



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **Fotogrammetrian käyttö geotieteiden opetuksessa ja tutkimuksessa**

Ville Niikonen

GEOTIETEET  
Kandidaatintutkielma  
Toukokuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Fotogrammetrian käyttö geotieteiden opetuksessa ja tutkimuksessa

Ville Niikkonen

Oulun yliopisto, Geologian ja mineralogian koulutusohjelma

Kandidaatintutkielma 2024, 25 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Ranta, Jukka-Pekka., FT

COVID-19-pandemian jälkeisessä maailmassa on noussut tarvetta etäopiskelun laadun parantamiselle eri teknologisten applikaatioiden avustuksella. Geotieteissä tarve korostui kenttäkurssien ja lähiopetuksen vähenemisen myötä, kun puutteita havaittiin käytännönläheisten aiheiden, kuten rakennegeologisten ilmiöiden sekä kivilaji- ja mineraalitunnistuksen opetuksessa.

Fotogrammetrian avulla voidaan muodostaa kohteista kolmiulotteisia digitaalisia malleja valokuvien avulla käyttäen hyväksi kuvanmittaus- ja tulkintamenetelmiä. Tässä kandidaatintutkielmassa tehdään kirjallisuuskatsaus fotogrammetrian käyttökohteisiin geotieteiden opetuksessa ja tutkimuksessa. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi ilma- ja lähifotogrammetrian sovelluksia insinööri-, kaivos-, malmi-, rakenne-, ja kvartäärigeologian aloilla. Työssä johdetaan myös lyhyt 3D-mallinnus neljälle käsinäytteelle Oulun yliopiston mineraali- ja kivinäytevarastosta käyttäen Alicevision Meshroom -mallinnusohjelmaa. Tutkimuksessa esitellään valokuvauksessa käytetyt välineet ja kuvausasetukset sekä kuvaillaan fotogrammetrisen 3D-mallinnuksen työnkulkua ja mahdollisia ongelmia mallinnusprosessissa.

3D-mallinnuksen tulokset vastasivat odotuksia kiittävästi, mutta mallinnusprosessiin jäi vielä parannettavaa mallien kirkkauksien ja tekstuurien parantamisen osalta. Mallinnuksen ja tutkittujen esimerkkien perusteella todetaan, että fotogrammetrisillä menetelmillä on paljon etäopiskelun laatua parantavia käyttökohteita geotieteissä. Fotogrammetristen menetelmien käyttö geotieteiden tutkimuksessa on myös avannut uusia mahdollisuuksia tiedonvaihdon tehostamisessa sekä geologisen tiedon käsittelyssä

ja esittämisessä. Fotogrammetristen menetelmien sovelluksissa todetaan myös tapahtuvan jatkuvia kehityksiä geotieteiden tutkimuksen ja opetuksen saralla 3D-mallinnuksen ja 3D-arkistojen yleistyessä.

*Asiasanat: Fotogrammetria, Geotieteet, 3D-mallinnus.*

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	5
2 Fotogrammetria .....	6
2.1 Fotogrammetrian määritelmä .....	6
2.2 Fotogrammetrian historiaa .....	6
2.3 Fotogrammetrian käyttö geotieteissä .....	7
2.3.1 Ilmafotogrammetrian käyttökohteita .....	7
2.3.2 Lähifotogrammetrian käyttökohteita .....	8
3 Menetelmät .....	10
3.1 Kuvausvälineet .....	10
3.2 Kameran asetukset .....	12
3.3 Kohteen asettelu .....	13
3.4 Fotogrammetrinen 3D-mallinnus .....	14
3.4.1 Mallinnusohjelman valinta .....	14
3.4.2 Työnkulku ja mallinnuksen vaiheet .....	15
3.4.3 Valmiin 3D-mallin loppukäsittely .....	19
3.4.4 Mahdolliset ongelmat .....	19
4 Tulosten tarkastelu .....	22
5 Pohdinta ja yhteenveto .....	24
LÄHDELUETTELO .....	26

# 1 JOHDANTO

Etäopiskelun mahdollistaminen ja etäopetuksen applikaatioiden tarve ovat nousseet uuteen uskoon COVID-19 pandemian jälkeisessä maailmassa. Eritoten geotieteissä – aloilla, joissa kenttäretket ja geologisten kohteiden fyysinen tarkastelu ovat läheisessä yhteydessä tieteiden harjoittamiseen ja opiskeluun – vastuuhenkilöt ovat joutuneet kehittämään ja integroimaan uusia menetelmiä nopeasti, jotta sopeutuminen uusiin vaatimuksiin opetus- ja työympäristöissä on voitu mahdollistaa (esim. Baker ym., 2020; Shami ym., 2022). Geologia on perusluonteeltaan paikallista, joten geologian tutkiminen vaatii usein kohteisiin liikkumista tai käsinäytteiden käsittelyä. Varsinkin visuaalisille oppijoille, paikan päällä olemista ja asioiden käsissä pyörittelemistä voi olla hankala korvata kuvilla, tekstillä, tai videoilla.

Fotogrammetrian ja 3D-mallinnuksen kehityksen myötä niiden käyttökohteet ovat löytäneet tiensä myös geotieteisiin. Fotogrammetriset menetelmät voivat toimia osana ratkaisua etäopiskelussa ja tutkimuksessa nousseisiin haasteisiin tarjoamalla mahdollisuuksia tarkastella geologisia kohteita ja ilmiöitä interaktiivisesti kolmessa ulottuvuudessa, etänä. Tässä tutkielmassa tarkastellaan fotogrammetrisien menetelmien käyttöä geotieteiden tutkimuksessa ja opetuksessa käyttäen apuna jo olemassa olevia tutkimuksia ja esimerkkejä. Tutkielmassa kuvaillaan myös lyhyt tutkimus, jossa fotogrammetrista 3D-mallinnusta sovellettiin neljälle käsinäytteelle Oulun yliopiston mineraali- ja kiviläytetarastosta.

## 2 FOTOGRAMMETRIA

### 2.1 Fotogrammetrian määritelmä

Fotogrammetriassa käytetään hyväksi kuvanmittaus- ja tulkintamenetelmiä kohteen muodon ja sijainnin johtamiseksi kohteesta otetuista valokuvista. Pääosin fotogrammetrisia menetelmiä käytetään kolmiulotteisen digitaalisen tai graafisen mallin muodostamiseksi valokuvien kohteesta. (Luhmann ym., 2013) Valokuvien lisäksi fotogrammetriaa voidaan hyödyntää elektronimikroskooppi-, ultraääni-, ja röntgenmittauksista (Luhmann ym., 2006).

