

TARTU ÜLIKOOL  
LOODUS- JA TÄPPISTEADUSTE VALDKOND  
Tehnoloogainstituut

Juhan Koppel

**MIKROFLUIDIKA INSTRUMENTIDES KASUTATAVATE  
RÕHUPUMPADE KARAKTERISEERIMISEKS VAJALIKU  
SEADME DISAINIMINE**

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Materjaliteaduse eriala

Juhendajad: prof. Alvo Aabloo

PhD Alar Ainla

MSc Tanel Ainla

MSc Aigar Vaigu

Tartu 2016

## **Resümee/Abstract**

„Mikrofluidika instrumentides kasutatavate rõhupumpade karakteriseerimiseks vajaliku seadme disainimine“

Käesoleva töö raames töötati välja seade, mille abil uurida pneumaatiliste pumbamoodulite sobivust mikrofluidika rõhugeneraatorites kasutamiseks. Loodud seade on kasutusel Teadusmosaiik OÜ tootearendusprotsessis. Töös käsitletakse probleemipüstitust seadmele seatud kriteeriumite formuleerimise teel, riistvara ja tarkvara disaini ning realiseerimist. Töö tulemusena valmis püstitatud eesmärkidele vastav seade.

CERCS: Materjalitehnoloogia (T150)

Märksõnad: mikrofluidika, pneumaatika, pump, Arduino, LabVIEW, tootearendus.

„Designing a device for the characterisation of pressure pumps to be used in microfluidics devices“

This thesis covers the development of a device for testing the suitability of pneumatic pump modules for use in microfluidics pressure generators. The intended use of the final product is product development in Teadusmosaiik OÜ. The thesis covers the formation of initial criteria for the device, design of hardware and software and completion of the device. As an end result, a device compliant to the initially set criteria is developed and built.

CERCS: Material technology (T150)

Keywords: microfluidics, pneumatics, pump, Arduino, LabVIEW, product development.

## Sisukord

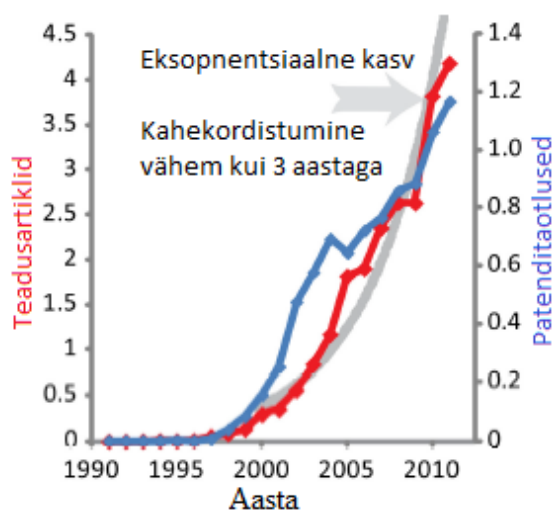
Sissejuhatus .....	4
1 Pumbamoodulite karakteriseerija disainimine .....	7
1.1 Seadmele esitatavad nõuded .....	7
1.2 Riistvara disainimine .....	9
1.3 Komponentide valik .....	11
1.3.1 Andmete vahendaja .....	11
1.3.2 Rõhuandur .....	11
1.3.3 Klapp .....	12
1.3.4 Toitemoodul .....	12
2 Riistvara valmistamine .....	14
2.1 Elektroonikaskeemi koostamine .....	14
2.1.1 Mikrokontroller ja rõhuandur .....	14
2.1.2 Pumbamooduli toiteahel .....	14
2.1.3 Pumba juhtahel .....	15
2.1.4 Klapi juhtahel .....	16
2.2 Prototüüp .....	16
2.3 Elektroonikaskeemi täiustamine .....	16
2.3.1 Toiteahel .....	17
2.3.2 Pumba juhtahel .....	18
2.3.3 Klapi juhtahel .....	19
2.4 Valmis elektroonikaskeem .....	19
2.5 Pneumaatikaühendused .....	20
2.6 Elektroonikamooduli valmishitamine .....	22
2.7 Muudetava ruumalaga reservuaari ehitamine .....	25
2.8 Raami ehitamine .....	26

3	Tarkvara disainimine .....	29
3.1	Juhtarvuti tarkvara .....	29
3.1.1	Rõhu lugemine .....	30
3.1.2	Pumba sisse-välja lülitamine .....	31
3.1.3	Pumba juhtimine PWM abil .....	32
3.1.4	Testide läbiviimise põhiprogramm .....	34
3.2	Rõhuanduri kalibreerimine .....	38
3.3	Sooritatavad testid .....	40
4	Andmete kogumine ja analüüs .....	42
5	Kokkuvõte .....	44
6	Viidatud materjalid .....	45
7	Lisad .....	50
7.1	Lisa 1. Uuritavate pumpade võrdlustabel andmelehtede järgi .....	50
7.2	Lisa 2. Rõhuandurite võrdlustabel .....	52
7.3	Lisa 3. Mikrokontrolleri ja rõhuanduri elektriskeem .....	53
7.4	Lisa 4. Toiteahela prototüübi elektriskeem .....	54
7.5	Lisa 5. Pumba juhtahela prototüübi elektriskeem .....	55
7.6	Lisa 6. Klapi juhtahela prototüübi elektriskeem .....	56
7.7	Lisa 7. Täiustatud toiteahela elektriskeem .....	57
7.8	Lisa 8. XL4015 toitemooduli skeem .....	58
7.9	Lisa 9. Täiustatud pumba juhtahel .....	59
7.10	Lisa 10. Täiustatud klapi juhtahel .....	60
7.11	Lisa 11. Tagapaneeli skeem .....	61
7.12	Lisa 12. Esipaneeli skeem .....	62
7.13	Lisa 13. Arduino programmi lähtekood .....	63
7.14	Lisa 14. Pumpade maksimumrõhu testi mõõteandmete tabel .....	65
7.15	Lisa 14. Pumpade rõhukarakteristikute võrdlusgraafik ülerõhu tekitamisel .....	66
7.16	Lisa 15. Pumpade rõhukarakteristikute võrdlusgraafik alarõhu tekitamisel .....	67

## Sissejuhatus

Mikrofluidika (ingl. *microfluidics*), eestindatult ka mikrovedelikundus, on väga kiiresti arenev uurimissuund, mis tegeleb vedelike manipuleerimisega mikroskaalas. Kontseptuaalselt on mikrofluidika-alaseid seadmeid välja pakutud juba eelmise sajandi kuuekümnendatel aastatel, kui toleaeelses kultussarjas „Star Trek“ räägiti Tricorderitest – kaasaskantavatest seadmetest, mis analüüsisid kosmoses rändavate seiklejate tervist [1]. Kui tähtedevaheline reisimine on

Mikrofluidika-alased publikatsioonid aastas x1000



Joonis 1. Mikrofluidika-alaste publikatsioonide ja patentide hulk aastatel 1990-2013 [4].

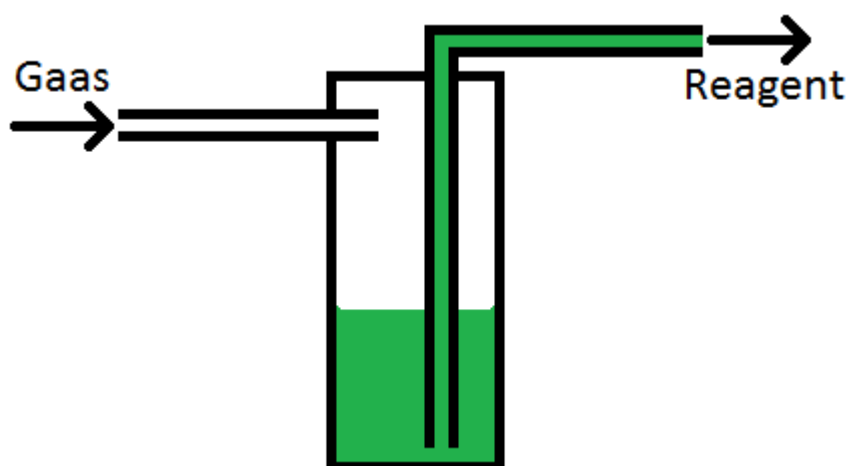
tänapäeval veel kättesaamatu, siis Tricorder on juba märksa maalähedasem aparaat. Nimelt toodeti juba kaheksakümnendatel aastatel esimene mikroskaala gaaskromatograafia kolonn [2], aidates inimkonna sammu võrra lähemale miniatuurisel skaalal toimuvale keemilisele analüüsile. Termin „mikrofluidika“ pakuti välja 1991. aastal Rootsi firma Pharmacia Biosensor AB poolt [3] ning sellesse valdkonda kuuluvate patentide ning teadustööde arv kahekordistub tänapäeval vähem kui kolme aasta tagant (joonis 1) [4].

Olgugi et mikrofluidika-alaseid seadmeid tootsid juba 2013. aastal üle saja ettevõtte [4] ning arvukate teadustööde käigus on tehtud olulisi edasiminekuid, on mikrofluidika alles lapsekingades. Põhjalikum arusaamine vedelike käitumisest mikroskaalal on tõstatanud uusi probleeme, mille olemasolust varem teadlikud ei olnud. Firma Qualcomm on välja pannud 10 miljonit USA dollarit eelmainitud Tricorderi välja töötajale. Tricorder X Prize'i võitmiseks peab kaasaskantav seade tuvastama 15 levinud haigust sama hästi või paremini, kui väljaõppinud arst [5]. Selle väljakutse lahendamisel on mikrofluidikal otsustav roll ning ühtlasi võime ka näha antud valdkonna potentsiaalset rakenduslikku kasu – inimestele (ja miks mitte ka muudele elusolenditele) lihtsa, kaasaskantava ja usaldusväärse seadmega diagnoosi andmine.

Mikrofluidika rakenduste hulka kuulub bioloogiliste katsetuste läbiviimine. Agresti *et al* [6] on arvutanud välja hüpoteetilise bioloogiaeksperimendi, mille käigus tuleb teha  $5 \cdot 10^7$

reaktsiooni, ajakulu ja maksumuse olukorras, kus katseid viib läbi tänapäevane robot *versus* olukorras, kus katsed viiakse läbi tilk-mikrofluidika meetodite abil. Ilmneb, et robotil kulub vajaliku töö tegemiseks 2 aastat ning 5000 L reagente, samas kui mikrofluidika meetodeid rakendades kulub samaväärsete katsetuste läbiviimiseks kõigest 7 tundi ja vaid 150  $\mu\text{L}$  reagente. Ka katsetuste hinnavahe on kolossaalne – robotiga nende katsete läbiviimine maksab kokku 15,81 miljonit USD, samas kui tilk-mikrofluidika seadmega tuleb kogu analüüsi hinnaks vaid 2,50 USD [6]. Seega on mikrofluidikal tohutu potentsiaal töömahukate ja palju korduseid nõudvate katsetuste läbiviimisel ning optimeerimisel.

Mikrofluidika eksperimentide läbiviimiseks on tarvis vedelikke liigutada. Üks kasutatavatest



Joonis 2. Vedeliku manipuleerimine gaasi rõhu abil.

meetoditest on vedeliku anumast pneumaatilise rõhu tekitamine [7], mida kirjeldab joonis 2. Rõhu toimel liigub reagent mööda voolikut dosaatorisse ning sealt edasi katsealusele. Selline vedeliku manipuleerimise meetod

on lihtne ning võimaldab vedeliku vooluhulka rõhu muutmisega reguleerida, sobides seejuures paljude vedelikega kasutamiseks, kuna pump ei puutu reagentiga kokku. Alternatiivsed välise kontrolli meetodid on vedelikureservuaari ruumala muutmine (süstalpumbad) ja vedelike vahetu manipuleerimine (peristaltilised ja piesoelektrilised pumbad) [8]. Kasutatakse veel ka mikrofluidikakiipide siseseid meetodeid nagu kapillaarjõud, elektriline märgamine, tsentrifuugimine ja integreeritavad pumbad. Antud töö raames käsitletakse ainult välise pneumaatilise rõhukontrolli seadmeid ja nende kasutamisest tulenevaid nõudmisi pumbamoodulitele.

Pneumaatilise rõhuga vedelike manipuleerimise juures on kriitilise tähtsusega rõhu tekitamise süsteemid ehk rõhugeneraatorid. Neid toodavad mitmed ettevõtjad, näiteks Elveflow [9], Fluigent [10], aga ka Tartu firma Fluika OÜ väljatöötatud ja Teadusmosaiik OÜ toodetav Fluika modulaarpump, mis on orienteeritud teaduslikku aparatuuri integreerimiseks ning eksperimentide kiireks ja lihtsaks läbiviimiseks [11]. Seade koosneb pumbamoodulist ning juhtelektronikast, mis on kõik paigutatud ühte kompaktsesse metallkorpusesse ning saab

oma toite arvuti USB-pesast. Sellise disaini oluline pluss on ulatuslik ühilduvus laiatarbeelektroonikaga, mis võimaldab pumba juhtimist personaalarvutist, kasutades seejuures levinud programme nagu LabVIEW või programmeerimiskeeli nagu Python. Fluika seeria pumbad ei vaja erinevalt mitmest konkureerivast tootest [12] [13] [14] välist rõhuallikat. Seadet müüakse ülemaailmselt läbi Suurbritannia ettevõtte Dolomite Microfluidics kaubamärgi Mitos Fluika all [15].

Käesoleva lõputöö eesmärk on ehitada seade, mille abil uurida ja võrrelda pumbamooduleid, millel on potentsiaali saada olulisimaks komponendiks järgmise põlvkonna Fluika laboratoorsete rõhugeneraatorite seerias üle- ja alarõhu tekitamise elementidena. Seadet hakatakse kasutama Teadusmosaiik OÜ tootearenduse protsessis. Tootearenduses huvipakkuvad pumbamoodulid on kataloogi järgi tellitavad ja suures mahus toodetavad seadmed, seega on igati otstarbekas kasutada valmislahendusi. Kuna aga mikrofluidika on veel arenev teadusala ning kõnealused pumbamoodulid on tootja poolt disainitud kasutamiseks muudes, levinumates seadmetes nagu gaasianalüsaatorid ja meditsiiniseadmed [16] [17], ei ole tellitavad pumbad tingimata sobivad antud mikrofluidika aparatuuris kasutamiseks.

Töö esimeses osas tehakse ülevaade ehitatava seadme soovitud funktsionaalsusest ning kirjeldatakse seadmes kasutatavate kriitiliste komponentide valimist. Teises osas kirjeldatakse seadme disainimise ja ehitamise ning tarkvara väljatöötamise protsessi ja tööpõhimõtet. Andmete kogumiseks ehitatakse Arduino mikrokontrolleri platvormil põhinev testskeem, mis pumbamooduleid juhib, ning mõõdetakse tekitatud üle- ja alarõhku. Andmete töötlemiseks koostatakse programm LabVIEW visuaalprogrammeerimise keskkonnas, mis võimaldab katse läbiviimise parameetreid kiiresti muuta ja uusi katseid välja töötada ka vähese programmeerimiskogemusega operaatoril. Töö kolmandas osas demonstreeritakse valmistatud seadme tööd erinevate tootjate pumbamooduleid võrreldes.

Lõputöö tulemusena on valminud seade, millega kiiresti, mugavalt, ohutult ja võimalusterohkelt katsetada läbi erinevaid pumbamooduleid. Karakteriseerimiseks vajaliku seadme abil arendatakse mikrofluidika aparatuuri ning selle aparatuuri abil tehakse katsetusi, mis aitavad loodetavasti tulevikus nii Tricorderi kui ka muude kasulike seadmete väljatöötamisele kaasa.

## 1 Pumbamoodulite karakteriseerija disainimine

Valmistatava seadme ehitamise aluseks on kriteeriumid, mis pandi paika Fluika seeria pumpade senisest spetsifikatsioonist lähtuvalt ja arutledes käesoleva töö juhendaja Tanel Ainlaga, kes juhib Teadusmosaiik OÜ-s Fluika pumpade tootearendust ning kelle juhitud meeskonna tööriistade hulka valmistatav seade kuluma hakkab.

### 1.1 Seadmele esitatavad nõuded

Ehitatava seadme abil peab saama hinnata järgmiseid parameetreid:

1. Piisav maksimaalne rõhk - kasutatav pump peab olema võimeline saavutama rõhuerinevuse atmosfäärirõhust minimaalselt 50 kPa<sup>1</sup> ülerõhumoodulis või -35 kPa alarõhumoodulis [18];
2. Piisav vooluhulk kogu rõhuvahemiku ulatuses – pumba abil peab 8 s jooksul [18] saavutama reservuaaris mahuga minimaalselt 10 ml soovitud rõhu eelmises punktis mainitud rõhkude vahemikus. Selle kriteeriumi täitmine eeldab kasutatava reservuaari suurusest sõltuvalt piisavat vooluhulka;
3. Võime käivituda rõhu vastu – kui pump on tekitanud reservuaari rõhu, takistab seadme pumbas rõhu poolt tekitatud jõud pumba käitava jõuallika (elektrimootori, lineaaraktuaatori vmt) liikumahakkamist. Inertsimomendi tõttu suudab elektrimootori jõul töötav pump saavutada rõhu, mille tingimustes seiskunud mootor enam liikuma ei hakka. Rõhu all käivitumise suutlikkus määrab seetõttu ära ka pumbamooduli praktilise kasutatava rõhuvahemiku;
4. Lekkimine - kui pump on tekitanud reservuaaris rõhu ning see seisatakse, võib pumba klappide kaudu rõhk läbi pumba reservuaarist tagasi atmosfääri lekkida. Lekke

---

<sup>1</sup> Antud töös viidatakse siin ja edaspidi rõhule atmosfäärirõhu suhtes. Positiivse väärtusega rõhk on ülerõhk, negatiivse väärtusega rõhk on alarõhk.



kompenseerimiseks on võimalik pumba osalise tootlikkusega töös hoida, kuid pumbamooduli valimisel on sellegipoolest vajalik teada selle lekkivust;

5. Mehaaniline vastupidavus – pumbamoodulid peavad töötama näiteks bioloogiaeksperimentides pidevalt terve ööpäeva vältel [19]. Seepärast on oluline võimalus pumbamoduleid nii ühtlase kui ka tsüklilise koormusega töös hoida saada, et uurida nende soorituse muutumist pideval kasutamisel.

Eelmainitud kriteeriumitele vastavuse uurimiseks on vajalik tarkvara, mis juhib pumpade tööd, kogub andmeid, salvestab ja töötleb neid, ning riistvara, mis võimaldab pumbamoduleid vastavalt tarkvara käskudele juhtida ja mõõta. Süsteemile tervikuna on seatud järgnevad nõuded:

1. Universaalsus – seadmega peab saama ühendada erinevaid pumbamoduleid, mis kasutavad erinevaid tööpingeid (3...12 V DC), juhtimismeetodeid (analoog ja digitaal) ning mille korpus on erineva suurusega (piirjuhud on leitavad lisast 1 – Uuritavate pumpade võrdlustabel andmelehtede järgi);
2. Täpsus – seadme mõõdetav tähtsaim füüsikaline suurus on rõhk ning rahuldavate andmete saamiseks peab seade suutma mõõta rõhku vahemikus -35...50 kPa minimaalse täpsusega +-300 Pa [18];
3. Sujuv reguleeritavus – pumbamooduli tootlikkust peab saama sujuvalt reguleerida täielikult välja- ja täielikult sisselülitatud olekute vahel, näiteks mootori juhtimisel pingereguleerimise või PWM signaali abil;
4. Ühilduvus – seade peab ühilduma Teadusmosaiik OÜ kontoris kasutatava Windows 7 operatsioonisüsteemiga PC-tüüpi arvutiga, kasutades soovitatavalt USB-liidest. Andmete kogumiseks ja analüüsiks kasutatavad programmid peavad olema sellised, millega seadme operaatoritel on kasutuskogemus, näiteks Pythoni või NI LabVIEW keskkondades koostatud programmid;
5. Kasutusmugavus – seade peab olema kasutatav erinevate operaatorite poolt ning seadme kasutamise selgeksõppimine ei tohiks võtta üle ühe tunni;
6. Kompaktsus – seade ei tohi võtta hoiustamisel asjatult ruumi;

7. Turvalisus – seade ei tohi olla kasutajale ohtlik elektriliselt ega mehaaniliselt ning seda peab saama hoiustada viisil, mis on ohutu nii kasutajale, keskkonnale kui ka seadmele endale;
8. Töökindlus – seade ei tohiks sisaldada kergesti purunevaid või veaohtlikke komponente. Kui nende kasutamine on õigustatud näiteks madala hinna või alternatiivide puudumise tõttu, peab komponent olema kergesti vahetatav;
9. Madal hind – võimalusel tuleks seadmes kasutada laialt kättesaadavaid, lihtsaid ja odavaid komponente, eeldusel, et ei tehta järeleandmisi käesoleva nimekirja eelnevates punktides.

