

TARTU ÜLIKOOL

Arvutiteaduse instituut

Informaatika õppekava

Martin Nõmm

# Tavakasutajale mõeldud LiDAR sensori kasutamine 3D rekonstruktsiooniks

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendaja: Madis Vasser PhD

Tartu 2021

# **Tavakasutajale mõeldud LiDAR sensori kasutamine 3D rekonstruktsiooniks**

## **Lühikokkuvõte:**

Käesolev bakalaureusetöö võtab kokku iPad Pro 2020 LiDAR sensori testimise kui 3D-skaneerijana. Tehtud on analüüs raskustest, mis esinevad 3D-skaneerimisega ja kuidas neid lahendada. Töö annab ülevaate erinevatest skaneeritud objektidest ja toob välja objektid, mida kergem või halvem skaneerida. Lisaks on välja toodud erinevaid töötlus meetodeid, millega mudeli kvaliteeti võimalik parandada. Lõpptulemuste analüüsiks on loodud demorakendus, kus on võimalik vaadelda mudeleid ja nende kvaliteeti.

## **Võtmesõnad:**

LiDAR, 3D-skaneerimine, Unity, 3D mudelite töötlus, iPad Pro

## **CERCS:**

P175 – Informaatika, süsteemiteooria.

# **Using commercial-grade LiDAR sensor for 3D reconstruction**

## **Abstract:**

This thesis is an overview of the process of testing the new iPad Pro 2020 LiDAR sensor as a 3D scanner. The paper mainly consists of an analysis of the problems that arise with 3D scanning and how to solve them. Alongside, it shows off which objects are easier for the scanner to pick up and which are harder. The author also gives an overview of some methods for processing the 3D models and how to improve their quality. In the end, the author made a demo app that showcases the models and their quality.

## **Keywords:**

LiDAR, 3D scanning, Unity, 3D model processing, iPad Pro

## **CERCS:**

P175 – Informatics, system theory.

# Sisukord

Sissejuhatus .....	4
1. Mis on LiDAR.....	5
1.1 LiDARi praktiline kasutus õhus .....	6
1.2 LiDARi praktiline maapealne kasutus .....	6
2 Alternatiiv lidar'ile.....	7
2.1 Mis on fotogrammeetria.....	7
2.2 Fotogrammeetria ja LiDAR erinevused.....	7
3 Meetodid.....	10
3.1 Kasutatud rakendused .....	10
3.2 Skaneeritud objektid .....	10
4 Skaneerimise raskused .....	12
4.1 Skaneerimise-eelsed meetodid.....	12
4.2 Skaneeringujärgsed meetodid .....	13
4.3 LiDARi iseärasused .....	15
5 Tulemused unity mootoris.....	18
5.1 Mudelite esitamine.....	18
5.2 Mudelite töötlusastmed.....	19
5.3 Demorakenduse loomisest .....	19
6 Tulemuste ja meetodite analüüs .....	20
6.1 Töö käigus avastatud raskused.....	20
6.2 Mudelite kvaliteet .....	25
Kokkuvõte .....	27
Kasutatud kirjandus .....	28
Lisa 1 .....	29
Lisa 2 litsents.....	37

# SISSEJUHATUS

Tänapäeval on kõik tehnoloogia kiires arengus. Viimastel aastatel on väga populaarseks teemaks saanud isejuhtivad autot ning nende kiire areng. Tehnoloogia areng toob kaasa ka moodsamad seadmed ning alandab hinnabarjääri sisenemiseks. Waymo, üks juhtiv isejuhtivate autode arendaja, kasutab enda süsteemis LiDAR seadmeid (Waymo, 2021). LiDAR ehk „Light Detection and Ranging“ on seade, mis suudab mõõta kauguseid kiirelt infrapuna kiirte kaudu ja suudab seda teha korraga laia ala peal. Selline seade aitab tuua isejuhtivad autod meie teedele, kuid see pole ainus kasutus LiDARile. LiDAR suudab teha ka kiireid ja täpseid 3D skaneeringuid päris maailmast ja muuta need arvutis vaadeldavateks mudeliteks.

Aastal 2021 tutvustas Apple oma uut tahvelarvutit iPad Pro 2020, millele on lisatud üks esimestest tavakasutajale saadavatest LiDAR-kaameratest (Apple Inc., 2021). Käesolevas töös on Apple'i LiDAR nimetatud LiDAR-kaameraks, sest hetkeseisus ei ole võimalik otse LiDAR andmeid kaamerast eraldada, need tulevad sügavuskaardina koos muude sügavuse arvutustega, mis IPadi kaamera ja süsteem teeb. Lisaks on Apple maininud, et LiDAR sensori mõte pole olla just 3D skaneerimiseks, vaid liitreaalsuse võimekuse edendamiseks.

Töö eesmärk on testida iPad Pro 2020 tahvelarvuti uut LiDAR-kaamera tehnoloogiat 3D skaneerijana. Testimiseks võrdles autor IPadi LiDARit teiste suuremate LiDAR-kaameratega hinna, kasutuse ja kvaliteedi poolest. Samuti on võrdluseks muud 3D skaneerimismeetodid nagu fotogrammeetria. Peale võrdluste on ka ülevaade skaneerimise raskustest ja erinevatest meetoditest, millega saaks parandada IPadi LiDARI skaneeritud mudelite kvaliteeti. Kvaliteedi parandamise jaoks on võimalik katsetada erinevatelt kaugustelt skaneerimist, tahvli liigutamise tehnikaid ja mudelite töötlemise tööriistaid. Töö osaks on ka autor loonud demorakenduse, mis esitleb skaneeritud mudeleid ja nende kvaliteeti erinevates töötlemisastmetes.

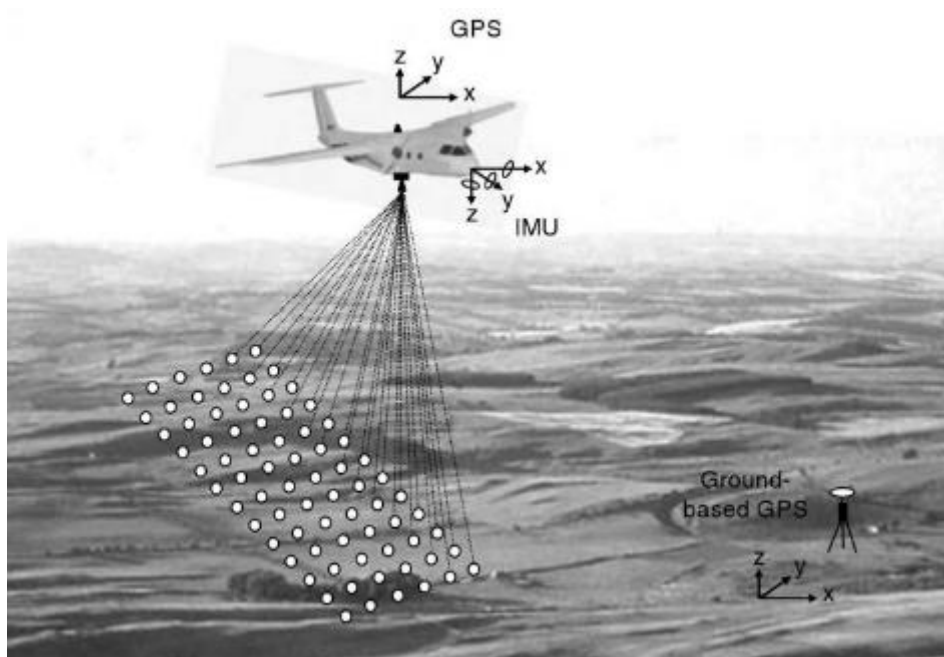
Tulemustena on välja toodud raskused, mis tekkisid skaneerimise ajal ja peale skaneerimist. Lisaks mudelite võrdlemine kvaliteedi ja kasutustarbe suhtes.

