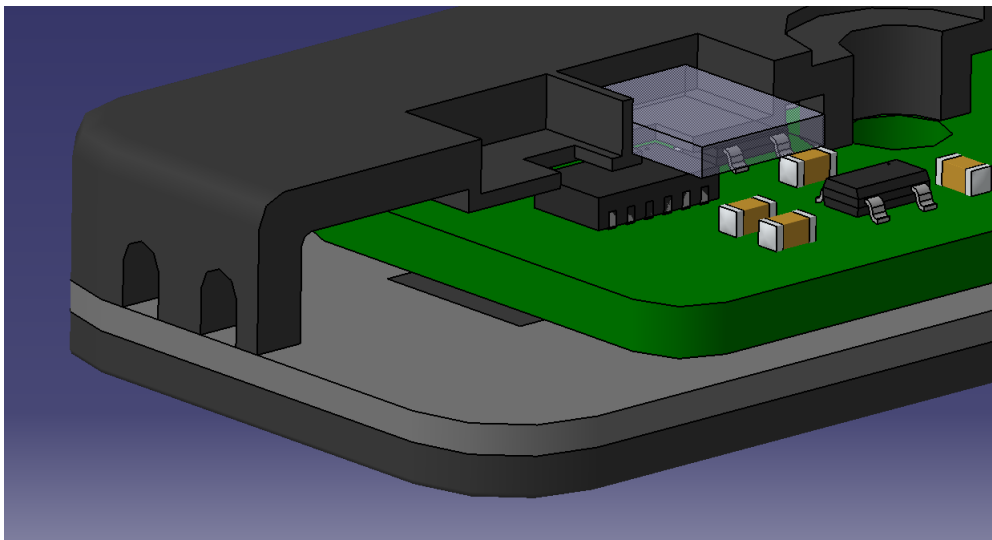


Joonis 7. Põhjakoõrgussensori trükkplaat koos korpusega.

#### 3.1 Veekindlus

Sensor kinnitub vormeli põhja alla, mistõttu on oluline, et see oleks ilmastikukindel. Tulenevalt sensori asukohast on vähetõenäoline seisva vee tekkimine korpusele, tõenäolised on aga maapinnalt tulevad pritsmed. IP-koodi [5] järgi on sobilik IPx5 taseme veekindlus, mis tähendab kaitset igast suunast veejugade eest.

Korpuse poolte ühenduskoha veekindluse tagamiseks on alumise poole peal tihend, mis on Joonisel 8 näha hallina. Sensorite jaoks tehtud avades olevad klaasid on liimitud korpuse külge. Liimimise jaoks on igasse külge jäetud klaasi alla serv, et liimpinda suurendada ja protsessi lihtsustada. Juhtmete läbiviigud on veekindlaks tehtud silikooniga.



Joonis 8. Põhjakõrgussensori lähivaade. Korpuse ülemine pool on pooleks lõigatud.

Mutrid on liimitud korpuse alumisel poolel olevatesse pesadesse (Joonis 9). Kasutatud poltidel on pea all o-rõngas, mis tagab veekindluse poldi pea ja korpuse ühenduskohast.

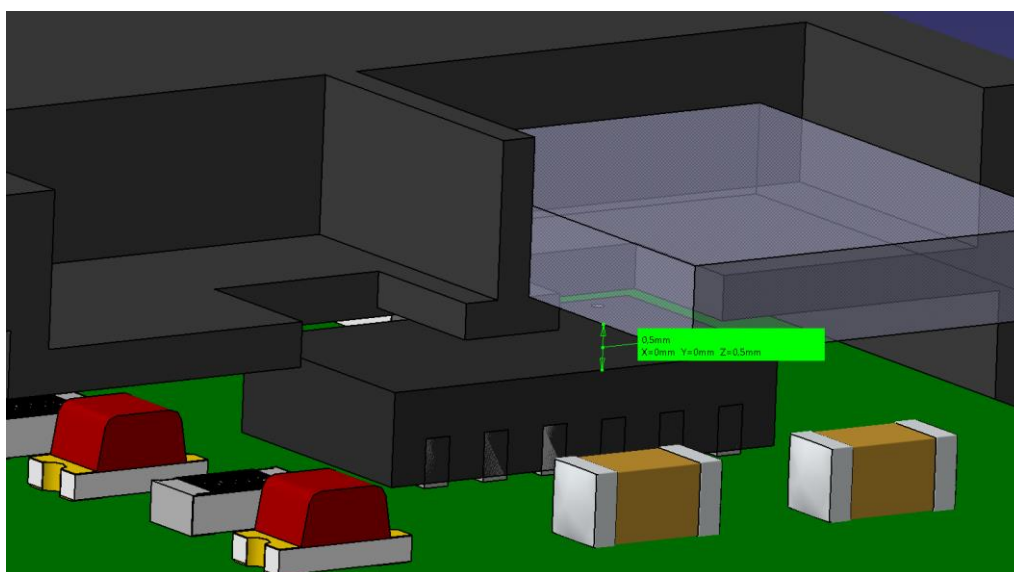


Joonis 9. Põhjakõrgussensori alt vaade.

IP-koodi defineerivas standardis [5] on väga täpselt defineeritud veekindluse testi läbi viimine: veejugade suund, ajaline kestus ja vee kogus. Standardile vastava testi läbi viimiseks puudub aga võimekus ja ka otsene vajadus. Veekindlust testiti sensorit jooksva vee all hoides ja samal ajal sensorit pöörates, et tagada veekindlus igast suunast. Testi ajal ja peale testi jäi sensori sisemus kuivaks.

### 3.2 Optiline mõjutus

Korpuses olev sensorite kaitseklaas mängib suurt rolli sensori töökindluses ja mõõtetulemuste täpsuses. Sensori kiibi ühes otsas on saatja, mis kiirgab valgust ning kiibi teises otsas on vastuvõtja, mis tuvastab objektilt tagasipeegeldunud valgust. Olenevalt kaitseklaasi peegeldustegurist peegeldub osa valgusest klaasilt tagasi, mis tekitab mõõtmises ebatäpsusi (vt 5.1.2). Korpusel on sensorite keskossa lisatud vahesein, mis takistab klaasilt tagasipeegeldunud valguse jõudmist vastuvõtjani (Joonis 10).



Joonis 10. Lähivaade sensori kiibist ja kaitseklaasidest.

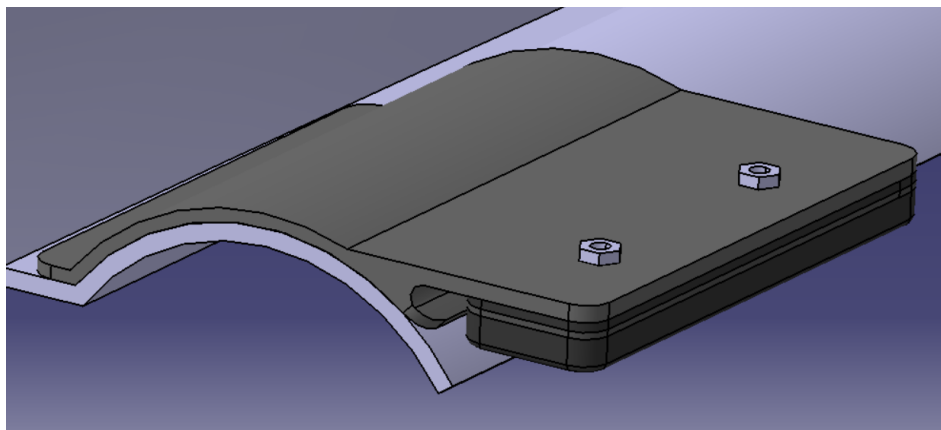
Sensori tööd mõjutab ka väline valgus, milleks on üldjuhul päikesevalgus. Ereda päikesevalguse käes ei suuda sensor korrektset mõõtetulemust saavutada, kuna vastuvõtja ei suuda teha vahet sensorilt tulnud ja välise valguse vahel. Sensor suudab mõõtmistulemuse väljastada piisava signaali müra suhte korral, mida saab tarkvaraliselt muuta (Vt 4.1.2). Sensori andmelehes [7] on suure välise valguse olemasolul ja suuremate kui 100 mm distantside puhul nõutud infrapunafiltri kasutust. Filter vähendab välise valguse mõju mõõtetulemustel. Kasutatud infrapunafilter [14] ei lase läbi nähtavat valgust, ehk valgust, mille lainepikkus jääb alla 750 nm. Sensor kasutab mõõtmiste tegemiseks valgust lainepikkusega 850 nm, mille juures laseb filter läbi ~90% valgusest.

### 3.3 Põhjakõrgussensori kinnitamine

Vormeli põhja alla ei ole võimalik sensorit mehaaniliselt kinnitada, ilma monokoki pinda kahjustamata. Monokoki põhi on valdavas enamuses sile, maapinnaga horisontaalne,

süsinikkiust pind. Põhjas on mõned avad erinevate komponentide kinnitamiseks, aga eri põhjustel ei ole võimalik sensorit nende külge kinnitada. Samuti on sensoreid vaja kasutada mitme eri koha peal, mis tõttu ei ole otstarbekas kasutada püsivaid kinnitusi, vaid ajutist kinnituslahendust vastavalt vajadusele. Lihtsaim lahendus on kasutada kahepoolset teipi. Teibi puhul peab kindel olema selle tugevuses, et see hoiaks sensorit monokoki küljes kinni. Sensor kaalub kõigest 17g, mistõttu sensorile ja teibile mõjuvad jõud on väikesed. Kasutatud kahepoolse teibi testimiseks kinnitati sensor 24 tunniks tagurpidi süsinikkiust plaadi külge. Testi käigus liigutati ka plaati, et simuleerida vormeli vibratsiooni. Sensor püsis testi lõpuni süsinikkiust plaadi küljes.

Sensori aerodünaamika elementide külge kinnitamiseks on vaja disainida kinnitused. Elemendid on keerulise geomeetriaga, mis tõttu puudub piisav horisontaalne pind sensori kinnitamiseks. Samuti on välja ulatuvates aerodünaamika elementides läbipaine suurem, mis tähendab, et teatud olukordades võib tekkida kontakt maapinnaga. Seetõttu on vaja sensor kõrgemale kinnitada. Joonisel 11 on näha kinnitus, millega saab kinnitada sensori vormeli esitiiva välisserva külge. Sensor on poltliidesega kinnituse küljes, mis omakorda on kahepoolse teibiga kinnitatud esitiiva külge.

