

TALLINNA REALKOOL

SARAH MARIA KAARE

8. KLASS

## VABADUSSÕJAS LANGENUD TALLINNA ÕPETAJATE JA ÕPILASTE MÄLESTUSSAMBA REALI POISS 3D-MUDELI DIGITAALSEL KUJUL SÄILITAMINE

JUHENDAJAD TANEL JAIRUS JA LENART KIVISTIK (TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL), ÕP ERIK MÄE

### SISSEJUHATUS

Reaali Poiss on Eesti üks tuntumaid ja olulisemaid monumente, millel on Eesti kultuuris ja ajaloos märgiline tähtsus. Ferdi Sannamehe skulptuur on püstitatud vabadussõjas langenud kooliõpilaste ja õpetajate mälestuseks ning saanud tuntuimaks Eesti vabaduse eest võidelnute mälestusmärgiks. Kahel korral aastas – Vabariigi aastapäeval ja Tartu rahu aastapäeval – kogunetakse selle monumendi juurde pidulikult tähistama eestlaste vabadust ja selle nimel toodud ohvreid. Samuti on tegu Eestit külastavate kõrgetasemeliste välisdelegatsioonide peatuskohaga, kus riigijuhtidel on tavaks panna pärg mälestamiseks ja tunnustamiseks Eesti vabadusvõitlust.

Kõigi reaalkooli õpilaste jaoks on monument koolitee üks keskse tähtsusega sümbol. Kooliteed 1. septembril alustades tehakse õpilastest foto Reaali Poisi juures ja sama foto on kõigil albumites ka tähistamiseks koolitee lõppu. Sadade õpilaste, tuhandete vilistlaste ja kõigi nende perede jaoks on see koht ja monument südames, sümboliseerides isiklikke mälestusi ja Eesti rahva vabadusvõitlust.

Tänu tehniliste võimaluste arengule on hakatud järjest rohkem igasuguseid andmeid, tekste ja ka kunstiväärtusi digitaliseerima. See võimaldab kõike jagada palju laiemale ringkonnale ning vajaduse korral on võimalik digitaliseeritud andmete alusel originaalteoseid taastada ja luua digitaalkeskondi kultuuriobjektidega tutvumiseks.

Arvestades monumendi tähtsust Reaalkooli kogukonnale ja Eesti rahvale ning nüüdisaegseid tehnoloogilisi võimalusi, tahtsin luua kujust digitaalse mudeli. Kuna Reaali Poissi on püütud mitmel korral hävitada ja seda ausammast on tulnud korduvalt taastada, siis oli soov teada saada, kuidas oleks võimalik säilitada antud monument digitaalsel kujul. Uurides erinevaid digitaliseerimise võimalusi, kujunes otsus teha Reaali Poisist digitaalne 3D-mudel.

Uurimistöö küsimused olid järgmised:

1. millised on kultuuriväärtuste populariseerimise ja tehnilise dokumenteerimise võimalused;
2. kuidas säilitada Reaali Poisi monument digitaalsel kujul;
3. kuidas monument digitaliseerida ja tulemused avaldada?

Töö jaguneb teoreetiliseks ja praktiliseks osaks.

Teoreetiline osa sisaldab ülevaadet digitaliseerimise meetoditest, kus ja kuidas saab kasutada 3D-mudeleid ja liitreaalsust, kultuurimälestiste mõõdistamisest ning kuidas käib digitaliseeritud kaju publitseerimine.

Töö praktilises osas on ülevaade tööde käigust. Sinna kuulub mõõtmise planeerimine, mõõteseadme valik ja kirjeldus ning mõõtmiste ja järeltöötamise käik, millele järgneb tulemuste avalikustamine.

## SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	1
LÜHENDID JA TERMINID .....	4
1. TEOREETILINE OSA.....	5
1.1. Ülevaade objekti digitaliseerimise protsessist.....	5
1.2. Mõõtmisseadmed .....	6
1.3. Rakendusvaldkonnad 3D-mudelitele .....	8
1.4. Digitaliseeritud mudelite publitseerimine.....	9
1.5. Kultuurimälestiste 3D-mudelite loomine ja kasutamine .....	9
1.6. Liitreaalsus ja kultuuriobjektid.....	11
2. PRAKTILINE OSA.....	12
2.1. Praktilise uurimistöö metoodika .....	12
2.2. Uurimistöö objekt: vabadussõjas langenud Tallinna õpilaste ja õpetajate mälestussammas .....	12
2.3. Digitaliseerimise seadme valik.....	16
2.4. Praktilise töö protsess .....	18
2.5. Mõõtmise planeerimine .....	18
2.6. Mõõtmine .....	19
2.7. Mõõtmistulemuste töötlemine .....	22
2.8. Publitseerimine.....	24
3. TULEMUSED .....	25
3.1. Töö väljundid .....	25
3.2. Ajakava ja töökäik .....	27
KOKKUVÕTE .....	29
KASUTATUD MATERJALID .....	31
LISA 1. Resümee.....	33
LISA 2. Abstract.....	34

## LÜHENDID JA TERMINID

2D – kahemõõtmeline ehk tasapinnaline

3D – kolmemõõtmeline ehk ruumiline

AR (ingl *augmented reality*) – liitreaalsus

fotogramm-meetria – fotode (satelliidifotode, aerofotode ja maapinnalt või selle lähedalt tehtud fotode) abil objektide asendi, mõõtmete ja kuju määramine

LIDAR (ingl *Light Detection and Ranging*) – ruumipunkti positsioneerimise meetod, mis põhineb valguse lennu aja leidmisel (ingl *time of flight*), kus objekti kaugus leitakse otseselt või kaudselt signaali edasi-tagasi liikumiseks kuluva aja põhjal. Punkt positsioneeritakse ruumis, kasutades seadme positsiooni, kaugust ja suunatud laserkiire horisontaal- ja vertikaalnurka seadme suhtes

liitreaalsus – reaalse keskkonna ja virtuaalse keskkonna kombineerimine

mesh – arvutigraafikas kasutatav andmestruktuur, mis koosneb hulknurkadest, et esitada 3D-objektide pinna kuju

OBJ – STL-i sarnane failivorming 3D-kujutiste jaoks, mis kirjeldab ka geomeetria värve

punktipilv – andmestik, mis koosneb ruumilistest punktidest, mida kasutatakse objektide ja keskkondade 3D-mudelite loomiseks

STL – (ingl *standard tessellation language*) raalprojekteerimise tarkvarale geomeetria defineerimise failivorming, mille on loonud 3D Systems Inc. Failivormingut toetavad paljud tarkvarapaketid ja see on laialt kasutatud tööstusdisaini prototüüpide loomises ning raalvalmistuses. STL-i failid kirjeldavad ainult detaili kolmemõõtmelisi tahkusi, mitte värvi, tekstuuri või teisi omadusi

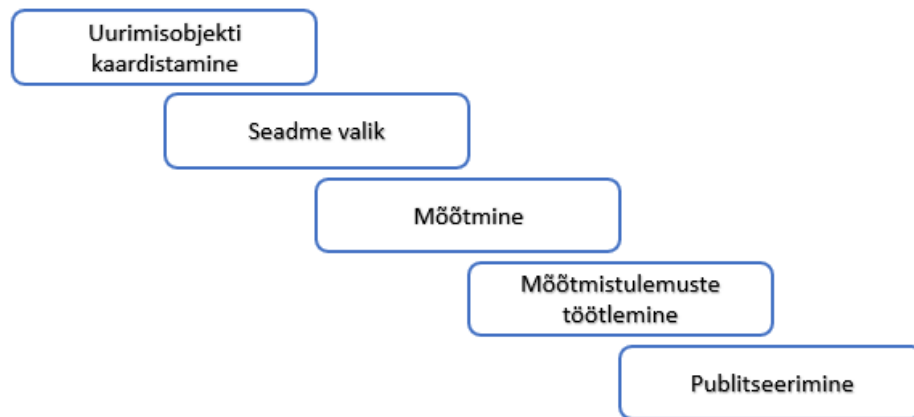
TRI – triangulatsioon ehk ruumipunkti positsioneerimise meetod, mis põhineb kolmnurkade arvutusel, kus punktide kaugus arvutatakse vastuvõtja erinevatest positsioonidest punkti tõmmatud mõtteliste sirgete abil

VR (ingl *virtual reality*) – virtuaalreaalsus

# 1. TEOREETILINE OSA

## 1.1. Ülevaade objekti digitaliseerimise protsessist

Objekti digitaliseerimine protsessi lihtsustatud kirjeldus on toodud alloleval skeemil (joonis 1). See annab hea ülevaate peamistest tegevustest, millest objekti digitaliseerimisprotsess koosneb. Digitaliseerimine algab uurimisobjekti kaardistamisega ja uurimisega, mille käigus kogutakse informatsiooni objekti geomeetria, materjali, asukoha ja eripära kohta. Lisaks objekti uurimisele selgitatakse virtuaalse mudeli tehnilised andmed ja eesmärk. Tehniliste andmete osas on olulised parameetrid punktipilve tihedus, punktide mõõtmise täpsus, värviinfo vajalikkus ja baaspindade või tähtsate detailide asukohad. Virtuaalmudeleid luuakse mitmetel eesmärkidel, nagu digitaliseerimine, pöördprojekteerimine või kvaliteedikontroll. Kogutud informatsiooni põhjal toimub seadme valik [1].