# 1. MIS ON LIDAR

Raamatus „Laser Scanning for the Environmental Sciences“ (Heritage & Large, 2009) on välja toodud LiDARi definitsioon ja kuidas see töötab. LiDAR on inglise keelne lühend „Light Detection And Ranging“, tõlgituna „Valguse tuvastamine ja kauguse mõõtmine“. LiDAR-kaamera saadab välja laseri ehk valguse pulsi, mis liigub vaadeldava objektini ja sealt peegeldub tagasi kaamerasse. Kaamera kaugus objektist arvutatakse aja kaudu, mis kulub laseril objektini ja tagasi liikumisel. Teades valguse kiirust on võimalik kaugus välja arvutada valemiga:

$$\text{kaugus} = (\text{Valguse kiirus} * \text{kulunud aeg}) / 2$$

LiDAR-kaamera pulsi sagedus on üldiselt 5000 kuni 50000 valguse pulssi sekundis. See tähendab, et sekundi jooksul on võimalik laserit nihutada ja koguda suur hulk andmeid ning need andmed koos moodustavad punktipilve (Heritage & Large, 2009, pp. 2-5).



*Joonis 1. LiDAR seadme kasutuse näide, kus LiDAR on lennuki külge pandud ja võimaldab kiirelt skaneerida maapinda (Heritage & Large, 2009).*

Punktipilve punktid näitavad kohti, kus laser põrkas objektilt tagasi ehk on võimalik näha objekti topograafiat. Neid skaneeritud punktipilvi saab kasutada mitmetes erinevates alades. Peamiselt eristatakse LiDAR tüüpi skaneerimist kahel viisil:

- Õhus skaneerimine;
- Maapealne skaneerimine.

## **1.1 LiDARi praktiline kasutus õhus**

LiDARi õhus kasutamine on peamiselt suurte maa-alade kaardistamiseks. Õhus kaardistamist tehakse üldiselt droonide või lennukitega, millele on külge pandud LiDAR-kaamera. Peale kaardistamise ja topoloogia on ka muid alasid, kus LiDAR kasuks tuleb. Lisaks on näiteks Florian Petit poolt kirjutatud LiDARi põllumajandusliku teemaga artiklis (Petit, 2020) mainitud viljakasvatus, kus LiDAR droon mõõdab kasvanud vilja pikkust ja tihedust. See aitab kiirelt hinnata, kas vili on valmis korjamiseks, mis võimaldab suurendada saaki kui vili korjatakse parimal ajal.

## **1.2 LiDARi praktiline maapealne kasutus**

Maapealseid kasutusi on LiDAR-kaameral mitmeid. Arhitektuurid kasutavad LiDARit, et kaardistada maju või muid ehitisi, mida on LiDARi skaneeringute abil kergem visualiseerida. Sarnaselt on LiDAR kasutusel kinnisvara turul, kus osad müüjad skaneerivad maja või korteri sisemuse ning võimalikud kliendid saavad näha kinnisvara juba ilma sisse astumata. Veel on kasutus arvutimängude keskkonnas, mängude arendajad skaneerivad sisse objekte ja maapindasid. See hoiab kokku aega ja raha, mis muidu läheks 3D modelleerijatel mängu mudelite tegemiseks. Samuti kasutatakse LiDARit isejuhtivatel autodel, Faraday Future (FF) veebilehel on artikkel (FF Team, 2016), kus FF tiim toob näiteid, kuidas nende isejuhtiva auto süsteem kasutab LiDARit. Artiklis on välja toodud, kuidas auto „näeb“ LiDARi abil teisi autosid ja seega suudab turvalisemalt ise liigelda. Samuti, kuidas selle abil on võimalik eristada autot, inimest ja lihtsalt taga tausta.

## **2 ALTERNATIIV LIDAR'ILE**

LiDAR pole ainus viis, kuidas skaneerida mudeleid, peamine konkureeriv meetod sellele on fotogrammeetria.

### **2.1 Mis on fotogrammeetria**

Fotogrammeetria on meetod, kus mingist objektist või pinnast tehakse suures koguses tavalisi pilte, need pildid töödeldakse vastavalt kaamera asukohale ja piltide omavahelisel võrdlusel saadud infot kasutades luuakse 3D kujutisi. Sarnaselt LiDARile on fotogrammeetrias kaks peamist kasutusviisi, õhus fotogrammeetria ja maapinnal ehk objekti-lähedane fotogrammeetria (Kraus, 2011, pp. 1-2). Õhus lendavad droonid kindlat trajektoori pidi, kus intervallide tagant tehakse pilte, need pildid töödeldakse kokku niioelda 3D kaardiks, mida saab arvutis vaadelda. Lähedalt tehtud fotogrammeetriaga saab võtta objekti ja selle skaneerida suure täpsusega.

### **2.2 Fotogrammeetria ja LiDAR erinevused**

Kuigi LiDAR ja fotogrammeetria täidavad sarnast ülesannet, on nad ikkagi erinevad meetodid, erinevate tööriistadega ja mõlemal on omad plussid ning miinused.

Peamiseks erinevuseks LiDARi ja fotogrammeetria vahel on see, kuidas nad andmeid koguvad. Järgnev paragraaf on refereeritud Jian Zhang'i uurimistööst (Zhang, 2002) LiDARi ja fotogrammeetria võrdluse kohta maa-alade skaneerimisest.

LiDAR seade saadab välja laserid, mis „lendavad“ otse vaadeldava objekti vastu ja pörkavad tagasi seadmesse, mis tähendab, et LiDAR mõõdab otse objekti kaugust ja salvestab need andmed. Sealhulgas on LiDAR seadmel üldiselt küljes ka sisemine navigeerimis süsteem, mis salvestab seadme suuna pärismaailmas ehk salvestatud andmetel on mitu kihti täpsust. Teisest küljest fotogrammeetria pole otsene seade, vaid töötlusmeetod. Sel juhul tehakse täiesti tavalise kaamera suures koguses pilte vaadeldavast objektist ning need pildid suunatakse arvutis programmi sisse, mis üritab pildid kokku sulandada piltide kattuvate ja erinevate osadega ning edasi töötleb need 3D mudeliks (Zhang, 2002, pp. 2-4).

Tabel 1 selgitab veel erinevusi, mis esinevad fotogrammeetria ja LiDARi vahel. Selles tabelis on tehtud võrdlus tavakasutaja suunaga ning pole arvesse võetud väga professionaalset keskkonda, sest plussid ja miinused sõltuvad alast, kus need kasutusel on.

Tabel 1 LiDARi ja fotogrammeetria võrdlus

	<b>Fotogrammeetria</b>	<b>LiDAR</b>
Objekti valgustus	Fotogrammeetrias sõltub mudeli kvaliteet väga palju valgustusest. Piltide pealt on väga raske andmeid kätte saada, kui pildil on palju varje. Seal tekib probleem, kus geomeetria rekonstrueerimiseks kasutatav programm ei suuda eristada neid kohti.	Mudeli kvaliteet ei sõltu objekti valgustusest, LiDAR saab infrapuna laseritega ka pimedas mudeli kätte. Samas halva valgusega jääb mudeli tekstuuri kvaliteet ikkagi madalaks.
Hinnaklass	Fotogrammeetria puhul pole hind väga probleemiks, piltide saamiseks sobivad ka tavalised telefonid, millel hea kaamera ja osav fotograaf. Vajalik on vähemalt keskmise jõudlusega arvuti, mis suudaks töödelda pildid kokku.	LiDARi hind sõltub LiDAR-kaamera seadmest. Käesolevas töös kasutatud iPad on tuhande euro ringis, aga üldised LiDAR-kaamerad võivad tuhandeid või isegi kümneid tuhandeid eurosid maksta.
Ajakulu	Peale piltide kogumise, sõltub ajakulu piltide kokku töötlemisest. Olenevalt kui võimas arvuti on saadaval ja kui palju pilte on vaja töödelda, võib fotogrammeetria meetodil mudelite kokku panemine võtta mitmeid tunde (Oleneb ka mis resolutsiooni ehk täpsusega mudelit soovitakse).	Peale objekti skaneerimist võtab mudeli töötlemine ja tekstuuremine üldiselt vähem kui tund aega. IPadi puhul pole mudelid väga suured (seadme mahu tõttu) ehk töötlus võtab üldiselt 5 kuni 10 minutit.
Täpsus	Täpsus oleneb piltide kvaliteedist, kuid üldiselt on tekstuur ja mudel hea täpsusega, sest pildile jääb kõik, mis objekti peal näha on. Samas objektidel, millel osad kohad ilmtingimata on varjus (näiteks põõsa alumine osa), kannatab täpsus.	LiDARi täpsus oleneb kui hea resolutsiooniga LiDAR seade on, sest täpsus tuleb punktipilvest ja kui palju punkte kokku on. IPadi LiDARil pole parim resolutsioon, seega vahest väiksed detailid jäävad „laserite vahele“. Näiteks tooli skaneerides võivad tooli jalad puudu jääda, sest laserid ei kata neid hästi.