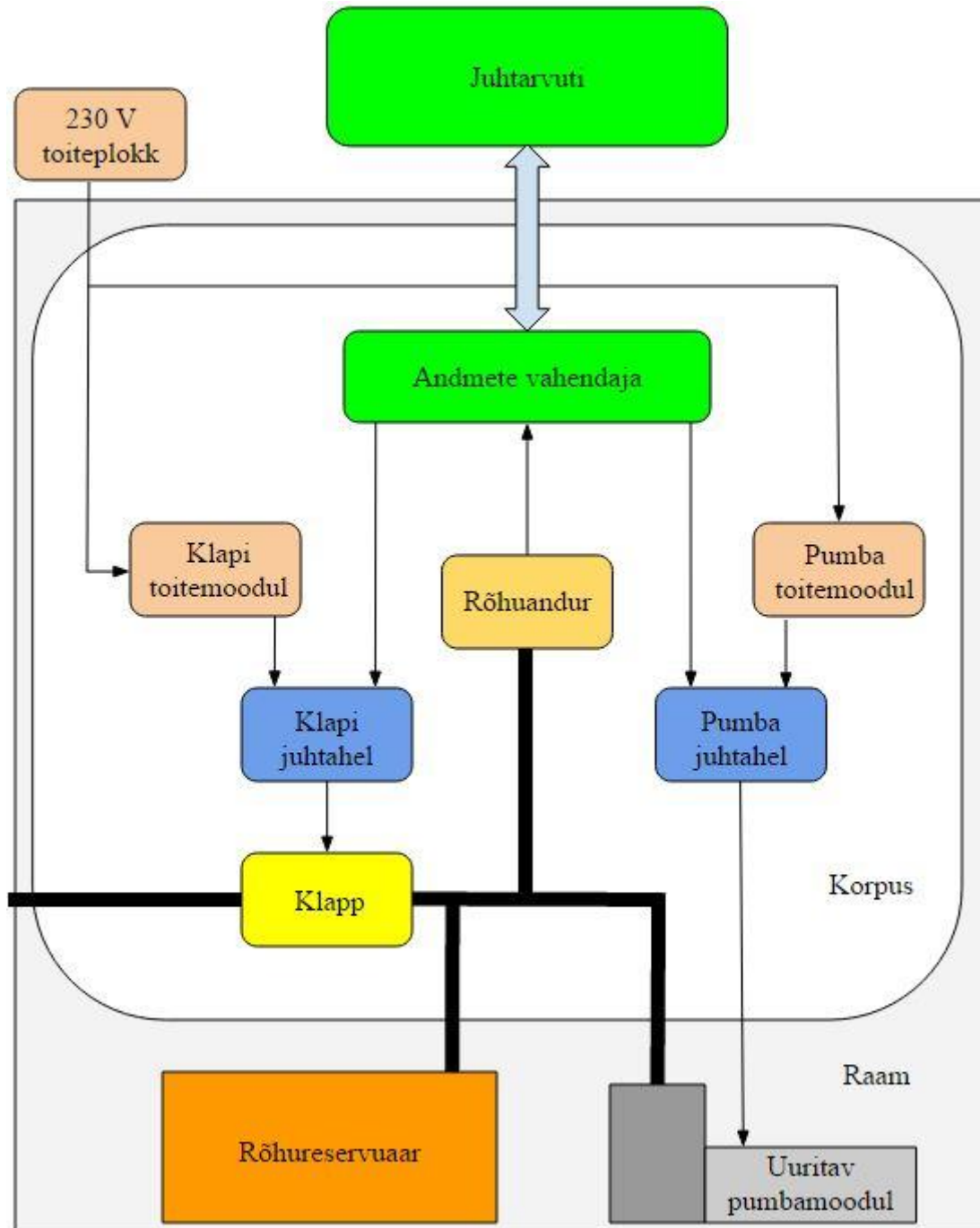
## 1.2 Riistvara disainimine

Pumbamoodulite karakteriseerimiseks vajaliku seadme riistvara koosneb järgnevatest põhisisüsteemidest:

- Andmete vahendaja, mis võtab juhtarvutilt vastu käsklusi, juhib nende abil pumpa ja rõhuklappi, mõõdab rõhuanduri abil rõhku ning edastab sensori mõõteandmed juhtarvutisse;
- Rõhuandur, mis mõõdab seadmega ühendatud reservuaaris olevat üle-ja alarõhku;
- Klapp, mille abil viia reservuaari rõhk võrdseks atmosfäärirõhuga;
- Võimsuselektronika, mis võimaldab käitada pumbamoodulit ja klappi vastavalt andmete vahendaja juhtimisele;
- Indikaatorelektronika, mis näitab seadme töökorda ning pumbamooduli ja klapi tööolekut;
- Toitemoodul(id), mille abil saavad vajaliku töövoolu pumbamoodul, indikaatorelektronika ja klapp;
- Korpus, mille sees on eelmainitud seadmed;
- Rõhureservuaar, mis on vahetatav või reguleeritav, et saaks läbi viia katseid erineva ruumalaga reservuaaridega;

- Pumbamoodul, mida uuritakse;
- Raam, mille külge kinnituvad korpus, rõhureservuaar ja pumbamoodul.

Joonisel 3 on kujutatud põhimõtteskeem, millel kajastuvad mainitud süsteemid. Järgnevad alapeatükid käsitlevad täpsemalt komponentide valikut, mille abil täita püstitatud eesmärgid.



Joonis 3. Ehitatava seadme põhimõtteskeem.

## 1.3 Komponentide valik

### 1.3.1 Andmete vahendaja

Pumpade karakteriseerija tähtsaim komponent on andmete vahendaja - see on kriitiliseks lülilik juhtarvuti, rõhuanduri, klapi ja pumba vahel. Pumpade edukaks juhtimiseks on vajalik analoog- või PWM-väljund; klapi sisse-välja lülitamiseks on tarvis digitaalset väljundit; rõhuanduri lugemiseks on vaja SPI/I2C ühenduvuse võimekust või 1 analoogsisendit ning arvutiga suhtlemise universaalsuse huvides peaks kontrolleri olema USB-liidesega.

Kaaluti kahte platvormi: National Instruments'i DAQ seadmed ning Arduino mikrokontrollerid. DAQ platvormi eeliseks on lihtne, töökindel ja dokumenteeritud ühenduvus LabVIEW keskkonnaga, millega kavatsetakse pumpade karakteriseerija juhtprogramm kirjutada, Arduino platvormi eeliseks on universaalsus - jadaporti andmesideks kasutades võib karakteriseerija juhtimine käia erinevate programmide kaudu (lisaks LabVIEW'le) ning ka erinevate operatsioonisüsteemidega arvutites [20]. Valik sai langetatud Arduino kasuks, sest selle ATmega328P protsessor toetab nii SPI kui I2C suhtlusprotokolle, omab 8 ADC kanalit ja PWM võimekust 6 kanalil [21], seejuures saab Arduino platvormiga ühilduva mikrokontrolleri osta vähem kui 2 EUR eest [22]. Analoogsisendiga DAQ hind on minimaalselt 163 EUR [23], SPI/I<sup>2</sup>C digitaalsuhtlust võimaldav DAQ seade maksab aga juba 500 EUR [24]. Lisaks on käesoleva töö koostajal DAQ seadmetest rohkem kogemust Arduino platvormiga ning plaan on nende seadmetega tööalaselt ka edaspidi tegeleda, seetõttu on Arduino kasutamisel antud töö raames ka ulatuslikum hariduslik väärtus.

### 1.3.2 Rõhuandur

Teine tähtis komponent pumpade karakteriseerijas on rõhuandur. Teadusmosaiik OÜ oli enne käesoleva töö tegemise algust katsetamiseks soetanud 4 erinevat rõhuandurit (Lisa 2 – Rõhuandurite võrdlustabel) ning andurite kõrge hinna tõttu [25] otsustati, et pumpade karakteriseerimise seadmesse ehitatav rõhuandur saab olema üks neist neljast. Valikut kitsendas vajadus mõõta nii üle- kui alarõhku, mistõttu jäi kõrvale Honeywell HSCDANT015PGSA5 rõhuandur, mis mõõdab ainult positiivset rõhku [26]. Täpsuse huvides sooviti kasutada digitaalsuhtlust Arduino ja rõhuanduri vahel (Arduino ADC resolutsioon on 10 bitti [27], rõhuandurite sisemine ADC konverter on 12-bitise [28] [26] resolutsiooniga, seega saaks Arduino ADC täpsust piiravaks faktoriks), mistõttu jäeti kõrvale Honeywell

TSCDRRN015PDUCV analoogväljundiga [29] rõhuandur. Valikusse jäänud kahes suunas kuni 100 kPa rõhku mõõtvaid digitaalandureid võrreldes jäi peale Honeywell HSCDAND015PDSA3, mis paistis silma tootja lubatud  $\pm 1\%$  täisskaalast maksimaalse koguvea [26] osas. Selle vea sisse on arvestatud nii anduri kuni  $\pm 0,5\%$  ebatäpsus lineaarsuse ja nullpunkti osas kui ka hüsterees, katse korratavus ja soojuslikud efektid, kusjuures temperatuurist tuleneva vea vähendamiseks on anduri sees eraldi termoandur, mille lugemi järgi kompenseeritakse rõhuväljundit [26]. Sensortechhnics HDIB001DUE8H5 rõhuanduri veaks on märgitud  $\pm 1,5\%$  täisskaalast [28].

### 1.3.3 Klapp

Rõhu ühtlustamiseks atmosfäärirõhuga katsete vahel tuleb kasutada õhuklappe. Ka neid on Teadusmosaiik OÜ varem katsetamiseks soetanud - valikus olid Parker X-2-05-L-F ja Koge KSV04A-3C miniatuursed solenoidklapid. Valituks osutus Parkeri klapp, mille tööpinge on 5 V ning millel on 1 sisend ja 2 väljundit (normaalselt avatud ja normaalselt suletud) [30]. See võimaldab valida tarbija ja väljalaske vahel. Koge klappil, tööpingega 3,3 V, on 1 sisend ning 1 normaalselt avatud voolikuühenduseta väljund [31], mis tähendab, et ülerõhk oleks alati lastud vaid klappi ümbritsevasse atmosfääri ning rõhu säilitamiseks peab klapp pidevalt pingestatud olema. Rohkemate ühendusvõimaluste tõttu otsustati kasutada Parker X-2-05-L-F klappi.

### 1.3.4 Toitemoodul

Kuna pumbamoodulid vajavad kuni 12 V toitepinget ja kuni 1 A toitevoolu (Lisa 1. Uuritavate pumpade võrdlustabel andmelehtede järgi), samas kui USB 2.0 liidese külge võib ühendada kuni 0.5 A voolutugevuse ja 5 V tööpingega tarbija [32], on pumpade karakteriseerija juures tarvis kasutada välist toidet. Selleks võeti kasutusele 12 V / 2 A seadmeväline impulsstoiteplokk. Otsustati, et kontrollelektronika kaitseks ja USB-liidese ülekoormuse vältimiseks ei ühendata USB-toiteahelasse ühtki seadet peale rõhuanduri. Honeywell HSCDAND015PDSA3 vajab 3,3 V toitepinget [26], mistõttu kasutati rõhuanduri toiteks Arduino mikrokontrolleri 3,3 V väljavõtet.

Klapi ja indikaatorelektronika käitamiseks 5 V toitepingega kasutati reguleeritavat DC-DC *step-down* tüüpi pingeregulaatori moodulit, mis põhineb XL4015E1 kuni 5 A

väljundvoolutugevusega [33] integraallülitusel. 3...12 V tööpingega pumbamoodulite käitamiseks kasutati teist samasugust pingeregulaatori moodulit.

## 2 Riistvara valmistamine

### 2.1 Elektroonikaskeemi koostamine

Järgnevalt käsitletakse elektroonikaskeemi disainimise protsessi moodulite kaupa. Elektroonikaskeemi disain tehti Eagle tarkvaraga. Paralleelselt elektroonikaskeemi disainimisega koostati valitud komponentidest jootevabale prototüübiplaadile (*breadboard*) elektroonikamooduli prototüüp, võimaldamaks soovitud funktsionaalsuse kohe ära katsetamise.

#### 2.1.1 Mikrokontroller ja rõhuandur

Esmalt paigaldati makettplaadile Arduino Nano mikrokontroller ning lisati sellele SPI suhtlusprotokolliga kasutatav Honeywell HSCDAND015PDSA3 rõhuandur. Arduino programmeerimiskeskonnas SPI teegi SPI.h kohaselt ühendati rõhuanduri ajastussignaali SCK, anduri signaaliväljund MISO ja anduri andmeside valimise signaaliks SS vaikimisi digitaalväljundid ehk vastavalt Arduino Nano kanalid 13, 12 ja 10 [34]. Kuna kasutatav rõhuandur kasutab 3,3 V tööpinget [26], ühendati Arduino väljundsignaalid SCK ja SS rõhuanduriga 30 kΩ ja 15 kΩ takistitest koostatud pingejagurite kaudu. Pingejaguri väljundpinge [35] on seega:

$$V_2 = V_1 \times \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = 3,33 \text{ V}$$

Katseliselt tehti kindlaks, et Arduino mikrokontroller aktsepteerib ka 3.3 V tasemel sisenevat MISO signaali, mistõttu ei olnud vajalik pingekonverteri lisamine rõhuanduri ja mikrokontrolleri vahele. See aga lihtsustas skeemi ning vähendas seadme lõpphinda. Mikrokontrolleri ja rõhuanduri elektriskeem on toodud lisas 3.

#### 2.1.2 Pumbamooduli toiteahel

Hilinenud tarne tõttu ei olnud prototüüpi koostades veel võimalik kasutada soovitud XL4015 integraallülitusel põhinevat toiteploki, mistõttu kasutati prototüübil MP1585EN integraallülitusel põhinevat 3 A väljundvoolutugevusega [36] toitemoodulit, mis reguleeriti 5

V väljundpingele. Toitemoodulile lisati pinge silumiseks 1000 $\mu$ F elektrolüütikondensaator ja 100nF keraamiline kondensaator nii sisend- kui väljundklemmide vahele. Sisendahelasse lisati valgusdiod, mis annab märku ühendatud ja töökorras vooluadapterist. Toiteahela prototüübi elektriskeem on toodud lisas 4.

### 2.1.3 Pumba juhtahel

Uuritavaid pumbamoduleid lülitatakse IRFU3504Z MOSFET abil. See autotööstuses kasutamiseks mõeldud väljaefekt-transistor suudab lülitada kuni 40 V pingega tarbijaid kuni 42 A vooluga [37]. Juhtiva transistori paisu ja läte vaheline takistus on 9.0 m $\Omega$  [37], mistõttu eraldub 2 A tarbimise (toiteadapteri maksimaalne voolutugevus) korral transistoril vaid

$$P = I^2 \times R = 36 \text{ mW}$$

soojuslikku võimsust.

Pumba sisse-välja lülitamiseks koostati MOSFET-lüliti [38], mille neel ühendati pumbamooduli pistiku negatiivsele klemmile (nr 1), läte toiteahela maandusklemmile ja pais läbi 200  $\Omega$  takisti mikrokontrolleri digitaalväljundile D3. Häirete vältimiseks ning transistori täieliku väljalülitumise tagamiseks ühendati Arduino D3 klemmi ja maanduse vahele veel 10 k $\Omega$  *pull-down* takisti. +5 V siini ja lülitatava maanduse vahele ühendati jadamisi 1 k $\Omega$  takisti ja sinine LED, mis süttib siis, kui pump on pingestatud. +12 V siini ja lülitatava maanduse vahele ühendati 1N4007 diod, mis piirab pumba elektrimootori kui induktiivse koormuse toite katkestamisel tekkiva pingepulsi kasvamist, vältides seeläbi MOSFETi kahjustamist [39].

Pumba ühendus on 3-positsiooniline Ninigi NS25 seeria pistik, kus 1. klemm on lülitatav maandus, 2. klemm +5 V toide pingeregulaatorist ning 3. klemm +12 V toide vooluvõrku ühendatud toiteadapterist. Seega sai prototüübiga juhtida 5 V ja 12 V pingega pumpasid ning pinge valimiseks oli pumbaga ühendatud pistik erinev. 5 V toitepingega pumba puhul kasutatakse pumba pistiku 1. ja 2. positsiooni, 12 V toitepingega pumba puhul kasutatakse pumba pistiku 1. ja 3. positsiooni. Pumba juhtahela prototüübi elektriskeem on toodud lisas 5.

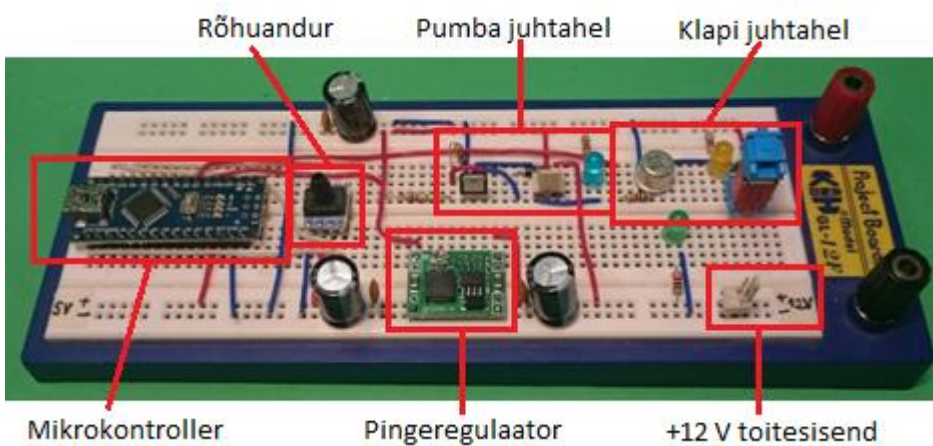


### 2.1.4 Klapi juhtahel

Rõhu mahalaadimise elektromagnetilise solenoidklapi lülitamiseks kasutatakse 2N1893 NPN-tüüpi bipolaarset transistori, mis suudab lülitada kuni 100 V tööpingega seadmeid kuni 500 mA vooluga [40]. Kasutatav Parker X-2-05-L-F klapp vajab lülitumiseks 150 mA voolu [30], seega on 2N1893 transistor antud rakenduseks sobiv. +5 V siini ja lülitatava maanduse vahele ühendati jadamisi 1 k $\Omega$  takisti ja oranž LED, mis süttib siis, kui klapp on pingestatud. +5 V siini ja lülitatava maanduse vahele ühendati ka 1N4007 diood, mis piirab solenoidklapi kui induktiivse koormuse toite katkestamisel tekkiva pingepulsi kasvumist, vältides seega transistori kahjustamist [39]. Klapi juhtahela prototüübi elektriskeem on toodud lisa 6.

## 2.2 Prototüüp

Joonisel 4 on kujutatud eelmises alapeatükis kirjeldatud disaini järgi koostatud elektroonikaskeemi prototüüpi. See elektroonikaskeem suudab juhtida PWM abil nii 5 V kui



12 V toitepingega pumpasid, lülitada sisse-välja pneumaatilist solenoidklappi, lugeda SPI liidesega rõhuanduri väärtuseid ning

vahendada arvutiga informatsiooni.

Joonis 4. Elektroonikaskeemi prototüüp.

## 2.3 Elektroonikaskeemi täiustamine

Prototüübiga katsetamine tõi ilmsiks mõned puudujäägid esialgses disainis, mis tuli püstitatud eesmärkide saavutamiseks kõrvaldada. Toiteahel peab võimaldama erinevate tööpingetega pumbamoodulite kasutamist, pumba juhtahel peab võimaldama lisaks tavaliste harjadega elektrimootoritega pumbamoodulite käitamisele juhtida ka Xavitechi digitaaljuhtimisega pumbamoduleid ning kuna seade ehitatakse plaanipäraselt korpusesse, tuleb skeemile lisada pistikuühendused toiteühenduse, pumbamooduli ühenduse ja indikaatorelektroonika jaoks. Järgnevalt kirjeldatakse tehtud muudatusi põhjalikumalt.

### 2.3.1 Toiteahel

Prototüübi üheks suuremaks miinuseks oli piiratud paindlikkus erinevate tööpingetega pumpade kasutamiseks. Lõplikus seadmes otsustati kasutada esipaneelilt kiiresti lülitatavat vähemalt nelja ettemääratava väärtusega toiteahelat pumbamoodulitele pluss fikseeritud 5 V toiteahelat indikaatoritele ja klapile. Mõlemad toiteahelad põhinevad XL4015 integraallülitusega toitemoodulil, mille elektriskeem on toodud lisas 8.

XL4015 impulsstoitemooduli väljundpinge seatakse takistitest tehtud pingejaguri abil valemi

$$V_{out} = 1,25 \times \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

järgi [33], kus  $V_{out}$  on väljundpinge,  $R1$  on integraallülituse pingetage tagasiside jala ja maanduse vahele ühendatud takisti väärtus ning  $R2$  on integraallülituse pingetage tagasiside jala ja väljundpinge vahele ühendatud takisti väärtus. Toitemoodulilt reguleerimispotentsiomeetri mahajootmisel selgus, et mitmepöördeliselt reguleeritav trimmerpotentsiomeeter on kasutusel reostaadina (jalad 1 ja 2 on trükkplaadil lühistatud) ning täidab toitemoodulil takisti  $R2$  funktsiooni. Seega võime luua reostaatide massiivi pingete astmeliseks lülitamiseks järgnevalt: 6 potentsiomeetri reguleeritavad klemmid (jalg 2) on omavahel kokku ühendatud ning toiteploki eemaldatud potentsiomeetri ühele klemmile ühendatud. Üks fikseeritud klemmidest (jalg 1) ühendati igalt potentsiomeetrilt DP6T lülitusega CKB6CBEA pöördlüliti [41] välisringil asuvatele klemmidele ning pöördlüliti ühine klemm ehk see, millega ühendatakse sõltuvalt lüliti asendist üks välisringi klemmidest, ühendati toiteploki eemaldatud potentsiomeetri vastasklemmile ehk pingejaguri toitepoolse takisti teisele otsale. Pöördlüliti erinevaid astmeid valides saab nüüd ühendada toitemooduli elektriskeemi reostaadi kohale erinevaid reostaate, mille väärtused on juba varem paika reguleeritud. Pöördlüliti kasutamine diskreetsete väärtuste valimiseks lihtsustab pumpade karakteriseerija kasutamist, kuna sobiva toitepinge saab väga kiiresti valida. Toitepinged reguleeriti käesoleva töö raames uuritavate pumpade nimipingetele 3,0 V, 5,0 V, 6,0 V ja 12,0 V (vt lisa 1). Pöördlüliti käik piirati komplektis olnud spetsiaalse stopperrõngaga [41] 4 astme peale, ehkki potentsiomeetreid ühendati lülitiga kokku 6. Vajadusel saab stopperrõnga asendit hiljem muuta ning ka hetkel tarvitusele võtmata jäänud 2 asendit seeläbi kasutatavaks muuta. Kuna antud pöördlüliti on *break before make* [41] ehk enne ühendust katkestavat tüüpi, ei ole lülituse tegemise hetkel toiteploki ühendatud ükski reostaat ning pingejaguri väljundpinge

arvutamise valemi kohaselt on takisti R2 ühendamata jätmisel (ideaaltingimustes seega lõpmatu väärtuse korral) ka pinge lõpmatu. Tegelikult seab aga piiri seadmega ühendatud toiteploki mõõdetud väljundpinge 12,4 V, millest ülespoole pinge ei tõuse. Mainitu tähendab, et pumba tööpinge ümberlülitamisel tõuseb pinge pumbamooduli toiteahelas hetkeks kuni 12 V-ni ja kahjustuste vältimiseks madalamat toitepinget kasutavatele pumpadele ei tohi lülitusi teha katsete käigus ehk töötava pumbaga. Seisva pumba ehk mittejuhtiva MOSFETi korral ei läbi pumba toitevool ja seega ei tee hetkeks nimipingest kõrgemale tõusev pinge pumbale kahju.

Skeemi lisati ka ühendus LED-indikaatori jaoks ning ühendus voltmeetri jaoks. Voltmeeter annab kasutajale selge info pinge reguleerimise lüliti hetkeasendist, vähendades seeläbi vale pinge valimise ohtu. Kasutatav voltmeeter on 0,1 V resolutsiooniga ning saab toite mõõdetavast vooluahelast [42], mistõttu on vaja ühendada vaid 2 juhet. Voltmeetri täpsus pole kriitiline, sest pinged reguleeritakse paika täpsemaid mõõteseadeid kasutades - voltmeeter on vaid indikaatoriks kasutajale. Täiustatud toiteahela elektriskeem on toodud lisas 7.

### **2.3.2 Pumba juhtahel**

Reguleeritava pumba toitepinge kasutuselevõtmiseks modifitseeriti esialgset pumbamooduli juhtahelat. Reguleeritav toide ühendati pumba ühenduse, 3 positsiooniga NS25 plaadile joodetava pistiku, 3. klemmiga. Transistoriga lülitatav maandus ühendati pistiku 2. klemmile ning pistiku 1. klemm ühendati toiteahela maandusega. Skeemi lisati ka ühendus LED-indikaatori jaoks.

Põhjuseid muudatusteks on kaks. Esiteks muudeti toiteahelat selliseks, et pumbamooduli toide tuleb ühest reguleeritavast toiteploki ning seetõttu ei ole enam tarvidust erinevate asetustega toitepesade kasutamiseks. Teiseks on vaja moodust Xavitechi digitaaljuhtimisega pumpade kontrollimiseks, mis käivituvad, kui pumba ühenduskaabli I/O X klemm on ühendatud maandusega või jäetud ühendamata. Pump seiskub, kui I/O X klemmile rakendada 2,8...3,3 V pinge [17] [43].