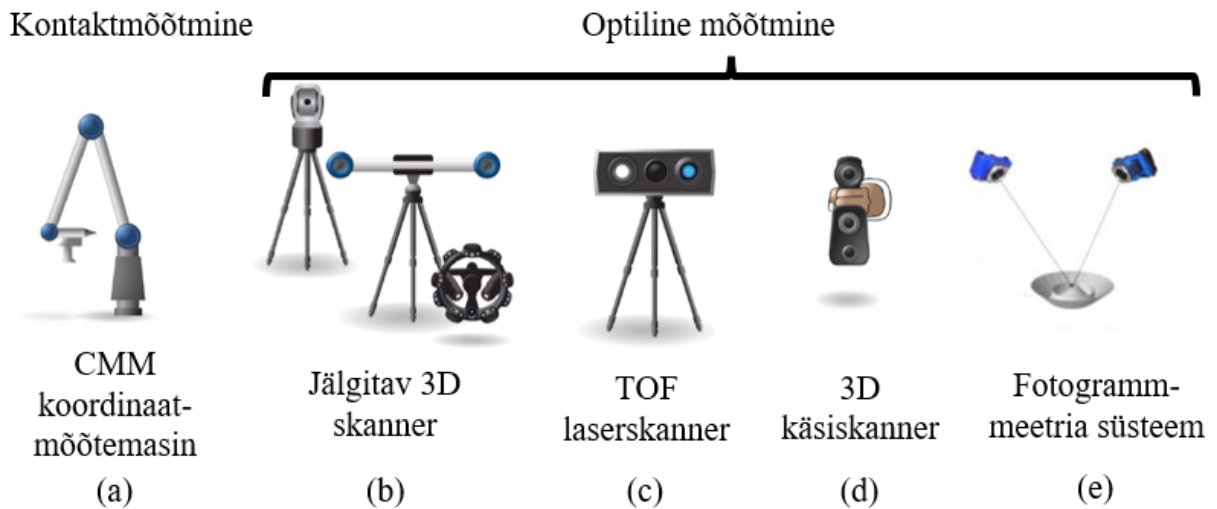


Joonis 1. Digitaliseerimise sammud

3D-möödistamiseks kasutatakse mitmesuguseid seadmeid. Vahendid ulatuvad käsitsi kasutatavatest skanneritest kuni lennukitele paigutatavate kaugseire LIDAR-i süsteemideni, mis võimaldavad jäädvustada eesmärgipäraselt nii väikseid kui ka ülisuuri objekte. Reaali Poiss on virtuaalmudeli loomise mõistes keskmise suurusega objekt, väikseks võib pidada tikutopsi ja suureks lennukisuurust objekti. On olemas ka mikroskoopskannereid, mida kasutatakse näiteks pinnakareduse uurimiseks materjaliteaduste valdkonnas, või radar, LIDAR-i seadmeid, millega kogutakse infot ülisuurte alade kohta, nagu maastikud või hooned geodeesia ja ehituse valdkonnas. Seadme valik määrab, kuidas toimub mõõtmine ja mõõtmistulemuste töötlemine, kuna seadmed töötavad erinevatel põhimõtetel ja vajavad tehnoloogiapõhist lähenemist. Siinses töös kirjeldatakse mõõtmise ja mõõtmistulemuste töötlemist täpsemalt praktilises osas, vastavalt valitud seadmele. Järgnevas peatükis on toodud ülevaade mõningatest seadmetest, mida kasutatakse väikse kuni suure objekti virtuaalmudeli loomiseks.

## 1.2. Mõõtmisseadmed

Detailide geometriat mõõdetakse kontakt- ja kontaktivaba- ehk optilise mõõtmise teel. Järgneval pildil (joonis 2) on toodud peamised mõõtesüsteemid, mida kasutatakse masinatööstuses ja tootearenduses digitaliseerimiseks, pöördprojekteerimiseks ja kvaliteedikontrolliks.



Joonis 2. Mõõdistusseadmed [2]

Kontaktmõõtmine seisneb mehaanilisel detaili ja mõõtemasina sensori kokkupuutel. Mõõtemasin leiab kokkupuute mõõtepunkti fikseeritud koordinaatsüsteemis seadme sõlmede asendi alusel. Kontaktmõõtmist tehakse koordinaatmõõtemasinal (a), mille eelis on suur täpsus ja vähesed nõuded detaili pinnale, puudus on punktide kogumise kiirus ja mõõteala piiratus mõõtekäe ulatusega. Koordinaatmõõtemasinat kasutatakse peamiselt masinatööstuses kvaliteedikontrolliks [2].

Optiline mõõtmine seisneb objektilt tuleva kiirguse signaali töötlemises. Töös uuritud seadmed jagunevad punkti positsioneerimise alusel LIDAR-i ja triangulatsiooni (TRI) meetodil põhinevaks. LIDAR-i meetodil põhinevad seadmed saadavad välja laserkiiri ja mõõdavad kiire tagasipeegeldumise aega või faasimuutust, et määrata objekti pinna kaugus ja asend. TRI meetodil salvestatakse ühe või mitme kaameraga 2D-pilte, seejärel leitakse tarkvaraliselt pildil ühised punktid ning määratakse punktide asukoht 3D-ruumis. TRI meetodit kasutavad struktureeritud valguse, markerite tuvastuse, pinna tuvastuse ning laserriba tehnoloogiad, mis mustreid projitseerides või tarkvaraliselt geometriat uurides hõlbustavad pildidelt ühiste punktide leidmist. Punktipilve punktide asukoha määramiseks on vajalik ka skaneeriva seadme positsioneerimine, mille saab liigitada skanneri jälgimise ja kogutud andmete põhiseks [3].

Laserskanner (c) töötab LIDAR-i meetodil ja skaneerib ruumi mõõtes iga punkti eraldi. Laserkiire sfääri igasse punkti suunamiseks pöörleb mõõtepea horisontaal- ja vertikaalsuunas.

Seadme positsioneerimine on kogutud andmete põhine. Üldjuhul on ruumi paigutatud spetsiaalsed markerid, mille tuvastamisega määrab seade enda positsiooni. Laserskannerite eelis on täpsus pikemate vahemaade mõõtmisel ja kiire punktide salvestuse kiirus (50–150 tuhat punkti sekundis). Näiteks suudab laserskanner mõõta täpselt 10 m vahemaad, kuid jääb hätta 10 cm mõõtmisel, kuna elektroonika ei suuda nii lühikest laserkiire lennuaega registreerida. Puuduseks on piiratud punktihedus, mis on tingitud mõõteseadme kaugusest, ja skanneri mõõteala, mis on objekti suhtes kahemõõtmeline. Objektist tervikliku kujundi saamiseks tuleb teha mitu ülesvõtet eri nurkade alt ja hiljem mudelid tarkvaraliselt liita. Laserskannerid võimaldavad saavutada väga suurt täpsust ja neid kasutatakse laialt arhitektuuris, arheoloogias ja kultuuripärandi dokumenteerimisel. Inseneerias kasutatakse laserskannereid peamiselt suurte objektide digitaliseerimises ja kvaliteedikontrollis, näiteks laevakerede mõõtmisel [2].

Fotogramm-meetria süsteem (e) kasutab TRI meetodit nii punktipilve punktide kui ka seadme positsioneerimiseks. Sageli kasutatakse mõõtmise juures ka spetsiaalseid markereid ja mõõteriba, mis parandavad mudeli kvaliteeti. Mõõteribal on kindla vahekaugusega markerid, et virtuaalses keskkonnas punktide vahelisi kaugusi dimensioneerida. Dimensioneerimine on võimalik ka vähem täpsel meetodil, näiteks kui on teada, et objekti kõrgus on 3 m. Mõõtmisel pildistatakse objekti ülekattega mitme nurga alt ja tarkvaraliselt pilte töödeldes leitakse objekti kolmemõõtmeline kujutis. Fotogramm-meetria süsteemide eelis on seadme lihtsus ja kättesaadavus. Puudus on üldjuhul madal punktihedus ja piiratud juurdepääs objekti keerulisemale geomeetriaale. Fotogramm-meetria süsteeme kasutatakse laialt objektide amatöördigitaliseerimisel, kus kvaliteet pole niivõrd oluline. Professionaalseid süsteeme kasutatakse inimese avatari loomisel ja inseneeria suunatud süsteemidele kvaliteedikontrolli tegemiseks [4], [5].

3D-käsiskannerid (d) töötavad samuti TRI meetodil nii punktipilve punktide kui ka seadme positsioneerimiseks. Enamasti on käsiskanneril kolm kaamerat, kahte kaamerat kasutatakse punktipilve punktide ja ühte kaamerat värviinfo tuvastamiseks. Seadmel on ka projektor või laserkiirgur, mis projitseerib objektile mustriise valguse (näiteks triibud või ruudustiku), mille peegeldumine jäädvustatakse kahe punktipilve tuvastava kaameraga. Käsiskanneri ruumis paremaks positsioneerimiseks ja mõõtmise hõlbustamiseks kasutatakse objekti peal markereid. Mõõtmisel suunab operaator seadme objektile ja liigub objektile seadme salvestusalaga kuni vajalikud punktid on salvestatud. Käsiskanneri eelis on mõõtepunktide salvestamise kiirus ja mõõtepunktide tihedus. Lisaks saab virtuaalse mudeli loomist jälgida mõõtmise käigus, mis võimaldab kohe vajalikud parandused teha. Eelnevate meetodite puhul nõuab paranduse tegemine uuesti ülesseadmist. Puuduseks võib pidada piiratud juurdepääsetavust kitsastes kohtadesse ja tundlikkust pinna omadustele, näiteks on käsiskanneril raske salvestada tumedaid, läikivaid ja läbipaistvaid pindu. Käsiskanner on

peamine seade masinatööstuses pöördprojekteerimisel ja digitaliseerimisel. Kvaliteedikontrolli jaoks kasutatakse käsiskannerit peamiselt pindade kuju mõõtmisel[2], [6].

Jälgitav 3D-käsiskanner (b) on samm edasi käsiskannerist, mille puhul käsiskanner positsioneeritakse ruumis jälgijaga. Käsiskannerile on lisatud markerid, mida jälgija tuvastab TRI või LIDAR-i meetodil. Jälgitava käsiskanneri peamine eelis käsiskanneri ees on see, et objektile ei ole tarvis lisada markereid. Puuduseks on kalibreerimist vajav tööala, mis välistab välitingimustes töötamise [2].