Tabelist saab kokkuvõttena välja tuua, et kuigi fotogrammeetria on odavam lahendus, läheb rohkem aega töötlemise peale. Kvaliteeti ei saa kontrollida enne kui pildid tehtud ja arvutil lasknud kokku panna neid kaua aega. Hiljem avastatud probleemide jaoks tuleb teha pilte juurde ja oodata veel kuni programm töötab.

Võrdluses on LiDAR kallim meetod, kuid võimaldab kiiremat tulemuste nägemist (IPadis saab kohe peale mõne minuti töötlemist näha mudelit). Probleemide esinemisel, saab kohe samas uue mudeli teha. See tähendab, et kui tavakasutajale mõeldud LiDAR toode suudab kvaliteedi poolest praktilise mudeli teha, võib see olla kergem meetod 3D mudelite loomiseks inimesele, kellel pole aega, et õppida ära ja parandada fotogrammeetria iseärasusi.

## 3 MEETODID

Töö peamine viis mudelite loomiseks on iPadi LiDARi kasutamine, kuid lõpliku mudeli saamiseks on veel muid samme. Nende hulka kuuluvad rakendused, mida kasutatud ja objektid, mida on skaneeritud. Töö käigus on kasutatud ainult vabavaralisi programme (välja arvatud iPad), et oleks võimalikult kerge tööd jäljendada.

### 3.1 Kasutatud rakendused

Skaneerimiseks on kasutatud Apple Store kaudu saadud rakendust 3D Scanner App<sup>1</sup>. See rakendus kasutab iPadi LiDARit, et skaneerida mudelite 3D punkt pilv. Lisaks kasutab rakendus iPadi tavakaameraid, millega saadakse tekstuur, mis kaardistatakse mudeli peale. 3D Scanner App sai valitud, sest see rakendus on küll suletud lähtekoodiga, kuid vabavaraline ning pakub kasulikke mudeli töötluse valikuid. Nende hulka kuuluvad näiteks mudeli kärpimine, tekstuuri kaardistamine. Lisaks võimaldab rakendus eksportida erinevatesse failitüüpidesse, milleks on populaarsemad 3D mudelite formaadid (OBJ, GLTF, GLB, DAE ja STL) ning ka erinevatesse pilvepunkti formaatidesse (PTS, PCD, PLY, ja XYZ). Käesolevas töös on mudelid eksporditud .obj ja .mtl failitüüpi, mis vastavalt haldavad 3D mudelit ja tekstuure. Obj failitüüp on kasutatud, et oleks kergem hiljem mudelit töödelda.

Mudelite edasiseks töötlemiseks on kasutatud 3D graafika töötlus programmi Blender<sup>2</sup>. Blender on võimas avatud lähtekoodiga ja vabavaraline programm, millega saab töödelda 3D mudeleid ja nende tekstuure.

### 3.2 Skaneeritud objektid

LiDARi võimekuse hindamiseks on vaja valida objekte, mille skaneerimine näitaks kui hästi saab LiDAR hakkama erinevates olukordades. Skaneeritavatel objektidel oleks erinevad omadused. Nendeks omadusteks võib olla objekti suurus, kus on näha mis suuruse piirini suudab seade salvestada mudeli objektist. Suurem mudel tähendab kauem

---

<sup>1</sup> <https://apps.apple.com/us/app/3d-scanner-app/id1419913995>

<sup>2</sup> <https://www.blender.org/>

skaneerimist ehk ka rohkem vigu, mis võivad mudelisse sattuda. Lisaks on omadusena välja toodud objekti keerukus ehk kui tasased pinnad on objektil (Näiteks kivi on üsna tasane ja pargipink on keerukam). See näitab, kuidas seade salvestab keerukaid objekte.

Näitena on toodud mõned objektid, mis said töö jooksul skaneeritud:



*Joonis 2. Kollaaž objektide piltidest, mis skaneeriti töö käigus.*

Joonis 2 on näha 4 erinevat objekti, mis on erinevate omadustega. Välja saab tuua nende puhul erinevateks omadusteks esmalt materjali ja tekstuuri. Näiteks prügikast on tehtud metallist, mis peegeldab rohkem valgust ja seega segab skaneerimist. Teisest küljest puukänd ja kivi ei peegelda liialt ehk nendel seda probleemi ei esine. Lisaks on objektide keerukus probleemiks, kus väiksete detailide skaneerimine tekitab raskusi. Selle näiteks saab tuua haljaspuu, kus väikesed okkad ei jää mudelile korrektselt peale, sest iga väike tuuleil liigutab need algsest asukohast ära ning nad peidavad liialt üksteist ära.

## 4 SKANEERIMISE RASKUSED

Arvestades, et iPad Pro 2020 küljes pole suur ja võimas LiDAR-kaamera, vaid taskukohase hinnaga tavakasutajale mõeldud kaamera, pole selle kvaliteet võrreldav kallimate LiDAR-kaameratega. Just selle pärast tasub katsetada meetodeid, mis võivad parandada skaneeringute kvaliteeti. Järgnevalt tuuakse välja erinevad raskused, mis tekivad skaneerimise ajal ning nendele pakutud lahendused. Hiljem ka meetodid, mida on võimalik rakendada, et parandada kvaliteeti.

### 4.1 Skaneerimise-eelsed meetodid

Skaneerimise-eelsed meetodid on tehnikad või otsused, mis rakenduvad skaneerimise ajal või enne skaneerimist. Sellised meetodid on toorandmete parima seisu leidmiseks. Samuti on võrreldud, millised meetodid võtavad rohkem aega, et paremat seisu saavutada või muud raskused, mis nende meetodite kasutamisega lisanduvad. Testitud raskused ja ajakulu on välja toodud Tulemuste ja meetodite analüüs peatüki all. Tabel 2 toob välja peamised raskused, mis kaasnevad skaneerimisega.

Tabel 2 LiDARi skaneerimisel tekkivad raskused ja pakutud lahendused

Raskus	Probleem	Pakutud lahendus
Kaugus	IPad Pro 2020 LiDARi töövõime on limiteeritud 5 meetri peale <sup>3</sup> .	Kuigi maksimaalne kaugus on 5 meetrit, tuleks teha kvaliteedi kontroll, kas see sobib
Valgustus	Halva valgustusega 3D objekte on raskem presenteerida, objektid näevad välja liiga „tuhmid“.	Väljas skaneerimine tuleks teha päeval, väheste pilvedega. Siseruumides mitme punkti valgustusega. Varjud ei tohiks olla liiga teravad, vaid ühtlaselt hajuma.
Suurus	Suuremad objektid või maa-alad võivad liiga andmemahukad olla.	Selliseid objekte tuleb skaneerida jupiti ja hiljem need skaneeringud kokku lappida.
Liikumine	Skaneerimise ajal liikumine ja sama koha uuesti skaneerimine võib andmed üle kirjutada halvemate andmetega.	Tuleb limiteerida skaneeritavat asukohta või objekti ja skaneerida nii, et kaamera ei kattuks uuesti varem skaneeritud osadega.
Detailid	Skaneeritud objektide detailsus võib erineda, LiDAR ei saa kõiki väiksemaid detaile kätte.	Skaneerimise ajal peab detailsemaid objekte lähedamalt skaneerima või kui see on osa suuremast objektist, teha eraldi skaneering sellest osast.

