

TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Füüsika instituut

Füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava

Henri Herm

Plastikstsintillatsioonkiudude efektiivsuse määramine ja  
mõõtesüsteemi karakteriseerimine

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Juhendajad: PhD Madis Kiisk

Tartu 2022

## **Plastikstintillatsioonkiudude efektiivsuse määramine ja mõõtesüsteemi karakteriseerimine**

Lennujaamadest arstikabinettideni – läbivalgustamise vajadus on tänapäeva maailmas muutunud võrdlemisi tavaliseks. Selleks, et see oleks inimestele võimalikult ohutu ja saaks läbi valgustada suuremaid esemeid on välja pakutud uus läbivalgustamise viis – müüontomograafia. Antud töös uuriti erinevaid stintillatsioonkiude, mida kasutatakse müüontomograafias müüonite registreerimisel. Uuriti kaheksat erinevat tüüpi kiude, et leida seoseid efektiivsuse ja erinevate kiudude parameetrite vahel ning erinevate kiudude efektiivsuse sõltuvust mõõtepunkti kaugusest. Selleks modifitseeriti olemasolevat mõõtesüsteemi ja valmistati uus kiudude komplekt, mida polnud varem uuritud. Samuti võrreldi uues kiudude komplektis olevaid kiude varem uuritud kiududega, millega tehti samuti mõõtmisi muudetud mõõtesüsteemiga. Töö tulemusena leiti, et efektiivsus sõltub valguse tekke ja mõõtepunkti kaugusest ning on tugevalt seotud kiudude diameetriga.

Märksõnad: müüongraafia, müüon, stintillatsioon, kiud, tomograafia

CERCS: T110 Instrumentatsioonitehnoloogia. P211 Kõrgenergeetiliste vastasmõjude uuringud, kosmiline kiirgus

## **Determining efficiency of scintillating fibers and characterising the measurement system**

From airports to medical centers – the need for x-ray imaging has become quite common. As the name suggest imaging is achieved with x-rays even though it has negative effects on people. A new alternative has been suggested, being muontomography, that uses muons and could be the less dangerous alternative to x-rays. In this bachelor thesis research on different scintillating fibers has been conducted, that could be used in muontomography to register muons. Eight different fibers were researched to find relations between efficiency and distance from where the experiment was conducted. For that purpose, measuring stand was modified and a new set of fibers was made that hadn't been researched before. The new set of fibers was compared to an

older set, that were remeasured in the modified measuring stand. As a result of the thesis, it was found that the efficiency of a fiber is strongly affected by the distance between the light source and measuring point. Also, the diameter of the fiber has a strong relation with efficiency.

Keywords: fibers, scintillator, muon, muography, tomography

CERCS: T110 Instrumentation technology. P211 High energy interactions, cosmic rays

## Sisukord

Sissejuhatus.....	5
1. Sissejuhatus müüontomograafiasse .....	7
2. Teoreetiline taust ja vajalikud eelteadmised.....	9
2.1. Müüionid .....	9
2.2. Fotodetektorid .....	10
2.3. Stsintillatsioonkiud.....	10
3. Metoodika.....	12
3.1. Mõõtesüsteem.....	14
4. Töö käik.....	17
4.1. Objektide ettevalmistamine.....	17
4.2. Mõõtmised.....	21
4.3. Veallikad ja korratavuse hindamine .....	22
5. Mõõtmiste tulemused ja analüüs .....	26
Kokkuvõte.....	32
Tänuavaldused .....	33
Kasutatud materjalid .....	34

## Sissejuhatus

Tehnoloogia areng on muutnud reisimise ja kaupade liikumise kiiremaks kui see on kunagi varem olnud. Sellega kaasnevad suured vabadused, aga ka teatavad ohud. Selleks, et vabadus liikuda ja kaupad üle maailma saata säiliks, on vaja, et turvameetmed areneksid koos transpordiga. Hetkel kasutatakse kaupade ja inimeste läbi valgustamiseks peamiselt röntgenkiirgust, kontrollimaks, et ei transpordita midagi ebaseaduslikku. Röntgentehnoloogial on aga mitmeid fundamentaalseid puudusi, mistõttu ei suuda tehnoloogia vastata vajalikul tasemel julgestusprotseduuride nõuetele. Ohtlike ja keelatud materjalide tuvastamine põhineb röntgenpildi analüüsil, mida viib läbi operaator. Röntgenkiirgus on tundlik materjalide tiheduse suhtes, kuid materjali tuvastamiseks sellest ei piisa. Enamasti toimub tuvastamine pildianalüüsi põhjal. Ameerika lennujaamades läbi viidud varjatud kontrolltestid on näidanud kahjuks, et väga sageli ei leia operaatorid kohvrast peidetud lõhkeainet või relvi. Teistlaadi probleem on aga suurte veoautode ja merekonteineritega. Kui koorem on tihedalt kaupa täis laaditud, ei suuda ka kõige võimsam röntgenallikas sellest läbi tungida ning röntgenpilti luua ei ole võimalik. Seega jääb ka võimalik salakaup koormast leidmata. Lisaks on röntgenkiirguse liigne hulk inimesele kahjulik, mistõttu allub selliste seadmete kasutamine rangete kiirgusohutusnõuete täitmisele.

Paljulubava alternatiivina on välja pakutud müüontomograafia, kus kiirgusallikana kasutatakse loomulikku, looduslikku müüonvoogu. Kuna müüonid on palju suurema läbistamisvõimega, siis võiks tulevikus olla võimalik rakendada müüontomograafiat tollis ja lennujaamades, et kontrollida sõidukeid, veokeid ja nendes sisalduvat kaupa. Müüonvoo ärakasutamiseks on vaja luua asukohatundlikud detektorpaneelid. Üheks võimaliku tööstusliku potentsiaaliga detektortehnoloogiaks on stsintillatsioonkiududest konstrueeritav kiud-matt.

Selleks, et oleks võimalik ehitada korralikult töötav müüontomograaf on vaja mõõta ja karakteriseerida erinevaid stsintillatsioonkiude, leidmaks, milline on kõige efektiivsem ja töökindlam antud rakenduse jaoks. Käesolevas töös uuriti kaheksat erinevat tüüpi tööstuslike stsintillatsioonkiudude efektiivsusi ja efektiivsuse sõltuvust mõõtepunkti kaugusest ning kiu läbimõõdust. Selleks modifitseeriti olemasolevat katsestendi ja valmistati uus kiudude komplekt, mida polnud varem uuritud. Töös oli kaks hüpoteesi. Esiteks, et suurema läbimõõduga kiudude efektiivsus on suurem kui väiksema läbimõõduga kiududel, sest stsintillatsiooni hulk on

lineaarses seoses müüoni teepikkusega kius. Teiseks hüpoteesiks oli, et efektiivsus on seotud neeldumistee pikkusega, sest osa kiirgust tõenäoliselt neeldub enne fotodetektorini jõudmist, mis võiks põhjustada madalamat efektiivsust. Lisaks uuriti, kas peegli lisamine katsesüsteemi tõstab uuritavate kiudude efektiivsust.

# 1. Sissejuhatus müüontomograafiasse

Müüontomograafia meetoditega on võimalik läbi valgustada esemeid, et detekteerida suure aatommassiga aineid ja esemeid. [1] Metoodika ja tehnoloogia arendamise edasiseks eesmärgiks on muuta võimalikuks väga erinevate materjalide, sealhulgas ka väikese aatommassiga ainete, detekteerimine.

Müüontomograafis mõõdetav müüonikiirus on ioniseeriv, nagu ka röntgenikiirus. Erinevus röntgenseadmest seisneb selles, et müüontomograaf on passiivne seade, mis ise kiirgust juurde ei tekita, vaid mõõdab looduslikku kiirgust. Müüontomograafias kasutatakse ära pidevalt olemasolevat kosmilisest kiirgusest pärit müüonite voogu, mis on ligikaudu  $1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$  merepinnal. [2] Teades müüoni suunda enne ja pärast uuritavat eset, saab kasutada erinevaid tomograafilisi meetodeid ja rekonstrueerida objektide kujutisi ning määrata nende koostist. [3] Müüonite hajumist aine läbimisel iseloomustab B. Rossi valem [4]

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{E_s^2}{2p^2v^2} \cdot \frac{x}{X_0}.$$

B. Rossi valemis tähistab  $\sigma_{\theta}$  osakese hajumise dispersiooni,  $E_s = 21 \text{ MeV}$  on konstant,  $p$  on osakese impulss,  $v$  on osakese kiirus,  $x$  on läbitud kihi paksus ja  $X_0$  on kiirgustee pikkus, mis iseloomustab materjali ja on seotud laetud osakese energia kaoga (läbi kiirguslike protsesside), materjalis. [4] Eriti tundlik on müüontomograafia suure aatommassiga aatomite jaoks, sest hajumine raskematelt aatomitelt on oluliselt suurem kui väiksema aatommassiga aatomitelt. Kuna müüonitel on väga suur energia ja läbistusvõime, siis on nad võimelised läbistama palju suuremaid esemeid kui röntgenkiired. [5]

Esimesed katsetused müüongraafias tehti 1950. aastal, mil E.P. George kasutas müüoneid, et määrata jää paksust ühe Austraalias asuva kaevanduse tunneli kohal. E.P. George mõõtis müüonite voogu tunneli sees ja võrdles seda väljas oleva vooga. Neeldunud müüonite hulgast määras ta tunneli kohal oleva jää paksuse. [6]

Hiljem on müüoneid korduvalt kasutatud erinevate objektide uurimisel. Peamine valdkond, kus müüongraafia meetodid kasutust leiavad, on geoloogilistel uuringutel. Jaapanis on väga palju

kasutatud erinevaid meetodeid vulkaanide uurimiseks ja nende aktiivsuse ennustamiseks.[6] Aastal 2009 kasutati müüoneid, et ennustada Mount Asama aktiivsust ja täpset purskamise aega. Müüongraafia leiab aktiivset rakendust vulkaanide uurimisel ka tänapäeval.[6]