Erinevate mõõteseadmete kasutamine põhineb küll erinevatel tehnoloogiatel ja protsessidel, kuid mõõtmise ja mõõtmistulemuste töötlemise tulemusena valmib objektist üldkasutatav digitaliseeritud mudel. Järgnevates peatükkides on toodud näiteid ja kirjeldatud 3D-mudelite kasutamist.

### 1.3. Rakendusvaldkonnad 3D-mudelitele

3D-mudeleid kasutatakse mitmesugustes valdkondades, alates arhitektuurist ja inseneriteadusest kuni meelelahutuse ja hariduseni, pakkudes võimalusi objektide ja keskkondade visualiseerimiseks, mis on reaalses maailmas raskesti kättesaadavad või täiesti olematud. Arhitektuuris võimaldavad 3D-mudelid kujutada hooneid ja struktuure enne nende ehitamist, andes arhitektidele, inseneridele ja klientidele võimaluse näha, kuidas valmis projekt välja näeb ja teha vajalikke muudatusi enne ehitusprotsessi algust. Inseneriteaduses kasutatakse 3D-mudeleid keerukate masinate, seadmete ja süsteemide kujundamiseks ja testimiseks, võimaldades analüüsida komponentide vastastikust mõju ja tuvastada potentsiaalseid probleeme enne tootmise alustamist [7].

Meelelahutustööstuses on 3D-mudelid revolutsiooniliselt muutnud nii videomängude kui ka filmide maailma, pakkudes vaatajatele ja mängijatele sügavamaid ja kaasahaaravamaid kogemusi virtuaalmaailmas. Videomängudes loovad 3D-mudelid rikkalikke ja interaktiivseid keskkondi, kus mängijad saavad uurida ja tegutseda, samas kui filmides võimaldavad need luua keerukaid stseene ja tegelasi, mis oleksid traditsiooniliste meetoditega raskesti saavutatavad. Haridusvaldkonnas võimaldavad 3D-mudelid õpilastel uurida keerulisi bioloogilisi struktuure, ajaloolisi sündmuskohti ja kosmoseobjekte interaktiivsel ja kaasahaaraval viisil, suurendades õppimise efektiivsust ja huvi aine vastu [8].

Üks 3D-mudelite kasutusvaldkond on nende kujutamine pärismaailmas, kasutades selleks nutiseadmete kaameraid või spetsiaalseid prille. Selliselt täiendatud vaadet nimetatakse liitreaalsuseks (AR – *augmented reality*). Erinevalt virtuaalreaalsusest (VR – *virtual reality*) ei ole vaataja täiesti kunstlikus maailmas, vaid näeb mudeleid oma tavapärasest keskkonnast, mille peal on genereeritud tajuteave. Nii saab näiteks autojuhtidele näidata teekonna juhiseid või seadme komplekteerijale töö erinevaid etappe [8].



## 1.4. Digitaliseeritud mudelite publitseerimine

Juba loodud mudeleid on võimalik erinevate veebiplatvormide kaudu laiemale avalikkusele levitada. Üks populaarsemaid platvorme on SketchFab, mis võimaldab kasutajatel üles laadida, jagada ja uurida 3D-mudeleid veebibrauseris. See toetab mitmesuguseid failivorminguid, muutes selle sobivaks erinevate 3D-modelleerimistarkvarade ja -tehnoloogiatega loodud projektide jaoks. Sketchfabil on ka interaktiivsed funktsioonid, nagu mudeli vaatamine erinevatest nurkadest, suumimine ja detailide uurimine, mis pakuvad kasutajatele rikastatud kogemust. Lisaks on platvormil kogukonna aspekt, võimaldades kasutajatel jälgida teisi kunstnikke, koguda lemmik mudeleid ja osaleda aruteludes [9]. Avaldamisprotsess platvormidel nagu Sketchfab hõlmab tavaliselt mitut sammu [10]:

- mudeli ettevalmistamine: optimeerimine ja tekstuuride lisamine, et tagada parim võimalik kvaliteet ja jõudlus veebis;
- üleslaadimine: mudel ja kõik selle komponendid (sh tekstuurid) laaditakse platvormile;
- kirjeldamine ja märksõnad: mudelile lisatakse kirjeldus, märksõnad ja muud olulised metaandmed, et parandada selle leitavust ja kättesaadavust;
- jagamine ja levitamine: pärast mudeli avaldamist saab seda jagada sotsiaalmeedias, integreerida veebisaitidele või kasutada hariduslikel eesmärkidel.

Need platvormid pakuvad mitte ainult tehnilist infrastruktuuri 3D-mudelite veebimajutuseks ja jagamiseks, vaid loovad ka kogukondi, kus inimesed saavad jagada oma huvi ja kirge ajaloo, kultuuri ja tehnoloogia vastu. Sellisel viisil aitavad nad kaasa kultuuripärandi digitaalsele säilitamisele ja demokraatiseerimisele, muutes selle kättesaadavaks kõigile [9]. Ka Muinsuskaitseamet on avaldanud erinevate objektide 3D-kujutisi oma SketchFabi kontol [11].

## 1.5. Kultuurimälestiste 3D-mudelite loomine ja kasutamine

3D-mudelite loomine ja kasutamine kultuuripärandi talletamisel on uuenduslik lähenemine, mis võimaldab säilitada ja taasluua ajaloolisi monumente, kunstiteoseid ja arheoloogilisi leide, mida ohustavad looduslikud ja inimtegevusest tingitud kahjustused. See protsess hõlmab mitut etappi, alates digitaalsest dokumenteerimisest kuni detailsete mudelite loomiseni, mida saab uurida ja jagada kogu maailmas, pakkudes teadlastele, õpetajatele ja üldsusele juurdepääsu kultuuripärandile, ilma et peaks füüsiliselt kohal olema [12].

Esimene samm 3D-mudelite loomisel on sageli füüsiliste objektide või paikade 3D-skaneerimine, kasutades laserskaneerimise tehnoloogiat, fotogramm-meetriat või muud täppismõõtmise meetodit. Need tehnoloogiad võimaldavad jäädvustada objekti või ala pinna geomeetria ja tekstuurid suure täpsusega. Saadud andmestik, mis koosneb miljonitest

punktidest (nn punktivilv), on aluseks 3D-mudeli loomisele. Töödeldes ja ühendades neid punkte, saavad spetsialistid luua üksikasjalikke digitaalseid duplikaate, mis kajastavad objekti või paiga füüsilisi omadusi [12].

Pärast 3D-mudeli loomist saab seda kasutada mitmel viisil. Hariduses võimaldavad mudelid õpilastel ja üliõpilastel uurida ajaloolisi monumente ja kunstiteoseid interaktiivselt, andes neile võimaluse n-ö külastada kohti, mis on kaugel või ligipääsmatud. Teadustöös annavad 3D-mudelid arheoloogidele ja ajaloolastele vahendid, et analüüsida objekte ja paiku ilma originaale kahjustamata, võimaldades näiteks uurida objektide valmistamise tehnikaid või konstruktsiooni detaile, mis ei pruugi olla palja silmaga nähtavad. Lisaks aitavad need mudelid dokumenteerida ja säilitada kultuuripärandi objektide seisundit teatud ajahetkel, pakkudes tulevastele põlvedele väärtuslikku teavet [12].

Veel üks oluline kasutusala on virtuaalnäitused, mis võimaldavad kasutajatel kogu maailmas tutvuda kultuuripärandi objektidega virtuaalreaalsuse (VR) või veebipõhiste galeriide kaudu. See mitte ainult ei tee kultuuripärandit kättesaadavamaks laiemale publikule, vaid aitab ka kaasa selle säilitamisele ja tutvustamisele. Kriitilistes olukordades, kus objektid või paigad on hävinud või raskelt kahjustatud, võivad 3D-mudelid olla ainsaks vahendiks nende ajalooliste pärandite taastamiseks ja säilitamiseks tulevastele põlvedele [13].

3D-mudelite kasutamine kultuuripärandi talletamisel on viimastel aastatel leidnud mitmeid märkimisväärseid rakendusi, millest mõned on saanud rahvusvaheliselt tuntud näideteks selle tehnoloogia potentsiaali demonstreerimisel. Üks silmapaistvamaid näiteid on Palmyra, Süürias asuv ajalooline linn, mida on raskelt kahjustanud konfliktid. Rahvusvahelised meeskonnad on kasutanud 3D-skaneerimist ja fotogramm-meetriat, et dokumenteerida ja luua digitaalseid rekonstruktsioone Palmyra mitmest olulisest ehitistest ja sambast, mis on võimaldanud säilitada nende pärandit isegi pärast seda, kui füüsilised struktuurid on hävinud või kahjustada saanud [13].

Teine näide on Notre-Dame'i katedraali põleng Pariisis 2019. aastal, mille järel on digitaalsed mudelid muutunud hindamatuks vahendiks katedraali restaureerimisel. Enne õnnetust loodud üksikasjalikud 3D-mudelid, sealhulgas ajaloolase Andrew Talloni läbi viidud laser-skaneerimine, pakuvad restaureerimisprojekti jaoks olulist teavet, võimaldades täpselt taastada katedraali arhitektuurilisi detaile [14].

Veebipõhiseid virtuaalnäitusi on kasutanud ka Briti muuseum, kus huvilised saavad uurida digitaalseid koopiaid muuseumi kollektsioonist, sealhulgas Rosetta kivi ja muude ajalooliste esemete 3D-mudeleid. See võimaldab ülemaailmset ligipääsu haruldastele ja tundlikele esemetele, mida ei pruugi olla võimalik füüsiliselt eksponeerida [15].

Lisaks on Bamiyan'i oru Buddha kujud Afganistanis, mis hävitati 2001. aastal, taasloodud virtuaalses vormis tänu 3D-modelleerimisele. Kuigi originaale ei saa kunagi asendada,

pakuvad need digitaalsed rekonstruktsioonid võimalust mälestada kultuuripärandit, mis on füüsiliselt kadunud [16].

