

Kõrgem Kunstikool Pallas

Mööbliosakond

Fotogramm-meetria rakendamine museaalide konserveerimisel ja dokumenteerimisel

Lõputöö

Meeli-Heli Lepna

Juhendaja: Andrei Bljahhin, BA

Tartu 2024

SISUKORD

SISSEJUHATUS	3
1. 3D-DOKUMENTEERIMINE	5
1.1 3D-digiteerimise olulisus.....	8
1.1.1 3D-tehnoloogiad muuseumipraktikas.....	9
1.1.2 3D-digiteerimine museaalide puhul.....	12
1.2 3D-dokumenteerimise meetod: fotogramm-meetria	15
1.3 Fotogramm-meetria töövoog ja 3D-mudeli loomine.....	19
1.3.1 Ettevalmistus	19
1.3.2 Kaamera tehnilised nõuded ja soovitused fotogramm-meetria tegemiseks.	20
1.3.3 Andmete töötlemine	22
1.4 Andmete kasutamine	27
1.4.1 3D-mudelite kasutamine kultuuripärandi valdkonnas.....	27
1.4.2 Märkesüsteem 3D-mudelil	28
1.5 3D-mudelite pikaajaline digitaalne säilitamine	33
2. 3D-MUDELI LOOMINE MUSEAALI NÄITEL	36
2.1 Andmehõive	38
2.2 Andmete töötlus.....	40
3. 3D-MUDELI TÖÖTLEMINE JA ANDMETE ANALÜÜS	43
3.1 Töödeldud andmete kasutus	43
3.2 3D-mudeli analüüs.....	44
KOKKUVÕTE	50
SUMMARY	52
KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU	54
LISAD	58
Lisa 1. iPad Pro 15 lidariga tehtud katsetused Pallase Mööbliosakonna mööblist.....	58
Lisa 2. Töövoog tabel	61
Lisa 3. Hilisbarokk kapi 3D-mudeli renderdused.....	62

SISSEJUHATUS

Traditsioonilised restaureerimis- ja konserveerimismeetodid on olnud aastasadu pärandi säilitamise nurgakiviks, kuid nüüd, viimastel kümnenditel, on tehnoloogia areng avanud uksi uutele lähenemistele ja praktilistele rakendustele nendes kahes valdkonnas. Uuenduslikeks meetoditeks on saanud 3D-digiteerimine ja 3D-tehnoloogiate (sealhulgas fotogramm-meetria ja laserskaneerimise) kasutamine ainelise kultuuripärandi puhul. Need meetodid ja tehnikad loovad uusi mitmekülgsemaid võimalusi pärandi uurimiseks, dokumenteerimiseks ja säilitamiseks.

Lõputöö eesmärk on näidata, kuidas 3D-mudeleid saab kasutada kultuuripärandi säilitamisel. Eesmärgi täitmiseks uurin, mis on 3D-dokumenteering, käsitlen põhjalikult 3D-tehnoloogiaid ja töövoogu. Seejuures keskendun fotogramm-meetria. Lõputöö praktilises osas loon 3D-mudeli Eesti Rahva Muuseumile kuuluvast hilisbaroksest kapist. Konservatorite jaoks on oluline esemete täpne dokumenteering, sealhulgas graafiline kirjeldamine, seega tutvustan erinevaid märkimisvõimalusi 3D-mudelil.

Teema valik on ajendatud ennekõike huvist fotograafia kui dokumenteeringivahendi vastu. Objekti jäädvustamine fotokaamera abil on pikka aega olnud kultuuripärandi valdkonna dokumenteeringitavade lahutamatu osa. Nii ka minu õpingutest Kõrgemas Kunstikoolis Pallas on just eredalt meelde jäänud restaureerimis- ja konserveerimistöde käigus tehtud pildid, dokumenteeringiks visuaalselt eseme kahjustusi ja protsessi ennast. Õpingute ajal oli võimalus tutvuda 3D-tehnoloogiatega, mis süvendas huvi uuenduslike pildindustehnoloogiate vastu. See andis tõuke ja pani mõtlema, kuidas saab kasutada neid tehnoloogiaid restaureerimis- või konserveeringiprotsessi tõhusamaks ja täpsemaks muutmisel.

3D-tehnoloogiate kasutamine muuseumikogude dokumenteeringisel on juba või muutub üha tavalisemaks. Fotogramm-meetria ja laserskaneerimine on kultuuripärandi valdkonna spetsialistide seas huvipakkuvad teemad. Teadmised digikaksikute loomise tehnoloogiate ja protsesside kohta muutuvad aina olulisemaks. Tänapäeval erinevate 3D-lahenduste ja 3D-mudelite kasutamine on laialt levinud muuseumipraktikates. Uurides Eesti muuseumi 3D tehnoloogiate kasutusvõimaluste kohta ja tuginedes Airi Hermi 2016. aasta magistritööle „3D ja seotud lahenduste kasutamisevõimalused muuseumides: Eesti muuseumide näitel“,

peab tõdema seda, et 3D-tehnoloogiaid on siiani väga vähe kasutatud. Muuseumid pole soetanud vastavat tehnikat 3D-mudeli loomiseks ja ka Muuseumite infosüsteemi (MuIS) keskkonnas pole seni võimalust 3D-mudelite üleslaadimiseks. Puudub ka laiem teavitamine museaalide 3D-digiteerimise põhimõtete, näpunäidete ja ka olulisuse kohta muuseumites ja kultuuripärandi valdkonna spetsialistide seas.

Käesoleva lõputöö teooria osa põhilise infoallikana olen käsitlenud Digitaalse kultuuripärandi ja Europeana ekspertgrupi välja antud dokumenti, mis selgitab ainelise kultuuripärandi 3D digiteerimise põhimõtteid ja annab vastavaid soovitusi. Fotogramm-meetria meetodi, nii teooria, töökäigu ja 3D-mudeli loomise juures toetusin suures osas lõputöö juhendaja Andrei Bljahhini teadmistele, samuti Agisoft Metashape kasutusjuhendile.

Töö esimeses peatükis annan ülevaate 3D-dokumenteerimisest ja fotogramm-meetriast. Teine peatükk keskendub 3D-mudeli loomisele ning andmete töötlemisele. Kolmandas peatükis analüüsin töödeldud andmeid ja nende kasutust dokumenteerimisel. Lõputööle on lisatud kolm tööd täiendavat lisa.

Antud lõputöö pakub minu jaoks põnevat väljakutset ning võimalust lisada tavapärasele konserveerimis- ja restaureerimisvaldkonna lõputööle uudsemat vaatenurka.

Avaldan tänu kogu nõu ja abi eest, mida olen oma lõputöö valmimisprotsessis kogunud. Suurim tänu minu juhendajale Andrei Bljahhinile. Samuti tänan konsultante: ERMi konservaatoreid Indrek Tirrulit ja Kõrgema Kunstikooli Pallas skulptuuriosakonna meistrit Rasmus Eisti.

1. 3D-DOKUMENTEERIMINE

Käesolevas peatükis käsitlen 3D-dokumenteermise ja digiteerimise olulisust kultuuripärandi säilitamisel. Kirjeldan nende protsesside erinevaid tahke ja annan ülevaate 3D-dokumentatsioonis kasutatavast metoodikast. Lisaks, selgitan märkesüsteemide kasutamist 3D-mudelitel.

Ainelise kultuuripärandi dokumenteermine on muuseumikogude säilitamise oluline osa. Nüüd traditsioonilised dokumenteermismetodid on üha enam asendatud 3D-dokumentatsiooniga, mis kajastab objekti algset olemust terviklikumalt (4D Research Lab, 2024). 3D-dokumentatsioon tähendab füüsilise kolmemõõtmeliste objektide jäädvustamist digitaalsete mudelitena ja seejärel ajakohase teabe nagu piltide, videote või muude kirjete või dokumentide lisamist selle juurde (SynergyXR, 2024).

Kuigi objekte on võimalik traditsioonilisel kätsi viisil paberile joonestada, pakuvad uued tehnikad palju suuremat täpsust. 3D-dokumentatsioon võimaldab objektist ja selle teabest kiiremat ja põhjalikumalt ülevaadet. Samuti võimaldab see ruumilist konteksti visualiseerida ja mõista täiesti uuel viisil, suurendades seeläbi näiteks täpsemat konserveerimistööd (SynergyXR, 2024). Seega 3D-dokumenteermine viitab protsessile, kus luuakse, töödeldakse, salvestatakse, kasutatakse ja jagatakse dokumentatsiooni kolmemõõtmelises vormingus. Protsessi, kus füüsiline objekt teisaldatakse digitaalsesse vormingusse nimetatakse digiteerimiseks. Kolmemõõtmeline (3D) digiteermine võimaldab saada digitaalse 3D-mudeli, mida saab virtuaalselt käsitleda, võimaldades uuel viisil säilitada ja kaitsta kultuuripärandit.

Muuseumid mitte ainult ei kogu ega säilita esemeid, vaid ka nende esemetega seotud uurimistöid, konserveerimisprotokolle ning nüüd ka juba 3D-andmeid ja failivorminguid. Tuleb oluliseks pidada, et kultuuripärandi dokumenteermine on koostöö. Seega osalevad teabe salvestamise ja säilitamise ülesannetes: koguhoidjad, konservatorid, kuraatorid, fotograafid, 3D-spetsialistid ja teised valdkonnaga seotud spetsialistid.

Kogude säilitamise aluseks on museaalide dokumenteermine. Tänapäeval toetab dokumenteermist digikeskkond, mille tõttu ühelt poolt väheneb kogude füüsiline kasutus, kuid teisalt muutuvad kollektsioonid kättesaadavaks suurele hulgale kasutajatele.

Museaalide dokumenteerimine digitaalses keskkonnas annab võimaluse teha info kättesaadavaks mitmel erineval tasemel ja viisil (Jeeser, 2013).

Museaalide dokumenteerimine on aegade jooksul jõudsalt arenenud. Muuseumikogude kohta teabe salvestamise tavad hakkasid ilmema ja arenema 18. saj lõpus (Buck, 2010). Eesti muuseumite museaalide dokumentatsiooni saab jälgida alatest 19. saj algusest. Samas saab muuseumikogude, kui terviku, teadlikust ja kaalutletud dokumenteerimisest rääkida alles 20. sajandi algusest, mil seoses Eesti Rahva Muuseumi (ERM) asutamisega 1909. aastal algas süstemaatiline edendamine vanavara kogumiseks ja kogu dokumenteerimiseks (Jeeser, 2013).

Muuseumiesemete dokumenteerimise keskne ja ühtlasi ka kõige olulisem etapp on museaali kirjeldamine. Objektide dokumenteerimine algab kogumisprotsessi käigus, mil märgitakse üles objekti füüsilised omadused, kontekst ja valmistamise ning kasutamise teave (Jeeser, 2013). Esiolguks tuginesid muuseumid oma esemete jäädvustamiseks kirjalikele kirjeldustele ja visanditele. Need kirjeldused sisaldasid teavet objekti välimuse, mõõtmete, materjalide, seisukorra ja võimalike pealdiste või märgistuste kohta. Joonised täiendasid neid kirjeldusi, pakkudes visuaalseid viiteid objektist, mis aitasid esemeid paremini tuvastada ja mõista. 1990. aastate lõpus, arvutite igapäevaseks töövahendiks muutumisega, toimusid muuseumides museaalide dokumenteerimises ja objektide jälgimise meetodites suuremad läbimurded (Buck, 2010). Tehnoloogia arenedes sai fotograafia kaasamine muuseumi dokumentatsiooni koostamisse tavapäraseks osaks, pakkudes visuaalseid töövahendeid esemete viitamiseks ja uurimiseks. Viimastel aastakümnetel on 3D-tehnoloogiate ja 3D-mudelite kasutamine täiendanud traditsioonilisi kirjeldamise viise ning muutunud oluliseks museaalide dokumenteerimisel.

Muuseumikogude 3D-digiteerimine, uute tehnoloogiate abiga, võimaldab teostada konserveerimist, uurimist uuel tasemel, võimaldades virtuaalset ligipääsu ka väga haruldastele või habrastele esemetele. Põhieesmärk jääb siiski museaalide dokumenteerimisel samaks: luua põhjalik ja üksikasjalik dokumentatsioon, mis aitab esemeid uurida, säilitada ja tõlgendada.

Digiteerimisprojektide toimingud võib struktureerida nelja etappi:

- 1) Projekti kavandamine, mis hõlmab digitaliseeritavate objektide valikut, ressursside hankimist ning ettevalmistusi digitaliseerimiseks. See etapp nõuab põhjalikku objektide hindamist, arvestades nende võimalikku kasutust ning õiguslikke ja tehnilisi piiranguid. Samuti võib tekkida vajadus koostööpartnerite kaasamiseks.
- 2) Digiteerimisprotsess hõlmab saadud digiobjektide kvaliteedi hindamist, nende varustamist metaandmetega ning säilitamist ja kasutusfailide loomist.
- 3) Andmebaaside loomine. Digitaalsete ressursside ja digiarhiivi ülesehitamine ning selle kasutajatele kättesaadavaks tegemine. See hõlmab tihedat koostööd kasutajatega ning vajalike ressursside eraldamist selleks, et tagada digiarhiivide optimaalne kasutamine.
- 4) Pikaajalise jätkusuutlikkuse tagamine, mis tähendab vahendite planeerimist nii digiteeritud objektide kui ka originaalide säilitamiseks. Pikaajaline ressursiplaneerimine on oluline, kuna digiobjektide säilitamine võib pideva hooldamise, varundamise ja tehnoloogia uuendamise vajaduse tõttu olla kulukam kui originaalide säilitamine. Originaalide säilitamine hoidlates on odavam, kuna see nõuab peamiselt ühekordseid kulusid. Originaale tuleb siiski säilitada, sest tehnoloogia arenedes võib tekkida vajadus neid uuesti digiteerida, et saada paremaid või nõuetele vastavamaid digikoopiaid (Konsa, 2019).

Muuseumid üle maailma võtavad üha enam oma kogude digiteerimiseks, külastajate kogemuse parandamiseks, konservatoritele parema uurimuse tegemiseks kasutusele 3D-dokumentatsiooni tehnikaid. Näiteks Briti Muuseum, mis on üks maailma suurimaid muuseume, mis on aktiivselt kasutanud 3D-skaneerimist ja dokumentatsiooni, et luua oma esemetest digitaalsed koopiad. Need 3D-mudelid on tehtud kättesaadavaks veebiplatvormil Sketchfab ning hetkel on muuseumil sealsel platvormil 269 mudelit (Sketchfab, 2024). Smithsoniani asutus, mille alla kuuluvad mitu muuseumit, on samuti kasutanud oma kogude digiteerimiseks 3D-dokumentatsiooni. Neil on olemas kodulehel 3D-mudelite vaatur erinevate funktsioonide ja tööriistadega. Üheks heaks näiteks on veel Google Arts & Culture platvorm, mis teeb koostööd muuseumide ja kultuuriasutustega üle maailma. Kuigi Google Arts & Culture ise ei ole muuseum, toimib see digitaalse platvormina, kus kasutajad saavad uurida kõrge eraldusvõimega pilte, videoid, virtuaaljuure ja muud multimeediasisu

erinevatest muuseumidest ja kultuuriorganisatsioonidest. Google Arts & Culture on oluline platvorm, mis edendab kultuuripärandite juurdepääsu digitaalsete vahendite abil, edastades informatsiooni 3D-dokumentatsioonitehnikate kasutamise, muuseumi esemete jäädvustamise ja säilitamise kohta.

1.1 3D-digiteerimise olulisus

3D-digiteerimine kultuuripärandi valdkonnas on otseselt seotud uurimis- ja õppetööga, luues 3D-mudeleid, mis on kasulikud dokumenteerimiseks, konserveerimiseks, restaureerimiseks, valdkonna populariseerimiseks ja väärtustamiseks. 3D-digiteerimise vajadus, väärtus, põhjus ja eesmärk, tuleb hoolikalt läbi mõtestada, kuna see on ajamahukas ettevõtmine.

Objektide valik digiteerimiseks nõuab kriitilist otsustust ja eelistuste määratlemist. Digiteeritavate objektide valik on sageli olnud erisugune, valikukriteeriumid on tulenenud pikka aega pigem digiteerimisest endast, konkreetsetest projektidest, mitte mäluasutuste üldisest kogude arendamise poliitikast. Mõned digiteerimisprojektid on eelistuste määramisel lähtunud kasutajate vajadustest (Konsa, 2019).

Digiteerimise protsessis omandatakse täiendavat teavet kogude kohta, mis võimaldab paremat haldamist tulevikus. See täiendav teave hõlmab objektide kirjeldusi ja andmeid nende seisundi kohta. Digitaalsete objektide kättesaadavus võimaldab laiendada olemasolevaid kogusid, kasutades teistes institutsioonides olevaid objekte, mida saab siduda antud koguga (Konsa, 2019).

3D-digiteerimise protsess on oluline ohustatud ainelise kultuuripärandi säilitamiseks ja ennistamiseks, võimaldades virtuaalset juurdepääsu kultuuriväärtuslikele objektidele, mis füüsiliselt pole kättesaadavad, näiteks veealused objektid (laevavrakid). Ohustatud ainelise kultuuripärandi puhul on 3D-digiteerimine hädavajalik nii säilitamise, materjali analüüsi, kui ka konserveerimise ja restaureerimise eesmärgil. Ohustatus võib tuleneda ootamatutest sündmustest, nagu näiteks loodusõnnetused, vargus, sõda aga ka ebasobilikest kliimamuutustest või pidevast kasutamisest ja materjalide loomulikust lagunemisest. 3D-mudelid kasutades uurib konservaator museaalide või tema osade seisundit ning jälgib sellega seotud konserveerimistöid (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

Digiteerimisprotsessi algul tuleb kindlaks teha, milline on mõõtmisandmete miinimumkvaliteet, mis vastaks muuseumi vajadustele. Mõnikord on vaja dokumenteerida objekti erinevate osade ja fragmentide jaoks erineva kvaliteediga. Näiteks terve objekti jaoks läheb vaja üldisema kvaliteetiga mudelit, samas kui tegemist on väiksema fragmendi või objektiga, näiteks keskaegse mündiga, tuleb luua detailsema kvaliteediga mudelit. Mõõtmised ja eriti andmete järeltöötlemised on väga ajakulukad, seega on oluline arvestada miinimumkvaliteedinõuetega, mis muudab kogu digiteerimisprotsessi tõhusamaks ja paneb paika projekti ulatuse (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

Eesti riigi jaoks kõige kulutõhusam ja pikas perspektiivis kõige paremini kultuuriväärtuste säilimist toetavam lahendus on rajada muuseumidele kaks ühist pärandihoidlat, mis toimivad ühtlasi säilitamise, konserveerimise ja digiteerimise kompetentsikeskusena (Kultuuriministeerium, 2022). See annaks võimaluse arendada ja tugevdada muuseumisisesid oskuseid ning ka teadmisi 3D-digiteerimise valdkonnas. Teisest küljest annaks see tõuke automatiseeritud digiteerimisele, mis kiirendab protsessi.