Suur läbimurre müüontomograafias toimus 2003. aastal, mil rakendati teadmist, mida Rutherford näitas juba 1911. aasta katses. Nimelt tõestas Rutherford, et laetud osakesed, läbides mingit ainet, kalduvad kõrvale oma sirgjoonelisest trajektooriga.[7] Kõrvalekaldumise põhjuseks olid tugevad Coulomb'i jõud, mis tekkisid, kui laetud osake sattus aatomi tuumale liiga lähedale. Rakendades seda teadmist müüonitele, leiti, et hajumise põhjal on võimalik määrata erineva aatommassiga aatomitest koosnevaid esemeid, kasutades laetud osakestena müüoneid. Hajumisel põhinevad müüontomograafid, mis on hetkel arenduses, töötavadki sellel põhimõttel.[6] Tänu Coulomb'i hajumise nähtusele on võimalik määrata, kui suure aatommassiga objektilt müüon hajus, kui on teada müüoni trajektoori enne objekti ja pärast objekti. Selleks on vaja müüoni trajektoori kindlaks määrata, milleks kasutatakse teiste variantide seas ka stsintillatsioonkiude. [6]

Hetkel kasutatakse peamiselt kahel põhimõttel töötavaid müüontomograafe. Üks töötab müüonite neeldumisel (*Absorption-based muography*) ja teine müüonite hajumisel (*Scattering-based muography*). Neeldumisel põhinev müüontomograafia registreerib müüoneid, mis on objekti läbinud ja võrdleb saadud müüonite jaotust taevast tuleva müüonite vooga. Kahe voo võrdlemisel on näha voo intensiivsuse vähenemist, mis võimaldab seeläbi teha järeldusi uuritava objekti kohta.[6] Hajumisel töötav müüontomograafia on antud töö jaoks huvi pakkuv valdkond, sest peamiselt kasutatakse stsintillatsioonkiude just hajumisel töötavates müüontomograafides.



## 2. Teoreetiline taust ja vajalikud eelteadmised

### 2.1. Müüonid

Müüon on elementaarosake, mis kuulub leptonite klassi. Kui müüonid tekivad atmosfääris kosmilise kiirguse tõttu, nimetatakse neid osaks atmosfäärselt kiirgusest. Peamiseks kosmilise kiirguse allikateks on kosmoses toimunud supernoovad, mis paiskavad välja suurtes kogustes osakesi ja aatomi tuumasid, mis interakteeruvad Maa atmosfääriga. Kusjuures müüon on sarnaste kvantarvudega nagu elektron, aga natuke rohkem kui 200 korda suurema massiga. Müüonid tekivad, kui kosmist päritolu prootonid, elektronid, positronid, raskemad tuumad ja antiprootonid satuvad Maa atmosfääri. Atmosfääris põrkuvad nad gaaside, peamiselt lämmastiku ja hapniku, tuumadega. Nende põrgete tulemusena tekivad uued osakesed. Kõige tõenäolisemalt tekivad piionid ja kaonid, mis omakorda võivad laguneda müüoniteks. Tekkivate müüonite keskmine impulss on kõige tõenäolisemalt 4 GeV/c, aga see võib olla ka oluliselt suurem või väiksem. Suure impulsi tõttu on need osakesed võimelised läbima Maa atmosfääri ning maapinnal ette jäävaid objekte.[6]

Müüonite eluiga on vaid 2,2  $\mu\text{s}$  (paigalseisus), aga tulenevalt relativistlikest efektidest, tundub meile kui vaatlejatele, et nende eluiga on oluliselt pikem. Sellest tulenevalt on müüonite lagunemise teepikkus umbes 24 km. Kuna nad tekivad atmosfääris umbes 15 km kõrgusel merepinnast, siis on nende lagunemise teepikkus piisav, et jõuda maapinnale.[6]

Müüonite voogu iseloomustab üpris hästi  $\cos^2(\beta)$ , kus  $\beta$  tähistab nurka seniidi suhtes. Sõltuvuse järgi on seniidi suunas voog maksimaalne ja sellest 90 kraadi kõigis suundades läheneb voog nullile. [8]

## 2.2. Fotodetektorid

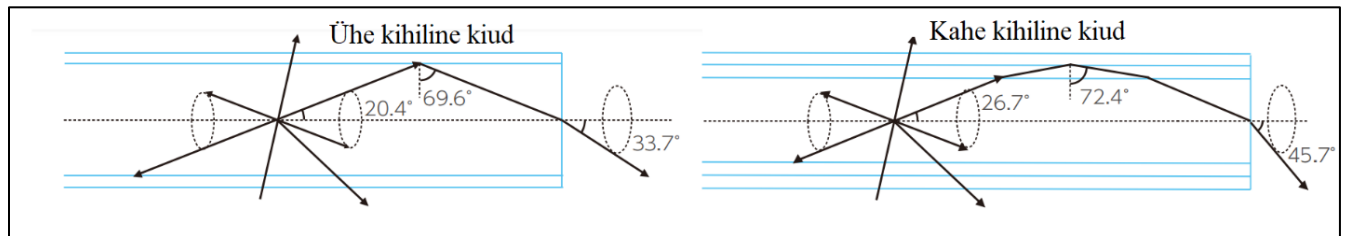
Üldine nimetus ränil põhinevatele fotodiodidele on SiPM, mis on lühend nende ingliskeelsest nimest *Silicon Photomultipliers*. [9] Antud töö rakenduses oli vajalik ühe footoni mõõtmise võimekus, mida antud fotodetektorid võimaldavad. Kasutatavad fotodetektorid töötavad fotokordisti põhimõttel ehk ühe footoni langemisel detektorile tekivad fotoefekti mõjul elektronid, mida võimendatakse, et saada elektroonika poolt registreeritavat impulssi. [9] Kuna detektor peab olema väga tundlik, et oleks võimalik detekteerida footoneid ühe kaupa, on see paraku ka oluliselt mõjutatav elektromagnetilisest müra. Müra allikateks on teised elektriseadmed, mis kiirgavad elektromagnetlaineid. Probleem tuleb sellest, et ühe footoni määramisel on isegi koos võimendusega signaal liiga nõrk ja ümbritsev müra võib olla suurem kui footoni registreerimisel saadud signaal.

## 2.3. Stsintillatsioonikiud

Stsintillatsioonikiud on optiline kiud, kuhu on lisandina sisse viidud orgaanilisi ühendeid, mis ergastuvad kui energiaga osakesed kiudu läbivad. Ergastuse relakseerumisel emiteeruvad footonid ja levivad mööda kiudu edasi. [10] Kiude toodetakse väga erinevate parameetritega, näiteks erinevate kujudega, murdumisnäitajatega, kattekihtide arvuga, valgussaagisega, läbimõõduga, orgaaniliste ühendite kontsentratsiooniga, neeldumistee pikkustega ja haprusega. See tähendab, et on võimalik valida erinevate variantide hulgast kindla rakenduse jaoks sobiv kiud. Töös kasutatavad kiud varieerusid murdumisnäitajas, kattekihtide arvus, hapruses, läbimõõdus, kiu materjalis ja neeldumistee pikkuses.

Kiududes, millel on kaks erineva murdumisnäitajaga kattekihti, on täielik sisepeegeldumine efektiivsem kui ühe kattekihiga kiududes, sest esimesest kihist välja murduv või hajuv valgus peegeldatakse mööda kiudu edasi järgmiselt kihilt. Ühe kihiga kiudude korral on kihte vähem, mille tõttu murdub rohkem valgust kiust välja ümbritsevasse õhku. Õhku hajunud ja murdunud

valgust enam kiudu tagasi ei juhita. Järgnevalt on joonisel nr 1 näha, kuidas kihtide arv mõjutab nurka, mille juures valgus veel kiust välja ei hajju.

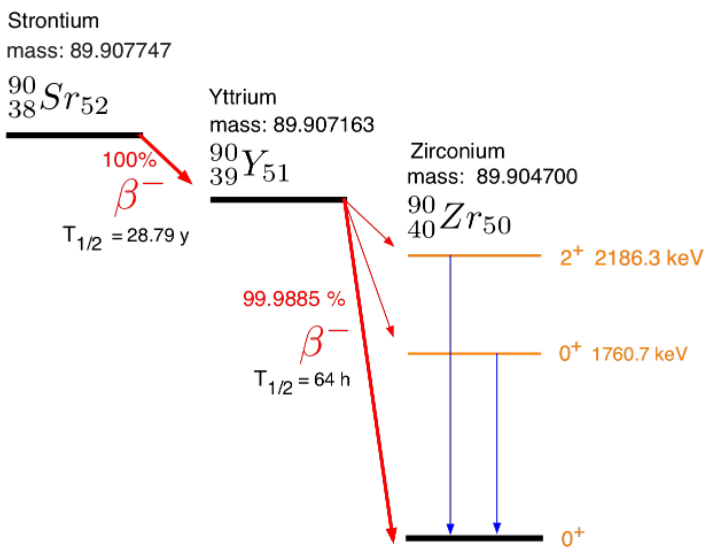


Joonis 1. Ühe ja kahe kihilise kiud täieliku sisepeegelduse võrdlus.[11]

Samuti on oluline parameeter haprus. Hapramatel kiududel on ka suurem on tõenäosus paigaldamise käigus murduda. Rohkete kahjustuste korral hajub valgus mõõtmistel kiust välja ja selle tõttu kasvab valguskadu.[12]

### 3. Metoodika

Antud töös kasutati ergastusallikana strontsium 90 (Sr-90) allikat, mis  $\beta^-$  laguneb ja vabastab selle käigus elektroni ja tütar nukliidi ütriumi, mis võib omakorda  $\beta^-$  laguneda tsirkooniumiks. Lagunemisel tekkiva elektroni energia on 512 keV. Tekkinud tütar nukliidi ütriumi edasisel lagunemisel võib tekkida elektrone kuni 2,27 MeV energiaga.[13] Lagunemise skeem on toodud joonisel nr 2.



