



TALLINNA
TEHNIKAKÕRGKOO

Jalmar Mägi

**PINNATEKSTUURIDE MÕJU
LÄHIFOTOGRAMM-
MEETRILISEL TEEL
LOODAVATELE 3D
MUDELITELE**

LÕPUTÖÖ

Tallinn 2023

Jalmar Mägi

**PINNATEKSTUURIDE MÕJU
LÄHIFOTOGRAMM-MEETRILISEL
TEEL LOODAVATELE 3D
MUDELITELE**

LÕPUTÖÖ

Ehitusinstituut

Rakendusgeodeesia õppekava

Juhendajad: Vaiko Veeleid

Raivo Ranne

Tallinn 2023

Mina

Jalmar Mägi,

tõendan, et lõputöö on minu kirjutatud. Töö koostamisel kasutatud teiste autorite, sh juhendaja teostele on viidatud õiguspäraselt.

Kõik isiklikud ja varalised autoriõigused käesoleva lõputöö osas kuuluvad autorile ainuisikuliselt ning need on kaitstud autoriõiguse seadusega.

Juhendajad: Vaiko Veeleid, Raivo Ranne /allkirjastatud digitaalselt/

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

Jalmar Mägi

sünnikuupäev: 05/09/1992

annan Tallinna Tehnikakõrgkoolile (edaspidi kõrgkool) tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Pinnatekstuuride mõju lähifotogramm-meetrilisel teel loodavatele 3D mudelitele“

1. reprodutseerimiseks paberkandjal kõrgkooli raamatukogus avaldamise ja säilitamise eesmärgil;
2. elektroonseks avaldamiseks kõrgkooli repositooriumi kaudu;
3. kui lõputöö avaldamisele on instituudi direktori korraldusega kehtestatud tähtajaline piirang, lõputöö avaldada pärast piirangu lõppemist.

Olen teadlik, et nimetatud õigused jäävad alles ka autorile ja kinnitan, et:

1. lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid ega muid õigusi;
2. PDF-failina esitatud töö vastab täielikult kirjalikult esitatud tööle.

Tallinnas,

/allkirjastatud digitaalselt/

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja: **Jalmar Mägi**
Õpperühm: KRG2019
Eriala: Rakendusgeodeesia (1824)
Lõputöö teema: **Pinnatekstuuride mõju lähifotogramm-meetrilisel teel loodavatele 3D mudelitele**

Lähteandmed töö koostamiseks:
Erialane kirjandus

Töö sisu, ülesehitus ja lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:
Erinevate tekstuuridega fassaadide fotogramm-meetriline mõõdistamine käsikaameraga. Seejärel uurida tekstuuride ja töö käigus avaldunud faktorite mõju loodavate 3D mudelite kvaliteedile. Töös tuuakse välja kahe tarkvara erinevused samade piltide põhjal. Töö on jaotatud neljaks osaks: teooria, metoodika, tulemuse ja analüüs.

Seletuskirja ning graafilise materjali sisu ja maht:
Seletuskirja maht on ca 40 lehekülge. Töös kasutatakse fotosid, jooniseid, skeeme ja tabeleid.

Lõputöö juhendaja:

Vaiko Veeleid
(nimi)


(allkiri)23.01.2023
(kuupäev)

Raivo Ranne
(nimi)


(allkiri)23.01.2023
(kuupäev)

Lõpetaja:

Jalmar Mägi
(nimi)


(allkiri)23.01.2023
(kuupäev)

Kinnitaja:

Aivars Alt
ehitusinstituudi direktor


(allkiri)23.01.2023
(kuupäev)

Lõputöö ülesanne antud: 23.01.2023

Lõputöö esitamise tähtaeg: 02.05.2023

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	6
1 TEOORIA	7
1.1 Fotogramm-meetria	7
1.2 Fotogramm-meetria ajalugu	7
1.3 Tarkvarade tutvustus.....	8
1.3.1 Agisoft Metashape	8
1.3.2 Regard 3D.....	9
1.3.3 MeshLab	9
2 METOODIKA.....	10
2.1 Kasutatud vahendid.....	10
2.2 Pildistamine	11
2.3 Programmide kasutamine.....	12
2.3.1 Agisoft Metashape	12
2.3.2 Regard 3D koos Meshlabi-ga	15
2.4 Uurimustöö objektid	17
2.4.2 Kõrveküla kooli fassaad	18
2.4.3 Tartu linn, Jänese tn 2 hoone fassaad.....	19
2.4.4 Eesti Rahva Muuseumi viinaköök	20
3 TULEMUSED.....	21
3.1 Mudelite visuaalne kvaliteedi hindamine ja tarkvarade võrdlus	21
3.2 Mudelite geomeetrilise kvaliteedi hindamine	26
4 ANALÜÜS.....	28
KOKKUVÕTE.....	32
SUMMARY	34
VIIDATUD ALLIKAD	35
LISAD.....	37
Lisa 1. Metashape genereeritud tihedad punktipilved	38
Lisa 2. Regard 3D genereeritud tihedad punktipilved.....	40
Lisa 3. Metashape tihedad punktipilved punktide usaldusväärsuse näitajatega	42

SISSEJUHATUS

Pinna tekstuurid on ruumiliste objektide väliste tunnuste hulgas üks olulisemaid tegureid, mis mõjutavad nende visuaalset kuvandit. Looduslikes keskkondades on pinna tekstuurid väga mitmekesised ja rikkalikud ning loovad objektidele erinevaid visuaalseid efekte, mis võivad oluliselt mõjutada objektide tuvastamist ja analüüsi.

Kaasaegsetes fotogramm-meetrilistes süsteemides kasutatakse pinna tekstuuride infot sageli objektide kolmemõõtmeliste mudelite loomisel. Seda seetõttu, et pinna tekstuurid võivad anda täiendavat infot objektide kuju ja geomeetria kohta, mis aitab kaasa täpsemate 3D mudelite loomisele.

Antud uurimistöö eesmärk on uurida, kuidas erinevad fassaadi tekstuurid mõjutavad loodavate lähifotogramm-meetriliste meetoditega loodud 3D mudelite kvaliteeti. Uurimistöö käigus rakendatakse erinevaid meetodeid ja tehnikaid, et analüüsida ja hinnata pinna tekstuuride tähtsust 3D mudelite loomisel ning tuvastada võimalikud piirangud ja väljakutsed selles protsessis. Samuti teab autor, et kõik tarkvarad ei ole võrdsed ja uurimustöö annab võimaluse võrrelda erinevaid tarkvarasid kasutades samasuguseid lähteandmeid ehk fotosid.

Selle uurimistöö teemavalik on asjakohane tänapäeval, kus tehnoloogiliselt on muutunud 3D mudelite loomine soodsamaks ja tehnoloogia on muutunud võimekamaks. Seetõttu suureneb huvi fotogramm-meetriliste lahenduste vastu ja on kasvamas paljudes valdkondades, nagu näiteks ehitus, arhitektuur, kinnisvara, geoloogia ja geodeesia. Pinna tekstuuride tähtsus 3D mudelite loomisel on selles kontekstis eriti oluline, kuna see võib parandada mudelite täpsust ja suurendada kasulikkust paljudes praktilistes rakendustes.

Uurimustöö koosneb neljast osast. Esimeses osas tutvustatakse lugejale fotogramm-meetria olemust, ajalugu ja fotogramm-meetrilisi tarkvarasid. Teises osas kirjeldab autor katse käigus kasutatud vahendeid, programmide tööprotsesse ja uurimustöö objekte. Kolmandas osas tuuakse välja saadud tulemused ja seatakse mudelid õigesse mõõtkavasse. Viimases osas toimub saadud tulemuste analüüs, kus analüüsitakse nii 3D mudelite visuaalset kvaliteeti kui ka geomeetrilist kvaliteeti.

1 TEOORIA

1.1 Fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria on teadus, mille abil saab objekti või ala omadusi (asukohta, suurust ja kuju) mõõta ja analüüsida kahemõõtmeliste fotode abil. See meetod põhineb kahe või enama foto kasutamisel, mis on tehtud erinevatest vaatenurkadest, et määrata objekti asukoht, kuju ja mõõtmed. [1], [2]

Fotogramm-meetriat võib liigitada erinevalt aga tavaliselt liigitatakse see kaamera asukoha järgi pildistamise hetkel. Nii jagunebki fotogramm-meetria: aerofotogramm-meetriaks, satelliitfotogramm-meetriaks ja maapealseks fotogramm-meetriaks. [3]

Aerofotogramm-meetrias tehakse fotod õhusõiduki külge kinnitatud kaameraga. Droonifotogramm-meetria on vaieldav valdkond. Droonidega pildistatud fotod võivad olla ka pildistatud lähemalt, kui 300 meetrit. Satelliit fotogramm-meetrias kasutatakse satelliidifotosid, et nende abil määrata objektide omadusi.