1.1.1 3D-tehnoloogiad muuseumipraktikas

Füüsilisest objektist digikaksiku loomiseks on mitu meetodit. Kultuuripärandi objektide puhul eelistatakse vähese ehk ka minimaalse sekkumisega kontaktivabasid tehnikaid, et tagada eseme säilimine teda kahjustamata. Eelistatavad või ka enim kasutatavad tehnikaid on mitmeid, mida kultuuripärandi ja museaalide dokumenteerimiseks kasutatakse:

- fotogramm-meetria,
- laserskaneerimine,
- lidar,
- struktureeritud valgus skaneerimine,
- kompuutertomograafia (röntgen),
- multispektraalfotograafia (MSI)

Lõputöö praktilise osa puhul puutusin kokku kolme eelmainitud meetoditega: fotogramm-meetria, laserskaneerimine ja lidar tehnoloogia. Nendest kõige põhjalikumalt tutvusin fotogramm-meetriaga. Eesmärgiks oli tutvuda paremini 3D-dokumenteerimise erinevate

tehnikatega ning hinnata nende rakendamise kiirust ja tulemuslikkust just suurema mahuliste esemete puhul nagu selleks on mööbel ja lõputöö praktilise osa objekt, hilisbarokne kapp. Struktureeritud valgus skaneerimine, kompuutertomograafia ja MSI meetodite kasutamine ei olnud praktilise töö puhul vajalikud, kuna nendel tehnikatel puudusid kokkusobituvused uurimistöö eesmärgiga. Röntgentehnoloogia oleks vajalik juhul, kui eesmärgiks oleks uurida kapi sisekonstruktsiooni, tuues välja, kuidas ja mis materjalid on kapi sees. Samuti röntgentehnoloogia oleks nõudnud suuri kulutusi kappi transportimisega vajalikudesse kohtadesse. MSI meetodi abil tavaliselt määratakse pigmentide keemilist koostist, mis samuti ei olnud kapi jäädvustamise puhul vajalik. Kuigi struktureeritud valgus skaneerimine on mõistlik, kui on vajadus jäädvustada objekti geomeetria, ei saavuta selline tehnika kõige parimat tekstuuri, mida tavaline fotogramm-meetria suudab saavutada.

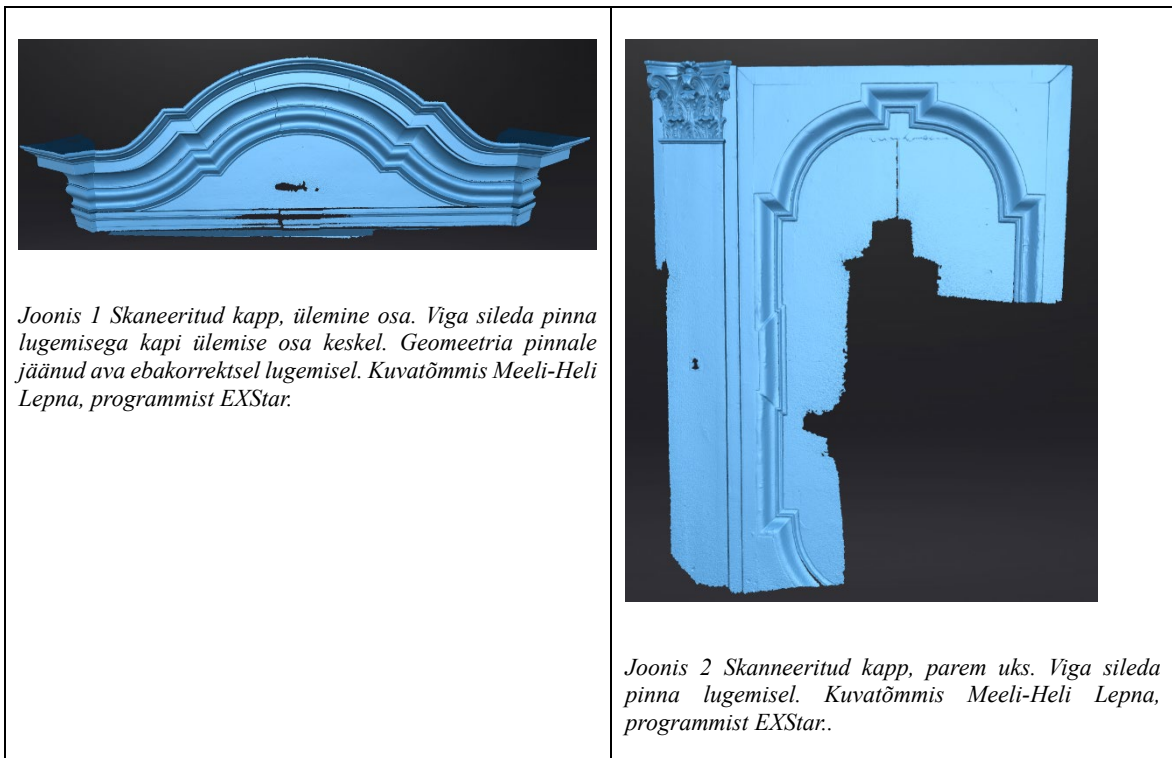
Fotogramm-meetria, mida lõputöö puhul rakendati, võimaldab luua detailseid ja täpseid 3D-mudeleid. Käesolev lõputöö keskendub selle meetodi potentsiaalile, et luua üksikasjalik 3D-mudel muuseumi kogus olevast esemest. Fotogramm-meetria ja selle töövoost on täpsemalt kirjeldatud alates peatükist 1.3.

Laserskaneerimist teostati Kõrgema Kunstikool Pallase Shining 3D Einstar käsiskanneriga, mis laenati skulptuuriosakonnast, et jäädvustada praktilise osa uurimisobjekt. Käsiskanner pakkus võimalust kiireks mudeli loomiseks, kuid protsessi käigus ilmusid mitmed tõrked objekti pinna jäädvustamisega, mis tulenesid kapi eripäradest ning takistasid võrdlemist fotogramm-meetria abil loodud 3D-mudeliga.

Kuigi muuseumites laserskaneerimine on üks tõhus viis museaalide üksikasjalike 3D-mudelite loomiseks ja digiteerimiseks, on sellel siiski materjali omaduste, objekti pinna osas ja keskkonnatingimustega seotud piirangud (Rahaman, 2021). Meetod tugineb kauguste mõõtmisel ja laserkiirte peegeldumisel objektide pinnalt. Laserskaneerimisele tekitavad suuremaid ebatäpsusi väga läikivad, peegelduvad, läbipaistvad, tumedad ja ühevärvilised eristamata pinnad (Kejing He, 2022).

Laserskaneerimisseadmed on kallid ja kõik muuseumid ei ole võimelised selliseid väljaminekuid endale lubama. Skaneerimise teostamiseks on vaja koolitada spetsialiste, kes tunneksid antud meetodit ja selle jaoks vajaminevat tarkvara.

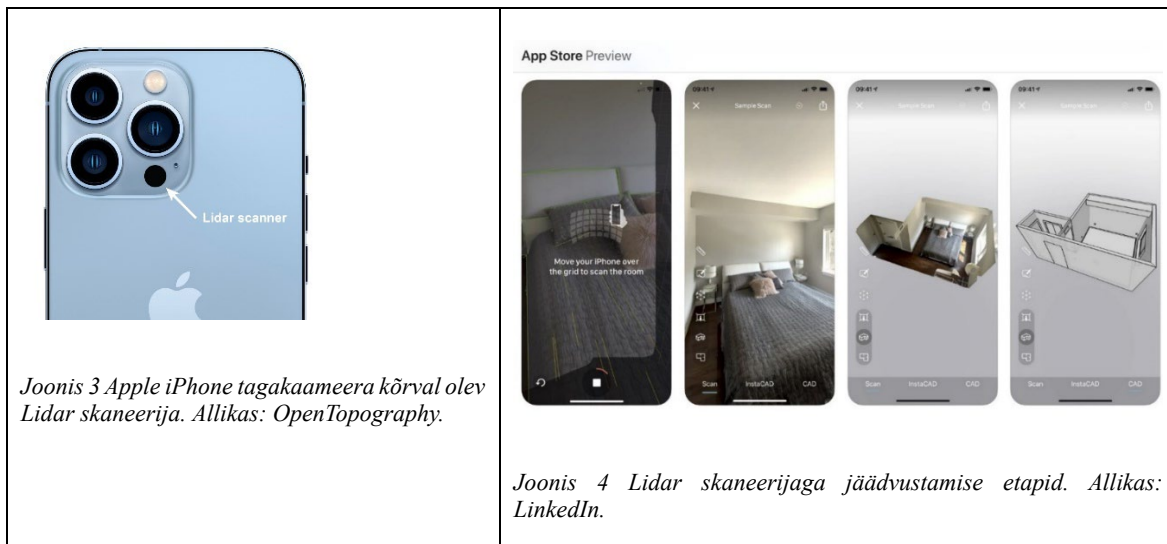
Hilisbarokne kapp on tumedat tooni, läikiv, mistõttu peegeldab valgust. Kapi eripära osutus katsetuste käigus probleemseks, kuna selle jäädvustamine osutus keeruliseks. Kapi skaneerimine nii esimesel kui ka teisel katsetusel ebaõnnestus. Kuigi skänner suutis kiiresti ja tõhusalt mõõta kapi profiililiistusid ja ornamentika detaile, tekkis seadmel raskusi tumedate siledade pindade lugemisel (Joonis 1, Joonis 2). Võimalus oli kasutada 3D-skaneerimise markerid, mis aitaks selliste pindade mõõtmisel. Kuna eesmärk oli jälgida kontaktivaba skaneerimise meetodit, loobuti siiski sellest võimalusest.



Viimaseks kasutati Apple iPad Pro 15 koos integreeritud lidariga, mille andis kasutamiseks 3Di/Hades Geodeesia. Selle tehnoloogiaga sai Pallase mööblisakonnas kokku kogutud kiiresti ruumilisi andmeid objektide kohta (Lisa 1. iPad Pro 15 lidariga tehtud katsetused Pallase Mööblisakonna mööblist.)

Lidar on akronüüm inglise keelsest sõnast *Light Detection and Ranging*, mis on aktiivne pildistamistehnoloogia. See mõõdab kaugusi (ranging – ulatust) valgustades objekti laservalgusega ja mõõtes peegeldust kaamera sensoriga/anduriga. See on olnud hiljutine esilekerkiv uus tehnoloogiaarendus Apple poolt toodetavates nutitelefonides, kui ka tahvelarvutites. Nende seadmete (iPad Pro/iPhone alates 12 Pro) tagakaamera kõrval on olemas lidar laserskaneerija (Joonis 3) (Rahaman, 2021). Apple toodetud lidari puhul on

eeliseks see, et võimaldab kiirelt jäädvustada objekte ning on kõige sobivam siseruumides ja mõeldud väiksete ruumide ehk lühikeste vahemaade jaoks (kuni 5 meetrit) (Narain, 2020) (Joonis 4).



Mõõtmiste tegemine Apple seadmete lidar-anduriga, tema kiiruse ja lihtsa kasutamise tõttu, võib olla konservaatori jaoks teatud olukordades tõhus dokumenteerimisvahend. Kuna Apple seadmete lidar ei paku kõrget detailsuse taset, võib see siiski anda põhilist teavet objekti kuju ja mõõtmete kohta, millest võib kasu olla esialgsel hindamisel.

Tänapäeva tehnoloogia on juba nii kaugemale arenenud, et telefonikaamera, lidar ning keskmise võimsusega ning graafikakaardiga arvutid võivad olla piisavad objektidest 3D-mudelite loomiseks ja töötlemiseks. Samas kui tulemuseks on nõutud kõrgkvaliteetsed mudelid, läheb vaja professionaalset tehnikat, suure jõudlusega arvutit, mille puhul suureneb töötlemisaeg (Rahaman, 2021). Näiteks käesoleva lõputöö praktiline osa, mis on fotogramm-meetria abil loodud 3D-mudel ERMi kogusse kuuluvast hilisbaroksest kapist ERM D 15:168, näitab vajadust parema tehnika järele suuremahuliste objektide digiteerimisel.

1.1.2 3D-digiteerimine museaalide puhul

Muuseumi kogudes olevad esemed on kõik eripalgelised. Sellest võib kujuneda suur väljakutse ja esemetest 3D-mudeli loomine võib osutada keeruliseks, kui ei järgita kindlaid reegleid.

Seega tuleb arvestada meetodi ja tehnika valikul

- digiteeritavate objektide iseloomu;
- nende mõõtmeid;
- erinevat tüüpi objektide arvu;
- objektide seisundit;
- töötajate kogemusi ja oskusi;
- eelarvet;
- digiteerimiseks kasutatavaid ruume;
- kogu projekti ajaraamistikku (Konsa, 2019).

3D-digiteerimisprotsess varieerub sõltuvalt iga objekti tüübist, kasutatavatest töövahenditest ja meetoditest. 3D-mudelite kasutamine erinevatel eesmärkidel või valdkondades nõuab erinevat kvaliteeditaset. Kvaliteeditase viitab resolutsioonile (näitab pildi selgust ja teravust) ja võib mõjutada 3D-mudeli sobivust kindlaks otstarbeks. Vajalik on määrata kvaliteeditase, mis tagab 3D-mudeli piisava sobivuse ja funktsionaalsuse konkreetse kasutusvaldkonna jaoks. 3D-mudelite kasutamine konservaatori töös nõuab enamasti kõrget kvaliteeti. Seetõttu on digiteerimisel kasutatavad töövahendid (tehnika, programmid) ja pildistamisstrateegia olulise tähtsusega 3D-mudelite kvaliteedi kujunemisel (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

3D-digiteerimise planeerimisel on oluline tagada, et digiteeritud kogud oleksid kättesaadavad sihtrühmadele, nagu konservaatorid, kuraatorid ja tavakasutajad. Tuleb otsustada, kuidas kasutajad saavad 3D-mudelitele ning -sisule juurde pääseda, olgu selleks veebipõhine 3D-vaatur¹ või spetsiaalse tarkvaraga kõrgjärgulusega arvuti. Samuti on oluline, et 3D-mudelid oleksid saadaval mitmes erinevas failivormingus, vastavalt kasutusotstarbele, nagu 3D-printimine, veebipõhine visualiseerimine, konservaatori, kuraatori töö või arhiveerimise jaoks. Oluline on tagada sisu kättesaadavus avatud vormingutes, et vältida sõltuvust ühest teenusepakkujast ja vähendada riske seoses vormingute muutumise või

¹ 3D-vaatur on tarkvararakendus või tööriist, mis võimaldab kasutajatel arvutis või muus elektroonilises seadmes kolmemõõtmelisi (3D) mudeleid vaadata. Need vaaturid on olulised 3D-andmete visualiseerimiseks erinevates valdkondades, nagu disain, inseneritöö, arhitektuur, mängud ja virtuaalne reaalsus.

pakkuja suutmatusega vormingut ja selle funktsioone ajakohastada (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

Muuseumil on oluline kaaluda, kas digiteerimist teostada muuseumisiseselt, või on otstarbekas tellida teenus väljastpoolt. Muuseum peab hindama, kas neil on piisavalt pädevaid töötajaid, kes omavad vajalikke oskusi ja tehnikat 3D-digiteerimisprotsessi läbiviimiseks. Muuseumil on vaja ka hinnata 3D-dokumenteerimiseks kuluva aja ja tehnika soetamise otstarbekust. Muuseumil peaks olema selge loetelu, mis annab ülevaate projektis kasutatavatest tehnikatest, vahenditest, alustades objekti ettevalmistamisest kuni järeltöötluseni, levitamiseni ja pikaajalise säilitamiseni. Kui digiteerimine toimub muuseumi siseselt, tuleb uurida töökeskkonna uuendamise vajadust ja sellega kaasnevat kulusid pikas perspektiivis (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

Muuseumi töötajate jaoks on vaja tööriistu ja tuge, mis võimaldaksid ka mitteekspertidel mugavalt ja tõhusalt luua 3D-mudeleid, eriti 3D-dokumentatsiooni pärandi visualiseerimise eesmärgil (Rahaman, 2021).

Automatiseeritud digiteerimist on seni välja töötatud ja rakendatud ainult "2D" museaalide puhul (fotod, filmid, raamatud, trükised, kaardid). 3D-digiteerimise protsess on jätkuvalt kulukas, aeganõudev ja suures osas käsitsi teostatav ning rakendatakse vaid valitud objektidele. Nende probleemide tõttu on kogude suurel hulgal digiteerimine, mis hõlmaks ka suuri kolmemõõtmelisi objekte, endiselt piiratud (Santos, 2017). Kuid võib välja tuua, et Euroopas, Saksamaal Fraunhoferi arvutigraafika uurimisinstituudi IGD kultuuripärandi digiteerimise kompetentsikeskus lõi interdistsiplinaarse uurimisprojekti raames CultLab3D töövahendi 2016. aastal (Joonis 5). CultLab3D on spetsiaalselt loodud automatiseerima kogu 3D-digiteerimisprotsessi, mis võimaldab skaneerida ja arhiveerida suures mahus pärandiobjekte ning on hetkel Euroopas ainulaadne (Santos, 2017) (Joonis 6).



Joonis 5 CultLab3D konveierlint museaalide jaoks. Foto: Norbert Miguletz © Liebieghaus Skulpturensammlung.



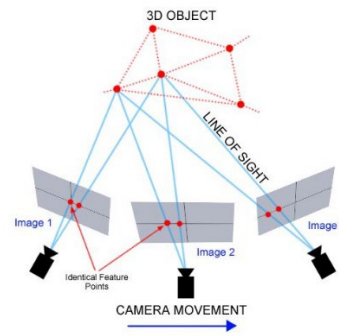
Joonis 6 Erinevate valgustega ja tehnikaga varustatud automatiseeritud konveierlint. Foto: Norbert Miguletz © Liebieghaus Skulpturensammlung.

