TARTU ÜLIKOOL
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Tehnoloogiainstituut

Lauri Raudla

Taimede gaasivahetuse mõõtekambri valguslahenduse automatiseeritud kalibreerimine

Arvutitehnika bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendajad:
PhD Veiko Vunder

Tartu 2022

Resümee

Taimede gaasivahetuse mõõtekambri valguslahenduse automatiseeritud kalibreerimine

Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis on mõõtesüsteem, millega jälgitakse taimede gaasivahetust sõltuvalt valgusest. Töö eesmärgiks on mõõtesüsteemi valgustite kalibreerimine, et tagada võimalikult täpsed tulemused edaspidises teadustöös antud masinat kasutades. Töö raames loodi tarkvara automaatse kalibratsiooni teostamiseks ja saadud tulemuste analüüsimiseks ning edaspidiseks töötlemiseks. Töö täitis oma eesmärgid ja sellega on võimalik kalibreerida antud masina valgustid nelja tööpäevaga, kulutades alla tunni operaatori aega.

CERCS: T125, automatiseerimine, robootika, *control engineering*

Märksõnad: automatiseerimine, LabVIEW visuaalprogrammeerimine, taimede gaasivahetus

Abstract

Automated calibration of the light solution of a gas exchange measurement device

There is a machine in the Technology Institute of the University of Tartu used to measure gas exchange of plants based on light. The goal of this bachelor's thesis is calibrating the lamps illuminating the plants to provide accurate results in further science using the specific machine. Code was written for automatic calibration and analysis of the results. The thesis fulfilled its goals and it can be used to calibrate the lamps of the machine in four working days, requiring less than an hour of an operator's time.

CERCS: T125, automation, robotics, control engineering

Keywords: automation, LabVIEW, visual programming, plant gas exchange

Sisukord

Resümee **2**

Abstract **2**

Sisukord **2**

Jooniste loetelu **5**

Tabelite loetelu **7**

Kasutatud mõisted ja lühendid **8**

Sissejuhatus **9**

1. Gaasivahetus taimedes **10**
1.1 Harilik müürlook 10
1.2 Taimede gaasivahetuse uurimiseks loodud mõõtesüsteem 10

2 Mõõtesüsteem **12**
2.1 Mõõtesüsteemi kirjeldus 12
2.2 Valgustite juhtimine 15

3 Nõuded loodavale kalibratsioonisüsteemile **17**
3.1 Nõuded kalibreerimislahendusele 17
3.2 Nõuded andurile 17
3.3 Nõuded tarkvarale 18

4 Kalibreerimislahendus **19**
4.1 PAR Anduri valik 19
4.1.1 Ülevaade 19
4.1.2 LI-COR LI-190R 20
4.1.3 Vernier PAR Sensor 20
4.1.4 Apogee SQ-520/SQ-616 21
4.1.5 Valitud andur 21
4.2 Anduri ühendamine mõõtesüsteemiga 21

5 Tarkvaraline lahendus **23**
5.1 Programmi lühikirjeldus 23
5.2 Kalibratsiooni programm 24
5.2.1 Programmi kasutamine 24
5.2.2 Anduri kasutamine 26

5.2.3 Valgustite juhtimine 27
5.2.4 Anduri ja valgustite integreerimine 27
5.2.5 Seadete valimine 27
5.2.6 Andmete kogumine, salvestamine 28
5.3 Mudelite loomise programm 29
5.4 Iseseisev testimisalus 29

6 Andmete analüüs 31
6.1 Tehtud mõõtmised 31
6.2 Ühe mõõtmise üldandmed 31
6.3 Kogu süsteemi mõõtmised 33
6.4 Kordusmõõtmiste võrdlus 35
6.5 Mudelite loomine 38

Kokkuvõte 40

Tänuavaldused 41

Kirjandus 42

LISA A. Loodud tarkvara repositoorium 43

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks 44

Jooniste loetelu

Joonis 1.1: Anumas taime kasvatamine 11

Joonis 2.1: Taimed mõõtesüsteemis: (a) valgustatud taimed anumates; (b) solenoidid taimede taga 13

Joonis 2.2: Mõõtesüsteemi gaasivahetuse plokkskeem 13

Joonis 2.3: Mõõtesüsteemi valgustus: (a) kogu süsteemi valgustus; (b) valgustid lähedalt 14

Joonis 2.4: Mõõtesüsteemi kasutamine 15

Joonis 2.5: Valgustite juhtimine 16

Joonis 2.6: DMX kontrolleritele saadetud jada struktuur 16

Joonis 4.1: Anduri hoidik: (a): hoidiku mudel; (b) andur 3D prinditud hoidikus; (c) hoidik koos anduriga mõõtesüsteemis 22

Joonis 5.1: CalibMeasure.vi plokkskeem: (a) programmi ülevaade; (b) programmi põhitsükkel 24

Joonis 5.2: Programmi kasutajaliides 25

Joonis 5.3: Anduriga suhtlemiseks kasutatavad käsud 26

Joonis 5.4: Valitavad seaded mõõteprogrammis 28

Joonis 6.1: Mõõdetud valguse intensiivsuse liikuv keskmine ja standardhälve ajas: (a) valguse intensiivsus kogu mõõtmise vältel; (b) valguse intensiivsus valitud lõigus 32

Joonis 6.2: Valgusti indeksiga 7 mõõõtetulemused 33

Joonis 6.3: Süsteemi valgustite siniste kanalite valguse intensiivsus 34

Joonis 6.4: Valgusti indeksiga 7 mõõtmise üldandmed 35

Joonis 6.5: Kordusmõõtmiste aritmeetilise keskmise ja standardhälbe suhe 36

Joonis 6.6: Kordusmõõtmiste standardhälve: (a) lineaarsel skaalal; (b) logaritmilisel skaalal 37

Joonis 6.7: Mudeli erinevus mõõteandmetest: (a) kahekse mõõtepunktiga; (b) 18 mõõtepunktiga 39

Tabelite loetelu

Tabel 4.1: PAR andurite parameetrite võrdlus 20

Kasutatud mõisted ja lühendid

Lühend	ingliskeelne vaste	eestikeelne vaste
PAR	Photosynthetically active radiation	Fotosünteetiliselt aktiivne kiirgus
LED	Light-emitting diode	Valgusdiood
USB	Universal Serial Bus	Universaalne jadasiin

Sissejuhatus

Käesolev bakalaureusetöö tegeleb Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis oleva mõõtesüsteemiga millega uuritakse valguse mõju taimede gaasivahetusele. Kuna mõõtesüsteemis kasutatavate valgusallikate intensiivsused võivad omada märkimisväärseid kõrvalekaldeid ja on tundlikud näiteks temperatuurile, tuleb valgusteid eksperimentide läbiviimiseks eelnevalt fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse anduriga kalibreerida. Kvaliteetse kalibratsiooni jaoks on tarvis koguda mitmeid mõõtepunkte. Senini on kalibratsiooniks vajalikud valgusintensiivsuse väärtused saadud eraldiseisva käeshoitava seadmega. Kuna piisava täpsusega kalibratsiooni saamiseks on vaja teha mõõtmisi pika aja jooksul ja koguda mitmeid andmepunkte on vastava kvalifikatsiooniga inseneril selleks seni kulunud ligikaudu 2 tööpäeva. Andmepunktide kogumisel saadeti kõikidele valgustitele samad väärtused, ehk tulemused sisaldasid ka müra kõrvalolevatest valgustitest ning rohelise valgusti kanali kohta andmepunkte ei kogutud, sest seda ei kasutatud.

Töö eesmärgiks on kalibreerimisprotsess automatiseerida ja seda kasutaja jaoks oluliselt lihtsustada. Selleks on tarvis leida sobiv andur valgusintensiivsuse automaatseks mõõtmiseks, integreerida andur füüsiliselt olemasolevasse süsteemi, luua vastav tarkvaraline võimekus ja integreerida see olemasoleva LabVIEW juhtprogrammiga. Programm peab sisaldama intuitiivset kasutajaliidest seadete valimiseks ning andma kasutajale reaalajas tagasisidet toimuva kohta. Bakalaureusetöö raames sai loodud tarkvara valgustite automatiseeritud mõõtmiseks ja mõõteandmete töötlemiseks ning disainitud ja 3D prinditud vajalik alus anduri paigutamiseks valgustite alla.

1. Gaasivahetus taimedes

Fotosünteesi käigus toimub taimedel gaasivahetus, selle käigus muutuvad peamiselt süsihappegaasi, veeauru ning osooni kontsentratsioonid ümbritsevas gaasikeskkonnas. Gaasivahetuse kiirust mõjutavad mitmed keskkonnast tulenevad parameetrid, näiteks taimele kättesaadava vee kogus[1] ning valgus. Taimede gaasivahetuste uurimine erinevatel keskkonnatingimustel annab ülevaate nende vastupidavusest ekstreemsetes tingimustes. Taimi paremini tundma õppides on tulevikus võimalik luua sorte, mis saavad muutlikes tingimustes paremini hakkama.

Suur osa inimkonna teadmistest elavate rakkude kohta tulenevad mudelorganismidest. Mudelorganismid on nii loomad kui taimed ning nende eeliseks on lihtne paljundamine ning suurtes kogustes säilitamine laboritingimustes. Neid organisme uurides loodetakse omandada uusi teadmisi ja arusaami, mis rakenduvad ka teistel liikidel. [2, 3]

1.1 Harilik müürlook

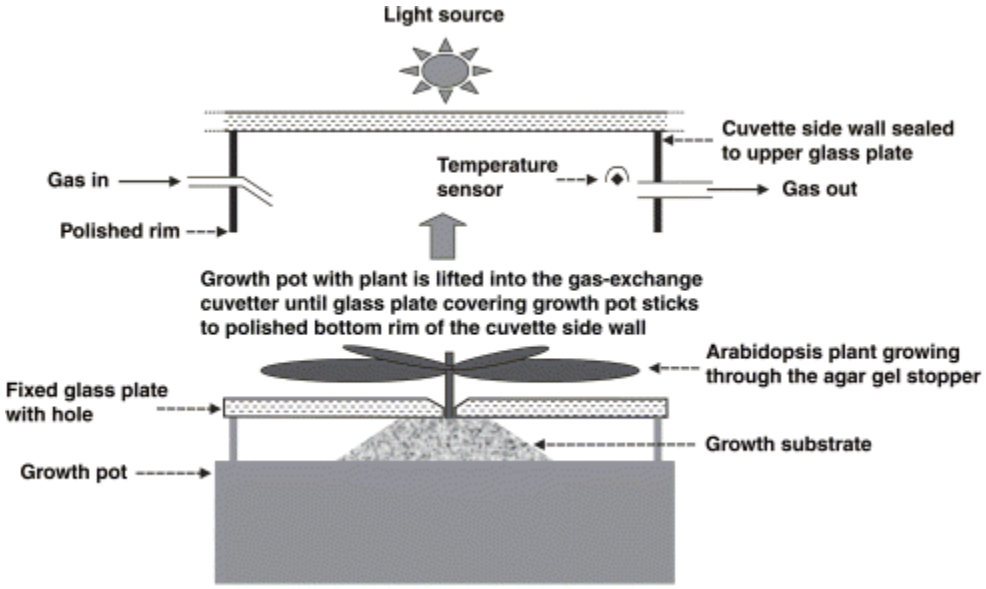
Harilik müürlook ehk arabidopsis thaliana on väike ristõieliste sugukonda kuuluv taim. Samasse sugukonda kuuluvad ka erinevad kapsad. Taimel on lühike eluiga ning kasvab hästi laboritingimustes. Tänu väiksele genoomile on taim üks mudelorganismidest, mida kasutatakse laialdaselt teadustöös taimede ja viljade uurimiseks. [4]