Lülitatava maandusklemmi külge ehitati Xavitechi pumpade seiskamiseks pingejagur, mis tekitab 5 V pumba tööpinge (mis on Xavitech P200-GAS-05 ja V200-GAS-05 pumpade tööpinge [17] [43]) korral sellele klemmile transistori mittejuhtivas olekus

$$V_2 = V_1 \times \left( \frac{R5}{R3 + R5} \right) = 3,11 V$$

pinge [35]. See pingejagur ei mõjuta pumbamootorite tööd, kuna IRFU350 transistor suudab lülitada kuni 42 A voolu [37] ning selle pingejaguri põhjustatud lekkevool kuni

$$I_{sees} = \frac{U_{max}}{R3} = 6 mA$$

on transistori lülitatavast maksimumvoolust oluliselt väiksem. Väljalülitatud olekus jookseb aga läbi takisti R5 toiteahela maandusesse kuni

$$I_{väljas} = \frac{U_{max}}{R5} = 3,6 mA$$

suurune lekkevool, mis ei ole piisav ühegi uuritava pumba soovimatuks käivitumiseks (vt lisa 1).

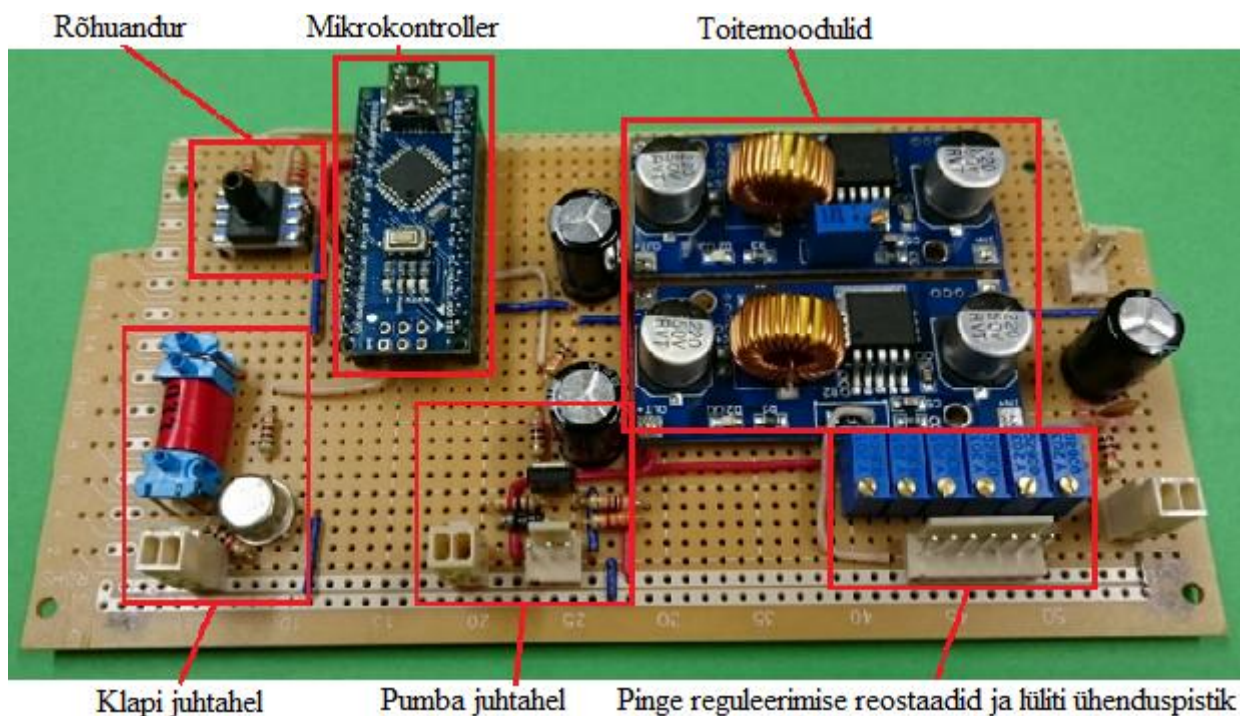
Otsustati, et pumba liideseks elektroonikamooduli välisseina külge saab 5,5/2,1 mm silinderpistikühendus. Erinevalt NS25 ühendusest, millel on ühendamata pesa korral klemmid katmata [44], ei ole 5,5/2,1 mm pesa kui pingestatud elementi selle standardi puhul võimalik juhuslikult lühistada (näiteks mõne töölaual leiduva metallist tööriistaga) ja seeläbi tõuseb seadme ohutus. Täiustatud pumba juhtahela elektriskeem on toodud lisas 9.

### 2.3.3 Klapi juhtahel

Prototüübi klapi juhtimise süsteem töötas sobival ja seda ei modifitseeritud oluliselt. Lisati vaid ühendus LED-indikaatori jaoks. Täiustatud klapi juhtahela elektriskeem on toodud lisas 10.

## 2.4 Valmis elektroonikaskeem

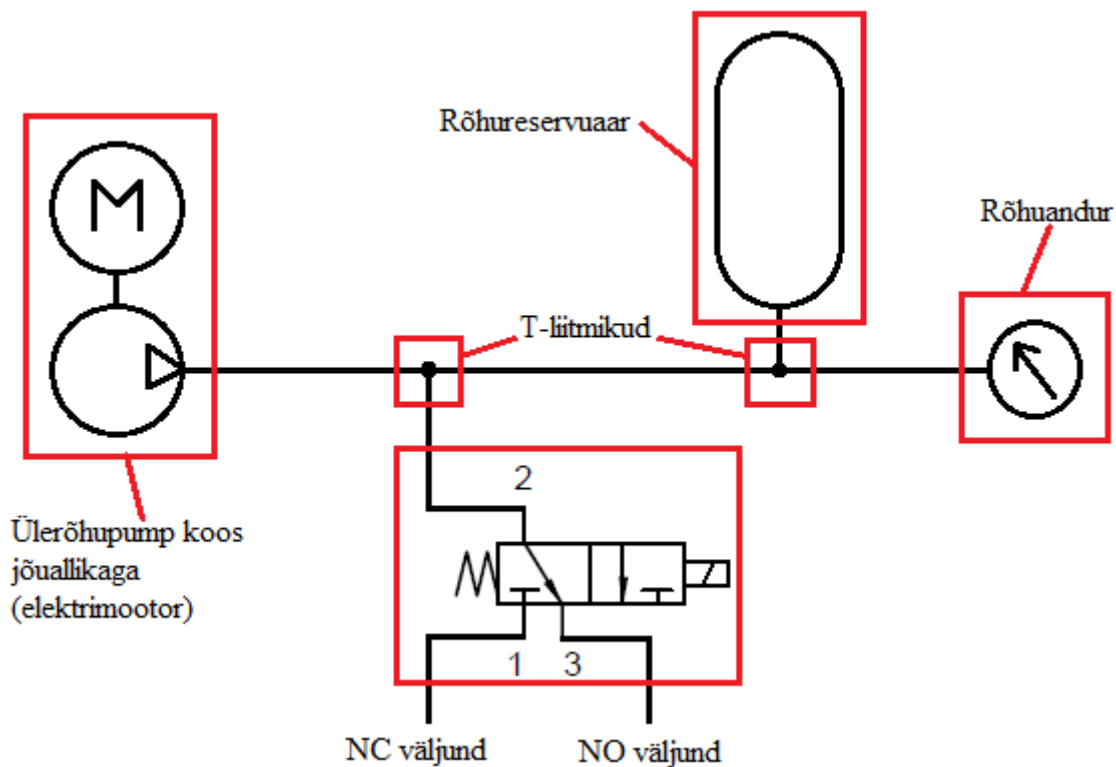
Pumbamoodulite karakteriseerimise seadme elektroonika koostati üksikute jooteplatjadega makettplaadile, võimaldamaks elektroonika hilisemat modifitseerimist ja täiustamist. Joonisel 5 on kujutatud valmishitatud elektroonikaskeemi.



Joonis 5. Valmishitatud elektroonikaskeem.

## 2.5 Pneumatikaühendused

Tööolekus on õhku pumpava pumbamooduli uurimiseks tarvilik elektroonikaga ühendada pneumaatikaskeem. See koosneb rõhureservuaarist, klapist, uuritavast pumbast ning rõhuandurist. Kõik seadmed peavad olema ühise rõhuliiniga ühendatud ning lekete vähendamiseks kasutatakse minimaalset komponentide kogust. Kuna kasutatav Parker X-2-05-L-F solenoidklapp on 2-asendiline ja 3 pordiga [30], saame süsteemi rõhuliini klapi ühisesse (COM) porti ühendades valida kahe väljalaske (ülerõhu korral; sisselaske alarõhu korral) vahel, millest üks on normaalselt avatud (NO) ja teine normaalselt suletud (NC). Mõlemad väljundid otsustati tuua seadme esipaneelile, et operaatoril oleks vajadusel võimalik lisada näiteks kägiventiiil normaalselt avatud porti, simuleerides sellega pumbamooduli tekitatud rõhu tarbimist mikrofluidika eksperimendis. Pneumaatikaskeemi kirjeldab joonis 6.



Joonis 6. Pumpade karakteriseeriya pneumaatikaskaem.

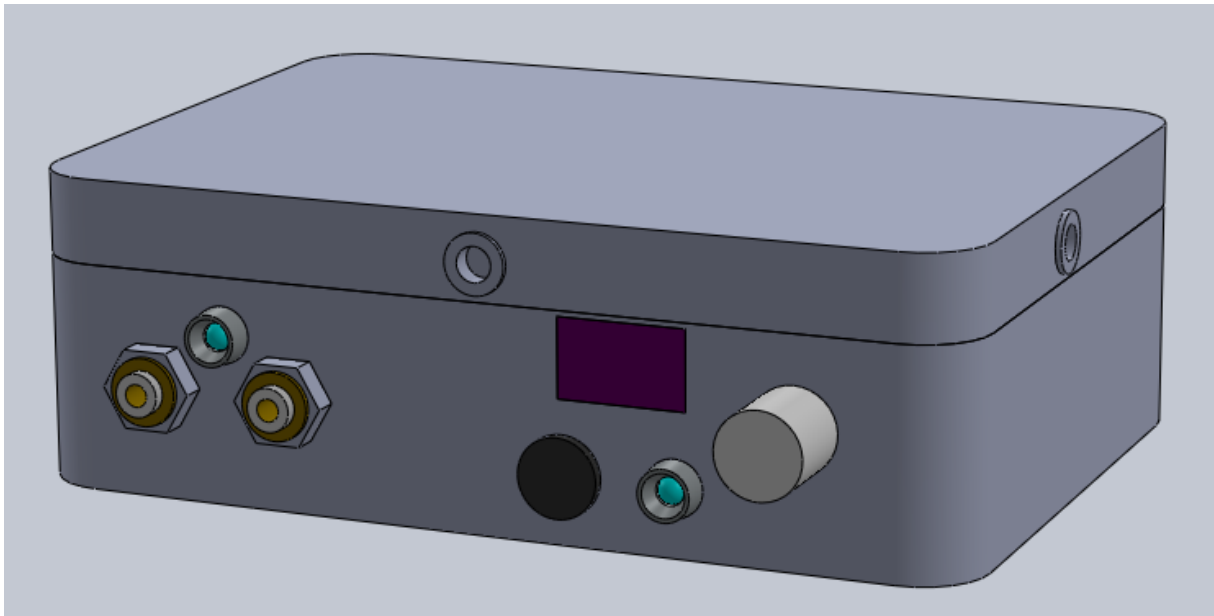
Seadmete ühendamisel kasutati kolme sorti voolikuid:

1. 3,5 mm väliläbimõõduga, 1,5 mm siseläbimõõduga läbipaistev värvitu silikoonvoolik, mida saab ühendada solenoidklapi portidele;
2. 4,0 mm väliläbimõõduga, 2,5 mm siseläbimõõduga läbipaistev sinine polüuretaanvoolik, ühendamiseks SWC KQ2 seeria Y-jagajate, paneeli läbiviikude ning kahe 4 mm ja ühe 6 mm ühendusega T-liitmikega;
3. 6,0 mm välisläbimõõduga, 4,0 mm siseläbimõõduga läbipaistev värvitu PVC-voolik, ühendamiseks rõhuanduri ja pumbamoodulite portidega ning SWC KQ2 seeria kahe 4 mm ja ühe 6 mm ühendusega T-liitmikega.

Pneumaatikaskaemi valmishitamisel koostati üleminekuid ühelt voolikusuuruselt teisele, surudes võimalusel väiksema vooliku jämedama sisse, ning paigaldades liitekohta peale sobiva mõõduga termokahaneva rüüsi.

## 2.6 Elektroonikamooduli valmishitamine

Kasutaja, keskkonna ja seadme kaitsmise huvides elektriliste ja mehaaniliste ohtude eest ehitati kirjeldatud alammodulid 170x120x55 mm välismõõtmetega elektroonikakarbiku sisse. Alammodulid joodeti kokku makettplaadile, mis kinnitati M3x6 poltide abil karbiku põhjas asuvate keermestatud tugede külge. Et vältida makettplaadi kahjustumist või vastu karbi põhjas olevate metallist kinnituskruvide päid puutumist, lisati plaadi nurkadesse plastmassist toed. Solenoidklapp kinnitati makettplaadile toitejalgade kinnijootmise teel ning klapi kere teise otsa lisati kahe pneumaatikapordi vahele traadist detail, mis joodeti otstest mehaanilise tugevuse saavutamiseks trükkplaadi külge. Sellist kinnitusmeetodit on kirjeldatud ka Parker X-2-05-L-F andmelehes [30]. Makettplaadi koostamisel paigutati alammodulid eraldi aladele ning jäeti ka vaba ruumi, võimaldamaks soovi korral tulevikus lisada näiteks teise pumba kontrollkanali. Joonisel 7 on kujutatud Solidworksi tarkvaraga koostatud mudel, mille koostamise käigus sätiti paika komponentide paigutus karbikul. 3D modelleerimine aitas lisaks ergonoomilise ja arusaadava kasutajaliidese disainimisele veenduda, et paigaldatavad komponendid paigutuvad sobivalt seadmesse.

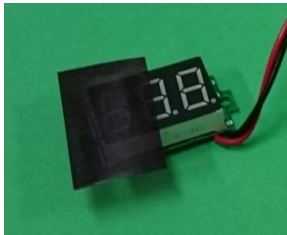


Joonis 7. Elektroonikamooduli ümbrise disain.

Et kasutajal oleks ülevaade pumpade karakteriseerija tööst, lisati seadmele 3 indikaatorit: pingestatud toiteahela kontrolltuli, pingestatud pumba kontrolltuli ning pingestatud solenoidklapi kontrolltuli. Indikaatoriteks kasutati 5 mm valgusdioode, mis kinnitati paneelile spetsiaalsete hoidikute abil. Kasutaja jaoks on oluliseks infoallikaks veel paneelivoltmeeter,



mis näitab pumbamoodulitele tööolukorras rakendatavat pinget. Parema loetavuse huvides tõsteti LED-ekraani kontrastsust, kattes voltmeetri ekraani tumelilla prožektorifiltriga. Ekraani kustunud segmente on läbi filterkile vähem näha (joonis 8), samas kui põlevad segmentid paistavad inimsilmale selgelt eristuvatena (joonis 9). Paneelivoltmeeter fikseeriti esipaneeli saetud süvisesse kuuma liimi abil.



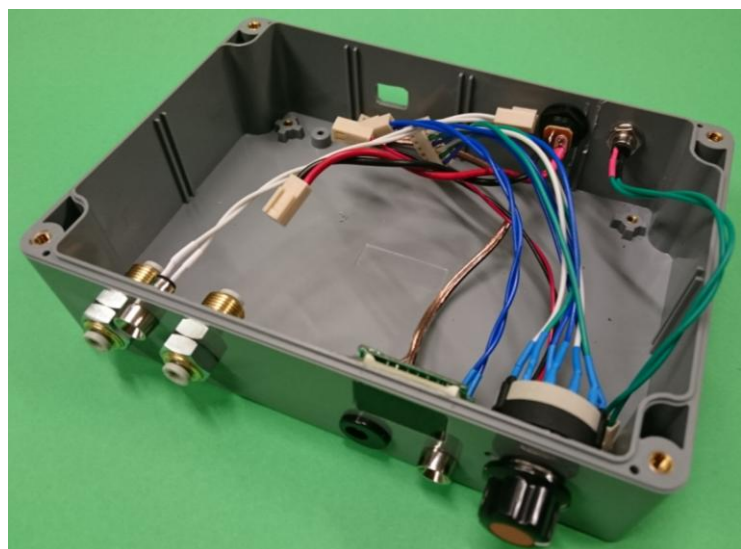
Joonis 8. Lilla prožektorifiltri efekt LED-ekraani kustunud segmentide varjamisel.



Joonis 9. Paneelivoltmeetri ekraan lilla prožektorikilega tööolukorras.

Karbiku tagapaneelile paigaldati toiteadapteri pistikuühendus ja pingestatud toiteahela indikaator ning saeti avaus Mini-USB kaabli ühendamiseks. Indikaatorituli ja toitepesa fikseeriti karbi külge ning need ühenduvad elektroonikaplaadiga NINIGI NS25 seeria pistikuühenduste abil, mis on mõeldud kuni 3 A voolutugevuse edastamiseks [44]. Mini-USB pesa asub Arduino Nano mikrokontrolleri küljes, ent plaadi ülesehitus on disainitud selliselt, et Mini-USB kaabel on ühendatav ilma täiendava ülemineku või vahekaablita. Tagapaneelile lisatud komponentide elektriskeem on toodud lisas 11.

Karbiku esipaneelil on klapi ja pumba pingestatuse indikaatorid, pumba toiteühenduse pesa, voltmeeter ja pumba tööpinge valimise pöördlüli. Kõik esipaneeli elektriseadmed ühendati elektroonikaplaadile NINIGI NS25 seeria pistikuühenduste abil. Seega on võimalik elektroonikaplaadi lahtiühendamine

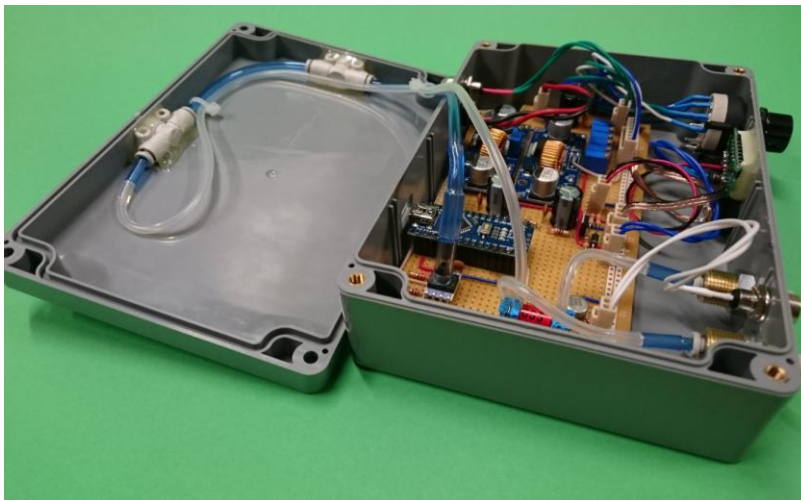


Joonis 10. Valmis karbik koos paigaldatud lisadega.

karbiku külge paigaldatud komponentidest, mis teeb lihtsamaks elektroonikamooduli



lahtimonteerimise ja vajadusel täiustamise. Esipaneelile paigaldatud elektriseadmete elektriskeem on toodud lisas 12. Esipaneelile paigaldati ka pneumaatikaläbiviigud, millega ühendati seestpoolt klapi normaalselt avatud ja normaalselt suletud väljundid. Sellega tagati kerge ligipääsetavus pneumaatikasüsteemi väljunditele. Joonisel 10 on kujutatud kokkumonteeritud kaaneta karbik. Normaalselt avatud kanalisse ühendati spetsiaalne sulgur, imiteerimaks tarbimise puudumist ja lekkekindlalt ühendatud, ruumalatut tarbijat. Vajadusel saab sellesse läbiviiku ühendada muu tarbija.

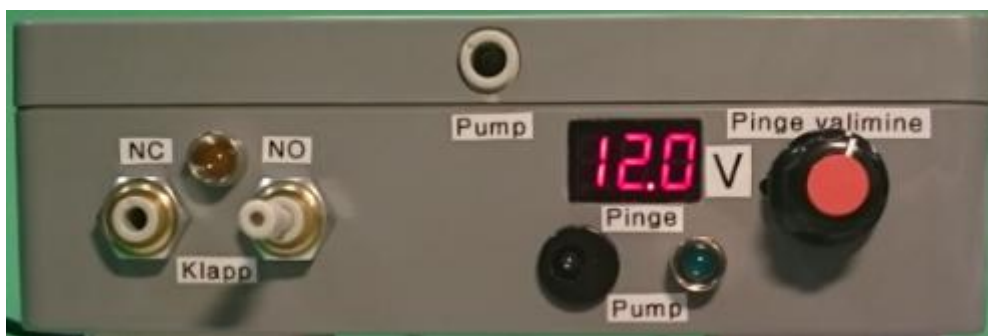


Joonis 11. Elektroonikamoodul koos pneumaatikaühendustega.

Karbiku kaane sisse puuriti augud kahe SWC KQ2 seeria T-liitmiku (kahe 4 mm ja ühe 6 mm ühendusega) jaoks ning fikseeriti liitmikud karbiku kaane külge kuuma liimiga (joonis 11). Karbiku esiküljele jääv ühendus on pumbamooduli 6 mm välisläbimõõduga pneumovooliku tarvis, küljele

jääv ühendus on reservuaari ühendamiseks 6 mm välisläbimõõduga vooliku abil.

Karbiku külge monteeritud ühendused, indikaatorid ja lüliti märgiti kasutusmugavuse huvides prinditud siltidega. Joonisel 12 on kujutatud seadme esipaneeli koos märgistustega.



Joonis 12. Elektroonikamooduli esipaneel.

## 2.7 Muudetava ruumalaga reservuaari ehitamine

Kuna ehitatava seadme abil peab saama karakteriseerida erinevaid pumpe, millel on ka erinev tootlikkus, on paslik kasutada ka erineva suurusega reservuaare. Liiga väikese reservuaari korral on väga keeruline soovitud rõhku saavutada ja hoida. Väikese tootlikkusega pumbamooduli kasutamisel suure rõhureservuaariga võtab aga soovitud rõhu saavutamine otstarbetult kaua aega. Seetõttu on soovitav võimalus ühendada seadmega erinevaid reservuaare.