1.2 3D-dokumenteerimise meetod: fotogramm-meetria

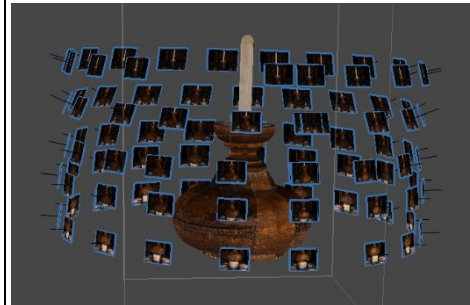
Fotogramm-meetria on üks 3D-dokumenteerimise viisidest. See hõlmab objektist või keskkonnast mitme foto jäädvustamist erinevate nurkade alt ja seejärel piltide töötlemist spetsiaalse tarkvaraga, et luua digitaalne kolmemõõtmeline ehk 3D-mudel täpse tekstuuriga (Joonis 7, Joonis 8, Joonis 9) (Julien Guery, 2017). Termin on tuletatud kolmest kreeka keelsest sõnast, kus *phôs-* või *phōtō-* (liitvorm) tähendab „valgust“, *grámma* „kirjutamist“ või „joonistamist“ ja *metria* „mõõtmisprotsessi“ (Eesti Entsüklopeedia, 2024), ehk see viitab fotode abil tehtavatele mõõtmistele ja kaardistamistele. Fotogramm-meetria on nii teadus kui ka tehnoloogia, mis hõlmab erinevaid protsesse. See on meetod igas suuruses ja mistahes tüüpi pärandkultuuriobjektide jäädvustamiseks.



Joonis 7 Objekti pildistamine ERMis. Foto: Andrei Bljahhin



Joonis 9 Fotode jäädvustamise skeem. Allikas: The Haskins Society
<https://thehaskinssociety.wildapricot.org/photogrammetry>



Joonis 8 Kaamera asukohad ja valminud 3D-mudel kapi jalast programmis Agisoft Metashape. Foto: Meeli-Heli Lepna

Valdkonnad, kus fotogramm-meetriat rakendatakse:

- geodeesia ja maamõõtmine, täpsete topograafiliste kaartide ja mudelite koostamine maamõõtmiseks ja linnaplaneerimiseks;
- ehitus ja tehnika, ehituse jälgimine, üksikasjalike mudelite loomine konstruktsioonidest;
- arhitektuur ja kultuuripärand, ajalooliste paikade, hoonete, museaalide dokumenteerimiseks, säilitamiseks ja taastamiseks;
- arheoloogias, kaevamiskohtade ja leitud esemete jäädvustamine 3D-mudelina;
- meelelahutusmaailm, filmides ja videomängudes 3D-keskkondade, visuaalsete efektide ja virtuaalreaalsuse loomine.

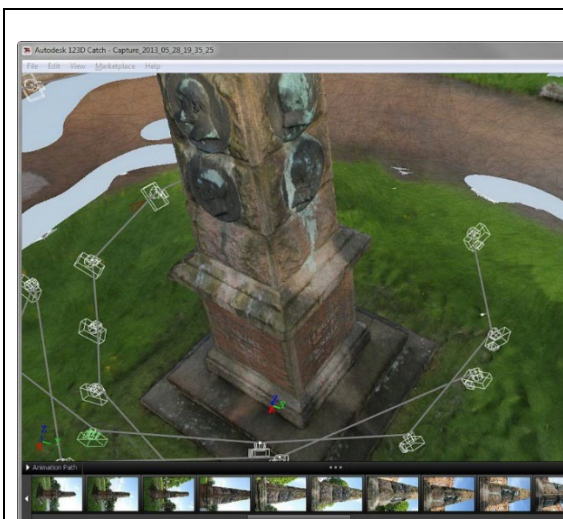
Fotogramm-meetria jaguneb kolmeks liigiks:

- 1) Aerofotogramm-meetria hõlmab spetsiaalse kaamera paigaldamist lennukisse, mis suunatakse vertikaalselt maa poole. Lendamise ajal teeb kaamera mitu kattuvat fotot, mida hiljem töödeldakse. Need fotod võimaldavad luua digitaalse kõrgusmudeli (inglise keeles *digital elevation model*, DEM).
- 2) Maapealne fotogramm-meetria toimub maapinnal. Kaamera on suunatud maapinnaga horisontaalselt või nurga all pildistatava objekti suunas. Kaamera asendit ja orientatsiooni mõõdetakse vahetult särituse ajal. Lähifotogramm-meetria meetodit kasutatakse väiksemate objektide ja ka hoonete mõõdistamisel.
- 3) Kosmosefotogramm-meetria hõlmab kõiki maavälise fotograafia ja mõõtmise aspekte. Kaamera võib-olla paigutatud satelliidil (Resources, 2013).

Lähifotogramm-meetria on tänapäeval hästi välja kujunenud kontaktivaba meetod muuseumi esemete dokumenteerimiseks. Fotogramm-meetria veel üheks plussiks on see, et seadmed, mida selleks kasutatakse (digitaalne peegelkaamera, välk, mõõtekett, värvikaart) on hõlpsasti transporditavad muuseumi siseselt või ka väliselt (Julien Guery, 2017). Sama meetodit kasutati käesoleva töö praktilises osas.

Museaalide fotogramm-meetrilise jäädvustamise puhul on kaks peamist viisi (Holmes, mai 2024):

- 1) liigutades kaamerat ümber objekti (Joonis 10);
- 2) pöörata objekti, näiteks pöörleva aluse peal, hoides kaamerat paigal (Joonis 11)



Joonis 10 Liigutades kaamerat ümber objekti. Allikas: The Haskins Society.



Joonis 11 Objekt asetatud pöörleva aluse peale, kus kaamera on paigas pööramise ajal. Foto: Meeli-Heli Lepna

Mõlemal meetodil on oma eeliseid ja piiranguid ning nende valik sõltub sageli objekti iseärasustest ja uurimise eesmärkidest. Pöörleva aluse kasutamine objekti jäädvustamisel vähendab oluliselt selleks vajaminevat ruumi. Selle meetodi kasutamine võib olla eriti sobilik juhtudel, kui konserveerimislaboritel, hoidlatel või muuseumitel pole vastavat fotostuudiot. Pöörlevat alust kasutades saab palju tõhusamalt kontrollida kaamera kaugust objektist, võrreldes meetodiga, kus kaamerat liigutatakse ümber objekti ning kasutatakse statiividel valgusteid. Kitsas ruumis pildistades ja ringi liikudes võivad statiivid tööprotsessi segada. Samuti, see meetod võimaldab märkimisväärset aja kokkuhoidu, kuna võimaldab kiiresti ja järjepidevalt jäädvustada fotosid (C. Nicolae, 2014).

Liikudes ümber objekti ja pildistades peab jälgima seda, et objekti ei liigutataks samal ajal. Näiteks, kui on vähe ruumi objekti ümber, võib tahtmatult minna objekti vastu. See tekitab takistusi pildistamisprotsessis. Tuleb kontrollida, kas museaal on saanud kahjustada, või mitte, ning vajadusel alustada pildistamist uuesti. Lisaks võib tahtmatu liigutamine tekitada kahjusid ka teistele läheduses asuvatele museaalidele (C. Nicolae, 2014).

Fotogramm-meetria lõpptulemuseks on objektist üksikasjalik ja täpne digitaalne kaksik ehk 3D-mudel, mida saab analüüsida, visualiseerida erinevates rakendustes ja nii-öelda ka modifitseerida, teha rekonstruktsioone, kasutada neid alates inseneriteadusest kuni kunstini.

1.3 Fotogramm-meetria töövoog ja 3D-mudeli loomine

Töövoog algab tavaliselt ettevalmistusega, seejärel andmete hankimisega, kus kasutatakse spetsiaalset tehnikat ja pildistamist objektist mitme nurga alt. Sellele järgneb andmetöötlus, kus fotogramm-meetria tarkvara analüüsib ja loob hangitud andmetest 3D-mudeli. Töövoog lõpeb loodud mudeli täiustamisega ja kasutamisega erinevates rakendustes. Käesolev peatükk kirjeldab üksikasjalikult fotogramm-meetria töövoogu ja 3D-mudeli loomist, et anda põhjalik ülevaade muuseumi töötajale ja fotogramm-meetria huvitunule.

1.3.1 Ettevalmistus

Fotogramm-meetria ettevalmistusprotsess tähendab, et optimaalsete tulemuste saavutamiseks pööratakse hoolikalt tähelepanu nii detailidele, kui ka strateegilisele planeerimisele. Keeruliste, või suuremahuliste objektide puhul kestab jäädvustamine ja andmete töötlemine kauem, seetõttu tuleb sellega arvestada, kui luuakse projekti ajakava (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

Ettevalmistusetapis valitakse välja vastavad museaalile, seadmed ja varustus. Fotogramm-meetria ettevalmistus hõlmab mitut etappi:

- digiteerimisviisi paika panek;
- vajaliku varustuse komplekteerimine;
- erilubade taotlemine;
- keskkonna valik;
- objekti korrastamine (nt pühkida tolmust);
- mõõdistusala seadistamine;
- kaamera parameetrite seadistamine.

Hoolikas ettevalmistus tagab, et projektid, mis on fotogramm-meetria abil tehtud, annavad täpseid, tõhusaid ja usaldusväärseid tulemusi. Selline ettevalmistus võimaldab fotogramm-meetria meetodit kasutada erinevates valdkondades.

1.3.2 Kaamera tehnilised nõuded ja soovitusel fotogramm-meetria tegemiseks

Kaamera on fotogramm-meetria juures peamine tööriist. Sellega algab andmekorje. Fotogramm-meetria saab teha peaaegu iga kaameraga, sealhulgas nutitelefoniga ja kompaktkameraga ning on selles osas väga paindlik, kuid lõpptulemus ei pruugi olla rahuldav või piisav, kui tahta pärandist kõrgekvaliteedilist 3D-mudelit analüüsiks. Selle tulemusel võib kaotada väärtuslikku aega tehes rohkem pilte, et kompenseerida puudulikku kvaliteeti.

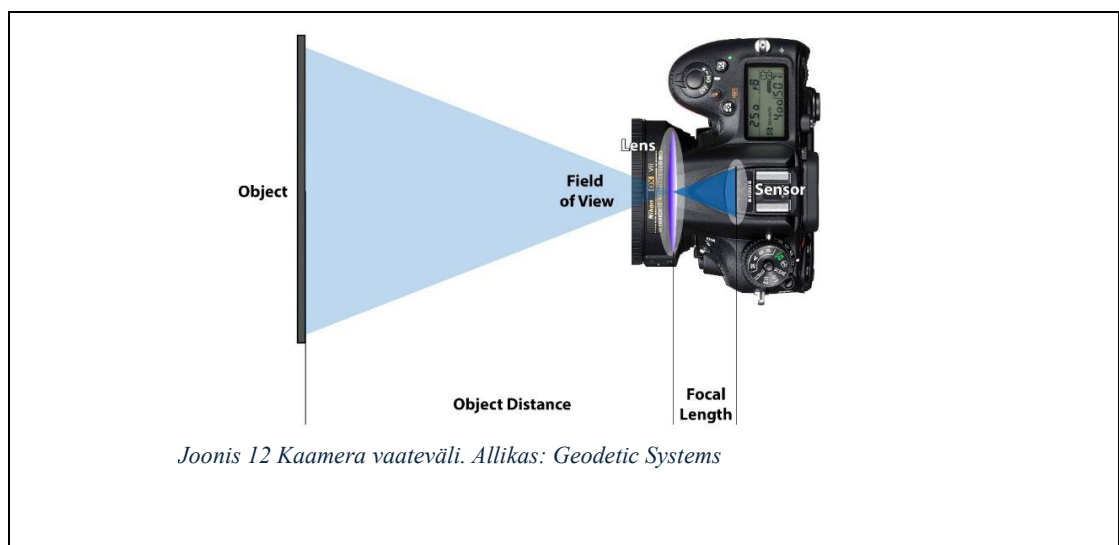
Fotogramm-meetria andmekorje jaoks annavad täiskaadersensoriga peegel- või hübriidkaamerad nende sensori suuruse ja eraldusvõime tõttu kvaliteetsema tulemuse. Täiskaadersensor-kaamerate eelis võrreldes väiksemate sensoritega kaameratega on parem pildi kvaliteet ja dünaamiline ulatus. Täiskaadersensor annab parema tulemuse pildistades hämaras kui poolkaader. Kvaliteetse pildi saamiseks on oluline kaamera eraldusvõime ehk resolutsioon, mis määrab, kui palju detaile jääb pildi peale objekti jäädvustamisel. Kvaliteetse pildi tagamiseks on oluline vähemalt 12 megapiksiline resolutsioon, kuid detailsemaks jäädvustamiseks sobivad paremini suuremad eraldusvõimed, näiteks 24 või 36 megapiksilit (Vision Aerial, 2022).

Kaamera jaoks teine oluline osa on objektiiv. Terava, detailse ja minimaalsete moonutustega pildi jäädvustamiseks on samuti oluline kasutada kvaliteetset objektiivi. (Vision Aerial, 2022). Fotogramm-meetria jaoks on parim mõõduka fookuskaugusega objektiiv, tavaliselt vahemikus 24–50 mm, mistõttu vaateväli pildistatava eseme puhul on piisavalt suur ilma, et objektiiv pildil moonutusi tekitaks. Lainurk objektiivid sobivad ruumide ja maastike pildistamiseks ning teleobjektiivid ei pruugi kõike mahtuda pildile (Zmejevskis, 2023).

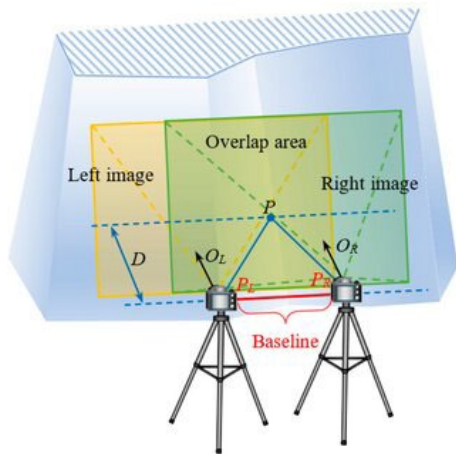
Digiteerimise eesmärk on digitaalsete koopiade saamine, mis tähendab, et tuleks kasutada võimalikult kõrgeid kvaliteediparameetreid (Konsa, 2019). Hea foto saavutamiseks on oluline tähelepanu pöörata neljale asjaolule:

- 1) vaateväli (ing k *field of view*) – määrab kui suur on kaamera vaateväli ehk kui palju kaamera näeb ning see sõltub objektiivi fookuskaugusest ja sensori suurusest (Joonis 12);
- 2) teravussügavuse ulatus (ing k *depth of field*) – tähendab seda, milline osa fotost on terav ning milline osa udune. Teravussügavuse ulatust saab mõjutada avasuuruse

- muutmisega (Geodetic Services Inc., n.d.) Väiksem avasuuruse number tagab suure teravussügavuse. Fotogramm-meetria meetodiga töötades on kvaliteetse tulemuste saamiseks ja töö lihtsustamiseks oluline, et objekt on piltidel kogu ulatuses terav;
- 3) säriaeg (ing k *shutter speed/ exposure*) – mis tähendab aega, mille jooksul valgus langeb sensorile ehk ajaintervalli kui kaua on kaamera katik avatud. See määrab kui hele või tume pilt on. Pikem säriaeg laseb sisse rohkem valgust muutes pildi heledamaks, samas kui lühem säriaeg vähendab valgust, muutes pildi tumedamaks.
 - 4) ISO arv on pildimüra minimeerimiseks ja määrab ära kaamera valgustundlikkuse.
- (Vision Aerial, 2022)



Pildistamise ajal tuleb jälgida, et fotod saaks tehtud eri kaugustest ja nurkadest, kattes ära kõik objekti küljed. Fotod tuleb teha sellise kattuvusega, et vähemalt 60-80% igast järgnevast pildist kattuks eelmisega (FormLabs, 2024). Õige tasakaal piltide kattumisel ei taga mitte ainult täpsust, vaid mõjutab ka järeltöötamise tõhusust. Liiga suur kattumine loob väga suure andmemahu, mis aeglustab töötlemist ja loob müra, samas kui kattuvus on vähene või puudulik, see võib põhjustada halva kvaliteediga mudeli (Walker, 2024). Objekti pöörleva aluse peal pildistades on vaja alust keerata iga 5–15 kraadi järel 360 kraadi (Holmes, mai 2024). Täpse ja hästi rekonstrueeritud 3D-mudeli määrab ära fotode kattuvus eelmisega, mitte fotode hulk.



Joonis 13 Kattuvusala kahe pildi vahel. Allikas: *Identification of the Potential Critical Slip Surface for Fractured Rock Slope Using the Floyd Algorithm*

Pildistamise puhul on valguse jälgimine ülioluline. Pildistamisel on oluline stabiilne valgustus. Fotod ei tohiks olla üle- ega alavalgustatud, sest pimedad varjud ja ülevalgustatud alad võivad töötlemisel varjata olulisi detaile. Päike tekitab esiletõstetud ja tugevaid varjusid, seega eelistatud on hajutatud valgus. Pimedas pildistamine välistab kontrollimatut ümbritsevat valgust. Ringvalgusti tagab kaamera vaateväljas ühtlast valgustust. Polariseerivate filtrite kasutamine nii valgusallikal kui ka kaamera objektiivil kaotab peegeldused. Ristpolarisatsioon on tehnika, meetod, mille kaudu filtreeritakse polariseeritud valgus (Zmejevskis, 2023).

1.3.3 Andmete töötlemine

Fotogramm-meetria andmetöötlus hõlmab fotode teisendamist 3D-mudeliks. Andmete töötlusprotsess käsitleb mitut põhietappi: eeltöötlus piltide importimist, nende joondamist, võrkumodeli loomist ning tekstuuride lisamist võrkumodelile selle realistliku esitluse tagamiseks. Nende etappide sooritamiseks kasutatakse selleks otstarbeks loodud tarkvaraprogramme, nagu Agisoft Metashape, RealityCapture, Autodesk ReCap, Meshroom (FormLabs, 2024).