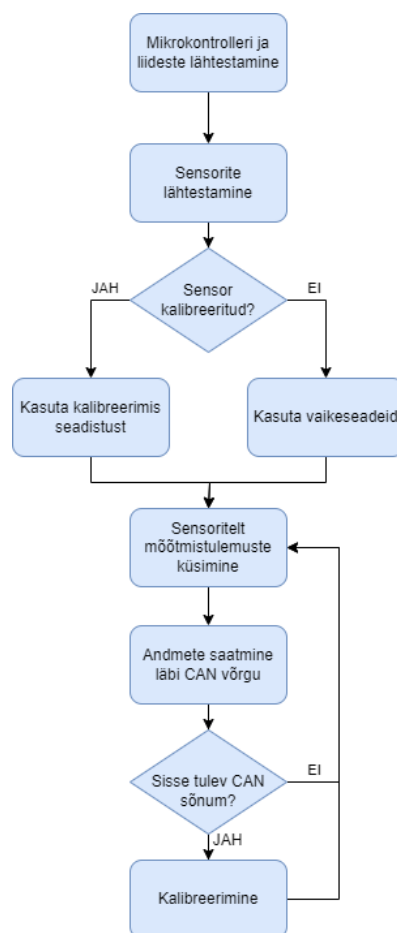


Joonis 11. Põhjakõrgussensor koos kinnitusega esitiiva otsaplaadi küljes.  
Must – sensor, tume hall – kinnitus, hele hall – esitiib.



## 4 Tarkvara arendus

Sensori tarkvara on kirjutatud C programmeerimiskeeles kasutades Keil Uvision 5 programmeerimiskeskonda. VL6180 kaugussensoriga suhtluseks on kasutatud STM'i poolt pakutavat API't [10], kus on kõik vajalikud funktsioonid sensoriga suhtluseks ja mõõtmiste tegemiseks. Mikrokontrolleri liideste seadistamise lihtsustamiseks on kasutusel Texas Instruments'i teek Tivaware [15]. Joonisel 12 on näha tarkvara üldstruktuur.



Joonis 12. Põhjakõrgussensori tarkvara struktuur.

## 4.1 Sensoriga suhtlus

VL6180 API's on kõik vajalikud kõrgema taseme funktsioonid sensoriga suhtlemiseks. API toimimiseks tuleb ise kirjutada madalama taseme I<sup>2</sup>C draiver, mis sõltub kasutatavast mikrokontrollerist. I<sup>2</sup>C liides on pool-dupleks jadasiin, mis koosneb ülemast, milleks on mikrokontroller, ja alamatest, milleks on sensorid. Igal alamal on 7-bitine aadress, mille abil alustatakse suhtlust ülema ja vastava alama vahel. Enne sensorite kasutamist tuleb sensorid lähtestada. Vaikimisi on kõikidel VL6180 sensoritel sama aadress, mistõttu tuleb sensorid eraldi sisse lülitada ja muuta I<sup>2</sup>C aadress erinevaks. Sensorite sisse lülitamiseks on sensoritel väljaviik, mis on ühendatud mikrokontrolleriga. Peale sensori sisse lülitamist ja lähtestamist tuleb sensor seadistada kas vaikeseadetega või EEPROM'i salvestatud väärtustega, kui sensor on kalibreeritud. Seejärel saab teostada mõõtmisi.

### 4.1.1 Mõõtmismeetodid

VL6180 sensoril on kolm moodust mõõtmiste tegemiseks: pollimine, katkestus ja ühekordne mõõtmine. Pollimise puhul küsib mikrokontroller sensorilt mõõtetulemust ja ootab kuni see on valmis. Katkestuse režiimis teeb sensor koguaeg mõõtmisi ja teeb katkestuse mikrokontrolleri töös korrekse mõõtmistulemuse olemasolul. Ühekordse mõõtmise režiimis küsib mikrokontroller sarnaselt pollimisega sensorilt mõõtetulemust, aga peab eraldi küsima, kas mõõtetulemus on valmis.

Režiim mõjutab eelkõige mõõtmisagedust. Teoreetiliselt on kõige kõrgema mõõtesagedusega katkestuse režiim. Sensor teeb pidevalt mõõtmisi ja edastab korrekse mõõtmise koheselt mikrokontrollerile. Sensoril on võimalik seadistada katkestus režiimis mõõtmiste vahelist aega. Minimaalne aeg on 0 ms, mis juhul tehakse mõõtmisi pidevalt. Täpsete mõõtmiste saavutamiseks on aga kehtestatud valemis (3) toodud piirang. Mõõte-aeg on muutuv, mis sõltub kaugusest ja sihtmärgi peegelduvusest. Madala peegeldusega pinnast kaugusel 100 mm on standardne mõõte-aeg ~10 ms [7]. Sellele lisandub veel keskmestamise aeg. Keskmestamise vaikeseadet kasutades, milleks on 4,3 ms, peab mõõtmiste vaheline aeg olema 21 ms.

$$\text{Maksimaalne mõõtmiste aeg} + 5 \leq \text{mõõtmiste vaheline aeg} \cdot 0,9 \quad (3)$$

Kuna trükkplaadil on 2 kaugussensorit, siis on katkestuse režiimis keeruline ka mõõtmisi sünkroniseerida, ilma et mõõtesagedus väheneks. Mõõtmiste sünkroniseerimine

võimaldab saata mõlema sensori mõõtetulemused ühe CAN'i sõnumiga, mis lihtsustab andmete salvestamist ja vähendab liini koormust.

Pollimise režiimis on mikrokontroller mõõtmise küsimise hetkest korrektse mõõtetulemuse saamiseni hõivatud. Trükkplaadil on 2 sensorit, mis tähendab, et sensorite pollimine toimub vaheldumisi ning igal ajahetkel teeb mõõtmisi ainult 1 sensor. Ühekordse mõõtmise režiimis küsib mikrokontroller mõlemalt sensorilt korraga mõõtmist ehk mõlema sensori mõõtmiste tegemine toimub samaaegselt. Mikrokontroller kontrollib seejärel vaheldumisi korrektse mõõtetulemuse olemasolu ja edastab tulemused läbi CAN-võrgu, kui mõlemad sensorid on mõõtmise lõpetanud (Joonis 13). See võimaldab kõrgemat mõõtesagedust. Tarkvaras on võimalik kõiki režiime kasutada. Kasutatav režiim sõltub EEPROMi salvestatud seade väärtusest. Režiimi saab muuta läbi CAN-võrgu saadetud sõnumiga, mis lihtsustab testimist.

```

while(1){
    distance[0] = 0;
    distance[1] = 0;
    VL6180_RangeStartSingleShot(&Sensors[0]);
    VL6180_RangeStartSingleShot(&Sensors[1]);
    while(!distance[0] || !distance[1]){
        if(!distance[0]){
            distance[0] = getDistance(&Sensors[0], &Range[0]);
        }
        if(!distance[1]){
            distance[1] = getDistance(&Sensors[1], &Range[1]);
        }
    }
    CANTx(distance, 2);
    if(can_rx_flag){
        sensorCalibration(&Sensors[0], &Sensors[1]);
    }
}

// Sensorilt mõõtetulemuse küsimine
uint8_t getDistance(VL6180Dev_t dev, VL6180_RangeData_t *result){
    VL6180_RangeGetMeasurementIfReady(dev, result);
    // Mõõtetulemus ei ole valmis
    if(result->errorStatus == DataNotReady){
        return 0;
    }
    // Tagasta mõõtetulemus
    else if (result->errorStatus == 0){
        return (uint8_t)result->range_mm;
    }
    // Tagasta veakood
    else{
        return (uint8_t)result->errorStatus + 200;
    }
}

```

Joonis 13. Kood ühekordse mõõtmise režiimis mõõtmiste tegemiseks.

#### 4.1.2 Seadistamine

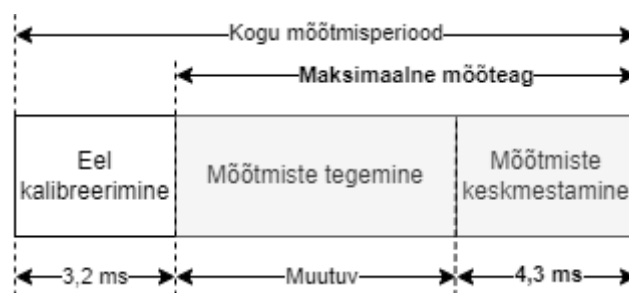
Sensorid tuleb enne kasutust kalibreerida. Kalibreerimisprotsessist on täpsemalt räägitud järgmises peatükis (Vt 5.1). Kalibreerimise ja testimise lihtsustamiseks toimub kogu protsess läbi CAN-võrgu. Vastavalt põhjakõrgussensorile saadetud sõnumile toimub kalibreerimine või muudatus sensori seadistust. Samuti saadab sensor läbi CAN-võrgu tagasi kalibreerimistulemused ja muud seadistuse muudatused, mis salvestatakse. CAN'i sõnum koosneb maksimaalselt 8 baidist andmetest. Sõnumi esimene bait määrab, mis sensori seadeid muudetakse või mis protsessi teostatakse. Järgnevad baidid on vajadusel muudetava parameetri või seade uued väärtused (Joonis 14). CAN sõnumite saatmiseks

ja lugemiseks on kasutatud tarkvara CANtrace. Kõik sõnumid salvestatakse .csv formaadis ja edasine andmete töötlemine ja analüüsimine toimub kasutades Matlab'i

Ch	Message Name	Identifier	RTR	Ext Id	Cycle (ms)	Burst	Dlc	0	1	2	3	4	5	6	7	Send	Comments
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	2	1	50	0	0	0	0	0	0	Send	Nihke kalibreerimine: reaalne kaugus(mm)
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	Send	Läbikoste kalibreerimine
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	2	3	1	0	0	0	0	0	0	Send	Läbikoste kompensatsiooni sisse/välja lülitamine: 1/0
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	4	4	120	30	10	0	0	0	0	Send	Sensori parameetrite muutimine: keskmestamise aeg, mõõtmiste aeg, SNR
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	1	5	0	0	0	0	0	0	0	Send	Kuva praegused sensorite seaded
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	1	6	0	0	0	0	0	0	0	Send	Leia hetke keskmine kaugus
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	1	7	0	0	0	0	0	0	0	Send	Sea vaikeseaded
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	2	8	2	0	0	0	0	0	0	Send	Mõõtmis meetodi valik: pollimine(0)/katkestus(1)/ühekordne(2)
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	2	9	0	0	0	0	0	0	0	Send	Lülita sisse/välja kalibreerimisrežim: 1/0
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	1	10	0	0	0	0	0	0	0	Send	Salvesta seaded püsivalt
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	3	11	17	28	0	0	0	0	0	Send	Sea sensorite nihe: sensor 1 nihe(mm), sensor 2 nihe(mm)
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	1	12	21	0	0	0	0	0	0	Send	Muuda mõõtmiste vahelist aega(katkestus): aeg(ms)
1	Calibrate	1688	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	0	1	2	6	91	0	0	0	0	0	0	Send	Muuda sensori CAN id'd

Joonis 14. Loetelu kalibreerimiseks kasutatud sõnumitest.