Maapealne fotogramm-meetria, terestiline fotogramm-meetria ja lähifotogramm-meetria on kirjeldavad terminid, kus tehtud fotode objekti ja kaamera vaheline vahemaa on alla 300 m. [3]

1.2 Fotogramm-meetria ajalugu

Tänapäevase fotogramm-meetriani viivad arengud toimusid juba ammu enne fotograafia leiutamist. Aristoteles viitas juba 350 eKr optilise projektsiooni protsessile. 19. sajandi alguses avaldas dr Brooke Taylor uurimustöö lineaarperspektiivi kohta ja varsti peale seda tegi J.H Lambert ettepaneku perspektiivi põhimõtteid kasutada kaartide koostamisel. [4]

Fotogramm-meetria tegelik praktika ei saanud loomulikult toimuda enne, kui oli välja töötatud praktiline fotograafiaprotsess. Selle valdkonna teedrajava uurimuse tegi prantslane Joseph Niepce. 1827. aastal valmistas maailma esimese foto kasutades protsessi, mida ta kutsus heliograafiaks. Selle protsessi käigus olid metallplaadid kaetud tõrvalaadse ainega, mis järk-järgult kõvenes valguse käes. Laiendades Niepce uurimustööd, avaldas Louis Daguerre enda fotograafia protsessi, mis oli praktilisem kui heliograafia. Tema protsessis tehti säritus valgustundlikustatud metallplaatidele, mis oli hõbejodiididega kaetud. See on sisuliselt tänapäevalgi kasutatav fotograafia protsess. [4]

Aasta pärast Daguerre töö avaldamist demonstreeris Prantsuse Teaduste Akadeemia geodeet Francois Arago fotode kasutamist topograafilises mõõtmises. Esimesed tegelikud katsetused fotogrammeetria kasutamisel topograafilisel kaardistamisel toimusid 1849. aastal. Neid katsetusi juhtis Prantsuse armee inseneride korpuse kolonel Aimé Laussedat. Laussedat'i katsetes kasutati aerofotode tegemiseks tuulelohesid ja õhupalle. Sellel ettevõtmisel teda edu ei saanud ja ta suundus lähi fotogrammeetria juurde. [4] Lisaks valmistas ta 1895. aastal esimese kasutuskõlbliku kaamera. Tema panuse eest fotogrammeetria arendamisesse on teda nimetatud fotogrammeetria isaks. [5]

1909. aastal hakkas sakslane, dr Carl Pulfrich, katsetama kattuvate fotopaaridega. Tema töö rajas aluse tänapäeval kasutatavate fotogrammeetrilistele kaardistamistehnike väljatöötamisele. [4]

1909. aastal tehti esimene aerofoto lennukilt. Lennukiga lendas lennuki 6 aastat varem leiutanud Wilbur Wright. See oli esimene õhus õhusõiduki liikumise ajal tehtud foto. Varasemalt olid aerofotod tehtud õhupallidelt ja lohedelt. [5]

Kaardistamise eesmärgil kasutati lennuki pealt tehtud fotosid esmakordselt 1913. aastal. Esimese maailmasõja ajal kasutati aerofotosid luuretegevuses. Esimese ja Teise maailmasõja vahelisel ajal hakati aerofotogrammeetria abil topograafilisi massiliselt tootma. Teise maailmasõja ajal kasutati fotogrammeetrilisi tehnikaid, et rahuldada suurt nõudlust kaartide järele. Samuti kasutati aerofotosid laialdaselt luuretegevuses. [4]

1.3 Tarkvarade tutvustus

1.3.1 Agisoft Metashape

Agisoft Metashape on tarkvara, mida kasutatakse fotogrammeetria protsessi hõlbustamiseks, sealhulgas 3D-mudelite, kaartide ja ortofotode loomiseks. Metashape on saadaval Windows, macOS ja Linux operatsioonisüsteemidele. Metashape oli varem tuntud kui Photoscan ja on loodud Agisoft LLC poolt. Esimene Photoscani versioon ilmus 2010. aastal ja sellest ajast alates on tarkvara pidevalt täiustunud ja uusi funktsioone lisatud. Metashape on võimeline töötlemas nii õhu- kui ka maapealseid fotogrammeetrilisi andmeid. See pakub kasutajale laia valikut funktsioone, sealhulgas kvaliteedikontrolli, andmete esitamise ja mõõtmise tööriistu ning võimaldab ka integreerida teisi GIS-tööriistu. [6], [7]

1.3.2 Regard 3D

Regard 3D on tasuta ja avatud lähtekoodiga fotogramm-meetriline tarkvara, mida kasutatakse 3D mudelite loomiseks reaalses maailmas olevatest objektidest. Regard 3D on saadaval Windows, macOS ja Linux operatsioonisüsteemidele. Tarkvara suudab automaatselt tuvastada iseloomulikke punkte, mis on sarnased erinevatel fotodel ning kasutada neid punkte 3D mudeli genereerimiseks. Regard 3D on võimeline töötlemas nii üksikuid fotosid kui ka suuri fotoandmestikke ning pakub mitmeid tööriistu, et hinnata fotode kvaliteeti ja töödelda 3D mudeleid. Samuti on programm suuteline genereerima tekstuuridega 3D mudeleid. [8], [9], [10]

1.3.3 MeshLab

MeshLab on tasuta ja avatud lähtekoodiga 3D mudelite tarkvara, mis võimaldab kasutajatel importida, eksportida, manipuleerida ja visualiseerida 3D mudelit. MeshLab pakub suurt hulka funktsioone, mis võimaldavad kasutajatel töödelda ja muuta 3D mudelit vastavalt nende vajadustele. [11]

MeshLab võimaldab kasutajatel teha palju erinevaid toiminguid, sealhulgas mudelite redigeerimist, visualiseerimist, analüüsi, filtreerimist, tekstuurimist ja palju muud. MeshLab on saadaval Windows, MacOS ja Linux operatsioonisüsteemidele ning selle kood on saadaval GitHubis. [11]

2 METOODIKA

2.1 Kasutatud vahendid

Uurimustöö andmete töötlemiseks kasutas autor enda lauaarvutit. Tegu on keskpärase arvutiga, mis vastab tarkvarade esitatud süsteeminõudmistele [6], [9]:

- operatsioonisüsteem: Windows 10 Pro 64-bit;
- protsessor: Intel®Core™i5-12600, 3.30 GHz;
- videokaart: Sapphire Radeon RX480, 8GB, GDDR 5;
- operatiivmälu: 16 GB DDR4, 3200MHz.

Kaamerana kasutati Sony α5000 hübriidkaamerat (Foto 1). Hübriidkaamera on kaamera tüüp, mis ühendab endas peegelkaamera ja kompaktkamera parimad omadused. Hübriidkaameratel on suurem pildisensor kui kompaktkameratel ning vahetavate objektiviide võimalus nagu peegelkaameratel. Samas on nad tavaliselt väiksema ja kergema korpusega kui peegelkaamerad ja neil puudub optiline pildiotsija, mida peegelkaameratel tavaliselt kasutatakse. Selle asemel kasutatakse hübriidkaameratel elektroonilist pildiotsijat või tagumist LCD-ekraani.

Kaameral on APS-C pildisensor suurusega 23,5 x 15,6 mm ja selle eraldusvõime on 20,1 megapiksli. Maksimaalne pildi lahutusvõime on 5456 x 3632 piksli. Objektiviiks on Sony 16-50 mm f/3,5-5,6 OSS Alpha E-Mount. Kaameral saab valida automaatseid sätteid vastavalt pildistamise objektile ja keskkonnale või manuaalselt kohandada endale sobivaid sätteid. Sony α5000 pakub võimalust salvestada videosid, samuti on kaameral integreeritud WiFi ja NFC võimalused, mis võimaldavad fotode ja videote juhtmevaba jagamist. [12]

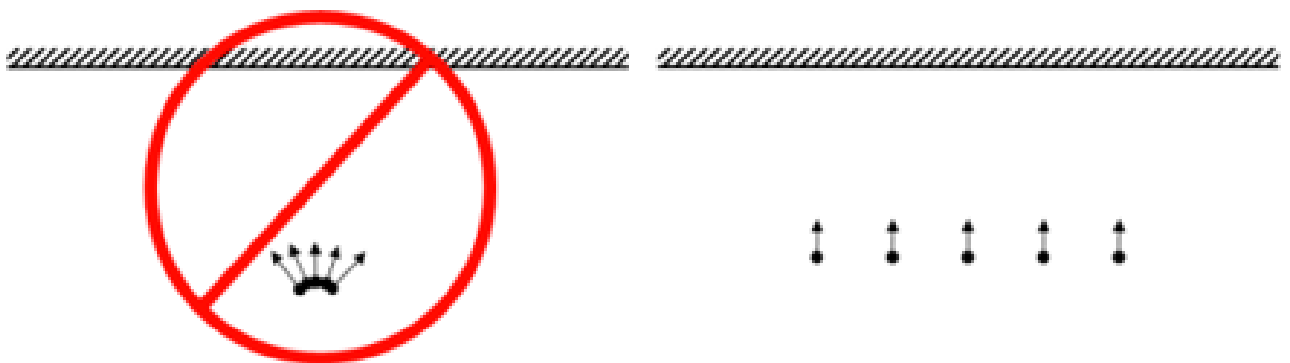


Foto 1. Sony α5000 hübriidkaamera [13]

2.2 Pildistamine

Fotogramm-meetrias on olulisel kohal fotode kvaliteet. Valgustingimused pildistamise ajal võivad muuta fotode kvaliteeti suurel määral. Väljas pildistades on suurimaks vaenlaseks päike, mis võib tekitada teravaid varjusid objektile ja seeläbi mõjutada otseselt loodavate 3D mudelite kvaliteeti. Kui mehitamata õhusõidukitega pildistades peab arvestama ka tuulekiirust siis maapinnalt pildistades see nii oluline pole. Väga tugeva tuulega siiski pole mõttekas pildistada, sest tuul võib piisavalt pildistajat liigutada ja fotode kvaliteet võib seeläbi kannatada.

Objektide pildistamised viidi läbi kahel päeval: 5. märtsil ja 21. märtsil 2023. Mõlemal päeval oli ühtlaselt pilves ilm ilma suurema tuuleta. Kaamera parameetreid oleks saanud ka valida automaatrežiimidega aga autor otsustas need käsitsi sisestada. Pildistamisel kasutati madalaimat valgustundlikkust (ISO100). Madala valgustundlikkuse kasutamise eesmärgiks oli, et hoida fotod võimalikult müravabad. Kõrge ISO väärtus tekitab fotodele müra ja fotode kvaliteet kannatab. Kaamera parameetrid salvestuvad fotode metaandmetes. Ilmastikuolud olid mõlemal pildistamise päeval sarnased seega sai kasutada sarnaseid parameetreid. Pildistamisel lähtuti Agisofti soovitustest [6]. Korrektne liikumisviis fassaadi pildistamisel on välja toodud alloleval joonisel (Joonis 1).