Igal fotogramm-meetria jaoks mõeldud tarkvaral on omad tugevad ja nõrgad küljed. Fotogramm-meetria tarkvara jaguneb tavaliselt tavatarbijatele ja professionaalidele mõeldud programmide vahel. Tavakasutajale on mõeldud programmid, nagu Qlone, COLMAP, mis on kasutajasõbralik ja lihtsustatud töövooga, mis võimaldab harrastajatel hõlpsalt luua 3D-

mudeleid. Need programmid sobivad hästi väiksemate projektide jaoks ja ei vaja spetsiifilisi tehnilisi teadmisi (FormLabs, 2024).

Professionaalsed fotogramm-meetria programmid, nagu Agisoft Metashape, RealityCapture, AutoDesk ReCap, pakuvad palju täpsemaid ja paremaid tööriista funktsioone, mis on vajalikud mitmekülgsemate ja suuremate projektide jaoks. Need programmid toetavad kõrgresolutsiooniga andmete töötlemist, võimaldavad teha detailseid andmetöötlusi. Professionaalsed programmid nõuavad tihti põhjalikumat koolitust ja suuremat arvutivõimsust, kuid pakuvad suuremat täpsust ja mitmekülgseid võimalusi (FormLabs, 2024).

1.3.3.1 Andmete eeltöötlus

Andmete töötlemiseks fotogramm-meetria tarkvaraga on kõigepealt vaja neid eeltöödelda. Eeltöötlemine hõlmab fotoandmete korrastamist, sealhulgas näiteks ebaoluliste tulemuste (hägused pildid) eemaldamist, värviparandust, objektiivi poolt moonutuste korrigeerimist. Piltide eeltöötluks võib kasutada vastavaid programme nagu Adobe Photoshop või Lightroom. Lightroom annab võimaluse rakendada kõikidele piltidele korruga ühtseid muudatusi. Seega, kui on andmekorjest tekkinud üle mitmesaja pildi, annab Lightroom võimaluse särituse, kontrastsuse, valge valguse tasakaalu ja pildimüra vähendamist korruga kõikidele piltidele kohandada.

Andmete eeltöötluks on oluline eksportida töödeldud pildid ühtses vormingus ja resolutsioonis. Seejärel on oluline ka varundada ja süstematiseerida fotod ehk kaustad sildistada arusaadavalt, et tagaks hõlpsa juurdepääsu kõigile. Fotode hoolika eeltöötluks saab parandada tarkvaraprogrammi imporditud andmete kvaliteeti, mille tulemuseks on parem joondus, täpsemad sügavuskaardid ja kvaliteetsem 3D-mudel.

1.3.3.2 Piltide joondamine

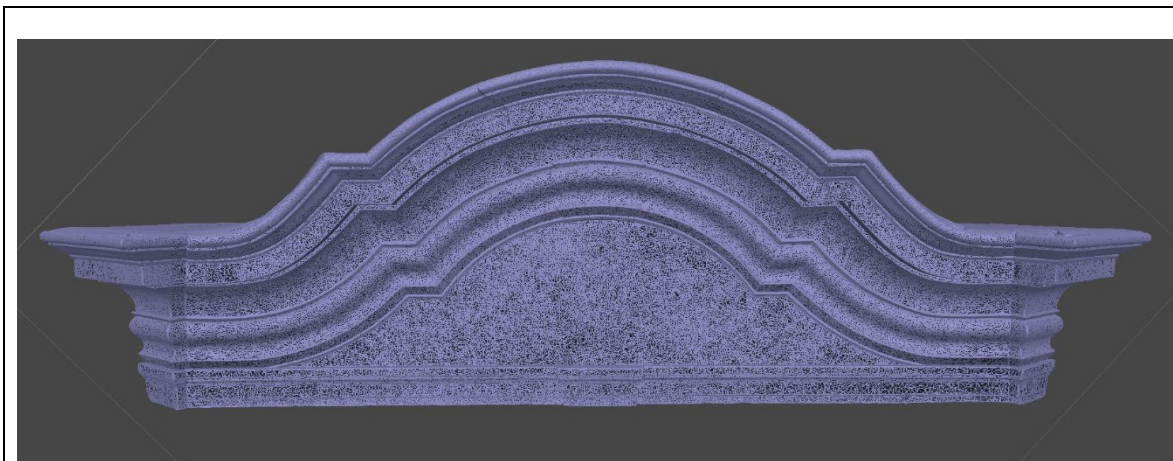
Kolmemõõtmeliste piltide tuletamine või mõõtmine nõuab objektist mitut pilti. Seda nimetatakse *structure from motion* ehk kaamera liikumisstruktuuriks. Protsess hõlmab kaameraga tehtud piltide liikumise rekonstrueerimist kolmemõõtmelises ruumis (Joonis) (Anette Eltner, 2020). Programm saab teavet tehtud piltidelt ja analüüsib neid vastava algoritmiga. See tähendab, et ühe pildi põhjal ei saa 3D-mõõtmisi tuletada.

Programmis piltide joondamise puhul on olulised sidepunktid (ing k *tie points*), mis on niioelda tuvastatavad tunnused või orientiirid objektist tehtud mitmetel pildidel. Need punktid on võrdluspunktid, mis aitavad fotogramm-meetria või 3D-mudeli loomise käigus erinevaid pilte joondada ja sobitada. Sidepunktid on olulised loomaks mitmest pildist täpset 3D-mudelit (Catalyst Earth, 2024).

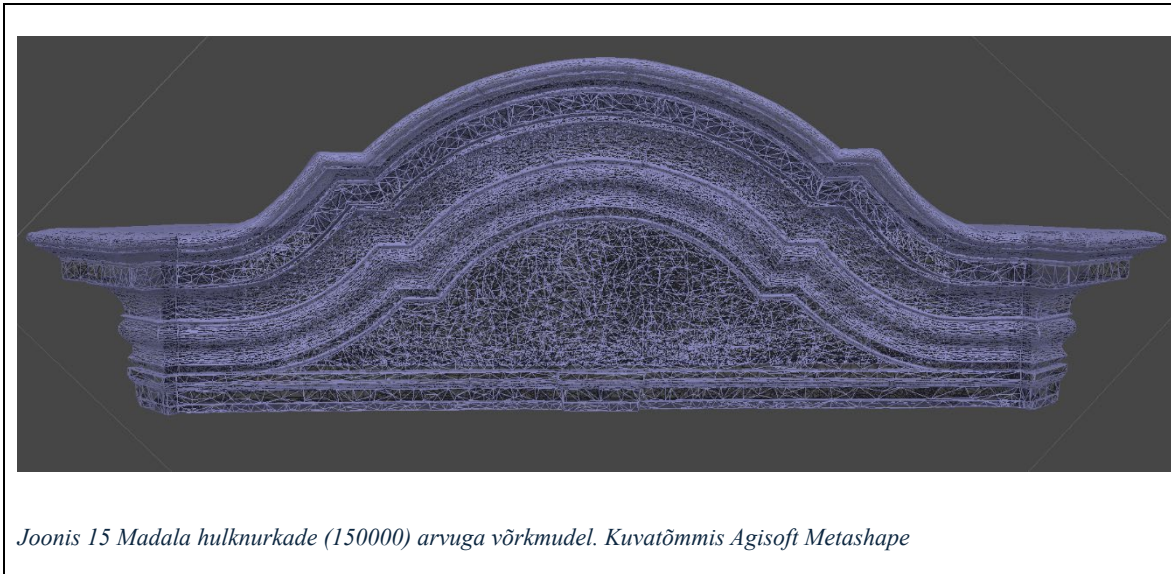
1.3.3.3 Võrkmodeli loomine

Võrkmodel on objekti pinna geomeetria, mis luuakse sügavuskaartidest (ing k *depth maps*). Sügavuskaardid kirjeldavad teavet objektide kauguse kohta konkreetsest vaatenurgast (nt kaamera objektiivist). Igale pildi pikslile määratakse väärtus, mis tähistab selle piksli kaugust võrdluspunktist. Loodud võrk koosneb omavahel ühendatud hulknurkadest (Looking Glass Factory, 2024).

3D-mudeli loomise puhul on kasutusel nimetus inglise keeles *poly* ehk *polygon*, mis tähendab hulknurka, mille põhjal 3D-mudel on üles ehitatud. 3D-mudelite puhul käivad kaasas mõisted: kõrge või arvukas (Joonis 14), keskmine ja madal või väike hulknurkade arv (Joonis 15) (inglise keeles *high, medium ja low poly*), mis kirjeldavad 3D-mudeli detailsuse taset selles sisalduvate hulknurkade põhjal.



Joonis 14 Kõrge hulknurkade (1,5 miljonit) arvuga võrkmodel. Kuvatõmmis Agisoft Metashape



Joonis 15 Madala hulknurkade (150000) arvuga võrkudel. Kuvatõmmis Agisoft Metashape

Arvukate hulknurkade tulemuseks on kõrge detailsuse tase. Neid mudeleid kasutatakse tiptasemel visualiseerimiseks, kus realistlikkus ja detailsus on väga tähtsad. Näiteks vajab konservaator või uurija kõrgkvaliteedilist mudelit, et paremini hinnata objekti kahjustusi ja geomeetrilist pinda ning saada detailse ülevaate objekti seisukorrast. Kõrge hulknurkade arvuga mudelite töötlemine või (3D-)renderdamine² on ajakulukam ning sujuvaks kuvamiseks ja töötlemiseks on vaja võimsat riistvara.

Keskmise hulknurkade arvuga 3D-mudelid on mitmekülgsemad ja sobivad hästi rakendustes, kus on vaja tasakaalu detailide ja jõudluse vahel. Samamoodi saab neid mudeleid kasutada hoonete digitaalseks rekonstrueerimiseks. Need pakuvad piisavalt detailsust, et edastada pärandi põhiomadusi ja on samas tõhusad visualiseerimiseks või muuseumi virtuaaltuuride jaoks.

Väikse hulknurkade arvuga mudeleid kasutatakse tavaliselt reaajas kuvavates rakendustes (nt videomängud). Kuna mudelite lihtsustatud geomeetria ja detailide vähesuse tõttu on kuvamine ja protsessimine efektiivne ja kiire, on need mudelid eriti sobilikud interaktiivsete rakenduste jaoks.

Loodud võrkudel võib vajada ka täiendamist või parandamist, kui eelnevate etappide käigus on midagi valesi läinud. Parandusi saab teha samas tarkvaras või ka eksportida

² Renderdamine on arvutiprogrammis toimuv protsess, kus graafilisest mudelist genereeritakse kahe- või kolmemõõtmeline kujutis (Wikipedia, 2024).

edasiseks redigeerimiseks teise 3D-modelleerimistarkvarasse nagu Blender, Autodesk Maya või ZBrush.

1.3.3.4 Tekstuuri lisamine

Kui võrkudel on loodud ja vajadusel korrastatud, saab objekti pinda tekstureerida tehtud piltide kaudu ning luua realistlik visuaalne 3D-mudel. Selles etapis kasutatakse tekstuuride täpseks kaardistamiseks mudelivõrgu pinnale piltide joondusandmeid ja sügavuskaarte.

Tekstuuri loomisel on olemas erinevad valikud, peamised on tekstuuuri kaardistamise (ing k *texture mapping mode*) ja segamisrežiim (ing k *blending mode*) kaks peamist tüüpi tekstuure plaaditud ja ainulaadsed tekstuurid. Kaardistamise režiimides on näiteks üldine kaardistamine, mis kasutab sujuvate üleminekutega üksikasjaliku tekstuuuri loomiseks mitut pilti. Ortofoto kaardistamine, mis projitseerib tekstuure ühest vaatepunktist, kasulik maastike puhul. *Single image mapping*, mis kasutab ühte pilti kogu tekstuuuri jaoks. Segamisrežiim määrab ära, kuidas kattuvaid pilte lõpliku tekstuuuri loomiseks kombineeritakse. See on oluline, kuna mitu pilti katavad tavaliselt mudelil sama ala ja segamine aitab luua sujuva ja ühtlase tekstuuuri.

Teine etapp hõlmab tekstuuuri suuruse ja arvu määramist. Tekstuuuri suurus tähendab genereeritavate tekstuurikaartide resolutsiooni. Tekstuure genereeritakse pildi formaadis. Seda mõõdetakse pikslites (nt 1024x1024, 2048x2048, 4096x4096, 8192x8192 jne ehk 1K, 2K, 4K või 8K). See suurus näitab, kui palju detaili igal tekstuurikaardil on. Kõrgem eraldusvõime annab detailsemad ja realistlikumad tekstuurid, kuid nõuavad rohkem töötlemisaega ja salvestusruumi. Sobib mudelitele, kus detail on oluline ja kus lähivaated on olulised, näiteks kultuuripärandi objektide puhul.

Tekstuuuri arv tähendab, et mitu tekstuurikaarti luuakse. Kui see arv on üks, siis tähendab, et kogu mudel on kaetud ühe suure tekstuurikaardiga. See on tõhus lihtsa visualiseerimise jaoks. Mitu tekstuuuri tähendab, et mudel on jagatud mitmeks osaks, millele igaühele määratakse tekstuurikaart. See võimaldab kõrget detailsuse taset.

Näiteks kaheksa tekstuurikaarti suurusega 8192x8192 pikslit, annab väga suure detailsuse, kuid failimaht on suur ning on vaja hea võimekusega arvutit. Seega on oluline teada, kus ja milleks 3D-mudelit kasutama hakatakse.

1.3.3.5 Eksport

Loodud 3D-mudel tuleb viimase etapina eksportida vastavasse failivormingusse, et seda saaks vastavas rakenduses või programmis kasutada järgneva otstarbe jaoks, nagu näiteks analüüsimine, rekonstruktsioon, visualiseerimine.

Mudeleid saab eksportida erinevatesse failivormingutesse. Levinumad on:

- OBJ: laialdaselt kasutatav ja toetab tekstuure
- FBX: levinud animatsioonis ja mänguarendustes
- PLY: toetab geomeetriat kui ka värviteavet
- STL: kasutatakse peamiselt 3D-printimisel ja ei toeta värve

Salvestamiseks on oluline kaustad süstematiseerida ja tähistada ning valida koht kuhu soovitakse eksportitud failid salvestada. Kontrollida ka ühilduvust, et kas ekspordivorming ühildub tarkvara või platvormiga, mida soovitakse kasutada. Veebi- või reaalajas rakenduste jaoks eksportida madala kvaliteediline mudel.

1.4 Andmete kasutamine

Pärast andmete kogumist ja protsessimist ning eksportimist saab tulemust ehk 3D-mudelit analüüsida, visualiseerida, jooniseid ja profiile koostada, parandusi ja rekonstruktsioone teha. Mudeleid saab kasutada erinevates valdkondades, sealhulgas arhitektuuris, arheoloogias, kunstis, kultuuripärandi valdkonnas. Peamiselt on kaks põhilist sihtgrupp, kes mudeleid kasutavad: professionaalid ja tavakasutajad.

Fotogramm-meetria või muude meetoditega loodud 3D-mudeleid saab integreerida muuseumi või muude kultuuripärandiga tegelevate asutuste veebilehtedele või rakendustesse. Võimalus on saadud 3D-mudelit kasutada integreerides olemasolevate süsteemidega, näiteks Muuseumite infosüsteem (MuIS).

1.4.1 3D-mudelite kasutamine kultuuripärandi valdkonnas

3D-mudeleid on aastakümneid kasutatud eriefektide jaoks kinos või videomängudes ning kasutatud ka kultuuripärandivaldkonnas, kuid palju harvem. Nüüd viimasel kümnendil on tehnoloogia arenguga tulnud palju muudatusi ning aina enam luuakse kultuuripärandi

valdkonnas 3D-mudeleid edaspidise analüüsimise tarvis. Näiteks konservator saab 3D-mudelite abil tuvastada objektil kulumisi, deformatsioone ning muid kahjustusi.

3D-mudeleid saab viia CAD programmidesse, kus erialaspetsialistid saavad teha objekti kohta analüüsi. CAD (*Computer-Aided Design*) tähistab arvutipõhist disaini, mis hõlmab arvutitarkvara programmide kasutamist, teatud protsessi abistamiseks. Mõned neist on üldotstarbelisema kasutusega ja mõned mõeldud spetsiifiliselt arhitektuuri, ehitus, mehaanika ja ka kultuuripärandi jms valdkondade kasutajate jaoks. CAD programmid võimaldavad 3D-mudeli puhul luua profiililõikeid. See võib olla kasulik konservatorile keerukate osade või struktuuri visualiseerimiseks. CAD võimaldab teha 3D-mudelil täpseid mõõtmisi ja mahu arvutusi. CAD programmides kasutatakse virtuaalse rekonstrueerimise puhul, näiteks ohustatud või peaaegu hävinud kultuuripärandi objektide puhul võib 3D-mudel olla vajalik osalise või täieliku rekonstrueerimise jaoks. Näiteks, kui esemel on osa puudu või kahjustunud, on võimalik luua kontseptsioon, kuidas võiks see puuduv osa välja näha. Sel puhul on võimalik jooniselt või fotolt luua 3D-mudelile rekonstruktsioon.

3D-mudelid on väga head visualiseerimiseks. Näiteks muuseumid loovad 3D-mudeleid mitte ainult põhjalikuks analüüsiks, vaid ka selleks, et pakkuda tavakülalastajale virtuaalsete võimaldades neil uurida ajaloolisi esemeid. 3D-mudeleid saab vastavale platvormile üles laadida, kus 3D-modelit on võimalik kõikidest külgedest vaadata ja uurida. (link Briti muuseumi Sketchfabile)

1.4.2 Märkesüsteem 3D-mudelil

3D-mudelite puhul on olemas traditsioonilise graafilise markeerimise asemel märkimissüsteemid, mis võimaldavad kasutajatel asetada interaktiivseid markereid, mis sisaldavad teksti, pilte või linke, mõõtmisandmeid jms otse mudeli teatud osadele, kuid ei ole selle tegelik osa. Märkimissüsteeme või märkimist nimetatakse või viidatakse paljudel veebiplatvormidel ja tarkvaraprogrammides sõnaga „annotatsioon“.

Traditsiooniline graafiline dokumentatsioon on objektist üksikasjalike jooniste või visandite loomine käsitsi või ka digitaalsete programmide abil. Dokumendiga kaasneb legend vastava märgi või värviga tähistatu seletamiseks. Nüüd on selle vabakäelise markeerimise asendanud arvuti, kasutatakse näiteks Photoshopi, AutoCADi või muid sarnaseid programme (Hilkka Hiiop, 2017)

Eestis üks toimivaid programme muuseumitöötajatele, kus saab märkida vajalikku teavet ja graafiliselt kahjustusi on GRADOC. See siiski ei paku 3D-mudelil märgistamist, kuid võimaldab digitaalselt arhiveerida ja töödelda konserveerimisega seotud visuaalinformatsiooni fotodel (Hilkka Hiiop, 2017).