Joonis 2. Sr-90  $\beta^-$  lagunemise skeem.[14]

Elektronid põhjustavad omakorda ionisatsiooni ja ergastusi uuritavates kiududes. Ergastuse relakseerumisel null-energia tasemele kiirgub välja gammakvant. Kiudude sees levib valgus tänu täieliku sisepeegelduse nähtusele. Antud töös prooviti tõsta valguse amplituuti, kasutades selleks peegleid, et valguse intensiivsus oleks üle müra nivoo. Hüpotees oli, et valgus peegeldub kiu pinnalt, mitte ei haju ümbritsevasse keskkonda ja tõstab sellega detekteeritavat valguse hulka.

Antud töös on kasutatud 1,0 mm ja 0,9 mm läbimõõduga, nii 1 kui ka 2 kihilisi Kuraray stsintillatsioonikiude. Vastavalt kiu diameetrile ja kiudude arvule on määratud kiudude kihtide paksused, mis on toodud tabelis nr 1.

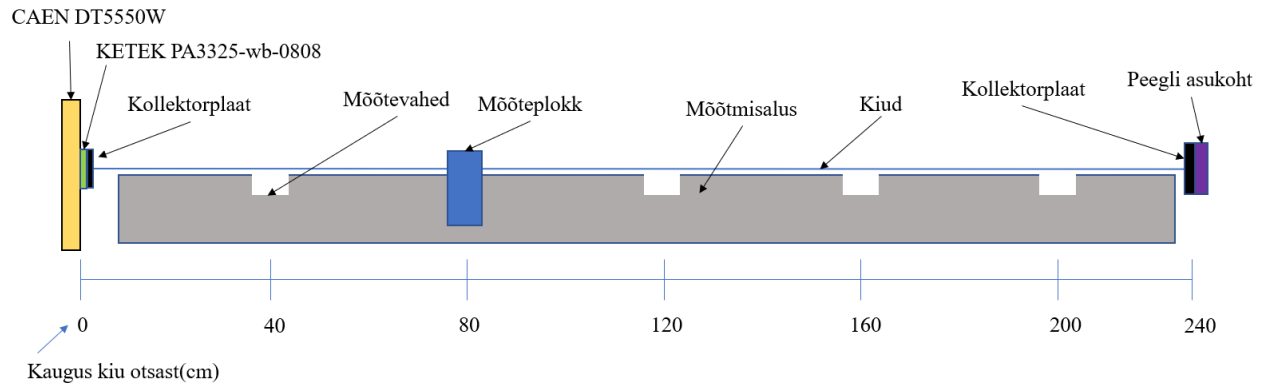
Tabel 1. Kiudude kihtide läbimõõdud sõltuvalt läbimõõdust ja kihtide arvust.[11]

<b>Kiudude läbimõõt</b>	<b>1 mm (2 kihti)</b>	<b>1 mm (1 kihti)</b>	<b>0,9 mm (2 kihti)</b>	<b>0,9 mm (1 kihti)</b>
<b>Tuum</b>	0,96 mm	0,98 mm	0,864 mm	0,882 mm
<b>Esimene kiht</b>	0,02 mm	0,02 mm	0,018 mm	0,018 mm
<b>Teine kiht</b>	0,02 mm	-	0,018 mm	-

Antud töös kasutati fotodetektoreid KETEK PA3325-wb-0808 ja HAMAMATSU S14160-6050HS. Mõlemad fotodetektorid võimaldasid mõõta ühe footoni kaupa ja olid varasemalt juba kasutatud stsintillatsioonkiudude mõõtmiseks.

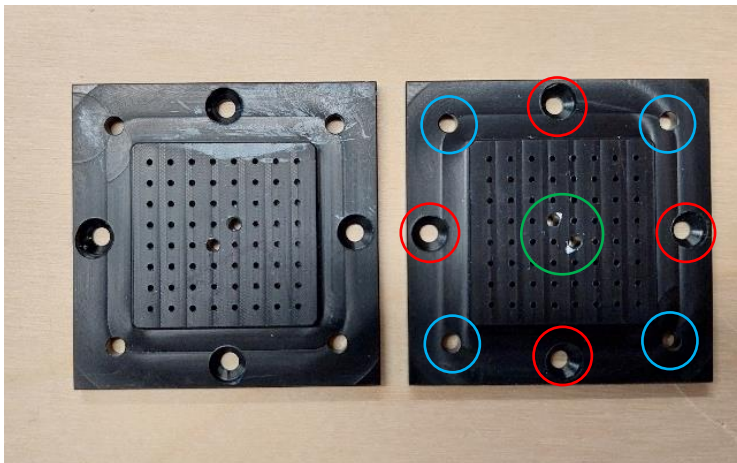
### 3.1. Mõõtesüsteem

Mõõtesüsteemiks kasutati kaht firma CAEN plaati, mis olid ühendatud vastavalt päästikplaatide ja 8 x 8 maatriksiga fotodetektori külge. Üldine katse skeem on näha joonisel nr 3, kus on toodud mõõtesüsteemi külgvaade.

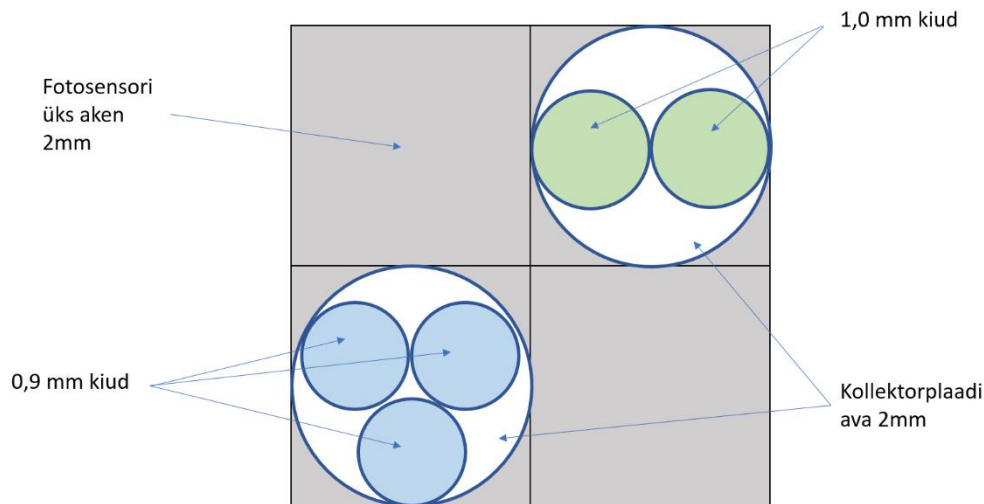


Joonis 3. Katsesüsteemi skeem.

Esimene plaat oli CAEN DT5550W, mille külge oli ühendatud 8 x 8 maatriksiga KETEK PA3325-wb-0808 fotodetektor. Selleks, et ühendada kiud fotodetektoriga, oli kiudude otsa ühendatud kollektorplaat. Kollektorplaati on näha joonisel nr 4 ja kiudude paiknemine kollektorplaadi avas ning nende paigutus fotodetektor maatriksi suhtes on näha joonisel nr 5.



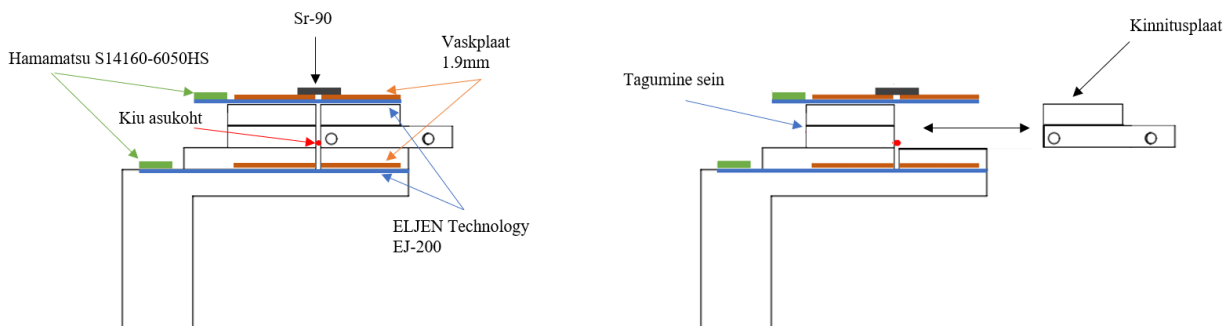
Joonis 4. Kollektorplaadid kõrvuti, kus on näha puuritud avasid. Nurkades olevad avad (sinised ringid) olid kollektorplaadi ühendamiseks fotodetektoriga. Punasega tähistatud avad olid plaadi ühendamiseks poleerimislaua külge ja peegli kinnitamiseks. Rohelisega tähistatud puuritud avad olid kiudude paigutamise jaoks. Samad avad on ka kõrval oleval kollektorplaadil.



Joonis 5. Kollektorplaadi avas paiknevate kiudude paigutus ja kollektorplaadi avade paigutus fotodetektori maatriksi suhtes (nähtav 2 x 2 maatriks).

Mõõtmiste andmed saadi, kasutades plaadiga kaasa tulevat tarkvara „DT5550W Readout Software“. Kogu süsteem oli üles seatud puidust kasti, mis oli suletav, et kõrvaldada välise valguse segavat mõju mõõtmistele. Kasti külje peale oli puuritud väikesed avad, mille kaudu sai juhtmed kastist välja tuua. Ava oli täidetud, et juhtmete vahelt ei leviks ruumis olev valgus kasti, mis segaks mõõtmisi.