Joonis 1. Korrektne liikumisviis fassaadi pildistades [6]: parempoolne illustratsioon kirjeldab korrektset liikumisviisi fassaadi pildistamisel; vaspoolne illustratsioon kirjeldab mittesobivat liikumisviisi fassaadi pildistamisel

2.3 Programmide kasutamine

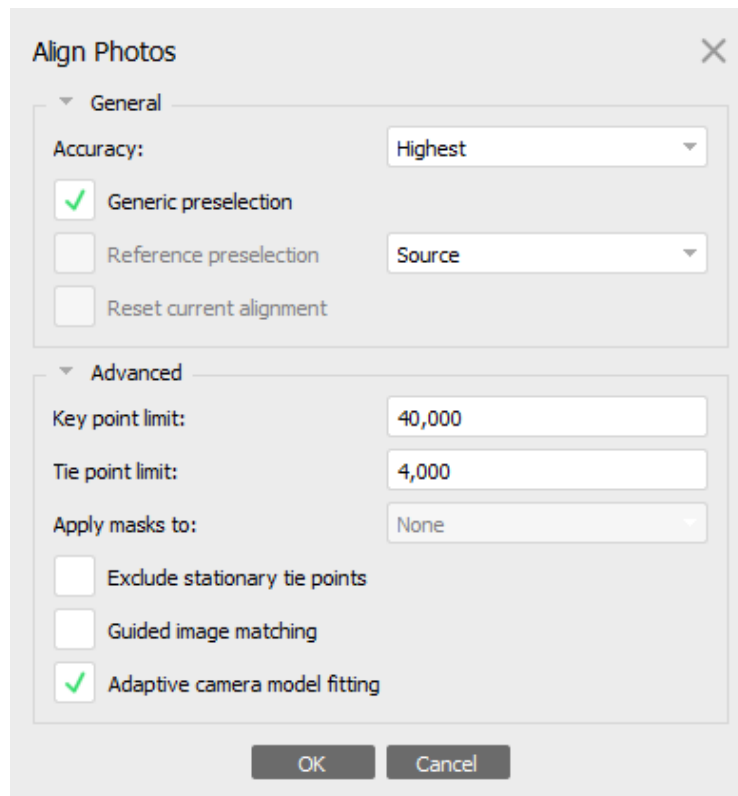
2.3.1 Agisoft Metashape

Esimeseks etapiks on piltide lisamine programmi. Seejärel on soovituslik lasta programmil hinnata piltide kvaliteeti käsuga *Estimate Image Quality*. See käsk aitab eristada madalama kvaliteediga pildid (Joonis 2), mis võivad mõjutada fotode joondamise tulemust ja hiljem 3D mudeli tekstuuri. Antud näites jäi kvaliteedi väärtus vahemikku 0,81529 – 0,82009. Agisoft soovitab alla 0,5 kvaliteediväärtusega fotosid mitte kasutada. [6], [7]

5456x3632	✓	0.815291	2023:04:16 12:29... SONY	ILCE-5000	16
5456x3632	✓	0.815441	2023:04:16 12:28... SONY	ILCE-5000	16
5456x3632	✓	0.815598	2023:04:16 12:26... SONY	ILCE-5000	16
5456x3632	✓	0.816628	2023:04:16 12:25... SONY	ILCE-5000	16
5456x3632	✓	0.818549	2023:04:16 12:28... SONY	ILCE-5000	16
5456x3632	✓	0.82009	2023:04:16 12:25... SONY	ILCE-5000	16

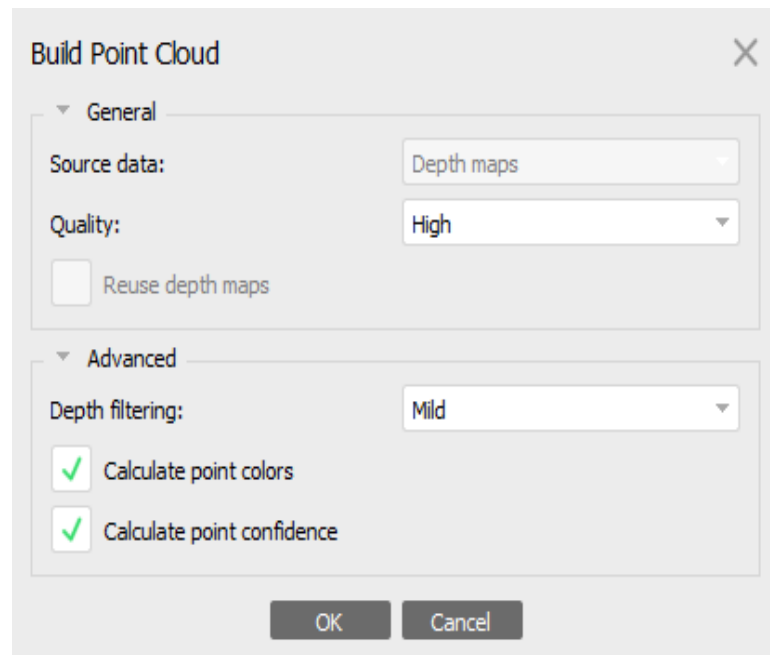
Joonis 2. Piisava kvaliteediväärtusega fotode näide

Align Photos käsku kasutades joondab programm fotod automaatselt. Programm leiab fotodelt eristuvad punktid. Igal punktil on omad parameetrid ja nende parameetrite alusel paneb programm fotod joonduma. Kui teie fotodel on metaandmed, näiteks kaamera mudel, säriaeg ja ISO, imporditakse need automaatselt. Kui fotodel pole metaandmeid, saate neid käsitsi lisada, valides fotod ja klõpsates "*Edit Camera*" nuppu. [6] Fotode joondamisel muutis autor Metashape-is joondamise täpsuse kõige kõrgemale sättele. Autori kasutatud sätted fotode joondamisel on välja toodud Joonis 3.



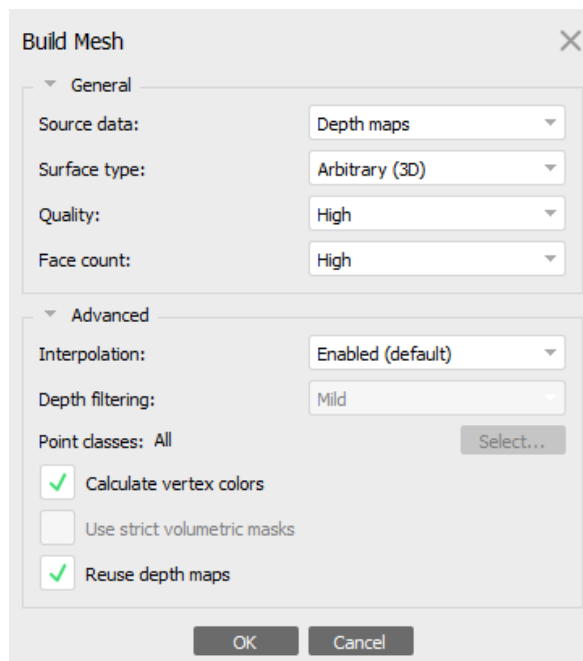
Joonis 3. Metashape fotode joondamiseks kasutatud sätted

Build Point Cloud käsuga tekitatakse tihe punktipilv. Punktipilvede genereerimine põhineb sügavuskaartidel, mis on arvutatud tiheda stereosobitamise abil. Sügavuskaardid arvutatakse kattuvate fotopaaride jaoks, võttes arvesse nende suhtelisi välis- ja siseorientatsiooni parameetreid, mis on hinnatud kiirte sobitamise (*bundle adjustment*) teel. Iga kaamera jaoks saadud paaripõhised sügavuskaardid liidetakse kokku kombineeritud sügavuskaardiks. Iga kaamera jaoks loodud kombineeritud sügavuskaardid muudetakse osalisteks punktipilvedeks, mis liidetakse lõplikuks punktipilveks. [6] Selles etapis autor sätteid ei muutnud ja tegutses programmi pool soovitatud sätetega. Tiheda punktipilve genereerimiseks kasutatud sätted on näidatud Joonis 4.



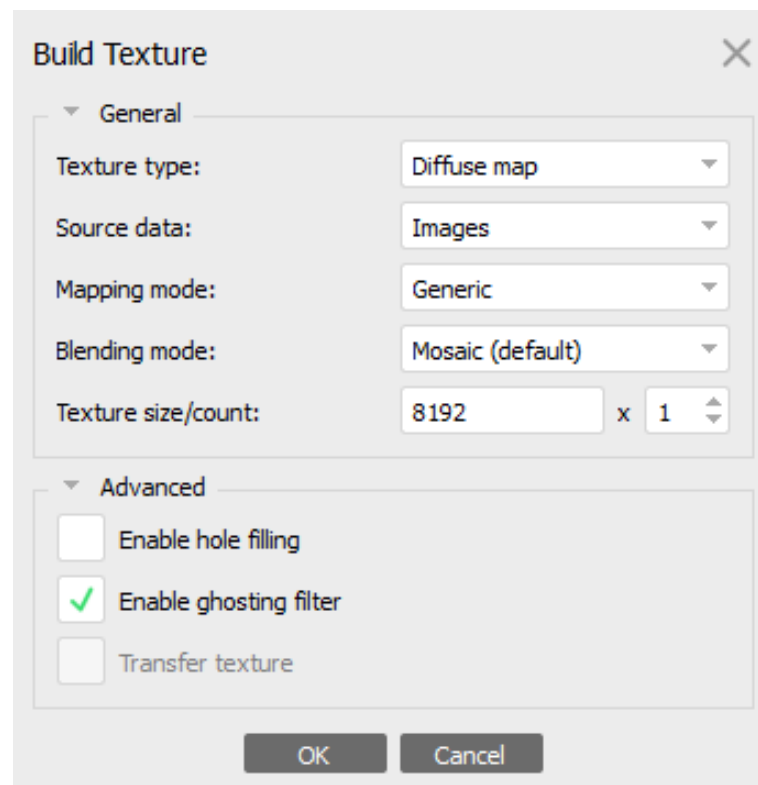
Joonis 4. Metashape tiheda punktipilve genereerimiseks kasutatud sätted

Build Mesh käsuga moodustatakse kolmnurkade võrgustik mudelile ehk *mesh* mudel. Metashape moodustab selle, kas punktipilve põhjal või sügavuskaartide andmete põhjal. [6] Uurimustöös *mesh* mudeli moodustamisel kasutatud sätted on välja toodud Joonis 5.