3D-mudelil, kombineerides tekstilisi ja visuaalseid elemente, võimaldavad märkimise süsteemid kasutajatele rikkalikemaid kogemusi ja aitavad kaasa laiemate pärandi säilitamise ja hariduslike eesmärkide saavutamisele. Need on oluline osa ajalooliste esemete ja paikade mõistmise, säilitamise, konserveerimise ja juurdepääsetavuse parandamisel.

Märgete lisamise eeliseks on 3D-mudelitel see, et võimaldab näha märkusi erinevate nurkade ja suunitaseme pealt. Näiteks graafilise markeerimise või märgistamise abil saab visualiseerida objekti tehnilist seisukorda, kahjustusi või läbiviidud konserveerimistööd. Märgistamine toob tavaliselt esile olulisi tunnuseid, mis lihtsustab seeläbi objektist arusaamist ja tõlgendamist.

Tänapäeval on suunatud tähelepanu mitmekülgsematele digiarhiividele, mis pakuvad 3D-vaatuid ja nendele on integreeritud võrdlus- ja uurimistööriistu ning saab teha semantilisi otsinguid (Loes Opgenhaffen, 2024). 3D-mudelite märkimiseks on saadaval erinevad tarkvaraplatvormid või 3D-vaaturid erinevate tööriista funktsioonidega. Nendeks võib olla Sketchfab, Nira.app, Blender, Autodesk Maya, 3DHOP, Potree ja CHISel.

Uurides ja tutvudes erinevate tarkvaraplatvormidega ja 3D-vaaturitega, selgus, et neid saab liigitada. 3D-mudelite annotatsioonisüsteeme saab klassifitseerida, lähtudes nende võimest tuvastada seoseid annoteeritud alade ja muude süsteemis olevate objektide vahel. Kaks peamist klassifikatsiooni on:

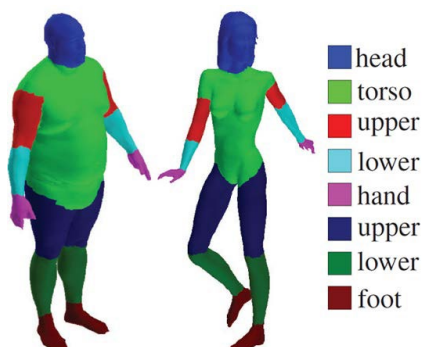
1. Sõltumatud annotatsioonisüsteemid – nendes süsteemides on annotatsioonid eraldiseisvad ega tunne ära ega seosta teisi 3D-keskkonnas olevaid objekte. Igat annotatsiooni peetakse isoleeritud teabeks, ilma mudeli muude osade kontekstist teadvustamata.

Näiteks Blenderis lisatakse märkused tavaliselt kindlatele aladele ilma automaatse kontekstita või seoseta teiste märkustega. Sketchfabis saab märkusi paigutada 3D-

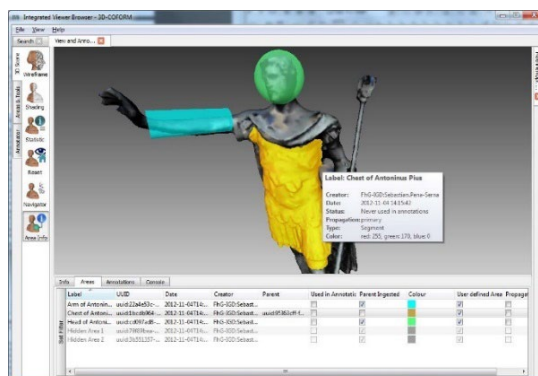
mudeli mis tahes ossa ja need toimivad samuti sõltumatute markeeringutena, millel puudub seos teiste märkustega.

2. Kontekstipõhised annotatsioonisüsteemid – need süsteemid on võimelised mõistma ja looma seoseid annoteeritud alade ja teiste süsteemis olevate objektide vahel. Need süsteemid võivad ruumiliste või semantiliste suhete tuvastamiseks kasutada andmestruktuure või algoritme.

3D-mudelite semantiline annotatsioon hõlmab tähendusliku teabe määramist 3D-mudeli erinevatele osadele (nt hoone osadele: seinad, aknad, ukсед) (Joonis 16), võimaldades objektide paremat mõistmist. Näiteks saab märkida ka objekti funktsionaalsed osad. Semantilised annotatsioonid lisavad metaandmeid, mis kirjeldavad mudeli erinevate komponentide funktsiooni, omadusi või kategooriat. Metaandmeid saab määratleda nende iga alamkomponendi kohta (nt kaal, materjal, funktsioon). Lõpuks võib automaatne segmenteerimine keskenduda nii struktuurikomponentidele kui ka palju peenematele omadustele, nt. peitlijälgede äratundmisele (F. Ponchio, 2019).

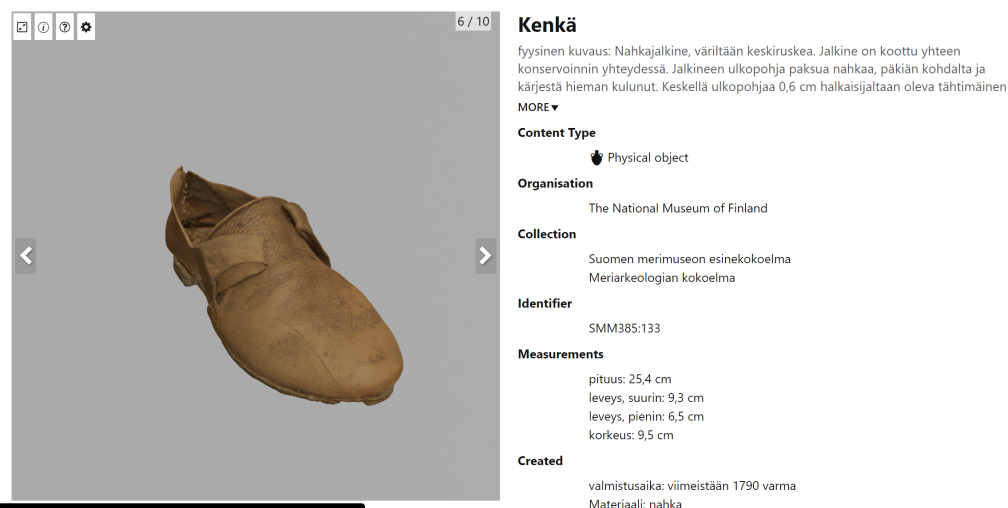


Joonis 16 Üks märkimisviise. Segmenteerimine inimese kuju järgi, klassifitseerides erinevad kehaosad. Pilt: Uurimistööst *Effective Annotation Over 3D Models*.



Joonis 17 Üks märkimisviise. Piirkonnad valitud Chisel süsteemis. Pilt: Uurimistööst *Effective Annotation Over 3D Models*.

Lähiriikide andmebaasidest on Eesti MuSile sarnaseimad Soome muuseumide infosüsteem Finna ning Leedu muuseumide infosüsteem LIMIS. 2016. aastal ei toetanud, aga Finna ega LIMIS 3D-mudelite kuvamist (Herm, 2016). Nüüdseks on Finna puhul olukord muutunud ning neil on olemas veebilehel 3D mudeli vaatur (Joonis 18). Siiski on Finna puhul saadaval hetkel, ainult 21 3D-mudelit. LIMISel ega Eesti MuSile vastavat 3D-vaaturit seni pole.

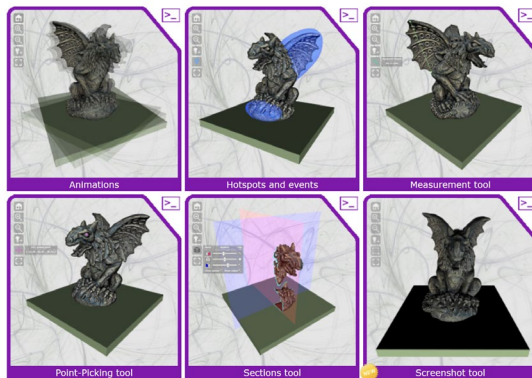


Joonis 18 3D-mudeli vaatur Finna lehel.

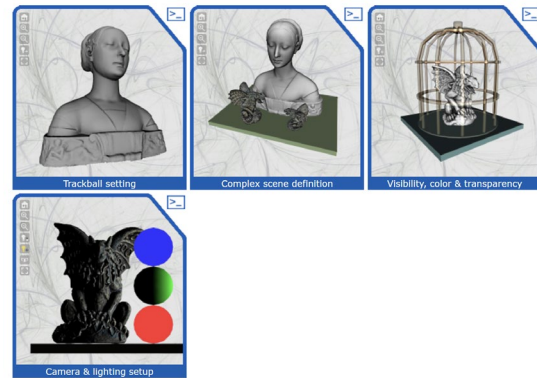
Finna.fi lehel 3D-vaaturis ei saa annotatsioone teha, kuid annab väga hea visualiseeringu 3D-mudelist. 3D-vaaturist saab näha hulknurkade arvu ehk kui hea kvaliteediga mudelit näeb. 3D-vaaturil on olemas materjali ja valguse funktsioonid, millega saab määrata valguse tugevust ja kontrasti.

3DHOP (*3D Heritage Online Presenter*) on itaallaste poolt välja töötatud 3D vaatur, avatud lähtekoodiga raamistik. Seda saavad muuseumid või teised kultuuripärandi valdkonna inimesed enda veebilehele lisada, kuid on vaja selleks IT-spetsialisti abi. Vaaturit on võimalik ka täiendada või kohandada vastavalt vajadusele, näiteks lisada navigeerimisnuppe, märkusi või mõõtmisfunktsioon. 3DHOPi vaatur toetab ka suure eraldusvõimega 3D-mudelite visualiseerimist, sh fotogramm-meetria, laserskaneerimise või muude 3D-skaneerimise tehnikate abil genereeritud mudelite visualiseerimist (3DHOP, 2024).

3DHOPi 3D-vaatur annab võimaluse laiaulatusliku tööriistakomplekti loomiseks 3D-vaaturisse, mis võimaldab konservatori jaoks üksikasjalikumad analüüsi tegemist 3D-mudelil. Platvorm pakub mitmeid täiustatud funktsioone, nagu kaamera ja valgustuse seadmine, tekstuuri eemaldamise võimalus, mõõtevahend, alade valik erineva värviga ja lõigete loomine erinevatel tasapindadel (Joonis 19, Joonis 20).



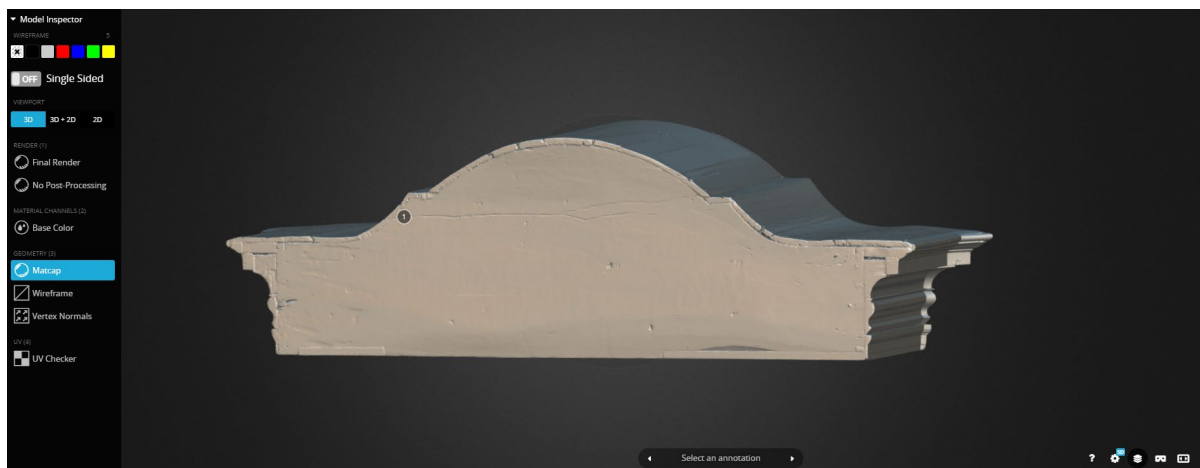
Joonis 19 Erinevad tööriistad, mida saab 3DHOPi 3D-vaaturile lisada. Kuvatõmmis veebilehelt 3DHOP.



Joonis 20 Erinevad tööriistad 3D-vaaturile lisamiseks. Kuvatõmmis veebilehelt 3DHOP.

Veebiplatvormil Sketchfab on võimalik lisada lihtsal viisil interaktiivsed märkeid. Need märked on numbrilised ja neile saab lisada teksti, pilte, linke. Need täiustavad vaatamiskogemust, juhataes vaatajat läbi mudeli, tuues esile olulisi funktsioone ning pakkudes selgitusi või taustateavet. Sketchfabi tugevuseks on ligipääsetavus ja kasutajasõbralik liides.

Sketchfabis on üks analüüsivahenditest uurija või konservatori jaoks *matcap* ehk *material capture* funktsioon mudeliinspektoris, mis võimaldab tekstuuri välja lülitada ja objekti pinna geometriat jälgida ja mudelil üksikasju rohkem esile tuua (Joonis 21). Näiteks nii on võimalik pinnal näha erinevaid lohke, kriimustusi kahjustusi, mida ei pruugi nii detailselt näha tekstuuri funktsiooniga. Sketchfabil on ka oma piirangud, näiteks puudub mõõtevahend, mis võib objekti analüüsimisel oluliseks osutada. Objektide suuruse tajut on võimalik ainult siis, kui mudeliga on üles laetud skaalariba või eraldi mõõteandmed.



Joonis 21 Sketchfabis matcap funktsioon, mille kaudu võimalik näha objekti geometriat. Kuvatõmmis: Sketchfab ERMi barokk-kapist.

CHIsel on kultuuripärandi infosüsteemi (ing k. CHIS) arvutiprogramm. See on loodud eksperimentaalse süsteemina, kultuuripärandi esemete ja paikadega seotud teabe haldamiseks ja ka annoteerimiseks ja analüüsimiseks. CHISeli teave on korraldatud punktidele viitavate kihtide komplektina museaali või artefakti pinnal (Joonis 17). Teabe haldamine tähendab redigeerimist, renderdamist, päringute esitamist, koostamist ja analüüsimist. See süsteem on kontekstipõhine annotatsioonisüsteem, kus võimalik andmetevahelisi seosed määrata (Torres, et al., 2024).

Nira.app on tarkvaraplatvorm, mis on loodud 3D-mudelite ja visuaalsete andmete haldamiseks, vaatamiseks ja redigeerimiseks. Selles tarkvaraprogrammis on võimalik üles laadida väga kõrge eraldusvõimega 3D-mudel, teha üksikasjalikku kontrolli, analüüsi ja dokumenteerimist. Kasutajad saavad samuti mudeli teatud osadele lisada erineval kujul märkusi. Võimalik on teha mõõtmisi ja märkida need 3D-mudelile (Nira, 2024). Nira.app-i kasutati ka lõputöö loodud 3D-mudeli dokumenteerimisel konservaatori varasemate ja hilisemate parandustööde näitamiseks.

1.5 3D-mudelite pikaajaline digitaalne säilitamine

Kuna meie ühiskond muutub üha enam sõltuvaks digitaalsest teabest, siis sellega ilmneb vajadus tagada digitaalsete varade pikaajalisus ja juurdepääsetavus (Konsa, 2019). 3D mudelite andmehõive ja loomise protsessi käigus kaasneb väga suur hulk andmeid ning oluline on nende õige ja efektiivne talletamine digihoidladesse või serveritesse.

Eesti muuseumite museaalide digitaalne arhiivindusmeetod on MuIS ehk Muuseumite Infosüsteem, kuid praegusel hetkel võimaldab see keskkond talletada vaid 2D kujutisi. Muinsuskaitseamet arendab uut MuISi, et tagada parem juurdepääs Eesti muuseumide kogudele ja luua muuseumidele nüüdisaegset tehnoloogilist lahendust, mis lihtsustaks kogude säilitamist ja haldamist. Muuseumikogude infosüsteemi arendusplaani lugedes jääb siiski arusaamatuks, kas lähitulevikus arendatakse ka võimalusi 3D-mudelite säilitamiseks. (Muinsuskaitseamet, 2024). Hetkel on Muinsuskaitseametil 3D-mudelid kultuuriväärtuslikest objektidest üles laetud Sketchfabi.

3D mudelite kättesaadavus veebis, ei ole piisav nende mudelite pikaajaliseks säilitamiseks ega arhiveerimiseks, isegi kui teha neist mitu varukoopiat. 3D-mudelite varundamine ehk säilitamine, töötlemine, haldamine ning see, kuidas neid on (kasutajatel) võimalik leida, kasutada ja taaskasutada, nõuab selget plaani juba iga projekti alguses. Toimiv pikaajaline säilitamine eeldab, et iga projekti puhul oleks kinnitatud milliseid vorminguid kasutatakse, kuidas andmeid varundatakse ja hooldatakse, samuti, kuidas finantseeritakse pikaajalisest säilitamisest tulenevaid kulusid (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

Digiteerimisprotsessist on mõistlik alles jätta nii palju andmeid, kui võimalik ja vajalik, kaasa arvatud töötlemata andmed. Digiarhiiv või server, kuhu digitaalseid andmefaile sisestatakse, peab olema vastuvõtmisvõimeline nende failide vormingule ja suurusele (European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana, 2020).

Andmefailide hulk ja maht võib oluliselt erineda sõltuvalt objekti suurusest, piltide kvaliteedist ja soovitud detailsuse tasemest. Ühe objekti 3D-andmed võivad ulatuda mõnest megabaidist mitme gigabaidini või isegi terabaidini. Lõputöö praktilise osa käigus tegin pilte nii JPG kui RAW failivormingus. Andmekorje puhul tuli andmemahu ligi 0,5 TB. Fotogramm-meetria tarkvaras loodud mudelite mahuks (koos tekstuuridega), mida sai eksporditud kolmes erinevas kvaliteedis ning nende andmete maht on kokku 2,9 GB (gigabaiti). Kapist loodud 3D-andmete maht on suur. Kui luua 3D-mudeleid näiteks 200, 500, 1000 või enama museaali jaoks, on oluline, et projekti käigus arvestataks selleks vajamineva andmeruumiga. Täpsemalt tuleb analüüsida iga andmekorje puhul tekkinud failisuuruseid, et määrata kindlaks tervikliku 3D-mudelite arhiivi salvestamiseks vajalik andmeruumi maht.