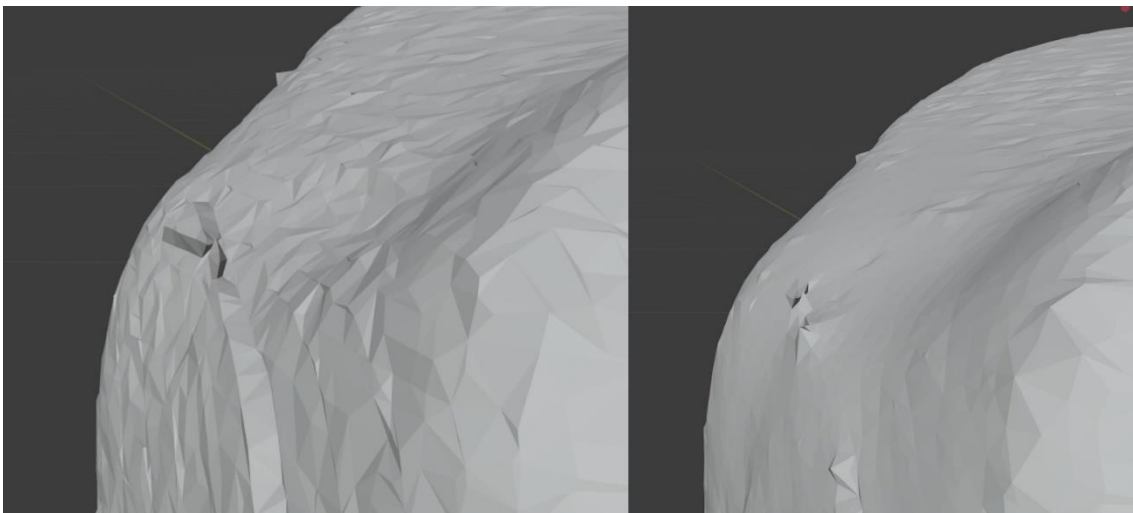
<sup>3</sup> <https://www.apple.com/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>

## 4.2 Skaneeringujärgsed meetodid

Skaneeringujärgsed meetodid on lahendused, mis rakenduvad valmis mudelitele. Neid meetodeid kasutades saab valmis lõplik mudel, mida võimalik vajadusel kasutada järgmistes rakendustes. Selle astme meetodid kasutavad mudelitöötlus programme seega võimalus rakendada neid meetodeid oleneb kasutaja oskusest taolistes programmides. Meetodid on jagatud olenevalt nende raskusest kolme kategooriasse:

Esimeseks kategooriaks on kergemad meetodid. Neid meetodeid saab kasutada kas kohe peale skaneerimist IPadis (kui rakendus võimaldab) või on kiirelt kättesaadavad mudelitöötlus programmis. Peamiseks nendest on mudeli kärpimine (cropping), mis on võimalik ka kohe IPadis teha ja eemaldab mudelist kõrvalised objektid, mis kogemata stseeni sattunud.

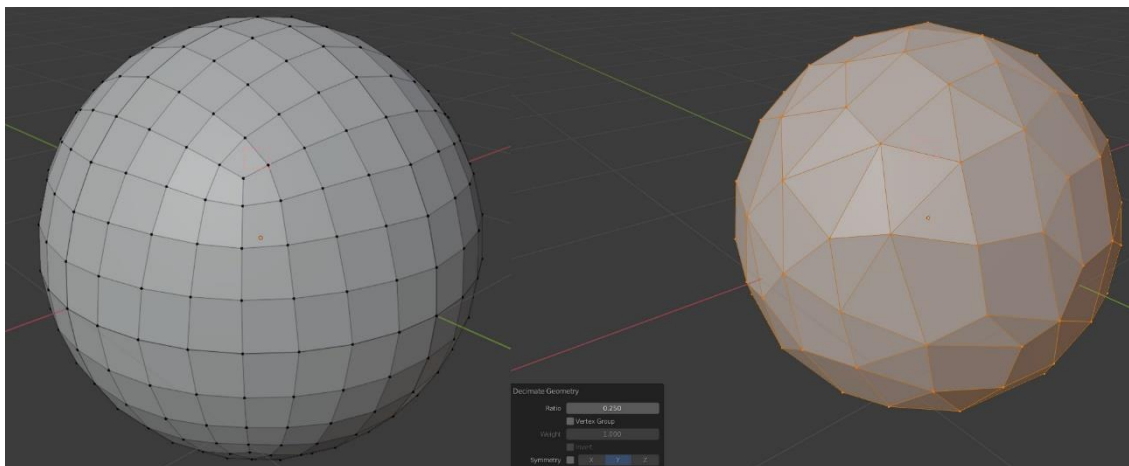
Lisaks sellele on mudeli silumine (smoothing), mis „silub“ mudeli kohti, mis on liiga ebatasased. Silumise meetod võtab sisse tugevus indeksi ja valitud hulga tippe mudelist, millest võetakse kõige kõrgemad ja kõige madalamad tipud. Kõik tipud ühtlustatakse võrreldes indeksi tugevusega, kus kõrgemad tipud tuuakse alla ja madalamad tipud tõstetakse.



*Joonis 3. Silumine. Vasakul algne, paremal silutud*

Joonis 3 on näha silumise tulemust, kus vasak mudel on algne ja paremal silutud mudel. Lisaks on mudelil ka näha defekt, kus algses mudelis olev auk ei lase õigesti siluda valitud kohta. See näitab, et esmane töötlus, mida mudel vajab on aukude lappimine, siis hilisemad parandused ei tekita vigu juurde.

Viimaseks kergeks meetodiks on mudeli geometria lihtsustamine (simplify), mis vähendab mudeli kvaliteeti ning saab ebavajalikult suure mahuga mudelitel vähendada ruumi mälus. See meetod võtab tipud ja suhtearvu, kui palju tippe peaks alles jääma. Mudelist eemaldatakse nii palju tippe kui vaja nii, et mudelile jääks sarnane üldkuju alles.



*Joonis 4. Lihtsustamise näide. Vasakul algne, paremal lihtsustatud*

Joonisel Joonis 4 on näha mudeli lihtsustamise tulemust. Vasakpoolne on algne mudel ja parempoolne on lihtsustatud mudel. Meetodi suhtearv on 0.25 ehk jääb alles vaid veerand algsetest tippudest. Kuju on küllalt lähedal algsele mudelile, aga tippude arv on vähenenud ehk mudel ise võtab vähem mälu. Sellised lihtsustamised on tähtsad, et saada mudel, mis ei võta ülemäära palju ruumi, eriti skanneerimise puhul, sest seal tekib väga suur hulk ebavajalikke tippe.

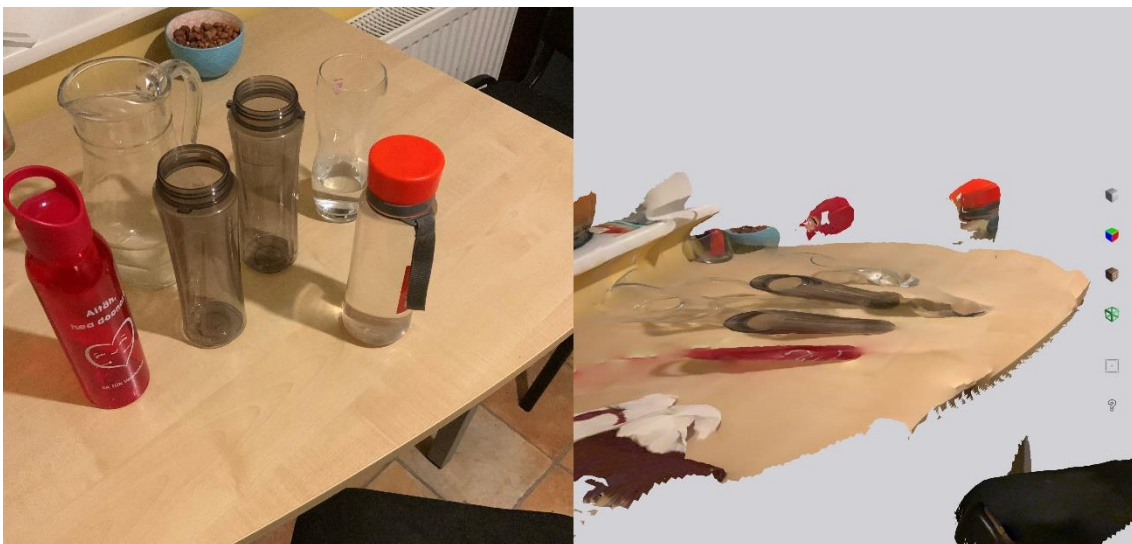
Teiseks on keskmise raskusega meetodid. Sellel astmel läheb vaja oskust mudelitöötlus programmis. Välja on toodud vaid üks meetod, mudeli lappimine (patching). Lappimise all on mõeldud mudeli vigade parandamine, milleks on peamiselt väikesed augud mudelis. Selliseid auke on võimalik lappida kiirelt ja tekstuur kas venitada või kopeerida nii, et varasem viga pole kergelt märgatav.