Joonis 5. Metashape kolmnurkade võrgustiku moodustamiseks kasutatud sätted

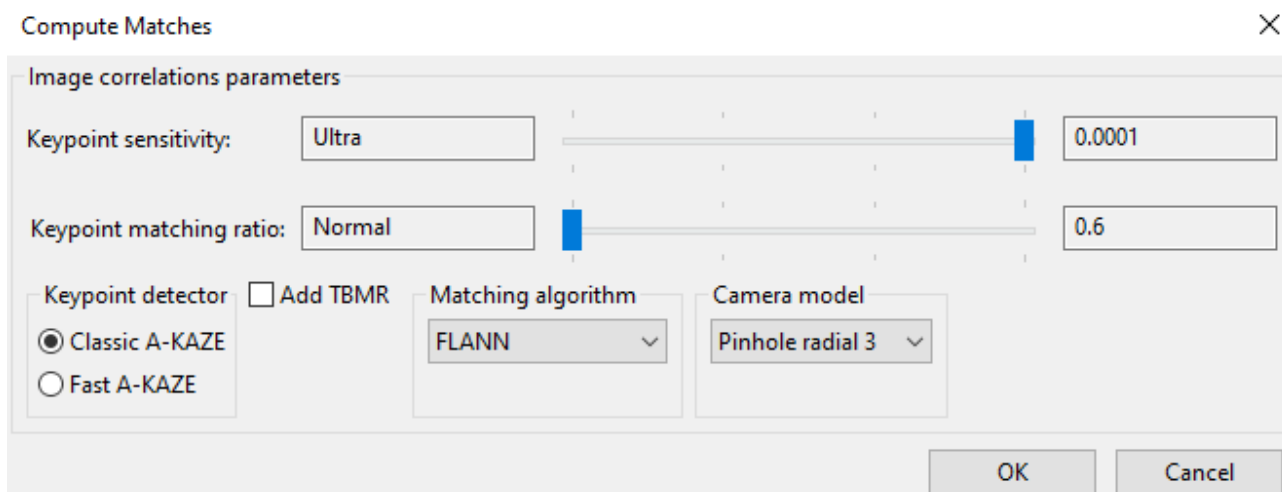
Building model texture käsuga luuakse tekstuuriga 3D mudel. Programm töötleb tekstuure ja lõpuks luuakse iga punkti kohta üks tekstuurikaart, mida kasutatakse 3D mudeli lõplikuks tekstureerimiseks. [6] Pinnatekstuurid on ruumiliste objektide väliste tunnuste hulgas üks olulisemaid tegureid, mis mõjutavad nende visuaalset kuvandit. Tekstuuriga 3D mudeli loomiseks kasutatud sätted on välja toodud Joonis 6.



Joonis 6. Metashape 3D mudelile tekstuuri genereerimiseks kasutatud sätted

2.3.2 Regard 3D koos Meshlabi-ga

Esimeseks etapiks on uue projekti loomine ja fotode lisamine programmi. Järgmise sammuna kasutatakse käsku *Compute matches*, kasutab punktide tuvastamise algoritmi, et tuvastada iga pildi omavahelised sarnased punktid, mis võimaldab tarkvaral arvutada nende punktide kolmemõõtmelisi koordinaate. [10] Autor tõstis selles etapis *Keypoint sensitivity* kõrgeimale tasemele, et programm tuvastaks rohkem punkte. Valitud sätteid illustreerib Joonis 7.



Joonis 7. Regard 3D punktide tuvastamisel kasutatud sätted

Triangulate käsk joondab fotod ja moodustab hõreda punktipilve. Selles etapis seadistamiseks väga valikuid ei olnud ja autor kasutas tarkvara soovitatud sätteid. *Densification* moodustab tiheda punktipilve. Siin kasutas autor jällegi tarkvara poolt soovitatud sätteid. *Surface generation* käsk genereerib tekstuuriga 3D mudeli. Kõige olulisem säte, mida selles etapis muuta tuli oli *Colorization Method* valikus valida *Textures* valik (Joonis 8). See valik tagas, et programm loob tekstuurid 3D mudelile. [10] Tekstuuriga mudelid eksporditi MeshLab-i, et see õigesse mõõtkavasse seada.

Surface generation

×

Surface generation method

☒ Poisson surface reconstruction
 ☐ Floating scale surface reconstruction

Poisson surface reconstruction parameters

Depth: 7

Samples per node: 3

Point weight: 2

Trim threshold: 9

Floating scale surface reconstruction parameters

Levels: 0

Scale factor multiplier: 1

Confidence threshold: 1

Min. component size: 1010

Colorization method

☐ Colored vertices
 ☒ Textures

Parameters for colorizing vertices

Number of neighbours: 3

Texturization parameters

Photometric outlier removal: None

Geometric visibility test: ☒

Global seam leveling: ☒

Local seam leveling: ☒

OK

Cancel

Joonis 8. Regard 3D pinna moodustamisel kasutatud sätted

2.4 Uurimustöö objektid

Autor valis uurimustöö tegemiseks välja neli objekti. Objektid asuvad Tartu linnas või Tartu lähiümbruses. Eesmärgiks oli valida fassaadid, mis oleksid erinevate tekstuuridega.

Klaaspinnaga fassaadiks valis autor Tartu Ülikooli keemia instituudi (Chemicum) fassaadi lõigu (Foto 2). Chemicumi hoone valmis 2009. aastal ja asub aadressil Ravila 14a. Enamustel fassaadidel

on aknad, mis on nii läikivad kui ka läbipaistvad. Selle objekti valimise eesmärk oli näha kuidas mõjutab suur klaaspind 3D mudeli kvaliteeti. Mõlemal pool klaaspinda on krohvitud fassaadi osad.



Foto 2. Tartu Ülikooli keemia instituudi fassaad

2.4.2 Kõrveküla kooli fassaad

Kõrveküla põhikooli hoone asub Tartu vallas, Kõrveküla alevikus. Uurimusala fassaad on kujutatud Foto 3. Hoone on ehitatud 1952. aastal. Selle aja jooksul on tehtud kaks juurdeehitust aastatel 1962 ja 2005. [14] Hoone fassaad on krohvitud siniseks, akende ja uste ääri kaunistavad valged karniisid. Uurimustöös käsitletakse eeskätt hoone põhjapoolset seina, kus on suur ala ühtlaselt krohvitud seina. See objekt valiti, et uurida, kuidas mõjutab suurem ühetahuline ala 3D mudeli kvaliteeti.



Foto 3. Kõrveküla põhikooli hoone

2.4.3 Tartu linn, Jänese tn 2 hoone fassaad

Tartu linnas Jänese tänaval asuva hoone fassaadi osa (Foto 4). Hoone fassaad koosneb punastest tellistest, üks post on valgetest tellistest. Akende ja uste sillused on fassaadil näha. Hoone jätkub paremalt krohvitud fassaadiga. Hoone esimese korruse aknad on kaetud niiskuskindla vineeriga, teise korruse aknad on klaasist.



Foto 4. Jänese tänaval asuva hoone fassaad

2.4.4 Eesti Rahva Muuseumi viinaköök

Eesti Rahva Muuseumi viinaköök asub Tartu linna ERM-i territooriumil (Foto 5). Varasemalt kuulus viinaköök Raadi mõisa koosseisu. Varemend konserveeriti 2016. aastal. [15] Uurimustöö käigus uuritakse kuidas mõjutavad sellel fassaadil olevad tekstuurid 3D mudeli kvaliteeti. Sellel objektil on mitmeid erineva tekstuuriga elemente. Suurem osa on telliskividest laotud seinad ja on näha maakividest laotud sein osa. Aknaid katavad fassaadile paigaldatud klaas tahvlid, mis on kaetud prindikilega.



Foto 5. Eesti Rahva Muuseumi viinaköök [16]

3 TULEMUSED

3.1 Mudelite visuaalne kvaliteedi hindamine ja tarkvarade võrdlus

Täielik ülevaade mõlema programmi genereeritud tihedatest punktipilvedest on toodud lisade jaotuses (Lisa 1 kuni Lisa 2). Metashape võimaldab punktipilve näidata erinevate väärtustena, Lisa 3 on näidatud mudelite punktipilved punktide usaldusväärsuse näitajatega.

Jänese tänaval asuvast fassaadist tehti 102 fotot (Tabel 1). Nii Metashape kui ka Regard 3D suutsid joondada kõik 102 fotot. Vabavaraline tarkvara Regard 3D tuvastas rohkem iseloomulike punkte kui kommertstarkvara Metashape.

Chemicum-i fassaadist tehti 144 fotot. Peale fotode kvaliteedi hindamist Metashape-i poolt eemaldati 4 fotot, mis olid kvaliteediväärtusega alla 0,5. Allesjäänud 140 fotost joondati kõik 140 fotot. Regard 3D fotode hindamist ei paku ja proovib kõiki fotosid joondada. Programm suutis joondada 120 fotot.

Viinaköögi varemetest tehti 140 fotot. Metashape-i fotode kvaliteedi hindaja hindas ühe foto kvaliteedi väärtuse alla 0,5 ja see pilt eemaldati joondamise etapist. Metashape joondas kõik ette antud 139 fotot. Regard 3D joondas 140 fotost 130 fotot.

Kõrveküla koolimajast tehti kokku 92 fotot. Metashape hindas koguni 15 foto kvaliteedi väärtuse alla 0,5. Joondamise etapis joondati kõik 77 valitud fotot. Regard 3D suutis ette antud 92 fotost joondada 74 fotot. Regard 3D fotode joondamisel kadus hoone tänavapoolne sein ära. Hõredas punktipilves ei olnud selle seina kohal tuvastatud punkte.

Tabel 1 välja toodud polügoonide arv mudelis iseloomustab *mesh* mudelis loodud kolmnurkade arvu. Mida rohkem on polügoone, seda täpsema tekstuuriga 3D mudeli suudab tarkvara tekitada.