## 1.6. Liitreaalsus ja kultuuriobjektid

Liitreaalsus (AR) koos 3D-mudelitega avab uusi võimalusi ajalooliste monumentide ja kultuuripärandi esitlemiseks, tuues esile uudsed viisid, kuidas publik ajaloo suhestuda saab. AR-rakendused võimaldavad kasutajatel näha ja interakteeruda 3D-mudelitega reaalse maailma kontekstis, kasutades selleks nutitelefone, tahvelarvuteid või AR-prille. See tehnoloogia suudab elustada mineviku, kujutades ajaloolisi ehitisi, monumente või sündmusi just nende algupärasas asukohas, aga tänapäeva kontekstis [17].

Näiteks võib AR-rakendus võimaldada turistidel või kohalikel elanikel suunata oma seadme kaamera mõnele ajaloolisele varemele ja näha, kuidas see ehitist kunagi välja nägi. Kasutajad võivad näha 3D-mudelit, mis on üle kantud reaalsele maastikule, pakkudes võimalust uurida ehitist detailideni, nagu oleks see endiselt püsti. Selline kogemus mitte ainult ei rikasta kasutaja teadmisi ja arusaama ajaloost, vaid loob ka emotsionaalse sideme minevikusündmustega, muutes õppimise kaasahaaravamaks ja meeldejäavamaks [18].

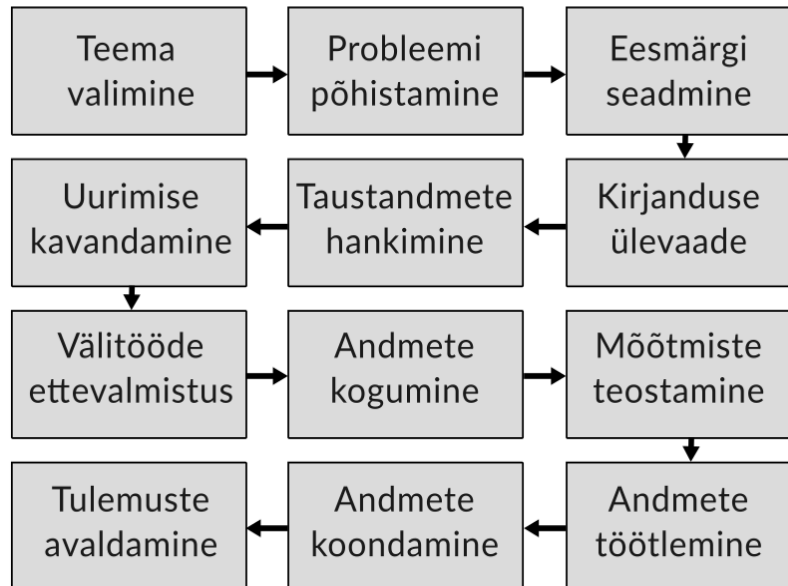
Lisaks hariduslikule väärtusele pakub AR kultuuripärandi valdkonnas praktilisi lahendusi, nagu näiteks restaureerimistöde planeerimine ja ajalooliste monumentide säilitamise strateegiate väljatöötamine. Spetsialistid saavad kasutada AR-tehnoloogiat, et visualiseerida ja hinnata erinevaid restaureerimise võimalusi reaalses keskkonnas enne, kui füüsilised tööd algavad. See võib aidata tuvastada potentsiaalseid probleeme ja optimeerida restaureerimisprotsesse, tagades parima võimaliku tulemuse ajalooliste objektide säilitamisel [17].

AR-tehnoloogia kasutamine monumentide 3D-mudelite jaoks näitab, kuidas digitaalsed uuendused võivad mõjutada meie suhet kultuuripärandiga, muutes selle kättesaadavamaks, mõistetavamaks ja nauditavamaks laiemale publikule. See mitte ainult ei aita kaasa ajaloolise teadlikkuse suurendamisele, vaid toetab ka kultuuripärandi säilitamist ja tutvustamist tulevastele põlvvedele [17].

## 2. PRAKTILINE OSA

### 2.1. Praktilise uurimistöö metoodika

Joonisel 3 on kirjeldatud praktilise uurimistöö metoodikat. Praktilise uurimistöö põhieesmärk on digitaliseerida Reaali Poisi kuju ja saada teoreetilised teadmised selle töö edukaks läbiviimiseks. Tegevused jagunevad etappidesse, kus iga samm on eelduseks järgmisele.



Joonis 3. Praktilise uurimistöö metoodika

### 2.2. Uurimistöö objekt: vabadussõjas langenud Tallinna õpilaste ja õpetajate mälestussammas

Reaali Poiss on elusuures mehe kuju Tallinna Reaalkooli kõrval. Täpne aadress on Estonia puistee 6, Tallinna linn. Kuju on välitingimustes ja statsionaarne, mis tähendab, et seda pole võimalik mõõdistamiseks kusagile mujale viia. Kuju on paigutatud umbes kahe meetri kõrgusele postamendile, mis koosneb kolmest trepiastmest ja kiviplotist. Kiviplotile on kinnitatud pronksist tähtedega tekst. Kuju on valmistatud pronksist, mille pind on enamasti sile ja tumeda värvusega. Kuju geomeetria on keeruline, sellel on väljaulatuvaid ja varjatud osi. Näiteks on varjatud kaenlaalune ja reite alune osa ning väljaulatuv on üles sirutatud käsi.



Joonis 4. Vabariigi aastapäeva tähistamine Reaali Poisi juures [19]

Mälestusmärgi (joonis 4) originaali autorid on skulptor Ferdi Sannamees ja arhitekt Anton Soans. 1948. aastal hävitasid selle Nõukogude okupatsioonivõimud. 1993. aastal taastasid skulptor Vambola Mets ja arhitekt Rein Heiduk monumendi algsete kavandite järgi [20].

Mälestussamba püstitamise mõtte algatas 1920. aastatel toonane Tallinna õpetajate selts [20]. Kuju valati pronksi Tallinnas, selleks eraldati 90 000 marka. Kujule määratud asukohas Tallinna Reaalkooli ja Estonia teatri vahelisel alal lammutati seal olnud kiviaed ning rajati trepistik. Kõigi tööde kogumaksumus oli 960 000 marka [21]. Kuju avati pühapäeval 13. novembril 1927. aastal lumistes oludes. Pühitsemistalituse viisid läbi piiskop J. Kukk ja ülempreester N. Päts. Kõnedega esinesid kaitseväge ja kaitseliidu juhid, Tallinna linnapea Anton Uesson ja teised. Kohal olid Soome ja Ungari saadikud, Tšehhoslovakkia konsul ja teiste saatkondade esindajad [22]. Siiski ei vastanud avatud monument selle autori Ferdi Sannamehe algsele ideele, mille järgi oleks pidanud olema tegu kolmest kujust koosneva kompleksiga. See plaan jäi raha puuduse tõttu täide viimata [23].



Joonis 5. Reaali Poiss ajavahemikul 1927–1941 [24]

1940. aastal, peale Eesti annekteerimist, asus võõrvõim kohalikke monumente hävitama [25]. Puutumata ei jäänud ka Reaali Poiss. Õpilaste meenutuste järgi pandi kooli ukсед lukku, et keegi ei pääseks välja monumendi ära viimist takistama. Ka akende ees olid valvurid, kes õpilasi eemal hoidsid. Sellest sündmusest on säilinud ka fotojäadvustus (joonis 6) [26]. Kujulise jäeti tol aastal hävitamata ning 1942. aastal toodi ta endisele asukohale tagasi [27]. Siiski ei olnud kujul enam pärast punavõimu naasmist pikka iga. Tagasi toodud monument võeti uuesti maha 1948. aastal ning lõigati sadamatehases tükkideks [28].





Joonis 6. Kuju teisaldamine 1940. aastal [26]

Kõigest hoolimata ei unustatud monumenti ega selle asukohta, kus toimusid isamaaliselt meelestatud kogunemised. 1989. aastal otsustati mälestusmärk taastada [27]. Aluseks võeti algupäraseid kavandid, mille vormisid metalli ja kivisse Vambola Mets ja Arseni Mölder. Pärast seda jätkas mälestusmärk teenistust vabadussõja monumendina [29]. 1995. aastal tunnustati reaalkooli kõrval asuv vabadussõja mälestussammas kultuurimälestiseks [30].



Joonis 7. Tartu rahu aastapäeva tähistamine 2019. aastal [31]

Eelneva põhjal on selge, et tegu on väga olulise objektiga, mille puhul peab ka valmiv mudel olema piisavalt hea kvaliteediga. Järgnevalt on kirjeldatud, mis nõuded mudelile on ja milliste vahenditega neid saaks täita.

### 2.3. Digitaliseerimise seadme valik

Seade valitakse lähtuvalt digitaliseerimise ülesande püstitusest. Võrdluseks on valitud nutitelefoniga piltidega fotogramm-meetria süsteem, Maa-ameti pakutatav madallennu LIDAR-i seadme punkt pilv [32] ja käsiskanner Academia 50. Ülesande püstitusena seadsin järgmised eesmärgid.

- Mudelisse peab kaasama ka varjatud osad (kaenlaalune, põlveõndlad).
- Täpsus peaks olema kuni  $\pm 3$  mm.
- Võimalusel salvestada originaalvärvus.
- Mudel peab olema terviklik või selliseks töödeldav.

Tabelis on toodud süsteemide võrdlus vastavalt autori hinnangule.