Teine plaat CAEN A1702 oli ühendatud kahe päästikplaadi külge. Päästikplaat koosnes fotodetektorist Hamamatsu S14160-6050HS ja stsintillatsioonplaadist ELJEN Technology EJ-200. Päästikplaadid olid ühendatud mõõteploki külge, mille skeemi on näha joonisel nr 6.



Joonis 6. Mõõteploki skeem, kus on näha koht, kuhu saab asetada kiu. Lisaks on veel näidatud ära võimalus eemaldada kinnitusplaat, et oleks liigipääs kiule.

Kiudude mõõtmisel kasutati mõõteplokki, mida sai mööda mõõtmisalust liigutada soovitud mõõtepositsiooni. Antud töös olid mõõtmisalusel vahed, kuhu sai kinnitada mõõteploki ja sooritada mõõtmisi. Vahede kaugus üksteisest oli 40 cm.



## 4. Töö käik

### 4.1. Objektide ettevalmistamine

Uuritavateks objektideks olid antud töös kaheksa erinevat Kuraray plastikstsintillatsioonkiudu. Kiududel tootekoodiga SCSF-78 oli mainitud, et nad kiirgavad rohkem valgust kui teised kiu tüübid, nagu näiteks SCSF-81, mis oli ka kiudude komplekti valitud. Nende erinevad markeeringud ja omadused on toodud tabelis nr 2.

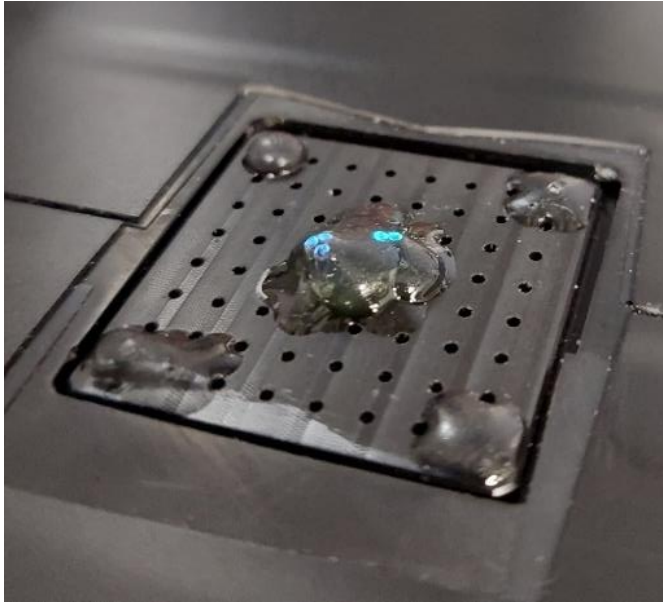
Tabel 2. Uuritavate kiudude numeratsioon ja parameetrid.

Numeratsioon	A-5	A-6	A-7	A-9	A-10	A-11	A-3	A-4
Tootekood	SCSF-78J	SCSF-78MJ	SCSF-78MSJ	SCSF-78J	SCSF-78MJ	SCSF-78MSJ	SCSF-81MJ	SCSF-81MSJ
Läbimõõt	1,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	0,9 mm	0,9 mm	0,9 mm	1,0 mm	1,0 mm
Kihtide arv	1	2	2	1	2	2	2	2
Tugev/habras	Habras	Habras	Tugev	Habras	Habras	Tugev	Habras	Tugev
Neeldumistee pikkus	>4 m	>4 m	>4 m	>4 m	>4 m	>4 m	>3,5 m	>3,5 m

Selleks, et oleks võimalik kiude mõõta, tuli need eelnevalt ühendada kollektorplaatide külge. Kollektorplaat on nähtav joonisel nr 4. See hoidis kiude koos, takistades nihkumist mõõtmiste käigus. Tellitud plaatide toorikud kohandati sobivaks, puurides neid vastavalt kiudude hulga ja läbimõõdule. Töös käsitletava viie kiu jaoks on kasutatud 2 mm puuri, millega puuriti kaks keskmist ava (vt joonis 4). Ühte avasse läks 3 x 0,9 mm kiud ja teise vastavalt 2 x 1 mm kiud. Aukude puurimisel oli vajalik, et nende paigutus võimaldaks pööramisel ümber plaadi keskpunkti puuritud auke samasse positsiooni panna. Kiudude positsioone saab näha joonisel nr 5.

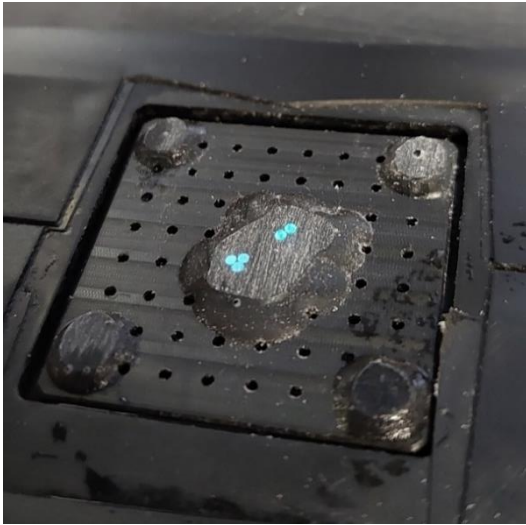
Välimised augud puuriti üle 3 mm puuriga (vt joonis 4), et oleks võimalik plaate kinnitada hiljem fotodetektoril külge. Keskmised augud (vt joonis 4) puuriti üle sama puuriga ja tehti plaadi siledale poolele 6 mm puuriga süvend, kuhu mahuks hiljem kruvipea. Siinkohal oli oluline jälgida, et plaadist läbi ei puuritaks, sest muidu ei ole võimalik seda hiljem poleerimislaual külge kinnitada. Järgmisena lõigati toetusplaadid, kuhu külge liimiti kiud, et neid oleks parem mõõta ja

et nende järjekord oleks kindel. Liimimisel kasutati UV-liimi Henkel LOCTITE AA 3311, mis muutus UV-lambiga valgustamisel tahkeks. Liimimisel oli oluline jälgida, et iga kiud oleks toetusplaadil liimitud õigesti vahesse, et kiud ei ristuks. Lisaks toetusplaatidele liimiti ka kiud kollektorplaatide külge. Kollektorplaatide nurkadesse jäeti liimiga „jalad“, mida on näha joonisel nr 7. „Jalad“ takistavad poleerimise käigus kiudu plaadini ära lihvimast. Hiljem lihviti nad aga samale tasemele, vähendamaks kollektorplaadi kõikumist.

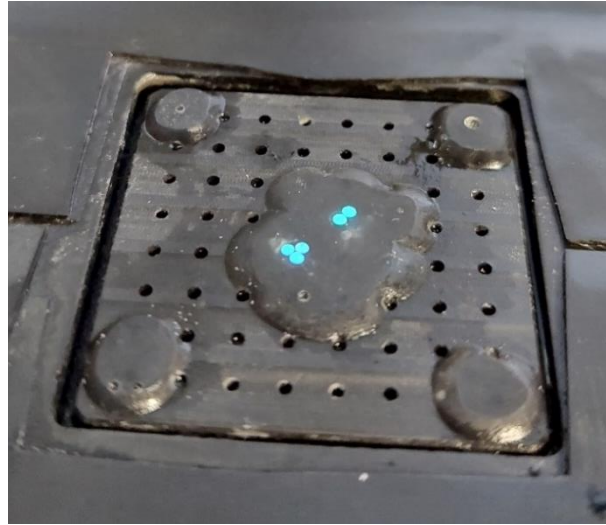


*Joonis 7. Kollektorplaat, millele on lisatud nurkadesse jalad.*

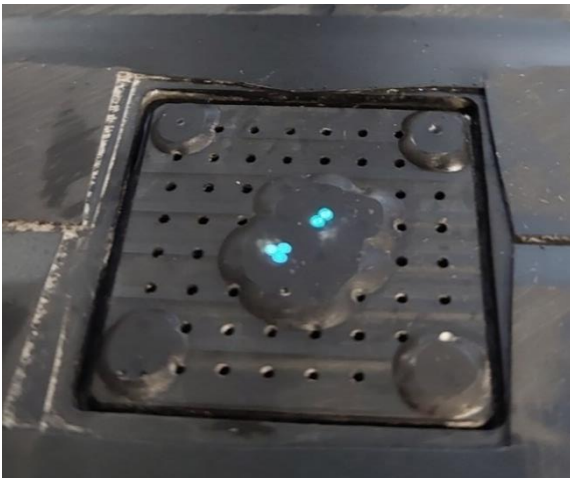
Poleerimist alustati suurema terasuurusega lihvpaberist. Kui eelmise lihvpaberiga oli pind juba lihvitud, siis liiguti väiksema terasuuruse juurde. Kiudude lihvimisel kasutati lihvpabereid P-400, P-2500, P-3000 ja P-8000. Antud järjekorras ja lihvimissuunda muutes oli võimalik mikroskoobiga kindlaks teha, kas eelmine kiht oli piisavalt lihvitud ja mis seisus olid kiud. Lihvimist jätkati seni kuni kiu otsad olid võimalikud siledad ja servades ei olnud nähtavaid deformatsioone. Erinevad lihvimisastmed on näha joonistel nr 8 – 11.