Viimaseks on raskemad meetodid. Ilmtingimata tekivad mudelites vead, mida skaneerimise ajal ei ole näha. Hiljem kui mudel valmis, leiduvad mudelis suured augud või tekstuuri vead. Nende parandamine on raskem, sest neid parandusi on lõplikus mudelis kerge märgata. Raskematel juhtudel on vaja teha objektist mitu mudelit, mis hiljem kokku ühendada ühtseks aukudeta mudeliks. See nõuab rohkem aega ja oskust nii mudeli töötlemis programmides kui ka tekstuuride alal.

### 4.3 LiDARi iseärasused

LiDAR ei tee kindlasti imesid ja ei suuda kõikides olukordades head tulemust anda. Tingimusi, mis teevad skaneerimiseks halva olukorra on erinevaid, peamiseks on vaadeldav objekt, selle materjal ja valgustus. Objektid, mis peegeldavad liialt valgust, tekitavad seadmele segadust, et kust põrkas valgus tagasi. Sarnast probleemi tekitavad objektid, mis on osaliselt või täielikult läbipaistvad. Nende puhul ei suuda programm samamoodi aru saada kui kaugel objekt on seadmest. See tähendab, et esinevad objektid, mida lihtsalt pole võimalik skaneerida tavaliste meetoditega.

Skaneerimise raskuste demonstreerimise jaoks on autor välja toonud kolm kindlat probleemi, neid probleeme toetavad joonised, kus joonise vasakul pool on pilt vaadeldud objektist ja paremal on 3D mudel sellest objektist:



*Joonis 5. Näide LiDARi skaneeringust plastiku ja läbipaistvate objektidega, vasakul pilt lauast objektidega ja paremal LiDAR skaneering.*

Esiteks näitab Joonis 5, kuidas LiDAR-kaamera ei salvesta hästi läbipaistvaid objekte. Lauale on asetatud mitmed läbipaistvad plastpudelid ja klaasid. Neid objekte skaneerides leidub, et nad ei jäänud skaneeringule, vaid „sulandusid“ taustale tekstuuriks. Muus keskkonnas võib see rikkuda skaneeringu kvaliteeti, nagu näiteks toa skaneerimisel, kus esinevad läbipaistvad objektid.



*Joonis 6. Näide LiDARi probleemidest peegelduvate objektidega*

Teiseks on Joonis 6 näitena toodud läikiv metallist prügikast. Objekt on skaneeritud päikeselisel päeval, et välja tuua valgusest esinevad probleemid. Metall läigib liialt päikese käes ja seetõttu on rikutud nii tekstuur kui ka topoloogia. 3D skaneerimine nõuab, et mudelit salvestatakse iga külje alt, kuid sellise valguse käes muutub peegeldus ja valgus ümber objekti liikumisega. Seega on näha mudeli külgedel deformatsiooni ja tekstuuris vigasid.



*Joonis 7. Näide LiDARi probleemidest väikeste detailidega*

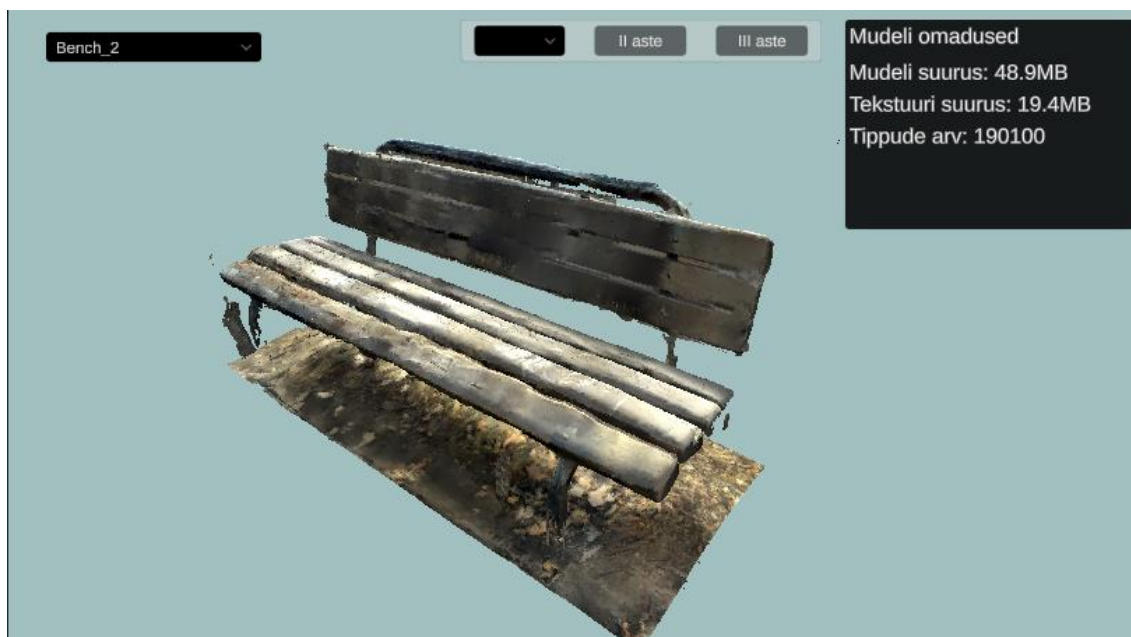
Kolmandaks, Joonis 7 demonstreerib LiDARi probleeme, kui salvestada objekti, millel on väga palju väikseid detaile. LiDAR on kindla resolutsiooniga ja puul on liiga palju lehti/okkaid, mis liiguvad tuule käes. Laser ei saa kindlat tulemust iga väikese okka käest ja nende vahele on võimatu saada nii, et ei liigutaks ise objekti. Sel puhul tuleb mudel välja rohkem paksemate okste kujuga, kuhu on okaste tekstuur peale sattunud.

## 5 TULEMUSED UNITY MOOTORIS

Valminud mudelid on välja toodud Unity<sup>4</sup> mängumootori abil käesoleva töö raames loodud demorakenduses, mis võimaldab kiirelt vahetada mudeleid ja võrrelda neid erinevates tötlusastmetes. Need tötlusastmed põhinevad töös varasemalt mainitud töötlemismeetoditel. Lisaks, millistes tötlusastmetes mudelid esitatud on. Aja säästmise suhtes pole autor kõigile mudelitele teinud II või III astme mudeleid ise valmis, sest töö eesmärk polnud mudelite töötlemine ja nende tegemine oleks võtnud mitukümmend tundi.

### 5.1 Mudelite esitamine

Mudelid on esitatud demorakenduses ilma lisa tötluseta ehk rakendus ise rohkem efekte ei muuda. Ainus muutus on tekstuuris, kus Unity kasutab enda tekstuuride pakkimis süsteemi ja see alandab kvaliteeti osaliselt. Lisaks on demorakenduses infoaken, mis võtab kokku mudeli omadused, nagu mudeli faili suurus, tekstuuri faili suurus ja mudeli tippude hulk.



Joonis 8. Demorakenduse näidis

Joonis 8 on ekraanitõmmis demorakendusest. Mudelit saab liigutada orbitaalse kaamera juhtimisega. Üleval vasakul on erinevate skaneeritud objektide valik, keskel üleval saab

---

<sup>4</sup> <https://unity.com/>

võimalusel vahetada mudeli erinevate toorandmete või töötlusastmete vahel. Viimaseks üleval paremal on infoaken, kus on näha käesoleva mudeli omadusi.

## **5.2 Mudelite töötlusastmed**

Mudelid on jagatud kolme töötlusastme kategooriasse: toorandmed, parandatud ja poleeritud. Igas kategoorias on mudel saanud ühe astme jagu töötlust juurde.

Toorandmete kategooriasse kuuluvad mudelid, mis on töödeldud ainult kärpimise meetodiga. See tähendab, et mudel on peaaegu otse esmane skaneering ja ainus muudatus on üleliigsete objektide eemaldamine mudelist (Eemaldatud on näiteks eemal olevat maapinda või vaadeldavale objektile lähedal olevad esemed, mis pole peamine objekt). Osadel mudelitel on demorakenduses mitu toorandme mudelit, sest algne mudel võib tihti olla vigane või aukudega, mis parandatakse hiljem.