Fotogrammetria jaetaan yleensä kameran etäisyyden perusteella ilmafotogrammetriaan ja lähifotogrammetriaan. Ilmafotogrammetrian avulla suurista alueista, kuten esimerkiksi kaivoksista tai kaupungeista, voidaan muodostaa topografisia karttoja ja 3D-malleja. Ilmafotogrammetriassa kamera on yleensä kiinnitetty lentokoneeseen kuvaamaan kohtisuoraan maata päin. Kohteesta otetaan päällekkäisiä kuvia, joista tuotetaan 3D-malli mallinnusohjelmistoja käyttäen. Lähifotogrammetria keskittyy pienempien kohteiden, kuten pienten rakennusten tai esineiden, mittaamiseen ja sen avulla voidaan tuottaa esimerkiksi tietokonegrafiikkaa ja piirroksia. (Walford, 2007)

### 2.2 Fotogrammetrian historiaa

Fotogrammetrian kehitys on alkanut 1850-luvun aikaan ja on tapahtunut neljässä, noin viidenkymmenen vuoden kehitysvaiheessa. Vuosina 1850–1900 tapahtui mittapöytä-fotogrammetrian kehittyminen, kun ”fotogrammetrian isänä” pidetty Aimé Laussedat aloitti käyttämään apunaan maan päältä otettuja kuvia topografisien karttojen muodostamiseen. Vuosina 1900–1960 tapahtui kaksi tärkeää kehityskaskelta: stereoskopian yleistyminen sekä Wrightin veljesten lentokone. Nämä johtivat analogisen fotogrammetrian kehittymiseen, kun kuvien laatu kasvoi ja niitä pystyttiin ottamaan korkeammalta. Analyttinen fotogrammetria on kehittynyt 1960-luvun jälkeen tietokoneen keksimisen avustuksella. Tänä päivänä, nopean digitalisaation ja teknologisten kehitysten vauhdittamana, puhutaan jo digitaalisesta fotogrammetriasta. (The Center for Photogrammetric Training, 2008)

## 2.3 Fotogrammetrian käyttö geotieteissä

Teknologian kehittyessä 3D-mallien tekemiseen tarvittavien resurssien kustannukset ovat laskeneet pisteeseen, jossa malleja voidaan tuottaa – joissain tapauksissa – lähes ilmaiseksi. Tämä on tehnyt digitaalisten geologisten mallien tuottamisesta houkuttelevaa, kun käyttökohteita on millimetritasolta koko maapallon kattaviin malleihin, kuten esimerkiksi Google Earth ja ArcGIS Earth. (Urbanski, 2018) Pavlis & Mason (2017) ennustavat 3D-tekniikoiden muokkaavan geologista kenttätöytä ja sen opetusta perustavanlaatuisesti menetelmien ja applikaatioiden kehittyessä. Opetusympäristöissä fotogrammetristen mallien tarkastelusta on hyötyä opiskelijoille erilaisten geologisten ilmiöiden parempaan ymmärtämiseen, kun opiskeluun voidaan tarjota uutta perspektiiviä esittämällä kaksiulotteista tietoa kolmiulotteisena mallina (Pavlis & Mason, 2017). Tässä kappaleessa tarkastellaan esimerkkejä fotogrammetrian käyttökohteista geotieteiden tutkimuksessa ja opetuksessa.

### 2.3.1 Ilmafotogrammetrian käyttökohteita

Miehittämättömien ilma-alusten (UAV) ja fotogrammetrian yhteiskäyttö on yleistä insinööri- ja kaivosgeologian alalla. Topografista dataa ja 3D-malleja voidaan muodostaa fotogrammetriaa käyttäen esimerkiksi maan- ja kivivyörymien liikkeistä, kallioseinämien ja -paljastumien rakenteesta sekä louhosten rakennegeologiasta (esim. Bemis ym., 2014; Esposito ym., 2017; Tsunetaka ym., 2020; Meng ym., 2021). Esimerkiksi Iranissa, Shahzadeh Abbasin kupariesiintymän malminetsintäprojektissa, geologisten pohjakarttojen teossa käytettiin edullista lennokkia geologisen datan keräämiseen. Shahzadeh Abbasin kupariesiintymät ovat juonityypin esiintymiä, jotka seuraavat geologisia rakenteita, joten korkearesoluutioisen pohjakartan tekeminen sekä murtumien, juonien ja saumojen tarkan sijainnin määrittäminen auttoi mineralisaatioiden paikantamista ja edisti tutkimuksia huomattavasti. (Honarmand & Shahriari, 2021)

Opetusympäristössä ilmafotogrammetrian avulla opiskelijoille voidaan tarjota esimerkiksi mahdollisuus analysoida eri 3D-elementtien suhteita, kuten stratigrafisia variaatioita, rakenteellisia epämuotoisuuksia ja pinnan eroosiota, interaktiivisesti 3D-mallien avulla (Urbanski, 2018). Ilmafotogrammetristen tekniikoiden avulla opiskelijoille voidaan myös mahdollistaa geologisiin kohteisiin tutustumista

virtuaalisesti, kuten Mariotto ym. (2022) artikkelissa kuvaillun Etna-tulivuoren (Italia) QR-koodeilla toimivan virtuaalisen ”geopolun” tapauksessa. Työssä kuvaillaan tulivuorelle UAV:lla ja ”structure-from-motion” (SfM) -teknologialla tuotettujen 3D-mallien avulla rakennettua virtuaalista esittelyä. Reitti muodostuu kahdeksasta virtuaalisesta ”geopysäkestä”, joissa QR-koodien avulla vierailija pääsee tarkastelemaan mobiililaitteella tulivuoren eri osia kolmiulotteisesti ilmasta. Työn tarkoituksena oli tukea tavallisia kenttäretkiä ja mahdollisesti inspiroida uusia lähestymistapoja geotieteiden opetukseen.

### **2.3.2 Lähifotogrammetrian käyttökohteita**

Geotieteiden tutkimuksessa lähifotogrammetrian käyttökohteet rajoittuvat suurimmaksi osaksi kairasydänten (esim. Betlem ym., 2020; Jacq ym., 2021; Ankor & Tyler, 2022) ja käsinäytteiden (esim. Harbowo ym., 2022) digitointiin. Kalliopaljastumien fotogrammetrinen mallinnus voidaan myös laskea lähifotogrammetriaksi, jos valokuvaus on tehty lähietäisyydeltä digitaalisella kameralla (esim. Lehto, 2017; Urbanski, 2018). Kairasydänten tapauksessa näytteiden valokuvaus on usein analysointiprosessia, jotta esimerkiksi sedimenttikivien visuaaliset ominaisuudet voidaan tallentaa ennen jatkonäytteenottoja tai tuhoavia analyysejä (Jacq ym., 2021). Jacq ym. (2021) tuottamassa tutkimuksessa edellä mainitun kaltaisia valokuvia käsiteltiin fotogrammetrisin menetelmin lisäinformaation (esim. rakenteiden) tallentamiseksi jälkitarkastelua ja -mittauksia varten. Ankor & Tyler (2022) tuottivat samankaltaisen tutkimuksen jatkona Jacq ym. (2021) työlle kvantifioiden 3D-mallinnuksen ja kuvauksen laatua suuremmalle määrälle kohteita. Kairasydämen fotogrammetrista 3D-mallinnusta voidaan myös käyttää ei-tuhoavana ja kustannustehokkaana työkaluna kairasydännäytteiden tilavuuden ja tiheyden määrittämiseen sekä tuhoutuneiden kairasydänintervallien uudelleenkaasamiseen (Betlem ym., 2020). Betlem ym. (2020) toteavat myös digitaalisten kairasydänmallien käyttökohteiden soveltuvan muille näytetyypeille, muun muassa luonnostaan hajoaville tai vaarallisille näytteille.

Edellä mainitut käyttökohteet voivat toimia myös hyvinä opetuksen työkaluina geotieteissä. Esimerkiksi Flemingin (2022) artikkelissa kuvaillaan kahta virtuaalisiin 3D kalliopaljastumiin pohjautuvaa opetusmenetelmää, jossa oppilaat pääsevät keräämään, analysoimaan ja tulkitsemaan geologista dataa, ja sitä kautta ajattelemaan kolmessa



ulottuvuudessa. Aalto-yliopistossa tuotetussa Pro gradu -tutkielmassa (Merkel, 2019) tuotettiin fotogrammetrisia 3D-malleja yliopiston kivi- ja mineraalinäytteistä. Valmiit mallit vietiin helposti opiskelijoiden saavutettavissa olevaan virtuaalitodellisuus (VR) -näytearkistoon.