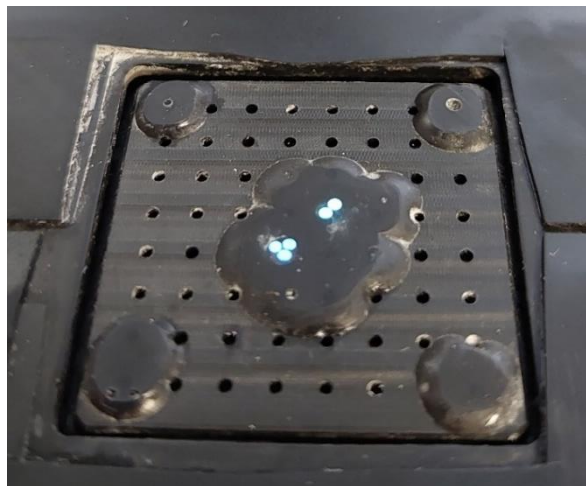
*Joonis 8. Kollektorplaat pärast esimest lihvi.*



*Joonis 9. Kollektorplaat pärast teist lihvi.*

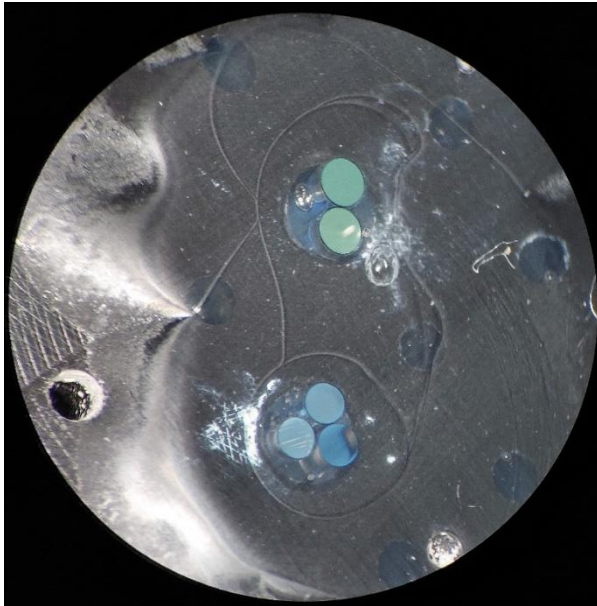


*Joonis 10. Kollektorplaat pärast kolmandat lihvi.*

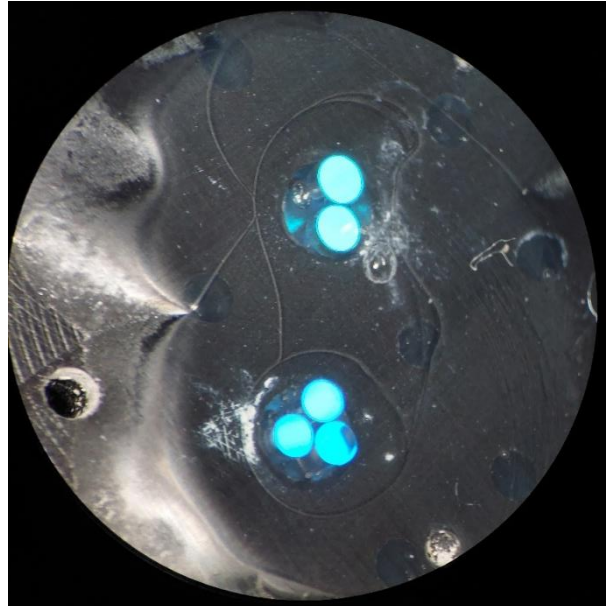


*Joonis 11. Kollektorplaat pärast neljandat lihvi.*

Peale lihvimist uuriti kiudude pindasid ka mikroskoobi all, et kontrollida, ega kiudude pindadele pole jäänud defekte. Kiudude pinnad ja nende paiknemine on näha joonistel nr 12 ja 13. Peale lihvimist tuli kollektorplaatidega väga ettevaatlikult ringi käia, sest väikseimgi hõõrdumine vastu pinda võis kiude kriimustada ja rikkuda nende valguse edasikandmise võimet.



*Joonis 12. Kiudude paiknemine (valgustamata).*



*Joonis 13. Kiudude paiknemine (valgustatud).*

Seejärel ühendati kiudude komplekt ühest otsast, kasutades kollektorplaati ja kruvisid, fotodetektorile KETEK PA3325-wb-0808 külge. Kiudude komplekti teise otsa kinnitati hiljem peegel, mis ühendati sarnaselt fotodetektorile, kasutades jällegi kollektorplaati ja kruve.

## 4.2. Mõõtmised

Kiude mõõdeti fotodetektoriga KETEK PA3325-wb-0808 viielt erinevalt kauguselt (vt joonis 3). Kaugused olid juba varasemate mõõtmiste käigus välja valitud ja mõõtmisalus oli tehtud vastavalt. Kaugused mõõdeti kollektorplaadi ja fotodetektori KETEK PA3325-wb-0808 ühenduskohast. Kaugused olid 40 cm, 80 cm, 120 cm, 160 cm ja 200 cm. Iga mõõtmise jaoks tuli mõõteploki eemaldada kinnitusplaat ja asetada kiud mõõteploki tagumises seinas olevasse mõõtekohta (vt joonis 6). Peale seda kinnitati taas kinnitusplaat ja sellega fikseeriti kiu asukoht. Kokku mõõdeti igat kiudu viiel positsioonil kaks korda. Esimesel korral oli üks kiu ots avatud ja teisel oli see kaetud peegliga, et suurendada detektorini jõudva valguse hulka. Peale esimest mõõtmistsükli (kõik kiud korra mõõdetud) tuli mõõteplokk mõõtmisaluse küljest lahti ühendada ja liigutada järgmisesse mõõtepunkti. Mõõtmiste juures oli väga oluline, et Sr-90 allikas ei nihkuks, seega fikseeriti allikas mõõteploki ülemise vaskplaadi külge, mis töötab elektronide kollimaatorina. Vaskplaadi kummaski otsas oli kaks pilu, mille abil sai vaskplaadi ära tsentreerida keskmise pilu suhtes. Tsentreerimist tuli teha iga kord peale uue kiu sisestamist või päästikplaatide nihutamist uuele kaugusele. Sr-90 aktiivsus ja selle kadu ei mõjuta mõõtmisi, sest efektiivsuse jaoks ei ole otseselt oluline, kui palju elektrone läbib plaati, vaid kui palju plaati läbivatest elektronidest oma signaali ka fotodetektorile edasi annavad. Efektiivsus on antud töös saadud kõikide sündmuste ja kiu otsast välja loetud sündmuste suhtest.

Kogu töö raames kasutati kiudude mõõtmiseks samaaegsus režiimi. Režiim võrdleb omavahel mõlemast päästikplaadist tulnud signaali ajalist lahknevust. Selle abil sai müra osaliselt vältida, sest kui mõlemast sensorist ei tulnud samaaegselt signaali või signaalide ajaline vahe oli liiga suur, siis ei edastatud läbimise signaali.

Lisaks antud töö raames valmistatud kiudude komplektile mõõdeti ka varasemalt valmistatud kiudude komplekti. Varasemast kiudude komplektist mõõdeti üle kolm kiudu, mis olid samade optiliste parameetritega nagu töö käigus valminud kiudude komplektis olevad kiud. Erinevus vanade ja uute kiudude vahel oli läbimõõdus, mis uutel kiududel oli 0,9 mm ja vanadel 1 mm. Varasemalt valmistatud kiududekomplekt oli tehtud sarnaselt töö käigus valminud komplektile.

### 4.3. Veallikad ja korratavuse hindamine

Töö käigus hinnati ka korratavust ja tehti korduvmõõtmisi võimalike veallikate määramiseks. Korratavuse jaoks hinnati viga, mis võis tekkida mõõtmiste ülesseadmisel tehtavatest mõõtesüsteemi muudatustest. Veallikad on toodud tabelis nr 3, kus on ka toodud, kas antud töö raames hinnati selle veallika mõju süsteemile või ei.

Tabel 3. Mõõtmis mõjutavad veallikad ja nende hindamine.

<b>Veallikas</b>	<b>Hinnatud või Ei ole hinnatud</b>
Kollektorplaadi eemaldamine fotodetektori küljest	Ei ole hinnatud (valguse lekke tõttu ebasobivad andmed)
Kiu eemaldamine mõõteplokist ja tagasi panemine	Hinnatud
Peegli eemaldamine ja tagasi paigaldamine	Hinnatud
Müra segav mõju	Ei ole hinnatud
Temperatuuri mõju mõõtmistele	Ei ole hinnatud
Müüonite mõju mõõtmistele	Ei ole hinnatud
Erinevate energiatega elektronide mõju mõõtmistele	Ei ole hinnatud

Antud töös ei hinnatud kõiki veallikaid. Analüüsi kiu mõõteplokist eemaldamise ja peegli eemaldamise mõju. Selleks, et määrata nende tegurite mõju mõõtmistulemustele tehti korduskatseid. Korrati ühte eelnevalt mainitud tegevustest ja mõõdeti kius saadud efektiivsust. Hiljem leiti mõõtmistulemuste standardhälve ja selle järgi hinnati ka tegevuste mõju mõõtmistulemustele standardmääramatuse kaudu.

Tabel 4. Kiu eemaldamise korratavuse tulemused.

<b>Kiud</b>	<b>Kaugus plaadist(cm)</b>	<b>Mõõtmise kestvus(min)</b>	<b>Päästikplaadi sündmused</b>	<b>Sündmused kiu otsast</b>	<b>Efektiivsus (%)</b>
<b>A-9</b>	200	15	740	483	65,270
<b>A-9</b>	200	15	828	525	63,406
<b>A-9</b>	200	15	807	504	62,454
<b>A-9</b>	200	15	711	460	64,698
<b>A-9</b>	200	15	741	467	63,023
<b>A-9</b>	200	15	735	479	65,170
<b>A-9</b>	200	15	793	529	66,709

Tabelist nr 4 saadud tulemuste põhjal arvutati välja keskmine efektiivsus, milleks oli 64,390%, efektiivsuse standardhälbeks saadi 1,386%. Statistiline määramatus oli 3,616% ja standardmääramatus 2,717%.

Tabel 5. Peegli eemaldamise korratavuse tulemused.