Väga lihtsa ja teadaoleva ruumalaga reservuaari saab süstla soovitud asendisse kuuma liimiga

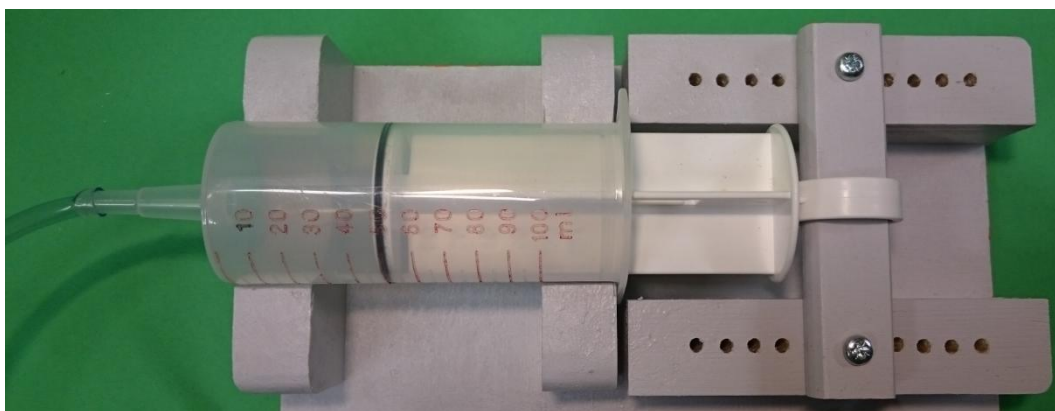


Joonis 13. 20 ml süstlast ehitatud rõhureservuaar.

fikseerimisel. Joonisel 13 kujutatud seade ehitati koos elektroonikaprototüübiga 20 ml süstlast ning kasutati Schwarzer Precision SP 550 EC pumbaga katsetamisel. Süstla otsa on liimitud kaks lisaotsikut, mille tulemusena sai selle reservuaariga ühendada korraga nii pumba, rõhuanduri kui ka klapi. Seadme

miinuseks oli aga fikseeritud mõõt - muu ruumala juures katsetuste läbiviimiseks pidi uue seadme tootma.

Seetõttu projekteeriti 100 ml süstlast muudetav reservuaar. Kriteeriumid muudetavale reservuaarile on järgmised: reservuaari peab saama reguleerida maksimaalselt 20 ml sammuga, reservuaar peab olema katse lihtsama läbiviimise huvides alusele kinnitatud ning süstal peab kahjustada saamise korral olema kergesti vahetatav.

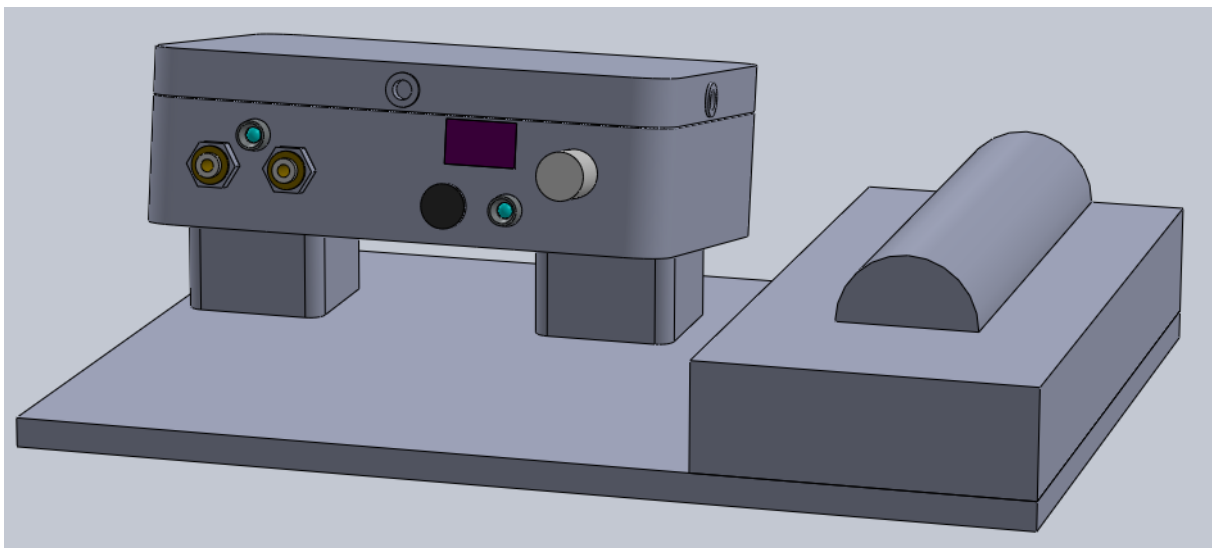


Joonis 14. 0...100 ml muudetava ruumalaga reservuaar.

Mainitud juhistest lähtudes ehitati valmis joonisel 14 kujutatud reguleeritav rõhureservuaar. Selle ruumala on valitav 0...100 ml 10 ml sammuga. Süstal kinnitub alusele vaid ühe puidukruviga, mis läheb läbi süstla tagaosas oleva kõrva. Süstla kolvi otsas on aas, millest on läbi pandud selleks otstarbeks ehitatud kasevineerist detail. Selle detaili otstes on 4,4 mm augud, millest saab läbi panna M4×50 poldid. Poldid lukatakse raami küljes asuvatesse pakkudesse, kuhu on puuritud 4,2 mm augud. Aukude samm on 8 mm, sama, mis mõõdeti süstla 10 ml jaotiste vahekauguseks. Ruumala muutmiseks tuleb eemaldada pesadest kaks polti, ühendada pneumaatikaliitmikust lahti reservuaari ühendusvoolik, sättida reservuaari ruumala soovitud väärtusele ning sisestada poldid tagasi oma pesadesse.

## 2.8 Raami ehitamine

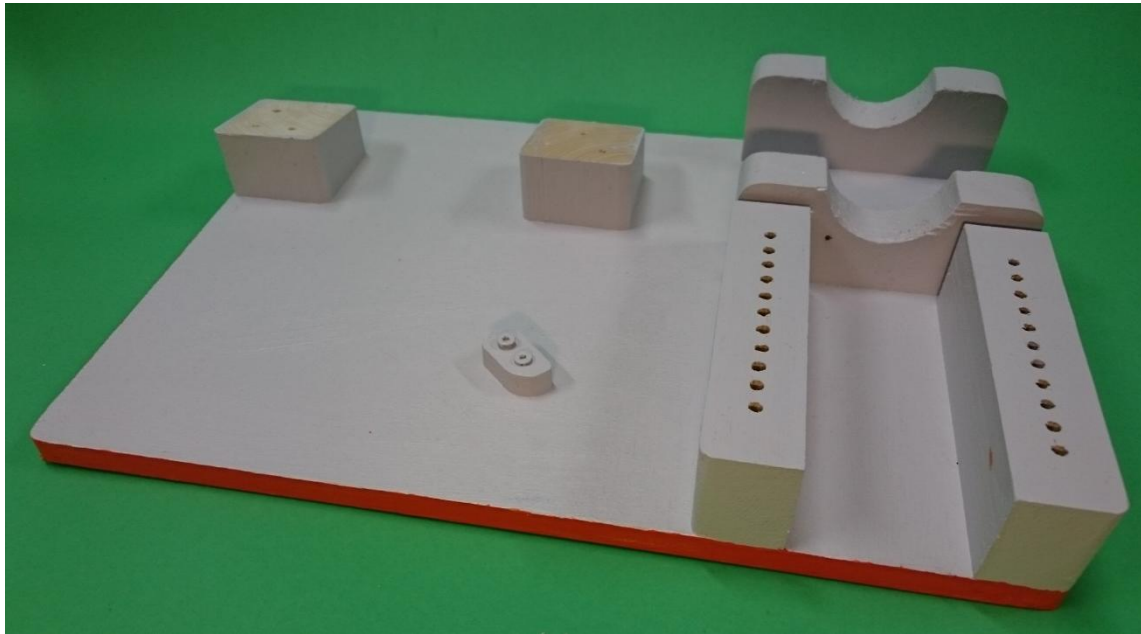
Kogu riistvara peab kinnituma ühisele raamile/alusplaadile, et katseseade oleks ohutu, mugav käsitleda, visuaalselt hallatav ja näeks esteetiline välja. Pumpade karakteriseerimise seadmele disainiti ja ehitati alusplaat, millele on kinnitatud elektroonikamoodul ja rõhureservuaari moodul. Joonisel 15 on kujutatud Solidworks tarkvara abil koostatud lihtsustatud mudel alusplaadist koos elektroonika- ja rõhureservuaari moodulitega.



Joonis 15. 3D disaini programmi "Solidworks" abil koostatud seadme alusraami virtuaalne kavand.

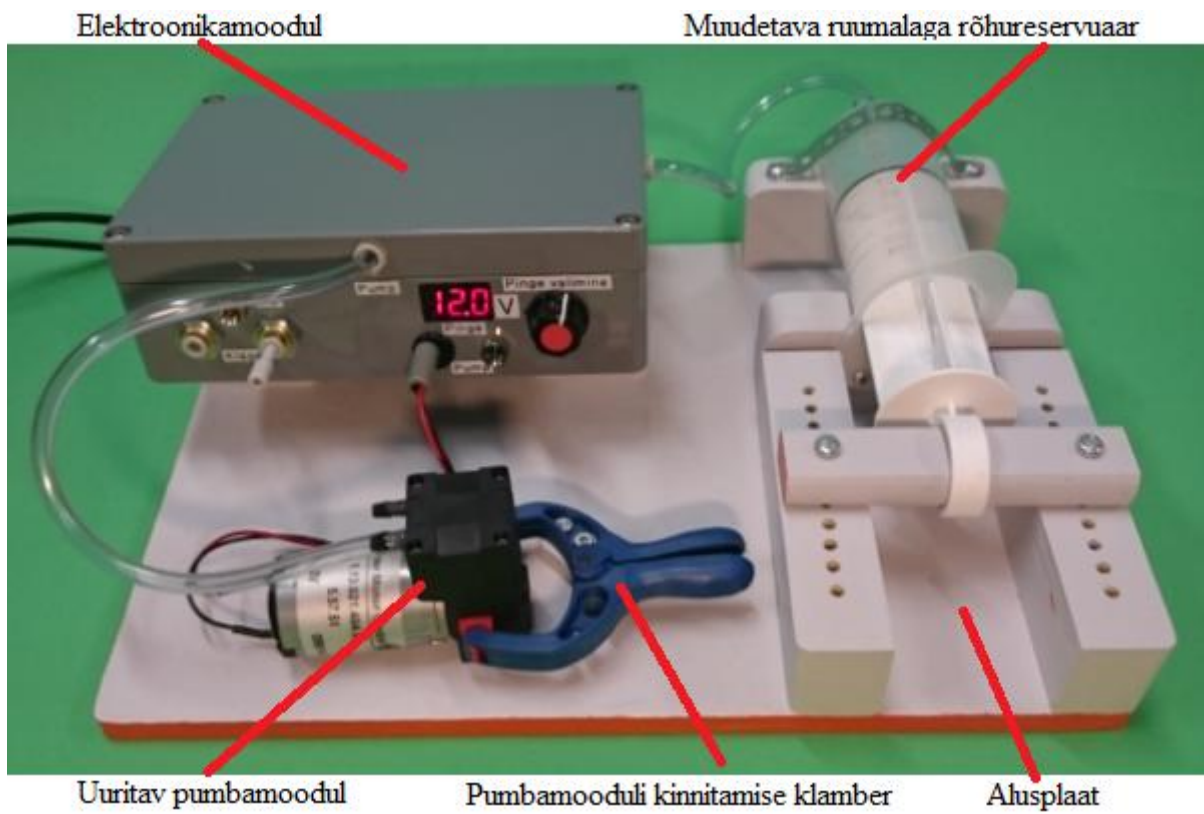
Pumbamoodulite karakteriseerimise seade otsustati ehitada 10 mm kasevineerist alusplaadile, kuna see materjal on piisavalt jäik, kergesti töödeldav ja värvitav ning laialdaselt kättesaadav. Alusplaadile jäeti suurima uuritava pumba järgi ruumi varuks ning lisati plaadile kinnitusklamber. Uuritava pumba saab kinnitusklambriga, mille üks haaradest on plaadi külge kinnitatud, katseseadme alusplaadile fikseerida. See teeb katsete läbiviimise kergemaks, kuna

töötav pump on kindlalt ühe koha peal paigal ega saa laua peal vibratsiooni tõttu ringi liikuda. Lisaks võib värisedes hüpleva pumba sooritus olla madalam kui fikseeritud pumbal ning on ka oht, et lahtine pump saab mehaaniliselt kahjustada. Alusplaat värviti halliks, mõned detailid oranžiks. Joonisel 16 on kujutatud valmis alusplaat.



**Joonis 16. Seadme alusplaat pärast värvimist.**

Elektroonikamooduli alla lisati kõrgendused, mis võimaldavad seadme kasutajale parema ülevaate seadme esipaneelist. Joonisel 17 on pumpade karakteriseerimise seade valminud kujul ja tööolekus, katseasendisse ühendatud pumbamooduliga.



Joonis 17. Valmishitatud pumbamoodulite karakteriseerimise seade.

### **3 Tarkvara disainimine**

Kuna pumbamoodulite testseade sisaldab mikrokontrollerit, on vaja andmete kogumiseks luua kaks programmi: mikrokontrollerile ja juhtarvutile. Need programmid hakkavad omavahel suhtlema ning seeläbi vastavalt operaatori soovidele andmete kogumist teostama. Sarnaselt riistvara disainimisele viidi ka tarkvara disain läbi astmeliselt, lisades süsteemile täiendavat funktsionaalsust. Käesolev peatükk käsitleb tarkvara väljatöötamise samme ning kirjeldab nii Arduino Nano kui ka juhtarvuti juhtprogrammide talitust.

#### **3.1 Juhtarvuti tarkvara**

Pumbamoodulite karakteriseerimise seade suhtleb juhtarvutiga üle USB-liidese, edastades infot jadapordi kaudu. Andmeedastuskiirus on reguleeritav vahemikus 300...115200 bit/s, soovitud väärtus määratakse Arduino programmis [45].

Juhtarvuti programm peab teostama järgmisi ülesandeid:

1. Käskude andmine pumbamoodulite katseseadmele jadapordi kaudu;
2. Info vastuvõtmine pumbamoodulite katseseadmelt jadapordi kaudu;
3. Kasutaja sisestatud ja riistvaralt saadud info põhjal andmete töötlemine;
4. Seadme operaatoril graafilise kasutajaliidese abil testide läbiviimise võimaldamine;
5. Katsetulemuste graafiline esitamine;
6. Katsetulemuste taasesitamist võimaldaval kujul salvestamine.

Juhtprogrammi koostamiseks kaaluti LabVIEW visuaalprogrammeerimiskeskonda ja ka eraldi programmi koostamist Java või Python programmeerimiskeeles. Käesoleva töö autori eelneva õppe- ja töökogemuse põhjal otsustati LabVIEW platvormi kasuks. LabVIEW tarkvara eelisteks on laiapõhjaline sisseehitatud funktsionaalsus andmeside juhtimiseks, andmetöötamiseks ja graafilise kasutajaliidese loomiseks. See tarkvara on Tartu Ülikoolil ka ametliku ja hariduslikul eesmärgil kasutamist lubava litsentsiga olemas [46].

### 3.1.1 Rõhu lugemine

Tarkvara disaini esimeses faasis koostati programm, mis ühendus elektroonikaprototüübi Arduino Nano mikrokontrolleriga ning luges sellega ühendatud rõhuanduri väärtusi.

Arduino programm töötab järgnevalt: programmis seati üles SPI protokolliga kasutatav digitaalsuhtlus Arduino Nano ja Honeywell HSCDAND015PDSA3 rõhuanduri vahel. Juhinduti ametlikust Arduino SPI protokolliga kasutamise juhendist [34] ning rõhuanduri suhtlusprotokolliga kirjeldavast infolehest [47]. Rõhuandurisse kirjutatakse käskudega

```
byte bait1 = SPI.transfer(0);  
byte bait2 = SPI.transfer(0);
```

kaks tühja baiti, kuid kuna rõhuandurisse info saatmiseks vajalik MOSI (*Master Out Slave In*) ühendus ei ole riistvaras tehtud, ei jõua info rõhuandurini. Seega võib Arduino välja saata ükskõik millise üksiku baidi. Alamseadme valimise kanali (*Slave Select*) madalasse olekusse kirjutamisega aktiveeritakse rõhuandur, mis vastab neile päringutele mõlemal korral 8 infobitiga. Esimene bait algab kahe diagnostikabitiga, mis on tavakasutuses nullid; sealt edasi väljastab rõhuandur 6 suuremat bitti (bitid [13:8]) rõhuanduri lugemist. Teine bait sisaldab 8 järgmist bitti rõhuanduri lugemist (bitid [7:0]) [47]. Ühendades saadud 2 baiti käskudega

```
baidid = bait1;  
baidid = baidid << 8;  
baidid |= bait2;
```

saame tulemuseks 14-bitise täisarvu vahemikus  $0 \dots 2^{14} - 1$ . Sellest vahemikust 10% ehk 1638 lugemist tähistab anduri mõõtepiirkonna miinimumi (kasutataval anduril -15 PSI ehk -103421 Pa), 90% ehk 14745 lugemist tähistab mõõtepiirkonna maksimumi (kasutataval anduril 15 PSI ehk 103421 Pa) [26]. Kui samas lugemistsüklis (SS jätkuvalt madalas olekus) teha rõhuandurile veel päringuid, väljastatakse veel kuni 2 baiti, mis kannavad rõhuanduri sees oleva termoanduri infot 11-bitise resolutsiooniga [47]. Käesoleva töö rakenduses ei ole rõhuanduri temperatuur oluline, seega ei loeta rõhuandurist rohkem andmeid ning kirjutatakse SS signaal taas kõrgeks.

Arduino Nano väljastab juhtarvutile vaid saadud lugemite arvu, selleks kasutatakse käsku

```
Serial.println(baidid);
```

ning andmete töötlemine toimub edasi juhtarvutis. Arduino Nano programm jääb täitma käsklust

```
delay(10);
```

ehk ootab 10 ms enne sama tsükli kordamist.

LabVIEW programm kasutab plokidiagrammi vaate paletilt *Data Communication - Protocols* - *Serial* järgmised alamVI-d:

- *VISA Configure Serial Port* - alamVI, mis aktiveerib jadapordi suhtluse. Selle sisendite abil valitakse programmi käivitamisel jadapordi number ja andmeside kiirus.
- *VISA Bytes at Serial Port* - alamVI, mis annab põhiprogrammile teada, mitu baiti on jadapordis ootel. Ootelolevad baidid annavad märku sellest, et Arduino on lõpetanud rõhuanduri väärtuse lugemise ning on saatnud vajaliku info jadaporti. Kui jadapordis on ootamas alla 5 baidi infot, ei loeta neid sealt välja ning LabVIEW programm kontrollib kohe uuesti ootel baitide hulka. 5 baiti on väärtus, mis osutus katseliselt stabiilseks. Antud programmi ajaline kiirus on määratud Arduino “delay(N);” käsu poolt, kus N on aeg millisekundites, mida oodata. Katseliselt tehti kindlaks, et alla 4 ms viite korral hakkas arvuti vastu võtma häiretega infot, viite puudumisel saadeti arvutisse täiesti loetamatu info.
- *VISA Read* - loeb jadapordist ootel olevad baidid ja väljastab loetud info sõnena. Loetud sõne kuvatakse programmi esipaneelil ning teisendatakse täisarvuks. Saadud tulemusest lahutatakse 8192 ehk nullrõhule vastav lugem [26] ning korrutatakse murruga 15/6553 (6553 lugemit 15 PSI mõõtevahemiku kohta). Saadud vastus korrutatakse arvuga 6864,75729 (teisendustegur Pa/PSI), mille tulemusena saame vastuseks rõhu paskalites. Rõhk kuvatakse numbrina indikaatoril ning ka graafikul, mis on seadistatud jooksvalt 100 viimast lugemit kuvama.
- *VISA Close* - sulgeb programmi töö lõppemisel jadapordi ühenduse.

### 3.1.2 Pumba sisse-välja lülitamine

Et pelgalt rõhuinfost ei piisa pumpade uurimiseks, koostati teine versioon tarkvarast, mis andis käsklusi pumba ja klapi sisse- ja väljalülitamiseks ning tegi rõhupäringuid. Erinevalt esimesest versioonist ei reguleerinud programmi töö kiirust enam Arduino, lugem võeti vaid siis, kui saadi vastavasisuline korraldus. Selleks kasutati käsklust

```
sisendbait = Serial.read();
```



mis loeb jadapordist ühe baidi infot [48]. See info väljastatakse ASCII koodis, kus “1” tähistatakse kui 49, “2” kui 50 jne [49]. Arduino võrdles saadud väärtust if-tsüklites väärtustega 49...53 ja käitus vastavalt saadud infole järgnevalt:

- Jadaporti saabunud “1” puhul viiakse pumbamooduli väljund kõrgeks;
- Jadaporti saabunud “2” puhul viiakse pumbamooduli väljund madalaks;
- Jadaporti saabunud “3” puhul viiakse solenoidklapi väljund kõrgeks;
- Jadaporti saabunud “4” puhul viiakse solenoidklapi väljund madalaks;
- Jadaporti saabunud “5” puhul küsitakse rõhuandurilt lugem ja kirjutatakse see jadaporti käskluse sarnaselt programmi esimese versiooniga.

Seega on Arduino programmi teise versiooniga võimalik pumba ja klapi sisse-välja lülitamine juhtarvutist ning rõhuanduri väärtuse pärimine.

LabVIEW programmi modifitseeriti vastavalt. Kuna nüüd otsustab juhtarvuti mõõtmisageduse üle, lisati LabVIEW programmi *While*-tsükklisse ajaline viide, mida saab juhtpaneelilt ka programmi töö ajal reguleerida. Katsetused näitasid taas, et viivitus alla 4 ms muudab mõõtmised ebastabiilseks ning juhtarvutisse hakkavad laekuma vigased signaalid.

Jadapordi paletist lisati programmi põhiahelasse alamVI *VISA Write*, mis saatis mikrokontrollerisse sobiva käsu vastavalt etteantud rõhu ja mikrokontrollerist loetud rõhu vahele, kasutades otsustamiseks lihtsat võrdlustehet. Kui jadapordis andmeid ei olnud, kirjutati jadaporti käsk “5” andmete saamiseks Arduinost ning pärast reguleeritava viivituse möödumist kontrolliti uuesti jadapordis ootel oleva info hulka.