## 3 MENETELMÄT

Fotogrammetrian ja fotogrammetrisen mallinnuksen tutkimisen avuksi tässä työssä tuotettiin neljä 3D-mallia Oulun yliopiston mineraali- ja kiviäytevarastosta valituille käsinäytteille. Tavoitteena oli tarkastella käsinäytteiden 3D-mallinnuksen työnkulkua, ja pohtia menetelmän käytettävyyttä geotieteiden opetuksessa. Näytteet valittiin siten, että ne edustavat ja kattavat erilaisia fyysisiä ominaisuuksia, kuten geometriaa, kiiltävyyttä, värejä, sekä pinnan tekstuureja.

### 3.1 Kuvausvälineet

Paljon yksityiskohtia sisältävien kohteiden, kuten mineraali- ja kiviäytteiden, mallintamisessa on erityisen tärkeää huomioida kuvien laatu ja määrä. Laatuun voi vaikuttaa valitsemalla korkeatasoisen kameran ja kameralinssin. Myös nykyajan matkapuhelimien kameroilla on mahdollista saada laadukkaita kuvia ottaen huomioon kuvaussovelluksen mahdollisuudet muokata kuvausasetuksia, kuten laukaisunopeutta, ISO-arvoa ja aukon kokoa.

Häiriötekijöitä pyritään poistamaan vaikuttamalla valaistukseen ja taustaan, poistamalla varjoja ja ei-haluttuja kohteita kuvasta. Tavoitteena on luoda neutraali ympäristö näytteelle, jotta mallinnussovellus onnistuu tunnistamaan kuvista vain relevantteja tekstuureja ja vertailupisteitä. Kamera ja kuvattava kohde täytyy myös pyrkiä pitämään jäämäkästi paikallaan, jotta vältetään tärähtäneitä kuvia. Kameran jalustan, tukevan pöydän ja etälaukaisimen käyttö on siis suotavaa. Tässä työssä käytetyt välineet on listattu Taulukossa 1 ja Kuvassa 1.

Taulukko 1. Kuvauksessa käytetyt välineet.

Canon EOS 6D Mark II -järjestelmäkamera
Canon EF 100 mm f/2.8L Macro IS USM -objektiivi
Kameran jalusta
Pyörivä alusta näytteelle
Diffuusiolaatikko
Kohdevalot



Kuva 1. Kuvausjärjestely ja kuvauksessa käytetyt välineet.

### 3.2 Kameran asetukset

Kameran asetukset toimivat yhteistyössä kuvausympäristön kanssa korkeatasoisten kuvien luomisessa. Tärkeimpinä asetuksina voidaan pitää valotukseen vaikuttavia parametreja. ISO-arvo, valotusaika ja aukon koko määräävät yhdessä kuvan valotuksen, joten näihin asetuksiin kannattaa kiinnittää erityistä huomiota. Tämän työn kameran asetusten valintaan käytettiin ohjeellisina arvoina Merkelin (2019) ehdotuksia kamera-asetuksista. Kuvauksissa käytetyt kameran asetukset on esitetty Taulukossa 2.

Taulukko 2. Kuvauksissa käytetyt kameran asetukset arvoineen ja yksikköineen.

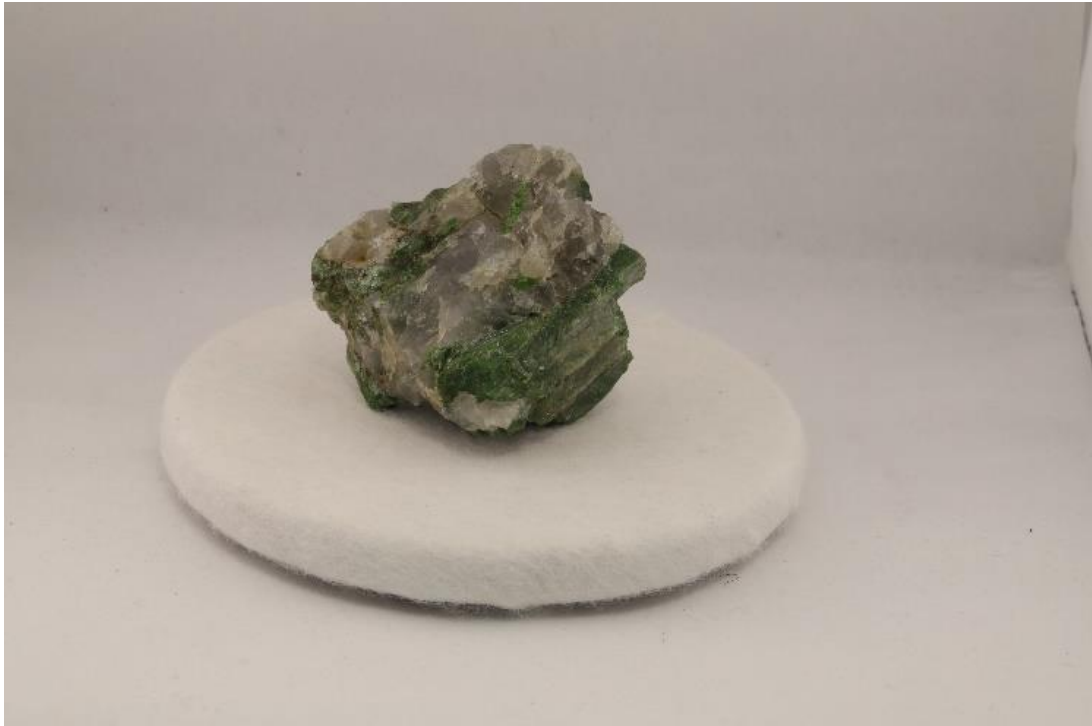
Parametri	Arvo	Yksikkö
<b>ISO</b>	400	-
<b>Objektiivin polttoväli (focal length)</b>	100	mm
<b>Valotusaika (shutter speed)</b>	167 1/6	ms s
<b>Aukon koko (aperture)</b>	f/20	-
<b>Manuaalinen tarkennus</b>	✓	-
<b>Kohteen etäisyys</b>	n. 65	cm

Alla esiteltynä tarkemmin kameran eri asetusten merkitykset Canon kameravalmistajan mukaan (<https://www.canon.com.au/explore/glossary>):

- ISO: ISO-arvolla pyritään vaikuttamaan kameran sensorin herkkyyteen valolle. Mitä suurempi ISO-arvo, sitä alhaisemmassa valaistuksessa kuvia voidaan ottaa ilman salamavaloa. Huono puoli korkeassa ISO-arvossa on sen mukana tuoma kohina. Liian korkealla arvolla kuvista voi tulla myös ylivalottuneita, ympäristön ollessa hyvin valaistu. Kuvausta varten on siis syytä pyrkiä takaamaan mahdollisimman hyvä valaistus, jotta voidaan käyttää pienintä mahdollista ISO-arvoa.
- Valotusaika: Kameran sulkimen avautumiseen ja sulkeutumiseen kuluva aika, joka vaikuttaa sensorille pääsevän valon määrään. Pienillä valotusajoilla varmistetaan, että kohde ja kamera pysyvät liikkumatta kuvanottohetkellä.
- Aukon koko: Määrittää valon sisääntuloaukon koon. Mitä suurempi f-luku, sitä pienempi aukko. Aukon koko vaikuttaa myös syväterävyysalueen (alueen, jossa kohteet ovat tarkentuneita) kokoon. Korkeammalla f-luvulla saavutetaan suurempi syväterävyysalue.
- Kohteen etäisyys: Etäisyys vaikuttaa kuvassa näkyvän alueen lisäksi syväterävyysalueen kokoon. Apuna etäisyyden määrittämiseen voi käyttää netistä löytyviä ”depth of field” -laskuohjelmia, jotka antavat lopputuloksena syväterävyysalueen koon, kun ohjelmaan syötetään linssin polttoväli (tässä tapauksessa 100 mm), aukon koko sekä kohteen etäisyys. Optimaalisessa tilanteessa syväterävyysalue kattaa kuvattavan esineen.