<b>Kiud</b>	<b>Kaugus plaadist(cm)</b>	<b>Mõõtmise kestvus(min)</b>	<b>Päästikplaadi sündmused</b>	<b>Sündmused kiu otsast</b>	<b>Efektiivsus (%)</b>
<b>A-9</b>	200	15	762	485	63,648
<b>A-9</b>	200	15	808	519	64,233
<b>A-9</b>	200	15	740	458	61,892
<b>A-9</b>	200	15	778	501	64,396
<b>A-9</b>	200	15	803	526	65,504
<b>A-9</b>	200	15	770	462	60,000
<b>A-9</b>	200	15	813	512	62,977

Tabelist nr 5 saadud tulemuste põhjal arvutati välja keskmine efektiivsus, milleks oli 64,236%, efektiivsuse standardhälbeks saadi 1,690%. Statistiliseks määramatuseks saadi 3,576% ja standardmääramatuseks 3,312%. Tabeli nr 4 ja 5 tulemuste põhjal arvutati ka liitmääramatus, milleks saadi 6,649 %.

SiPM-i ühendamise katse juures oli märgatav keskmise efektiivsuse langus, mille põhjuseks oli katva kasti peaplaadi deformatsioon, mille kaudu lekkis katseruumi vähesel määral välisruumi valgust. Lekkiva taustvalguse tõttu ei arvestatud neid mõõtetulemusi antud töös. Kiudude eemaldamise ja peegli eemaldamise katsete juures oli antud deformatsioon juba kõrvaldatud.

Lisaks neile mõõtmistele tehti ka mõõtmine varasemalt kasutatud mõõteplokiga, kus kasutati 0,2 mm vasklehte alumise vaskplaadi all. Varasemalt ei kasutatud ülemist piluga vaskplaati, mis kollimeeriks elektronkiirgust, vaid hoopis vasklehte, et selles neelduksid madalamaenergiaga elektronid. Kasutades nii vaskplaati kui ka vasklehte tehti mõõtmised A-9 kiuga. Mõõtmiste tulemused on näidatud tabel nr 6.



Tabel 6. Mõõtmised vaskplaadi ja vasklehega.

<b>Kiud</b>	<b>Kaugus plaadist(cm)</b>	<b>Mõõtmise kestvus(min)</b>	<b>Päästikplaadi sündmused</b>	<b>Sündmused kiu otsas</b>	<b>Efektiivsus (%)</b>
<b>A-9</b>	40	15	290	192	66,207
<b>A-9</b>	80	15	265	173	65,283
<b>A-9</b>	120	15	295	185	62,712
<b>A-9</b>	160	15	269	168	62,454
<b>A-9</b>	200	15	272	142	52,206

Antud tulemustest on näha, et kahe vaskplaadi rakendamine vähendas sündmuste hulka 3 – 4 korda. Selle tõttu ei saa antud töös sellist süsteemi kasutada, sest statistiline määramatus nii väheste sündmuste korral hakkab omama liiga suurt kaalu.

Töö käigus mõõdeti kahes eri suuruses kiude (1 mm ja 0,9 mm). Selleks, et mõõtmistulemused oleks usaldusväärsed tuli ka määrata kui täpselt oli antud mõõtesüsteemi puhul võimalik fikseerida pilu laius, kuhu kiud asetati. Juhul kui kiud ja ava on liiga suure erinevusega ei saa olla kindel, et leitavad erinevused on seotud kiudude diameetri erinevusega. Selleks mõõdeti pilu läbimõõtu mõõteploki, pannes kiu kinnitusplaadi ja tagaseina vahele (vt joonis 6). Peale seda mõõdeti mõõteploki laiust. Pärast seda avati taas mõõteplakk et eemaldada kiud ja kinnitusplaat, millest viimane asetati koheselt tagasi. Taaskord mõõdeti laiust. Kahe mõõtmise vahe andis pilu mõõtme. Mõõtmistulemused on esitatud tabelis nr 7.



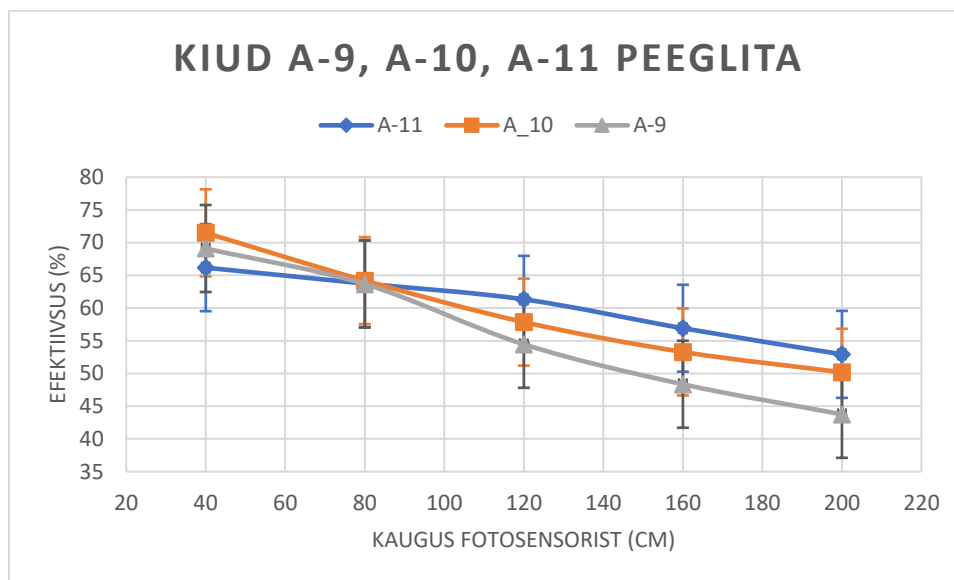
Tabel 7. Pilu laiuse hindamine.

Kasutatava kiu läbimõõt (mm)	X_1(vahega) (mm)	X_2(vaheta) (mm)	Delta X (mm)
1	50,99	50,01	0,98
1	50,99	50,02	0,97
1	51,07	50,02	1,05
1	51,06	50,02	1,04
1	51,06	50,06	1
1	51,01	50,04	0,97
1	51,06	50,03	1,03
1	51,05	50,04	1,01
1	51,04	50,04	1
1	51,04	50,06	0,98
1	51,04	50,04	1
1	51,04	50,02	1,02
1	51,04	50,04	1
1	51,03	50,02	1,01
1	51,03	50,02	1,01

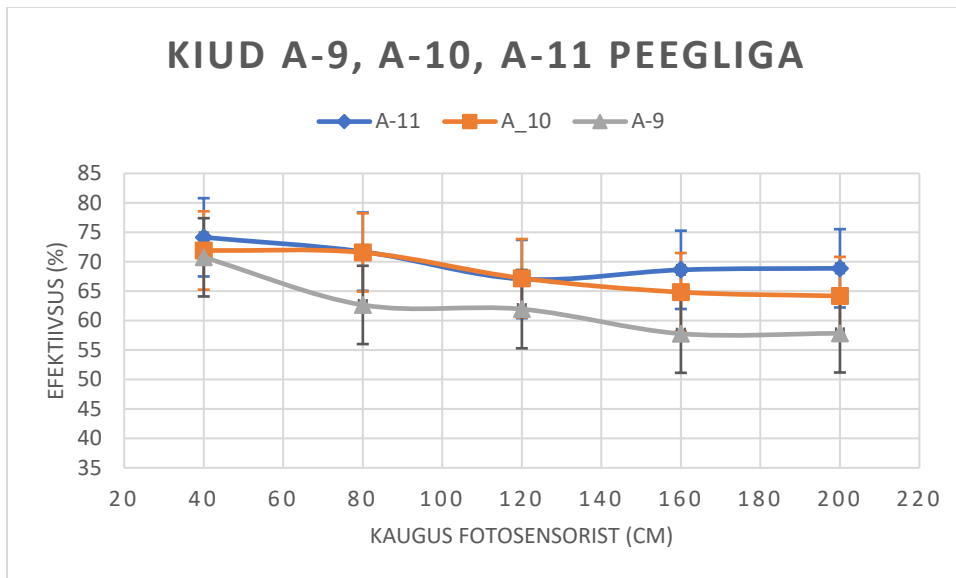
Antud mõõtmiste tulemusena arutati välja, et keskmine pilu laius 1 mm kiu korral oli 1,004667 mm, standardhälve 13 mõõtmise tulemusena oli 0,023 mm ehk 23  $\mu$ m. Antud töö jaoks on selline täpsus aktsepteeritav ja saadud tulemused usaldusväärsed.

## 5. Mõõtmiste tulemused ja analüüs

Mõõtmistest saadi kiude läbinud elektronide ja fotodetektori poolt kogutud sündmuste arv ning igale sündmusele vastav pinge, mis iseloomustab signaali tugevust. Selleks, et leida sündmustest tõelised sündmused kasutati juba varasemalt välja töötatud Pythoni koodi, mis sorteeris toorandmetest välja kindlas kanalis oleva kiu info ja filtreeris sealt lävendist allapoole olevad sündmused välja. Lävendi seadmine oli vajalik, et eemaldada andmetest müra tekitatud sündmused. Selline lähenemine ei ole ideaalne, kuid ainuvõimalik, kuna müra tekkimist vältida ei ole võimalik. Seega võib juhtuda, et mõni reaalne sündmus filtreeritakse välja koos müraga. Müra foon andis laboris loenduskiiruse 79 sündmust/15 min ehk 5,26 sündmust minutis. Kiudude A-9, A-10 ja A-11 tulemused on toodud joonistel nr 14 ja 15.