Sensoril on mitu seadistatavat parameetrit, mis mõjutavad mõõtetulemust. Mõõtmise ajastust muutes on võimalik mõjutada sensori mõõtetäpsust ja mõõtesagedust. Sensori ühe mõõtmise tegemine koosneb kolmest osast (Joonis 15). Eelkalibreerimise aeg on konstante ja ei ole muudetav. Mõõtmiste tegemise aeg on muutuv, sõltuvalt kaugusest ja sihtmärgi peegeldusest. Mõõtmiste keskmestamise aeg on kalibreeritav vahemikus 1,3 – 17,7 ms. Madalam keskmestamise aeg võimaldab suuremat mõõtmisagedust, aga suurendab müra mõõtmistulemustes. Samuti on muudetav maksimaalne mõõteaeg, mis koosneb mõõtmiste tegemisest ja keskmestamisest. Madalam maksimaalne mõõteaeg suurendab samuti mõõtesagedust, aga liiga madala mõõteaja piiranguga ei jõua sensor kehtivat mõõtetulemust saavutada ja tulemust ei edastata mikrokontrollerile.



Joonis 15. VL6180 sensori mõõtmisprotsessi ajaline jaotus. Paksus kirjas on seadistatavad parameetrid.

Väline valgus, milleks on üldjuhul ere päikesevalgus, mõjutab mõõtmistulemust. Sensori seadetest saab muuta sensori signaali-müra suhte piiri. Signaali müra suhte seadistamisega on võimalik eemaldada mõõtetulemused, kus välise valguse ehk müra osakaal on liiga suur. Piiri saab muuta vahemikus 0-16, kus vaikesead on 10. Madalam väärtus on agressiivsem filter ja kõrgem vähem agressiivne. Agressiivsema signaali-müra

suhte filtriga on võimalik saavutada suurem mõõtetäpsus, aga väheneb maksimaalne mõõtekaugus. Suurematel kaugustel jõuab väiksem osa sensori poolt välja saadetud footonitest tagasi ning seega signaali-müra suhe halveneb ning korrektset mõõtmistulemust ei saavutata.

## 4.2 Liidesed

Mõõtmistulemuste edastamiseks andmelugejale on vaja seadistada CAN liides. CAN'i sõnumite edastamine ja vastuvõtmine on katkestuste põhine. Vastavalt katkestuse põhjusele edastatakse sõnum või sisse tuleva sõnumi korral seatakse vastav lipp kõrgeks, mille olekut kontrollitaks mujal koodis. CAN'i sõnumitel on 11 bitised ID'd vahemikus 0x000-0x7FF. Vastavalt ID väärtustele on sõnumid prioritseeritud. Kahe sõnumi samaaegsel edastamisel on eesõigus väiksema ID'ga sõnumil. Seetõttu on vormeli CAN võrgus sõnumite ID'd täpselt ära jaotatud. Põhjakõrgussensori andmed on madala prioriteediga, ning seetõttu on eraldatud ID'd vahemikus 0x690-0x698. Kuna sensoreid on mitu, siis kalibreerimisprotsessi lihtsustamiseks saab iga põhjakõrgussensori ID'd muuta läbi CAN võrgu.

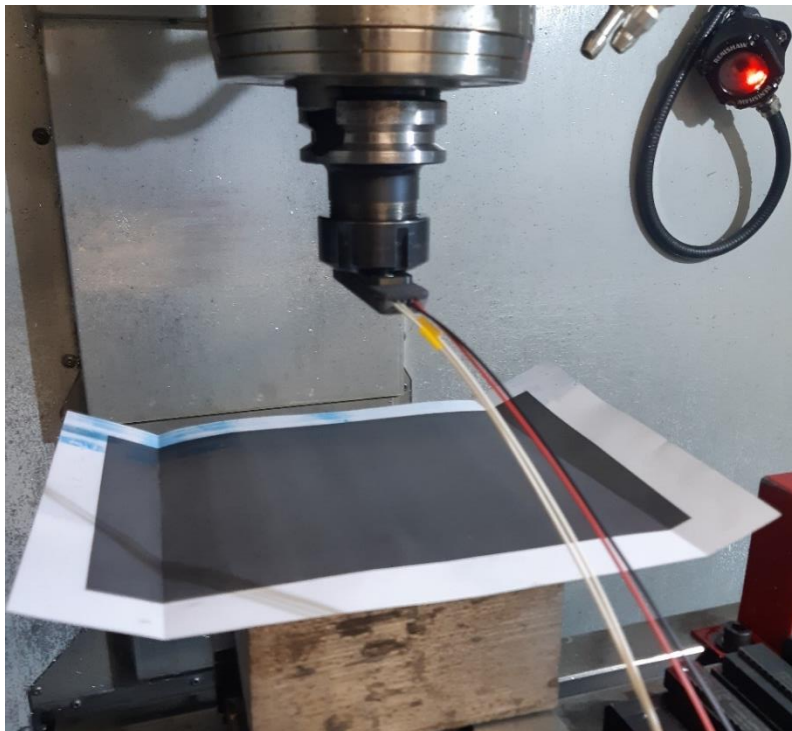
Mikrokontrolleril on 2 kB elektriliselt ümberprogrammeeritavat püsimälu ehk EEPROM'i. Püsimälu säilivad andmed ka peale mikrokontrolleri välja lülitamist. Mälusse saab salvestada andmeid 4 baidiste sõnadena. EEPROM'i on salvestatud kõik sensori seaded ja CAN ID.

## 5 Mõõtetulemuste valideerimine

Sensori nõuetele vastavuse kindlaks tegemiseks on sensorit staatilises olukorras testitud. Enne testimist on vajalik sensori kalibreerimine. Protsessidest on täpsemalt räägitud järgnevates peatükkides. Testimisprotsessi eesmärk on optimeerida sensori parameetreid, et saavutada nõuetele vastavad mõõtmistulemused.

### 5.1 Kalibreerimine

Enne mõõtmiste tegemist tuleb sensor kalibreerida. Kalibreerimine koosneb kahest osast: nihke seadistamine ja läbikoste korrigeerimine. Kalibreerimine toimub freespingis, kus sensor on rakise abil kinnitatud freespingi pea külge, mis võimaldab sensorit liigutada kindlale kaugusele mõõdetavast pinnast (Joonis 16). Mõõdetavaks pinnaks on võetud asfaldiga sarnane madala peegeldusega taust. Kalibreerimisprotsessi lõpus määratakse igale sensorile kindel CAN id, mis võimaldab sensoreid samaaegselt vormeli küljes kasutada.



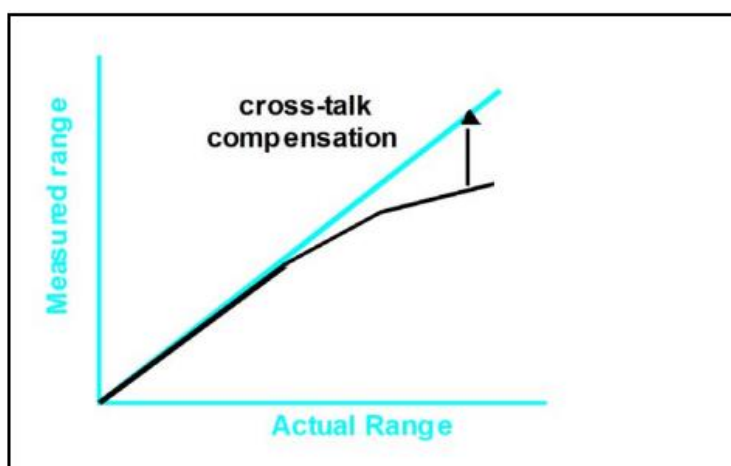
Joonis 16. Sensori kalibreerimisprotsess freespingis..

### 5.1.1 Nihke seadistamine

Nihke seadistamiseks tuleb sensor asetada mõõdetavast pinnast 50 mm kaugusele. Nihke seadistamisel on null punktiks võetud sensori tagumine pind, mis kinnitub vormeli põhja alla. Nihe on vahe mõõtetulemuste keskmise ja reaalse vahemaa vahel. Leitud nihe salvestatakse mikrokontrolleri ja sensorite mällu ning arvestatakse järgnevate mõõtmiste puhul.

### 5.1.2 Läbikoste kompenseerimine

Osa sensori poolt välja saadetud footonitest peegeldub sensori kaitseklaasilt tagasi, mitte mõõdetavalt objektilt, mis mõjutab mõõtetulemust. Korpuse kaitseklaasilt tagasi peegeldunud osakest arvu nimetatakse sensori läbikosteks. Kaitseklaasilt tagasi peegelduvate footonite kogus sõltub korpuse ja kaitseklaaside füüsilistest omaduste (vt 3.2). Läbikoste on kindla korpuse ja kaitseklaasiga konstantne ning ei sõltu mõõdetavast kaugusest. Distanti suurenedes aga maapinnalt tagasi peegelduvate footonite kogus väheneb. See tähendab et mõõdetava vahemaa suurenedes, suureneb klaasilt tagasi peegeldunud footonite osakaal, mis tekitab reaalse kauguse ja mõõtmistulemuse vahel suuremat viga. Klaasilt tagasi peegeldunud footonite lennuaeg on väga lühike mis põhjustab keskmise osakeste lennuaja vähenemist, mis omakorda vähendab mõõtmistulemuse kaugust. Teades aga klaasilt tagasi peegeldunud osakeste osakaalu on võimalik läbikoste välja kompenseerida (Joonis 17).