Taime on kasutatud 1980 aastatest ning sai kiiresti teadlaste seas populaarseks ning 2000. aastal avaldati A. thaliana genoom. Tänu taime kiirele kasvule ning soodsatele kasvutingimustele on tehtud lühikese aja jooksul suuri edusamme taimede arengu, rakubioloogia, metabolismi ja muudes valdkondades. Taim on kasutuses ka teadustöös Tartu Ülikoolis. [5, 6]

1.2 Taimede gaasivahetuse uurimiseks loodud mõõtesüsteem

Taimede gaasivahetust uuritakse kas ühe lehe või taime kaupa. Peamiselt kasutatakse mõõtesüsteeme, mis mõõdavad gaasivahetust lehe kaupa, kuid on ehitatud mitmeid masinaid, mille abil uuritakse taimede gaasivahetust taime kaupa[6]–[8]. Käesoleva lõputöö raames käsitletud mõõtesüsteemis uuritakse gaasivahetust ühe taime kaupa, selleks kasvatatakse A.

thaliana taimi kaheksas anumas. Joonisel 1.1 on kirjeldatud taime paiknemist anumates - anuma põhjas on substraat, mille peal olevas klaasis on auk, läbi mille kasvab taim. [6]



Joonis 1.1: Anumas taime kasvatamine

2 Mõõtesüsteem

2.1 Mõõtesüsteemi kirjeldus

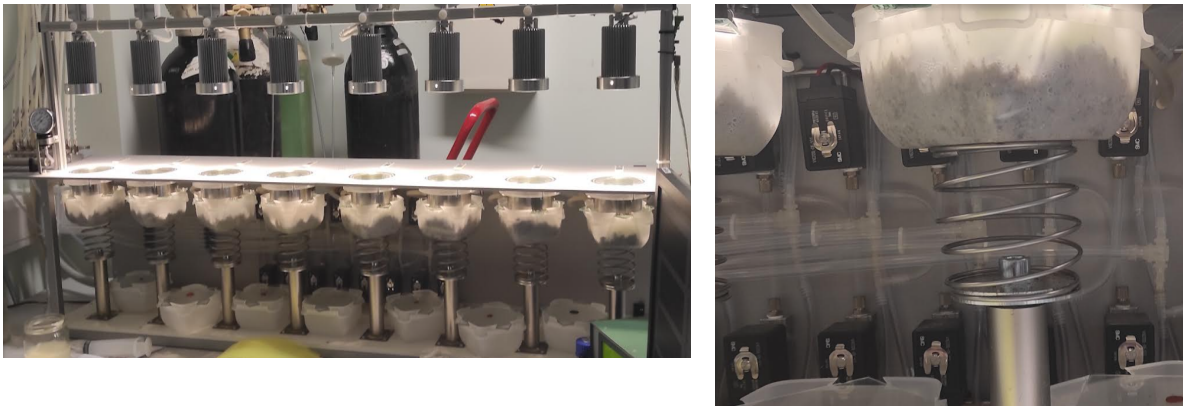
Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis asub mõõtesüsteem millega uuritakse taimede gaasivahetust sõltuvalt valgustusest. Kogu mõõtesüsteemi juhitakse arvutis oleva programmiga, mis on koostatud LabVIEW arenduskeskkonnas. LabVIEW on inseneridele mõeldud graafiline programmeerimiskeskkond, mis võimaldab hõlpsasti suhelda erinevate riist- ja tarkvaradega ning teostada andmehõivet.

Süsteemi tähtsamateks elementideks on:

- arvuti, millega kasutaja kontrollib valguse intensiivsust kõikidel LED-idel
- LI-COR LI-7000 CO2/H20 analüsaator
- LED valgustid, millega valgustatakse taimi, ning nende kontrollerid on nähtaval joonisel 2.3a ja 2.3b
- taimed ning nende anumad, kujutatud joonisel 2.1a valgustite all, ja voolikud koos solenoididega, mis on nähtaval joonisel 2.1b, mis juhivad gaasi taime kambrist analüsaatorisse

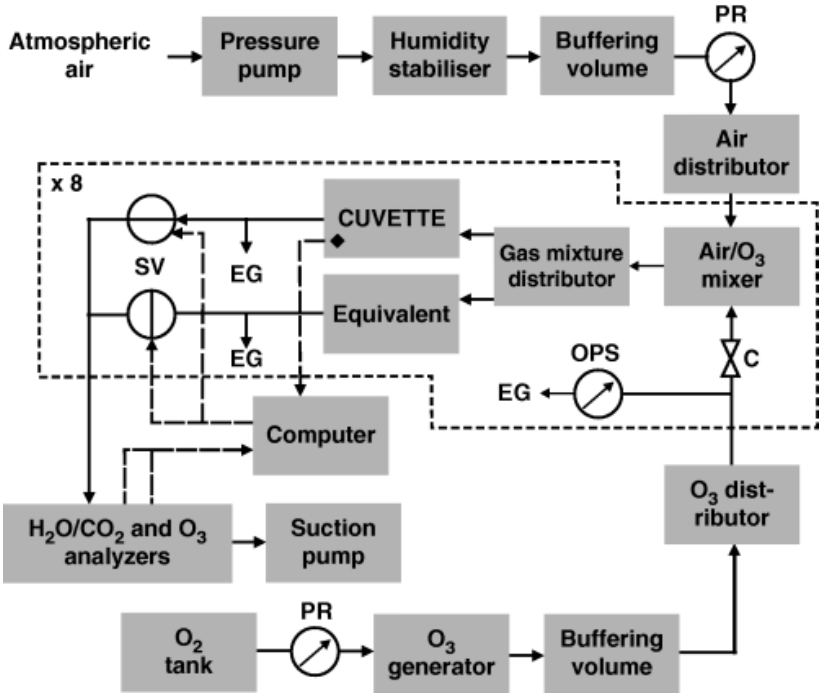
Sarnase süsteemi gaasivahetuse mõõtmise diagramm on nähtaval joonisel 2.2. Tegu on Tartu Ülikoolis loodud mõõtesüsteemiga, mis on vanem kui kasutuses olev süsteem, kuid gaasivahetuse mõõtmise teostus on sarnane. Süsteemi pumbatakse gaas sisse, luuakse soovitud gaasi segu ning seejärel pumbatakse see taimede kambritesse. Seejärel on võimalik arvutiga juhtida solenoidide olekuid, et valida millise kambri gaas liigub analüsaatorisse. Analüsaatorist saadetakse mõõtetulemused arvutisse. [6]

Kogu mõõtesüsteemi peale on kasutuses üks LI-COR LI-7000 analüsaator. Iga taime kambri gaasivahetuse analüüsimiseks võetakse kambrisse sisenevast gaasist referentsväärtus ning seejärel suunatakse solenoidide abil kambrist väljuv gaas analüsaatorisse ning tehakse mõõtmine. Protsessi korratakse kuni 8 kambri jaoks.

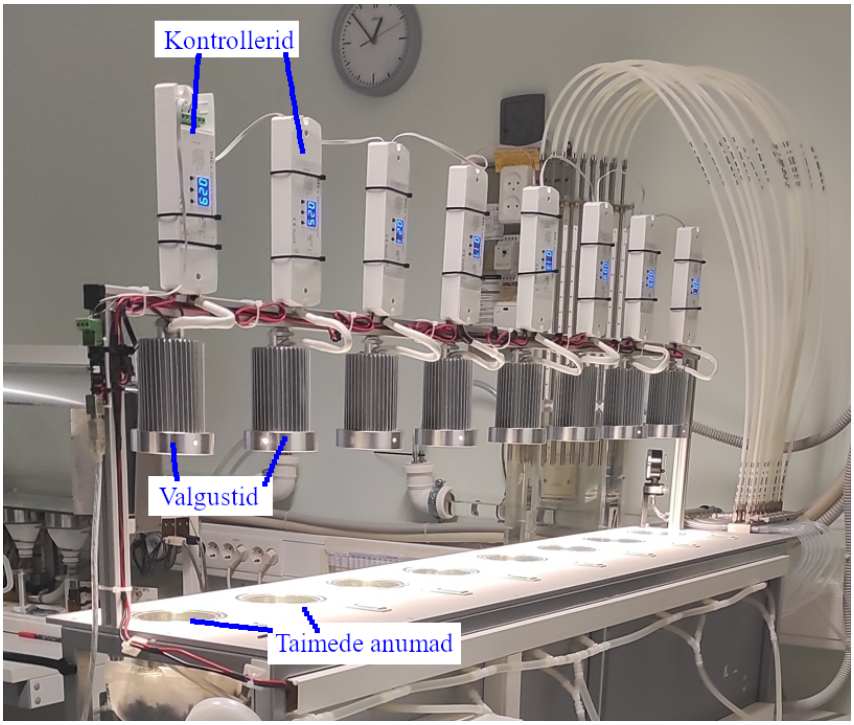


(a) **(b)**

Joonis 2.1: Taimed mõõtesüsteemis: (a) valgustatud taimed anumates; (b) solenoidid taimede taga



Joonis 2.2: Mõõtesüsteemi gaasivahetuse plokkskeem

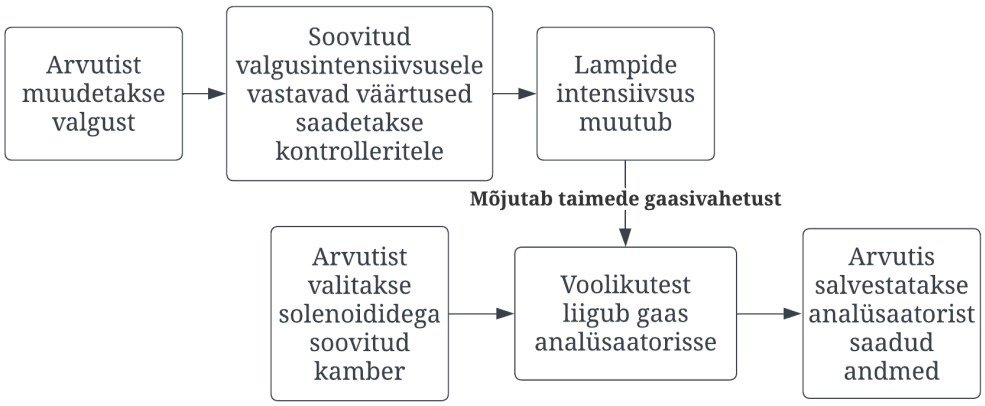


(a)

(b)

Joonis 2.3: Mõõtesüsteemi valgustus: (a) kogu süsteemi valgustus; (b) valgustid lähedalt

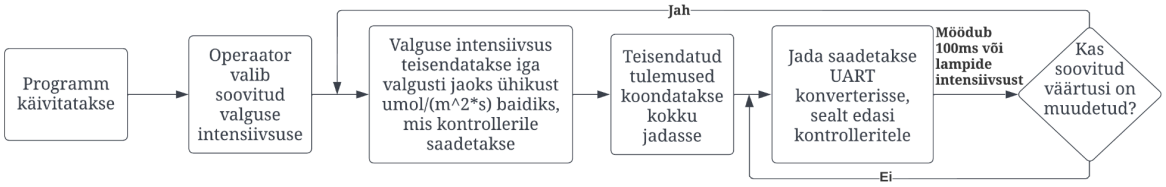
Mõõtesüsteemi kasutusprotsess on kokku võetud joonisel 2.4. Tüüpilisel kasutamisel seatakse uuritavad taimed anumatega LED-ide alla, arvutist valitakse soovitud valguse intensiivsus ning juhtarvutiga registreeritakse analüsaatorist saadud tulemused.