Tabel 1. Tarkvarade joondatud fotod, tuvastatud punktid ja genereeritud polügoonid, tk

Objekt	Tarkvara	Joondatud fotod	Tuvastatud punktid	Genereeritud polügoonid
Chemicum	Agisoft Metashape	140/140	67 041	1 787 514
	Regard 3D	120/144	15 087	4203
Viinaköök	Agisoft Metashape	139/139	60 399	5 028 078
	Regard 3D	130/140	182 842	118 335

Objekt	Tarkvara	Joondatud fotod	Tuvastatud punktid	Genereeritud polügoonid
Jänese tänava fassaad	Agisoft Metashape	102/102	19 714	1 371 278
	Regard 3D	102/102	25 760	104 760
Kõrveküla kool	Agisoft Metashape	77/77	41 198	1 006 265
	Regard 3d	74/92	13 909	36 540

Valitud objektide fassaadidel on kasutatud erinevaid ehitusmaterjale, mis on erineva tekstuuriga. Autor eeldas, et kõiki tekstuure ei modelleerita sama kvaliteediga ja nii oligi.

Viinaköögi varemete modelleerimisega (Joonis 9 ja Joonis 10) said mõlemad tarkvarad hästi hakkama. Telliskividest ja maakividest osad modelleeriti hästi ja moonutusi ei esinenud. Varemete seinale kinnitatud klaaspinnad olid kaetud prindikilega ja seetõttu esines neil moonutusi. Prindikile tõttu esines vähem moonutusi, kui oleks esinenud läbipaistvate klaastahvlitega. Samuti esines moonutusi metallala peal.



Joonis 9. Metashape-is genereeritud viinaköögi varemete tekstuuriga 3D mudel



Joonis 10. Regard 3D genereeritud viinaköögi varemete tekstuuriga 3D mudel

Jänese tänava fassaadi mudelid (Joonis 11 ja Joonis 12) tulid mõlemal tarkvaral autori arvates välja kõige paremini. Telliskivi pindadel moonutusi ei esine. Esimese korruse aknaid katvate niiskuskindlate vineerplaatide ääred on selgesti eristatavad. Lisaks on mudelilt näha vineerplaatide sees olevad kruvid, mida kasutati reaalmaailma ja mudelite mõõtude võrdlemisel.



Joonis 11. Metashape-is genereeritud Jänese tänava fassaadi tekstuuriga 3D mudel



Joonis 12. Regard 3D genereeritud Jänese tänava fassaadi tekstuuriga 3D mudel

Kõrveküla koolihoone oli valitud ühelaadse fassaadi tõttu. Ühes seinas olid mõlemal pool ust suur pind ühtlaselt krohvitud seina. Mõlemas tarkvaras loodud mudelites (Joonis 13 ja Joonis 14) tekkisid moonutused krohvitud pindadele ja hoone nurkadesse. Lisaks tekkisid moonutused teise korruse akendele. Esimese korruse akendele tekkis vähem moonutusi.



Joonis 13. Metashape-is genereeritud Kõrveküla Põhikooli tekstuuriga 3D mudel



Joonis 14. Regard 3D genereeritud Kõrveküla Põhikooli tekstuuriga 3D mudel

Chemicumi fassaadil on suur osa fassaadist kaetud akendega. Oodatult tekkisid mõlemas programmis loodud mudelite (Joonis 15 ja Joonis 16) klaaspindadele suured moonutused. Metashape-i mudelil tekkisid lisaks augud klaaspindadele.



Joonis 15. Metashape-is genereeritud Chemicum-i tekstuuriga 3D mudel



Joonis 16. Regard 3D genereeritud Chemicum-i tekstuuriga 3D mudel

3.2 Mudelite geomeetrilise kvaliteedi hindamine

Mudelite geomeetrilise kvaliteedi hindamiseks tuli viia mudelid õigesse mõõtkavasse, sest esialgselt genereeritakse mudelid programmide enda suhtelises koordinaatsüsteemis. Autor otsustas mudelite mõõtkavadesse viimiseks kasutada skaleerimist. Metashape lubad tekitada skaala ribad (*Scale Bar*), millele antakse reaalmaailmas mõõdetud suurus ja programm viib mudeli õigesse mõõtkavasse. Regard 3D programmis ei ole võimalust mudelite mõõtkava muuta, seepärast eksportis autor mudeli ja muudab mõõtkava programmiga MeshLab. Meshlab-is ei ole skaala ribad võimalust nagu Metashape-is, seetõttu tuleb skaleerimise faktor (*Scale Factor*) ise arvutada ja programmi sisestada [17]. Skaleerimise faktori saamiseks tuleb reaalmaailmas mõõdetud suurus jagada MeshLab-is mõõdetud suurusega, mis on välja toodud Tabel 2. Reaalmaailma mõõdetud on mõõdetud mõõdulindiga objektidel, edaspidi nimetatakse neid õigeteks pikkusteks. Autor mõõdistas objektidel asuvaid kergesti eristatavate punktide vahemaid.

Tabel 2. MeshLab-is skaleerimiseks arvutatud skaleerimisfaktorid

Objekt	Õiged pikkused, cm	Meshlabist mõõdetud suurus	Arvutatud skaleerimise faktor MeshLabi tarbeks
Jänese tänava fassaad	91,5	33,9008	2,6991
Viinaköögi varemed	60,0	1,5684	38,2555
Chemicum	235,0	14,2334	16,5105
Kõrveküla kool	143,7	7,0542	20,3708

Mudeli kvaliteedi hindamiseks kasutab autor objektidelt mõõdetud suurusi ja võrdleb neid mõõtkavasse viidud mudelitelt mõõdetud suurustega. Selleks mõõdab autor mõlema programmiga loodud mudelitelt suurusi kolm korda ja kasutab mõõtmiste aritmeetilisi keskmisi võrdlemaks reaalmaailmast mõõdetud tulemustega. Kolm korda mõõdetakse, et vältida mõõtmisel tekkivaid vigu. Vastavad Metashape-is tehtud mõõdistused on kirjas Tabelis 3 ja vastavad MeshLab-is tehtud mõõdistused on kirjas Tabelis 4. Mudelitelt mõõte võttes selgus, et Metashape joonlaua funktsioon mõõtis sentimeetrilise täpsusega.

Tabel 3. Metashape mudelite geomeetrilise kvaliteedi mõõtmised, cm

Objekt	Õiged pikkused	Mudelilt mõõdistatud pikkused			Aritmeetiline keskmine	Vahe
		1.	2.	3.		
Jänese tänava fassaad	125,1	125,0	125,0	125,0	125,0	0,1
Viinaköögi varemed	203,0	203,0	203,0	204,0	203,3	0,3
Chemicum	234,7	236,0	235,0	235,0	235,3	0,6
Kõrveküla kool	125,5	127,0	126,0	126,0	126,3	0,8

Tabel 4. Regard 3D mudelite geomeetrilise kvaliteedi mõõtmised, cm

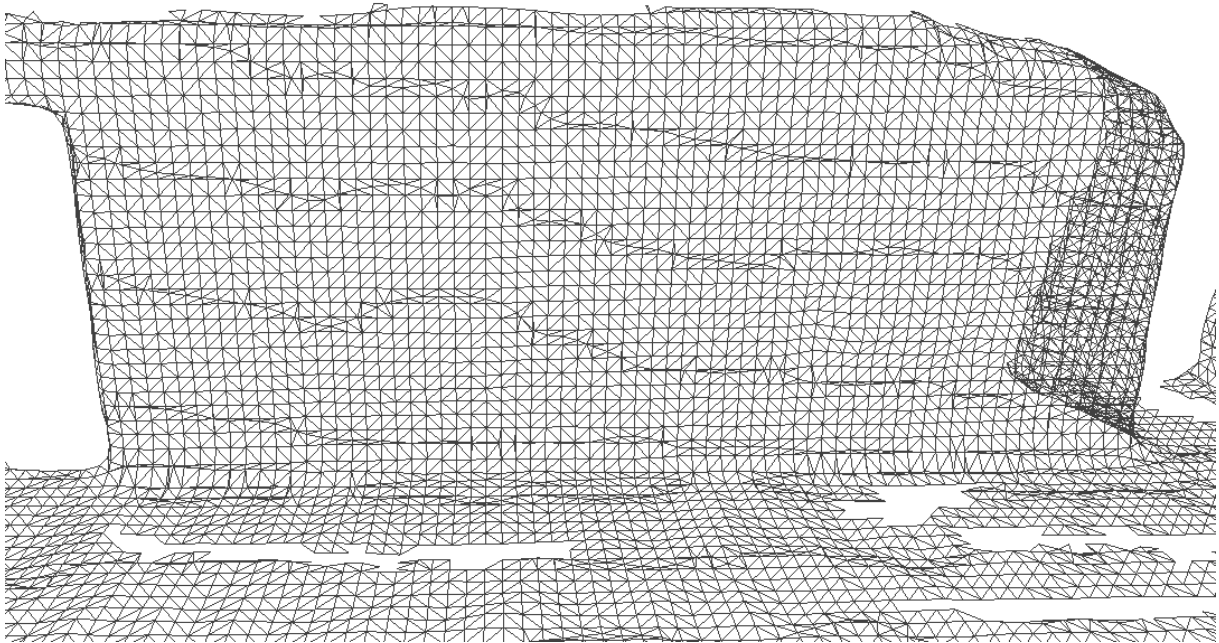
Objekt	Õiged pikkused	Mudelilt mõõdistatud pikkused			Aritmeetiline keskmine	Vahe
		1.	2.	3.		
Jänese tänava fassaad	125,1	125,9	125,1	125,9	125,6	0,5
Viinaköögi varemed	203,0	203,8	202,7	203,6	203,4	0,4
Chemicum	234,7	233,6	233,4	234,2	233,7	1,0
Kõrveküla kool	125,5	125,9	126,4	126,0	126,1	0,6