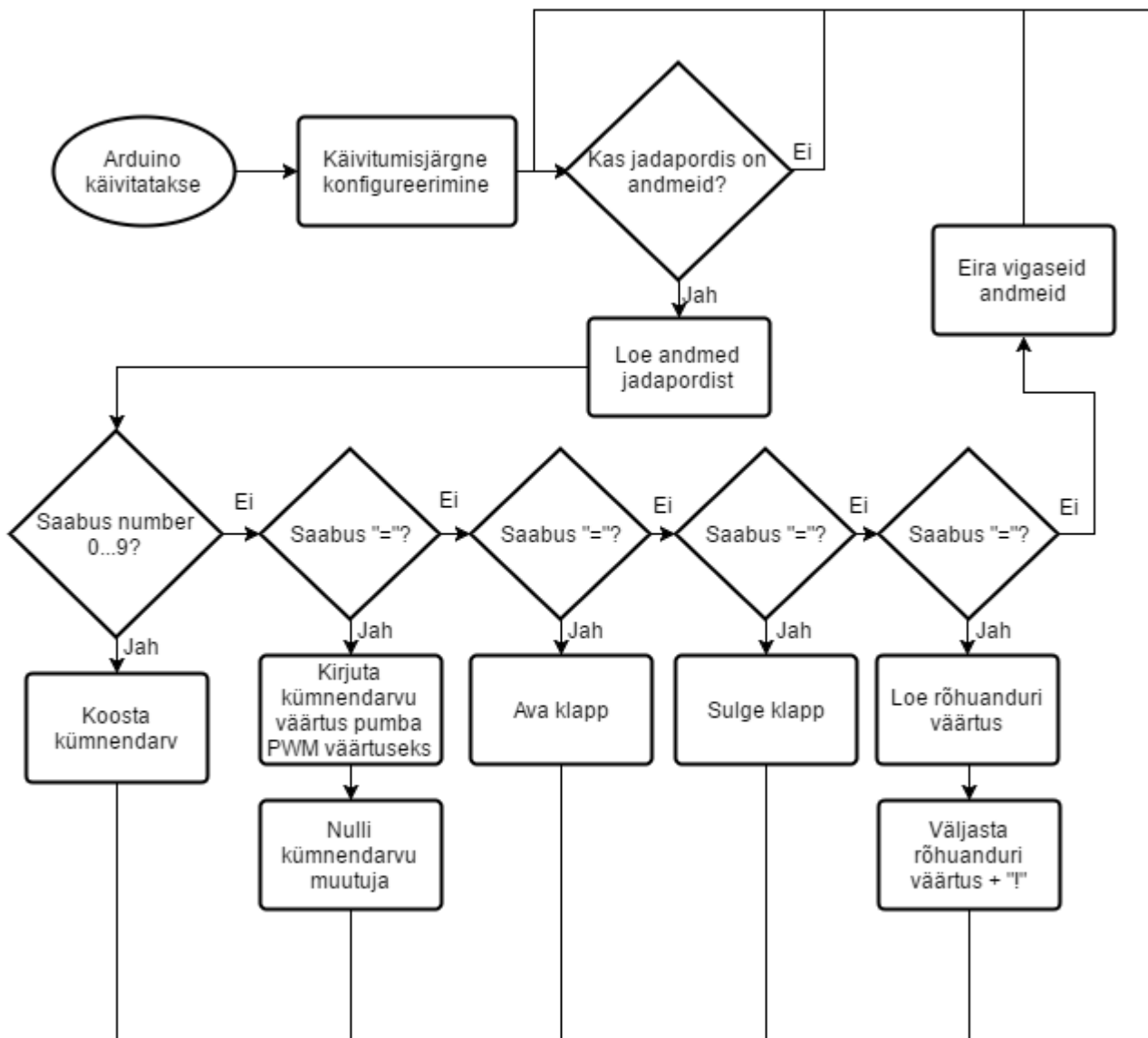
### **3.1.3 Pumba juhtimine PWM abil**

Teise programmiversiooni lihtne kontroll-loogika näitas juba esimeste katsetuste ajal, et pelgalt sisse-väljalülitamisega vähemalt 4 ms intervalliga on väga keeruline ettemääratud rõhku saavutada. Seepärast lisati tarkvara funktsionaalsusele PWM juhtimine.

Arduino programmis säilis loogika *if*-tingimuslausetega sisendinfo kontrollimise osas. Nüüd võeti infot aga vastu järgmise loogika alusel [49]:

- Jadaporti saabunud numbri 0...9 korral korrutatakse senine pumba PWM muutuja väärtus 10-ga ning liidetakse sellele saadud number. Kui järjest tulevad näiteks väärtused “2”, “4” ja “0”, moodustub Arduino programmilõigu kolme läbimise tulemusena “pumbaPWM” muutuja väärtuseks 240.
- Jadaporti saabunud võrdusmärgi (“=”) korral kirjutatakse praegune “pumbaPWM” väärtus käsklusega “analogWrite(pumbaKanal, pumbaPWM);” kanalile 3, mis on eelnevalt määratud pumba juhtahela kanaliks. Riistvara toetab juba prototüübi faasist saadik PWM-juhtimist. Lisaks nullitakse “pumbaPWM” muutuja käskluse “pumbaPWM = 0;” abil, et uue numbrilise sisendi saabudes hakataks kasvatama uut väärtust vahemikus 0...255.
- Solenoidklapp avatakse korralduse “-” peale;
- Solenoidklapp suletakse korralduse “+” peale;
- Rõhuanduri väärtus saadetakse korralduse “?” peale.

Et lihtsustada andmeside jälgimist jadapordi terminalis, lisab Arduino iga väljastatud lugemi järele hüüumärgi (“!”), tähistamaks täies mahus välja saadetud lugemit. Rohkem muudatusi Arduino programmis hiljem ei tehtud, Arduino lähtekood on toodud lisas 13. Joonisel 18 on toodud Arduino programmi põhimõtteskeem plokkiagrammina.



Joonis 18. Arduino programmi põhimõtteskeem.

LabVIEW tarkvaras on nüüd võimalus väljastada pumba juhtimiseks täisarvuline sisend vahemikus 0...255. Väärtus kirjutatakse jadaporti sõnena. Sellele lisatakse järele võrdusmärk funktsiooniga “Concatenate Strings” ning vajadusel ka “-” või “+” klapi juhtimiseks. Kui jadapordis pole andmeid, mida lugeda, kirjutatakse jadaporti sümbol “?”.

### 3.1.4 Testide läbiviimise põhiprogramm

Et valmistatud seadme abil pumpade kohta kasulikku infot koguda, koostati programm, millega on võimalik eelseadistatud teste läbi viia. Et visuaalne kood oleks lihtsamini hallatav, jagati see alamelementidesse ning koostati vastavad alamVI-d. Juhinduti eesmärgist, et põhiprogramm on raamistik, mis korraldab testide läbiviimist ettenähtud kordustega ning et

testideks vajalikud sisendid ja väljundid on raamistiku poolt paigas. Uue testi lisamiseks on seega vaja koostada kõigest uus alamVI, mis soovitud moel andmeid analüüsib. Peaprogramm toimib järgnevalt:

- Enne programmi käivitamist valib kasutaja jadapordi, kuhu pumpade karakteriseerimise seade on ühendatud. Lisaks valib ta rippmenüüst pumba mudeli ning testi läbiviimisel kasutatava reservuaari ruumala. AlamVI “*Tab Control*” abil valib kasutaja, millist testi ta läbi viia soovib.
- Programmi käivitamisel avatakse jadapordi ühendus pumpade karakteriseerimise seadmega;
- Aktiveeritakse alamVI “*Surve või vaakumi tuvastaja subVP*”, mille töö käigus käivitub pump 0,4 sekundiks ning rõhuanduri lugemisel tuvastatakse, kas ühendatud on üle- või alarõhupump. AlamVI tagastab väärtuse “tõene” ülerõhu korral ja “väär” alarõhu korral;
- Aktiveeritakse alamVI “*Katse info moodustamise subVP*”, mis koostab eelnevalt tehtud valikute ja kogutud info põhjal sõne järgmistest elementidest ning edastab selle sõne programmi peatsükklisse:
  - Kuupäev
  - Kellaaeg
  - Pumba tüüp
  - Reservuaari ruumala
  - Üle- või alarõhk
- Fikseeritakse testi alguse aeg süsteemitaimer järgi millisekundites ning edastatakse see peatsükklisse;
- Lähtestatakse muutujate “Katseid kokku” ja “Test edukas?” väärtused.
- Programm liigub seejärel *While*-tsükklisse. Selle sees võrreldakse “Katseid kokku” muutuja väärtust käimasoleva tsüklinumbriga ning kui tsükkel on ettenähtud arvu kordi käinud, väljutakse programmist. Iga kord, kui programm selles tsükklis on, nullitakse ka katsete vahetulemused.

- Eelnevalt kirjeldatud *While*-tsükli sees on veel teine *While*-tsükkel. Selle sees:
  - Käivitatakse igal läbimisel alamVI “*Pumba ja klapi juhtimise subVF*”, mille sisenditeks on jadaühenduse andmed, pumba PWM (täisarv 0...255), klapi avatus (tõene = lahti, väär = kinni) ning veateade sisse; alamVI väljastab jadaühenduse andmed, rõhuanduri lugemi ning veateate väljundi;
  - Uuendatakse graafikut, millelt näeb kasutaja rõhuanduri lugemit viimase 500 tsükli jooksul, teisendatuna paskalitesse;
  - Valitakse vastavalt “*Tab Control*” valikule test, mida läbi viia ning käivitatakse see test;
  - Kui test saadab peatumissignaali, väljutakse tsüklist välimisse *While*-tsükklisse;
  - Kui kasutaja saadab esipaneeli nupust peatumissignaali, peatatakse nii selle kui ka välimise *While*-tsükli töö.
- Välimises tsükklis käivitatakse uuesti sisemine tsükkel, välja arvatud siis, kui kasutaja on ise testi peatanud või ettenähtud korduste arv on täidetud.

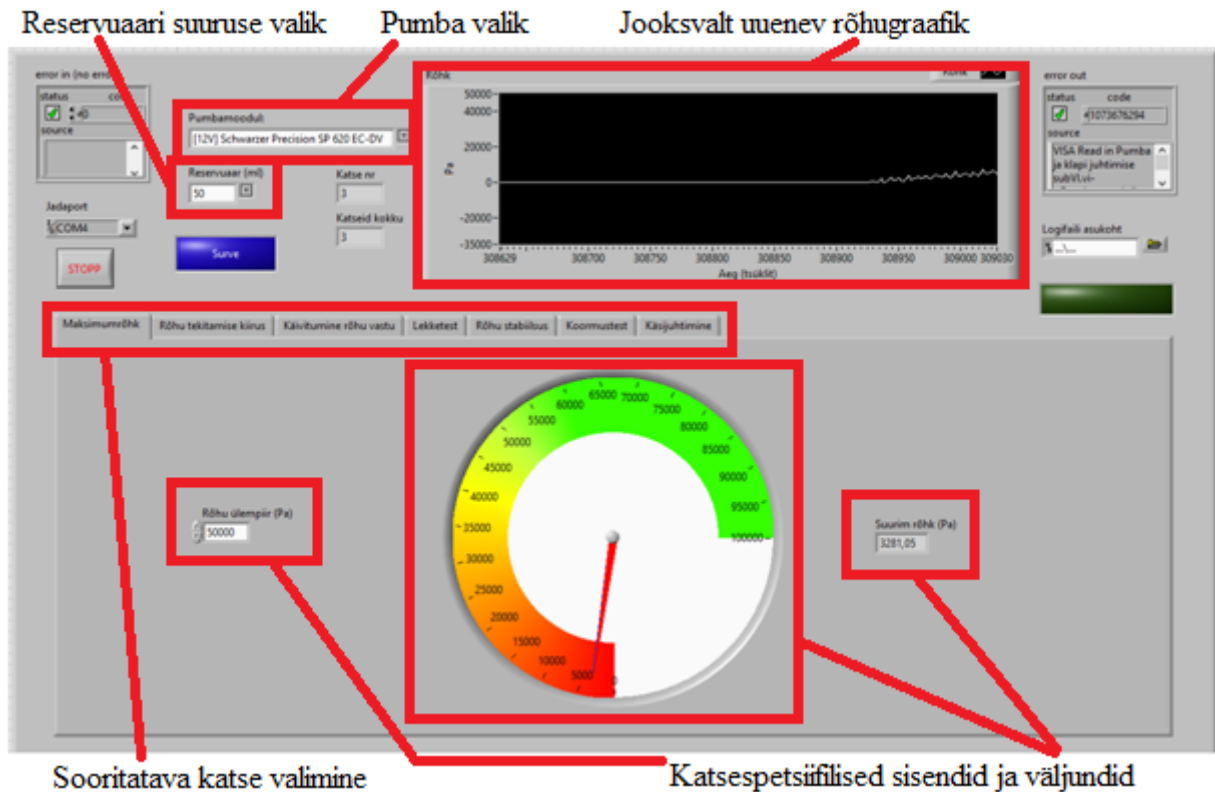
Põhiprogrammi tähtsaim osa on läbiviidava testi alamVI. Selle standardseteks sisenditeks on:

1. Hetkerõhk (Pa) (täisarv)
2. Testi info (sõne)
3. Ülerõhk(T)/alarõhk(F) (tõeväärtus)
4. Aeg testi alguses (ms) (täisarv)
5. Katse kordus nr (täisarv)

Ning standardseteks väljunditeks on:

1. Pumba PWM (täisarv)
2. Klapp aktiivne(T)/passiivne(F) (tõeväärtus)
3. Väljundsõne testi info ja tulemustega (sõne)
4. Peatumissignaali (tõeväärtus)

Lisaks eelmainitutele on testi alamVI-del täiendavad sisendid kontrollide (näiteks rõhu ülempiir testi vältel) ja väljundid indikaatorite (näiteks testi tulemuse kuvamise kasti) jaoks. Joonisel 19 on kujutatud koostatud programmi esipaneel, kus toimub hetkel maksimaalse rõhu mõõtmine.



Joonis 19. Pumpade karakteriseerimise peaprogrammi esipaneel.

Kui välimine *While*-tsükkel on oma töö lõpetanud, suletakse jadapordi ühendus ning käivitatakse alamVI “Andmete salvestamise subVI”, mis salvestab etteantud asukohas asuvasse (vaikimisi sama kaust, kust programm käivitati) tekstifaili “*Pumbamoodulite logifail.txt*” uue rea infoga, mis testide koostamise vältel üheks sõneks kokku pandi. Näiteks:

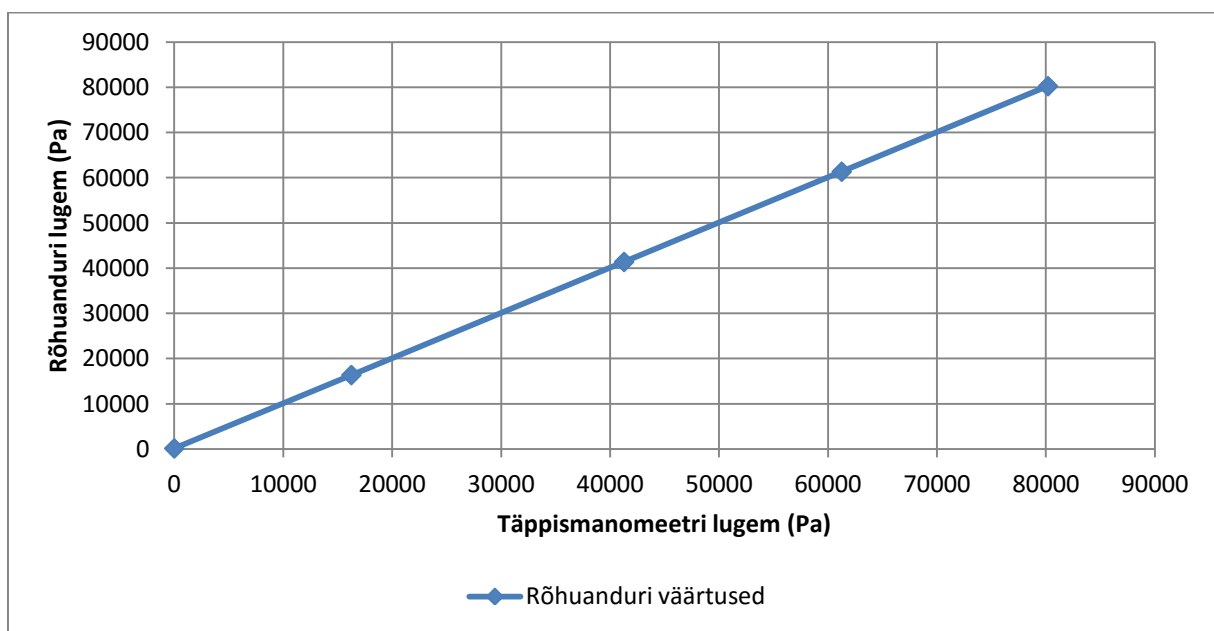
```
07.05.2016 16:23:57. Pump [5V] Schwarzer Precision SP 550
EC, reservuaari maht 50 ml, surve. Maksimumrõhk
31945 Pa. Maksimumrõhk 31909 Pa. Maksimumrõhk 31908
Pa.
```

Sellest reast võime välja lugeda, et katse sooritati 7. mail 2016 kell 16:23, kasutatud pump oli Schwarzer Precision SP 550 EC, mis oli ühendatud ülerõhuväljundiga seadmesse ning reservuaar oli seatud 50 ml mahu peale. Tehti kolm maksimaalse surve korduskatset tulemustega 31945 Pa, 31909 Pa ja 31908 Pa.

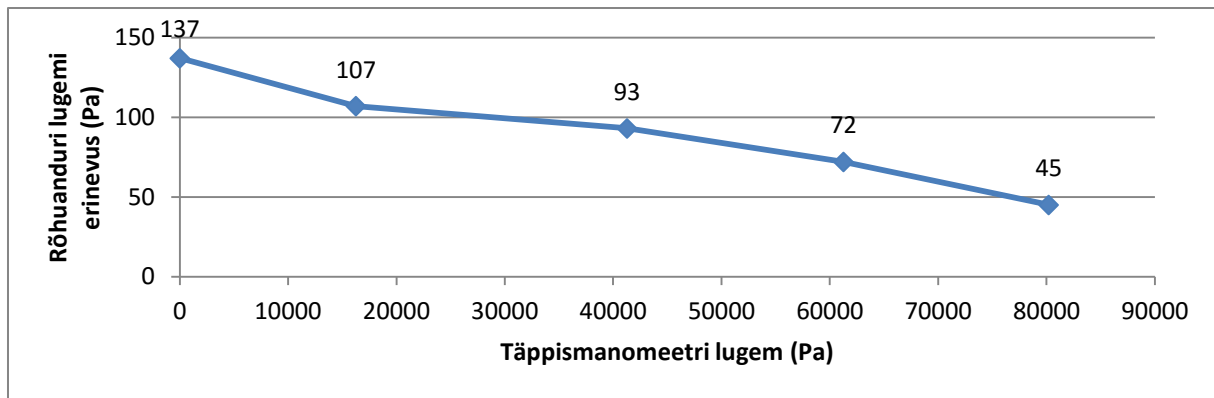
### 3.2 Rõhuanduri kalibreerimine

Pumbamoodulite karakteriseerija rõhuanduri kalibreerimiseks ühendati seadme pneumaatikaahelasse rõhuanduri vooliku külge Y-jagaja, mille külge ühendati Keller LEX 1 kalibreeritud täppismanomeeter täpsusega  $\pm 0,05\%$  [50]. Kasutati  $-1 \dots 2$  bar mõõtevahemikuga mudelit, seega on seadme täpsus  $\pm 100$  Pa. Koostati kalibreerimisandmete kogumise programm, mis loeb samaaegselt nii pumbamoodulite karakteriseerija kui täppismanomeetri mõõteandmeid ning kujutab loetud andmed graafikule. Katseprogrammi koostamisel kasutati täppismanomeetri tootja Keller kodulehel toodud näidisprogrammi mooduleid.

Katseprogrammis on 3 graafikut - ühel kujutatakse mõlema anduri mõõtetulemus, teisel karakteriseerija anduri mõõtetulemuse erinevus täppismanomeetri mõõtetulemusest ning kolmandal protsentuaalset erinevust kahe anduri mõõtetulemuste vahel. Kuna programmis tekib ajaline nihe kahe mõõtetulemuse vahel, koguti kalibreerimisandmed järgnevalt: pump pandi tööle ning lasti sellel tekitada reservuaaris soovitud rõhk; rõhu saavutamisel katkestas kasutaja pumba töö. Oodati 5 s - selle perioodi jooksul rõhk stabiliseerus - ning pandi kirja nii pumbamoodulite karakteriseerija kui ka täppismanomeetri lugemid. Joonisel 20 on kujutatud kalibreerimiselsete mõõtmiste andmed ning joonisel 21 on kujutatud karakteriseerimise seadme rõhuanduri ja täppismanomeetri tulemuste vahed. Tulemused on keskmistatud viimase 100 mõõtmise tulemuse alusel, kuna mõlema anduri väljund kõikus jooksvalt ajas.



Joonis 20. Esmaste mõõtmiste andmed.

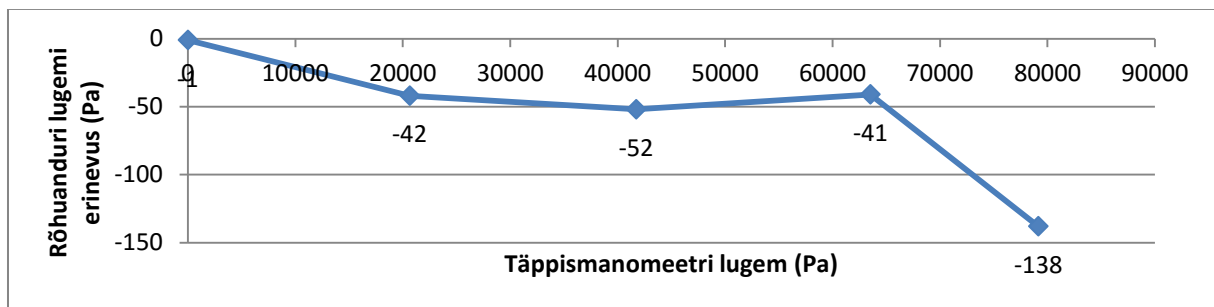


Joonis 21. Rõhuanduri ja täppismanomeetri mõõtetulemuste vahe.

Seejärel viidi sisse parandid rõhu arvutamise programmi. Esmalt reguleeriti paika näit 0 Pa juures, muutes karakteriseeriija juhtimise alam-VIs lugemite hulka, mis vastab 50%  $2^{14}$ -st. Joonisel 19 toodud esimese andmepunkti, atmosfäärirõhu väärtuse erinevuse järgi on vaja kompenseerida rõhuvähe +137 Pa. Ühele lugemile Honeywell HSCDAND015PDSA3 väljundis vastab 15,78 Pa [26], seega muudeti nullpunkti määravat muutujat

$$\frac{137 \text{ Pa}}{15,78 \frac{\text{Pa}}{\text{lugem}}} = 8,68 \text{ lugemit} \cong 9 \text{ lugemit}$$

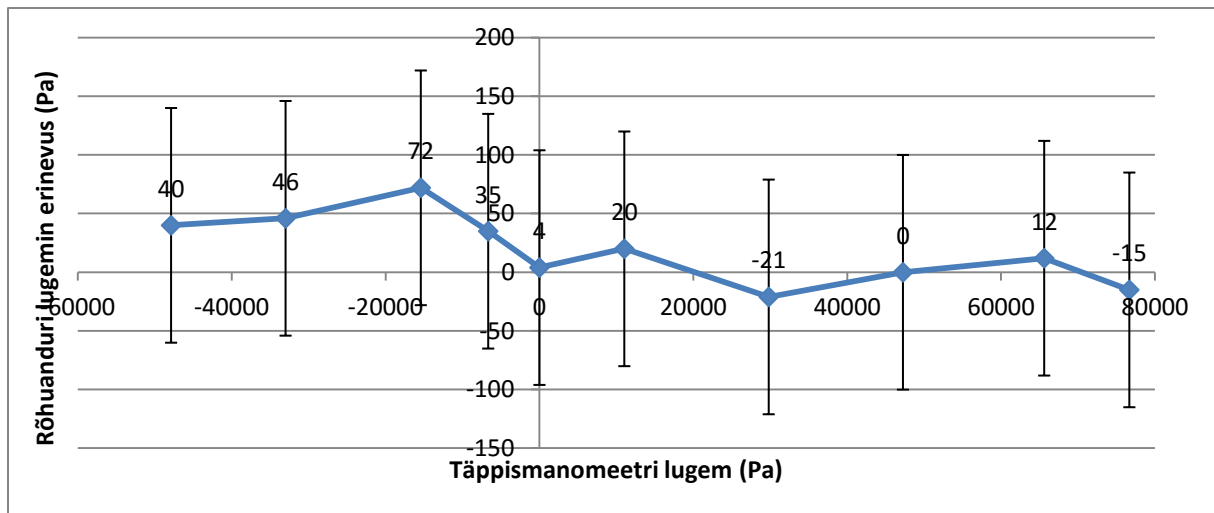
arvutuslikult väärtuselt 8192 lugemit väärtusele 8201 lugemit. Nüüd võeti 5 juhuslikul rõhul uuesti lugemid. Joonisel 22 on kujutatud karakteriseerimise seadme rõhuanduri ja täppismanomeetri mõõtetulemuste erinevused.