Joonis 2.4: Mõõtesüsteemi kasutamine

2.2 Valgustite juhtimine

Valgustite tarkvaraline juhtimine algab arvutis. Arvutis paikneb LabVIEW programm, millega kasutaja saab valida valguse intensiivsuse. Igal valgustil on 4 kanalit erinevate värvuste jaoks - punane (R), roheline (G), sinine (B) ja valge (W). Valguse intensiivsus sisestatakse ühikus µmol/(m²*s) ning programm teisendab sisestatud väärtuse kontrollerile sobivaks vastavalt mudelile. LED-e juhitakse D4C-L kontrolleriga. D4C-L kasutab suhtlemiseks lavatehnikas laialdast kasutust leidnud DMX512 andmevahetusprotokolli, mis võimaldab mitme seadme individuaalset juhtimist sama siini küljes. Käesolevas bakalaureusetöös kasutatud mõõtesüsteemis on siini küljes kaheksa valgustit. Tabelis 2.1 on kirjeldatud kontrolleritele saadetud jada struktuuri - jada algab start baidiga, millele järgnevad valgustid 4 kanali kaupa, mis määravad valgusti punase, rohelise, sinise ja valge kanali LED-i intensiivsuse. Kontrolleritega suhtlemiseks kasutatakse jadaliidese konverterit, mis võimaldab juhtida valguslahendust arvuti USB pordi kaudu.



Joonis 2.5: Valgustite juhtimine

START	Valgusti 0				Valgusti 1				…
START									…
0	R0	G0	B0	W0	R1	G1	B1	W1	…

Joonis 2.6: DMX kontrolleritele saadetud jada struktuur

3 Nõuded loodavale kalibratsioonisüsteemile

3.1 Nõuded kalibreerimislahendusele

Loodava kalibratsioonitarkvara nõuded said kokku lepitud autori ja mõõtesüsteemi kasutajate vahel. Tarkvara peab vastama järgnevatele nõuetele:

1. tarkvara võimaldab mõõta ja salvestada erinevate valgustite kontrolleritele saadetud väärtustele vastavaid intensiivsusi
2. tarkvara leiab optimaalsed parameetrid mudelile, mis kirjeldaks kontrolleri väärtuste ja intensiivsuste vahelist seost kirjeldaks kogu mõõtepiirkonna ulatuses täpsusega +-5 µmol/(m²*s)
3. tarkvara on automatiseeritud ja vajadus operaatori sekkumiseks kalibreerimisprotsessi on minimaalne
4. kogu mõõtesüsteemi kalibreerimine peaks võtma aega alla nädala - süsteemi broneeritakse nädala kaupa

.

3.2 Nõuded andurile

Varasemalt kasutati mõõtesüsteemi kalibreerimiseks käeshoitavat andurit Apogee Instruments MQ-500**.** Lähtuvalt varasema anduri spetsifikatsioonile ja koostöös mõõtesüsteemi kasutajatega selgitati välja järgnevad nõuded arvutijuhitavale PAR andurile:

1. anduri ühendusliides peab olema universaalne ja ühilduma olemasoleva mõõtesüsteemi juhtarvutiga
2. anduri tööpiirkond peaks jääma lainepikkuste vahemikku 400-700 nm
3. anduri absoluutne täpsus peab olema alla 5%
4. mõõtmiste korratavus(ingl *repeatability*), ehk kui palju võib erineda mõõdetud väärtus samadel tingimustel, peab olema alla 2%
5. pikaajaline triiv(ingl *long-term drift*), ehk anduri stabiilsus mitme aasta jooksul, peab olema alla 2% aastas
6. anduril eksisteerib detailne andmeleht ja dokumentatsioon

3.3 Nõuded tarkvarale

Automaatse kalibreerimislahenduse väljatöötamisel on üheks olulisemaks osaks tarkvara ning sobiliku kasutajaliidese arendamine. Töö alguses seati tarkvarale järgmised nõuded:

1. Kalibratsiooni tarkvara on kirjutatud LabVIEW graafilises programmeerimiskeeles
2. Kalibratsiooni tarkvara esipaneel on kasutajale intuitiivne ning mahub 1920x1080 (*FullHD*) eraldusvõimega monitorile
3. Kalibratsiooni tarkvaras on võimalik määrata
    - kalibreeritav valgusti
    - mõõtepunktide arv
    - asukoht tulemuste salvestuseks
    - PAR anduri ning valgustite kontrolleritega suhtlemiseks vajalikud *pordid*
4. Tarkvara peaks võimaldama järgnevaid tegevusi:
    - Automaatselt koguda mõõteandmeid ühe valgusti kohta ning salvestada mõõtepunktid ja mõõtmiste üldandmed organiseeritult failidesse
    - Analüüsida mõõtmiste üldandmeid, et veenduda programmi korrektses töös ning uurida valgustite intensiivsust mõõteperioodi vältel.
    - Kogutud mõõtepunktide abil luua, kuvada ning salvestada mudel, mis kirjeldab kontrollerile saadetud väärtuse seost valguse intensiivsusega.

4 Kalibreerimislahendus

4.1 PAR Anduri valik

4.1.1 Ülevaade

Fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse mõõtmiseks kasutatakse PAR (ingl *Photosynthetically active radiation*) andurit. Varasemalt kasutati mõõtesüsteemi kalibreerimiseks Apogee Instruments MQ-500[9] käeshoitavat andurit. Andurit kasutatakse, et uurida suhet valgustite kontrolleritele saadetud väärtuste ning fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse vahel. PAR väärtuse mõõtmiseks on turul saadaval mitme erineva tootja andureid nii eraldiseisvate mõõteseadmete osana kui arvutiga juhitavaid. Anduri valikul lähtuti esmalt peatükis 2 seatud nõuetest, kuid võeti arvesse ka LI-COR toodetud gaasianalüsaatori ja Apogee Instruments toodetud käeshoitava PAR anduri varasemat positiivset kasutamiskogemust. Lõplikusse valikusse jäid LICOR LI-190R [10], Vernier PAR Sensor[11] ja kaks andurit Apogee SQ tooteseeriast[12–14]. Kokkuvõttev tabel nimetatud andurite parameetritest on toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1: PAR andurite parameetrite võrdlus

Andur	Apogee MQ-500	LI-COR LI-190R	Apogee SQ-520	Apogee SQ-616	Vernier PAR sensor
Arvutiga liidestus	N/A	N/A	USB A	USB A	Vernier Go!link, USB A
Tööpiirkond	389-692 nm	Ligikaudu 400-700 nm	389-692 nm	400-750 nm	410-655 nm
Absoluutne täpsus	+-5%	+-5%	+-5%	+-5%	+-5%
Mõõtmise korratavus	< 0,5%	N/A	<1% kuni 4000 µmol/(m^2*s)	<1% kuni 4000 µmol/(m^2*s)	N/A
Pikaajaline triiv	<2% aastas	N/A	<2% aastas	<2% aastas	<2% aastas

4.1.2 LI-COR LI-190R

LI-190R on LI-COR poolt toodetud PAR andur. Anduri tööpiirkond on nõuetele vastav, kuid ei leidu informatsiooni korratavuse ja pikaajalise stabiilsuse kohta. LI-COR ei paku lahendust anduri arvutiga ühildamiseks. Nende puudujääkide tõttu ei valitud antud andurit. [10]

4.1.3 Vernier PAR Sensor

Vernier on tunnustatud mõõteriistade tootja ning nende tooteid kasutatakse tihti hariduslikel eesmärkidel. Vernier pakub oma toodetud PAR andurile põhjalikku dokumentatsiooni ning olemas on tähtsamad toote spetsifikatsioonid. Toetatud on anduri kasutamine LabVIEW-ga - Vernier pakub draivereid ning näidisprogramme LabVIEW-s kasutamiseks. Puudujääkideks on teiste tootjatega võrreldes kitsam lainepikkuste vahemik ning arvutiga ühildumiseks on vaja

adapterit. Sobiv adapter oleks Vernier Go!Link, mis võimaldab anduri ühendamist USB A liidesega. [11, 15]

4.1.4 Apogee SQ-520/SQ-616

Apogee Instruments on tootnud mitu PAR andurite seeriat ning nende anduriga on tehtud ka süsteemi esialgne kalibreerimine. SQ-520 ja SQ-616 anduridid on arvuti külge ühilduvad USB-ga. SQ-616 on EPAR andur, ehk laiendatud (ingl *extended*) PAR andur, ehk lainepikkuste vahemik on suurem. Kuigi SQ-520 tööpiirkond ei kattunud esialgsete nõuetega, otsustati selle anduri kasuks olemasoleva riistvaraga ühilduvuse saavutamiseks ning varem kasutatud PAR anduriga sama tööpiirkonna säilitamiseks. Tootja lehel on saadaval kõik vajalikud andmed anduri täpsuse kohta. [12–14]

4.1.5 Valitud andur

Süsteemi kalibreerimiseks valiti Apogee Instruments SQ-520 PAR andur. Tootja on toote andmelehes välja toonud kõik tähtsamad parameetrid: ühilduvus arvutiga USB A kaudu, tööpiirkond vahemikus 389-692nm, mõõtmise korratavus väiksem kui 1% kuni 4000 µmol/(m^2*s) ning pikaajaline triiv väiksem kui 2% aastas. Apogee Instruments pakub ka Python programmeerimiskeeles näidiskoodi anduri kasutamisest[16], selle alusel saab luua LabVIEW programmi anduriga suhtlemiseks.

4.2 Anduri ühendamine mõõtesüsteemiga

Taimele langeva valgusintensiivsuse mõõtmiseks, on tarvis paigutada andur taimega samale kaugusele valgusallikast. Selleks disainis töö autor spetsiaalse hoidiku, millega on võimalik asetada andur mõõtesüsteemis taime sisaldava katseanuma asemele ning tagada anduri stabiilne asetus mõõtmise käigus. Hoidik on suletud põhjaga silinder, kuhu andur kinnitub kaasatulnud kruviga. Autor disainis hoidiku mudeli Autodesk Fusion 360 tarkvaras ning printis selle välja Prusa i3 3D printeriga.