Parandatud ehk II astme mudelite kategooriasse kuuluvad töödeldud mudelid, millel on augud parandatud ja välimuse poolest on hea kvaliteediga mudelid. Kasutatud meetoditeks on peamiselt aukude lappimine ja enam kärpimist, kus vaja. Selle kategooria mudelid näevad head välja, kuid päriselt pole praktiline kasutada, sest kasutab liialt mälu või esinevad veel mingid rikked.

Poleeritud ehk III astme mudelite hulka kuuluvad töödeldud mudelid, mis on võimalikult hea kvaliteediga ning ei võta üleliigselt mälu. Selle astme mudelid on küllalt hea kvaliteediga, et praktiliselt kasutada. Kasutatud on silumise ja lihtsustamise meetodeid, et säilitada mudeli kuju, kuid vähendada mudelis olevate tippude hulka. Lisaks on hoitud tekstuuri kvaliteeti ja parandatud kohtades, kus mudel vajab rohkem parandusi. III astme mudeleid kõigile skaneeringutele autor loonud pole.

## **5.3 Demorakenduse loomisest**

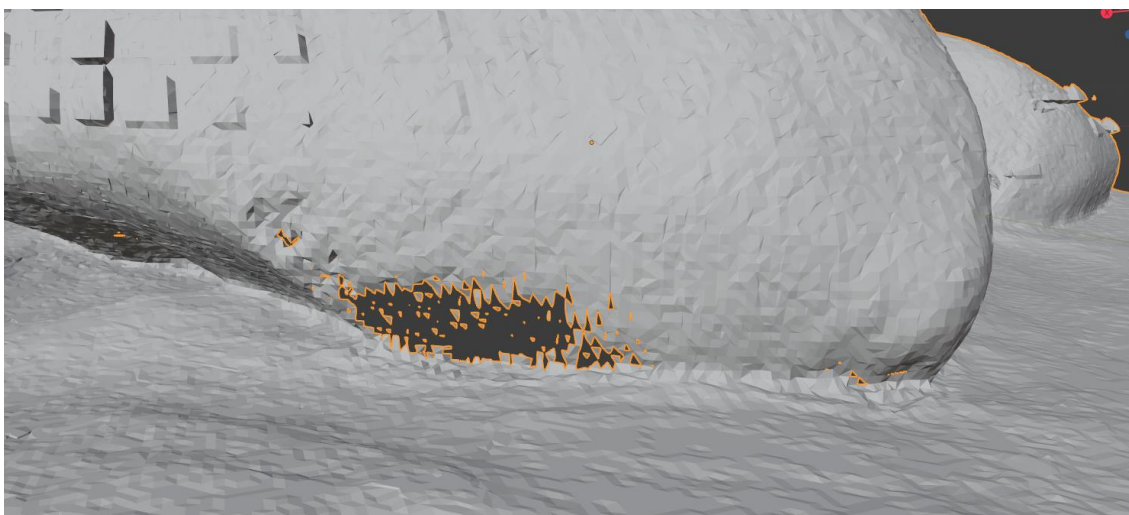
Demorakendus sai loodud, et oleks kergem ülevaade skaneeritud mudelitest. Keegi, kes soovib vaadata loodud mudeleid, aga neil pole ligipääsu kergele võimalusele avada .obj faile, saab kasutada seda demorakendust. Rakenduse loomine muidugi ei läinud ilma probleemideta. Peamiseks raskuseks oli süsteemi ehitamine, mis võimaldaks ilma vigadeta vahetada mudelite vahel. Vigadeks oli näiteks kui eelnev ekraanil ei kadunud mudelite vahetamise ajal või kui nupp rakenduses ei suunanud õigesti mudelile ja andis veateate, kui mudelit ei leitud. Lisaks tuli teha manuaalne tabel, kus kirjas kõigi mudelite failisuurused, sest Unity ei lase avada arvutil olevate failide andmeid..

## 6 TULEMUSTE JA MEETODITE ANALÜÜS

Otsene tulemuste kvaliteedi hindamine mudelite puhul ei ole kerge, sest mudelid ise pole objektiivse väärtusega ja neid ei saa lihtsalt numbrite kaudu võrrelda, milline on parem või halvem. Siiski saab teha hea ülevaate probleemidest, mis ette tulevad skaneerimisega ja võimalik subjektiivselt võrrelda kvaliteeti teiste meetoditega nagu fotogrammeetria.

### 6.1 Töö käigus avastatud raskused

Töö käigus avastas autor mitmeid raskusi, mis tekkisid skaneerimisega. Peamisteks probleemideks oli augud mudelis ja tekstuuri vead. Lisaks tekkis veel probleeme mudeli mälus hoidmisega.



*Joonis 9. Mudeli näidis aukudega*

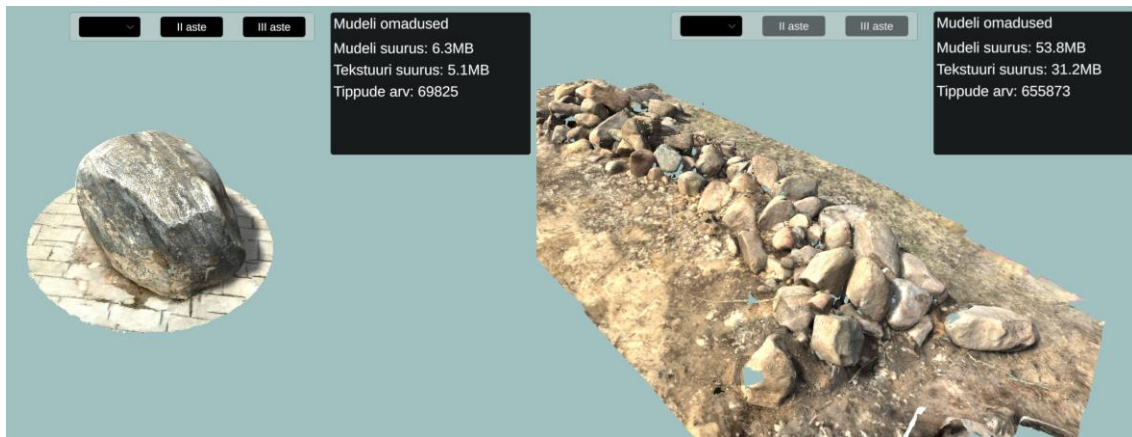
Joonis 9 on näha mudel, millel on skaneerimise ajal jäänud augud, millele lisanduvad ka lahtised jupid. Selliseid auke on raske märgata skaneerimise ajal, sest skaneeringule jäänud väikesed jupid nii-öelda näitavad, et see koht on skaneeritud. Selliste aukude parandamiseks tuleb eemaldada kõik väikesed lahtised osad. Peale lahtiste osade eemaldamise tuleb korrastada ka augu äär, sest see on üldiselt väga korrapäratu. Täidetud auk parandab küll mudeli, aga järgmiseks probleemiks on tekstuur. Koht, mis on ise täidetud ei oma tekstuuri. Tekstuuri parandamiseks on võimalik võtta tekstuur mujalt objekti pealt ja tühi koht lihtsalt asendada teise sarnase tekstuuriga. See üldiselt parandab vea ja hästi asendatud koht ei paista liialt välja.