4 ANALÜÜS

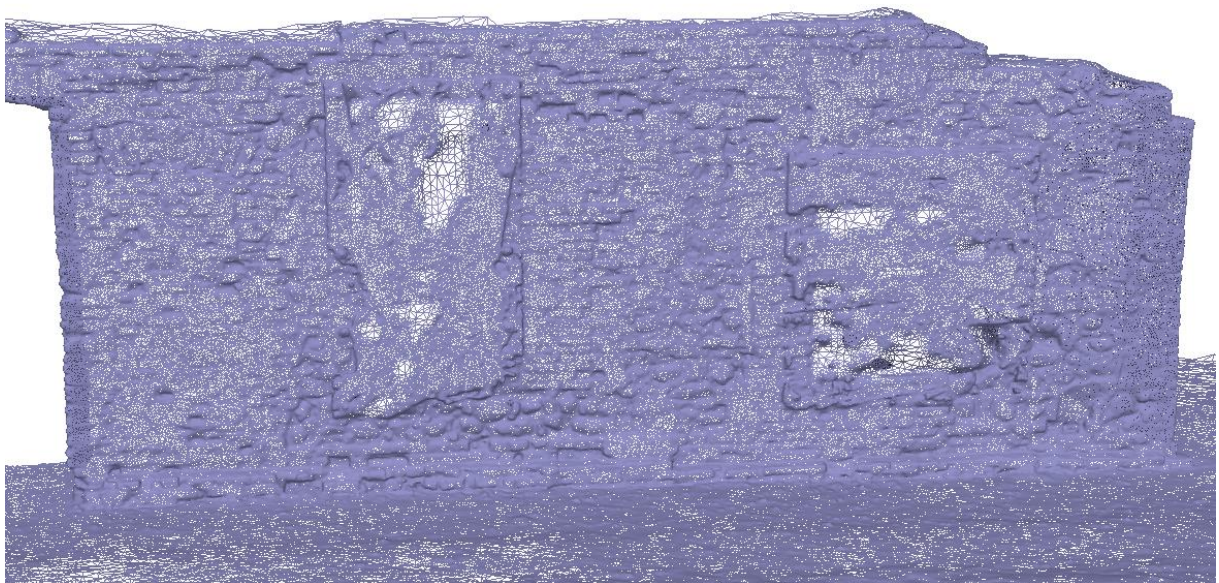
Kõikide tarkvarade kasutamine oli arusaadav ja kodulehtedel olemas vajalikud õpetused esmaseks kasutamiseks. Metashape-l on lisaks väga põhjalik kasutusjuhend, mis uueneb iga versiooniga. Autorile kõige mõistvam ja loogilisem tundus Agisoft Metashape graafiline kasutajaliides. See on ka loogiline, sest tegemist on kommertstarkvaraga, mis on mõeldud müügiks. Uurimustööks kasutati 30-päevast prooviversiooni. Regard 3D ja MeshLab on vabavaralised tarkvarad. MeshLabi pidi kasutama, sest Regard 3D ei paku skaleerimise võimalust. Uurimustöö autoril on kindlasti veel palju õppida, sest kõikidel programmidel on palju erinevaid võimalusi seadistada kõiksuguseid sätteid, et saavutada maksimaalselt hea tulemus. Programmides kasutati valdavalt vaikesätteid, ainult fotode joondamise täpsust tõsteti mõlemas tarkvaras.

Metashape suutis kõik pakutud fotod joondada ja lisaks omab fotode kvaliteedi hindamise funktsiooni. Regard 3D suutis ainult Jänese tänava fassaadi puhul joondada kõik fotod ja tuvastada fotodelt rohkem iseloomulike punkte (Tabel 1). Teiste objektide puhul ei suutnud Regard 3D kõiki fotosid joondada. Viinaköögi varemete fotosid suutis Regard 3D joondada 9 vähem kui Metashape aga tuvastas üle 180 000 iseloomuliku punkti Metashape-i 60000 punkti vastu. Chemicum-i ja Kõrveküla kooli hoone puhul suutis Metashape rohkem iseloomulike punkte fotodelt tuvastada.

Tabel 1 kirjeldab ka genereeritud polügoonide arvu. Polügoonideks nimetatakse kolme punkti vahele tekkivat pinda. Polügoonid Metashape genereeris kõikide mudelite korral kordades rohkem polügoone, kui Regard 3D. See on üllatav, sest algselt leidis Regard 3D kahe objekti puhul rohkem iseloomulikke punkte fotodelt. Polügoonide suuruste erinevused on välja toodud Joonis 17 ja Joonis 18.



Joonis 17. Regard 3D polügoonide näide



Joonis 18. Metashape polügoonide näide

Visuaalselt vähim moonutusi tekkis viinaköögi varemete (Joonis 9 ja Joonis 10) ja Jänese tänava fassaadi mudelitele (Joonis 11 ja Joonis 12). Mõlemate fassaadid on tehtud suuresti telliskividest. Telliskivide tekstuur tekitab mudelisse palju lähedalasuvaid punkte ja programmid suudavad neid kvaliteetsemalt modelleerida. Viinaköögi varemete mudelites tekkisid mõlema programmi puhul

moonutused metallala peale, kus programmidel oli keeruline kitsaid metallala osasid sobitada. Vähesel määral tekkisid moonutused ka klaaspindadele. Jänese tänava fassaadi mudelites tekkisid moonutused teise korruse akendele, esimese korruse aknad on kaetud niiskuskindla vineeriga.

Kõrveküla põhikooli hoone mudelites (Joonis 13 ja Joonis 14) tekkisid moonutused krohvitud pindadele. Programmidele tekitab raskusi leida sellistelt pindadelt piisavalt lähedal asetsevad eristuvaid punkte fotodelt, mistõttu muutub mudelite kvaliteet halvemaks. Metashape mudeli puhul oli moonutusi vähem aga ikka tekkisid moonutused akendele ja hoone nurkadesse.

Kõige rohkem klaaspinda on Chemicum-i fassaadil. Metashape tekstuuriga mudelil (Joonis 15) on klaaspinnal augud sees ja moonutused aknaraamidel. Metashape-l on tööriistad, et mudelil tekkinud auke täita aga näite eesmärgil seda ei tehtud. Regard 3D tekstuuriga mudelil (Joonis 16) on suured moonutused klaaspinna keskmises osas, kus aknaraamid ei lähe omavahel üldse kokku. Klaaspinda on keeruline modelleerida, sest klaas on läbipaistev ja võivad tekkida peegelduse tõttu varjundid.

Mudelite skaleerimist on mugavam teostada Metashape-is, sest seal ei pea eraldi arvutama skaleerimiseks vajaminevat väärtust. Joonisel 19 on näha vasakul pool sildi juures olevad märgid, mis tähistavad skaalariba, mille abil mudel mõõtkavasse pandi. Paremal pool olevad märgid tähistavad punkte, mille vahemaa mõõdeti geomeetrilise kvaliteedi hindamiseks. Mudelite geomeetrilise kvaliteedi hindamiseks on eelmises peatükis loodud Tabel 3 ja Tabel 4.



Joonis 19. Metashape mudelilt mõõdetud vahemaad

Tabel 3 illustreerib Metashape-is tehtud mudelite mõõtmisi, Tabel 4 illustreerib Regard 3D-s tehtud mudelite mõõtmisi. Visuaalselt kõrgema kvaliteediga mudelitel on ka kõrgem geomeetriline kvaliteet. Visuaalselt nõrgema kvaliteediga mudelitel on ka geomeetriline kvaliteet halvem. Metashape loodud 3D mudelitest oli kõige täpsem Jänese tänava fassaad, kus õige pikkuse ja mudelilt mõõdistatud pikkuse erinevus oli 0,1 cm. Regard 3D loodud mudelites oli kõige täpsem viinaköögi varemete mudel 0,4 cm erinevusega. Nende objektide mudelid olid ka kõrgema visuaalse kvaliteediga. Kõige ebatäpsem mudel Metashape loodud mudelitest oli Kõrveküla Põhikooli hoone mudel 0,6 cm erinevusega. Regard 3D kõige ebatäpsem mudel oli Chemicu-i fassaadi mudel 1,0 cm erinevusega. Nende objektide mudelitel oli mõlemas tarkvaras kõige rohkem moonutusi.

Objektiivselt saab tarkvarade võimekust mudelite modelleerimisel võrrelda ainult Jänese tänava fassaadi punktipilvi ja mudeleid võrreldes. Jänese tänava fassaadi puhul suutsid mõlemad tarkvarad joondada 102 pilti. Ülejäänud objektide võrdlemine ei oleks objektiivne, sest tarkvarad ei suutnud joondada sama palju fotosid ja seega lähteandmed on erinevad.

KOKKUVÕTE

Fotogramm-meetria on aja jooksul kiiresti arenenud. Tugevaim areng on toimunud viimastel aastakümnetel tänu tehnoloogia arengule. Tänu sellele on 3D mudelite modelleerimine ja kättesaadavus võimalik peaaegu igaühele. Vaja on ainult kaamerat ja arvutit, millega andmeid töödelda. On võimalik isegi ainult nutitelefoniga luua 3D mudeleid, kasutades telefonis olevat kaamerat ja nutitelefonidele loodud tarkvara.

Antud uurimustöös kasutas autor 3D mudelite loomiseks hübriidkaamert Sony α5000 ja lauaarvutit. Kokku pildistati neli erinevat objekti ja andmeid töödeldi kahe erineva tarkvaraga. Kõikidel objektidel oli erinevaid pinnatekstuure, mille mõju 3D mudeli loomisele hinnati. Objektid asusid Tartu linnas või selle lähiümbruses. Autori valitud objektideks on: Eesti Rahva Muuseumi viinaköök, Tartu Ülikooli keemia instituudi fassaad, Kõrveküla Põhikooli hoone fassaad ja Jänese tänaval asuva hoone fassaad. Autor kasutas valitud fassaadidest lõikusid, et andmetöötlus liiga mahukaks ei läheks.