(a) **(b)** **(c)**

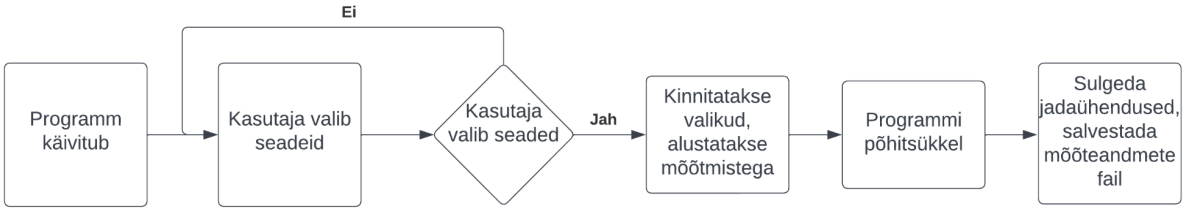
Joonis 4.1: Anduri hoidik: (a): hoidiku mudel; (b) andur 3D prinditud hoidikus; (c) hoidik koos anduriga mõõtesüsteemis

5 Tarkvaraline lahendus

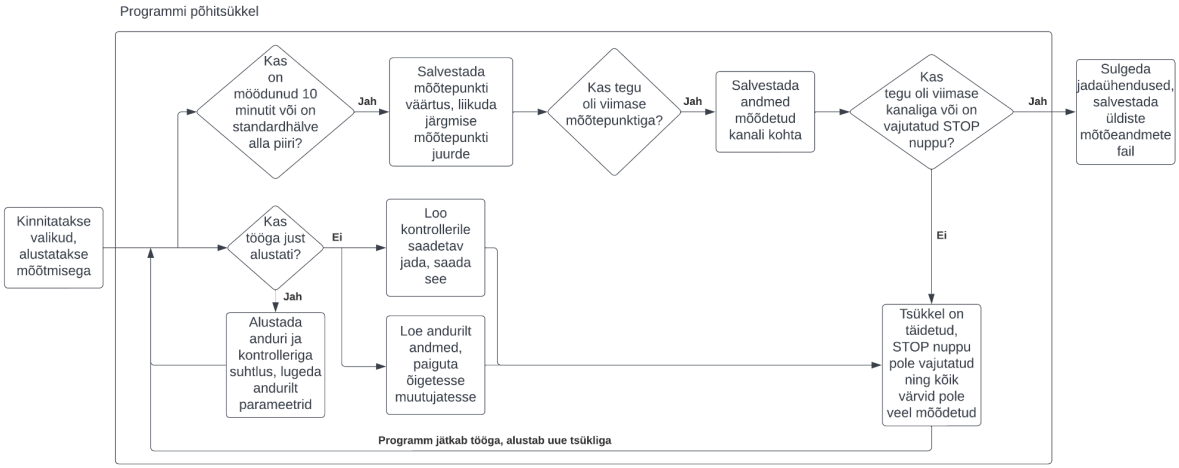
5.1 Programmi lühikirjeldus

Töö käigus loodi 2 põhilist programmi - calibMeasure.vi ning calibFitModel.vi. Programmiga CalibFitModel.vi luuakse ühendus anduri ja DMX kontrolleriga ning tehakse vastavalt kasutaja seadistusele valgusintensiivsuse mõõtmised. Programmis calibFitModel.vi sobitatakse mõõtetulemused kalibratsiooni kirjeldava mudeliga ja salvestatakse leitud parameetrid failidesse. Loodi ka programm üldiste mõõteandmete, mis sisaldavad kõiki andurilt kogutud väärtusi, nende kogumishetke ning väärtust, mis hetkel kontrollerile saadetakse, visualiseerimiseks ning mõõtmisel tekkinud erisuste tuvastamiseks.

Mõõtmisi teostava programmi töökäik on kirjeldatud joonisel 5.1a, mis sisaldab kõiki tähtsamaid samme programmi töös käivitusest programmi sulgemiseni. Joonisel 5.1b on kirjeldatud programmi põhitsükkel. Põhitsüklis luuakse ühendus kontrolleri ja anduriga ning seejärel hakatakse koguma andurilt saadud infot, mida kasutatakse mõõtepunktide väärtustamiseks.



(a)



(b)

Joonis 5.1: CalibMeasure.vi plokkskeem: (a) programmi ülevaade; (b) programmi põhitsükkel

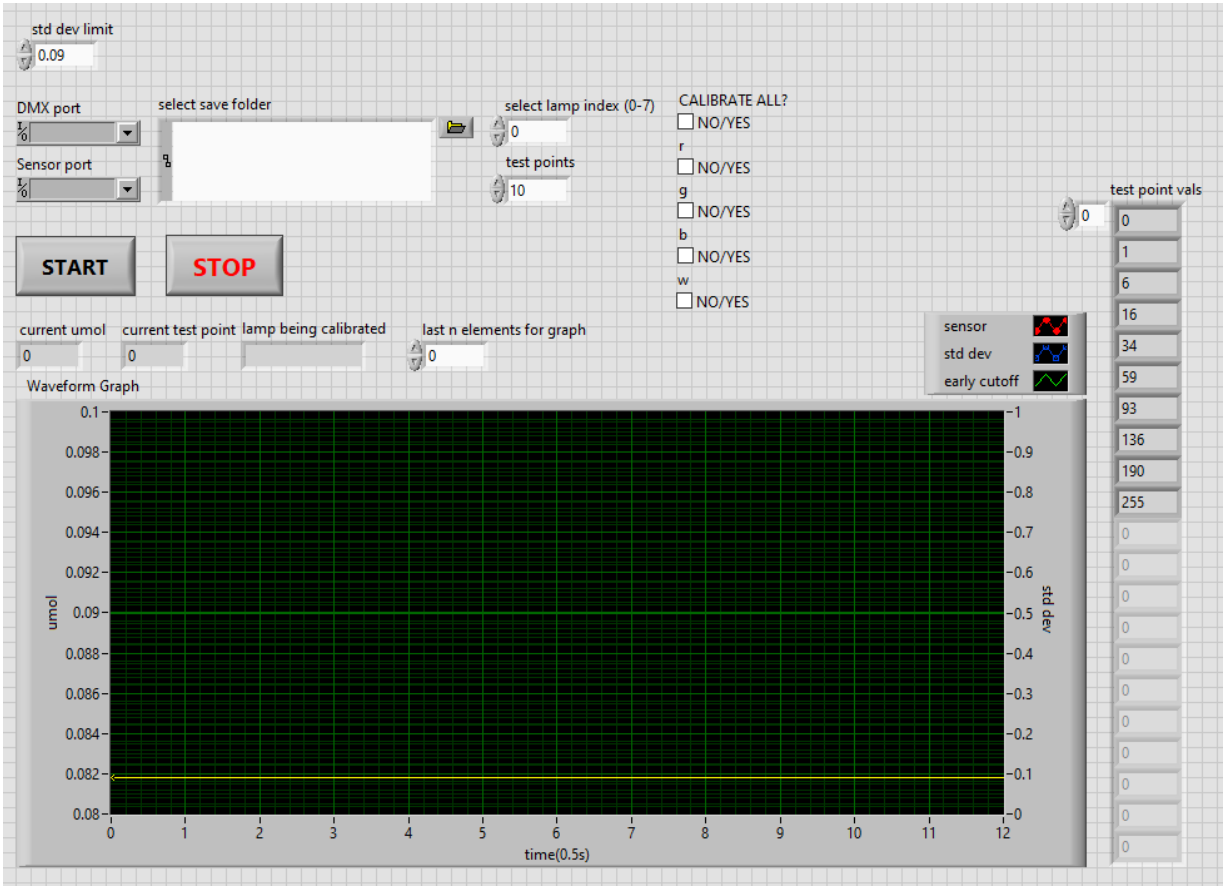
5.2 Kalibratsiooni programm

5.2.1 Programmi kasutamine

Joonisel 5.2 on kujutatud loodud tarkvara kasutajaliidest. Programmi käivitamisel peab kasutaja valima pordid andurile ja DMX kontrollerile, kasuta, kuhu salvestatakse mõõtetulemused, valgusti indeks, mõõtepunktide arv ning kanalid, mida mõõdetakse. Saab valida ka graafikul kuvatavate väärtuste arvu. Esipaneelil on nähtav mõõtepunktide väärtused, hetkene andurilt saadud väärtus, mitmenda mõõtepunkti juures programm on, valgusti kanal ning graafik, kus kuvatakse vastavalt valikule mõõtetulemusi.

Vajutades START nupule teostab programm automaatselt mõõtmised vastavalt valitud seadistusele. Programm lõpetab kalibreerimise lõpus automaatselt töö. Võimalik on ka programmi enneaegne peatamine vajutades STOP nupule, millele järgneb mõõtmise üldandmete salvestamine ning jadaühenduste sulgemine.

Kogu mõõtesüsteemi kalibreerides on iga järgmise valgusti mõõtmiseks vajalik anduri ümberpaigutamine vastava mõõdetava valgusti alla ning esipaneelilt kalibreeritava valgusti valimine. Kuigi anduri ümberpaigutamine vajab kasutaja sekkumist, on selle protsessi ajaline kulu võrreldes andmepunktide mõõtmisele kuluvaga tühiselt väike.



Joonis 5.2: Programmi kasutajaliides

5.2.2 Anduri kasutamine

Toetudes Apogee Instruments'i poolt avaldatud näidiskoodile[16] koostas autor programmi anduri kasutamiseks. Andur ühildub arvutiga USB A pesaga ning suhtlus on võimalik jadaühenduse abil. Mõõtesüsteemi arvuti ei ole internetiga ühendatud, anduri kasutamiseks pidi autor manuaalselt paigaldama arvutisse vajalikud draiverid. Apogee Instruments pakub ka tarkvara Apogee Connect[17], mis võimaldab andurilt väärtuste mugavat lugemist ning püsivara uuendamist, mida autor ka tegi. Samuti aitas Apogee Connect kontrollida autori loodud tarkvaralist implementatsiooni, võrreldes andurilt loetud väärtusi. Väärtused kattusid, seega oli implementatsioon korrektne.

Anduriga suhtlemiseks kasutab Apogee Instruments suhtlusprotokolli, kus sõltuvalt andurile saadetud juhtkäskudele vastab andur andmetega. Joonisel 5.3 on välja toodud käesoleva töö raames kasutatud käskude kirjeldus. Bait 0x21 on määrab käsu sisestamise lõpu, millele järgneb andurilt vastuse saamine. Vastus ei sisalda baiti 0x21. [16]

KÄSK	SAADETUD BAIDID	TAGASTAB
GET_VOLT	0x55 0x21	5 [käsk + 4 baidine ujukomaarv]
READ_CALIBRATION	0x83 0x21	9 [käsk + 4 baidine ujukomaarv + 4 baidine ujukomaarv]

Joonis 5.3: Anduriga suhtlemiseks kasutatavad käsud

Programmi alguses seadistatakse jadaühendus ning saadetakse andurile kaks baiti - 0x83 ning 0x21. Nendele baitidele vastab andur üheksa baidiga, mis sisaldavad andmeid sisestatud käsust ning tehases seatud kalibratsiooni. Anduri kalibratsioon on kirjeldatud lineaarse seosega elektripinge ja fotosünteetiliselt aktiivse kiirguse vahel (1)

$$PAR\ reading = (voltage\text{-}offset)*multiplier*1000 \quad (1)$$

kus *PAR reading* on anduriga mõõdetud valgusintensiivsus ühikus µmol/(m²*s), *voltage* on andurilt saadud pinge, *offset* ning *multiplier* on andurisse salvestatud kalibratsioon.

Saates andurile baidid 0x55 ja 0x21 tagastab andur sisestatud käsu ja pinge.

Anduri kiireks integratsiooniks kasutas autor Arduino Nano arendusplaati, kus loodi andurit simuleeriv suhtlusprogramm. Programm täitis oma eesmärgi ja võimaldas arendada mõõtmistarkvara ajal mil andurit veel soetati ja transporditi.