Tabel 1. Digitaliseerimise meetodite võrdlus

	Fotogramm-meetria süsteem	LIDAR-i seade	Käsiskanner
Täpsus	Keskmine	Madal	Kõrge
Punktihedus	Keskmine	Madal	Kõrge
Värvus	Olemas	Olemas	Olemas
Mõõtmise keerukus	Keskmine	Mõõtmistulemused avalikult kättesaadavad	Keskmine
Mudeli terviklikkus	Keskmine	Olematu	Kõrge
Järeltöötamise maht	Keskmine	-	Keskmine

Mõõtmise seadmeks valiti Academia 50 seade, kuna see on mõeldud väikeste kuni keskmise suurusega objektide mõõdistamiseks. Fotogramm-meetria kasutamine oleks nõudnud ka pilte mitme meetri kõrguselt kuju kohalt. Maa-ameti kaugseire LIDAR-i seadme punkt pilv osutus kontrollimisel liiga hõredaks, nii et kuju detaile polnud võimalik eristada. Käsiskanner osutus pea kõikides punktides sobivamaks lahenduseks, kuna võimaldas saada täpset ja suure punktihedusega kujutist terve mudelist korraga. Tegu oli ka ainsa võimalusega saada kujutis kohtadest, mis on kuju teiste osadega varjatud.



Creaform Academia 50 on kaasaskantav 3D-skanner, mis on loodud spetsiaalselt hariduslikel eesmärkidel, pakkudes õpetajatele ja õpilastele kättesaadavat täpset viisi reaalse objektide digitaliseerimiseks. See seade kasutab Creaformi välja töötatud arenenud optilist tehnoloogiat, et skaneerida erinevaid objekte, luues täpsed 3D-mudelid. Academia 50 on suunatud peamiselt koolidele, ülikoolidele ja teadusasutustele, pakkudes neile võimalust integreerida nüüdisaegset 3D-skaneerimise tehnoloogiat õppekavadesse, mis hõlmavad inseneriteadust, disaini, kunsti ja muud. Seade on disainitud lihtsasti kasutatavaks, pakkudes kiiret andmetöötlust ja paindlikkust erinevate objektide ja materjalide skaneerimisel, ilma et oleks vaja keerulist ettevalmistust või spetsiaalset taustvalgustust. Seadet on kujutatud joonisel 8.



Joonis 8. Mõõteseadme Academia 50 transpordikohvr

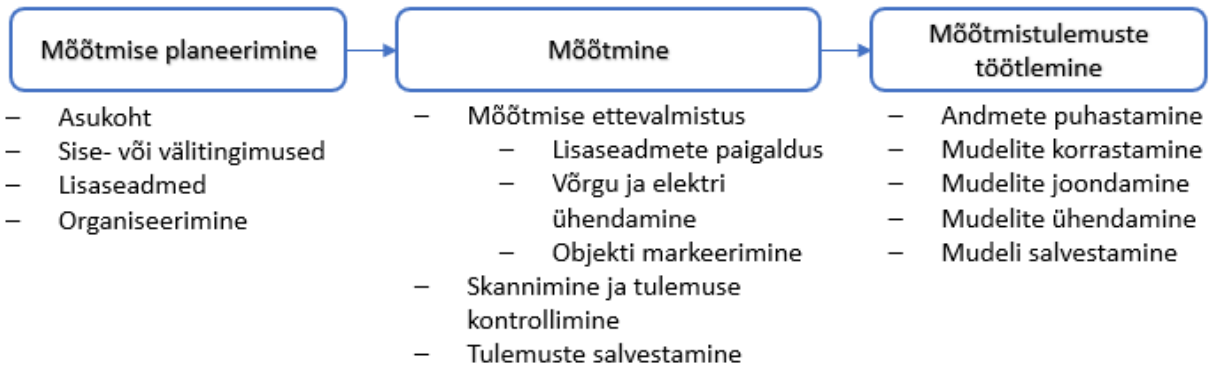
Tehnilise dokumentatsiooni järgi [33] on seadmel võimekus, mis on toodud tabelis 2.

Tabel 2. Mõõteseadme Academia 50 tehnilised parameetrid

Objekti suurus	0,3–3,0 m
Täpsus	Kuni 0,250 mm
Võrgu resolutsioon	0,500 mm
Mõõtmise resolutsioon	0,250 mm
Mõõtmiste sagedus	550 000 mõõtmist/s
Ruumiline täpsus (osa suuruse põhjal)	0,500 mm/m
Skaneerimisala	380 × 380 mm
Töökaugus	400 mm
Sügavusulatus	250 mm

## 2.4. Praktilise töö protsess

Töö praktilise osa planeerimist kujutab joonis 9.



Joonis 9. Mõõtetevuse käik

Mõõtmise planeerimine kestis mitu kuud ning sellesse protsessi oli kaasatud mitu osapoolt. Juhendajad aitasid mõõtmise tehnilise poole ettevalmistusega, reaalkool toetas mõõtmise üldise korraldusega, sealhulgas redelite ja elektrivarustusega.

Mõõtmine toimus kahel päeval novembrikuus, esimesel päeval takistas mõõtmist lumesadu, teisel päeval olid ilmaolud paremad ning mõõtmine õnnestus lõpule viia. Kui kogu kuju oli skaneeritud, oli vaja tulemused korrektselt salvestada. Pärast tulemuste kontrollimist oli vaja kujult eemaldada markerid, viia tööplatsilt ära platvorm, redelid, laud, lisaseadmed ning veenduda, et monumendi ümbrus oleks korras.

Mõõtmistulemuste töötlemine kestis umbes üks kuu.

## 2.5. Mõõtmise planeerimine

Mõõtmiseks saadi luba reaalkooli juhtkonnalt ja mõõtmise päev lepitati kokku kooli ning juhendajatega. Välitööde kavandamisel tuli arvestada mitme asjaoluga. Kasutatav seade seadis nõuded mõõtmise ilmingimustele. Arvestades monumendi asukohta (välitingimused) tuli mõelda, milliseid lisaseadmeid on mõõtmisprotsessis vaja. Kuna kuju asetses üle kahe meetri kõrguse aluse peal, siis oli mõõtmiseks vaja monumendi kõrvale paigaldada platvormid ja redelid. Platvormi ja redelite valimiseks hinnati kuju kõrguseks 4m. Seda kõrgust võrreldi Maa-ameti LIDAR-i andmetega: Maa-ameti LIDAR-i andmete järgi (joonis 10) on kuju kõrgeim punkt 16,62 meetrit merepinnast, kuju ümbritsev pind 13,15 m, ehk siis kuju kõrgus koos alusega 3,47 meetrit. See tähendas, et tööplatvormi kõrgus pidi olema kuni 2 m. Lisaks oli vaja paigaldada mõõtmise ajaks töövahendite (arvuti) jaoks laud.



Joonis 10. Monumendi madalaima ja kõrgeima punkti andmed Maa-ameti LIDAR-i punkt pilves

## 2.6. Mõõtmine

Mõõtmise päeval paigaldati kuju ümber vajalikud platvormid ja redelid (joonis 11). Mõõtmisseade ja arvuti vajasis kohapeal elektritoidet, mis toodi koolimajast monumendini pikendusjuhtmetega.



Joonis 11. Mõõtmise ettevalmistus, redelite paigutamine

Seejärel tuli töövalmis seada ja vooluvõrguga pikendusjuhtmete abil ühendada mõõtmiseks vajalikud seadmed: sülearvuti, ruuter, skanner. Enne skaneerimist tuli kuju ka puhastada. Puhtale kujule sai paigaldada markerid (joonis 12), mis tagas täpsema mõõtmise.





Joonis 12. Markerite paigaldamine kaju ülemisele osale

Markerid on väikesed paberist kettad, mis kleebitakse ühetaoliste pindade peale. Nii positioneerib skanner ennast paremini ja tööprotsess on kiirem. Markerid paigutatakse sammuga 10 kuni 20 sentimeetrit. Markeritega kaetud kaju detaili lähivaade on järgmisel joonisel (joonis 13).



Joonis 13. Markerid paigutatud kuju jalale ja alusele

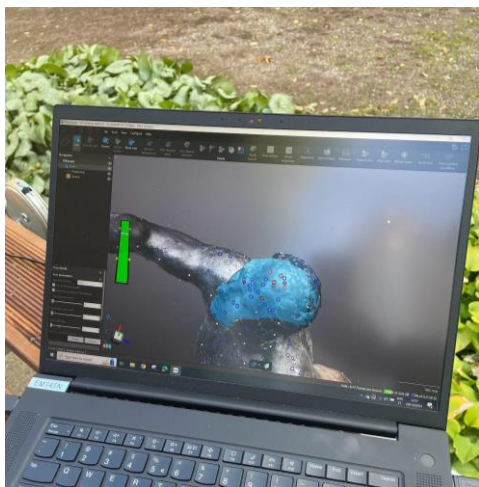
Niimoodi ettevalmistatud kuju sai hakata skaneerima. Selleks tuleb käsiseadet liigutada ühtlase kiirusega ning hoida seda ettenähtud kaugusel mõõdistatavast objektist. Seda protsessi illustreerib joonis 14.



Joonis 14. Mõõtmine Academia 50 seadmega

Seda, kas skaneerimine toimub korrektselt, näitab seade punase tulega. See süttib, kui skanner on mõõdistatavale objektile liiga lähedal või sellest liiga kaugel. Sellisel juhul tuleb

jälgida, kas viimased punktid on salvestatud õigesti. Seade salvestab mõõtmise käigus objekti ruumikuju koos värviga. See tähendab, et juba skaneerimise käigus moodustub mudel, mida on võimalik kohe ka vaadata Creafom tarkvaras VXelements versioon 11 (joonis 15). Nii saab näha, kas objekt on salvestunud õigesti või on tekkinud mingi tõrge.



Joonis 15. Mõõdistuse käigus tekkinud kujutis sülearvuti ekraanil

Skaneerimise käigus võib juhtuda, et objekti jooksvalt kokku panemine läheb valesti (joonis 16). Siis saab viimased kaadrid ära kustutada, et viga ei jõuaks lõppmudelisse. Teine variant on järeltöötuses niimoodi tekkinud lisapunktid kustutada.