### 3.3 Kohteen asettelu

Omnistuneen mallinnuksen edellytyksenä on kuvien laadun lisäksi kohteen kattavuus. Kattavuuden maksimoimiseksi kuvia on syytä ottaa paljon, ja useista eri asennoista, jolloin jokainen pinta tulee kuvatuksi vähintään kaksi kertaa. Kuvausta suunniteltaessa käsinäytteille valittiin kolme eri orientaatiota, joissa kuvia otettiin.



Kuva 2. Yksi mallinnuksessa käytetyistä kuvista, jossa huomioitavana kohteen asettelu pyörivän alustan päälle, neutraali tausta, sopiva valaistus sekä kohteeseen tarkennus.

Kuvausta auttoi myös pyörivän kohdealustan käyttö (Kuva 2.), jolla varmistettiin kohteen paikan muuttumattomuus kuvissa, ja helpotettiin kohteen kääntämistä kuvia otettaessa. Kohdealustaa käytettäessä kohde asetettiin alustan keskelle, jotta kohteen sivuttaisliike alustaa pyöritettäessä olisi mahdollisimman pieni. Mahdollista olisi myös pitää kohde täysin paikoillaan ja liikuttaa kameraa kohteen ympäri, mutta pienillä kohteilla järkevämpää on pyrkiä pitämään kamera paikoillaan ja pyörittää kohdetta kameran sijaan. Kuvauksissa käytetty diffuusiolaatikko myös estää kameran liikuttelun.

Kuvia otettiin alustaa pyörittäessä n. 5–10 asteen välein, eli n. 36–72 kuvaa yhtä asentoa kohden. Yhden käsinäytteen kuvakirjaston kooksi tuli siis n. 100–200 kuvaa.

### **3.4 Fotogrammetrinen 3D-mallinnus**

#### **3.4.1 Mallinnusohjelman valinta**

Markkinoilla on useita fotogrammetriseen 3D-mallinnukseen soveltuvia ohjelmistoja. Suosituimpiin ohjelmistoihin lukeutuvat muun muassa *Autodesk ReCap*, *Agisoft Metashape*, *Alicevision Meshroom*, *Pix4D*, *3DF Zephyr*, *Regard3D*, *PhotoModeler*,

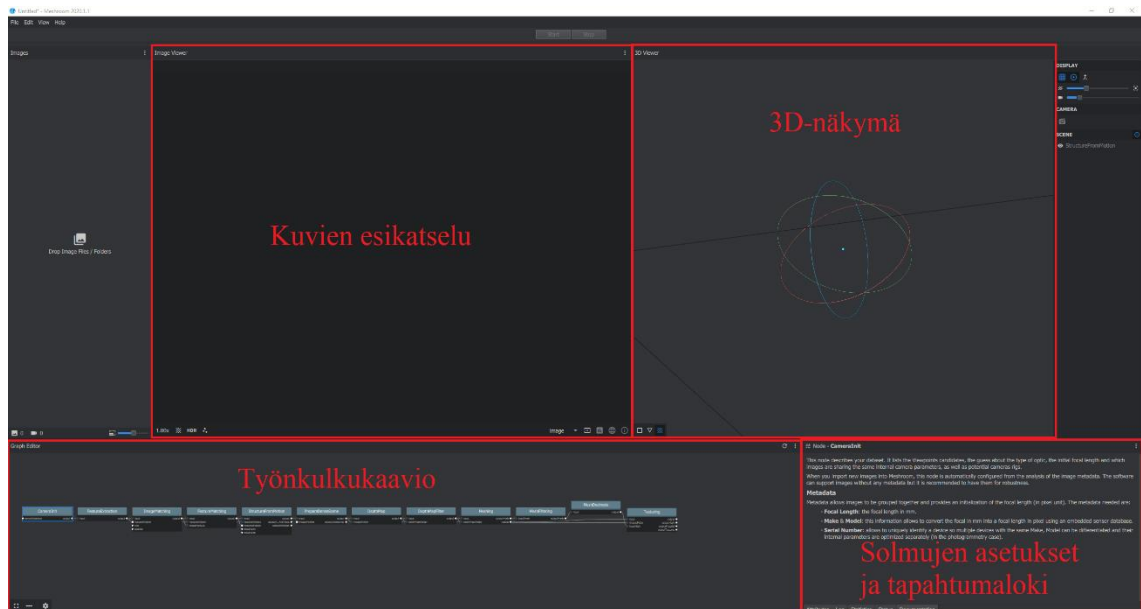
*WebODM*, *RealityCapture* sekä *COLMAP*. Suurin osa sovelluksista on maksullisia, mutta tarjolla on myös laadukkaita ilmaisia vaihtoehtoja. Tässä työssä esitettävien mallien tekoon käytettiin *Alicevision Meshroom*-ohjelmo, joka valittiin sen helppokäyttöisyyden vuoksi.

Mallinnusohjelma on täysin vastuussa kuvien muuttamisesta 3D-malliksi algoritmien avulla, joten oikean ohjelman valinta on tärkeää. Valintakriteereihin helppokäyttöisyyden lisäksi voi lukea myös prosessointinopeuden, asetusten muokkausmahdollisuudet sekä tietysti lopputuloksen laadun.

Meshroomilla mallien editointi ei ole mahdollista, joten mallin jälkikäsitteilyssä käytettiin *MeshLab*-ohjelmaa. Muita ilmaisia vaihtoehtoja ovat esimerkiksi *Blender*, *Daz 3D* ja *SketchUp*.

### 3.4.2 Työnkulku ja mallinnuksen vaiheet

Kuvien oton jälkeen voidaan aloittaa mallinnusprosessi. Kuvassa 3 on aloitusnäky Meshroom-ohjelmasta. Käyttöliittymässä korostuu Meshroomin helppokäyttöisyys: kaikki tarvittava on selkeästi esillä niille varatuilla alueilla.

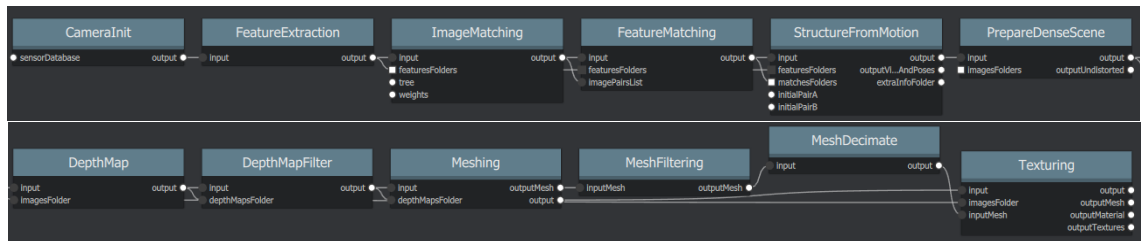


Kuva 3. Meshroom aloitusnäky.

Meshroom hyväksyy kuville suurimman osan yleisistä RAW tiedostomuodoista, kuten ".exr", ".rw2", ".cr2", ".nef", ".ar2", ja niin edelleen. Jos kuvia ei ole otettu RAW

muotoon, Meshroom suosittelee käyttämään kuvien tiedostomuotona yhtä seuraavista: ”.jpg”, ”.jpeg”, ”.tif”, ”.tiff” ja ”.png” (Meshroom, 2021)

Tutkimuksessa tehdyssä mallinnuksessa Meshroomin vakiona antamaan työkulkukaavioon (Kuva 4.) lisättiin ”MeshDecimate” -solmu, josta lisää sen selitteessä alempana.