5.2.3 Valgustite juhtimine

Valgustite juhtimiseks oli olemas LabVIEW programm, millega süsteemi kasutajad muudavad valgustite intensiivsust. Töö raames tutvuti olemasoleva programmiga ning võeti sealt kasutusele vajalikud osad. Eelnevalt olemasolevas tarkvaras on implementeeritud jadaliidese konfigureerimine ning sinna kirjutamine, failidest parameetrite sisselugemine, esipaneelil on võimalik kontrollida valgustite intensiivsust. Kalibreerimise tarkvara loomiseks kopeeriti sealt jadaühenduse konfigureerimist ning sinna kirjutamist.

5.2.4 Anduri ja valgustite integreerimine

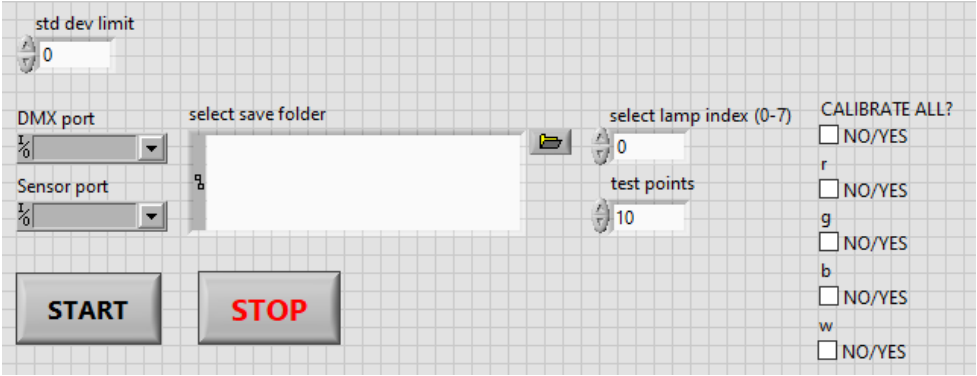
Töö eesmärgi täitmiseks on vajalik valgustite ja anduri kasutamine samaaegselt, seega peaksid need töötama sünkroonis. Selle teostamiseks paigutas autor andurilt lugemise ja valgustite juhtimise samasse tsüklisse, mille ooteajaks valiti 1 sekund, sest vastavalt andmelehele uueneb anduris väärtus sagedusega 1 Hz.

5.2.5 Seadete valimine

Programmi käivitades on võimalik valida seadistus, mida mõõtmise jaoks kasutada. Valitavate seadete paiknemine esipaneelil on kujutatud joonisel 5.4. Kasutaja saab valida:

- DMX kontrolleri COM pordi
- anduri COM pordi
- mitmendat valgustit kalibreeritakse
- mõõtepunktide arvu
- milliseid valgusti kanaleid mõõdetakse
- kausta, kuhu mõõtmistulemused ja -andmed salvestatakse

Seadete valimine on eraldi tsüklis. Seadeid valides genereeritakse mõõtepunktide väärtused ning väljastatakse vastav info. Seadistuse kinnitamisel valitud seaded fikseeritakse, et kasutaja neid programmi töötamise ajal ekslikult muuta ei saaks. Ainus väärtus, mida saab peale seadete kinnitamist muuta on mitu viimast väärtust andurilt kuvatakse graafikul.



Joonis 5.4: Valitavad seaded mõõteprogrammis

5.2.6 Andmete kogumine, salvestamine

Programmi üks põhifunktsioonidest on andmete kogumine ja salvestamine. Andurilt loetakse andmeid iga sekundi tagant. Programmi lõpus salvestatakse kõik mõõdetud andmed koos ajahetke ning valgustile saadetud väärtusega faili measuredataY.txt, kus Y on valgusti indeks. Need andmed on kasutatavad mõõtmise analüüsimiseks, et tuvastada mõõtmisi häirivad sündmused.

Iga mõõtepunkti jaoks salvestatakse vastav väärtus andurilt. Valgusti intensiivsus sõltub valgustile saadetud väärtusest ning temperatuurist. Andmete salvestamisel kasutatakse 5 minutilise aknaga liikuv keskmine filtrit. Filtreeritud signaalist arvutatakse viimase 5 minuti standardhälve. Madalamatel intensiivsustel stabiliseerub valgusti võrdlemisi kiiresti, mõõtmiste kiirendamiseks implementeeris autor funktsionaalsuse, mille alusel salvestatakse mõõtepunkt siis, kui standardhälve on väiksem, kui kasutaja määratud piirväärtus ning on möödunud vähemalt 10 minutit mõõtepunkti algusest. Kui sellist tingimust ei täideta, salvestatakse väärtus 20 minuti möödumisel.

Andmed salvestatakse tekstifailidesse, mille nimetamiseks kasutatakse numbritega vormistust kujul lampXY.txt. Y on valgusti kanali indeks (järjekorras RGBW) ning X on valgusti indeks.

5.3 Mudelite loomise programm

Mõõteandmete kasutamiseks on vajalik nendest mudeli loomine. Mudel kirjeldab seost valgusti kontrollerile saadetud väärtuste ning valgusti valguse intensiivsuse vahel. Mudelit kasutatakse hiljem mõõtesüsteemiga tööd tehes valguse intensiivsuse, mille kasutaja saab valida, tõlgendamiseks väärtuseks, mis saadetakse kontrollerile.

Saadud mõõteandmetest mudelite loomiseks koostas autor kaks programmi - calibFitModel.vi, milega on võimalik kogu süsteemi mudelid korraga luua, ning calibFitModelSingle.vi, millega on võimalik luua mudeleid ühe valgusti kaupa. CalibFitModel.vi programmiga on võimalik valida kaust, kus on mõõtepunktide failid ning programmi käivitades vaadata kõikide mudelite väljundeid, parameetreid ning erinevust mõõtepunktidest.

LabVIEW sisaldab *curve fit* funktsiooni, mille abil on võimalik lihtsustada funktsiooni genereerimist. *Curve fit* vajab mudeli loomiseks kasutatavat funktsiooni ning funktsiooni parameetrite algväärtusi, mida automaatselt muudetakse, et lähendada funktsioon sisendandmetele.

Mudeli loomiseks kasutati algselt eksponentsiaalfunktsiooni, millega tekkis probleem mudeli täpsuse saavutamisega. Eksponentsiaalfuntksioon muutus aksepteeritavaks, kui parameetreid oli viis või rohkem, mis autori hinnangul ei ole kaheksa mõõtepunktiga mõistlik. Samuti oli funktsiooni parameetrite arvutamine *curve fit* funktsioonis ajakulukas ning alati lahend ei koondunudki.

Autor otsustas proovida funktsiooni (2)

$$y = a*x^2 + b*x + c \tag{2}$$

kus y on valgusti intensiivsus, x on valgusti kontrollerile kirjutatav väärtus ning a, b, ja c on funktsiooni parameetrid. Seda funktsiooni kasutades kahanes ajakulu märgatavalt.

5.4 Iseseisev testimisalus

Töö käigus koostati ajutine testimisalus, mille peal testiti tarkvara funktsionaalsust. Mõõtesüsteem on aktiivselt kasutuses ning teostatavad eksperimendid võivad kesta nädalaid. Selle kasutamiseks oli vajalik süsteemi broneerimine. Ajutine testimisalus koosnes ühest valgustist, DMX kontrollerist, Apogee SQ-520 PAR andurist ning USB-UART konverterist.

Testimisalus ei olnud stabiilselt fikseeritud, selle ainus eesmärk oli tarkvara funktsionaalsuses veendumine.

6 Andmete analüüs

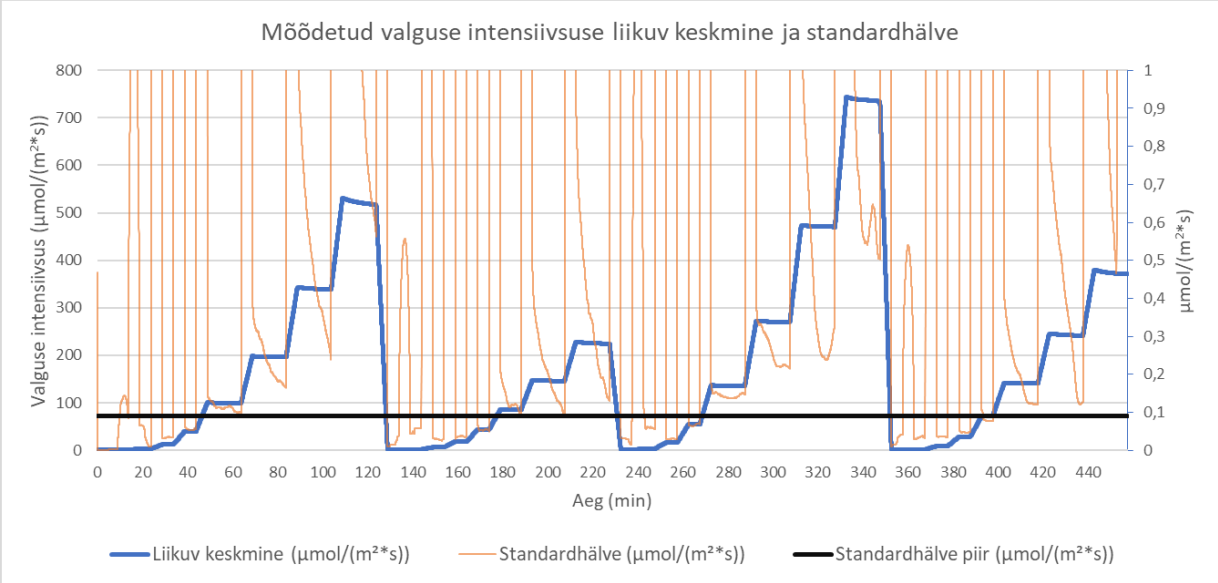
6.1 Tehtud mõõtmised

Töö käigus tegi autor mitmeid mõõtmisi loodud programmiga. Tehti mõõtmine, mis võttis ajaliselt 108 tundi ja sisaldas iga valgusti kanali kohta 18 mõõtepunkti, et veenduda mõõtepunkti salvestamist siis, kui valgusti on stabiliseerunud. Järgmisena tehti kogu süsteemi mõõtmised, mis hõlmasid kõigi kaheksa valgusti mõõtmist. Autor valis programmi seaded selliselt, et iga valgusti peale kuluv aeg oleks alla 8 tunni. Saadud andmeid võrreldes osutus keskmiseks ajakuluks valgusti kohta 7 tundi ja 36 minutit, lisaks märkas autor märkimisväärseid erinevusi lampide intensiivsustes, millest saab täpsema ülevaate peatükis 6.3. Mõõtetulemuste korratavuse uurimiseks tehti ühe valgustiga lisaks 2 kordusmõõtmist, mille tulemustest saab ülevaate peatükis 6.4.