Joonis 22. Erinevus rõhuanduri ja täppismanomeetri mõõtetulemuste vahel nullpunkti kalibreerimise järgselt.

Seejärel viidi sisse parandid rõhu arvutamise programmi tõusu muutujasse. Arvutuslikult on ühepoolses maksimaalses mõõtevahemikus 103,42 kPa kohta 6554 lugemit, see väärtus korrigeeriti katseliselt 6545 peale. Viimaks viidi katsetused läbi nii ala- kui ülerõhuga, veendumaks kalibratsiooni edukuses. Joonis 23 kajastab vastavaid mõõtetulemusi; toodud vearibad kujutavad Keller LEX 1  $\pm 0,05\%$  mõõtevahemikust ehk  $\pm 100$  Pa lubatud viga.





Joonis 23. Erinevus rõhuanduri ja täppismanomeetri mõõtetulemuste vahel tõusu reguleerimise järgselt.

Kalibreerimisejärgsete tulemuste standardhälve on 29,1 Pa ehk 0,028% mõõtepiirkonnast.

### 3.3 Sooritatavad testid

Pumpade karakteriseerimiseks pakutakse välja järgmised võimalikud testid:

1. Maksimumrõhu mõõtmine - pumbamoodulil lasta teatud aja jooksul, nt 20 s, täisvõimsusel töötada ning registreerida maksimaalne stabiilne rõhk, mille pump saavutas. Testi kiirema läbiviimise huvides kasutada väikest reservuaari ruumala, nt 20 ml. Tulemusi võrrelda pumba andmelehega. Rõhu 100 kPa ületamisel katset edasi mitte teha, kuna rõhk väljub anduri mõõtepiirkonnast ja sellest suuremaid rõhkusid ei plaanita väljatöötatavates rõhugeneraatorites kasutada.
2. Maksimaalse käivitusrõhu mõõtmine - pumbamoodulil lasta rõhk tõsta atmosfäärirõhult maksimumrõhust madalama rõhuni ning jätta pump mõneks sekundiks seisma. Proovida pumpa käivitada. Kui pump käivitub edukalt, tõsta katse läbiviimise rõhku; kui pump ei suuda käivituda, lasta klapi abil rõhk välja ning proovida katset uuesti madalama rõhuga. Stabiilsuse huvides kasutada reservuaari maksimaalset ruumala. Tulemusi võrrelda pumba andmelehega.
3. Rõhu saavutamise kiiruse mõõtmine - mõõta aega, mis kulub pumbal reservuaari pumpamiseks eelnevalt tekitatud rõhust sihtmärkrõhuni täisvõimsusel. Katset korrata erinevatel (algus- ja) lõpprõhkudel ning ka erinevate reservuaari ruumalade juures.

Rõhuparameetrid määrata vastavalt praktilistele vajadustele (kas Fluika moodulite eeldatav kasutusprofiil või rõhutasemed mikrofluidikas üldiselt).

4. Üksiku pumbalöögi uurimine - võtta rõhulugemeid piisavalt kiiresti, et katsetulemustes oleks eristatavad pumbamooduli töötaktid. Uurida matemaatiliselt ühe pumbalöögi ruumala.
5. Pumba lekkimise mõõtmine – pumbamoodulil lasta tekitada reservuaari maksimaalrõhu lähedane rõhk ning lülitada pump välja. Mõõta rõhu langemist kindla perioodi, nt 60 s vältel. Eraldi mõõta rõhu langemine, kui pumba asemel on süstal, kraan või klapp, mille leket võib tühiseks lugeda, mõõtmaks süsteemi isetühjenemise kiiruse. Lahutades isetühjenemise pumbaga koos mõõdetud lekkekiirusest samal rõhul, saame arvutada pumba kaudu lekkiva õhuhulga.
6. Pumba mehaanilise vastupidavuse uurimine - hoida pumbamoodul pideva koormuse all, kas maksimaalsel võimsusel, kindla rõhu juures või tsükliliselt rõhku tõstes-langetades. Pärast mitme(kümne)tunnist koormamist viia uuesti läbi teisi teste, et võrrelda neid algsete andmetega ning teha järeldusi pumba eluea osas. Kui pumba lõpprõhk ületab 100 kPa, viia läbi tsüklilise koormamise test. Kuna Teadusmosaiik OÜ kogemus näitab, et mõne pumba sooritus väheneb kuumenedes, ent jahtudes omadused mõningal määral taastuvad, tasub koormustesti järgselt kohe ka kontrolltestid sooritada.

Kuna kõigi mainitud testide täpsem kirjeldamine, valmisprogrammeerimine ja läbiviimine viib käesoleva töö ettenähtust oluliselt mahukamaks, ei käsitleta käesolevas töös läbiviidavate testide olemust. Demonstreerimaks seadme tööd viiakse uuritavate pumbamoodulitega läbi vaid maksimaalse rõhu katse ning kogutakse ühisele graafikule rõhu sõltuvus ajast reservuaari täitmisel. Testide läbiviimist kirjeldab järgnev peatükk.

#### 4 Andmete kogumine ja analüüs

Antud peatükis sooritatakse uuritavate pumpadega maksimaalse rõhu katsed nii üle- kui alarõhuga (kui võimalik) ning kõrvutatakse saadud andmeid tehaseandmetega. Lisaks tuuakse graafiliselt välja rõhu sõltuvus ajast reservuaari täisvõimsusel täitmisel.

Esimese karakteriseerimise seadme tööd demonstreeriva katsena sooritati maksimaalse rõhu mõõtmise katse. Test viidi läbi 20 ml reservuaari ruumala juures, välja arvatud Fluika PG ja Fluika VG moodulite testimisel, millel on sisene 13 ml rõhureservuaar [11] ja mille mõõtmisel reguleeriti reservuaar 0 ml ruumalale. Maksimaalse rõhu testi sooritades viidi läbi kolm korduskatset ning arvutati nende keskmine. Igal korduskatsel lasti pumbamoodulitel töötada 20 sekundit, välja arvatud Fluika PG ja Fluika VG moodulid, mis pidid maksimumrõhu saavutamiseks töötama 40 sekundit. Kui pumba tekitatav rõhk ületas 100 kPa, katkestati test. Testi tulemused on toodud lisas 14 asuvas tabelis.

7 pumba maksimumrõhud väljusid ülerõhu korral pumbamoodulite karakteriseerimise seadme rõhuanduri mõõtepiirkonnast, mistõttu ei saa kasutatava seadmega teha ammendavaid järeldusi nende pumpade andmelehtedes toodud maksimumrõhkude tõesuse kohta. Schwarzer Precisioni pumbad SP 620 ja SP 625 paistsid silma oodatust madalama maksimumrõhuga, vastavalt 46,50% ja 47,91% alla andmelehes toodud väärtuse.

Alarõhu maksimumide mõõtmisel oli taas Schwarzer Precisioni SP 620 ja SP 625 pumbamoodulite sooritus ettenähtust halvem, maksimaalne alarõhk oli vastavalt 23,76% ja 23,66% tootja lubatust väiksem. Ettenähtust selgelt madalam oli ka 23,42% tootja infost väiksemat alarõhku tekitanud Xavitech V200 sooritus. YW Fluid YW02 pumbamoodul tekitas aga infolehes toodust 25,20% suuremat alarõhku ning Koge KPV08A pumbamooduli maksimaalne alarõhk ületas tootja spetsifikatsiooni 24,75%.

Teise katsena koguti pumbamoodulite karakteriseerimise seadme abil andmed pumpade tekitatava rõhu ajalisest sõltuvusest. Et tulemused oleksid omavahel võrreldavad, viidi kõik katsed läbi reservuaari maksimaalset, 100 ml ruumala kasutades. Erandiks on taas Fluika PG ja Fluika VG moodulid, mis madala tootlikkuse ja sisseehitatud 13 ml rõhureservuaari [11] tõttu ei saavutanud 100 ml reservuaari mahu kasutamise korral teiste pumbamoodulitega võrreldavaid rõhutasemeid. Seetõttu viidi Fluika PG ja Fluika VG moodulite rõhu tekitamise

ajalise sõltuvuse andmete kogumised läbi 0 ml mahule reguleeritud rõhureservuaariga. Lisas 15 toodud graafikul on kujutatud uuritavate pumbamoodulite ülerõhu tekitamise ajalist sõltuvust. Lisas 16 toodud graafikul on kujutatud uuritavate pumbamoodulite alarõhu tekitamise ajalist sõltuvust.

Näidiskatsetega omandatud info täpsem analüüs ja interpreteerimine väljub käesoleva töö eesmärkidest ja mahust ning seepärast ei käsitleta seda siinkohal põhjalikumalt.

## 5 Kokkuvõte

Bakalaureusetöö „Mikrofluidika instrumentides kasutatavate rõhupumpade karakteriseerimiseks vajaliku seadme disainimine“ raames kirjeldatakse erinevate pneumaatiliste pumbamoodulite testimise seadme ideed, riistvara ja tarkvara disaini ning valmistamist. Seadme eesmärk on abistada Teadusmosaiik OÜ tootearendust Fluika seeria mikrofluidika rõhugeneraatorite uute mudelite väljatöötamisel.

Töö käigus ehitati valmis seade, mis võimaldab erinevate toitepingete, juhtimismeetodite ning gabariitidega pumbamoduleid juhtida, tekitades seeläbi seadme küljes olevasse muudetavasse rõhureservuaari üle- või alarõhku, ning mõõta tekitatud rõhku. Seade võimaldab suhtlust USB-liidese kaudu juhtarvutiga ning kasutab sideks jadaporti. Lisaks karakteriseerimise seadme mikrokontrolleri tarkvarale koostati ka raamistik visuaalprogrammeerimise keskkonnas LabVIEW, võimaldamaks pumbamoodulitega erinevaid teste läbi viia.

Valminud seade täidab töös püstitatud eesmärgid seadme funktsionaalsuse, kasutusmugavuse, paindlikkuse ning ohutuse osas. Demonstreerimaks seadme töövõimekust, viidi läbi demonstratsioonkatsed, mille käigus võrreldi pumbamoodulite tekitatavaid maksimaalseid rõhutasemeid andmelehtedes toodud infoga. Testi käigus ilmnis tulemusi, kus pumbamoodul suutis tekitada kõigest 66% ettenähtud ülerõhust, kuid ka tulemusi, kus pumbamoodul suutis tekitada ettenähtust 25% suurema rõhuerinevuse atmosfääriga. Koguti ka andmed, mille põhjal saab uuritavaid pumпасid sarnase ruumala vastu töötades võrrelda.

Käesoleva töö jätkuks oleks põhjalikum tarkvaraarendus, võimaldamaks töö käigus väljaarendatud riistvaraplatvormi maksimaalset ärakasutamist. Täpsemad testid, mida seadmega sooritada, tuleb koostada vastavalt vajadusele Fluika seadmete arendustöö käigus ning vastavalt vajadusele ka kogutavaid andmeid interpreteerida. Antud töö käigus on aga valminud riistavaplatvorm, millel on võimalik edasiarendusi läbi viia, aidates seega kaasa mikrofluidika kui kiirelt areneva ja suurt potentsiaali omava teadusharu edendamisele.

## 6 Viidatud materjalid

- [1] „Tricorder“ [<http://en.wikipedia.org/wiki/Tricorder>]. 17.05.2016.
- [2] S. C. Terry, J. H. Jerman ja J. B. Angell, „Gas-Chromatographic Air Analyzer Fabricated On A Silicon-Wafer,“ *IEEE Transactions on Electron Devices*, kd. 26, nr 12, pp. 1880-1886 (1979).
- [3] R. Karlsson, A. Michaelsson ja L. Mattsson, „Kinetic-Analysis Of Monoclonal Antibody-Antigen Interactions With A New Biosensor Based Analytical System,“ *Journal of Immunological Methods*, kd. 145, nr 1-2, pp. 229-240 (1991).
- [4] A. Ainla, „The Multifunctional Pipette. A Microfluidic Technology For The Biosciences,“ *Chalmers University of Technology, Department of Chemical and Biological Engineering.*, 2013.
- [5] H. Waters, „New \$10 million X Prize launched for tricorder-style medical device,“ *Nat Med*, kd. 17, nr 7, p. 754 (2011).
- [6] J. J. Agresti, E. Antipov, A. R. Abate ja e. al, „Ultrahigh-throughput screening in drop-based microfluidics for directed evolution,“ *PNAS*, kd. 107, nr 9, pp. 4004-4009 (2010).
- [7] „Flow Control In Microfluidic Devices,“ Elveflow, [<http://www.elveflow.com/microfluidic-tutorials/microfluidic-reviews-and-tutorials/flow-control-in-microfluidic-device/>]. 26.05.2016.
- [8] Dolomite Microfluidics, „Pumps,“ [<http://www.dolomite-microfluidics.com/web-shop/pumps-c-38>]. 27.05.2016.
- [9] „AF1 DUAL,“ Elveflow, [<http://www.elveflow.com/microfluidic-flow-control-products/flow-control-system/high-accuracy-vacuum-pumps/>]. 26.05.2016.

- [10] „MFCS-EZ,“ Fluigent, [<http://www.fluigent.com/microfluidic-flow-control-system/>]. 26.05.2016.
- [11] T. D. C. Ltd, *Mitos Fluika Pressure and Vacuum Pumps Datasheet*, 2016.
- [12] Dolomite Microfluidics, „Mitos P-Pump,“ [[http://www.dolomite-microfluidics.com/webshop/pumps-pressure-pumps-pump-modules-c-38\\_39\\_40/mitospump-p-174](http://www.dolomite-microfluidics.com/webshop/pumps-pressure-pumps-pump-modules-c-38_39_40/mitospump-p-174)]. 27.05.2016.
- [13] Elveflow, „AF1 Dual,“ [<http://www.elveflow.com/microfluidic-flow-control-products/flow-control-system/high-accuracy-vacuum-pumps/>]. 27.05.2016.
- [14] Fluigent, *MFCS-EZ product flyer*, 2015.
- [15] „Low Pressure,“ Dolomite Microfluidics, [[http://www.dolomite-microfluidics.com/webshop/pumps-pressure-pumps-low-pressure-c-38\\_39\\_77](http://www.dolomite-microfluidics.com/webshop/pumps-pressure-pumps-low-pressure-c-38_39_77)]. 27.05.2016.
- [16] Schwarzer Precision, *SP 500 EC / 550 EC datasheet*, 2013.
- [17] Xavitech, *P200 GAS datasheet*, 2010.
- [18] The Dolomite Centre Ltd, *Mitos Fluika Pressure and Vacuum Pumps Datasheet*, 2014.
- [19] M. T. Guo, A. Rotem, J. A. Heyman ja D. A. Weitz, „Droplet microfluidics for high-throughput biological assays,“ *Lab on a Chip*, kd. 12, pp. 2146-2155 (2012).
- [20] Arduino, „Download the Arduino Software,“ [<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>]. 28.05.2016.
- [21] Arduino, „Arduino Nano,“ [<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>]. 28.05.2016.
- [22] Ebay, „Mini USB Nano V3.0 ATmega328P CH340G 5V 16M Micro-controller Board For Arduino,“ [<http://www.ebay.com/itm/Mini-USB-Nano-V3-0-ATmega328P-CH340G-5V-16M-Micro-controller-Board-For-Arduino-/201539166894?hash=item2eecaba2ae:g:sjoAAOSwAuNW3727>]. 28.05.2016.

- [23] National Instruments, „USB-6000,“ [<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/211872>]. 28.05.2016.
- [24] National Instruments, „NI USB-8451,“ [<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/202368>]. 28.05.2016.
- [25] Transfer Multisort Elektronik, „tme.eu - rõhuandurid,“ [[http://www.tme.eu/ee/katalog/automaatika\\_100124/#id\\_category=112580&s\\_field=artikul&s\\_order=ASC&visible\\_params=2%2C2193%2C377%2C2227%2C98%2C32%2C1397%2C1387%2C1390%2C10%2C35%2C2390%2C82%2C1754%2C1774&used\\_params=10%3A3244%3B1387%3A8443%3B1397%3A115242%2C7](http://www.tme.eu/ee/katalog/automaatika_100124/#id_category=112580&s_field=artikul&s_order=ASC&visible_params=2%2C2193%2C377%2C2227%2C98%2C32%2C1397%2C1387%2C1390%2C10%2C35%2C2390%2C82%2C1754%2C1774&used_params=10%3A3244%3B1387%3A8443%3B1397%3A115242%2C7)]. 30.05.2016.
- [26] Honeywell, *TruStability® Board Mount Pressure Sensors, HSC Series*, 2014.
- [27] Arduino, „Arduino - AnalogRead,“ [<https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead>]. 30.05.2016.
- [28] Sensortronics, *HDI Series Amplified Pressure Sensors*, 2009.
- [29] Honeywell, *TruStability® Board Mount Pressure Sensors, TSC Series*, 2014.
- [30] Parker, *Miniature Solenoid Valves - Precision Fluidics*, 2016.
- [31] Koge Electronics Co., Ltd, *KSV04A Solenoid Valve*, 2008.
- [32] Wikipedia, „USB,“ [<https://en.wikipedia.org/wiki/USB>]. 30.05.2016.
- [33] XLSEMI, *XL4015 datasheet*, 2014.
- [34] Arduino, „SPI library,“ [<https://www.arduino.cc/en/Reference/SPI>]. 30.05.2016.
- [35] Sparkfun, „Voltage Dividers,“ [<https://learn.sparkfun.com/tutorials/voltage-dividers>]. 30.05.2016.
- [36] MPS, *MP1584EN datasheet*, 2011.
- [37] International Rectifier, *IRFU3504Z datasheet*, 2004.



- [38] Basic Electronics Tutorials, „MOSFET as a Switch,“ [[http://www.electronicstutorials.ws/transistor/tran\\_7.html](http://www.electronicstutorials.ws/transistor/tran_7.html)]. 30.05.2016.
- [39] A. Tantos, „MOSFETs and catch diodes,“ Modular Circuits, [<http://www.modularcircuits.com/blog/articles/h-bridge-secrets/mosfets-and-catch-diodes/>]. 30.05.2016.
- [40] Central Semiconductor Corp., *2N1893 datasheet*, 2013.
- [41] Lorlin Electronics Ltd, *CK Rotary Switch datasheet*, 2012.
- [42] Ebay, *Mini Red LED Panel Voltage Meter 3-Digital Adjustment Voltmeter QR*, 2016.
- [43] Xavitech, *V200 GAS datasheet*, 2010.
- [44] Ninigi, *PCB CONNECTORS NS25 SERIES*, 2005.
- [45] Arduino, „begin(),“ [<https://www.arduino.cc/en/Serial/Begin>]. 31.05.2016.
- [46] Tartu Ülikooli Wiki, „Füüsika Instituudis kasutatav keskselt litsentsitud tarkvara,“ [<https://wiki.ut.ee/pages/viewpage.action?pageId=21760225>]. 31.05.2016.
- [47] Honeywell, *SPI Communication with Honeywell Digital Output Pressure Sensors*, 2012.
- [48] Arduino, „read(),“ [<https://www.arduino.cc/en/Serial/Read>]. 31.05.2016.
- [49] ArduinoBasics, „Simple Arduino Serial Communication,“ [<http://arduinobasics.blogspot.com/2012/07/arduino-basics-simple-arduino-serial.html>]. 31.05.2016.
- [50] Keller, *LEX 1 Highly Precise Digital Manometer datasheet*, 2014.
- [51] Thomas, *Pumps and Compressor Solutions for OEMs Worldwide*.
- [52] Thomas, *1410 Series datasheet*, 2015.
- [53] Topsflo, „TM30A-A,“ [<http://www.topsflo.com/mini-diaphragm-pump/tm30a-a.html#Parameter>]. 28.05.2016.
- [54] Schwarzer Precision, *SP 600 EC / 620 EC / 625 EC datasheet*, 2015.

- [55] YW Fluid, „YW02A-DCL-12V,“ [[http://www.ywfluid.com/diaphragmpump/yw02?-product\\_id=73](http://www.ywfluid.com/diaphragmpump/yw02?-product_id=73)]. 28.05.2016.
- [56] Pumps365.com, „1.5 l/min mini vacuum pump 3V, brush mini vacuum pump 3V,“ [[http://syftcl99.pumps365.com/product-detail\\_129455/1-5-l-min-mini-vacuum-pump-3V-brush-mini-vacuum-pump-3V.html](http://syftcl99.pumps365.com/product-detail_129455/1-5-l-min-mini-vacuum-pump-3V-brush-mini-vacuum-pump-3V.html)]. 28.05.2016.
- [57] Schwarzer Precision, *SP 12 RO*, 2014.
- [58] Koge, *KPV08A-3A*.