Kuva 4. Meshroom työkulku.

Työkulun vaiheet ja niiden selitteet (Meshroom, 2021):

- I. CameraInit
  - II. FeatureExtraction
  - III. ImageMatching
  - IV. FeatureMatching
  - V. StructureFromMotion (SfM)
  - VI. ProperDenseScene
  - VII. DepthMap
  - VIII. DepthMapFilter
  - IX. Meshing
  - X. MeshFiltering
  - XI. MeshDecimate
  - XII. Texturing
- I. CameraInit: Kuvaa käytössä olevaa ainestoa. Se listaa sopivat kandidaatit näkökulmille, käytössä olevan optiikan, alustavan polttovälin ja kuvat, jotka käyttävät samoja kameran sisäisiä parametrejä, sekä potentiaaliset kameralaitteet. Se tunnistaa suurimman osan arvoista suoraan kuvien metadatasta, mutta se tukee myös kuvia ilman metadataa. Suositeltavaa on kuitenkin käyttää kuvia, joista löytyy metadata.



- II. FeatureExtraction: Paimii erottuvat pikseliryhmät, jotka ovat jossain määrin muuttumattomia kameran näkökulmien vaihtuessa kuvauksen aikana.
- III. ImageMatching: Valitsee sopivia kuvapareja. Tavoitteena on löytää kuvat, jotka katsovat näkymässä samoille alueille (esim. kaksi kuvaa, jotka katsovat samaa sivua käsinäytteestä). Tämän solmun ansiosta "FeatureMatching" -solmu laskee vain valittujen kuvaparien väliset osumat.
- IV. FeatureMatching: Suorittaa jokaiselle "ImageMatching" -solmun valitsemalle kuvaparille kaikkien ominaisuuksien vertailun kahdessa vaiheessa (fotometrinen vertailu ja geometrinen suodatus).
- V. StructureFromMotion (SfM): Analysoi kuvapareista löydettyjä ominaisuuspareja ymmärtääkseen geometriset suhteet 2D-havaintojen taustalla, ja päättelee näkymän rakenteen (3D pisteet) kaikkien kameroiden asennon (sijainti ja suunta) ja sisäisen kalibroinnin avulla. Tämä tehdään kasvavana jälleenrakennusprosessina (kutsutaan inkrementaaliseksi SfM:ksi): se laskee ensin alkuperäisen kahden näkymän jälleenrakennuksen, jota iteratiivisesti jatketaan lisäämällä uusia näkymiä.
- VI. PrepareDenseScene: Välittää vääristymättömiä kuvia syvyyskartan ja teksturoinnin laskentaan, jotta laskennat voidaan suorittaa neulanreikäkuviin ilman vääristymistä.
- VII. DepthMap: Laskee syvyysarvon jokaiselle pikselille jokaiselle SfM:n laskemalle kameralle. Tässä solmussa kuluu yleensä pisin aika, kun prosessointi on käynnissä.
- VIII. DepthMapFilter: Suodattaa syvyyskartan arvoja, jotka eivät ole yhtenäisiä useissa syvyyskartoissa. Tämä suodattaa epävarmat pisteet pois ennen syvyyskarttojen yhdistämistä "Meshing" -solmussa.
- IX. Meshing: Luo tiheän geometrisen pintaesityksen kohtauksesta (tässä tapauksessa käsinäytteestä). Se yhdistää kaikki syvyyskartat globaaliksi tiheäksi pistepilveksi mukautuvalla tarkkuudella, jonka jälkeen se muodostaa kolmioista muodostuvan mesh-pinnan.
- X. MeshFiltering: Suorittaa Laplace-suodatuksen poistaakseen paikallisia vikoja raa'asta mesh-leikkauksesta.

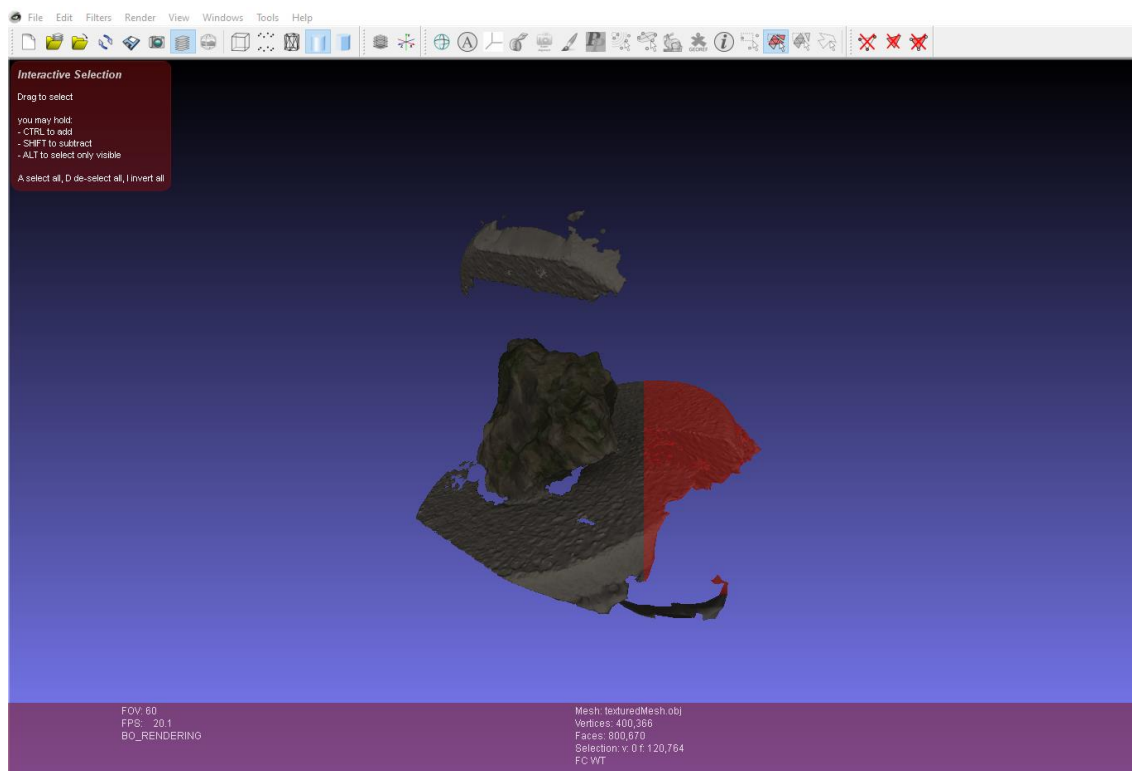
- XI. MeshDecimate: Vähentää meshin tiheyttä yksinkertaistamalla ja vähentämällä luotujen kolmioiden kärkien määrää, tehden mallista tiedostokooltaan pienemmän ja helpommin jatkokäsiteltävän.
- XII. Texturing: Tuottaa 3D-mallille kuvioinnin (tekstuurin) valitsemalla jokaiselle "Meshing" -solmun muodostamalle kolmiolle parhaan kamerakandidaatin riippuen kuvan resoluutiosta valitulle kolmiolle. Lopuksi se tasaa pikseliarvot tekstuurille.

Mallinnusprosessin kestoksi voi odottaa muutamaa tuntia, riippuen käytössä olevan tietokoneen prosessorin ja näytönohjaimen laskentatehosta sekä prosessoitavana olevan kuvakirjaston koosta. Kestoa voi myös yrittää lyhentää laskemalla teksturoinnin ja syvyyskartan laatua niiden solmujen asetuksista.