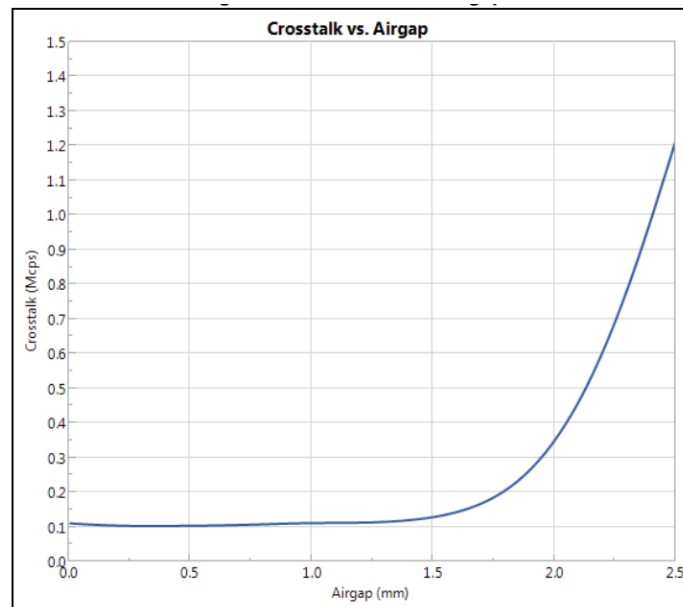


Joonis 17. Läbikoste kompenseerimine vahemaa suurenedes [7].

Valguse klaasilt tagasi peegeldumise vähendamiseks on mitu meetodit. Sensori saatja ja vastuvõtja vahele valgust mitte läbi laskva vaheseina lisamine takistab tagasipeegeldumist. Lisaks vaheseina lisamisel on oluline ka kaugus sensori ja



kaitseklaasi vahel. Kui vahemaa on suurem kui 1,5 mm hakkab tagasi peegeldunud osakeste arv eksponentsiaalselt kasvama (Joonis 18).



Joonis 18. VL6180 sensori ja kaitseklaasi vahelise kauguse mõju läbikosteale [7].

## 5.2 Testimine

Mõõtetulemuste valideerimiseks on samuti kasutatud freespinki. Staatilises olukorras saab testida sensori eri seadete ja parameetrite muutmise mõju mõõtetulemustele. Peamised muudetavad parameetrid:

- Kaitseklaas
- Mõõtmismeetod
- Mõõdetav taust
- Sensori seaded
  - Kogu mõõtmisaeg
  - Mõõtetulemuste keskmestamise aeg
  - Signaali-müra suhe

Parameetrite muutmisel on võrreldud eri kaugustel mõõtetulemuste keskmist, standardhälvet, mõõtetulemuste linearsust ja mõõtmisagedust. Kõikide erinevate seadistuste puhul tehakse mõõtmised kindlatel distantidel: 20 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm ja 150 mm. Igal kaugusel tehakse vähemalt 500 mõõtmist. Kasutatavad distantid

katavad kogu reaalse mõõtevahemiku (20–135 mm), ning võimaldab mõõtetulemusi üksteisele võrrelda.

Mõõtetulemused peale esialgset kalibreerimist, mõlema trükkplaadi peal oleva sensori kohta, on toodud Tabelis 5. Sensoril on vaikeseaded, kaitseklaasiks on pleksiklaas, mõõdetav pind on madala peegelduvusega ning mõõtmised on tehtud pollimise režiimis.

Tabel 5. Sensori mõõtmistulemused peale esialgset testimist.

Kaugus [mm]	20	50	75	100	150
Mõõtmiste arv	1016	1132	1148	1001	1002
Mõõtesagedus [Hz]	48,8	47,7	46,0	43,8	38,3
Sensor 1 keskmine (viga) [mm]	22,5 (+2,5)	51,7 (+1,7)	76,4 (+1,4)	101,1 (+1,1)	154,1 (+4,1)
Sensor 1 standardhälve [mm]	1,09	1,19	1,34	1,44	1,95
Sensor 2 keskmine (viga) [mm]	20,5 (+0,5)	49,9 (-1,1)	74,7 (-0,3)	99,1 (-0,9)	148,4 (-1,6)
Sensor 2 standardhälve [mm]	1,13	1,53	1,43	1,78	2,03

Mõõtetulemustes on näha mitmeid puuduseid võrreldes nõuetega. Mõõtesagedus on igal distant sil väiksem kui 50 Hz ning on vahemaa suurenedes langev. Sensori 2 mõõtetäpsus on nõuetele vastav, aga sensor 1 on 20 mm ja 150 mm juures väljaspool lubatud vahemikku. Samuti on suurematel kaugustel mõlema sensori standardhälve suurem nõutust.

Standardhälve näitab mõõtetulemuste hajuvust. Standardhälve  $\sigma$  arvutatakse valemiga (4), kus  $n$  on mõõtmiste arv,  $h$  on mõõtetulemuste keskmine kaugus ning  $h_i$  on üks mõõtetulemus.  $\sigma$  väärtus näitab, et 68,2% mõõtmistest on vahemikus  $\pm 1\sigma$  ning 95,4% mõõtmistest on vahemikus  $\pm 2\sigma$ . Sensori 1 mõõtetulemuste hajuvus on väiksem, kui sensoril 2, aga siiski on väljaspool nõuetes defineeritud väärtust.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h)^2}{n+1}} \quad (4)$$

### 5.2.1 Kaitseklaasi mõjutus

VL6180 sensori andmelehes [7] on nõutud infrapunafiltri kasutus, kui mõõdetavad kaugused on suuremad kui 100 mm. Filter takistab välise valguse jõudmist sensori vastuvõtjasse, mis segab mõõtmist tegemist. Kasutatud infrapunafiltrilt [14] peegeldub tagasi ~10% valgust, mis suurendab klaasilt tagasi peegelduvate osakeste arvu ehk läbikostet (vt 5.1.2). Seetõttu on eriti tähtis, et sensori ja kaitseklaasi vaheline kaugus oleks minimaalne, ning saatja ja vastuvõtja vahel oleks vahesein.

Sisetingimustes testides ei ole võimalik valideerida infrapunafiltri vajadust ja efektiivsust. Võimalik on testida filtri mõju mõõtetulemustele ja läbikostele. Tabelis 6 on näha kaitseklaasilt tagasi peegelduvate osakeste arvu pleksiklaasi ja infrapunafiltri puhul. Tabelis on 2 eri infrapunafiltriga korpust. Sensori korpus on prinditud SLA printeriga vaigust, mis on osaliselt läbipaistev, mistõttu ei täida sensori saatja ja vastuvõtja vaheline sein oma eesmärki. Ühel juhul ei ole korpust töödeldud ja vahesein on läbipaistev, teisel juhul on korpus värvitud.

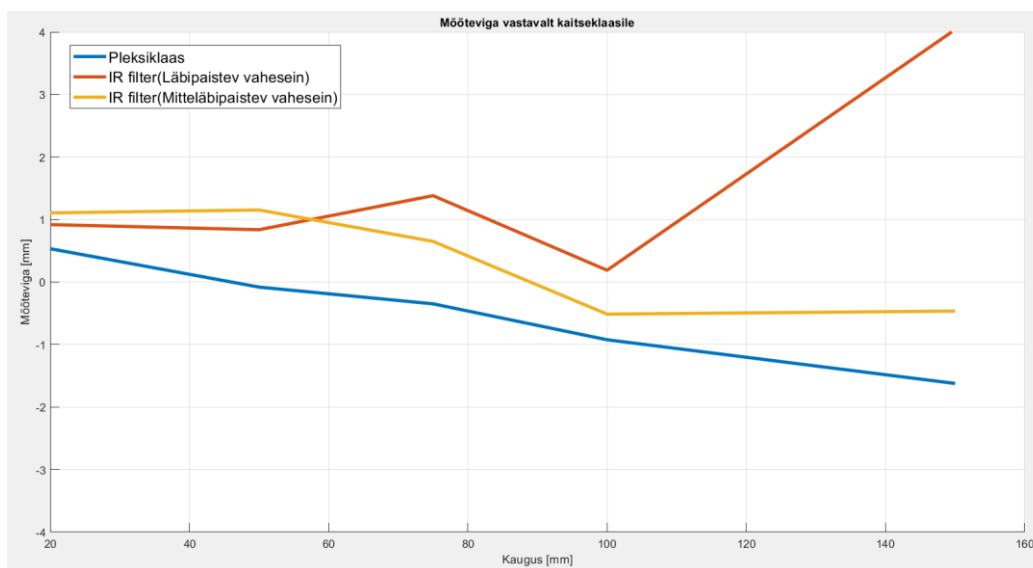
Tehtud mõõtmised näitavad selgelt vaheseina efektiivsust. Värvitud korpusel on läbikoste minimaalne, värvimata korpusel on läbikoste aga kordades suurem. Tabelis on läbikoste ühikuteks Mcps ehk *mega counts per second*, mis näitab tagasi peegeldunud footonite arvu ühes sekundis.

Tabel 6. Kaitseklaasilt tagasi peegeldunud osakeste arvu sõltuvus kaitseklaasist.

Kaitseklaas	Sensor	Tagasi peegeldunud osakeste arv
Pleksiklaas	Sensor 1	0,0859375 Mcps
	Sensor 2	0 Mcps
Infrapuna filter (Läbipaistev vahesein)	Sensor 1	0,5859375 Mcps
	Sensor 2	0,546875 Mcps
Infrapuna filter (Mitteläbipaistev vahesein)	Sensor 1	0 Mcps
	Sensor 2	0,0234375 Mcps

Läbikostel on suur mõju ka mõõtmistäpsusele. Suure läbikoste puhul kompenseeritakse läbikostet VL6180 sensori tarkvaras, et saavutada parem mõõtetäpsus (Vt Joonis 17). Joonisel 19 on toodu eri kaitseklaasidega tehtud mõõtmised. Kaugustel alla 100 mm on