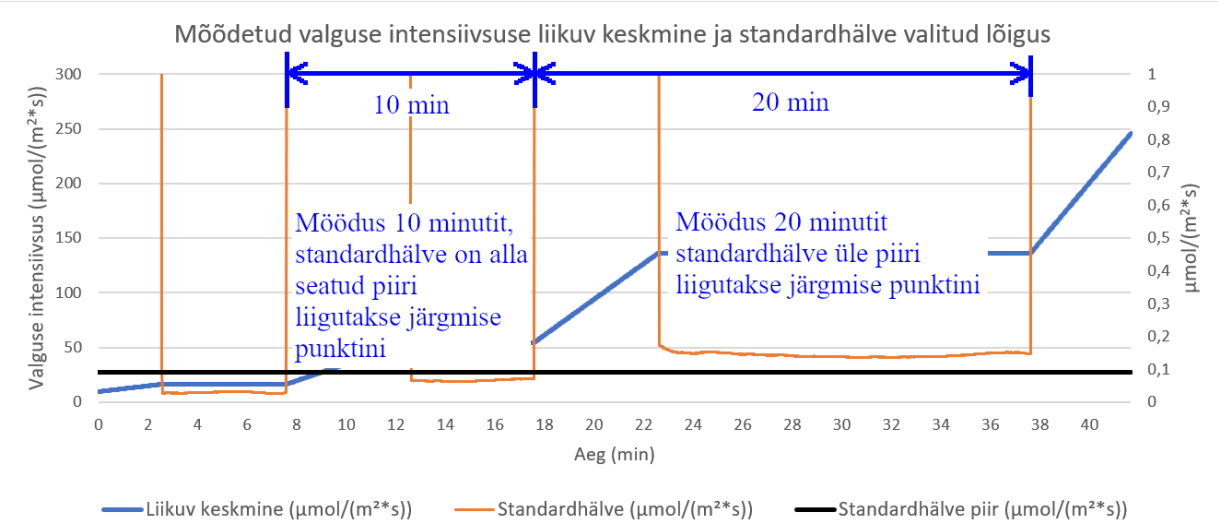
6.2 Ühe mõõtmise üldandmed

Loodud programmi töötamise ajal on võimalik kuvada viimase 300 mõõtmise aritmeetilist keskmist ning standardhälvet. Graafikul kuvatakse aritmeetiline keskmine, standardhälve ning standardhälve piir, mille juures loetakse süsteem piisavalt stabiilseks ja liigutakse edasi järgmise mõõtepunkti juurde. Joonisel 6.1a on kujutatud väärtused ühe valgusi mõõteprotsessi vältel. Joonisel 6.1b on valitud vahemik joonisest 6.1a, kus on demonstreeritud peatükis 5.2.6 kirjeldatud standardhälbega mõõtmise kiirendamise funktsionaalsust. Kujutatud on mõõtepunkti salvestamist peale 10 minutit, kui standardhälve oli alla seatud piiri ning teist mõõtepunkti salvestamist, kus 20 minuti möödudes oli standardhälve üle seatud piiri.

Andmeid analüüsides veendus töö autor programmi funktsionaalsuse korrektsuses. Kui standardhälve on alla seatud piiri, saab stabiilseid mõõtetulemusi salvestada varem, kui 20 minuti möödumisel. Piir oli mõõtmistel seatud 0,09 peale, mis kiirendas madalamate intensiivsustega mõõtepunktide läbimist, sest madalamate väärtuste tõttu on standardhälve väiksem ning tänu väiksemale voolutarbele on valgustites toimuvad temperatuurist tingitud muutused väiksemad.



(a)



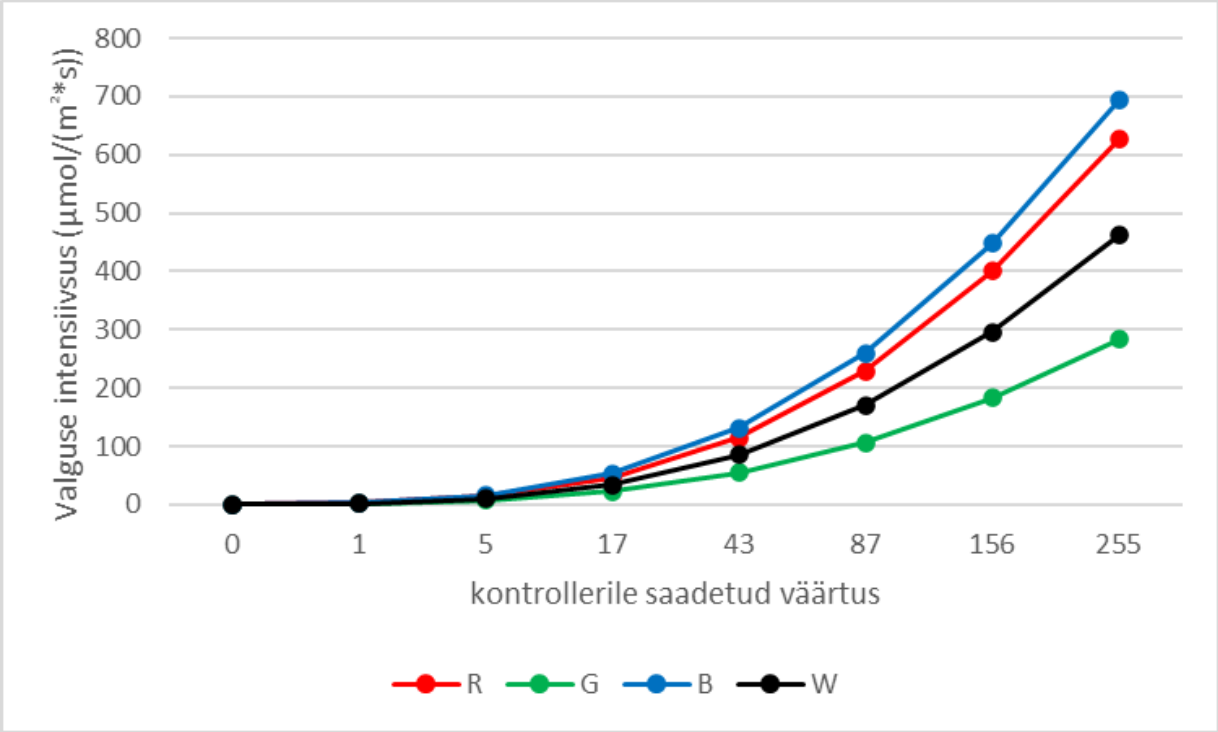
(b)

Joonis 6.1: Mõõdetud valguse intensiivsuse liikuv keskmine ja standardhälve ajas: (a) valguse intensiivsus kogu mõõtmise vältel; (b) valguse intensiivsus valitud lõigus

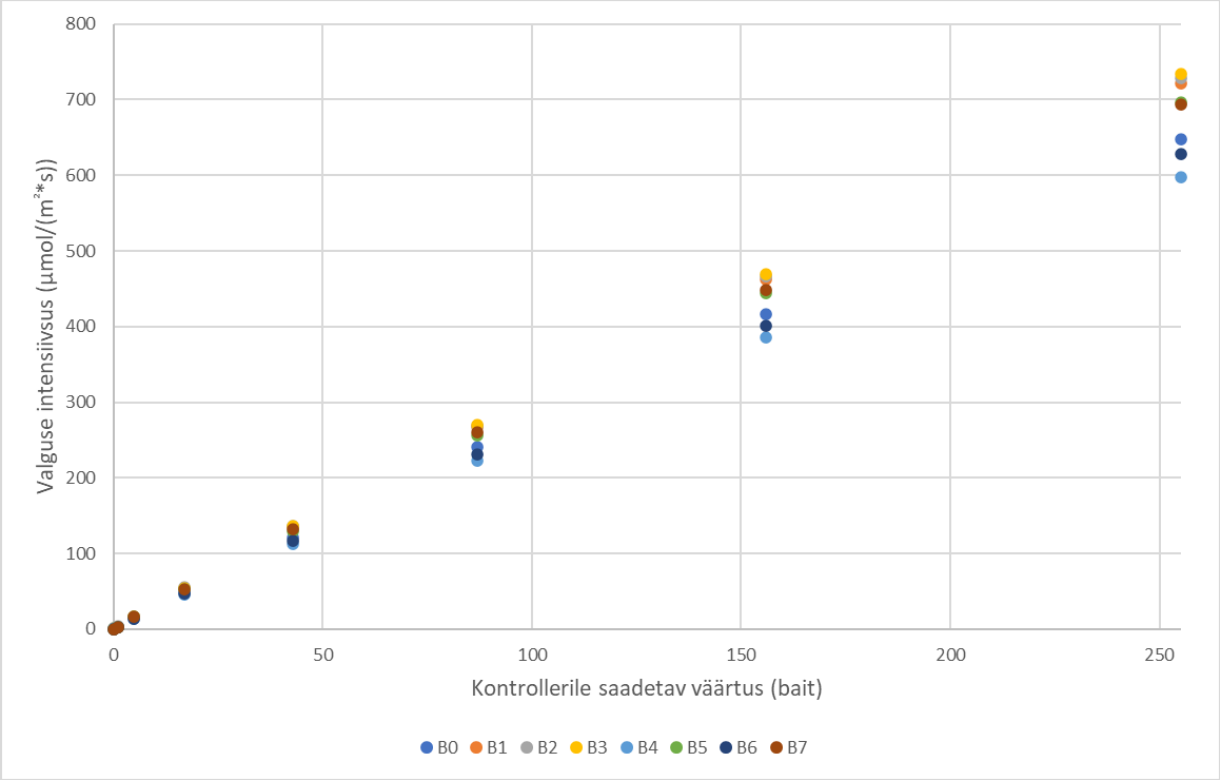
6.3 Kogu süsteemi mõõtmised

Süsteemis on kokku kaheksa valgustit ning programm salvestab iga valgusti kohta viis faili - neli faili valgusti iga valgusti kanali mõõtepunktide andmete hoiustamiseks ning mõõtmiste üldandmete fail. Kõikide mõõtmiste lõpuks loodi 40 faili, millest 32 olid mõõtepunktide andmed ning 8 mõõtmiste üldandmed.

Joonisel 6.2 on kujutatud ühe valgusti mõõtetulemused. Kõikide valgustite mõõtetulemused on sarnase väljundiga, kuid mitte võrdväärsed. Üldiselt olid roheline ja punane kõige intensiivsemad. Joonisel 6.3 on kujutatud süsteemi kõikide valgustite siniste kanalite valguse intensiivsus. Jooniselt kujuneb muster, kus valgusti indeksiga 3 on kõige intensiivsema valgusega, töö autor otsustas teha kordusmõõtmisi ühe valgustiga, et veenduda programmi väljundi stabiilsuses. Töö raames loodud programmidega on võimalik vaadata kõiki mõõtetulemusi graafikutel.