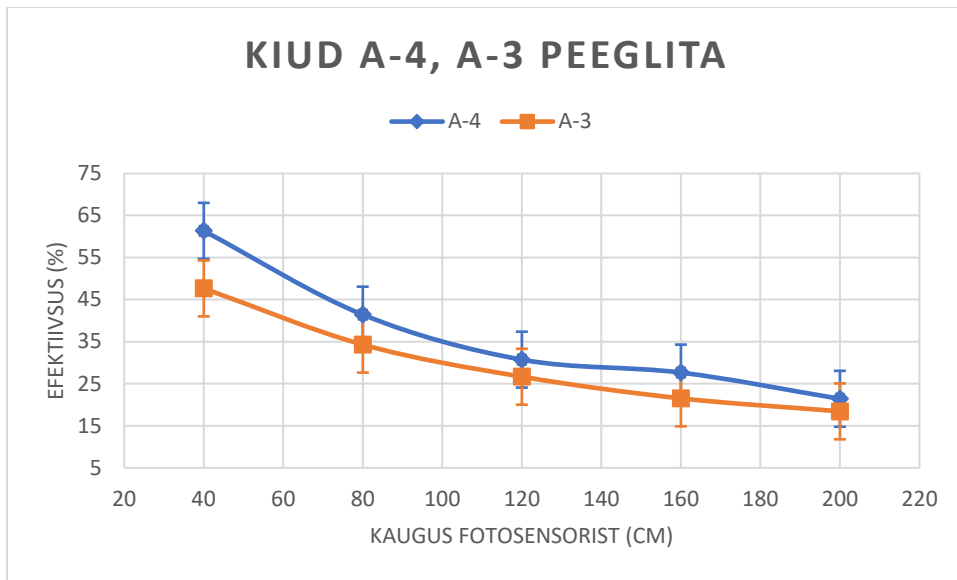
Joonis 14. Kiudude A-9, A-10 ja A-11 mõõtetulemused ilma peeglita. Lisatud on liitmääramatus.



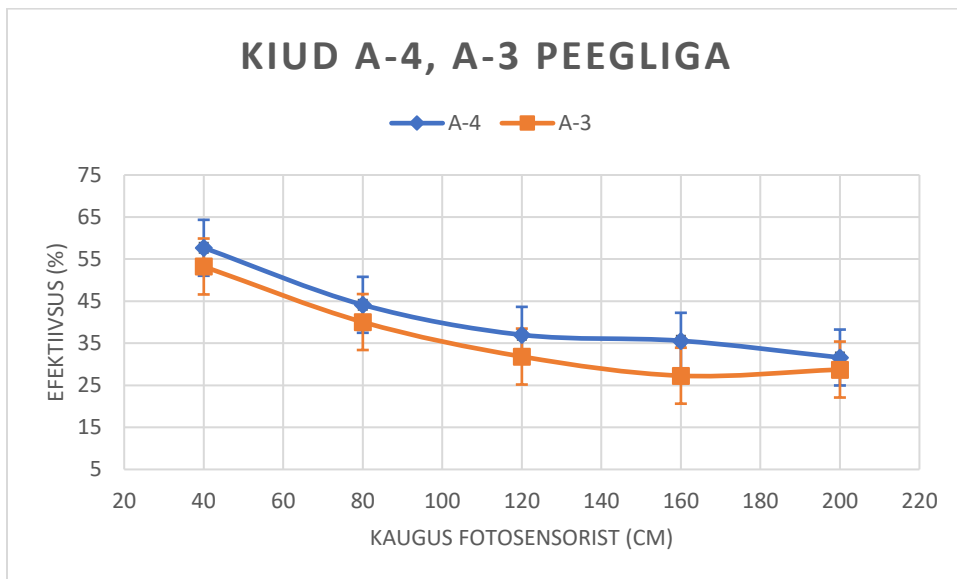
Joonis 15. Kiudude A-9, A-10 ja A-11 mõõtmiste tulemused peegliiga. Lisatud on liitmääramatus.

Kiudude A-9, A-10 ja A-11 (läbimõõt 0,9 mm) jaoks on väga selgesti näha peegli võimenduse efekti. Ilma peeglita on efektiivsuse langus järsk, kuid kasutades peeglit muutub efektiivsuse langus sõltuvalt kaugusest laugemaks. Andmetest on selgelt näha, et peegli lisamine kiu teise otsa põhjustab sealt valguse peegeldumist, mis omakorda tõstab keskmiste ja äärmiste mõõtepunktide (120 cm, 160 cm ja 200 cm) efektiivsust, sest rohkem valgust jõuab sensorini. Sellest tulenevalt ei ole graafikutel olevad sirged nii järsu tõusuga, vaid on pigem lauged kõverad, mis püsivad keskmise efektiivsuse ümber.

Töö käigus valminud kiududekomplektis oli ka kaks erandlikku kiudu A-3 ja A-4 (tootekoodiga SCSF-81), mille neeldumistee pikkused olid lühemad võrreldes teise uuritava kiu tüübiga. Samuti polnud nende tootelehel välja toodud, nagu oli teisel kiu tüübil (SCSF-78), et neis oleks väga suur valguse saagikus, lisaks oli nende neeldumistee pikkus lühem kui teistel kiududel. Väärtused on toodud tabelis nr 2. Uuritavate objektide hulka võeti need kiud, sest taheti määrata nende efektiivsust ja võrrelda neid juba varasemalt uuritud kiududega. Mõõtmistulemused on nähtavad joonistel nr 16 ja 17.



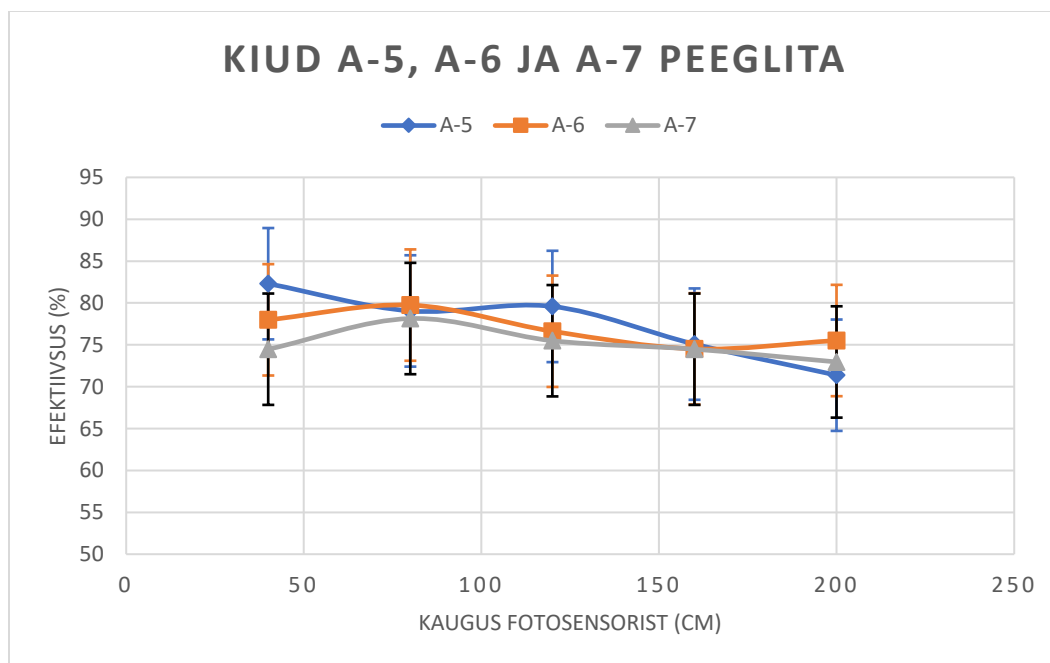
Joonis 16. Kiudude A-4 ja A-3 mõõtmistulemused ilma peeglita. Lisatud on liitmääramatus.



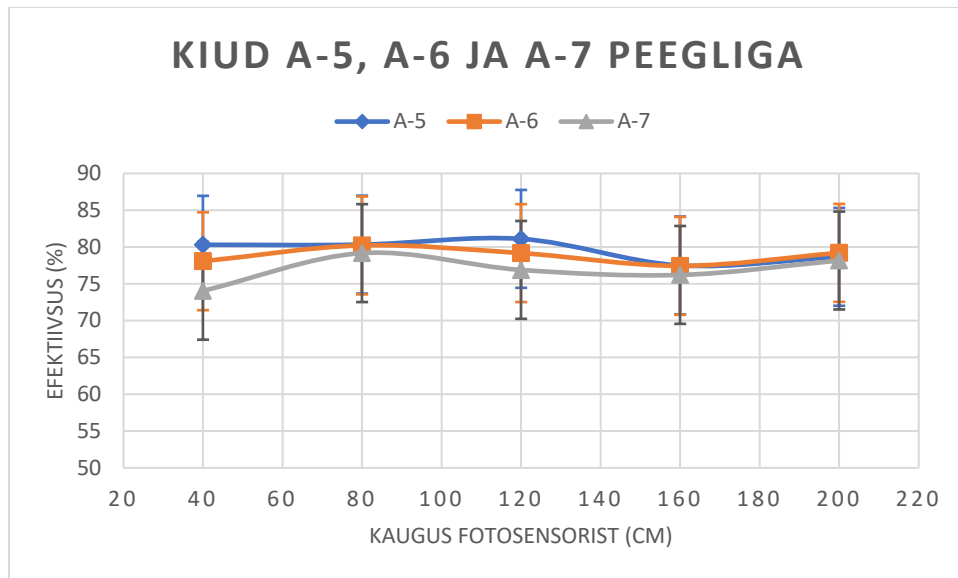
Joonis 17. Kiudude A-4 ja A-3 mõõtmistulemused peeglita. Lisatud on liitmääramatus.

Mõõtmistest selgus, et kiud A-3 ja A-4 on oluliselt kehvema efektiivsusega. Teiste kiududega võrreldes oli efektiivsuse vähenemine sõltuvalt kaugusest oluliselt suurem kui teistel kiududel. Sellest tulenevalt jõuab kiu lõppu vähem valgust ning seda ei suudeta piisavalt registreerida. Kuna tegu on aga antud rakenduse jaoks olulise omadusega, siis leiti, et nimetatud kiud ei ole sobivad müüontomograafias kasutamiseks.