3D mudelite modelleerimiseks kasutati Agisoft Metashape Proffessional ja Regard 3D tarkvarasid. Mõlemad programmid on eksisteerinud juba mõnda aega ja algsetest versioonidest kõvasti edasi arenenud. Metashape eelkäija Agisoft Photoscan loodi juba 2010. aastal ja esimene versioon Regard 3D ilmus 2015. aastal. Mõlemat programmi on ka algajal lihtne kasutada ja kodulehtedel on juhendid seletamaks hätta sattumisel. Regard 3D kasutati koos MeshLab-iga, viimast kasutati 3D mudelite mõõtkavasse viimiseks.

Andmetöötlus algas fotode importimisest tarkvaradesse ja seejärel programmid joondasid fotod otsides fotodel asuvaid iseloomulike punkte, mis on tuvastatavad mitmetelt piltidelt. Metashape suutis kõik ette antud fotod joondada. Regard 3D suutis kõik fotod joondada ainult ühe objekti puhul. Fotode joondamise tulemusena tekkisid hõredad punktipilved, mida seejärel tuli tihendada, et tekiks tihe punktipilv. Seejärel loodi kolmnurkade võrgustiku mudel ja viimaseks genereeriti tekstuurid 3D mudelitele.

Programmide suutlikkuse suurimad erinevused tulid välja võrgustiku mudelite loomisel, kus Metashape genereeris detailsemad mudelid. Tekitatud polügoonide hulk Metashape programmiga oli kümneid kordi suurem, kui Regard 3D loodud mudelitel.

Suurimad visuaalsed moonutused 3D mudelitele tekkisid klaaspindadest ja liiga ühetahulise tekstuuridega pindadest. Seetõttu visuaalselt kõige kehvemad mudelid tekitati Tartu Ülikooli keemia

instituudi ja Kõrveküla Põhikooli hoone andmetest. Väiksema moonutustega mudeliteks olid ERM-i viinaköögi ja Jänese tänava fassaad, mis olid suuresti tehtud telliskividest.

Geomeetrilise kvaliteedi hindamisel tõdeti, et väiksema visuaalse kvaliteediga mudelitel on ka väiksem geomeetriline kvaliteet. Tarkvarade vahelist võrdlust geomeetrilise kvaliteedi hindamisel on võimalik sooritada ainult Jänese tänava fassaadi puhul. Sellel objektil suutsid ainsana mõlemad tarkvarad joondada sama palju fotosid ja seega on lähteandmed samasugused. Teistel objektidel ei suutnud programmid sama palju fotosid joondada ja seetõttu on lähteandmed erinevad.

SUMMARY

The objective of this graduation thesis *Effects of Surface Textures on Close-range Photogrammetry Based 3D Models* is to investigate how different facade textures affect the quality of 3D models created using close-range photogrammetric methods. The texture of surfaces is one of the most important factors that affect the visual appearance of spatial objects. In natural environments, surface textures are diverse and rich, creating various visual effects that can significantly affect object detection and analysis. Modern photogrammetric systems often use surface texture information to create three-dimensional models of objects, as textures can provide additional information about the shape and geometry of objects, contributing to more accurate 3D models.

The research consists of four parts, introducing the nature and history of photogrammetry and photogrammetric software, describing the tools, processes, and research objects used in the experiment, presenting the obtained results and scaling the models, and analyzing the results obtained, considering both the visual and geometric quality of 3D models.

The choice of this research topic is relevant today, as the creation of 3D models has become more affordable and technology has become more capable. Creating 3D models is now possible for almost anyone with a camera and a computer to process data. Even smartphones can create 3D models using built-in cameras and software designed for smartphones. Therefore, interest in photogrammetric solutions is growing in many fields, such as construction, architecture, real estate, geology, and geodesy. The importance of surface textures in creating 3D models is particularly critical in this context, as it can increase the accuracy and usefulness of models in many practical applications.

The study applies various methods and techniques to analyze and evaluate the importance of surface textures in 3D model creation and identify possible limitations and challenges in this process. The research also provides an opportunity to compare different software programs using the same data set, i.e., photographs. This study discusses the distortions in 3D models and how the quality of the models can be affected by different surfaces. It is noted that the biggest distortions occur on glass surfaces and on surfaces that are too uniform. The study found that the highest quality models were obtained from brick facades. The article emphasizes the importance of considering the surface properties when creating 3D models, as it can greatly impact the geometric quality of the final product. Models with higher visual quality also have higher geometric quality, while models with lower visual quality also have poorer geometric quality.

VIIDATUD ALLIKAD

- [1] G. Konecny, GEOINFORMATION Remote Sensing, Photogrammetry, and Geographic Information Systems, Second Edition, Boca Raton: CRC Press, 2014, p. 472.
- [2] Maa-amet, „Fotogramm-meetria,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://maaamet.ee/ruumiandmed-ja-kaardid/ruumiandmete-tootmine/fotogramm-meetria>. [Kasutatud 25. 04. 2023].
- [3] N. A. Matthews, *Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation Technical Note 428*, Denver, Colorado: U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, 2008, p. 42.
- [4] B. A. D. B. E. W. Paul R. Wolf, Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, Fourth Edition, McGraw-Hill Education, 2014, p. 640.
- [5] N. Liba, Fotogramm-meetri alused, Tartu: Eesti Põllumajandusülikool, 2005, p. 303.
- [6] Agisoft LLC, „Agisoft Metashape User Manual Professional Edition, Version 2.0,“ [Võrgumaterjal]. Available: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_2_0_en.pdf. [Kasutatud 21. 04. 2023].
- [7] Agisoft LLC, „Support,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.agisoft.com/support/tutorials/>. [Kasutatud 19. 04. 2023].
- [8] Regard 3D, [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.regard3d.org/index.php>. [Kasutatud 25. 04. 2023].
- [9] Regard 3D, „Download,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.regard3d.org/index.php/download>. [Kasutatud 25. 04. 2023].
- [10] Regard 3D, „Tutorials,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.regard3d.org/index.php/documentation/tutorial>. [Kasutatud 24. 04. 2023].
- [11] MeshLab. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.meshlab.net/>. [Kasutatud 25. 04. 2023].
- [12] Sony Europe B.V., „α5000 E-mount Camera with APS-C Sensor,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.sony.ee/electronics/interchangeable-lens-cameras/ilce-5000-kit>. [Kasutatud 20. 04. 2023].
- [13] Photopoint, „Sony a5000 + 16-50mm Kit, must,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.photopoint.ee/kaamerad/704-sony-a5000-16-50mm-kit-must>. [Kasutatud 20. 04. 2023].

- [14] „Kõrveküla põhikool,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://web.archive.org/web/20160819231358/https://www.maan.ee/index.php?leht=9&rn=75010559>. [Kasutatud 28. 04. 2023].
- [15] Wuni OÜ, „Erm,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.wuni.ee/erm>. [Kasutatud 25. 04. 2023].
- [16] Eesti Rahva Muuseum, „Viinaköök,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.erm.ee/et/rooms/viinakook>. [Kasutatud 29. 04. 2023].
- [17] U. Ackah, „Scale in Meshlab,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://uackahmsc.wordpress.com/2020/04/02/scale-in-meshlab/>. [Kasutatud 28. 04. 2023].
- [18] Wikipedia, „Metashape,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Metashape>. [Kasutatud 21. 04. 2023].