Meshroom tuottaa lopputuloksena valmiin mesh-tiedoston (".obj"), siihen sopivan tekstuuritiedoston (".png") (joskus monta kappaletta) sekä kolmannen tiedoston (".mtl"), joka toimii ohjeena 3D-mallien käsittelyohjelmistoille meshin ja tekstuurin yhdistämiseen.

Valmista 3D-mallia voi tutkia Meshroomissa prosessin valmistumisen jälkeen tuplaklikkaamalla "Texturing"-solmua ja laittamalla sen näkyviin käyttöliittymän oikeasta laidasta löytyvästä 3D-näkymästä.

### 3.4.3 Valmiin 3D-mallin loppukäsittely

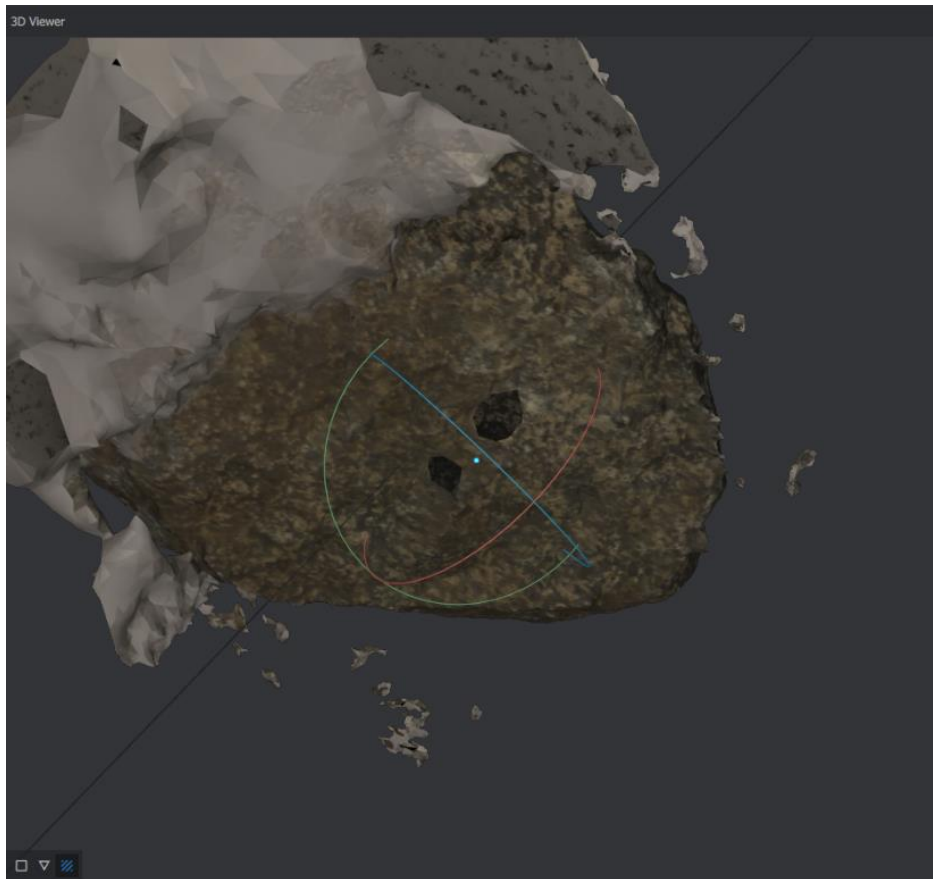


Kuva 5. Valmistuneen mallin loppusiivous MeshLabissa.

Mallinnuksen valmistuttua lopputuloksista löytyi turhia elementtejä, jotka ovat jääneet malleihin esimerkiksi kuvausalustasta, kuten Kuvassa 5. Näitä elementtejä voi poistaa monilla 3D-mallien editointiohjelmistoilla. Tässä tutkielmassa käytössä oli jo aikaisemmin mainittu MeshLab, jolla mallien siivous oli helppoa.

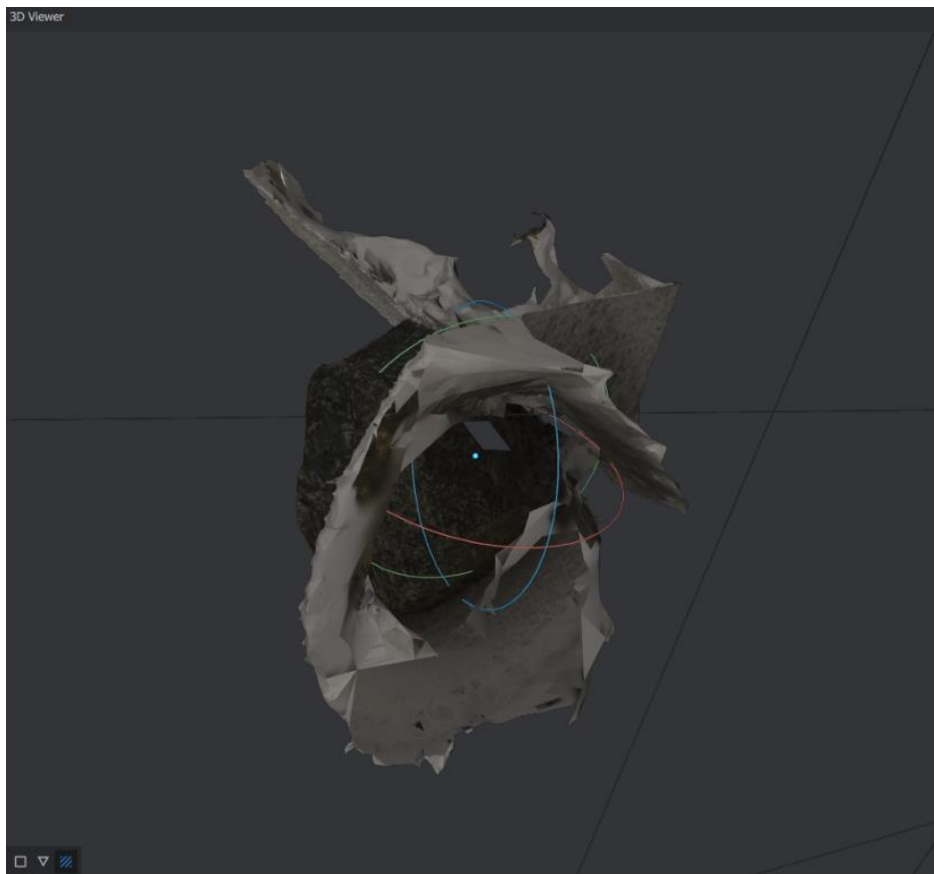
### 3.4.4 Mahdolliset ongelmat

Mallinnuksen epäonnistumiselle voi olla monta syytä, mutta suurin osa juontaa juurensa heikkolaatuisiin valokuviiin. Valokuvissa voi olla esimerkiksi heijastuksia aiheuttavia kiiltäviä pintoja, jotka tuottavat ongelmia mallinnusohjelmalle. Heijastuksien minimoimiseksi kuvausten valaistukseen täytyy kiinnittää erityistä huomiota, jos kohteessa on paljon kiiltäviä pintoja. Kiiltäviä pintoja omaavia kohteita voidaan yrittää käsitellä kiiltoa vähentävällä lakalla, joka poistuu kohteen pinnalta 24 tunnin jälkeen, eikä ole kohteelle haitallinen. (Merkel, 2019) Yksityiskohtien puute on toinen epäonnistuneiden mallien lähde. Jos kohteen pinta on liian tasainen ja yksinkertainen, mallinnusohjelmalla voi olla vaikeuksia löytää vertailupisteitä ja muodostaa yhtenäistä pintaa, johtaen esimerkiksi Kuvassa 6 näkyviin reikiin mallin pinnassa.