Tulevikku suunatud arhiivisüsteemid peaksid olema lihtsad ja paindlikud, mis on valmis tulevaste andmevormingutega hõlpsasti integreeruma. Tulevikku suunatud arhiivisüsteemid peavad olema paindlikud ja lihtsasti skaleerivad³, mis on valmis tulevaste andmevormingutega hõlpsasti integreeruma. Arhiivihoidlad, mis põhinevad analoogstruktuuridel on seega vaja uuendada, või modifitseerida, et sobituda 3D-andmetega/failivormingutega. Lihtsat ja paindlikku arhiivisüsteemi toetab *Open Archival Information System* (OAIS), mis on optimaalseks aluseks nii 3D-andmete, kui ka muude tulevaste vormingute arhiveerimisele (Kruse, 2024).

³ Skaleeritavus (inglise keeles scalability) on süsteemi, mudeli, funktsiooni omadus tulla toime suurenenud töökoormusega (Investopedia, 2024). See on põhimõte, et süsteem peab olema laiendatav või taandatav nii, et antud vajadused saaksid võimalikult optimaalselt rahuldatud (arhitektuur, 2024).

2. 3D-MUDELI LOOMINE MUSEAALI NÄITEL

Lõputöö praktilise osa eesmärk oli luua lähifotogramm-meetria abil 3D-mudel Eesti Rahva Muuseumi kogusse kuuluvast hilisbaroksest kapist ERM D 15:168 (Joonis 22) (Sketchfabi link kapist loodud 3D-mudelile <https://skfb.ly/oVtAU>). Käesolevas peatükis kirjeldan kapi andmete kogumise protsessi ja andmete töötlust ning töödeldud andmete kasutust. Varasemalt olin fotogramm-meetria kokku puutunud minimaalselt, seega eesmärgi, tööprotsessi ja mudeli loomise juures oli suureks abiks lõputöö juhendaja Andrei Bljahhin, kes kogu töö vältel jagas oma teadmisi pildistamise ja andmete järeltöötamise kohta.

Hilisbarokne kapp on ostetud ERMile 1922. aastal ja ilmselt kuulunud Heinrich Nolkenile. Kapi valmistaja pole teada, kuid valmistamise aeg on dateeritud 1730-1750 aastatesse. Kapp on tehtud männist ja saarest ning kaetud pähkli ja juurpähkli vineeriga. Kapp on oma detailrikkuse poolest hea näide hilisbaroksest stiilist, kuna seda ilmestavad ornamentika, profiililiistud kapi ülemisel ja alumisel osal, ustel ning intarsia kaunistused ülaosal ja uste sisekülgedel. Objekt on peaaegu 300 aastat vana ning olnud erinevates keskkonnatingimustes, mis on oluliselt mõjutanud selle seisukorda. Kapp on deformeerunud, sellel on suured kuivamislõhed seintel, ustel ja jalgadel.

Käesolevat kappi on varasemalt Kõrgema Kunstikool Pallas Mööbliosakonna tudengite mõõdistuspraktika raames üles mõõdistatud, 2023. aasta suvel. Praktika raames sai kapp esmakordselt detailsemalt üles mõõdistatud ning tehtud dokumentatsioon. Samuti tehti kapi 3D-mudel AutoCAD programmis, kuid ei anna nii täpset visuaalset ülevaadet. Uurimistööl objekti valimisel oli võimalus selle kapi puhul jätkata täpsemat dokumenteerimist fotogramm-meetria meetodi abil.

Üksiti oli ERMi konservaatori Indrek Tirruli idee, et kapist tehtud 3D-mudelil oleks animeeritud video, mis kirjeldaks visuaalsel kujul selgelt kapi erinevaid osasid ja funktsioone. Kuna kapil on uste sisekülgedel intarsia ja ilusa graveeringuga lukuplaat, siis selline animeeritud visualiseering annaks edasi paremat arusaamist esemest, näiteks muuseumi külastajale, kes ei saa objekti oma käega katsuda ja uurida.

Kappi on aja jooksul erinevate konservaatorite poolt parandatud, mis võimaldas lõputöö puhul rakendada märgistamismeetodit 3D-mudelil, kus eriajastu parandustööd on võimalik

eristavalt märgistada. Parandusi sai märkida 3D-mudelil erinevate värvide ja aladena sõltuvalt tehtud parandustöödele



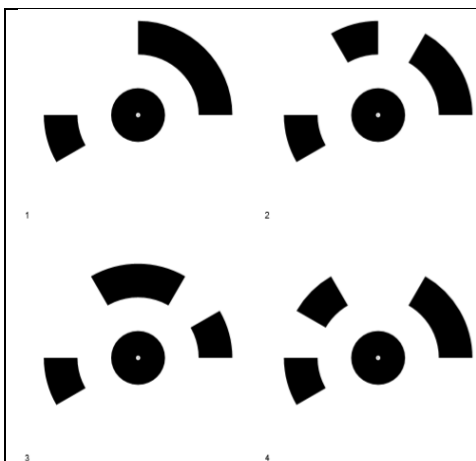
Joonis 22 ERMi kogusse kuuluva hilisbarokk-kapi rendertatud 3D-mudel. 3D-mudelid Meeli-Heli Lepna ja 3D-mudelid liitis kokku ehk 3D renderdus Andrei Bljahhin.

2.1 Andmehõive

Fotogramm-meetria protsess viidi läbi ERMi konservaatorite töökojas, kus kapp oli konserveerimis- ja restaureerimistöodeks osadeks võetud. Kapi osasid oli kokku 14 - ülemine ja alumine osa, kaks seina, kaks ust, kaks sahtlit, viis jalga ning võti. Kapil puudub tagumine sein. Tervikliku välimuse näitamiseks sai tagumine sein lisatud kapi juurde programmis Blender.

Andmekorje protsessis ehk pildistamiseks kasutasin 3Di/Hades Geodeesia firma poolt Sony $\alpha 7r2$ hübriidkaamerat, Sony kaamerale mõeldud Samyang AF 24-70 mm f/2.8 objektiivi, objektiivi jaoks Hoya ringpolariseerivat filtrit ja AR400 ringvälku, millel ees oli iseehitatud ringpolariseeriv filter. Võtme pildistamise puhul oli aga erand, see sai pildistatud Kõrgema Kunstikool Pallas Mööbliosakonnas, kus kasutasin osakonna kaamerat Canon EOS 90D ja statsionaarseid hajutatud valgusteid.

Fotogramm-meetria programmiga loodud 3D-mudel vajab reaalse mõõtkava loomiseks markereid. Markerid on mõõdetavad punktid (Joonis 23), mis pannakse pildistamisel objekti juurde. Lõputöös kasutasin Agisoft Metashape tarkvaraga ühilduvaid kodeeritud markereid. Enne andmekorjet paigutasin Agisoft Metashape kodeeritud markerid ehk märgised vastavalt pildistatava objekti lähedusse, et programmis panna ese täpsesse mõõtkavva (Joonis 24).



Joonis 23 Agisoft Metashape kodeeritud markerid. Allikas: Agisoft Metashape.



Joonis 24 Objekti kõrvale asetatud kodeeritud markerid. Foto: Meli-Heli Lepna

Esimesel andmekorje katsel viisin pildistamise läbi kapi jalgade, ülemise osa ja sahtlite dokumenteerimiseks. Selleks määrasin ava väärtuseks F5.6, säriajaks 1/200 sekundit ja ISO tundlikkuseks 100. Välgu võimsuse reguleerisin 1/4-le. Objektiivi fookuskaugus sai määratud 24mm peale. Esialgsete mudelite loomisel sai selgeks, et esimesed pildistamisparameetrid ei olnud piisavad ning vajasis järgnevate osade jäädvustamisel kohandamist. Selleks oli objektiivi ava vaja määrata niisugusele teravussügavusele, et objekt oleks iga nurga all fookuses, samuti tuli välgule võimsust juurde lisada. Uus ava suurus sai määratud F9.0, säritusaeg 1/160 sekundit, ISO tundlikkus jäi endiselt 100 peale ja välgu võimsust tõstsin 1/2 peale. Nende pildistusparameetrite muutmise tulemusena paranes oluliselt piltide kvaliteet.

Kapi jalgade, kui ka võtme puhul sai kasutatud objekti pööramise viisi ehk pöörleva laua meetodit. Jalad sai asetatud ükshaaval pöörlevale alusele ja pärast iga pildi tegemist tuli alust keerata 20° võrra, et teostada jala 360°-ne rotatsioon, ning et tagada piltide kattuvus omavahel. Kapi jala terviklikuks jäädvustamiseks ja ka mudelivõrgu täpsemaks loomiseks oli oluline pildistada seda erinevatelt kõrgustelt. Kuna jalgadel olid suured kuivamislõhed, oli nende täpsemaks jäädvustamiseks vaja teha väiksemate kraadinurkadega pöördeid kuivamislõhede koha juures. Iga jala jäädvustamiseks läks ligikaudu 15 minutit.

Võtme jäädvustamisel sai kasutatud sama meetodit nagu kapi jalgade puhul, kuid erinevuseks oli see, et võti oli kinnitatud pitskruidude vahele ja omakorda kaamera statiivile, mida kasutasin nii-öelda pöörleva alusena.

Suuremad kapi osad asetasin koos juhendaja või ERMi konservaatoritega, kas ratastega alusele, või pinkidele. Suuremõõtmeliste osade puhul kasutasin kaameraga ümber objekti liikumise viisi. Kapi osasid pildistasin kahes etapis. Pärast esimese poole pildistamist keerasin objekti ümber, et saaks jäädvustatud ka eseme teine külg. Suuremõõtmeliste osade puhul oli andmekorje ajakulukas ja osade objektide puhul tuli teha ka uuesti mõõtmisi piltide ebaõnnestumise tõttu.

2.2 Andmete töötlus

Andmete töötluseks ja 3D-mudeli loomiseks kasutasin programmi Agisoft Metashape 2.1.1 (professionaal versiooni) Windowsile. Enne piltide importimist eelmainitud programmi, liigitasin nii RAW kui JPG formaadis tehtud pildid kaustadesse. Seejärel kustutasin ebaõnnestunud (udused, valesti kadreeritud) pildid. Andmete töötluseks kasutasin Kõrgema Kunstikool Pallas arvutiklassi arvuteid.

Eeltöötlemise protsessile järgnes piltide töötlemine ja analüüsimine fotogramm-meetria tarkvaras. Andmete protsessimiseks kasutasin Agisoft Metashape tarkvara, ja valdavalt nelja põhitoimingut:

- 1) fotode importimist programmi (kaustade/gruppide tegemine),
- 2) fotode joondamist,
- 3) võrkmodeli loomist ja
- 4) tekstuuri loomist.

Esimeses etapis importisin JPG-failivormingus fotod programmi. Kuna pildistasin kapi osi mõlemalt poolt (näiteks ukse ülemine pool ja alumine pool), jaotasin imporditud fotod programmis gruppideks (Agisoft Metashape tarkvaras nimetusega *chunks*). Seejärel sai mudeli loomise töövooga alustada.

Töövoos esimene samm oli piltide joondamine. Fotode joondamise järel, või ajal loob Agisoft Metashape sidepunktide abil hõreda punktide kogumi. Need on punktid, mis on tuvastatud ja ühendatud mitmetelt piltidel. Sidepunktide korrasolek on esimene märge, kas joondamine õnnestus või mitte. Pärast joondamist kontrollisin tulemust üle, veendumaks, et selles ei esineks vigu. Samuti tuli üle vaadata ja teha vastavad parandused juhtudel, kui programm

polnud mõnda pilti joondanud. Joondamise protsessi tuli läbi viia kõigi loodavate gruppide puhul.

Joendusprotsessi järel panin objekti mõõtkavva. Andmekorje käigus objekti kõrvale lisatud spetsiaalsed Agisoft Metashape kodeeritud markerid tuvastas programm piltidelt automaatselt. Seejärel valisin markerilehel kolm punkti ja määrasin neile mõõtmed, mis olid eelnevalt nendelt markeritelt mõõdetud joonlauaga. Pärast joondamist lõin igast osast keskmise kvaliteediga võrkumodeli, kuna kõrgema kvaliteediga võrkumodelit polnud selle loomise esimeses etapis, enne tervikumodeli loomist, vaja.

Esialgse piltide joondamise ja võrkumodeli loomise järel andsin programmile käsu luua tausta eemaldamiseks maskid. Maskimise abil saab pildi teatud alasid eemaldada või juurde lisada – maskimine toimib nagu šabloon, võimaldades muuta pildi valitud osasid, jättes ülejäänud muutumatuks. Agisoft Metashape programm loob maske automaatselt juba programmi laetud piltidest, kuid on võimalus neid sisse tuua ka välistest allikatest (näiteks Adobe Lightroomi või Photoshopiga loodud maskid). Maskimine on kasulik joondamise ja võrkumodeli loomise täpsuse parandamiseks, vältides soovimatute või ebaoluliste osade kaasamist. Kuna mina andsin käsu programmile luua maskid programmis olevatest piltidest automaatselt, siis kõigi piltide puhul ei loonud programm neid õigesti, ja seetõttu tuli neid ise käsitsi muuta. Käsitsi maskeerimiseks tuli vastav foto avada (kus mask kuvatakse fotol varjutatud alana) ning märgistada soovitav ala spetsiaalse maskeerimistööriistaga vastavalt sellele, kas seda ala oli vaja objektile lisada, või eemaldada. Maskeerimine tehti enne kõrge kvaliteediga võrkumodeli loomist, kuna see ei olnud eelnevate etappide juures oluline. See protsess oli väga ajakulukas, kuna tuli seda teha kohati väga mitmete piltide puhul.

Järgnevalt tuli need grupid esialgse võrkumodeli loomise järel ühendada ning seejärel uuesti joondada, et saada objekti terviklik mudel. Siin oli suureks abiks eelnevalt loodud maskid, sest sai ära kasutada funktsiooni “*Apply masks to: Key Points*”, mis kasutab joondamisel ainult maskeerimata alas olevat pildi informatsiooni. Seejärel sain luua kõrge kvaliteediga võrkumodeli. Järgnevalt tuli samuti võrkumodel üle vaadata ja vajadusel teha vastavad parandused maskeerimise abil. Kui võrkumodeliga olin rahul, sai sellele luua tekstuuri.

Esimestel katsetel oli loodud tekstuur mõneti ebaõnnestunud ja mitterahuldav. Tekstuuri hägusus tulenes väikese teravussügavusega (F5.6) pildistamisest, mistõttu objekt ei olnud

kogu pildi ulatuses terav ning mõjutas seeläbi ka selge tekstuuri loomist programmis. Tekstuuri sai aga parandada uute maskide loomisega, kus programmi algoritm tekitas automaatselt maskid fookusest väljas olevatele aladele. Selline maskide loomise viis võimaldas hägusad alad enne tekstuuri tegemise protseduuri välistada.

Otsustasin luua kõrge, keskmise ja madala kvaliteediga mudelid. Võrkmodeli suurus oli paika pandud Sketchfabi võimekusest visualiseerida korraga optimaalselt 1,5 miljonilise hulknurga võrkmodeli, 8x8129 tekstuuri.

Nendele kolmele erineva kvaliteediga võrkmodelile lõin erineva resolutsiooniga tekstuuri. Kõrge kvaliteedilisele modelile lõin 8 tekstuurikaarti 8K, keskmisele 4x8K ja väiksele 1x8K (erand ülemise ja alumise osa puhul, kus 2x8K). Pärast tekstureerimist vaatlisin mudelit ja veendusin, et loodud tekstuuril ei oleks uduseid kohti. Kui siiski see probleem esines, tuli piltide seast otsida üles vastavad pildid ja need eemaldada ning tekstuur uuesti luua.

Viimases etapis, kui olin loodud võrkmodeli ja tekstuuriga rahul, ja ei olnud pinna geometria ja tekstuuriga probleeme, eksportisin need edasiseks kasutamiseks. Enne eksportimist valmistasin ette eksportimise kaustad mudelitele kolme erineva kvaliteediga. Mõtlesin välja vastava failinimetuse mudelite jaoks, mis näitaks vajalikke tunnuseid paremaks faili üles leidmiseks. Failinimetusse sai kirjutatud museaali nr, mis osa ta on, mis on tema hulknurkade arv ehk detailsus ning tekstuuri resolutsioon (nt ERM_D15-168_ylemine_osa_1,5M_8x8K).

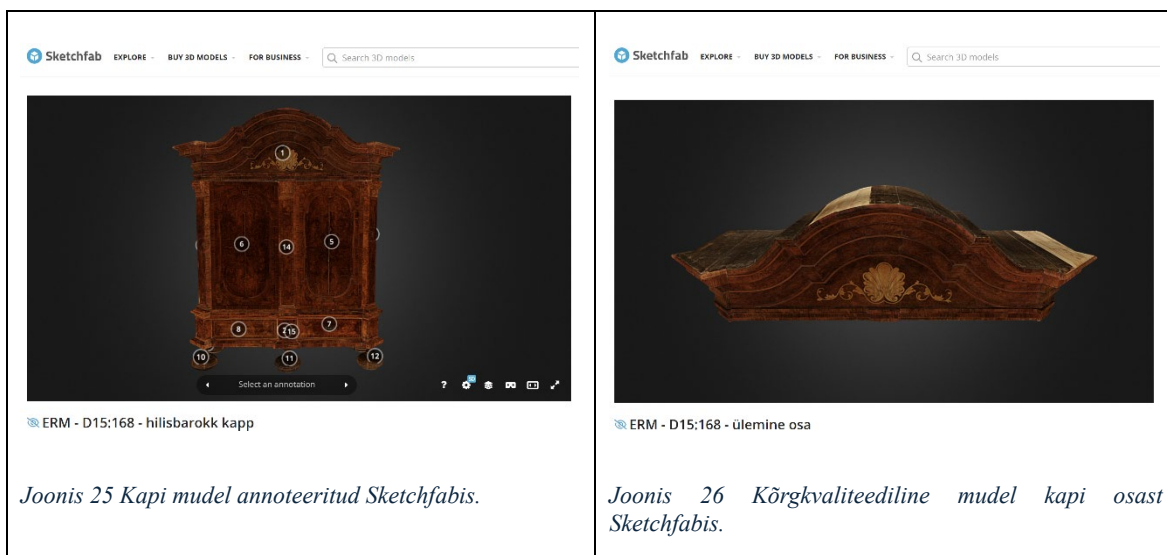
3. 3D-MUDELI TÖÖTLEMINE JA ANDMETE ANALÜÜS

Käesolev peatükk keskendub fotogramm-meetria abil loodud 3D-mudelite kasutusele ja analüüsile. Peatükk käsitleb 3D-mudelite kasutamist Blender, Sketchfab ja Nira.app tarkvarades. Teine alapeatükk käsitleb ka mudelite loomise käigus ilmnunud tehnilisi probleeme ja nende lahendamise protsesse.