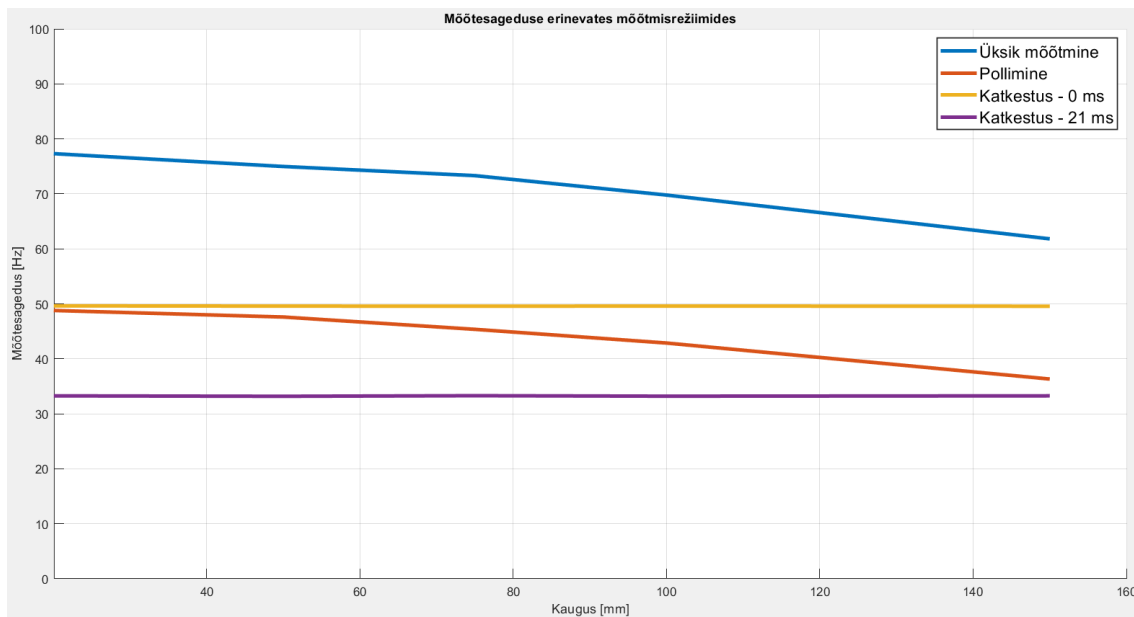
läbikoste mõju mõõtetäpsusele minimaalne, kus mõõteviga jääb igal juhul alla 1,5 mm. Jooniselt on aga näha, et 150 mm juures on suure läbikostega mõõtmisel viga 4 mm. Läbikoste tõttu peaks mõõtetulemus olema väiksem reaalsest kaugusest, aga antud juhul on mõõtetulemus suurem. Sellest saab järeldada, et läbikostet on tarkvaraliselt üle kompenseeritud. Parim variant on värvitud korpusega infrapunafiltriga kaitseklaas, kuna selle puhul on läbikoste ja mõõteviga kõige väiksemad ning infrapunafilter on andmelehes nõutud.



Joonis 19. Sensori mõõteviga sõltuvus kaitseklaasist.

### 5.2.2 Mõõtmisrežiimide võrdlus

Mõõtmisrežiimil on suur mõju mõõtmisagedusele (Joonis 20). Jooniselt on näha, et kõige kõrgema sagedusega on ühekordse mõõtmisrežiim, kuna sel juhul toimub mõlema sensoriga mõõtmine samaaegselt. Sagedus jääb vahemikku 62 – 77 Hz, olenevalt kaugusest. Pollimise puhul on sagedus madalam, vahemikus 36 – 49 Hz, kuna igal ajahetkel teeb mõõtmisi ainult 1 sensor.



Joonis 20. Sensori mõõtesagedused erinevates mõõtmisrežiimides.

Võrreldes mõõtmisagedusi, on võimalik leida keskmine sensori mõõtmisaeg ja mikrokontrolleri poolt kulutatud aeg. Arvestades, et pollimise režiimis on sensorite mõõtmiste tegemisele kulunud aeg kaks korda suurem kui üksiku mõõtmise puhul, siis on võimalik valemiga (5) leida mõlemad ajad. Mikrokontrolleril kulub toimingute tegemiseks ligikaudu 5 ms, mille alla kuulub sensoritelt mõõtmistulemuste küsimine, sisse tulevate CAN sõnumite kontroll ja mõõtetulemuste edastamine läbi CAN-võrgu. Sensori mõõtmiste tegemiseks kulub 20 mm juures keskmiselt 7,5 ms ja 150 mm juures 11,4 ms.

$$t_{kokku} = \frac{1}{f_{kokku}} = t_{MCU} + t_{sensor} \quad (5)$$

Katkestuse režiimis on sagedus, konstante olenemata mõõtekaugusest. Sagedust mõjutab mõõtmiste vahelise aja limiit, mis tuleb enne mõõtmisi seadistada. Mõõtmiste vahelise ajaga 0 ms on sagedus ~50 Hz. Mõõtmiste vahelise aja määrab piirang, mis on toodud valemis (3). Väiksema aja puhul suureneb mõõtmistulemuste ebatäpsus ja müra. Testimise käigus mõõtetulemused erinesid alla 1%, nii viga, linearsus kui ka standardhälve. Probleem tekib reaalses olukorras vormeli küljes, kus olud on keerulisemad ja mõõtekaugus muutub ajas kiiresti. 21 ms suuruse mõõtmiste vahelise aja juures on sagedus ~33 Hz, mis on alla nõutud 50 Hz.

### 5.2.3 Sensori seadistus

Tabelis 5 olevad mõõtmistulemustest on näha, et standardhälve on suurem, kui nõuetes seatud piir. Standardhälvet on võimalik parandada suurendades mõõtmiste keskmestamise aega, mis vähendab mõõtmistulemustes müra, aga vähendab ka mõõtesagedust. Vaikimisi on mõõtetulemuste keskmestamise aeg 4,3 ms. Arvestades eelmises peatükis leitud mõõtmisaegu ja ühe mõõtmise ajajaotust (vt Joonis 15) on maksimaalne keskmestamise aeg 8 s, et säiliks kõrgem kui 50 Hz mõõtesagedus.

Signaali müra filtrit ei saa seadistada sisetingimustes, kuna väline mõjutus sensori vastuvõtjale on väga väike. Signaali müra filtrit tuleb seadistada juhul, kui ere päikesevalgus hakkab mõjutama mõõtmistulemusi. Vaikeväärtusena on piiriks 10. Tabelis 7 on mõõtetulemused peale tehtud muudatusi. Lõplikud parameetrid on järgnevad:

- Infrapuna filter
- Üksiku mõõtmise režiim
- Madala peegeldusega sihtmärk
- Seaded
  - Maksimaalne kogu mõõtmisaeg – 30 ms
  - Mõõtmise keskmestamise aeg – 8 ms
  - Signaali müra filter – 10

Tabel 7. Sensori mõõtetulemused pärast optimeerimist. Sulgudes on võrdlus esimese kalibreerimisega.

Kaugus [mm]	20	50	75	100	150
Mõõtesagedus [Hz]	59,0 (+10,2)	58,0 (+10,3)	56,4 (+9,6)	54,5 (+9,3)	49,1 (+9,2)
Sensor 1 keskmine [mm]	20,4 (-2,1)	49,4 (-1,1)	74,3 (-0,7)	98,8 (+0,1)	149,8 (-3,9)
Sensor 1 standardhälve [mm]	1,1 (+0,03)	1,25 (+0,06)	1,24 (-0,09)	1,39 (-0,05)	1,72 (-0,23)
Sensor 2 keskmine [mm]	20,5 (0)	50,0 (-1,1)	73,9 (+0,8)	99,8 (-0,2)	149,0 (-0,6)
Sensor 2 standardhälve [mm]	1,14 (+0,01)	1,30 (-0,23)	1,27 (-0,16)	1,51 (-0,27)	1,84 (-0,19)

Mõõtetulemused paranesid võrreldes esialgsete mõõtmistega. Sagedus tõusis igal kaugusel rohkem kui 9 Hz. Mõlema sensori keskmine mõõtmistulemus paranes välja arvatud kahel juhul. Siiski jäävad kõik keskmised nõutud täpsuse piiridesse. Standardhälve paranes eelkõige suurematel kaugustel. Samuti on nüüd mõlema sensori standardhälbed võrreldavad. Esimesel mõõtmisel oli sensori 2 standardhälve märgatavalt suurem.

### **5.3 Tulemuste analüüs**

Sensori mõõtetulemusi ja füüsilisi parameetreid tuleb võrrelda püstitatud nõuetega. Samuti on võimalik sensorit edasi arendada. Järgnevates peatükkides on täpsemalt kirjeldatud nõuetele vastavust ja edasisi arendusi.

#### **5.3.1 Sensori vastavus nõuetele**

Tabelis 8 on toodud sensori algsed nõuded ja nende vastavus. Sensori ühilduvus ja füüsilised omadused vastavad nõuetele. Sensoril on vajalikud ühendused, korpus on veekindel ja piisavalt madala profiiliga. Staatilises olukorras tehtud testide tulemused vastavad valdavalt nõuetele. Standardhälve on vahemikus 20 mm – 100 mm väiksem või võrdne kehtestatud piiriga. 150 mm juures on standardhälve suurem, küll aga reaalses olukorras ei tehta mõõtmisi nii suure kauguse peal. Standardhälve ja mõõtesagedus on omavahel võrdeliselt seotud. Standardhälbe minimaliseerimiseks on mõõtesagedus 150 mm juures samuti alla nõutud piiri. See tähendab, et standardhälvet ei ole võimalik enam seadistusega vähendada.

Töö kirjutamise hetkeks on valmis 5 toimivat sensori trükkplaati. Kaks sensorit on koos korpusega kalibreeritud. Kalibreerimis ja testimisprotsess toimub freespingis, kuhu saab lihtsasti sensori kinnitada ja kõrgust muuta. Juhtimine toimub läbi CAN võrgu.

Tabel 8. Põhjakõrgussensori nõuetele vastavus

Nõuded			Tulemus
Ühilduvus	Toitepinge	24 V / 12 V / 5 V	5 V
	Liidesed	CAN võrk	CAN võrk
Füüsilised nõuded	Korpuse kõrgus	< 10 mm	7,4 mm
	Veekindlus	IPx5	IP65
	Asukoht	Igale poole vormeli põhja alla	Igale poole vormeli põhja alla
Nõuded mõõtetulemustele	Mõõtevahemik	25 mm – 135 mm	20 mm – 150 mm
	Mõõtetäpsus	2 mm	Max 1,2 mm
	Lineaarsus	2%	1%
	Mõõtesagedus	> 50 Hz	Min 49,1 Hz
	Standard hälve	< 1,5 mm	Max 1,84 mm @ 150 mm Max 1,51 mm @ <100 mm
Mitte funktsionaalsed nõuded	Sensorite arv	4	5 trükkplaati 2 korpust
	Kalibreeritavus	Sensorid on lihtsasti ja kiiresti kalibreeritavad	Sensorid on kiiresti kalibreeritavad freespingis läbi CAN võrgu. Samuti on võimalik seadistust muuta vormeli küljes

### 5.3.2 Edasised arendused

Staatilises olukorras on sensori nõuetele vastavus valideeritud. Sensorit tuleb testida ka dünaamilises olukorras vormeli peal, kus vormel liigub suurtel kiirustel ja mõõdetav pinnas on ebahütlane. Mõõtesagedust ja hajuvust saab leida salvestatud mõõtetulemustelt Mõõtetäpsuse valideerimiseks saab kasutada vormeli küljes olevat maakiirussensorit [3]. Selle jaoks tuleb sensorid kinnitada lähestikku, ja võrrelda kõrguse mõõtetulemusi. Samuti saab maakiirussensori abil valideerida infrapunafiltri toimimist. Maakiirussensor valgustab maapinda ereda LED valgustusega, mis ilma infrapunafiltrita mõjutaks põhjakõrgussensori mõõtetulemust.