Joonis 16. Kindelpunkti nihkumise tõttu on kujul käe asukoht vale

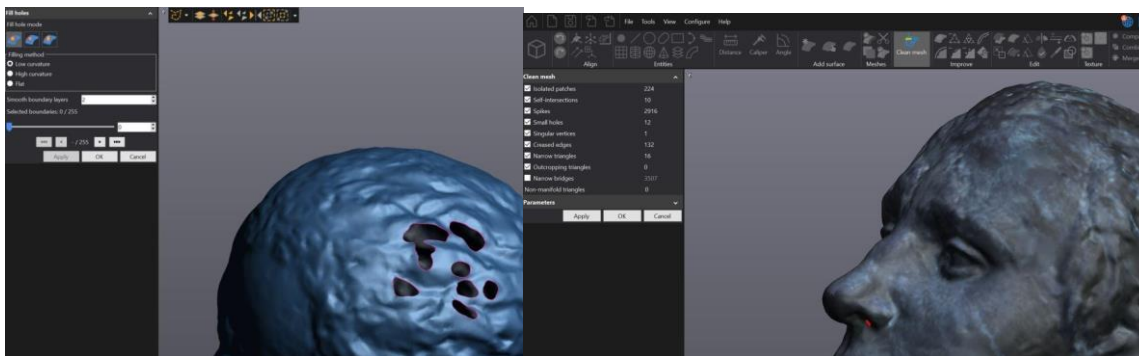
## 2.7. Mõõtmistulemuste töötlemine

Välitöö ajal saab ekraanilt jälgida, kuidas kuju mudel moodustub. Selle järgi saab vaadata, millised kohad tuleb veel üle käia. Kui mudel paistab pildi peal valmis, siis ei ole sellega töö veel lõppenud. Algne mudel on väga suur, kuna sisaldab kõiki kaamerateega jäädvustatud kaadreid. Nii suudavad seda kuvada ainult väga võimsad arvutid, aga eesmärk on saada



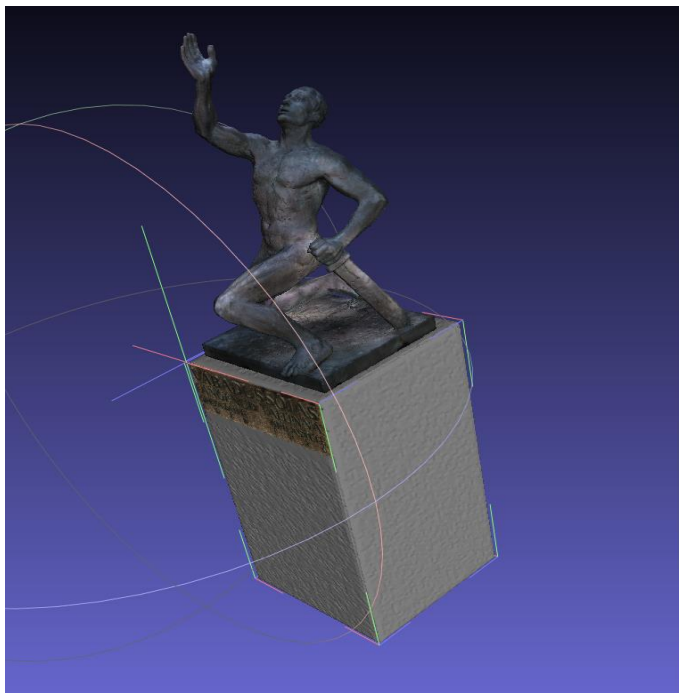
model sellisele kujule, mida saaksid kõik vaadata. Samuti tuleb hoolitseda selle eest, et mudelis ei oleks auke või iseendaga ristuvaid pindu. Selliste asjade olemasolul ei ole võimalik mudelit 3D-printimiseks kasutada.

Spetsiaalne tarkvara näitab ära, kus ja kui palju mudelis vigu on. Näiteks võivad olla väikesed augud või üksikud punktid pinnast eemal. Need probleemid saab automaatselt eemaldada. Juhul kui mudelil on suuremaid probleeme – nagu eelnevalt näidatud kahekordne käsi – tuleb need käsitsi välja lõigata või täis joonestada.



Joonis 17. Ekraanitõmmised mudeli puhastamise protsessist

Kuna kuu alus on oma olemuselt ühtlase kujuga graniitplokk, ei olnud mõistlik seda täies ulatuses üle skaneerida. Seetõttu on täppismõõdistatud ainult kivi esiküljel olev tekst ja ülejäänud on modelleeritud vastavalt mõõtudele. Aluse tekstuur on võetud mõõdistamise ajal tehtud fotolt.



Joonis 18. Kuu ja postamendi ühendatud mudel enne tekstuuri lisamist

## 2.8. Publitseerimine

Kuna mudel oli andmemahult suur, siis tuli mõelda, kuidas see avalikkusele kättesaadavaks teha. Valmis 3D-mudeli laadisin üles Sketchfab keskkonda, tekitasin lühilingi ja QR-koodi.

Sain koolilt loa töö esitamiseks reaalkooli kodulehel. 10. novembril 2023. aastal andsin failid koolile üle ning Reaali Poisi sünnipäeval 13. novembril muutus 3D-mudeli link kooli kodulehel avalikuks.

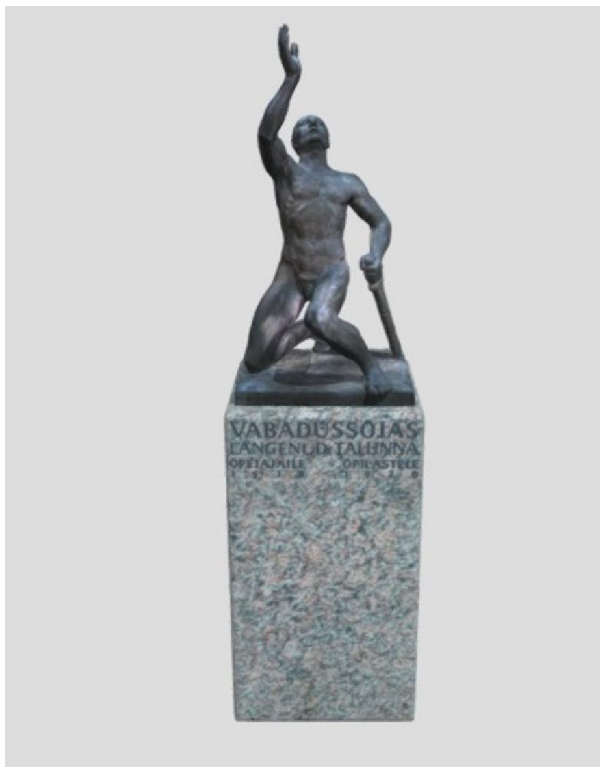
Liitreaalsuse rakenduste jagamiseks kasutatakse väga tihti QR-koode. Need paigutatakse objektiga seotud piirkonna lähedale, et kõik huvilised saaksid oma seadmetes mudeleid vaadata. Avasin lehe <https://.goqr.me/> ja kopeerisin lingi aadressi vastavasse tekstikasti.



### 3. TULEMUSED

#### 3.1. Töö väljundid

Töö tulemusena valmis Reaali Poisist värviline kolmemõõtmeline kujutis, mida teisendasin mitmesse formaati. Selleks, et kuju oleks võimalik kõigil huvilistel vaadata, laadisin selle üles SketchFab keskkonda OBJ-formaadis.

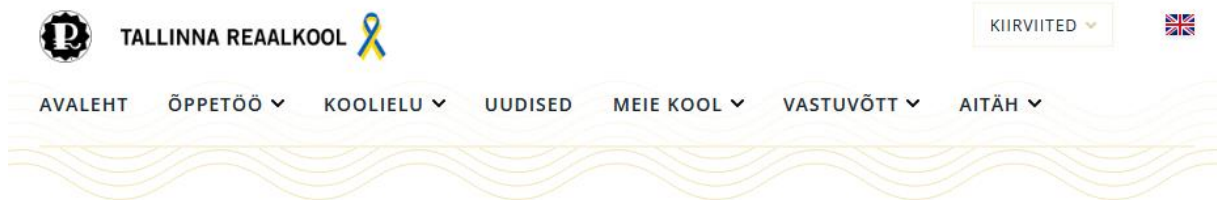


Joonis 19. Kujutise kuvatõmmis SketchFab keskkonnas koos vastava ruutkoodiga

Automaatselt tekkinud aadress oli väga pikk ja kohmakas ning seda on ebamugav jagada muul kujul kui klõpsatava lingina. Seetõttu lõin ka vastava ruutkoodi, mis suunab SketchFabi keskkonnas õigesse kohta. Lisaks teisendasin kuju ka STL-i formaati, et seda oleks võimalik 3D-printida.

Töö avalikustamisest rääkisin kooli IT-juhiga. Kokku sai lepitud, et mudel võiks minna kooli kodulehele üles Reaali Poisi sünnipäeval 13. novembril. Avaldamine oli vaja kooskõlastada ka kooli direktori ja õppealajuhatajaga.

Sümboolselt päeval, mil tähistati Reaali Poisi sünnipäeva (13.11.2023), ilmus uudis (joonis 20) mudeli valmimisest reaalkooli kodulehel ning alates sellest ajast on Reaali Poisi 3D-mudel reaalkooli kodulehel kõigile huvilistele leitav (joonis 21). Objekti avaldamine pälvis kajastust kooli uudistes ja sai laia kajastuse erinevates sotsiaalmeediakanalites. Monumendi digitaliseerimisest on valmimas ka populaarteaduslik artikkel.