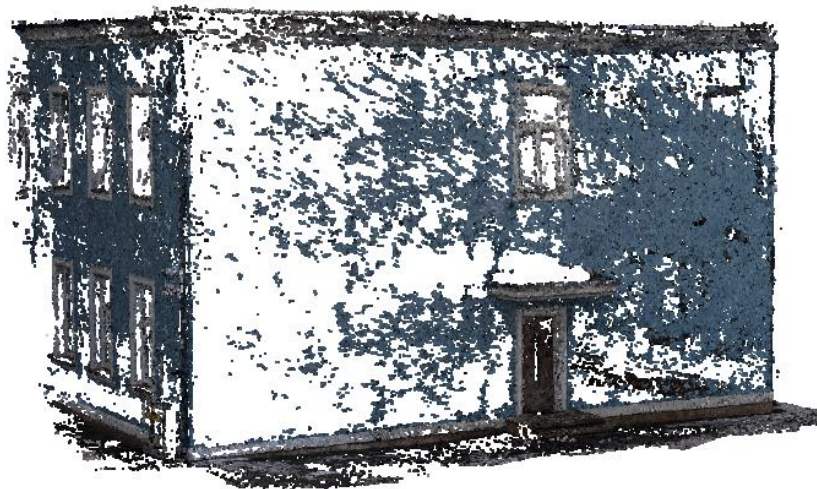
LISAD

Lisa 1. Metashape genereeritud tihedad punktipilved

Lisa 2. Regard 3D genereeritud tihedad punktipilved

Lisa 3. Metashape tihedad punktipilved punktide usaldusväärsuse näitajatega

Lisa 1. Metashape genereeritud tihedad punktipilved



Metashape-is genereeritud Kõrveküla kooli tihe punktipilv



Metashape-is genereeritud viinaköögi varemete tihe punktipilv

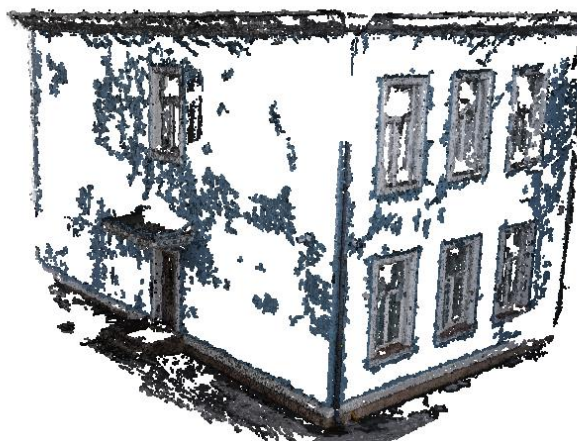


Metashape-is genereeritud Jänese tänava fassaadi tihe punktipilv



Metashape-is genereeritud Chemicum-i tihe punkt pilv

Lisa 2. Regard 3D genereeritud tihedad punktipilved



Regard 3D genereeritud Kõrveküla kooli tihe punktipilv



Regard 3D genereeritud viinaköögi varemete tihe punktipilv

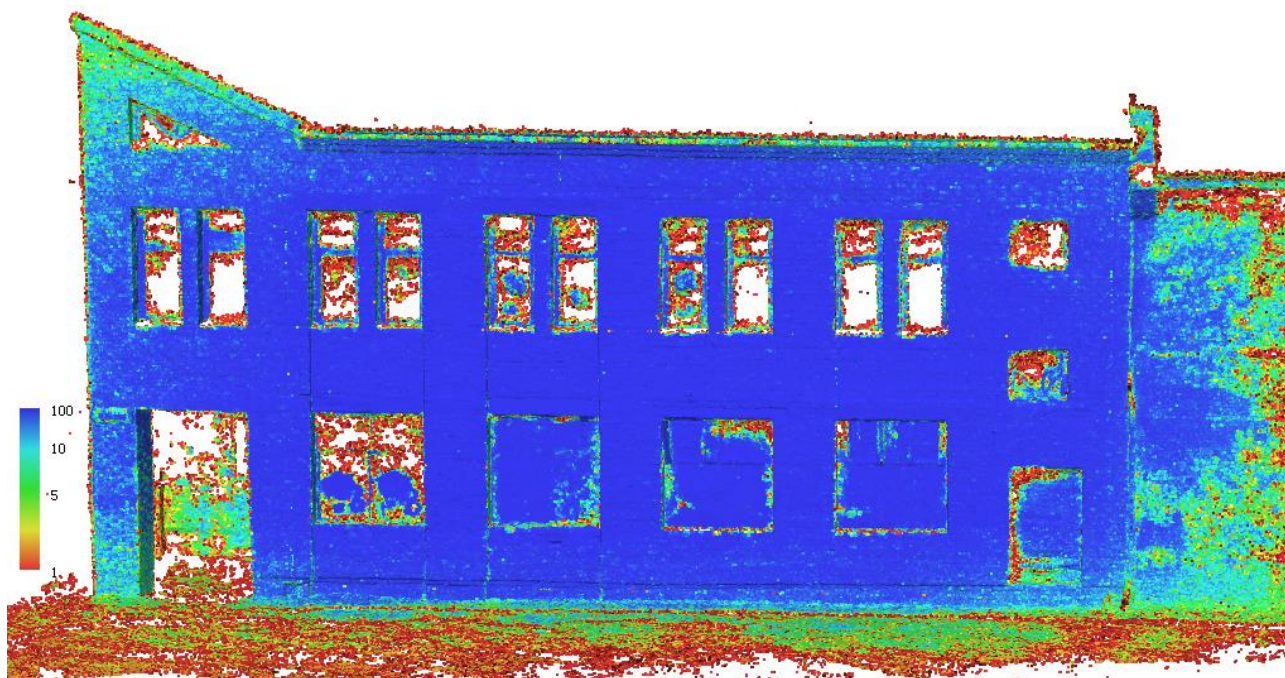


Regard 3D genereeritud Jänese tänava fassaadi tihe punktipilv

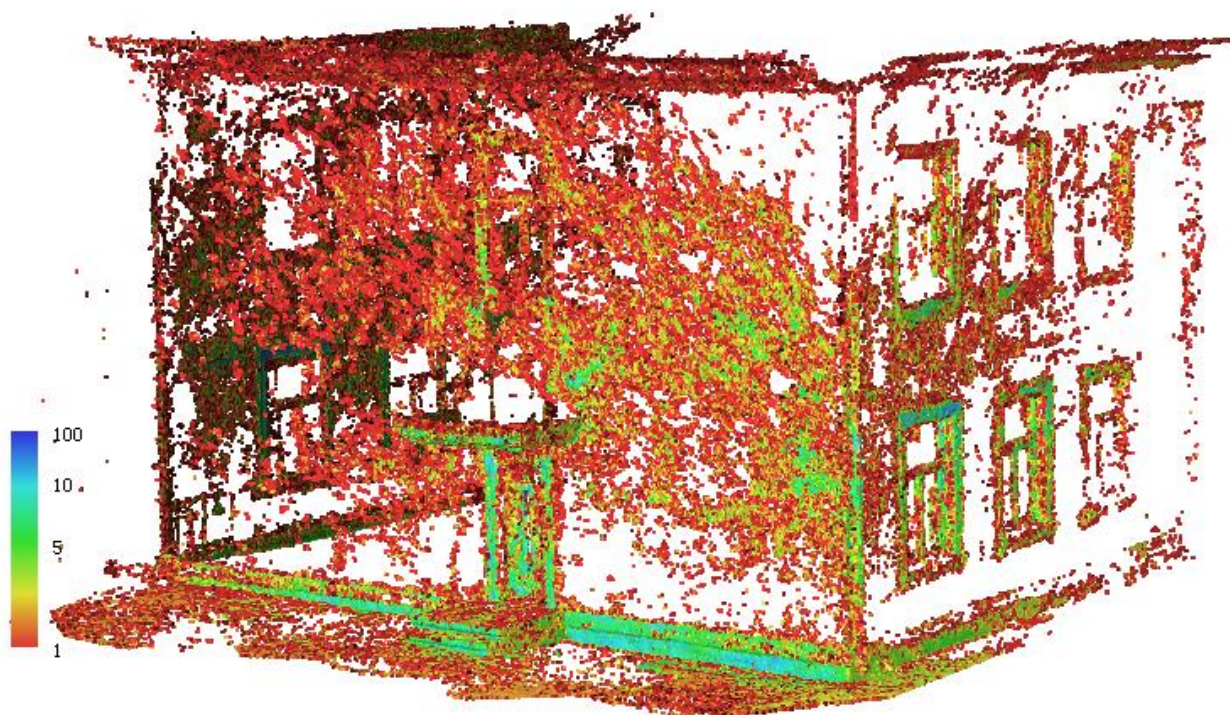


Regard 3D genereeritud Chemicum-i tihe punktipilv

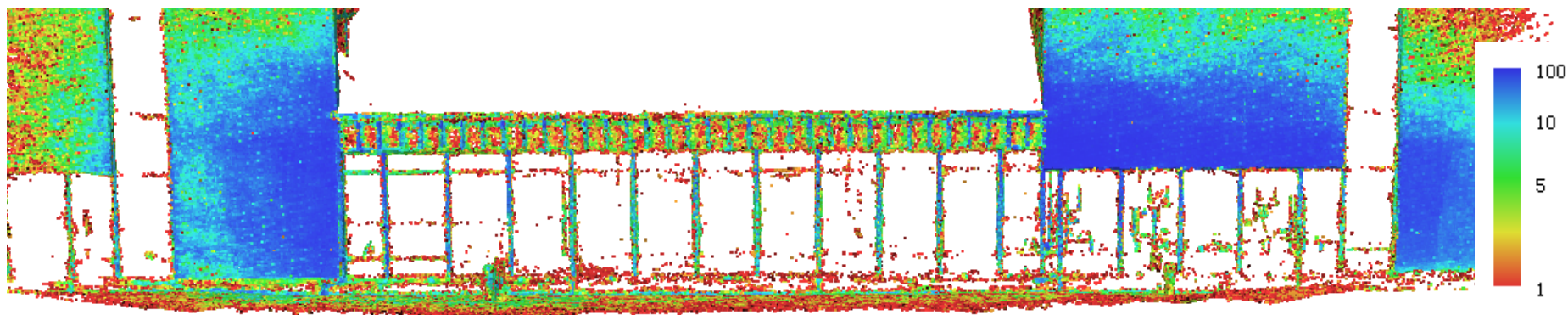
Lisa 3. Metashape tihedad punktipilved punktide usaldusväärsuse näitajatega



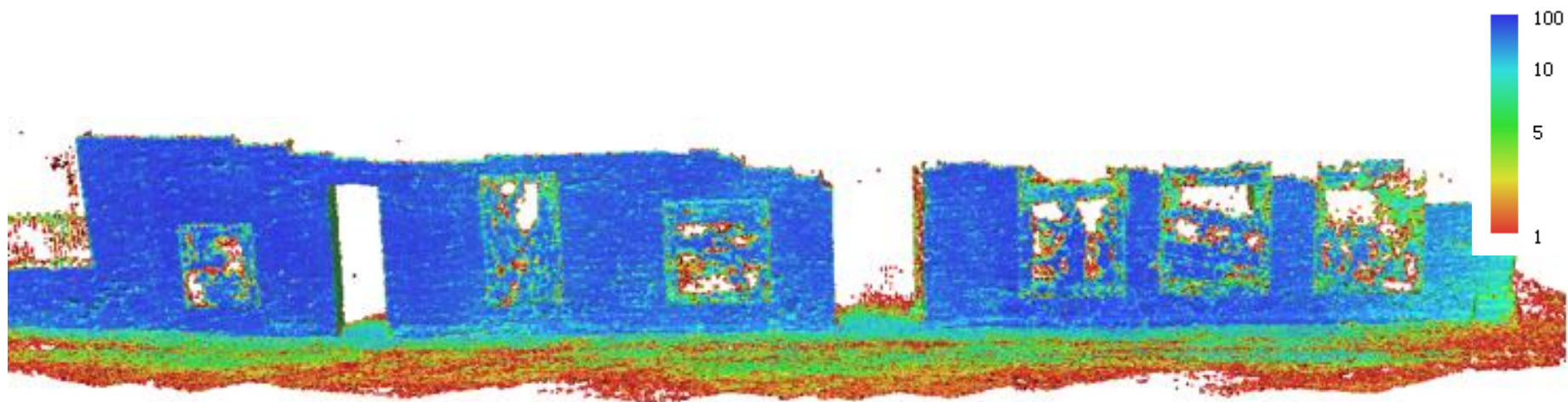
Metashape Jänesetähe fassade tihe punktipilv punktide usaldusväärsuse näitajaga



Metashape Kõrveküla Põhikooli hoone tihe punktipilv punktide usaldusväärsuse näitajaga



Metashape viinaköögi tihe punktipilv punktide usaldusväärsuse näitajaga



Metashape-i Chemicum-i fassaadi tihe punktipilv punktide usaldusväärsuse näitajaga