*Joonis 10. Mudeli näidis muljunud tekstuuriga*

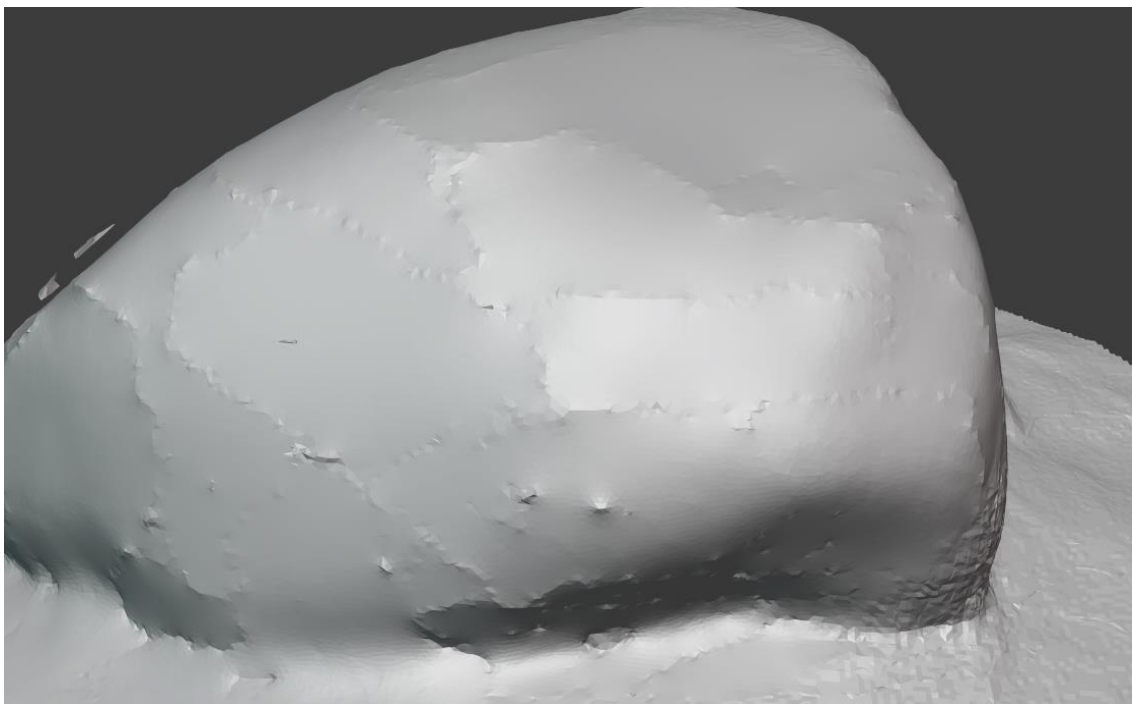
Joonis 10 on näidis „muljutud“ tekstuuridest. Sellised vead tekstuuris võivad tekkida juba skaneerimise ajal kui kaamerat liigutada liiga kiiresti või kaamera ei saa fokuseerida küllalt objektile. Tekstuuri nägemiseks tuleb lõpetada algne skaneerimine ja alustada tekstuuuri kaardistamisega. Alles peale kaardistamist on näha, kas tekstuuriga oli probleeme. Isegi kui algne tekstuur on sobiv, võib tekstuuuri kvaliteet halveneda, kui mudelit on vaja töödelda. Sel juhul on vaja tekstuur uuesti kaardistada töödeldud objektile, mis alati ei pruugi korrektselt töötada.

Lisaks tekkis probleeme IPadi sisese mälu ja mudelite faili suurusega. iPad 2020 Pro-l on 8 GB muutmälu, mida pole liiga raske ülekoormata. Näidisenähtena välja toodud kaks mudelit erineva keerukuse tasemega.



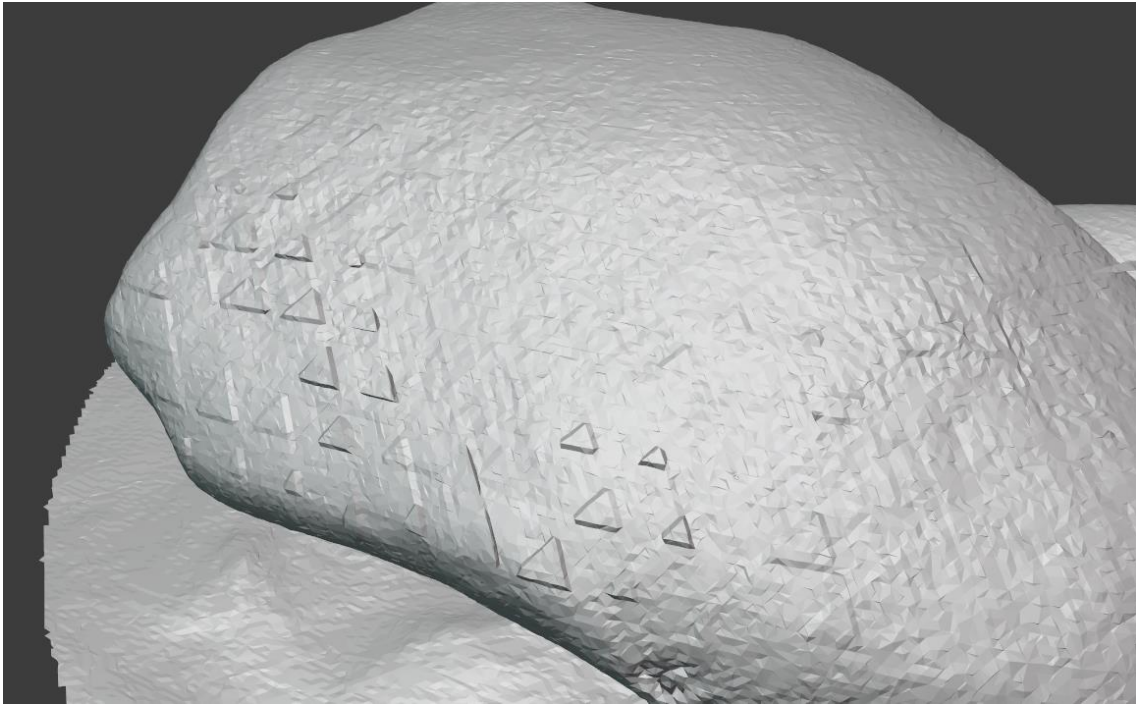
*Joonis 11. Demorakenduses võrdluses ühe kivi mudel kivihunniku mudeliga*

Joonis 11 on näha kahte mudelit. Esimene mudel on üksikust kivist, mis kasutab 6.3MB mälu objekti jaoks ja 5.1MB mälu tekstuuridele. See on kokku 11.4MB terve mudeli jaoks. Lisaks kasutab mudel 69 tuhat tippu. Olenevalt küll kontekstist, kus seda mudelit kasutatakse, on see väga suure mahuga mudel. Teiseks on kivihunnik, mis kasutab kokku 85MB mälu ja koosneb 655 tuhandest tipust. Selle mudeli puhul on tippude hulk isegi väike. Lisaks on näha mitmeid auke mudelis. See mudel on üpris suur Ipad Pro 2020 jaoks, sest peale esimest skaneerimist jooksis programm kokku ja protsess tuli uuesti alustada.



*Joonis 12. Mudel koosneb paljudest lahtistest tükkidest, mis pole omavahel ühendatud*

Joonis 12 on demonstreeritud, kuidas programm salvestab mudeleid. Mudelid koosnevad paljudest väikestest juppidest, mis pole omavahel ühendatud. Joonisel on võetud kivi mudel ja tehtud kiire silumine selle pinnale. Kõik „praod“, mis mudelil näha, on kohad, kus mudeli jupid pole omavahel ühenduses. See lisab raskust mudeli töötlemisele, sest mudel on vaja ühendada üheks jupiks kokku. Lisaks tekitab see probleeme tekstuuridega, kus igale jupile on oma tekstuuri jupp.



*Joonis 13. Mudelites esinevad jupid, mis on väljaulatuvad deformatsioonid*

Joonis 13 on toodud välja deformatsiooni probleemid. LiDAR sensor pole täiuslik ja vahest tekivad valed mõõdud. Joonisel oleval mudelil on näha väljaulatuvad kolmnurgad, kus on tekkinud kauguse mõõtmisega sisse vead. Sel juhul on programm arvanud, et just nendes kohtades on mingid välja ulatuvad osad, sest sellised olid mõõtmised. Selliseid deformatsioone saab üldiselt kergesti parandada silumisega ja see ei tähenda, et iga koht on katkine mudelis. Peamine probleem sellega taas on tekstuur, sest nendes kolmnurkades on tekstuur paigutatud õigesti, kuid silumine muudab topoloogiat ja ka tekstuuri paigutamist.



*Joonis 14. Näidis mudeli tekstuurist ja kuidas see on juppideks tehtud*

Joonis 14 toob välja probleemid tekstuuriga. Kuna mudel on jagatud paljudeks väikesteks osadeks, siis seega on ka mudeli tekstuur jagatud paljudeks osadeks. Peale mudeli töötlemist ja nende juppide ühendamist jääb tekstuur samadeks lahtisteks osadeks. See tähendab, et töö käigus muutunud topoloogiaale on väga raske tekstuuri tagasi kaardistada.



*Joonis 15. Mudel, kus on sama koha uuesti skaneerimine teinud topelt-skaneeringu*

Joonis 15 toob välja probleemi, mis tekib kui ühte kohta mitu korda skaneerida. Sel juhul võib LiDAR-kaamera valesti aru saada oma asukohast ja objekt, mis varem sai skaneeritud, skaneeritakse uuesti paar sentimeetrit varasemast asukohast eemal. See takistus oli peamine probleem, miks autor ei teinud poleeritud mudeleid objektidest. Iga objekti väikeste juppide eemaldamine oleks vaja teha käsitsi ja võtaks tohutult aega.