Sensori mõõtetäpsuse suurendamiseks ja hajuvuse vähendamiseks on võimalik mõõtetulemusi tarkvaraliselt filtreerida. Üks võimalus on kasutada Kalmani filtrit [16].



Selle jaoks tuleb reaalajas analüüsida eelnevaid mõõtetulemusi ja nende hajuvust. VL6180 sensoril on mõõtetulemuste ajaloo puhver, mis salvestab 16 viimast mõõtmist, ning mõõtetulemusi saab filtreerida otse mikrokontrolleril. Filtreerimisel tuleb arvestada mõõtesageduse langemisega ja viite tekkimisega. Samuti on võimalik teha andurisulandust, ehk kombineerida mitme sensori mõõtetulemused, et veelgi suurendada mõõtetäpsust ja vähendada hajuvust. Põhjakõrgussensoril on 2 kaugussensorit, mille mõõtmistulemusi on võimalik keskmestada ja filtreerida. Olenevalt sensori asukohast on võimalik reaalajas kasutada ka maakiirussensori kõrgusandmeid.

## Kokkuvõte

Antud bakalaureusetöö eesmärk oli arendada tudengivormelile FEST23 põhjakõrgussensor. Töö käsitleb kogu sensori arendusprotsessi ja testimist. Põhjakõrgussensor võimaldab mõõta eri kohtades vormeli põhjakõrgust, mis aitab kaasa vormeli dünaamika arendusele. Eelkõige võimaldab see valideerida aerodünaamika simulatsioone. Töö käigus tehtud arendusprotsess on jagatud viieks osaks: nõuete defineerimine, trükkplaadi ja korpuse disain, tarkvara arendus ning mõõtetulemuste valideerimine.

Töö tulemusena valmis komplektne põhjakõrgussensor, mida saab kasutada tudengivormeli FEST23 küljes põhjakõrguse mõõtmiseks. Sensori vajab toimimiseks ainult 5 V toitepinget ja CAN võrguga ühendust andmete edastamiseks. Sensor kasutab kauguse mõõtmiseks kahte STM VL6180 lennuaja kaugussensorit ning juhtimiseks Tiva C seeria mikrokontrollerit. Sensoril on SLA printeriga prinditud veekindel korpus. Sensori kalibreerimiseks ja mõõtetulemuste valideerimiseks kasutati freespinkki, mis võimaldas sensorit seada kindlatele kõrgustele. Sensor vastab pärast parameetrite optimeerimist püstitatud nõuetele.

Järgmise sammuna tuleb sensorit testida dünaamilises olukorras vormeli peal ja kontrollida mõõtetulemuste vastavust nõuetele. Edasiarendusena on võimalik mõõtevea ja hajuvuse vähendamiseks mõõtetulemusi tarkvaras filtreerida. Samuti on võimalik kasutada andurisulandust.

## Kasutatud kirjandus

- [1] "Formula Student Rules 2023, Version 1.1," Formula Student Germany, 2023. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.formulastudent.de/fileadmin/user\\_upload/all/2023/rules/FS-Rules\\_2023\\_v1.1.pdf](https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2023/rules/FS-Rules_2023_v1.1.pdf). [Kasutatud 28 04 2023].
- [2] „Formula Student Team Tallinn,“ MTÜ Tudengi Vormel, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.formulastudent.ee/>. [Kasutatud 14 05 2023].
- [3] LV Electronics Design Book v3, MTÜ Tudengi Vormel, 2022.
- [4] „RHL4 Laser Ride Height Sensor,“ Ka sensors, 12 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.kasensors.com/sites/default/files/downloads/RHL4%20datasheet.12.22.pdf>. [Kasutatud 11 05 2023].
- [5] „EVS-EN 60529:2001+A2:2014 Ümbristega tagatavad kaitseastmed(IP kood),“ 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.evs.ee/et/evs-en-60529-2001-a2-2014-consolidated>. [Kasutatud 24 04 2023].
- [6] „CH101 Datasheet,“ TDK, 15 03 2022. [Võrgumaterjal]. Available: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/ch101-datasheet/>. [Kasutatud 28 04 2023].
- [7] „VL6180 Proximity sensing module Datasheet - production data,“ ST, 28 02 2020. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/389/vl6180-1842518.pdf>.
- [8] „GP2Y0A51SK0F Datasheet,“ SHARP, [Võrgumaterjal]. Available: [https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a51sk\\_e.pdf](https://global.sharp/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp2y0a51sk_e.pdf). [Kasutatud 28 04 2023].
- [9] „LIDAR In a Chip,“ STMicroelectronics, [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.st.com/resource/en/product\\_presentation/SensorsLive\\_LiDAR\\_Chip.pdf](https://www.st.com/resource/en/product_presentation/SensorsLive_LiDAR_Chip.pdf). [Kasutatud 28 04 2023].
- [10] „API User Manual for the VL6180 proximity sensor,“ STMicroelectronics, 10 2020. [Võrgumaterjal]. [Kasutatud 08 04 2023].
- [11] „Tiva™ TM4C1230H6PM Microcontroller datasheet,“ Texas Instruments, 06 2014. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c1230h6pm.pdf?ts=1676646555795&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tm4c1230h6pm.pdf?ts=1676646555795&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F).
- [12] „NCV8603 LDO Regulator - High performance, CMOS, enable,enhanced ESD,“ ON Semiconductor, 09 2019. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.mouser.ee/datasheet/2/308/1/NCV8603\\_D-2317642.pdf](https://www.mouser.ee/datasheet/2/308/1/NCV8603_D-2317642.pdf). [Kasutatud 22 04 2023].
- [13] „BAT46WH Single Schottky barrier diode,“ NXP, 28 11 2011. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.mouser.ee/datasheet/2/916/BAT46WH-1578912.pdf>. [Kasutatud 22 04 2023].

- [14] „Optolite IR. Infra Red Filters,“ Instrument Platics, [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/1693999.pdf>. [Kasutatud 02 05 2023].
- [15] „TivaWare™ Peripheral Driver Library User's Guide,“ Texas Instruments, 04 2020. [Võrgumaterjal]. Available: [https://www.ti.com/lit/ug/spmu298e/spmu298e.pdf?ts=1640674002448&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ug/spmu298e/spmu298e.pdf?ts=1640674002448&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). [Kasutatud 05 05 2023].
- [16] A. R. A. Tahtawi, „Kalman Filter Algorithm Design for HC-SR04 Ultrasonic Sensor Data Acquisition System,“ IJITEE, 2018.

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

Mina, Danel Tiitma

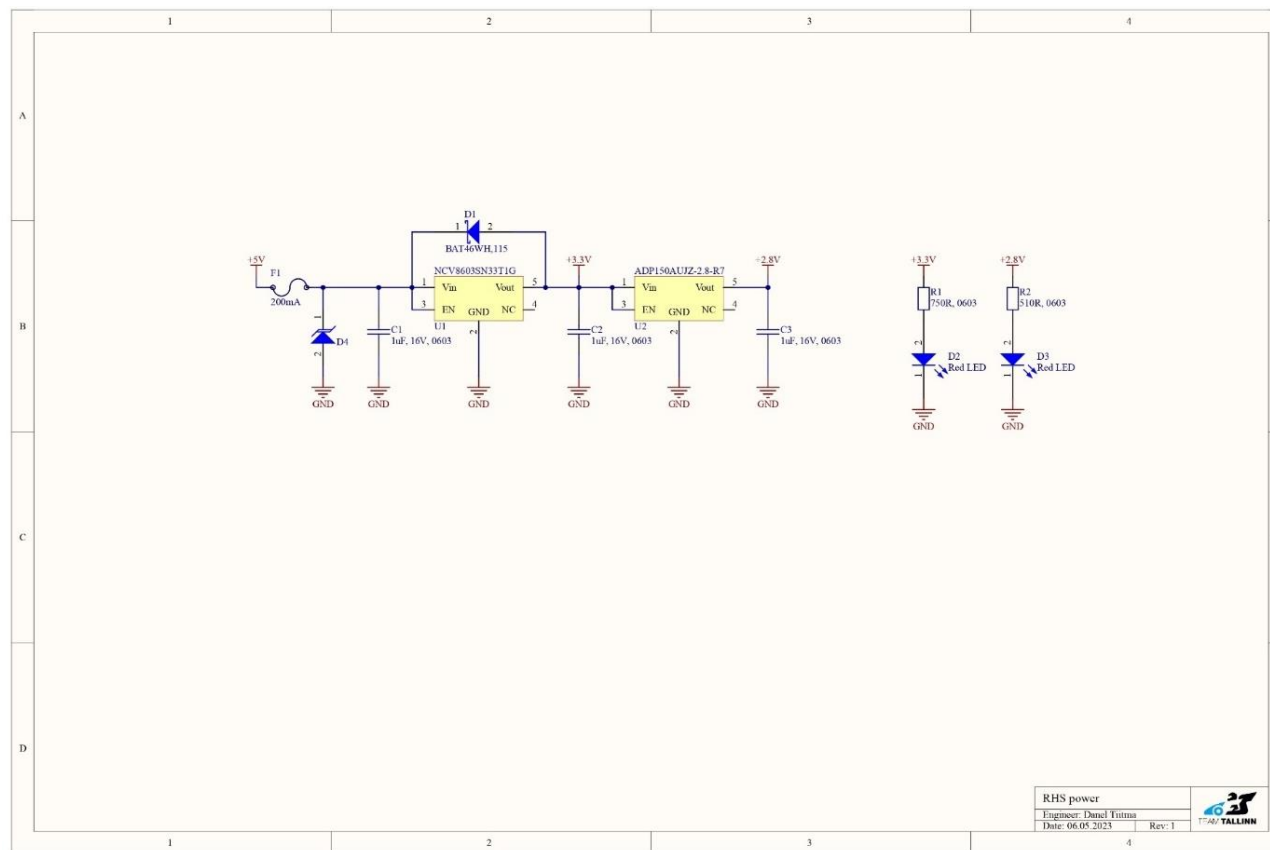
1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose "Põhjakõrgussensori arendus tudengivormelile FEST23" , mille juhendaja on Peeter Ellervee
  - 1.1. reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse 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.