## 7 Lisad

### 7.1 Lisa 1. Uuritavate pumpade võrdlustabel andmelehtede järgi

Parameetrid tootja andmelehtede järgi	Pumba tüüp <sup>2</sup>	Mootori tüüp <sup>3</sup>	Maksimaalne ülerõhk (kPa)	Maksimaalne alarõhk (kPa)	Vooluhulk koormuseta (ml/min)	Tööpinge (DC V)	Voolutarve koormuseta (mA)	Juhtimine <sup>4</sup>	Pikkus (mm)	Laius (mm)	Kõrgus (mm)	Kaal (g) <sup>5</sup>	Gaasidega kokku puutuvad materjalid
Xavitech P200-GAS-5V [17]	M	LA	45	-18	400	5	40...90	D	37,15	21	21	39	PPS, EPDM
Xavitech V200-GAS-5V [43]	M	LA	18	-45	480	5	40...90	D	37,15	21	22	39	PPS, EPDM
Thomas 8003D/24/1,2/E/DC [51]	WOB-L	DC	200	0	3000	12	708	A	82	30	53	190	PAA, PPS, PTFE, EPDM
Thomas 1410D/2,2/E/LC [52]	M	DC	100	0	3700	12	400	A	83,3	30	54,1	180	PA, EDPM
Thomas 1410VD/1,5/E/LC [52]	M	DC	190	-75	2600	12	417	A	83,3	30	54,1	180	PA, EPDM
TOPSFLO TM30A-A12-P12006 (V7006) [53]	M	DC	120	-70	6000	12	240	A	75,5	31,2	57,5	220	EPDM, PTFE, FPM

<sup>2</sup> M – membraanpump; WOB-L – Thomas WOB-L kolbpump

<sup>3</sup> LA – lineaaraktuuaator; DC – harjadega alalisvoolu elektrimootor; BL-C – harjadeta mootor sisseehitatud kontrolloriga

<sup>4</sup> D – digitaaljuhtimine analoogjuhtimise lisavõimalusega; A – analoogjuhtimine mootorile rakendatava pingereguleerimise teel

<sup>5</sup> x – vastavad andmed puuduvad andmelehest

TOPSFLO TM30A- C12-P12004 (V7004) [53]	M	BL-C	120	-70	4500	12	240	A	88,5	31,2	57,5	240	EPDM, PTFE, FPM
Schwarzer Precision SP 550 EC 5 VDC [16]	M	DC	37	-40	800	5	100	A	41	23	34	41	PPS, EPDM
Schwarzer Precision SP 620 EC-DV 12 VDC [54]	M	DC	180	-64	3700	12	550	A	77,5	31	54	184	PPS, EPDM
Schwarzer Precision SP 625 EC-LC- DV 12 VDC [54]	M	DC	180	-65	5000	12	900	A	80,5	31	54	220	PPS, EPDM
YW Fluid YW02-DC12 [55]	M	DC	100	-50	3000	12	583	A	86	31,8	60	x	x
Z1303- 5006-8500 [56]	M	DC	x	-45	1500	3	500	A	48	18	32	36	x
Schwarzer Precision SP V 3DC12B RO-D (Fluika PG) [57]	PM	DC	600	0	650	3	350	A	50,5	27	12	23	ABS, POM, EPDM, NBR
Koge KPV08A-3A (Fluika VG) [58]	M	DC	x	-35	400	3	375	A	32,5	17,8	8	x	x

## 7.2 Lisa 2. Rõhuandurite võrdlustabel

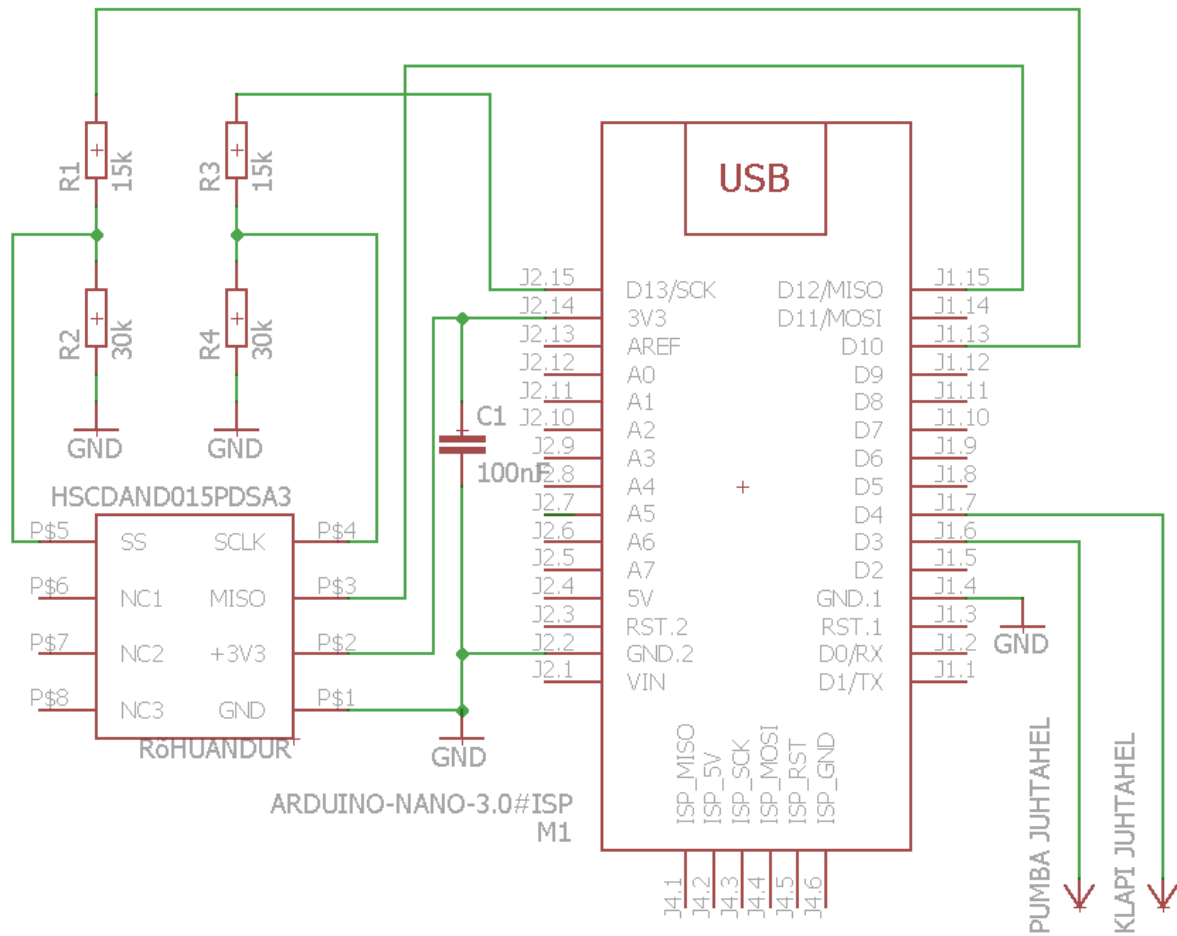
	Sensortech HDIB001DUE8 H5 [28]	Honeywell HSCDANT015P GSA5 [26]	Honeywell HSCDAND015P DSA3 [26]	Honeywell TSCDRRN015 PDUVCV [29]
Mõõtmise tüüp <sup>6</sup>	Diferentsiaalne	Atmosfääri suhtes	Diferentsiaalne	Diferentsiaalne
Mõõtepiirkond (kPa)	0...100	0...103,42	-103,42...103,42	-103,42...103,42
Maksimaalne ohutu töörõhk (kPa)	200	106,84	413,69	413,69
Purunemisrõhk (kPa)	300	413,69	827,37	792,90
Täpsus (% kogu mõõtevahemikust)	+1,5	+0,25	+0,25	+0,15
Märgitud täpsuse temperatuurivahemik (°C)	0...85	0...50	0...50	0...85
Digitaalne suhtlusprotokoll <sup>7</sup>	I <sup>2</sup> C	SPI	SPI	-
Digitaalresolutsioon (bit)	12	12	12	-
Lugemi muutumise viivitus (digitaalväljund) (ms)	0,5	0,46	0,46	-
Lugemi muutumise viivitus (analoogväljund) (ms) <sup>8</sup>	x	1 ms	1 ms	x
Tööpinge (V)	4,5...5,5	4,75...5,25	3,0...3,6	1,5...12
Voolutarve (mA)	5	3,7	3,1	0,6 @ 5 V
Pakend	SMD, 2 porti küljel	DIP, 1 port üleval	DIP, 1 port üleval	DIP, 2 porti külgedel

<sup>6</sup> Diferentsiaalne – mõõdetakse rõhuerinevust kahe pordi vahel, kusjuures üks portidest võib olla avatud ehk atmosfäärirõhul; Atmosfääri suhtes – mõõdetakse rõhuerinevust atmosfäärirõhu suhtes

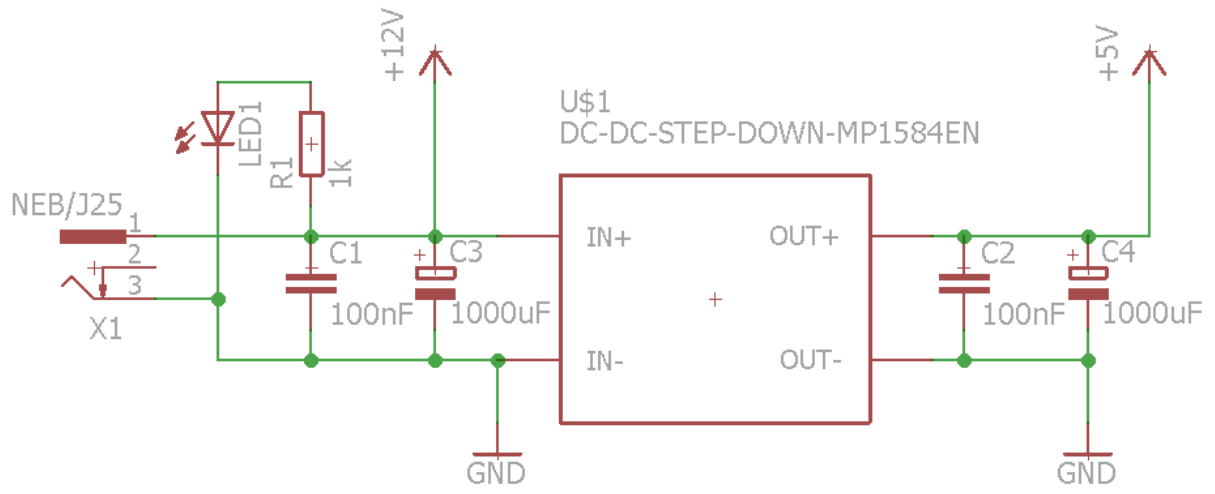
<sup>7</sup> - – puudub

<sup>8</sup> x – vastavad andmed puuduvad andmelehest

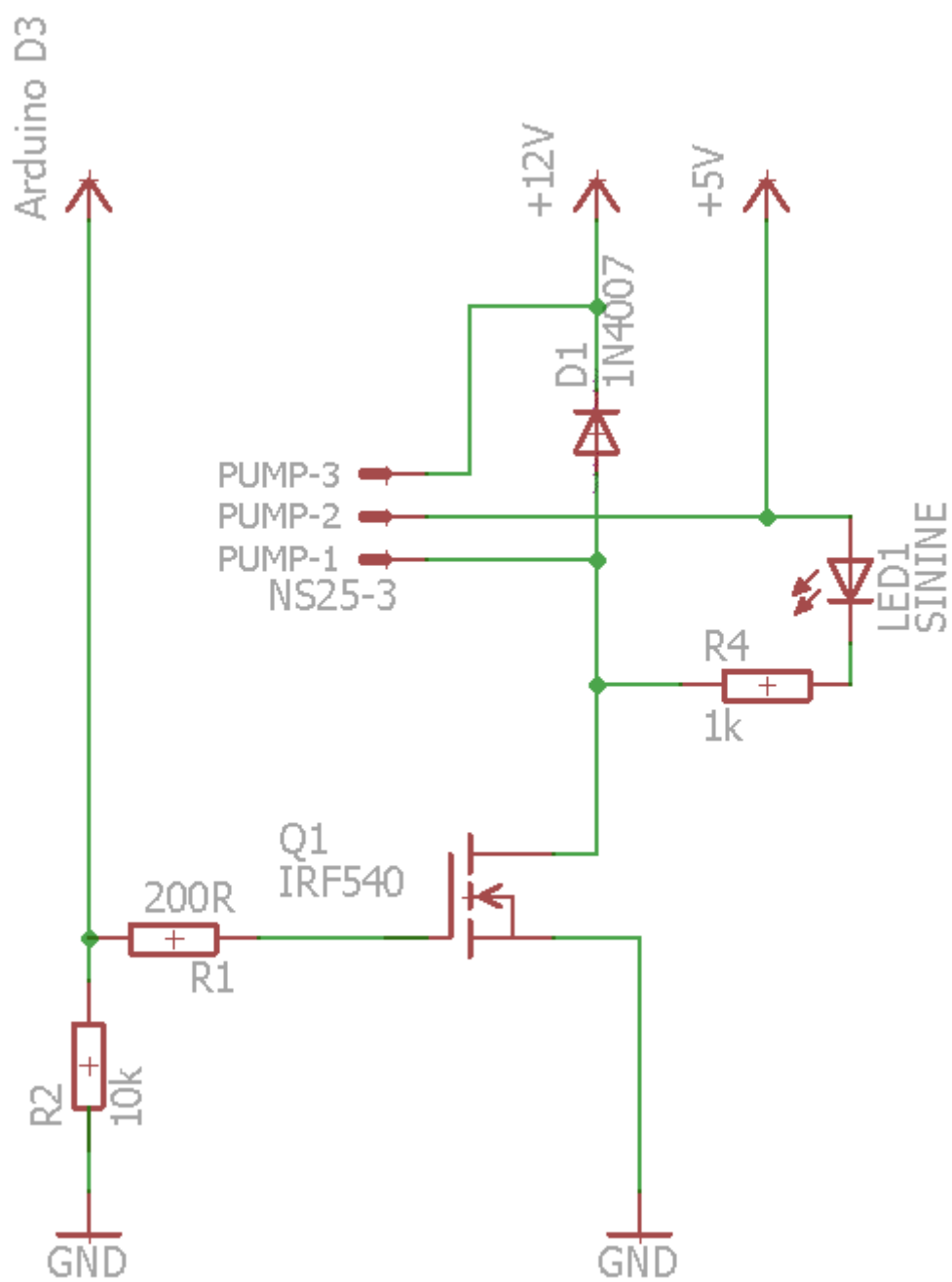
### 7.3 Lisa 3. Mikrokontrolleri ja rõhuanduri elektriskeem



#### 7.4 Lisa 4. Toiteahela prototüübi elektriskeem

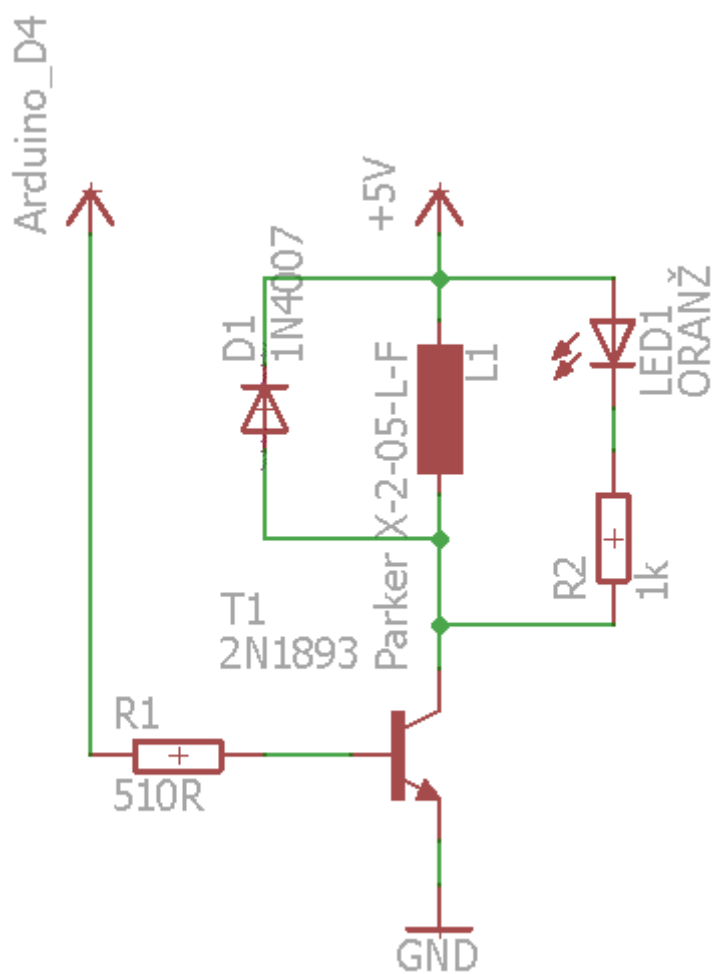


## 7.5 Lisa 5. Pumba juhtahela prototüübi elektriskeem

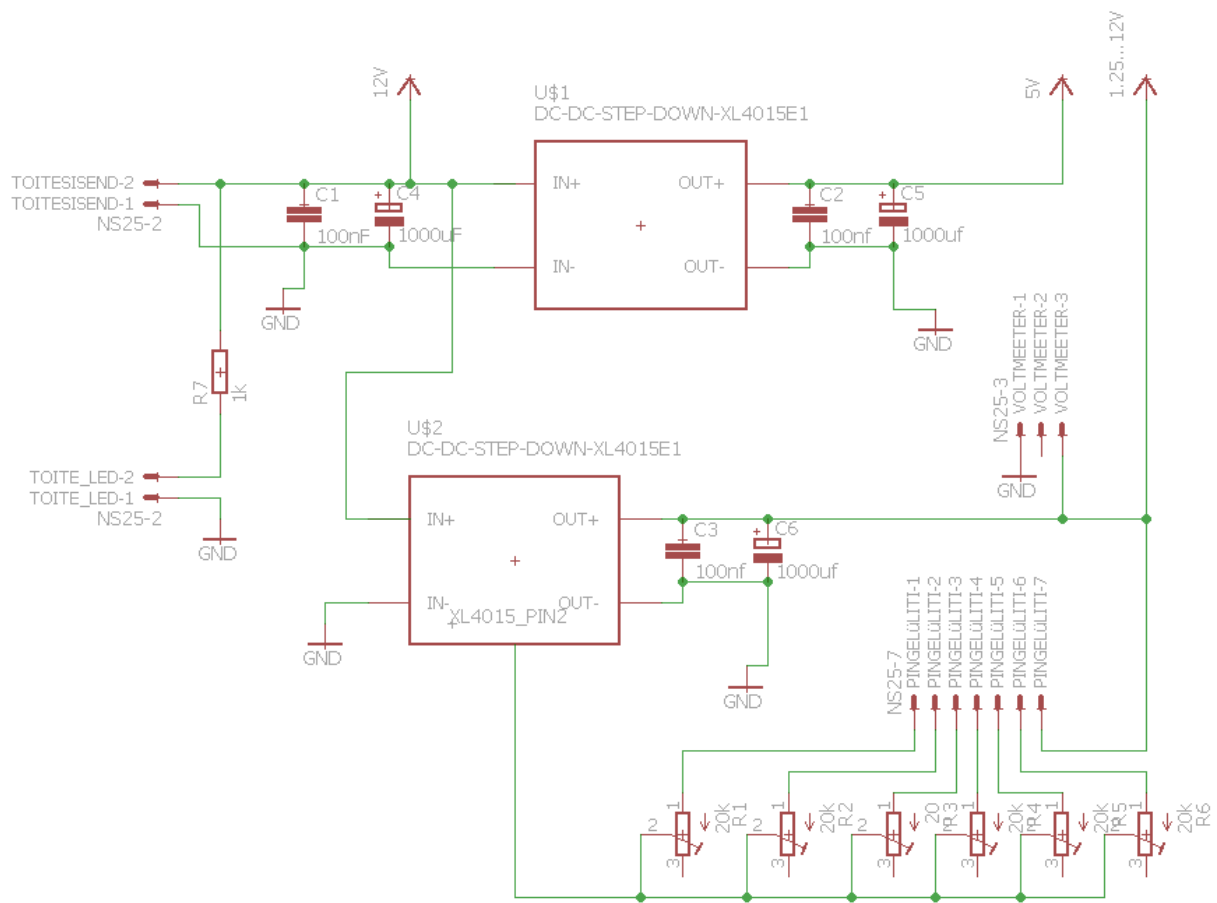




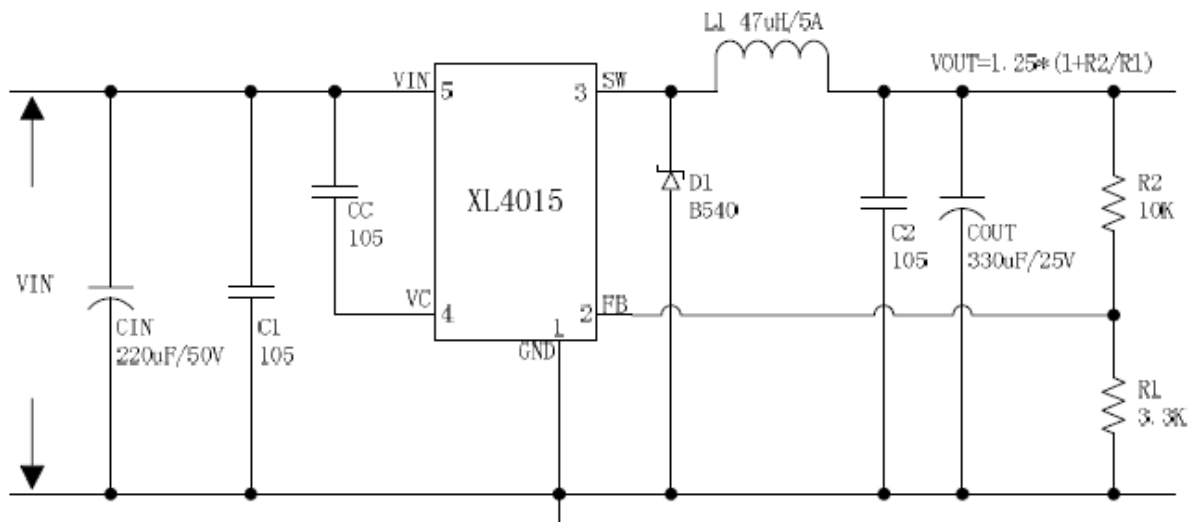
## 7.6 Lisa 6. Klapi juhtahela prototüübi elektriskeem



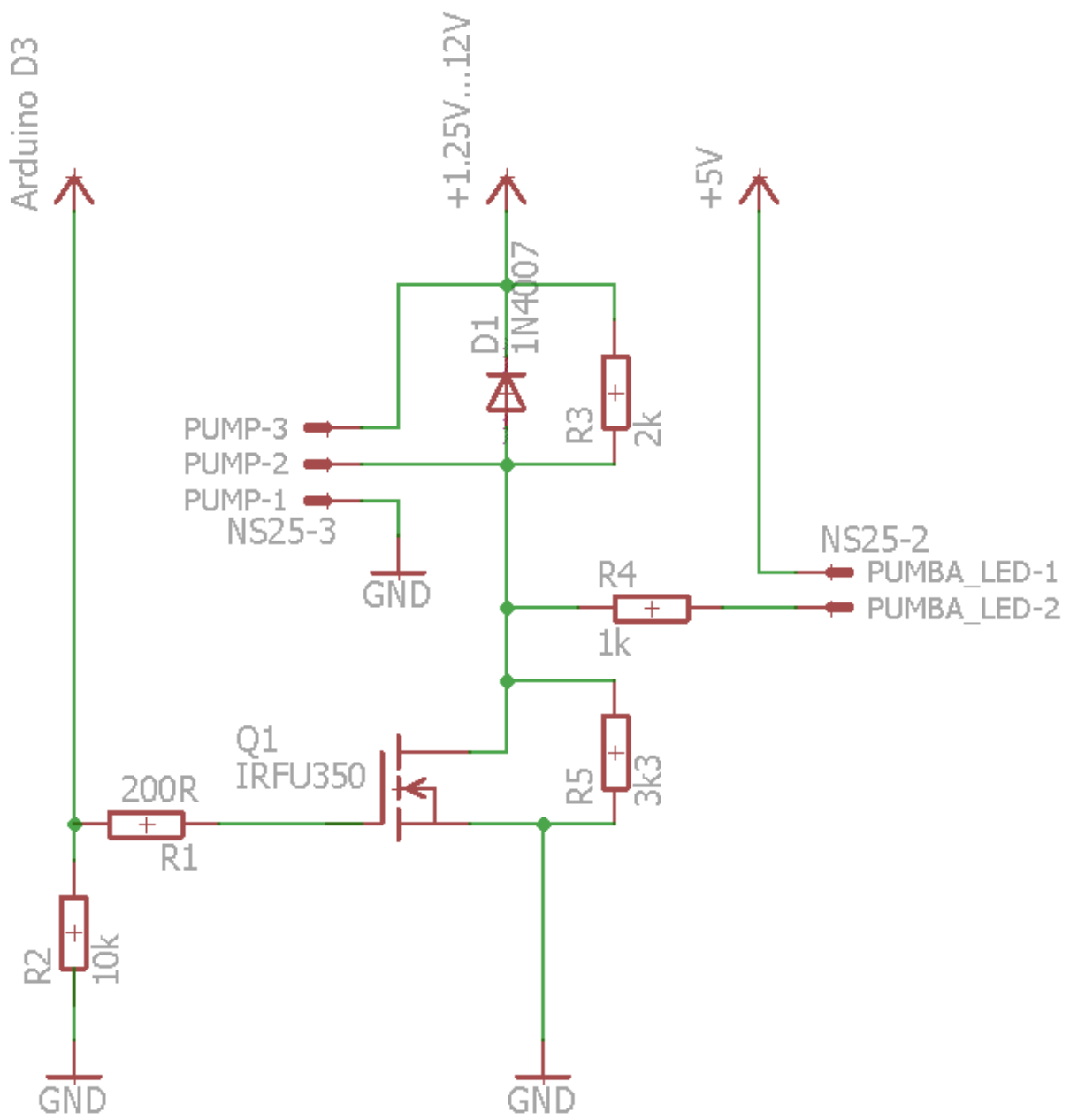
## 7.7 Lisa 7. Täiustatud toiteahela elektriskeem