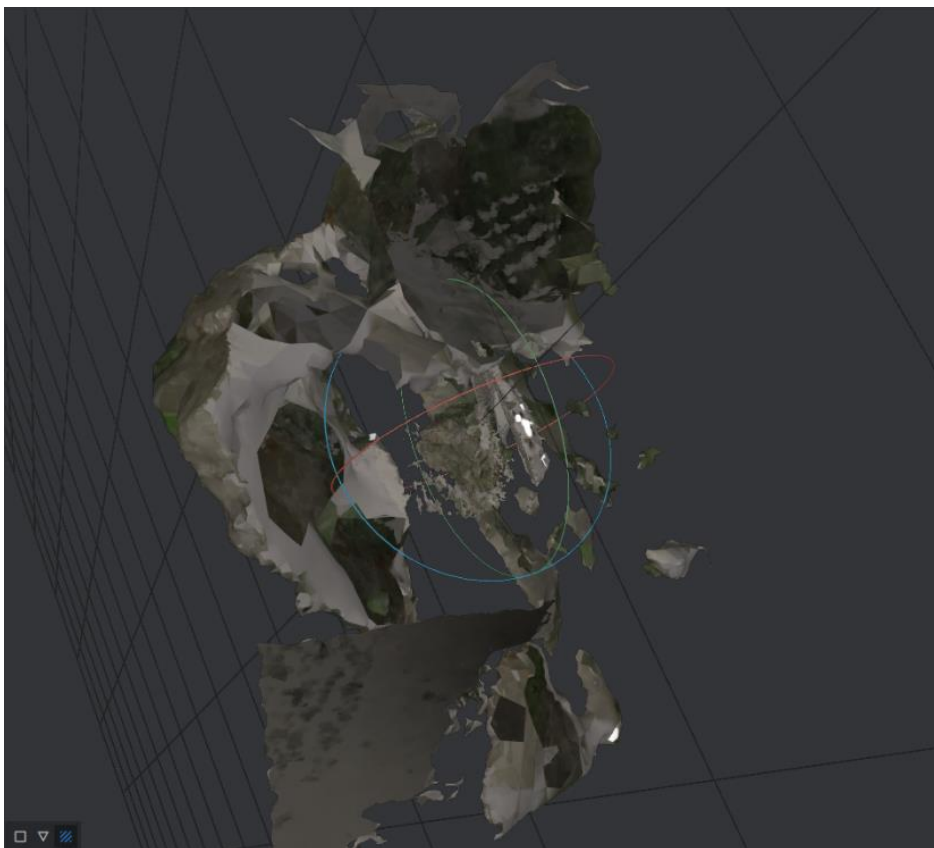


Kuva 6. Epäonnistunut malli, jossa reikiä valmistuneen mallin pinnassa.

Kohteen huono asettelu, kameran epäonnistunut tarkennus ja kuvien vähäinen määrä johtavat yleensä siihen, että malliin tulee mukaan liikaa taustaelementtejä ja itse kohteesta jää osia mallintamatta, koska mallinnusohjelma on keskittänyt huomionsa turhiin taustaelementteihin. Kuvassa 7 käsinäytteen yksi sivu on jäänyt kokonaan puuttumaan, koska mallinnusohjelma on kiinnittänyt huomionsa kuvausalustaan. Kuvassa 8 taas malliin on tullut mukaan niin paljon muita elementtejä, että mallinnusohjelma on sekoittanut pinnat täysin ja lopputulos on sekava klusteri kohdealustan osia kuvattavana olleen kromidiopsidin tekstuurilla.



Kuva 7. Epäonnistunut malli, jossa kohteesta puuttuu kokonainen sivu.



Kuva 8. Epäonnistunut malli, jossa kohde-elementit ja tekstuurit ovat täysin sekaisin.

## 4 TULOSTEN TARKASTELU

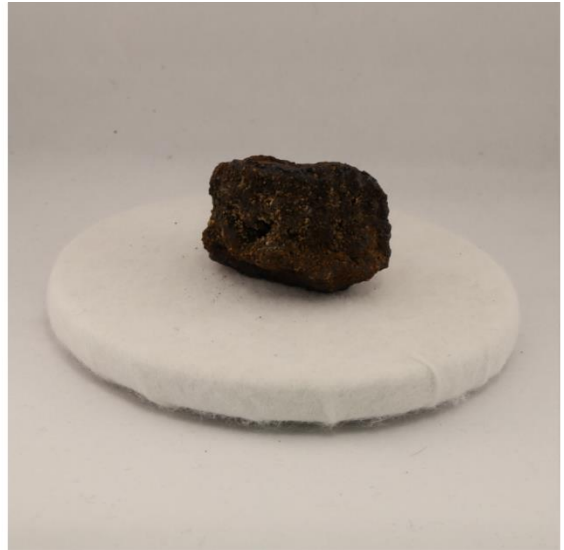


Kuva 9. Vertailukuva diabaasin valmiista mallista (vasen) ja alkuperäisestä näytteestä (oikea).

Diabaasin (Kuva 9.) ja suuntautuneen graniitin (Kuva 10.) mallinnus onnistui parhaiten. Näytteiden muodot ovat oikein, ja tekstuurit ovat ehjiä, korkearesoluutioisia ja oikeassa paikassa. Valmiit mallit vastasivat hyvin oletusta siitä, että pinnat ilman heijastuksia tuottaisivat vähiten ongelmia mallinnusohjelman kanssa. Kohteiden verrattain tasaiset pinnat eivät myöskään tuottaneet ongelmia. Ainoa heikkous valmiissa malleissa on kohteiden vähäinen kirkkaus, jota ei pystytty korjaamaan vähäisen mallinnuskokemuksen takia.



Kuva 10. Vertailukuva suuntautuneen graniitin valmiista mallista (vasen) ja alkuperäisestä näytteestä (oikea).



Kuva 11. Vertailukuva limoniitin valmiista mallista (vasen) ja alkuperäisestä näytteestä (oikea).

Limoniitin (Kuva 11.) ja kromidiopsidin (Kuva 12.) mallinnus onnistui hieman heikommin diabaasiin ja graniittiin verrattuna. Limoniitin mallissa kohteen monimutkainen muoto tasoittui mallinnusprosessin tuloksena ja pinnan tekstuuri jäi osittain huonoresoluutioiseksi. Kromidiopsidin tapauksessa kohteen kiiltävät pinnat tuottivat vaikeuksia mallinnusohjelmalle, mikä johti huonoresoluutioiseen ja rikkinaiseen tekstuuriin. Limoniitin mallinnuksen epäonnistuminen oli hieman yllättävää ottaen huomioon, että mallinnusohjelmistoilla pitäisi teoriassa olla helpompi muodostaa tarkkoja 3D-malleja kohteista, joissa on paljon yksityiskohtia, joihin kiinnittää huomiota.



Kuva 12. Vertailukuva kromidiopsidin valmiista mallista (vasen) ja alkuperäisestä näytteestä (oikea).

## 5 POHDINTA JA YHTEENVETO

Fotogrammetrian käyttökohteet geotieteissä mahdollistavat tutkimuksen ja opiskelun myös etänä. Geologisten kohteiden ja ilmiöiden 3D-mallinnuksella voidaan mahdollistaa tiedonvaihtoa globaalilla tasolla ja tärkeän geologisen tiedon varastointia digitaalisesti, sekä tukea perinteistä opiskelua tarjoamalla lisänäkökohtia kolmessa ulottuvuudessa.