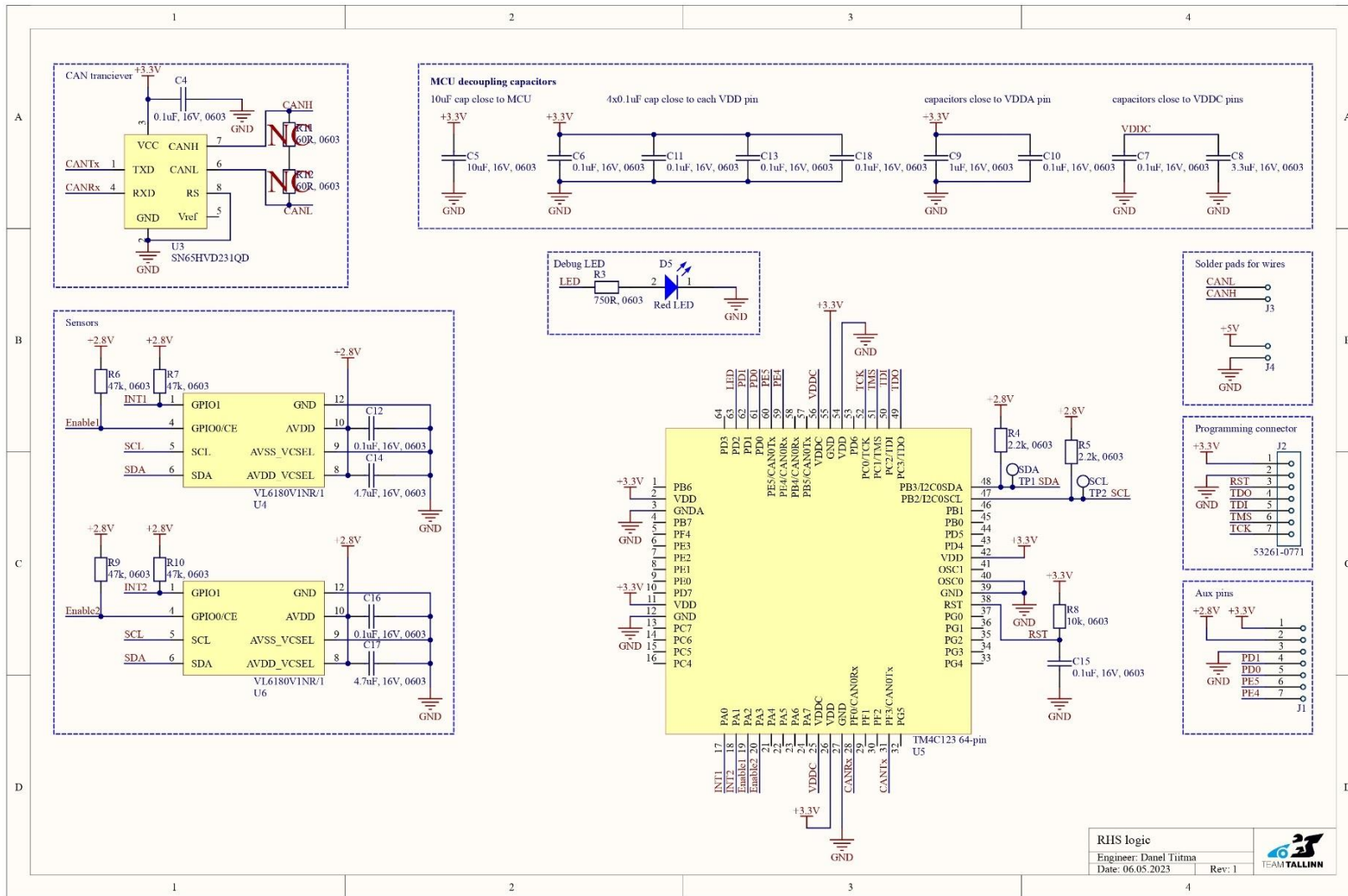
15.05.2023

---

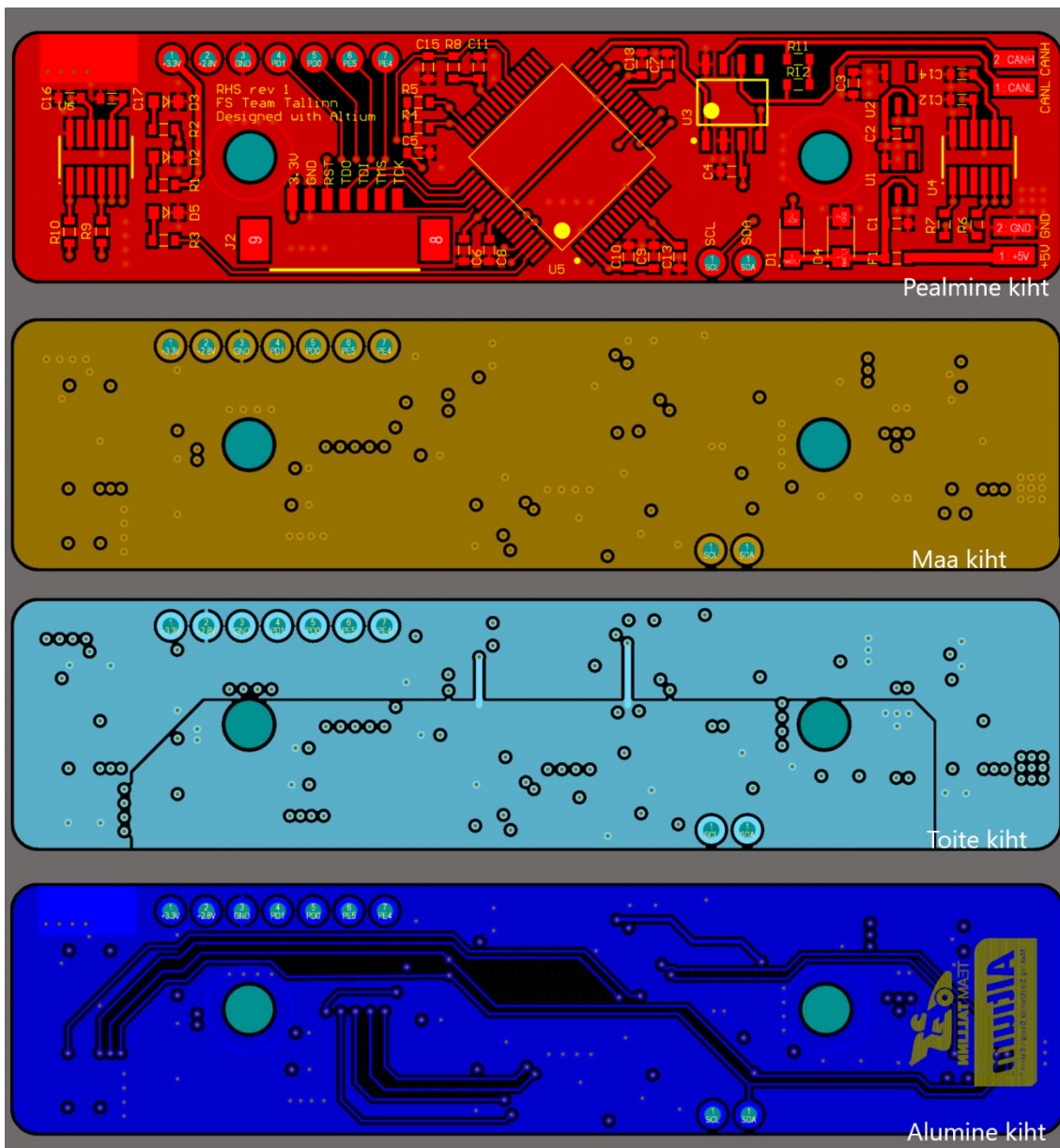
<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud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