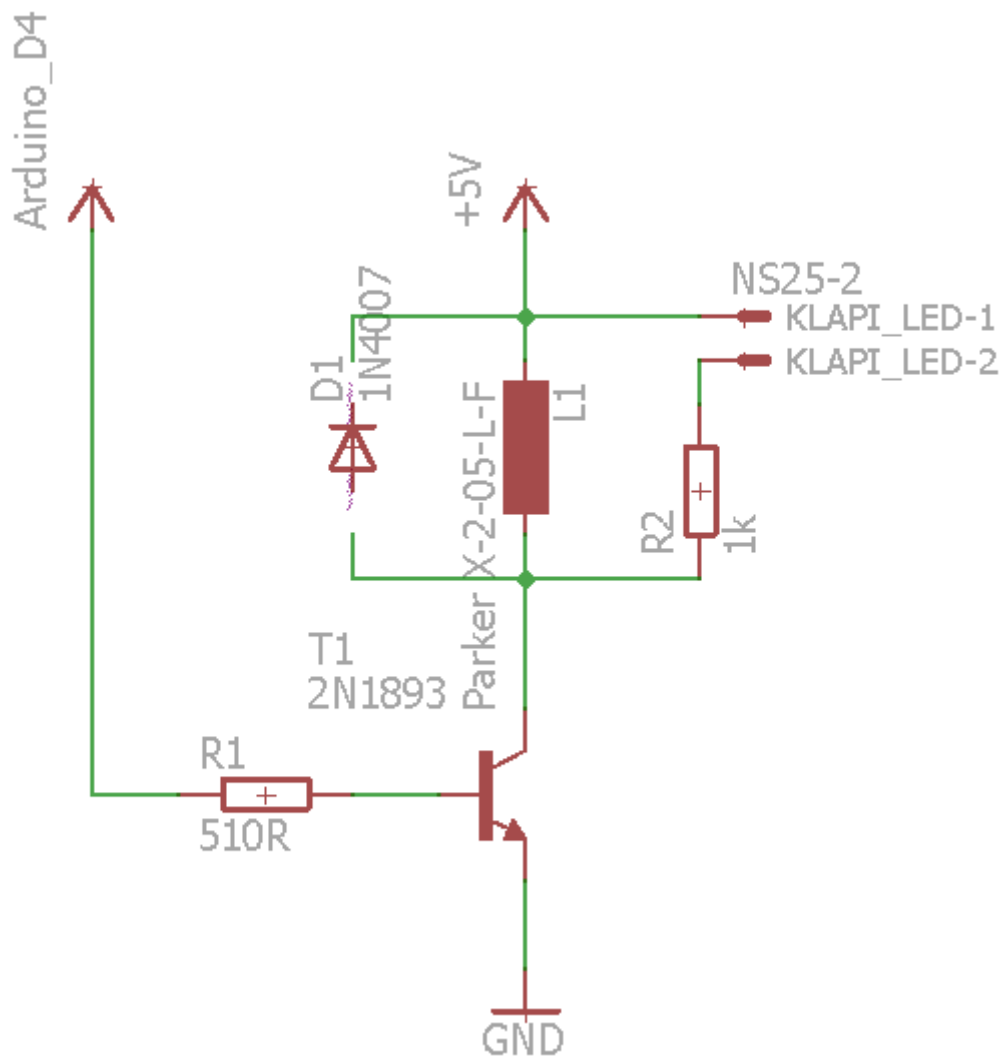
### 7.8 Lisa 8. XL4015 toitemooduli skeem



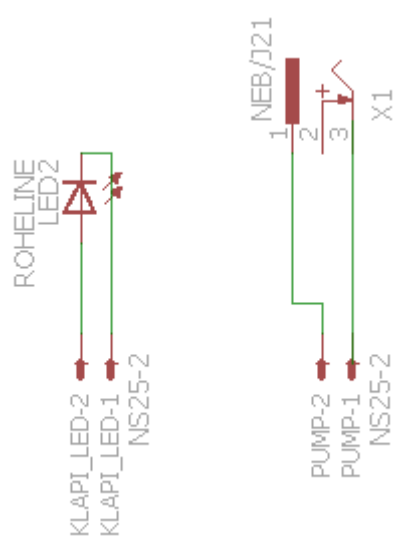
### 7.9 Lisa 9. Täiustatud pumba juhtahel



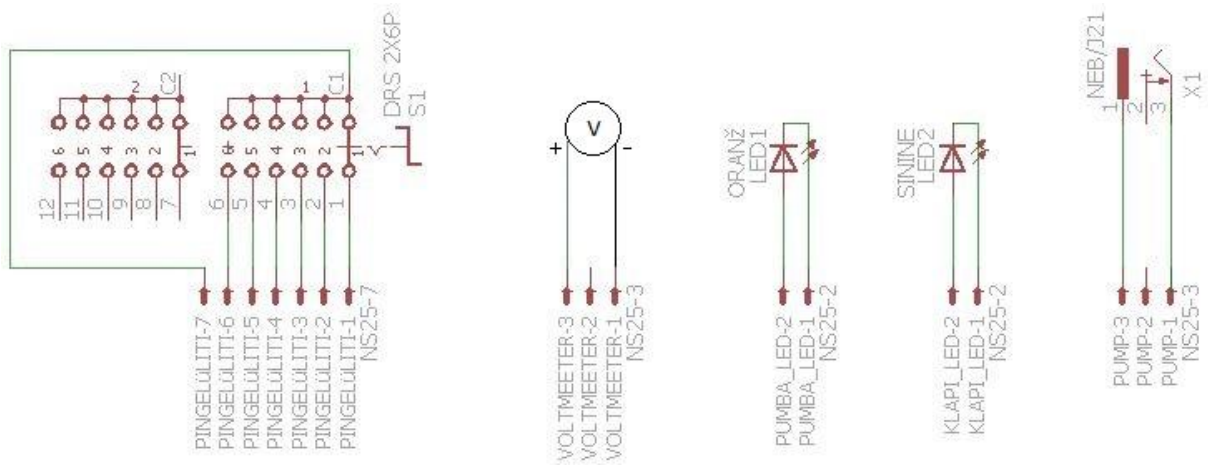
### 7.10 Lisa 10. Täiustatud klapi juhtahel



## 7.11 Lisa 11. Tagapaneeli skeem



## 7.12 Lisa 12. Esipaneeli skeem



### 7.13 Lisa 13. Arduino programmi lähtekood.

```
// Programm Arduino Nano abil SPI rõhuanduri lugemi
//      saatmiseks jadapordi kaudu arvutisse.
// Riistvara: Arduino Nano ja Honeywell HSCDAND015PDSA3
//      (3.3 V tööpinge!).
// Autor: Juhan Koppel.
// Viimati muudetud: 25.05.16.
// Kasutatud abimaterjalid:
// http://tronixstuff.com/2011/05/13/tutorial-arduino-and-
//      the-spi-bus/
// http://www.arduino.cc/en/Reference/SPI (ja selle
//      alamlehed)
// http://forum.arduino.cc/index.php?topic=92718.0
// https://www.arduino.cc/en/Serial/Read

// Lisame SPI teegi:
#include "SPI.h"

// Määrame muutujad:
int sisendbait; // Jadapordist sisse tuleva info muutuja
byte bait1; // Rõhuandurist tuleva 1. baidi muutuja
byte bait2; // Rõhuandurist tuleva 1. baidi muutuja
unsigned int baidid; // Rõhuandurist tuleva rõhuinfo
//      muutuja
String lugem; // Rõhuanduri lugemi muutuja stringi kujul
int pumbaPWM = 0; // Pumba juhtimise PWM väärtus
int pumbaKanal = 3; // Pumba juhtimise kanal
int klapiKanal = 4; // Solenoidklapi juhtimise kanal

void setup() {
  // Määrame klapi juhtkanali digiväljundiks:
  pinMode(klapiKanal, OUTPUT);
  // Määrame SPI ühenduse SS jala väljundiks:
  pinMode(SS, OUTPUT);
  // Aktiveerime SPI:
  SPI.begin();
  // Määrame, mis järjekorras bitid tulevad:
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  // Alustame jadapordi ühenduse kiirusega 115200 baud:
  Serial.begin(115200);
}

// Põhistsükkel:
void loop() {
  // Kontrollime, kas jadapordis on andmeid ootel:
  if (Serial.available() > 0) {
    sisendbait = Serial.read(); // Kui andmeid on, loeme need
    //      sisse
    if (sisendbait > 47 && sisendbait < 58) { // Kas
    //      jadapordis on number 0...9?
```



```

    pumbaPWM = (pumbaPWM*10)+(sisendbait-48); // Koostame
        kümendarvu
    }

    if (sisendbait == 61) { // Jadapordis "="
        analogWrite(pumbaKanal, pumbaPWM); // Kirjutame
            moodustatud kümnendarvu pumba PWM väärtuseks
        pumbaPWM = 0; // Nullime pumba väärtuse muutuja ära.
    }

    if (sisendbait == 45) { // Jadapordis "-" ehk klapi
        avamise käsk
        digitalWrite(klapiKanal, HIGH);
    }

    if (sisendbait == 43) { // Jadapordis "+" ehk klapi
        sulgemise käsk
        digitalWrite(klapiKanal, LOW);
    }

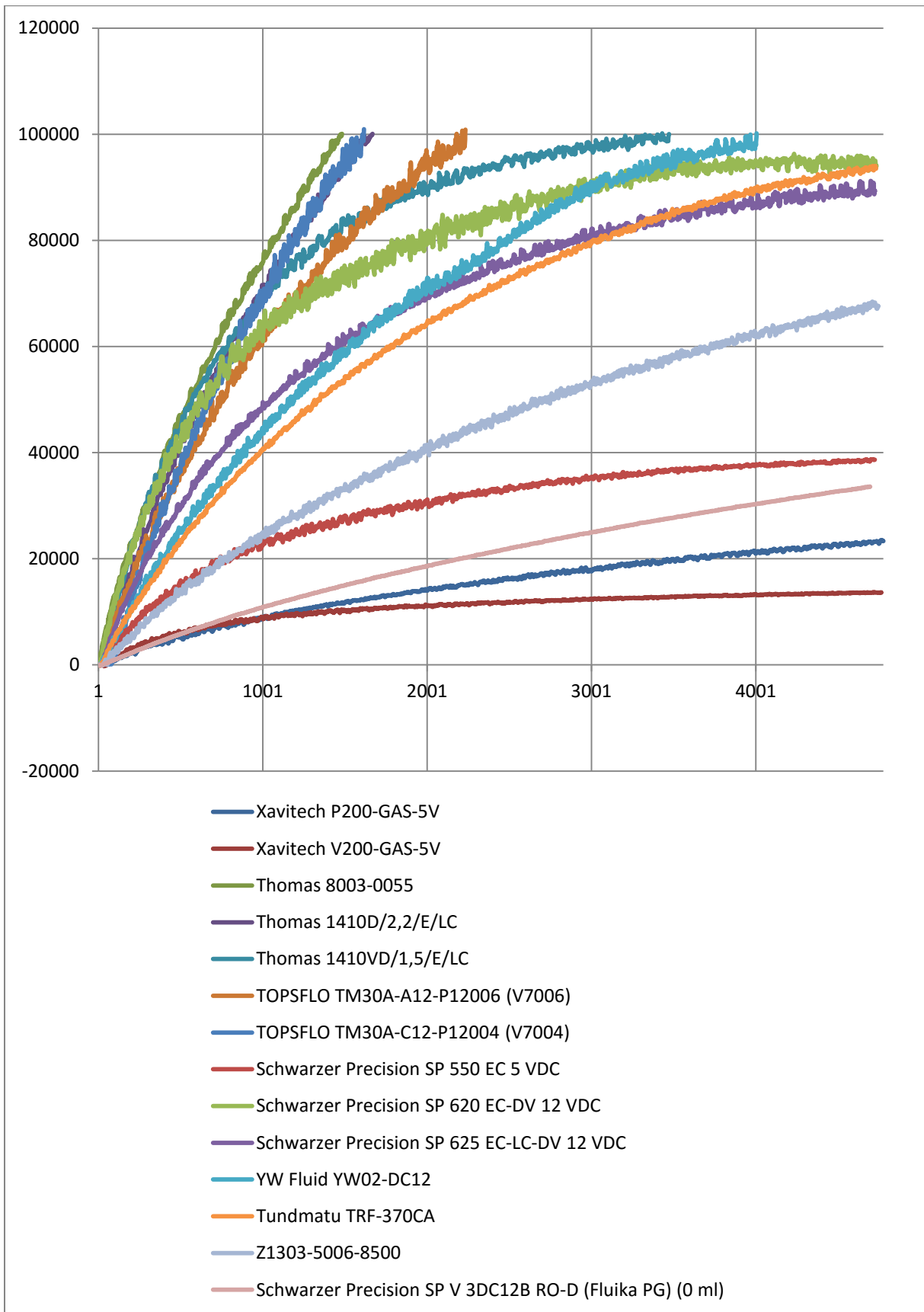
    if (sisendbait == 63) { // Jadapordis "?" ehk rõhupäring
        // Alustame SPI suhtluse:
        SPI.beginTransaction(SPISettings(500000, MSBFIRST,
            SPI_MODE0));
        // Seame SPI alamseadme aktiivseks:
        digitalWrite(SS, LOW);
        // Loeme rõhuanduri näidu 2 baidina:
        bait1 = SPI.transfer(0);
        bait2 = SPI.transfer(0);
        // Seame SPI alamseadme passiivseks:
        digitalWrite(SS, HIGH);
        // Lõpetame SPI suhtluse:
        SPI.endTransaction();
        // Paneme baidid kokku:
        baidid = bait1;
        baidid = baidid << 8;
        baidid |= bait2;
        //lugem = String(baidid) + "!";
        // Seame SPI alamseadme passiivseks:
        digitalWrite(SS, HIGH);
        // Saadame loetud andmed jadapordi kaudu arvutisse:
        Serial.println(baidid);
    }
}
}
}

```

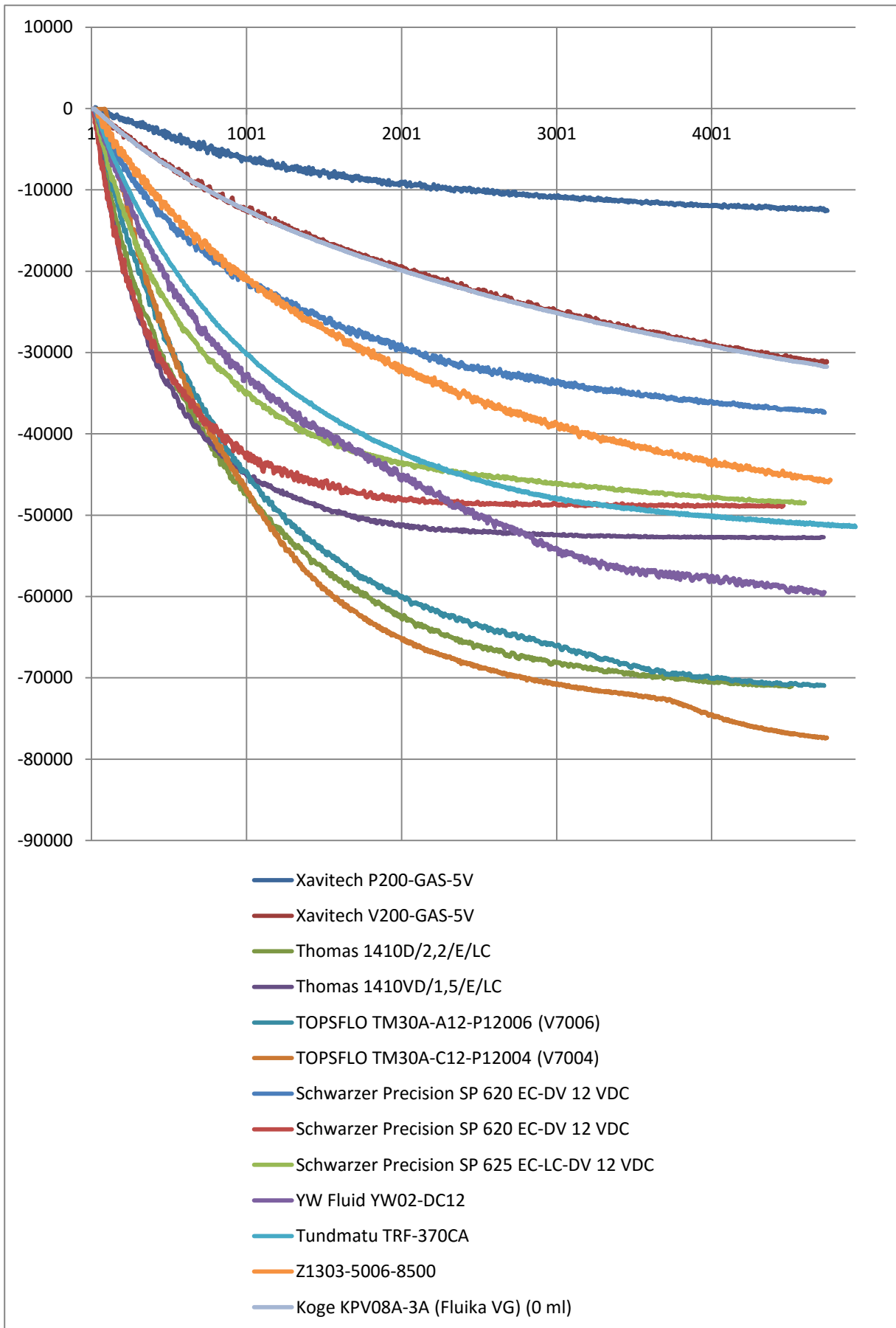
7.14 Lisa 14. Pumpade maksimumrõhu testi mõõteandmete tabel

Parameetrid tootja andmelehelede järgi / uuritav pumbamoodul	Maksimaalne ülerõhk andmelehe järgi (kPa)	Maksimaalne mõõdetud ülerõhk katse 1 (kPa)	Maksimaalne mõõdetud ülerõhk katse 2 (kPa)	Maksimaalne mõõdetud ülerõhk katse 3 (kPa)	3 katse keskmine	Vahe (kPa)	Andmelehe ja mõõdetud ülerõhu vahe (%)	Maksimaalne alarõhk (kPa)	Maksimaalne mõõdetud alarõhk katse 3 (kPa)	Maksimaalne mõõdetud alarõhk katse 3 (kPa)	Maksimaalne mõõdetud alarõhk katse 3 (kPa)	3 katse keskmine	Vahe (kPa)	Andmelehe ja mõõdetud alarõhu vahe (%)
Xavitech P200-GAS-5V	45	36,75	36,39	35,84	36,32	-8,68	-19,28	-18,00	-15,45	-15,55	-15,55	-15,51	2,49	-13,81
Xavitech V200-GAS-5V	18	15,50	15,06	14,74	15,10	-2,90	-16,13	-45,00	-34,63	-34,54	-34,21	-34,46	10,54	-23,42
Thomas 8003-0055	200	>100	>100	>100	>100	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-
Thomas 1410D/2,2/E/LC	100	>100	>100	>100	>100	-	-	0,00	-53,36	-53,05	-52,93	-53,11	-53,11	-
Thomas 1410VD/1,5/E/LC	190	>100	>100	>100	>100	-	-	-75,00	-70,87	-71,47	-71,70	-71,35	3,65	-4,87
TOPSLO TM30A-A12-	120	>100	>100	>100	>100	-	-	-70,00	-72,30	-72,52	-72,59	-72,47	-2,47	3,53
TOPSLO TM30A-C12-	120	>100	>100	>100	>100	-	-	-70,00	-73,79	-74,08	-74,27	-74,04	-4,04	5,78
Schwarzer Precision SP 550 EC	37	40,24	40,18	40,14	40,19	3,19	8,61	-40,00	-39,11	-39,12	-39,10	-39,11	0,89	-2,23
Schwarzer Precision SP 620 EC-	180	96,18	96,49	96,23	96,30	-83,70	-46,50	-64,00	-48,74	-48,75	-48,89	-48,79	15,21	-23,76
Schwarzer Precision SP 625 EC-	180	93,59	93,86	93,82	93,76	-86,24	-47,91	-65,00	-49,19	-49,72	-49,95	-49,62	15,38	-23,66
YW Fluid YW02-DC12	100	>100	>100	>100	>100	-	-	-50,00	-62,67	-62,63	-62,49	-62,60	-12,60	25,20
Tundmatu TRF-370CA	0	>100	>100	>100	>100	-	-	0,00	-53,93	-53,85	-53,75	-53,84	-53,84	-
Z1303-5006-8500	0	88,19	89,24	89,08	-	-	-	-45,00	-49,87	-49,30	-49,97	-49,71	-4,71	10,47
Schwarzer Precision SP V	60	65,91	66,17	65,67	65,92	5,92	9,86	-	-	-	-	-	-	-
Koge KPV08A-3A (Flukka VG)	-	-	-	-	-	-	-	-35,00	-43,58	-43,69	-43,72	-43,66	-8,66	24,75

### 7.15 Lisa 14. Pumpade rõhukarakteristikute võrdlusgraafik ülerõhu tekitamisel



Lisa 15. Pumpade rõhukarakteristikute võrdlusgraafik alarõhu tekitamisel



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

Mina, Juhan Koppel,

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

**MIKROFLUIDIKA INSTRUMENTIDES KASUTATAVATE RÕHUPUMPADE  
KARAKTERISEERIMISEKS VAJALIKU SEADME DISAINIMINE**

mille juhendaja on Alvo Aabloo,

1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, 01.06.2016