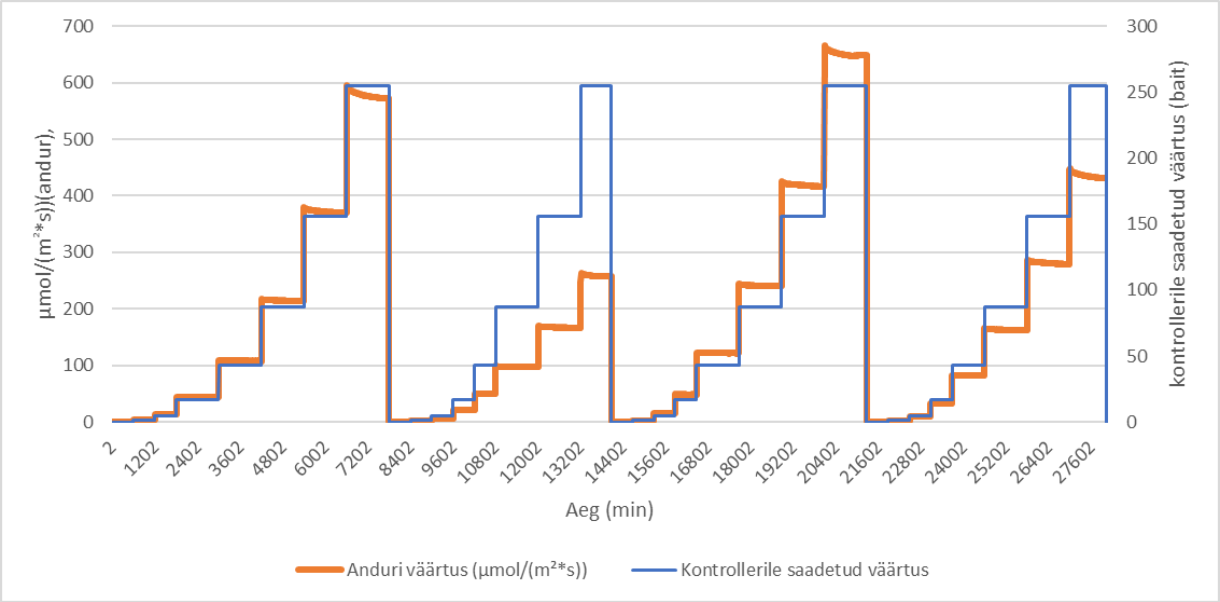


Joonis 6.2: Valgusti indeksiga 7 mõõtetulemused



Joonis 6.3: Süsteemi valgustite siniste kanalite valguse intensiivsus

Joonisel 6.4 on kujutatud valgusti indeksiga 7 mõõtmiste üldandmeid, välja arvatud salvestatud aeg. Aega salvestatakse millisekundites ning alguspunkt pole defineeritud, seda salvestatakse ebatavalise käitumise tuvastamiseks, mis esines üksikutel juhtudel, autori arvates seoses kasutatava arvuti unerežiimi minekuga. Sellel mõõtmisel oli aja muutus stabiilne, seega ei toimunud programmi töö suhtes ebatavalist käitumist. Graafikult näeb ka valgustite intensiivsuse muutumisi ajas, mis on tingitud valgusti temperatuuri muutumisest. Mõõtmise andmeid saab kiiresti vaadata selleks loodud programmiga.

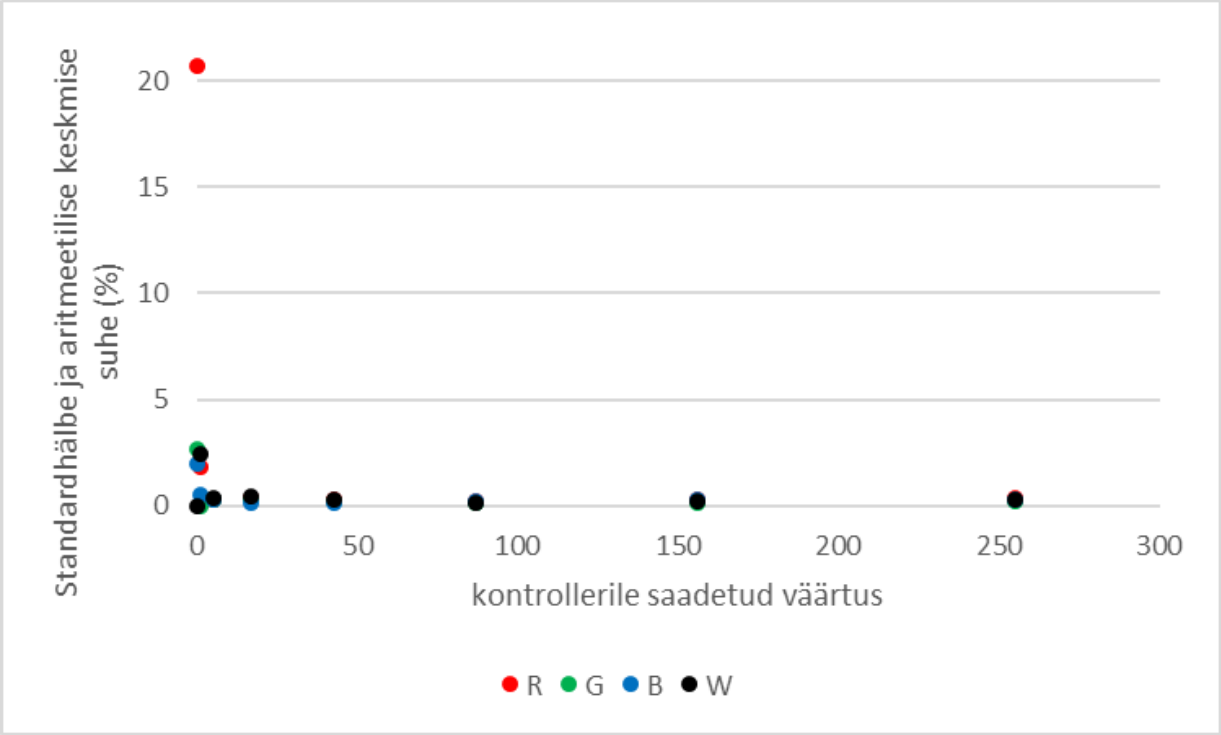


Joonis 6.4: Valgusti indeksiga 7 mõõtmise üldandmed

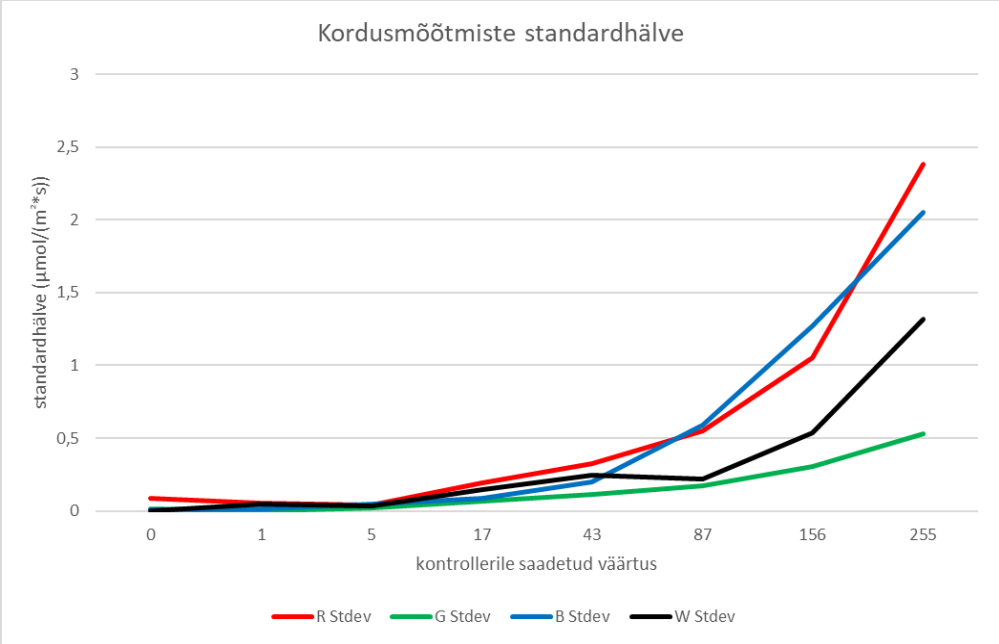
6.4 Kordusmõõtmiste võrdlus

Suurte erinevuste tõttu kogu süsteemi mõõtes, mis on nähtaval joonisel 6.3, otsustas autor teha kordusmõõtmised valgustiga, mille indeks oli 7. Mõõtmiseks kasutati samu seadistusi, mida kogu süsteemi mõõtes. Kordusmõõtmiste jaoks otsustati kasutada kaheksandat valgustit. Tulemuste võrdlemiseks arvutati iga kanali jaoks mõõtepunktide aritmeetilised keskmised ja standardhälbed mõõtepunkti kaupa. Kordusmõõtmiste tulemuste standardhälve moodustas aritmeetilisest keskmisest peamiselt kuni 3%, kuid punase kanali esimesel mõõtepunktil moodustas see 20,7%. Tulemused on nähtaval joonisel 6.5. Tegu oli esimese mõõtepunktiga, ehk valgusti oli kustus, seega võis ebastabiilsus tekkida erinevast valgustusest ruumis mõõtmise ajal. Joonisel 6.6a on välja toodud kõikide valgusti kanalite standardhälve kolme mõõtmise puhul. Kõige suurem standardhälve oli maksimaalse intensiivsuse puhul ning suurim standardhälve oli valgusti punasel kanalil. Punase kanali viimase mõõtepunkti mõõtmiste aritmeetiline keskmine oli 629,9 µmol/(m^2*s) standardhälbega 2,38 µmol/(m^2*s). Standardhälve moodustab aritmeetilisest keskmisest 0,38%. Joonistel 6.6a ja 6.6b on kujutatud ühe valgusti standardhälbed lineaarsel ja logaritmilisel skaalal. Logaritmilise skaala alusel on standardhälve eksponentsiaalses seoses valguse intensiivsusega. Autori hinnangul on tõestatud mõõtesüsteemi

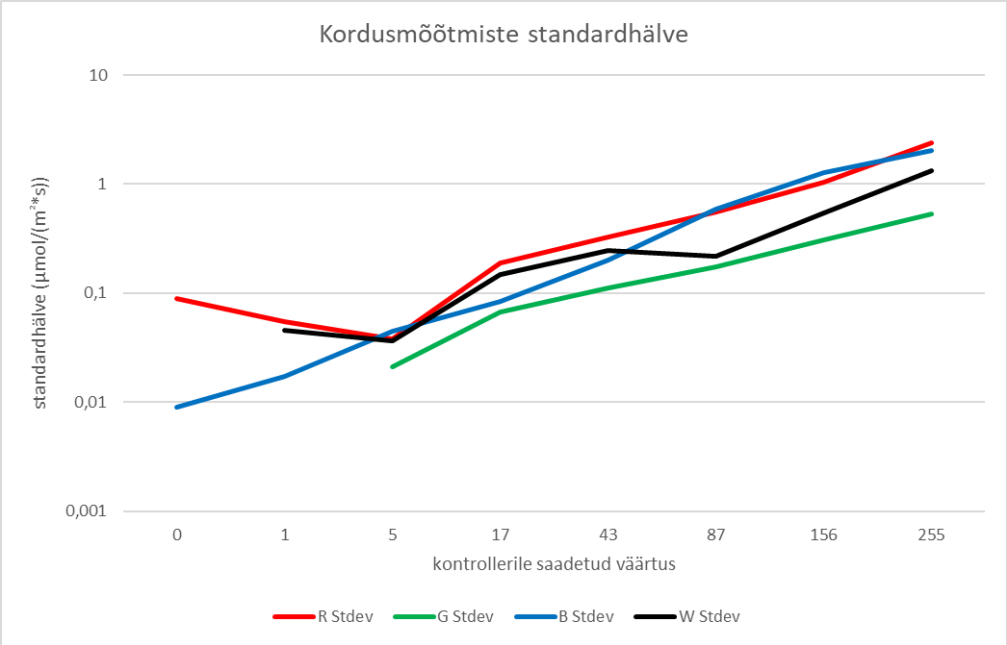
stabiilsus, seega tuleneb valgustite vaheline erinevus valgustitest, mitte autori poolt koostatud programmist.