## Lisa 2 Põhjakõrgussensori trükkplaadi elektriskeem



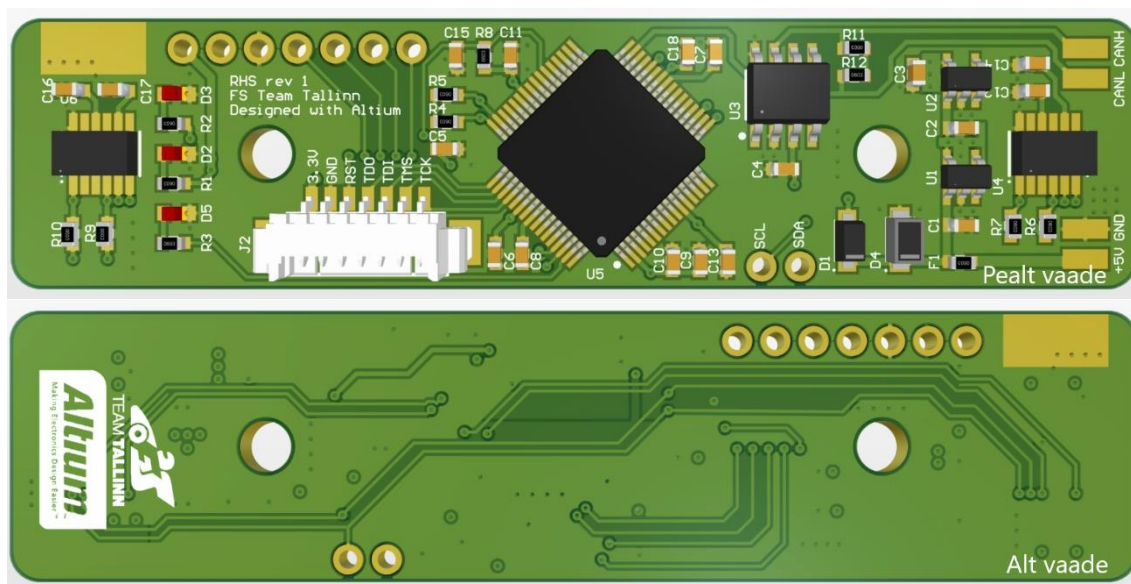


### Lisa 3 Põhjakõrgsessori trükkplaadi kihid

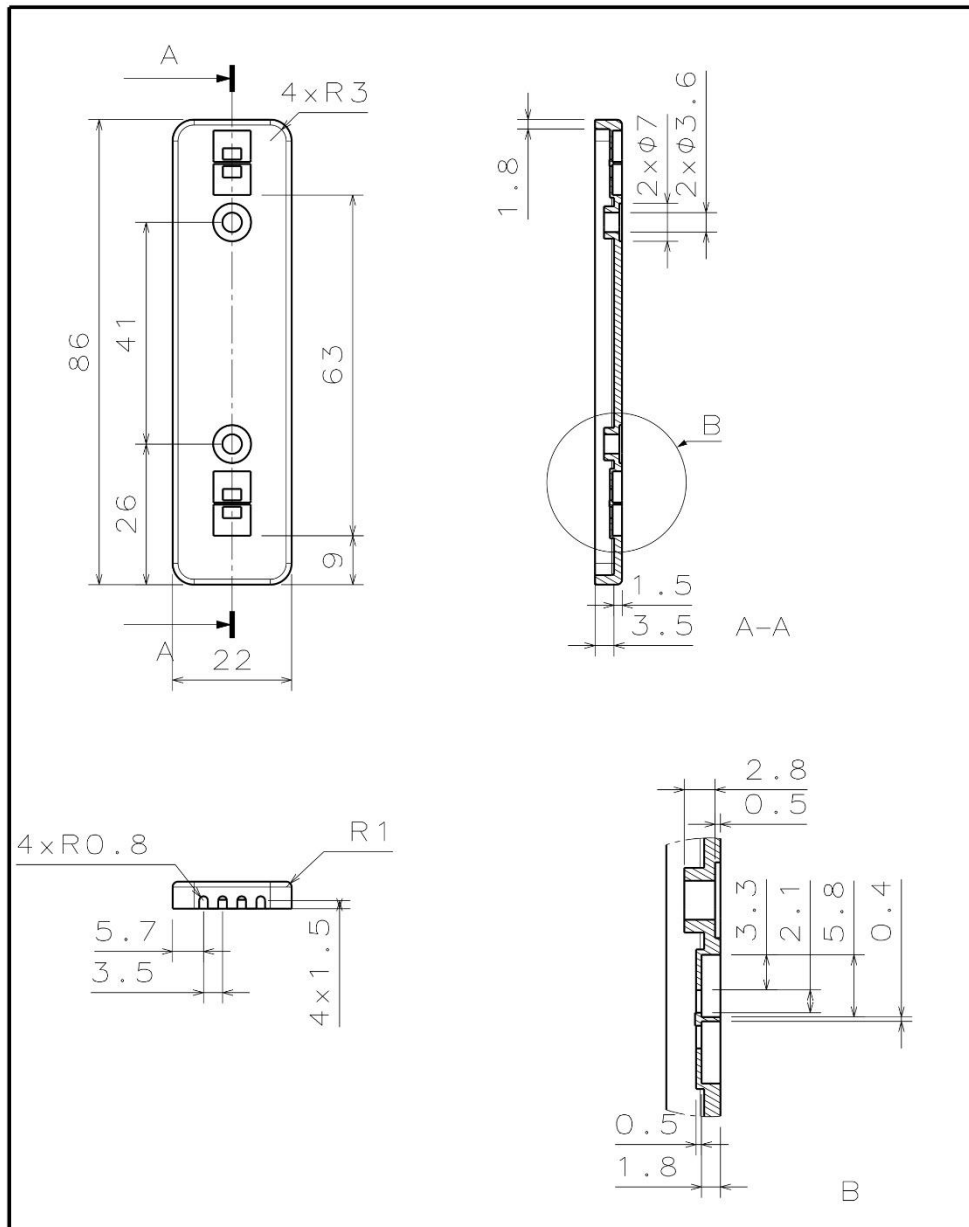




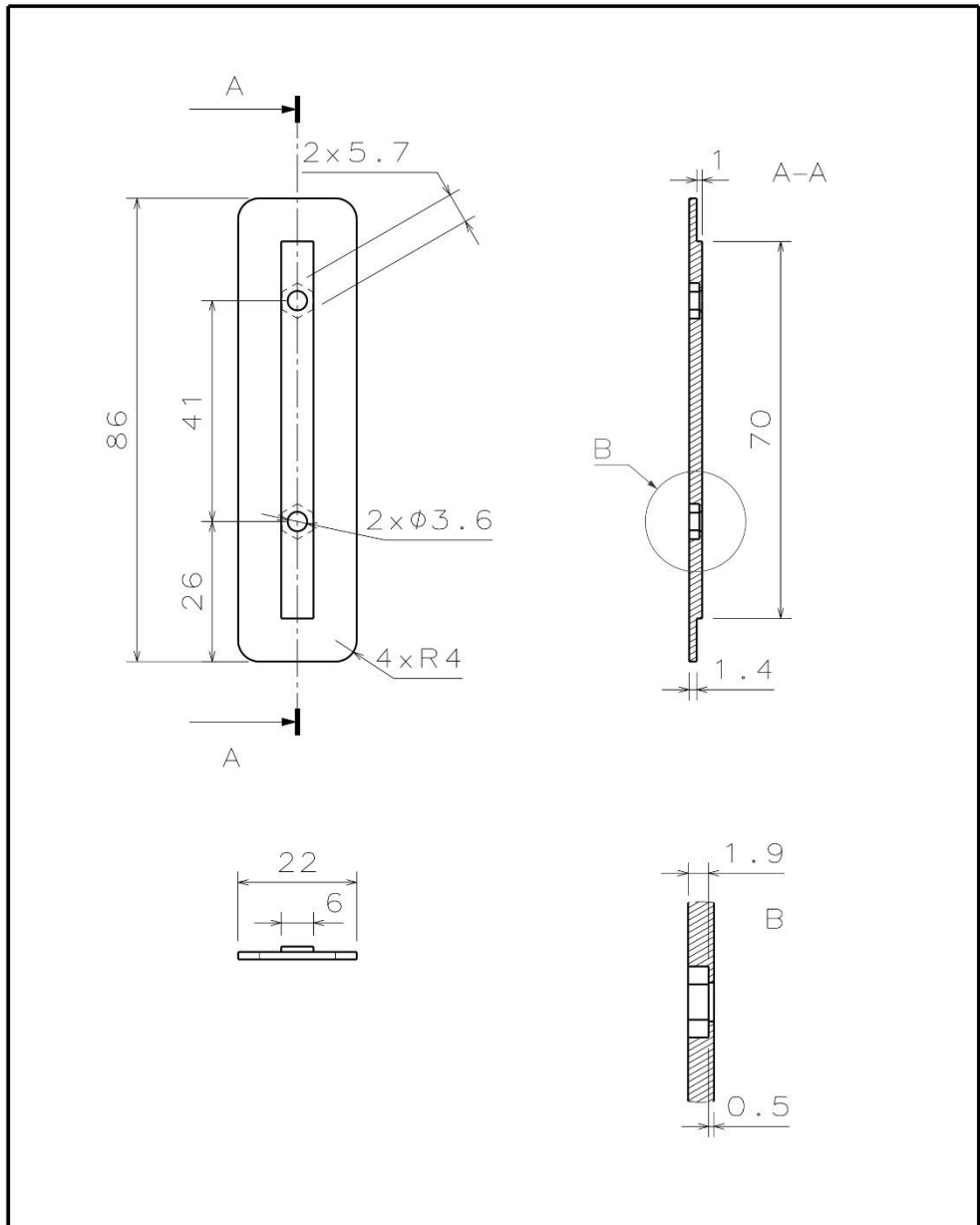
## Lisa 4 Põhjakõrgussensori trükkplaadi 3D vaated




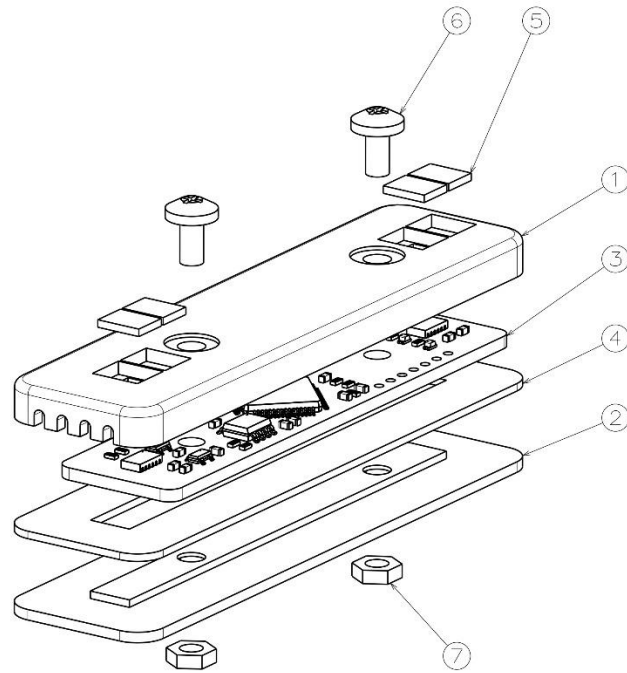
## Lisa 5 Põhjakõrgussensori korpuse joonised




	<b>Material:</b> Resin	<b>Unmarked Tolerances:</b>	<b>Mass:</b> 0,005(kg)	<b>Scale:</b> 1:1
<b>Drawn</b>	Danel Tiitma	<b>Title:</b> RHS housing upper		
<b>Checked</b>	Oskar Järg			
<b>Approved</b>	Kristjan Taimla			
Tallinn TU/UAS		<b>Sheet:</b> 1/3	<b>ID:</b>	



	<b>Material:</b> Resin	<b>Unmarked Tolerances:</b>	<b>Mass:</b> 0,003(kg)	<b>Scale:</b> 1:1
	<b>Drawn</b> Danel Tiitma <b>Checked</b> Oskar Järg <b>Approved</b> Kristjan Taimla	<b>Title:</b> RHS Housing lower		
Tallinn TUJAS		<b>Sheet:</b> 2/3	<b>ID:</b>	



ITEM	QTY	PART
1	1	RHS_housing_upper_DaT_23v2
2	1	RHS_housing_lower_DaT_23v1
3	1	RHS_PCB
4	1	Sealing gasket
5	4	Cover glass
6	2	RM3X8MM 2701
7	2	ISO 4035 M3
8		
9		
10		

	Material:	Unmarked Tolerances:	Mass: 0,017(kg)	Scale: 1:1
Drawn	Danel Tiitma	Title: RHS assembly		
Checked	Oskar Järg			
Approved	Kristjan Taimla			
Tallinn TU/UAS		Sheet: 3/3	ID:	