Varasemalt valminud kiukomplektist mõõdeti kolme kiudu: A-5, A-6 ja A-7, mille omadused (v.a läbimõõt) on sarnased vastavalt kiududega A-9, A-10 ja A-11. Väiksemate numbritega kiududel A-5, A-6 ja A-7 on läbimõõt 1 mm ja suuremate numbritega A-9, A-10 ja A-11 on läbimõõt 0,9 mm. Kiudude mõõtmiste tulemused on joonistel nr 18 ja 19.



Joonis 18. Kiudude A-5, A-6 ja A-7 mõõtmistulemused ilma peeglita. Lisatud on liitmääramatus.



Joonis 19. . Kiudude A-5, A-6 ja A-7 mõõtmistulemused peeglika. Lisatud on liitmääramatus.

Kiudude komplektis mõõdetud kiududel A-5, A-6 ja A-7 (edaspidi 1 mm kiud) esines sarnaselt kiududega A-9, A-10 ja A-11 (edaspidi 0,9 mm kiud) efektiivsuse erinevused peeglika ja peeglika mõõtmiste vahel. Ent võrreldes 0,9 mm kiududega ei ole 1 mm kiudude puhul erinevused peeglika ja peeglika mõõtmiste vahel nii suured. Nii peeglika kui peeglika on näha, et 1 mm kiudude efektiivsuse langus ei ole nii järsk kui oli 0,9 mm kiudude puhul. Samuti säilitavad 1 mm kiud palju paremat efektiivsust kogu 200 cm pikkusel mõõtelõigul. Ilma peeglika katsete efektiivsuse langus oli oluliselt väiksem 1 mm kiududel kui 0,9 mm kiududel. Seetõttu on 1 mm kiud parema efektiivsusega ja ei sõltu nii tugevasti mõõtepunkti asukohast kui 0,9 mm läbimõõduga kiud.

Esimene hüpotees, et suurema diameetriga kiud on parema efektiivsusega kui väiksema diameetriga kiud, sai kinnitust. Samuti leiti, et antud töö raames osutus kõige efektiivsemaks kiuks A-5 (1 mm), mis andis kõige paremaid efektiivsuse tulemusi. Kuigi määramatusi arvesse võttes ei saa kindlalt väita, et tegemist on kõige efektiivsema kiuga uuritud kiudude hulgast.

Teise hüpoteesi, et efektiivsus on seotud neeldumistee pikkusega, vastus jäi ebaselgeks. Neeldumistee pikkus antud töö näitel ei mõjutanud efektiivsust ilmselt kuigi palju, sest peeglika peegelduv valgus läbis pikemaid vahemaid kui otse levinud valgus. Kuna ei olnud võimalik

kasutada samade üldiste omadustega, kuid erineva neeldumistee pikkusega kiude, siis ei saanud antud hüpoteesi täielikult kontrollida.

Peepli võimendus sai kinnitust ja näitas, et sellise meetodiga on võimalik oluliselt parandada kiudude efektiivsust. Kiududel, mille diameeter oli 1 mm, oli peegli võimenduse efekt oluliselt nõrgem kui 0,9 mm läbimõõduga kiududel. See näitab, et igas rakenduses ei pruugi peegli kasutamine osutada vajalikuks.

Andmete põhjal võib öelda, et efektiivsuse sõltuvus kiu kattekihtide arvust on suurem väiksema diameetriga kiududes. Suurema diameetriga kiudude efektiivsuse sõltuvus kattekihtide arvust on väiksem, sest kõik kiud andsid lähedase efektiivsusega signaali.

## Kokkuvõte

Käesolevas töös uuriti erinevaid stsintillatsioonkiude. Hinnati kiudude efektiivsuse sõltuvust erinevatest parameetritest, et leida kiude, mida kasutada müüontomograafias.

Eriti tugevalt sõltus efektiivsus kiu läbimõõdust. Selgus, et efektiivsus oli kõrgem 1 mm diameetriga kiududel. Seega sai töö esimene hüpotees, et efektiivsus sõltub kiu diameetrist, kinnitust.

Teine hüpotees – efektiivsuse sõltuvus neeldumistee pikkusest – jäi ebaselgeks, sest mõõdetud kiududes võisid olla muud segavad tegurid, mis efektiivsust mõjutasid. Edasiseks uurimiseks tuleks kasutada kiude, mille parameetrid erinevad üksnes neeldumistee pikkuses. Nii saaks hinnata täpsemalt neeldumistee pikkuse mõju efektiivsusele.

Lisaks tuli tööst tuli välja, et peeglite kasutamine on hea viis efektiivsuse tõstmiseks. Peeglite kasutamine oli suurema mõjuga väiksema diameetriga kiudude korral. Suuremate kiudude puhul oli peegli mõju väike. Peegli kasutamine on kindlasti õigustatud väiksema diameetriga kiudude korral, suuremaid kiude kasutades sõltub peegli tarvilikkus aga praktilisest rakendusest.

Käesoleva töö raames leiti, et väiksema diameetriga (0,9 mm) kiude mõjutab kattekihtide arv rohkem kui suurema diameetriga (1 mm) kiude. Nimelt väiksema diameetriga kiudude efektiivsus oli suurem kahekihilistel kiududel. Määramatust arvestades ei pruugi antud tulemus olla siiski usaldusväärne.

Selgus, et kiud A-3 ja A-4 ei ole sobivad müüontomograafias kasutamiseks. Põhjuseks nende efektiivsuse oluline langus mõõtepunkti kaugenemisel valguse tekke asukohast.



## Tänuavaldused

Autor tänab südamest juhendajaid kannatlikkuse, toetuse ja vastutulelikkuse eest. Suur aitäh ka teistele labori liikmetele, kes olid alati väga abivalmid.

## Kasutatud materjalid

- [1] R. Kaiser, „Muography: overview and future directions“, *Philos. Trans. R. Soc. Math. Phys. Eng. Sci.*, kd 377, nr 2137, lk 20180049, jaan 2019, doi: 10.1098/rsta.2018.0049.
- [2] M. Tanabashi *et al.*, „Review of Particle Physics“, *Phys. Rev. D*, kd 98, nr 3, lk 030001, aug 2018, doi: 10.1103/PhysRevD.98.030001.
- [3] K. K. Kaup, „KOSMILISE SEKUNDAARKIIRGUSE ELEKTRONIDE HAJUMISEL JA NEELDUMISEL PÕHINEVA MATERJALIDE TUVASTUSMEETODI UURIMINE SIMULATSIOONITARKVARAGA G4BEAMLINEL“.
- [4] W. Zeng, X. Pan, Z. Zeng, H. Ma, M. Zeng, ja J. Cheng, „Principle Study of Image Reconstruction Algorithms in Muon Tomography“. arXiv, 19. detsember 2019. Vaadatud: 15. mai 2022. [Online]. Available at: <http://arxiv.org/abs/1912.09120>
- [5] S. Procureur, „Muon imaging: Principles, technologies and applications“, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip.*, kd 878, lk 169–179, jaan 2018, doi: 10.1016/j.nima.2017.08.004.
- [6] L. Bonechi, R. D’Alessandro, ja A. Giammanco, „Atmospheric muons as an imaging tool“, *Rev. Phys.*, kd 5, lk 100038, nov 2020, doi: 10.1016/j.revip.2020.100038.
- [7] E. Rutherford, „LXXIX. The scattering of  $\alpha$  and  $\beta$  particles by matter and the structure of the atom“, *Lond. Edinb. Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, kd 21, nr 125, lk 669–688, mai 1911, doi: 10.1080/14786440508637080.
- [8] G. Bonomi, P. Checchia, M. D’Errico, D. Pagano, ja G. Saracino, „Applications of cosmic-ray muons“, *Prog. Part. Nucl. Phys.*, kd 112, lk 103768, mai 2020, doi: 10.1016/j.pnpnp.2020.103768.
- [9] P. Eraerds, M. Legré, A. Rochas, H. Zbinden, ja N. Gisin, „SiPM for fast Photon-Counting and Multiphoton Detection“, *Opt. Express*, kd 15, nr 22, lk 14539, 2007, doi: 10.1364/OE.15.014539.
- [10] S. Imai, S. Soramoto, K. Mochiki, T. Iguchi, ja M. Nakazawa, „New radiation detector of plastic scintillation fiber“, *Rev. Sci. Instrum.*, kd 62, nr 4, lk 1093–1097, apr 1991, doi: 10.1063/1.1142012.
- [11] „Plastic scintillating fibers (PSF) | kuraray“. <https://www.kuraray.com/products/psf> (vaadatud 25. mai 2022).

- [12] C. Whittaker, C. A. Kalnins, D. Ottaway, N. A. Spooner, ja H. Ebendorff-Heidepriem, „Transmission loss measurements of plastic scintillating optical fibres“, *Opt. Mater. Express*, kd 9, nr 1, lk 1–12, 2019.
- [13] C. Alfieri, M. W. Kenzie, C. Joram, ja A. B. Rodrigues Cavalcante, „An experimental set-up to measure Light Yield of Scintillating Fibres“, 2015.
- [14] „4. Beta Spectroscopy — Modern Lab Experiments documentation“.  
[https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern\\_lab\\_manual3/beta\\_spectroscopy.html](https://wanda.fiu.edu/boeglinw/courses/Modern_lab_manual3/beta_spectroscopy.html)  
(vaadatud 23. mai 2022).

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, \_\_\_\_\_ Henri Herm \_\_\_\_\_,

(autori nimi)

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

Plastikstintillatsioonkiudude efektiivsuse määramine ja mõõtesüsteemi

karakteriseerimine \_\_\_\_\_,

(lõputöö pealkiri)

mille juhendajad on \_\_\_\_\_ PhD Madis Kiisk \_\_\_\_\_,

(juhendaja nimi)

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, 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.

Henri Herm

27.05.2022