## Reaali Poisi 3D kujutis

💡 ÕPILASTEGEVUS | 12.11.2023

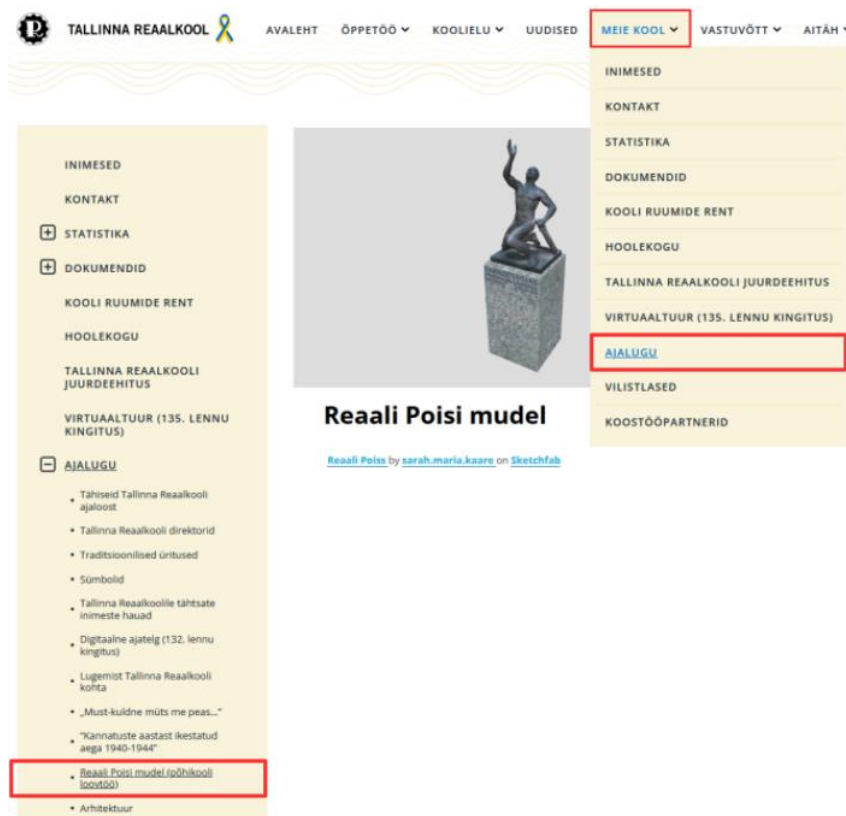
Täna, 13. novembril on Reaali Poisi sünnipäev. Sellel monumendil on oluline tähtsus Eesti rahva vabadusvõitluse loos ja eriline koht kõigi Reaalkooli õpilaste ja vilistlaste elus ja mälestustes.

Tänasest on võimalik kooli kodulehel leida Reaali Poisi 3D kujutis, mille tegi oma põhikooli loovtöök 8. klassi õpilane Sarah Maria Kaare. Teda juhendasid Lenart Kivistik ja Tanel Jairus Tallinna Tehnikaülikoolist, Reaalkooli poolt oli abiks töö teostamisel õpetaja Erik Mäe. Sarah soovis loovtöök teha midagi, millel on praktiline väärtus koolile ja samas soovis õppida uusi ja innovaatilisi tehnoloogilisi lahendusi. Ideed toetas ja aitas formuleerida eelmisel aastal õpetaja Marge Kanne.



Reaali Poisi 3D kujutist näed [siit](#).

### Joonis 20. Mudeli avalikustamine Tallinna Reaalkooli kodulehel



### Joonis 21. Avalikustatud mudel Tallinna Reaalkooli kodulehel

Töö praktiliste väljundite katsetamiseks tehti mõõtmiste andmefailide kasutades Reaali Poisist 3D-prinditud mudelid metallist ja plastikust ning prooviti ka uuenduslikku 3D-vedelikuprinteri kasutamist. Tulevikus tahaksin uurida võimalusi luua veelgi täpsem skaneering, mis annab võimaluse saada kuju taastamisel reaalsuuruses koopia.

### **3.2. Ajakava ja töökäik**

Uurimistöö tegevuste planeerimine algas maikuus 2023 eesmärgiga avaldada kuju novembrikuus, kui tähistatakse monumendi sünnipäeva. Tegevuste planeerimise juures tuli planeerida juhendajatega sobivate aegade võimalused ja saada koolilt luba mõõtmisteks (Tabel 3). Ajagraafikule tuli koostada ka varuplaan juhuks, kui ilmastikutingimused ei võimalda mõõtmist läbi viia.

Töö käigus sain teada, kuidas toimub ühe skulptuuri digitaliseerimisprotsess. Ma õppisin skaneerimist Academia 50 käsiskanneriga, mudeli järeltöötlemist mitme tarkvaraga ja seda, kuidas lisada kujule alus, mida ma töö käigus ei skaneerinud. Õppisin QR-koodide loomist, erinevaid digitaliseerimise meetodeid ja seadmeid, virtuaal- ja liitreaalsuse võimalusi, kuidas parandada mõõtmisel tekkinud vigu ning kuidas planeerida tööprotsessi ja vormistada uurimistööd.

Tabel 3. Töö ajakava

<b>Tegevuse aeg</b>	<b>Tegevus</b>
Mai 2023	Töö planeerimine: idee genereerimine, väljapakkumine ja põhjendamine õpetajale, kaasuse valideerimine, juhendajate otsimine ja esialgsed kokkulepped
September 2023	Aerofotode ja olemasoleva punktipilve analüüs: monumendi kõrgus, vajalike töövahendite valik, sobivuse hindamine, kättesaadavus
September 2023	Sobiliku mõõdistusseadme valik
Oktoober 2023	Mõõtmiste ajagraafiku kooskõlastamine kooliga, vajalike töövahendite broneerimine
Oktoober 2023	Ajagraafiku kokkulepe seadme omanikuga ja juhendajaga
Oktoober 2023	Redelite võrdlemine, ilmateate vaatamine, kuju olmeprahist ja tolmust puhastamine
19. ja 20. oktoober 2023	Objekti skaneerimine: markerite panemine, vigade parandus
November 2023	Punktipilve puhastamine ja kujule aluse lisamine
10. november 2023	Mudeli publitseerimine Sketchfab keskkonnas
10. november 2023	Kooli IT-juhiga kuju kodulehele ülespanemise kokkuleppimine, faili edastamine
13. november 2023	Digitaliseeritud algmaterjali üleandmine koolile
13. november 2023	Kuju 3D-kujutise avalikustamine kooli kodulehel Reaali Poisi sünnipäeva hommikul
21. november 2023	Esitluse vormistamine ja kaitsmine koolis komisjonile

## KOKKUVÕTE

Minu praktilise uurimistöö eesmärk oli luua Tallinna Reaalkoolile vabadussõjas langenud Tallinna õpetajate ja õpilaste mälestussamba digitaalne 3D-mudel. Töö käigus uurisin, millised on digitaliseerimise võimalused ning praktilised rakendusvaldkonnad.

Vabadussõjas langenud Tallinna õpilaste ja õpetajate monument on Eesti üks tuntumaid ja olulisemaid monumente, millel on Eesti kultuuris ja ajaloos väga suur tähtsus, sümboliseerides isiklike mälestusi ja eesti rahva vabadusvõitlust. Reaalkooli õpilaste jaoks on Reaali Poiss koolitee üks keskse tähtsusega sümbol.

Tänu tehniliste võimaluste arengule on hakatud järjest rohkem andmeid, tekste ja ka kunstiväärtusi digitaliseerima. Uued digitaalsed tehnoloogiad loovad võimalusi säilitada nende ajaloolist ja kultuurilist väärtust virtuaalsel kujul, võimaldades laiemale publikule juurdepääsu olulistele mälestistele, taiestele ja ürikutele ning liitreaalsuse rakenduste kaudu nende tuntust suurendada.

Täiendavalt võimaldavad 3D-printimine ja liitreaalsuse lahendused digitaliseeritud mudelit rakendada ulatuslikult erinevates valdkondades ja rakendustes. Juba loodud mudelit saab kasutada näiteks filmides või arvutimängudes, samuti füüsiliste makettide ehitamisel. Vajaduse korral on võimalik digitaliseeritud andmete alusel originaalteoseid ka taastada.

Töö käigus sain teada, kuidas toimub ühe skulptuuri digitaliseerimisprotsess. Kuna kuju asub välitingimustes oli mõõtmise planeerimine eriti tähtis. See hõlmas loa saamist Tallinna Reaalkooli juhtkonnalt, mõõtmiseks sobiva aja leidmist, ilmastikutingimustega arvestamist ja vajalike töövahendite ettevalmistamist.

Kuju mõõtmiseks kasutasin käsiskannerit Academia 50, mis võimaldas täpselt jäädvustada kuju geomeetria ja tekstuurid. Mõõtmise käigus paigaldasid skulptuurile markerid, mis aitasid tagada mõõtmise täpsuse ja hõlbustasid skaneerimisprotsessi. Pärast mõõtmist järgnes tulemuste töötlemine, kus kasutasin spetsiaalset tarkvara, et korrigeerida vigu, eemaldada üleliigsed punktid ja optimeerida mudelit, et see oleks kvaliteetne ja realistlik.

Töö tulemusena valmis Reaali Poisist värviline kolmemõõtmeline kujutis, mida teisendasin mitmesse vormingusse. Selleks, et kuju oleks võimalik kõigil huvilistel vaadata, laadisin selle üles SketchFab keskkonda OBJ-formaadis. Lisaks tegin QR-koodid, mis võimaldavad huvilistel mudelit hõlpsasti vaadata oma mobiilseadmetes. Reaali Poisi 3D-mudel on alates 13.11.2023 vaadatav reaalkooli kodulehel ning mudel on kasutatav erinevateks rakendusteks. Tulevikus on võimalik teha veelgi täpsem skaneering, mis annab võimaluse kuju taastada originaalkujul ja virtuaalkeskkonnas jagada veel suurema täpsusega kujutist.

Valminud digitaalne mudel tagab skulptuuri säilimise tulevastele põlvetele ja muudab selle ka kättesaadavaks, pakkudes uusi kasutusvõimalusi. Töö näitab, kuidas nüüdisaegset

tehnoloogiat saab edukalt rakendada kultuuripärandi digitaliseerimisel, avardades meie võimalusi ajalooliste ja kultuuriliste objektide tutvustamiseks ja väärtustamiseks.