Fotogrammetrian hyödyntämisestä geotieteen tutkimuksessa hyvänä esimerkkinä voidaan käyttää malminetsintäyhtiöiden kairasydänvarastojen digitointia. Yhtiöltä voi löytyä kilometreittäin kairasydäntä varastoituna ja hankalasti käsiteltäväksi saatavana. 3D-mallien muodostaminen kairasydämistä helpottaa näytteiden tarkastelua huomattavasti, kun tarvittavaa näytettä ei tarvitse noutaa varastosta, vaan se löytyy suoraan esimerkiksi tietokoneelta valmiina tarkasteltavaksi. Varastojen digitointi mahdollistaa myös tuhoavaan analyysiin lähetettyjen näytteiden jälkitarkastelua ja rakenteellisen tiedon digitaalista analysointia.

Digitaalisia 3D-arkistoja voidaan käyttää hyödyksi myös geotieteiden opetuksessa. Esimerkiksi yliopistojen kivi- ja mineraalinäytteistä voidaan luoda etänä käytettävä arkisto, johon opiskelijoilla on vapaa pääsy mennä katsomaan ja tutkimaan näytteitä (ks. esim. Merkel, 2019). Tämä poistaa tarpeen mennä paikan päälle etsimään tiettyä näytettä laajasta kokoelmasta, kun haluttu näyte löytyy suoraan esimerkiksi matkapuhelimelle tehdystä sovelluksesta. Oppimisen tueksi jokaiselle näytteelle voidaan myös tuottaa 3D-mallin lisäksi lisämateriaalia, kuten esimerkiksi infokortteja, joissa luetellaan näytteiden kaikki fysikaaliset ominaisuudet, kuten esimerkiksi kovuus, viiru ja kiderakenne. Näytearkistojen digitointiin liittyen tässä tutkielmassa tehty suppea 3D-mallinnus toimii esimerkkinä odotettavissa olevaan työnkulkuun. Vaikka tässä työssä tehty mallinnus vei odotettua enemmän aikaa, suurin osa ajasta kului mallinnusohjelman opetteluun ja työnkulun optimointiin. Virtuaalisen oppimisen sovellusten potentiaali korostui tutkielmaa tehdessä, ja on syytä uskoa, että COVID-19:n jälkeisessä geotieteiden opintoympäristöissä on tilaa ja tarvetta fotogrammetrian kaltaisille etäopiskelun applikaatioille.



Geotieteen opetuksen ja tutkimuksen tehokkuutta voidaan siis yleisesti parantaa tarjoamalla mahdollisuuksia tarkastella erilaisia geologisia 3D-malleja matkapuhelimelta tai tietokoneelta. Hyvän 3D-mallin tarkasteleminen etänä paikan päälle menemisen sijaan voi säästää huomattavasti aikaa ja resursseja, sekä laajentaa saatavilla olevan tiedon määrää ja laatua.

## LÄHDELUETTELO

Ankor, M. J. & Tyler, J. J., 2022. A computational method for rapid orthographic photography of lake sediment cores. *J Paleolimnol* 68. 203–214.

Baker, R., Shami, M., Khandaker, N. I. & Schleifer, S., 2020. Integrating Digital Tools in Remote Learning to Enhance the Delivery Methods of Technical Content in Undergraduate Geosciences. Poster. GSA 2020 Connects Online.

Bemis, S., Micklethwaite, S., Turner, D., James, M., Akciz, S., Thiele, S. & Bangash, H., 2014. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for Structural Geology and Paleoseismology. *Journal of Structural Geology* 69.

Betlem, P., Birchall, T., Ogata, K., Park, J., Skurtveit, E. & Senger, K., 2020. Digital Drill Core Models: Structure-from-Motion as a Tool for the Characterisation, Orientation, and Digital Archiving of Drill Core Samples. *Remote Sens* 12. 330.

Canon, 2024. Photo Glossary. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.canon.com.au/explore/glossary> [viitattu 28.5.2024]

Esposito, G., Mastrococco, G., Salvini, R., Oliveti, M. & Starita, P., 2017. Application of UAV photogrammetry for the multi-temporal estimation of surface extent and volumetric excavation in the Sa Pigada Bianca open-pit mine, Sardinia, Italy. *Environ Earth Sci* 76. 103.

Fleming, Z., 2022. Using virtual outcrop models and google earth to teach structural geology concepts. *Journal of Structural Geology* 156.

Harbowo, D. G., Sitorus, J. H., Agustina, L. K., Muztaba, R., Julian, T. & Malasan, H. L., 2022. 3D Modelling of Meteorite from Astomulyo Village, Lampung, Indonesia by Close Range Photogrammetry (CRP) Methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1047.

- Honarmand, M. & Shahriari, H., 2021. Geological Mapping Using Drone-Based Photogrammetry: An Application for Exploration of Vein-Type Cu Mineralization. *Minerals* 11, 585.
- Jacq, K., Ployon, E., Rapuc, W., Blanchet, C., Pignol, C., Coquin, D. & Fanget, B., 2021. Structure-from-motion, multi-view stereo photogrammetry applied to line-scan sediment core images. *J Paleolimnol* 66, 249–260.
- Lehto, J., 2017. Kuvantamis- ja mallinnusmenetelmien hyödyntäminen kallioperän rakennetutkimuksessa Kuopion alueella. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Harley, I., 2006. Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Ensimmäinen painos. Yhdistynyt kuningaskunta: Whittles.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J., 2013. Close Range Photogrammetry and 3D Imaging. Toinen painos. Berliini: De Gruyter.
- Mariotto, F. P., Bonali, F.L., Tibaldi, A., De Beni, E., Corti, N., Russo, E., Fallati, L., Cantarero, M., Neri, M., 2022. A New Way to Explore Volcanic Areas: QR-Code-Based Virtual Geotrail at Mt. Etna Volcano, Italy. *Land* 11. 377.
- Meng, Q., Li, W., Raspini, F., Xu, Q., Peng, Y., Ju, Y., Zheng, Y. & Casagli, N., 2020. Time-series analysis of the evolution of large-scale loess landslides using InSAR and UAV photogrammetry techniques: a case study in Hongheyan, Gansu Province, Northwest China. *Landslides* 18. 251–265.
- Merkel, J., 2019. Utilization of Photogrammetry during establishment of virtual rock collection at Aalto University. Pro gradu -tutkielma. Aalto-yliopisto.
- Meshroom, 2021. Meshroom manual. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://meshroom-manual.readthedocs.io/en/latest/> [viitattu 28.5.2024]

Pavlis, T. & Mason, K. 2017. The New World of 3D Geologic Mapping. GSA Today 27. 4–10.

Shami, M., Bethel, C., Nunez, E., Rayhan, S., Khandaker, N., & Cabaroy, C, 2022. Integrating Remote Digital Tools into Post-Pandemic Geologic Fieldwork to Effectively Disseminate Content Delivery and Assist in Overall Understanding of Various Geologic Phenomena: Summer 2022 Field Mapping Exercises. Poster. GSA 2022 Connects meeting in Denver, Colorado.

The Center for Photogrammetric Training, 2008. History of Photogrammetry. Luentomateriaali. Ferris State University.

Tsunetaka, H., Hotta, N., Hayakawa, Y.S. & Imaizumi, F., 2020. Spatial accuracy assessment of unmanned aerial vehicle-based structures from motion multi-view stereo photogrammetry for geomorphic observations in initiation zones of debris flows, Ohya landslide, Japan. Prog Earth Planet Sci 7. 24.

Urbanski, T., 2018. Virtual Geologic Environments: Interfaces to Incorporate Visualization and Analyses of 3-D Models in Geoscience Education and Research. Väitöskirja. The University of Texas at Dallas.

Walford, A., 2007. What is Photogrammetry? WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.photogrammetry.com/>. [Viitattu 30.05.2024]