Joonis 6.5: Kordusmõõtmiste aritmeetilise keskmise ja standardhälbe suhe



(a)



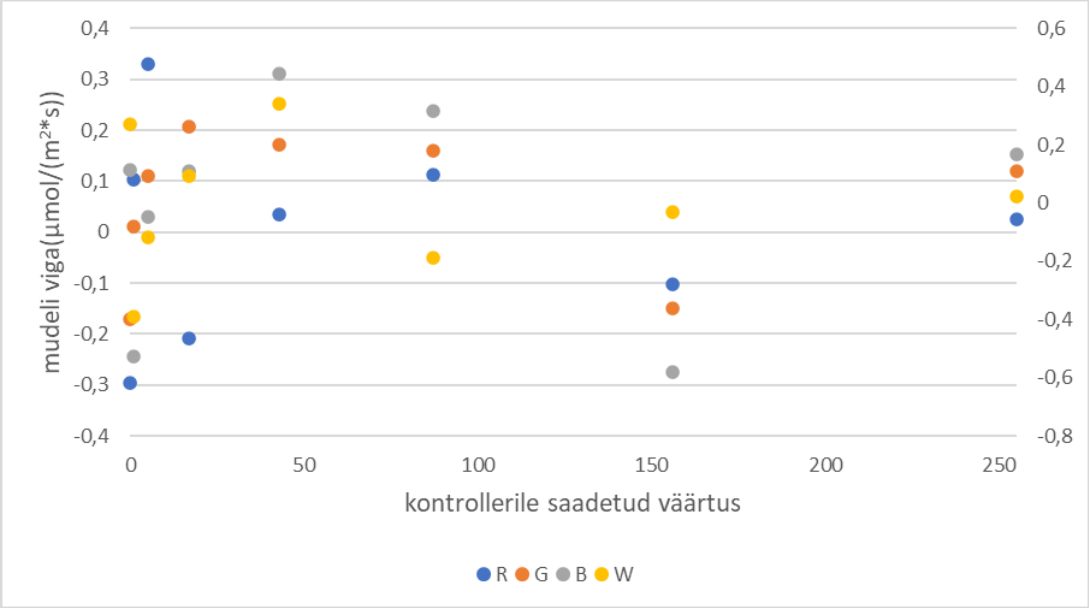
(b)

Joonis 6.6: Kordusmõõtmiste standardhälve: (a) lineaarsel skaalal; (b) logaritmilisel skaalal

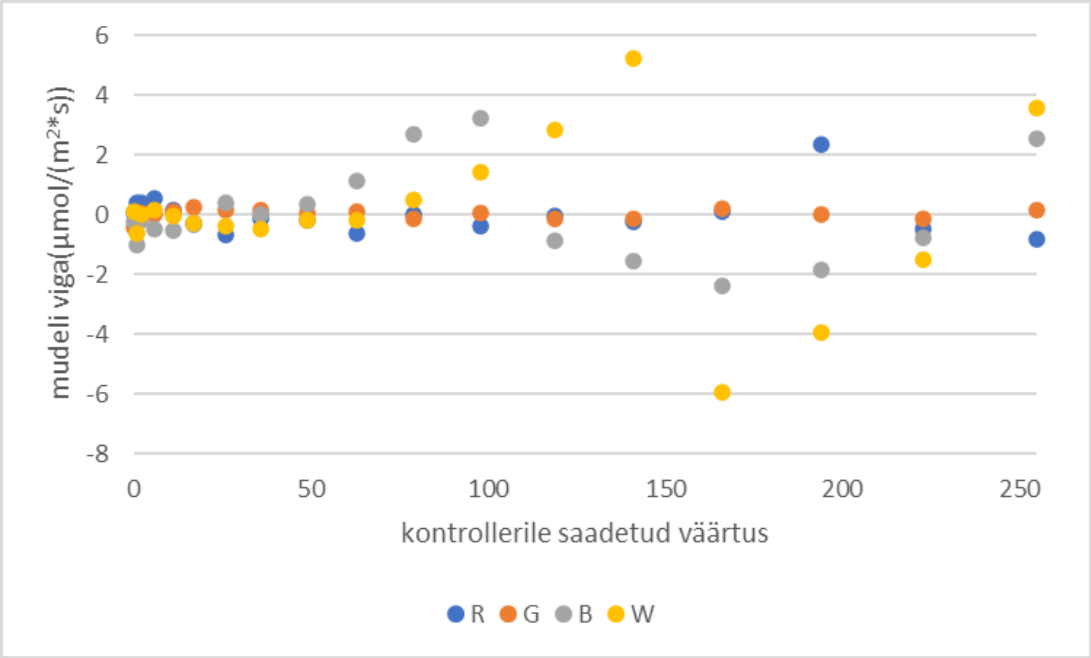
6.5 Mudelite loomine

Peale mõõtmiste teostamist koostas autor peatükis 5.3 kirjeldatud programmi, calibFitModel.vi, abil mudelid, mida saab edaspidi kasutada mõõtesüsteemi juhtimiseks mõeldud programmis. Mudelite abil saab süsteemi operaator valida sobiva valguse intensiivsuse ning programm teisendab intensiivsuse väärtuseks, mis edastatakse valgustite kontrolleritele.

Joonisel 6.7a on välja toodud valgusti indeksiga 7 mudeli erinevus mõõteandmetest, mis pärinevad kogu süsteemi kalibreerimisest. Kõik mudelid, mis loodi kogu süsteemi kalibreerimisest ei erinenud mõõteandmetest rohkem kui +-0,6 µmol/(m^2*s). Joonisel 6.7b on välja toodud 18 mõõtepunktiga mõõtmise erinevus mudelist. Enamikel mõõtepunktidel jääb mudel nõuetes püstitatud vahemikku +-5 µmol/(m^2*s). Kasutatud mõõtmine kestis kokku 108 tundi ilma järelvalveta, töö autor ei saa veenduda mudeli erinevuse allikas - kas muutus ruumi valgustus või on selle taga muud põhjused.



(a)



(b)

Joonis 6.7: Mudeli erinevus mõõteandmetest: (a) kaheksa mõõtepunktiga; (b) 18 mõõtepunktiga

Kokkuvõte

Selle bakalaureusetöö eesmärgiks oli luua automatiseeritud lahendus taimede gaasivahetuse mõõtesüsteemi valguslahenduse kalibreerimiseks. Eesmärkide saavutamiseks valiti välja sobiv andur, integreeriti olemasolevat koodi ning loodi uus programm valguslahenduse automatiseeritud mõõtmiseks. Kasutajaliidese aken on nõuetest märkimisväärselt väiksem, seega on seda mugav kasutada ka vanemate monitoridega. Bakalaureusetöö täitis oma eesmärgid ja töö tulemusena loodi programmid valguslahenduse mõõtmiseks ning mudelite loomiseks, mida saab kasutada valguslahenduse täpsemaks juhtimiseks tulevases teadustöös. Esitatud nõuded said täidetud. Loodud tarkvara saab kasutada ka teiste, sarnaste süsteemide kalibreerimiseks ning tänu kogutud andmepunktide salvestamisele on võimalik uurida alternatiivseid mudeleid, et tulevikus mudeli täpsust veelgi suurendada.

Tänuavaldused

Veiko Vunder

Kirjandus

[1] M. Centritto, M. Lauteri, M. C. Monteverdi, ja R. Serraj, „Leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, and grain yield in contrasting rice genotypes subjected to water deficits during the reproductive stage“, *Journal of Experimental Botany*, kd 60, nr 8, lk 2325–2339, mai 2009, doi: 10.1093/jxb/erp123.

[2] S. Fields ja M. Johnston, „Whither Model Organism Research?“, *Science*, kd 307, nr 5717, lk 1885–1886, märts 2005, doi: 10.1126/science.1108872.

[3] R. A. Ankeny ja S. Leonelli, „What Is So Special About Model Organisms?“, 2011, Vaadatud: 18. mai 2022. [Online]. Available at: https://ore.exeter.ac.uk/repository/handle/10036/3660

[4] P. H. Masson, „Gravitropism in Arabidopsis thaliana“, *Encyclopedia of Genetics*, S. Brenner ja J. H. Miller, Toim New York: Academic Press, 2001, lk 890–894. doi: 10.1006/rwgn.2001.1681.

[5] U. Krämer, „Planting molecular functions in an ecological context with Arabidopsis thaliana“, *eLife*, kd 4, lk e06100, märts 2015, doi: 10.7554/eLife.06100.

[6] T. Kollist *et al.*, „A novel device detects a rapid ozone-induced transient stomatal closure in intact Arabidopsis and its absence in abi2 mutant“, *Physiologia Plantarum*, kd 129, nr 4, lk 796–803, 2007, doi: 10.1111/j.1399-3054.2006.00851.x.

[7] P. Tocquin ja C. Périlleux, „Design of a versatile device for measuring whole plant gas exchanges in Arabidopsis thaliana“, *New Phytologist*, kd 162, nr 1, lk 223–229, 2004, doi: 10.1046/j.1469-8137.2004.01000.x.

[8] K. Kölling, G. M. George, R. Künzli, P. Flütsch, ja S. C. Zeeman, „A whole-plant chamber system for parallel gas exchange measurements of Arabidopsis and other herbaceous species“, *Plant Methods*, kd 11, nr 1, lk 48, okt 2015, doi: 10.1186/s13007-015-0089-z.

[9] „MQ-500: Full-Spectrum Quantum Meter“, *Apogee Instruments, Inc.* https://www.apogeeinstruments.com/mq-500-full-spectrum-quantum-meter/ (vaadatud 20. mai 2022).

[10] „LI-COR LI-190R Quantum Sensor“. https://www.licor.com/env/products/light/quantum (vaadatud 17. mai 2022).

[11] „PAR Sensor“, *Vernier*. https://www.vernier.com/product/par-sensor/ (vaadatud 17. mai 2022).

[12] „Quantum Sensors - PAR Meters | Apogee Instruments“. https://www.apogeeinstruments.com/quantum/ (vaadatud 17. mai 2022).

[13] „SQ-520: Full-Spectrum Smart Quantum Sensor (USB)“, *Apogee Instruments, Inc.* https://www.apogeeinstruments.com/sq-520-full-spectrum-smart-quantum-sensor-usb/ (vaadatud 17. mai 2022).

[14] „SQ-616: 400-750 nm USB output ePAR Sensor“, *Apogee Instruments, Inc.* https://www.apogeeinstruments.com/sq-616-400-750-nm-usb-output-epar-sensor/ (vaadatud 17. mai 2022).

[15] „Go!Link“, *Vernier*. https://www.vernier.com/product/golink/ (vaadatud 17. mai 2022).

[16] „Apogee USB Sensors and Linux“. https://www.apogeeinstruments.com/apogee-usb-sensors-and-linux/ (vaadatud 17. mai 2022).

[17] „Apogee Connect Overview“. https://www.apogeeinstruments.com/apogee-connect-overview/ (vaadatud 17. mai 2022).

LISA A. Loodud tarkvara repositoorium

Loodud tarkvara sisaldav Gitlab repositoorium.

https://gitlab.ut.ee/lauri.raudla/lampcalibrate

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Lauri Raudla,

1. Annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose
   Taimede gaasivahetuse valguslahenduse automatiseeritud kalibreerimine
   mille juhendaja on PhD Veiko Vunder,
   Reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõpuni
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Lauri Raudla
20.05.2022