3.1 Töödeldud andmete kasutus

Andmete töötlusprotsessis loodud 3D-mudel sai viidud erinevatesse keskkondadesse järeltöötamiseks, visualiseerimiseks kui ka konserveerimistööde dokumenteerimiseks.

Eksporditud mudelid toodi vabavaralisse tarkvaraprogrammi Blender edasiseks töötamiseks. Kuna kapid osad olid eraldi pildistatud ja neist kõigist eraldi loodi ka 3D-mudelid, siis oli vaja need osad kokku liita üheks tervikmudeliks. Mudeleid töötles lõputöö juhendaja Andrei Bljahhin, kuna minul ei ole vastavat erialast väljaõppet. Madala kvaliteediga kapi tervikmudel, 1,1 miljoni hulknurgaga laeti üles Sketchfabi keskkonda (<https://skfb.ly/oVtAU>) kasutaja 3Di kontole (Joonis 25, Joonis 26). Seal lisati iga osa juurde numbriline märg, mille kaudu pääseb ligi kapi osade kõrgkvaliteedilistele mudelitele. Samuti lõi lõputöö juhendaja kapist animeeritud video paremaks visualiseerimiseks (<https://skfb.ly/oVtAX>).



Koos ERMi konservaatori Indrek Tirruliga töötasin välja plaani ja kavandi, kuidas märkida konserveerimistööd 3D-mudelile. Konservaator soovis dokumenteerida ja märgistada kapile

tehtud varasemad ja hiljutised parandustööd. Konservator pakkus välja, et punane värv tähistaks viimati taastatud alasid, roheline varasemaid parandusi ning sinine näitaks neid alasid, kus väikesed pinnakahjustused on täidetud toonvahaga. Sel puhul laeti kõrge kvaliteediline 3D-mudel kogu kapist Nira.appi kahjustuste kirjeldamiseks. Nira.app laetud 3D-mudel kogu kapist oli 12,9 miljoni hulknurgaga ja tekstuure kokku oli 7,52 gigapikslit.



Joonis 27 Märgistatud alad konserveerimistöödest. Varasemad parandused rohelisega ja punasega viimati parandatud alad. Kuvatõmmis Nira.app.



Joonis 28 Märgistatud alad konserveerimistöödest. Kaod on täidetud toonvahaga. Kuvatõmmis Nira.app.

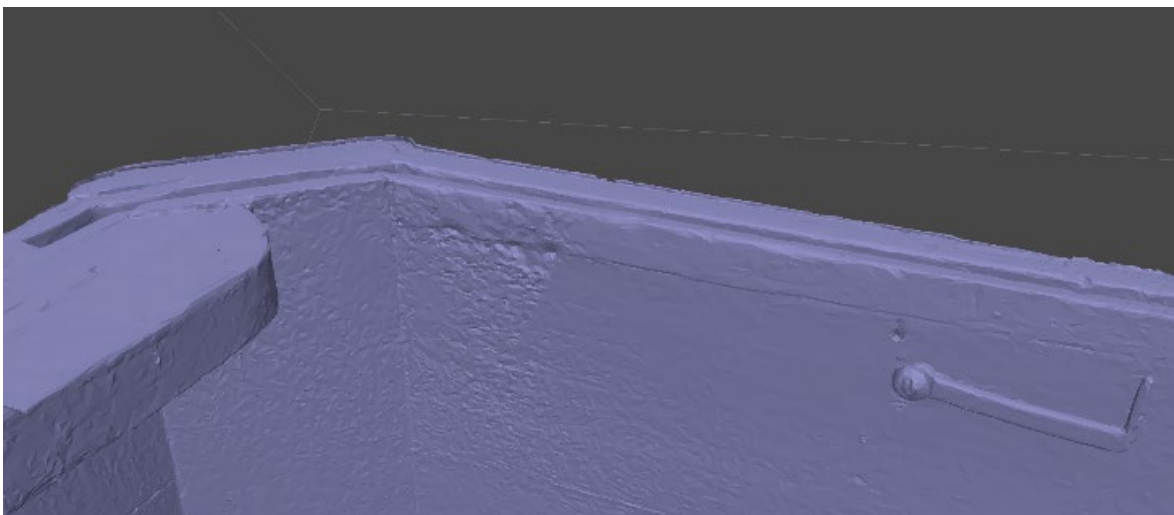
3.2 3D-mudeli analüüs

Fotogramm-meetria abil loodud 3D-mudeli tulemus sõltus mitmest tegurist ja asjaolust. Hilisbarokset kappi pildistati mitmel korral. Esimese pildistamise käigus ilmnnes, et mudeli loomisel on vaja muuta kaamera parameetreid, kuna valgust oli liiga vähe. Seega suurendati

ava arvu ja välgu tugevust. Lisaks tuli teha lisapilte järgnevate pildistuskordade ajal, kuna mõnes kohas olid pildid ebaõnnestunud esialgsete loodud mudelite põhjal.

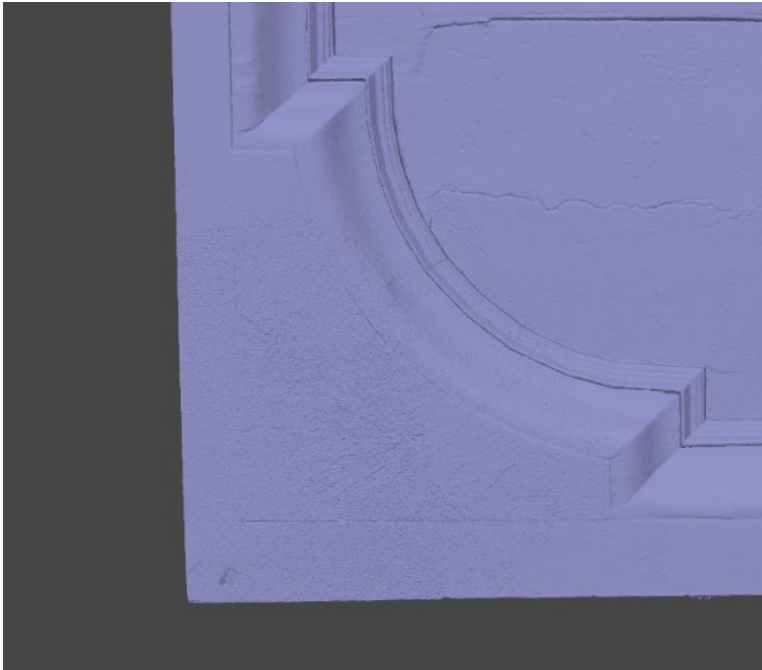
Üheks probleemiks osutusid kapi jalad. Kapi jalad on füüsilisel objektil visuaalsel vaatlusel üsna tumedad, kui loodud 3D-mudelil. Jalgade 3D-mudeli tekstuur tuli liiga hele ja andis ka ebakorrekse värvi. Kapi jalgu uuesti ei pildistatud ja kõigile piltidele sai tehtud järeltöötlus eraldi Adobe Lightroomi programmis.

Mudeli loomise ajal tekkis võrkudelil ja ka tekstuurimisel mitmeid probleeme. Teatud kohtades mudelil tekkis deformatsioon ehk serv tõusis üles (Joonis 28). Nende kohtade puhul oli märgata, et piisava katvusega pilte ei olnud tehtud, mis viis topelt servade loomiseni. Parema mudeli saamiseks tuli korduvalt maske korrigeerida, et mudelit parandada ja teha korduvaid joonduse ning võrkumudeli loomise protsesse, mis tegid mudelit lõppkokkuvõttes korrektsemaks.



Joonis 28 Alumine äär tõuseb üles kapi ülemise osa puhul. Kuvatõmmis Agisoft Metashape programmist.

Teiseks tehti kapi detailidest (lukuplaat, haagid, praod) rohkem ja lähedamalt pilte, kuid see osutus segavaks faktoriks ning tekitas võrkudelil kohati krobelse pinna (Joonis 29). See hõlmas erinevate piltide selekteerimist, mis võisid olla liiga lähedalt, madalalt või ebasobiva nurga alt/asendist tehtud ning nende kustutamist. See parandusprotsess muutus väga ajakulukaks, kuna õigete piltide leidmine polnud lihtne ning pärast piltide kustutamist tulid pildid uuesti joondada ning luua võrkumudel. Neid protsesse kordasin kõigil kapi osadel (v.a sahtlite ja võtme) mitmeid kordi kuni olin saavutanud parima võrkumudeli.



Joonis 29 Krobeline pind mudelil. Kuvatõmmis Agisoft Metashape programmis.

Heledad, tumedad, tekstuurita ja peegeldavad pinnad tekitavad nii fotogramm-meetria kui ka laserskaneerimise geometrias ja tekstuuris probleeme. Vasaku ukse sisekülje servas on tume laik (kas siis põletusjalg või mõni muu vigastus puidul, mis tekitab pinna värvuse muutumist). Esimese loodud võrkmodeli puhul tekkis sel alal nõ võõrkeha, kuna programm ei suutnud välja lugeda infot, mis asus sellel mustal alal. Skulptuuriosakonna 3D-meister Rasmus Eist, andis hea soovitus, et pilditöötlus programmiga töödelda nendel piltidel, kus on see tume ala, see koht heledamaks. See tähendas jällegi lisaamme. Otsisin kaustadest üles vastavad RAW failid ning töötlesin pildid heledamaks.

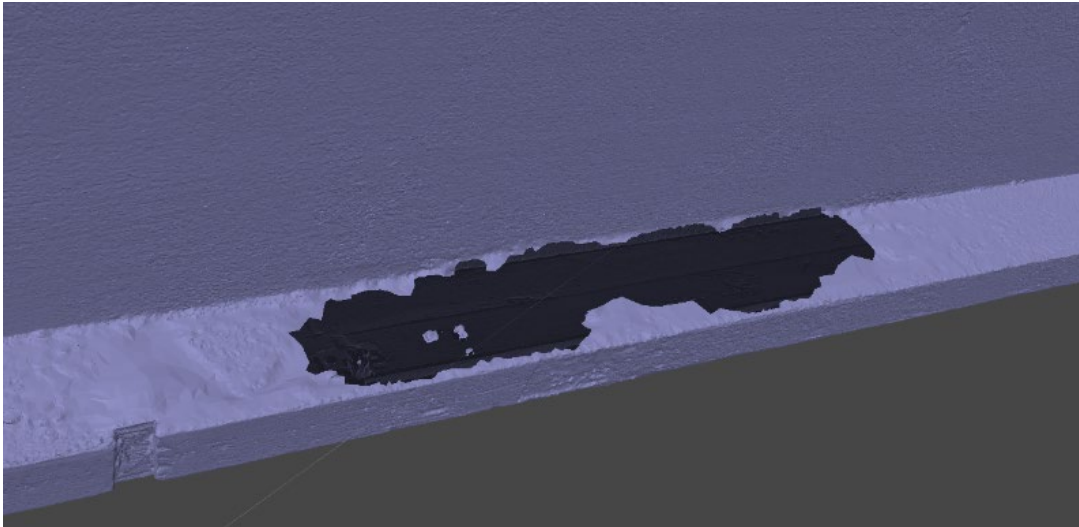
Tekstuuri osas tekkisid samuti probleemsed kohad. Programm loob tekstuuri võrkmodeli pinnale selle põhjal, mis infot ta piltidelt välja loeb. Seega kohati oli mudelitel näha uduseid alasid. Parema tekstuuri saavutamiseks pidi nende alade puhul pildid üle vaatama, kas on uduseid pilte, kus teravussügavus pole nii hea. Teiseks võib kapi sahtlite ja alumise osa puhul tekstuurile märgata roheline, mustade, punaste pindadega tekstuuri (Joonis 30). Sellised pinnad tekkisid seetõttu, et kaamera ei pääsenud ligi teatud kohtadesse ning programmil ei olnud infot, mis tekstuuri sinna peale kleepida. Seega, kui museaalide puhul on oluline täpne tekstuuri igas võimalikust osast, siis lahenduseks väiksematesse kohtadesse pääsemiseks on väiksem kaamera ja välg, kuid ikkagi soovitatud on täiskaader kaamera ja fikseeritud fookuskaugusega objektiivi kasutus.



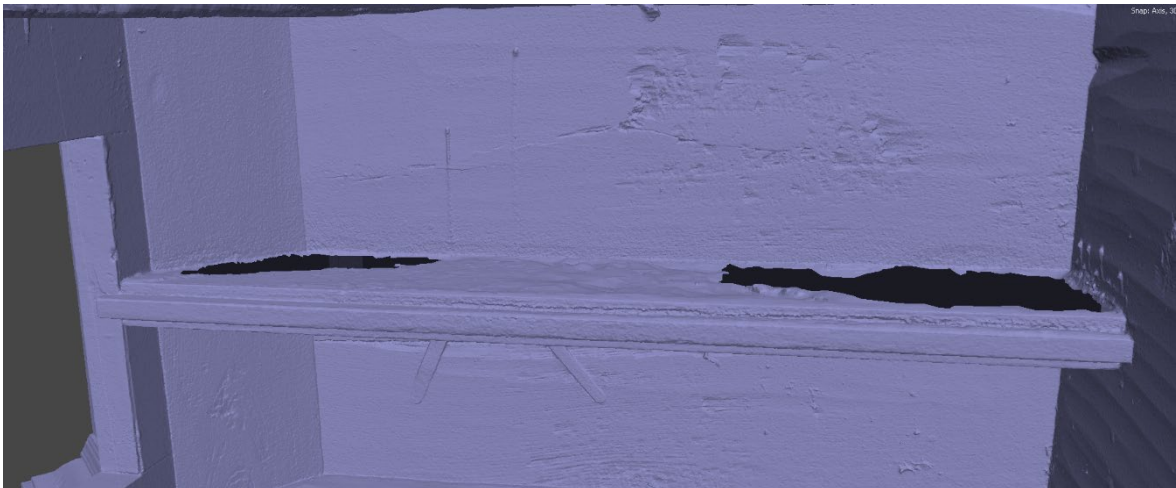
Joonis 30 Vigane tekstuur kapi alumise osa sahtli siini puhul, kuhu kaamera ei pääsenud ligi. Kuvatõmmis Agisoft Metashape programmist.

Kapil esinesid kuivamislõhed, mis läbisid objekti pinda. Kasutatud tehnika abil ei olnud võimalik jäädvustada kuivamislõhede sügavust või seda, et läbib pinda. Seega võib nimetada samuti fotogramm-meetria puudulikkust selliste kitsaste kohtade jäädvustamisel. Võimalus on modifitseerida või töödelda kuivamislõhesid eraldi järeltöötlusprogrammis pinda läbivaks, kuid ei pruugi olla kõige õigem lahendus. Kuna soovitakse näidata tõetruud mudelit museaalist, siis on parem mudelile mitte teha muudatusi, mis ei pruugi olla nii tõesed. Siinkohal on see uurimiskoht, kuidas fotogramm-meetriaga sellist probleemi lahendada.

Kapi ülemise ja alumise osa 3D-mudelitel tekkisid augud. See tähendas seda, kas oli tehtud liiga vähe pilte või kaamera koos välguga ei pääsenud ligi teatud kohtadesse. Need aukudega osad said parandatud Blender programmi abil.



Joonis 31 Augu teke kapi ülemise osa sisemisel serval vähese pildistamise tõttu. Kuvatõmmis Agisoft Metashape programmist.



Joonis 32 Augud kapi alumisel osal pildistamise piirangu tõttu, kuna kaamera ligipääs oli piiratud. Kuvatõmmis Agisoft Metashape programmist.

Programmis 3D-mudeleid luues on ajakulu mõttes mõistlik esimeste protsesside ajal kasutada madalaid seadeid, et näha kas mudel õnnestub. Kõrge kvaliteediga loodud mudel on andmemahult oluliselt suurem ja protsessimine võtab seega rohkem aega.

Programmide kiirus on seotud arvuti võimsusega. Andmete töötlemine tehti Kõrgema Kunstikool Pallas arvutiklassi arvutitega. Nende tehnilised näitajad olid Intel Xeon W-2133, 3,6 GHz, RAM 64GB, NVIDIA Quadro P5000, mille võimsused ei olnud sellise töö jaoks piisavad. Samuti tekkisid probleemid arvuti mälu. Agisoft Metashape professionaal versioon soovib täpsemaks konfiguratsiooniks arvutit võisusega alates 32-128 GB

RAMist, 6–32-tuumalist, 3,0+ GHz protsessorit (näiteks: Intel i7 / i9 või AMD Ryzen 7 / Ryzen 9) ja video/graafikakaardiga NVIDIA või AMD GPU-d (näiteks: GeForce RTX 3080 või Radeon RX6800 XT). Samuti oli probleemiks arvuti mälu. Ei saanud kõike pilte hoiustada ühes arvutis ning pidin pilte välisel kõvakettal hoiustama või ühest arvutist teise tõstma. Seega on vaja arvuteid, mis suudavad ressursinõudvamaid projekte käsitleda.

KOKKUVÕTE

Lõputöö käsitles 3D-dokumenteermise meetodit, peamiselt fotogramm-meetria ning selle rakendamist muuseumi objektide puhul. Eesmärk oli uurida, kuidas fotogramm-meetria abil museaalset 3D-mudeli loomine käib ja selle tööprotsessi ning seda, kuidas see saab toetada konservaatore tööd ja täiustada paremat kultuuripärandi säilitamist.

Fotogramm-meetria on 3D-dokumenteermise meetod, mis hõlmab mitme foto jäädvustamist objektist erinevate nurkade alt ja nende töötlemist spetsiaalse tarkvaraga, et luua täpne 3D-mudel. Fotogramm-meetria pakub mitmeid eeliseid, sealhulgas võimalust dokumenteerida objekte kontaktivabalt, mis on museaalide puhul eriti oluline. Protsessi põhietapid hõlmavad ettevalmistust, kaamera parameetrite õiget seadistamist, andmekorjet, andmete eeltötlust, töötlust ja mudeli loomist. Korralikult teostatud fotogramm-meetria tagab täpse ja detailse esituse 3D-mudelist, mida saab kasutada erinevates rakendustes, teadusliku analüüsi jaoks kuni virtuaalreaalsuse loomiseni.