## KASUTATUD MATERJALID

- [1] 3D Digitization A Complete Guide. SelfCAD. Kättesaadav: <https://www.selfcad.com/blog/3d-digitization-a-complete-guide> (15.02.2024).
- [2] Creaform Inc 2018. ACADEMIA 3D SCANNING.
- [3] L. Kivistik 2021. Kujupindade tuvastamise kontseptsioon. Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [4] R. Juhkam 2021. Fotogramm-meetria rakendamine Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži linnaku 3d-modelleerimiseks, diplomitöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [5] What is Photogrammetry? – Geodetic Systems, Inc. Kättesaadav: <https://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry/> (15.02.2024).
- [6] Ruul, Kristi 2019. TRIMBLE CX LASERSKANNERI EFEKTIIVSUSE JA TÄPSUSE ANALÜÜS. Bakalaureusetöö, Eesti Maaülikool, Tartu.
- [7] L. Elmi 2014. Fassaadide võrdlev mõõdistus tahhümeetria, maapealse fotogramm-meetria ja laserskaneerimisega. Magistritöö, Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn.
- [8] Nextech3D.ai. The Evolution and Impact of 3D Modeling in Gaming Industry. Kättesaadav: <https://www.nextechar.com/blog/3d-modeling-in-gaming-industry> (15.02.2024).
- [9] C. Hung. Top 10 Free 3D Model Websites: Creating a Digital Oasis. VIVERSE. Kättesaadav: <https://www.news.viverse.com/post/creating-a-digital-oasis-the-top-10-free-3d-model-websites> (15.02.2024).
- [10] Getting Started with Sketchfab. Sketchfab Help Center. Kättesaadav: <https://help.sketchfab.com/hc/en-us/articles/203994889-Getting-Started-with-Sketchfab> (15.02.2024).
- [11] Muinsuskaitseamet. Sketchfab. Kättesaadav: <https://sketchfab.com/muinsuskaitseamet> (15.02.2024).
- [12] Global Digital Heritage. Kättesaadav: <https://globaldigitalheritage.org/> (15.02.2024).
- [13] Open Heritage. Google Arts & Culture. Kättesaadav: <https://artsandculture.google.com/project/openheritage> (15.02.2024).
- [14] Rebâtir Notre-Dame de Paris - Accueil. Kättesaadav: <https://rebatirnotredamedeparis.fr/en> (15.02.2024).
- [15] How to explore the British Museum from home | British Museum. Kättesaadav: <https://www.britishmuseum.org/blog/how-explore-british-museum-home> (15.02.2024).
- [16] A. Gruen, F. Remondino, ja L. Zhang 2024. Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The Photogrammetric Record*, kd 19, lk 177–199. doi: 10.1111/j.0031-868X.2004.00278.x.
- [17] R. P. Reality, Augmented Reality in Tourism and Travel. Rock Paper Reality. Kättesaadav: <https://rockpaperreality.com/insights/ar-use-cases/augmented-reality-in-tourism-and-travel/> (15.02.2024).
- [18] Sam. Ten popular AR Travel Apps That You Can't Miss. ZealAR. Kättesaadav: <https://zealar.com.au/ten-popular-ar-travel-apps-that-you-cant-miss/> (15.02.2024).
- [19] Traditsioonilised üritused. Reaalkool. Kättesaadav: <https://real.edu.ee/koolielu/traditsioonilised-uritud/> (15.02.2024).
- [20] 90-aastane Reaali poiss – ajaloomälu kandja. *Õpetajate Leht*. Kättesaadav: <https://opleht.ee/2018/03/90-aastane-reaali-poiss-ajaloomalu-kandja/> (15.02.2024).
- [21] Õpetajate ja õpilaste mälestussammas, *Kaja*, 08.09.1927.
- [22] Noorte kangelaste mälestus elab, *Päewaleht*, 15.11.1927.

- [23] Üks poolelijäänud kunsteos, *Uus Eesti*, 12.1938.
- [24] ERA.4996.1.379.3. Kättesaadav: [https://www.ra.ee/fotis/index.php/et/photo/view?id=386229&\\_xr=65c616a6a3b17](https://www.ra.ee/fotis/index.php/et/photo/view?id=386229&_xr=65c616a6a3b17) (15.02.2024).
- [25] Eestlaste monumente hävitasid okupandid kivipurustajaga ja raamatuid kirvega. *Eesti Ekspress*. Kättesaadav: <https://ekspress.delfi.ee/artikkel/120100744/eestlaste-monumente-havitasid-okupandid-kivipurustajaga-ja-raamatuid-kirvega> (02.10.2023).
- [26] Kui hävitati Eesti vabaduse sümboleid. *Eesti Post = Estonian Post : Estonian Newspaper*, 20.02.1948.
- [27] Kauts, Andres ja Orloff, Brett 2000. Huvitavat Reaalkooli ajaloo. *Reaali Poiss : Tallinna Reaalkooli häälekandja*, 01.04.2000.
- [28] Millest juttu. 03.1954.
- [29] Kuidas 'Reaali poiss' punavõimu kiusu üle elas. *Õhtuleht*. Kättesaadav: <https://www.oh tuleht.ee/naine/596169/kuidas-reaali-poiss-punavoimu-kiusu-ule-elas> (15.02.2024).
- [30] 1075 Vabadussõja mälestussammas • Mälestiste otsing • Mälestised. Kättesaadav: <https://register.muinas.ee/public.php?menuID=monument&action=view&id=1075> (15.02.2024).
- [31] ERR. Tartu rahu aastapäeval sai Reaali Poisi monument taas pärja. *ERR*. Kättesaadav: <https://www.err.ee/906937/tartu-rahuaastapaeval-sai-reaali-poisi-monument-taas-parja> (15.02.2024).
- [32] Maa-amet. Aerolaserskaneerimise kõrguspunktid. Kättesaadav: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimis-e-korguspunktid-p499.html> (16.02.2024).
- [33] Creaform Academia 50 - 3D Scanner - Emco Group UK. Kättesaadav: <https://emco.co.uk/creaform-academia-50-3d-scanner/> (15.02.2024).



## LISA 1. Resümee

### Vabadussõjas langenud Tallinna õpetajate ja õpilaste mälestussamba Reaali Poiss 3D digitaalsel kujul säilitamine

Praktiline uurimistöö

Sarah Maria Kaare 8. klass

Tallinna Reaalkool

Juhendajad: Tanel Jairus, Lenart Kivistik

ja õp Erik Mäe

Minu praktilise uurimistöö eesmärgiks oli luua Tallinna Reaalkoolile vabadussõjas langenud Tallinna õpetajate ja õpilaste mälestussamba digitaalne 3D-mudel. Töö käigus uurida, millised on digitaliseerimise võimalused ning praktilised rakendusvaldkonnad.

Reaali Poiss on Eesti üks tuntumaid ja olulisemaid monumente, millel on Eesti kultuuris ja ajaloo väga oluline tähtsus, sümboliseerides isiklike mälestusi ja Eesti rahva vabadusvõitlust. Reaalkooli õpilaste jaoks on vabadussõjas langenud Tallinna õpilaste ja õpetajate monument koolitee üks keskse tähtsusega sümbol.

Tehnoloogia areng on loonud võimalused digitaliseerida järjest rohkem andmeid, teksti ja ka ajaloolisi kunstiväärtusi. Selle tulemusena jõuavad varem ainult kitsale ringile kättesaadavad teosed ja teadmised kõigi soovijateni. Vajaduse korral on võimalik digitaliseeritud andmete alusel originaalteoseid ka taastada ja läbi liitreaalsuse rakenduste nende tuntust suurendada.

Töö käigus sain teada, kuidas toimub ühe skulptuuri digitaliseerimisprotsess. Kuju mõõtmiseks kasutasin käsiskannerit Academia 50, mis võimaldas täpselt jäädvustada kaju geomeetria ja tekstuuri. Pärast mõõtmist järgnes tulemuste töötlemine, kus kasutasin spetsiaalset tarkvara, et korrigeerida vigu, eemaldada üleliigsed punktid ja optimeerida mudelit, et see oleks kvaliteetne ja realistlik.

Töö tulemusena valmis Reaali Poisist värviline kolmemõõtmeline kujutis. Selleks, et kaju oleks võimalik kõigil huvilistel vaadata, laadisin selle üles SketchFab keskkonda. Reaali Poisi 3D-mudel on alates 13.11.2023.a vaadatav Reaalkooli kodulehel ning mudel kasutatav erinevateks rakendusteks.

Tulevikus on võimalik teha veelgi täpsem skaneering, mis annab võimaluse saada kaju taastamisel elu suuruses täpsem koopia.

## LISA 2. Abstract

### **3D digital form preservation of “Reaali Poiss” - the memorial to Tallinn's teachers and students fallen in the War of Independence**

The aim of my work was to create a digital 3D model of the memorial for teachers and students of Tallinn who fell in the War of Independence, for Tallinn Secondary School of Science. The study explored the possibilities of digitization and its practical applications.

Reaali Poiss is one of the best-known and most important monuments in Estonia, which has a very important importance in Estonian culture and history, symbolizing personal memories and the freedom struggle of the Estonian people. For students of the Secondary School of Science, the monument to the teachers and students of Tallinn who fell in the War of Independence is a symbol of central importance on their school journey.

Technological advancements have created opportunities to digitize increasingly more data, text, and even historical art values. As a result, works and knowledge previously accessible to only a narrow circle are reaching all interested parties. If necessary, original works can be restored based on digitized data, and their popularity can be increased through augmented reality applications.

During the work, I learned how the digitization process of one sculpture takes place. I used an Academia 50 handheld scanner to measure the shape, which allowed me to accurately capture the geometry and textures of the shape. After the measurement, the results were processed, where I used special software to correct errors, remove redundant points and optimize the model to make it high-quality and realistic.

As a result of the work, a colorful three-dimensional image of "Reaali poiss" was produced. To make the statue accessible to all interested parties, I uploaded it to the SketchFab platform. The 3D model of "Reaali poiss" has been viewable on the Secondary School of Science's website since November 13, 2023, and the model is available for various applications.

In the future, it will be possible to perform an even more precise scan, providing the opportunity to obtain a more accurate life-size replica for the restoration of the statue.