Töö esimeses osas uurisin 3D-dokumenteermise ja digiteermise tähtsust ja olulisust kultuuripärandi säilitamisel. Muuseumid kasutavad 3D-dokumentatsiooni, et täiendada traditsioonilisi meetodeid ja parandada esemete säilitamist, konserveermist ja uurimist. 3D-dokumenteermine hõlmab füüsiliste objektide kolmemõõtmelist jäädvustamist ja nende digitaalsete mudelite loomist. Digiteermisprotsess hõlmab projekti kavandamist, teostamist, andmebaaside loomist ja pikaajalise jätkusuutlikuse tagamist. Peamiselt keskendusin fotogramm-meetria kui 3D-dokumenteermise meetodi kirjeldamisele, kirjeldades üksikasjalikult protsessi põhietappe alates andmekorjest kuni töövoole, andmete kasutamise ja säilitamiseni.

Teises osas kirjeldasin fotogramm-meetria meetodi rakendamist Eesti Rahva Muuseumi kogusse kuuluva hilisbarokse kapi ERM D 15:168 peal ja 3D-mudeli loomise protsessi. Fotogramm-meetria protsessi viisin läbi Eesti Rahva Muuseumis konservaatore töökogas, kus kapp oli lahti võetud 14-ks osaks. Seega sain kappi 3D-digiteerida väga üksikasjalikult ja detailselt, luues igast osast eraldi 3D-mudeli. 3D-mudeli loomisel kasutasin andmete töötluks Agisoft Metashape Professional tarkvara.

Kolmandas osas keskendusin 3D-mudeli kasutusvõimalustele, töötlemisele ja loodud 3D-mudeli analüüsile, kasutades tarkvaraprogrammi Blender ja veebis olevat 3D vaatlusplatvorme Sketchfabi ja Nira.app-i. 3D-mudelid liitis kokku üheks tervikmudeliks töö juhendaja Andrei Bljahhin programmis Blender. Kapist loodud 3D-mudelit saab uurida ja vaadelda Sketchfabis. Nira.app-is teostasın konserveerimistöde paranduste märkimise vastavalt ERMi konservatori Indrek Tirruli näpunäidetele.

Mudelite töötlemisel ilmnescid mitmed tehnilised probleemid nende geometria, kui tekstuuri pinna osas ning nende probleemide lahendamiseks tegin korduvalt piltide joendamist, võrkumudeli loomist ning ka pilditöötlust. Samuti ilmnescid fotogramm-meetria piirangud kitsaste ja tumedate kohtade jäädvustamisel. Eduka töötlemise tagamiseks olid olulised õiged kaamera parameetrid, täiendav pilditöötlus ning kõrge võimsusega arvutite kasutamine.

3D-mudelit ei tohi kasutada ainult ühel ainsal eesmärgil, vaid see peaks olema osa laiemast kultuuripärandisse kuuluvast digitaalsest süsteemist, mis võimaldab digitaalset teavet edaspidise uurimistöde ja levitamise otstarbel taaskasutada ja töödelda. 3D-tehnoloogiate puhul on terminoloogia selgus ja teadmiste jagamine muuseumi töötajatele väga oluline, et mõista virtuaalpärandi kasutusvõimalusi, nende eelseid ja edendada teadlikkust selle potentsiaalset.

Lõputöö andis mulle palju kogemust spetsiifilisest erialavaldkonnast, mille kaudu õppisin üksikasjalikult tundma fotogramm-meetria töö käiku ja selle tööprotsessi ning sain oluliselt rohkem teada 3D-mudelite olulisusest kultuuripärandi valdkonnas.

SUMMARY

The aim of the thesis „Application of photogrammetry for museum object conservation and documentation“ is to create a 3D model of a Late Baroque style cabinet owned by the Estonian National Museum using photogrammetry. In addition to creating the model, it addresses data acquisition, processing, and the possibilities and results of using processed data. The work aims to emphasize the importance and value of 3D digitization in Estonian museums.

Therefore, the thesis explores the important role of 3D documentation and digitization in the preservation of cultural heritage. Museums have started to use 3D documentation to enhance traditional methods, improving preservation, conservation, and research of museum objects by creating digital twins. The digitization process involves project planning, database creation, and ensuring long-term sustainability. 3D digitization is important for conserving and restoring endangered cultural heritage, providing virtual access to physically inaccessible objects, for example that it is too fragile to handle for large audience. Also protecting them from threats such as excessive degradation from handling the object, theft, war, climate change and natural disasters.

The primary focus of this thesis was on photogrammetry as a 3D documentation technique, outlining the main steps and creating a 3D model. Photogrammetry is a method of 3D documentation that involves capturing multiple photographs of an object from various angles and processing them with specialized software to generate accurate 3D models.

The second chapter covered data acquisition and creating a 3D model of a Late Baroque style cabinet (ERM D 15: 168). The cabinet was disassembled into 14 parts, allowing for detailed digitization. Agisoft Metashape Professional software was used for data processing to create individual 3D models of each component.

During data processing, technical challenges were encountered, requiring several repeated photo alignments and mesh model creations. Photogrammetry's limitations during data acquisition, particularly in narrow and dark areas, highlighted the need for different approaches.

The third chapter focused on the potential applications of the 3D model, the processing, and analysis of the generated 3D model using software programs such as Blender and online 3D

platform Sketchfab and Nira.app. The thesis supervisor, Andrei Bljahhin, combined the individual 3D models into a complete model using Blender. The final 3D model of the cabinet can be examined on Sketchfab, and Nira.app was used to mark conservation repair works based on Estonian National Museum conservator Indrek Tirrul's guidance.

The thesis gave me a lot of experience in a specific professional field, through which I got to know photogrammetry in detail, and I learned significantly more about the importance of 3D models in the field of cultural heritage.

KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

Nira [WWW] <https://nira.app/> (2024, mai)

Looking Glass Factory [WWW] <https://lookingglassfactory.com/blog/depth-map> (2024, mai)

3DHOP. 3D Heritage Online Presenter. [WWW] <https://3dhop.net/> (2024, mai)

4D Research Lab [WWW] <https://4dresearchlab.nl/3d-visualization/3d-recording/> (mai 2024)

Anette Eltner, G. S. (2020). Chapter 1 - Structure from motion photogrammetric technique. In Developments in Earth Surface Processes (pp. 1-24). Elsevier.

arhitektuur, M. j. MKM.ee [WWW] https://web.archive.org/web/20210111191541/https://www.mkm.ee/sites/default/files/riigi_it_arhitektuur.pdf (mai 2024)

Buck, R. A. (2010). History of Registration. In Museum Registration Methods 5th Edition (pp. 2-11). AAM Press.

C. Nicolae, E. N. (2014). Photogrammetry Applied to Problematic Artefacts. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5, lk 451-456.

Catalyst Earth [WWW] https://catalyst.earth/catalyst-system-files/help/COMMON/concepts/TiePoint_explain.html (mai 2024)

Champion, E. (2021). Preserving Authenticity in Virtual Heritage. In Virtual Heritage: A Guide (pp. 129-138). Ubiquity Press. [WWW] <https://www.ubiquitypress.com/site/chapters/10.5334/bck.1/download/4879/>

Eesti Entsüklopeedia. (2006). Allikas: projektsioon: [WWW] <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/projektsioon3>

Eesti Entsüklopeedia. (mai 2024. a.). Allikas: <http://entsyklopeedia.ee/artikkel/fotogramm-meetria1>

- European Commission's Expert Group on Digital Cultural Heritage and Europeana. (2020, September 11). Euroopa Komisjon. Retrieved from <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/basic-principles-and-tips-3d-digitisation-cultural-heritage>
- F. Ponchio, M. C. (2019, may). Effective Annotations Over 3D Models. Computer Graphics Forum, pp. 1-16.
- FormLabs. (2024, may). FormLabs. Retrieved from <https://formlabs.com/eu/blog/photogrammetry-guide-and-software-comparison/>
- Geodetic Services Inc. (n.d.). Geodetic Systems. [WWW] <https://www.geodetic.com/basics-of-photogrammetry/> (mai 2024)
- Herm, A. (2016). 3D ja seotud lahenduste kasutamise võimalused muuseumides: Eesti muuseumide näitel. Tartu: Tartu Ülikool.
- Hilkka Hiiop, E. K. (2017). Muinsuskaitse ja restaureerimise valdkonna visuaalide digitaalse arhiveerimise ja graafilise dokumenteerimise süsteem. . Muinsuskaitse ja restaureerimise valdkonna visuaalide digitaalse arhiveerimise ja graafilise dokumenteerimise süsteem. . Tallinn, Eesti.
- Holmes, M. Autodesk Instructables. [WWW] <https://www.instructables.com/Shooting-for-Photogrammetry/> (mai 2024)
- Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/s/scalability.asp> (2024, may).
- Jeeser, K. (2013). Documentation of Museum Objects in Estonian Museums: Development and Application of Museum Information System. Tartu: University of Tartu.
- Julien Guery, M. H. (2017). Photogrammetry. rmt: A. B.-K. MacDonald, Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage (lk 229-236). Arc Humanities Press.
- Kejing He, C. S.-H. (2022). 3D Surface reconstruction of transparent objects using laser scanning with LTFtF method. rmt: Optics and Lasers in Engineering Volume 148.
- Konsa, K. (2019). Digitaalne mälu. Tartu: Hariduse Infotehnoloogia Sihtasutus.

Kruse, K. a. (2024). Archiving the Third Dimension: Production, Maintenance and Use of 3D Models in Cultural Heritage Management. rmt: M. B. Hostettler, The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology (lk 205-219). Springer.

Kultuuriministeerium. (2022). Rahandusministeerium. [WWW] <https://www.fin.ee/media/10077/download> (mai 2024)

Loes Opgenhaffen, C. J. (2024). Balancing Data Storage and User Functionality: The 3D and Archaeological Data Strategy of the Tracing the Potter's Wheel Knowledge Hub. rmt: L. J. Opgenhaffen, The 3 Dimensions of Digitalised Archaeology (lk 131-149). Springer.

Marketplace, P. Photonics [WWW] <https://www.photonics.com/EDU/photogrammetry/d6126> (mai 2024)

Muinsuskaitseamet. [WWW] <https://www.muinsuskaitseamet.ee/amet-koostoo-uudised-ja-kontakt/arendus-ja-koostooprojektid/muis-20#item-3> (mai 2024).

Narain, A. Geospatial World. [WWW] <https://www.geospatialworld.net/blogs/apples-lidar-scanner/> (2020, may 31).

Natural Resources Canada. (2006). Fundamentals of Remote Sensing. Canada: Natural Resources Canada.

Rahaman, H. (2021). Photogrammetry: What, How, and Where. In E. b. Champion, Virtual Heritage: A Guide (pp. 25-38). Ubiquity Press.

Resources, G. (01. 09 2013. a.). GIS Resources. [WWW] https://gisresources.com/basic-of-photogrammetry_2/

Santos, P. R. (2017). 3D mass digitization: a milestone for archeological documentation. rmt: P. R. Santos, Virtual Archaeology Review Volume 8 (lk 1-11).

Schindler, K. ETH Zürich. [WWW] <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/igp/photogrammetry-remote-sensing-dam/documents/pdf/math-of-photogrammetry.pdf> (mai 2024)

Sébastien Lachambre, S. L. (23. 06 2014. a.). Unity 3D. Allikas: https://unity3d.com/files/solutions/photogrammetry/Unity-Photogrammetry-Workflow_2017-07_v2.pdf

Sketchfab. (2024, may). Sketchfab. [WWW] <https://sketchfab.com/britishmuseum/models>

SynergyXR. (2024, may). SynergyXR. [WWW] <https://synergyxr.com/news-and-updates/7-ways-3d-documentation-is-changing-how-businesses-communicate/>

Zmejevskis, L. (22. Feb 2023. a.). PixPro. [WWW] <https://www.pix-pro.com/blog/focal-length>

Tallinna ülikool. [WWW]

https://www.tlu.ee/opmat/in/Annoteerimine/1_mis_on_annoteerimine.html (mai 2024)

Torres, J. C., Martín, D., Romo, C., López, L., Cano, P., & León, A. (2024, mai). Retrieved from Digibug: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/55781?locale-attribute=en>

Walker, M. (2024, may). Retrieved from AircamDrone:

<https://aircamdrone.co.uk/optimising-overlap-in-drone-mapping-a-comprehensive-guide-for-operators-and-surveyors/>

Wikipedia. (2024, mai). [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/3D-renderdamine>

Vision Aerial. (2022, september 21) [WWW] <https://visionaerial.com/best-camera-for-photogrammetry/>

Wynne, C. a. (2022). Science Direct. [WWW]

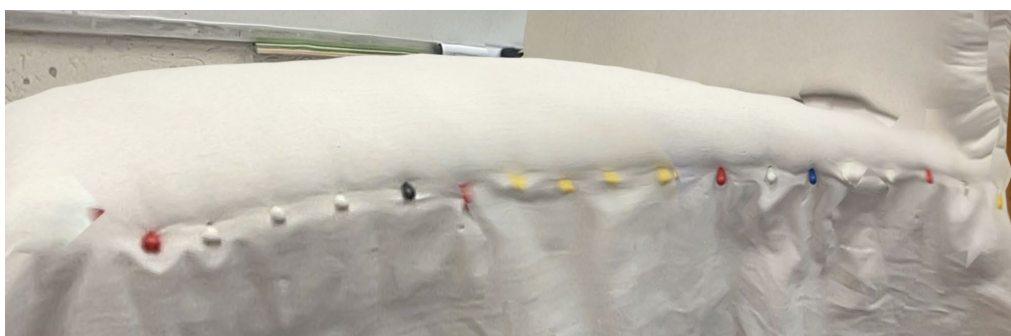
<https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/photogrammetry>

LISAD

Lisa 1. iPad Pro 15 lidariga tehtud katsetused Pallase Mööblioskonna mööblist.



Joonis 33 Pallase mööblioskonnas tehtud iPad Lidar skaneerijaga 3D-mudel. Kuvatõmmis Sketchfabist.



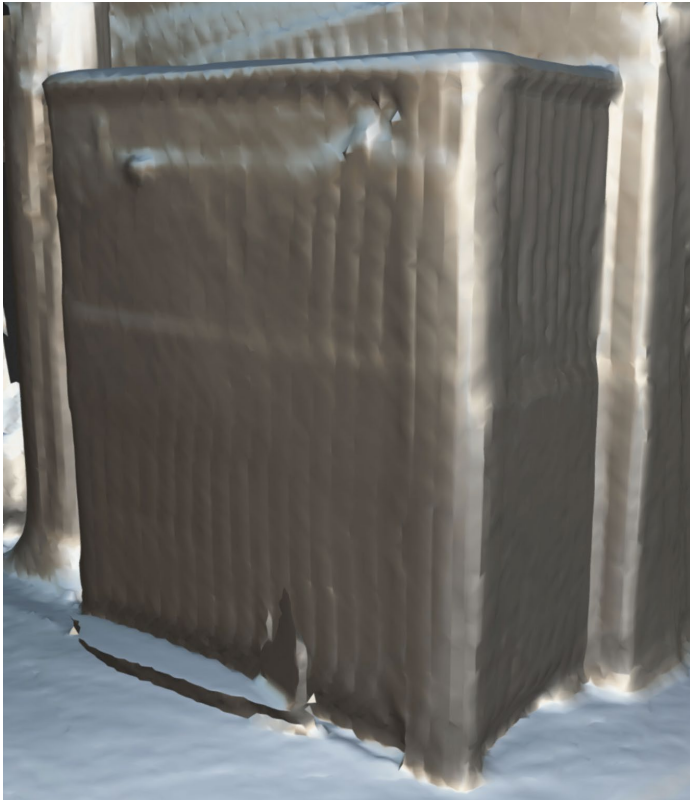
Joonis 34 Pallase Mööblioskonnas tehtud toolist 3D-mudel. Lähivõte näitamaks tooli kvaliteeti. Udused kohad, ebatäpne. Kuvatõmmist Sketchfabist.



Joonis 35 Pallase Mööblisakonnas tehtud toolist 3D-mudel. Mudel näitab objekti pinda ilma tekstuurita. Kuvatõmmis Sketchfabist.



Joonis 36 Pallase Mööblisakonnas loodud 3D-mudel. Ebakorrektnen geometria. Kuvatõmmis Sketchfabist.



Joonis 37 Pallase Mööbliosakonna loodud 3D-mudel. Mudel ilma tekstuurita. Kapi detailid ei ole loetavad Kuvatõmmis Sketchfabist.

Lisa 2. Töövo tabel

	Ülemine osa	Alumine osa	Parem sein	Vasak sein	Parem uks	Vasak uks	Parem sahtel	Vasak sahtel	Keskmine jalg	Parem esimene jalg	Parem tagumine jalg	Vasak esimene jalg	Vasak tagumine jalg
Align photos:	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
I osa	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
II osa	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
parandused	-	☺	-	-	-	☺	-	-	-	-	-	-	-
Markers	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	-	-	-	-	-
Vörkmudel:	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
I osa	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
II osa	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
parandused	-	☺	-	-	-	☺	-	-	-	-	-	-	-
Masks:	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
I osa	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
II osa	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
parandused	-	☺	-	-	-	☺	-	-	-	-	-	-	-
Merged chunks:	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
MC align photos	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
MC vörkmudel		☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
Augud täita			-	-	-	-	-	-	☺	-	-	☺	☺
Krobeld kohad likvideerida geometria	-	☺	☺	Vaja parandada!	Vaja parandada!	Vaja parandada!	-	-	-	-	-	-	-

pinnal													
Lightroom edit	-	-	-	-	-	-	-	-	☺	☺	☺	☺	☺
Defocus chunk		☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	-	-	-	-	-
Image quality		☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	-	-	-	-	-
Defocus chunkile mask		☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	-	-	-	-	-
Eksport:			☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
High + tekstuur			☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
Mid + tekstuur			☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺
Low + tekstuur		☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺	☺

Joonis 38 Agisoft Metashape töövo jaoks loodud tabel jälgimaks kogu tööprotsessi.

Lisa 3. Hilisbarokk kapi 3D-mudeli renderdused



Joonis 39 3D-mudeli renderdus Andrei Bljahhin. Photoshopi töötlus mudeli 3-st eri osast Meeli-Heli Lepna