Kõikidel mudelitel tekkisid mingid defektid kas mudeliga või tekstuuriga. Üldiselt olid need väiksed probleemid, kuid vahest nõudsid mitu korda objekti skaneerimist.

## 6.2 Mudelite kvaliteet

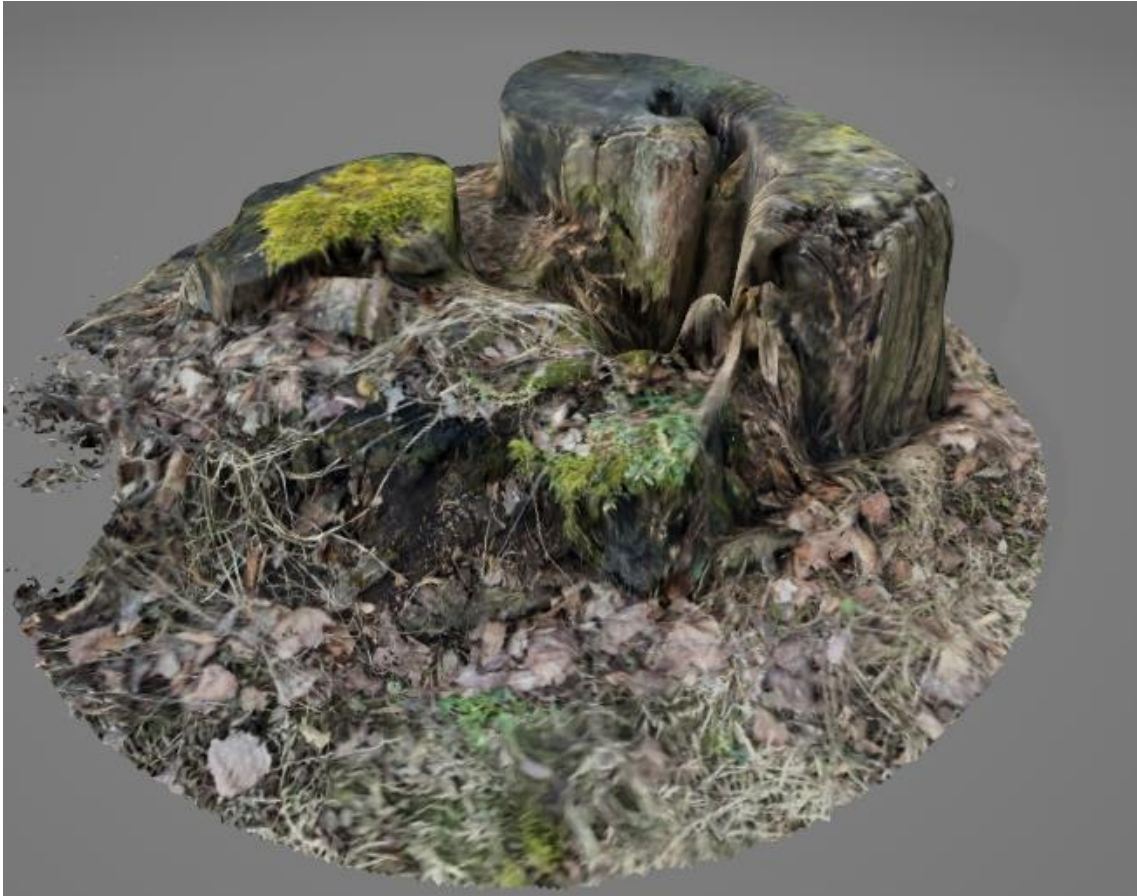
Kuigi iPad LiDAR-kaamera pole otseselt mõeldud 3D skaneerimiseks, vaid liitreaalsuse programmide abistamiseks, saab sellega tulemusi, mis on võrreldavad tavaliste 3D skaneerimis meetoditega nagu fotogrammeetria.

Lisa 1 all on välja toodud pildid kõigist mudelitest, mis lõpetasid demorakenduses. Tee peal sai skaneeritud veel mitmeid mudeleid, kuid kõik ei jäänud alles erinevate vigade tõttu. Peamiseks probleemiks oli, et mudelis tekkisid suured augud, mida varem skaneerimise ajal polnud märkanud.

Välja on toodud mudelid ja tingimused, mis andsid autori silmis parimad tulemused:



*Joonis 16. Kivi mudel*



*Joonis 17. Puukännu mudel*

Joonis 16 ja Joonis 17 andsid autori silmis parima tulemuse ja näitasid IPadi LiDAR-kaamera võimekust heade tulemustega. Need mudelid on tehtud kivist ja puukännust ehk pole tüüpilisi probleeme peegelduse või valgusega. Objekt pole liialt väikeste detailidega, mis ei jääks skaneeringule peale.

Kuigi mudelitel tekkis mitmeid probleeme valede andmete kätte saamisega ja mudeleid vaja tihti puhastada, andis iPad Pro 2020 LiDAR-kaamera head tulemused 3D skaneerimisel.

# KOKKUVÕTE

Käesoleva uurimistöö käigus testis autor uue iPad Pro 2020 LiDAR-kaamera võimekust 3D skaneerijana, mis muidu on loodud liitreaalsuse edendamiseks. Katsetatud said erinevad tingimused skaneerimiseks, mis sõltusid valgusest, objektist endast ehk selle tekstuurist, valguse peegelduvusest ja detailide keerukusest. Lisaks sai uuritud ka meetodeid, kuidas parandada loodud mudeleid ja kuidas autor klassifitseeris mudelid kolme astmesse, kus algne on toormudel, teine aste on puhastatud mudel, kust on võetud välja peamised defektid ja visuaalselt näeb korrektne välja. Kolmandaks oli poleeritud mudelid, mida võimalik praktiliselt kasutada ja ei võta liigselt mälu arvutis. Loodud sai ka demorakendus kasutades Unity mängumootorit, kus on võimalik vaadelda kõiki skaneeritud mudeleid.

Töös sai enamik eesmärke läbitud ja sai testitud LiDAR-kaamera. Puudulikuks osaks jäi mudelite rohkem töötlemine ja laiem võrdlemine fotogrammeetriaga. Mudelite töötlemise puhul ei näinud autor põhjust veeta mitukümmend tundi mudeleid töötlemas, kui eesmärk oli kontrollida LiDAR-kaamera võimekust, mitte oma töötlus oskuseid. Sellele selgusele jõudmine võttis ebavajalikult kaua aega ja väga palju mudeleid lõpliku töötlust ikkagi ei saanud.

LiDAR-kameera tegi hea töö 3D skaneerijana. Tekkis küll raskusi ja vigu skaneerimisel, kuid lõpliku tulemused olid head. Parim tulemus oli looduse ja maastiku skaneerimisel (Välja arvatud puud ja lehed). Halvimad tulemused olid eeldatavalt objektidel, mis peegeldasid palju valgust või olid osaliselt läbipaistvad.

Edasiarenduseks on palju valikuid, enamasti näeb autor valikuteks sügavamalt suunda kindla kasutusala suhtes. Nendeks võib olla loodusalade säästmine virtuaalmaailmas, kus oleks vaja säilitada parim kvaliteet ja mudelit pole vaja liiga kompaktselt ruumi suhtes teha. Muu suund võib olla mängude arenduses, kus mudelid on vaja teha võimalikult kompaktselt, aga säilitada mudelite kvaliteet.

# KASUTATUD KIRJANDUS

Apple Inc. (2021). *iPad Pro*. Retrieved 11 10, 2021, from Apple:

<https://www.apple.com/ipad-pro/>

FF Team. (2016, Oktoober 9). Retrieved 11 10, 2021, from Faraday Future:

<https://www.ff.com/us/futuresight/what-is-lidar/>

Heritage, G., & Large, A. (2009). *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. John Wiley & Sons.

Kraus, K. (2011). *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans, Volume 1*. Walter de Gruyter.

Petit, F. (2020, Aprill 23). Retrieved 11 10, 2021, from blickfeld:

<https://www.blickfeld.com/blog/lidar-in-agriculture/>

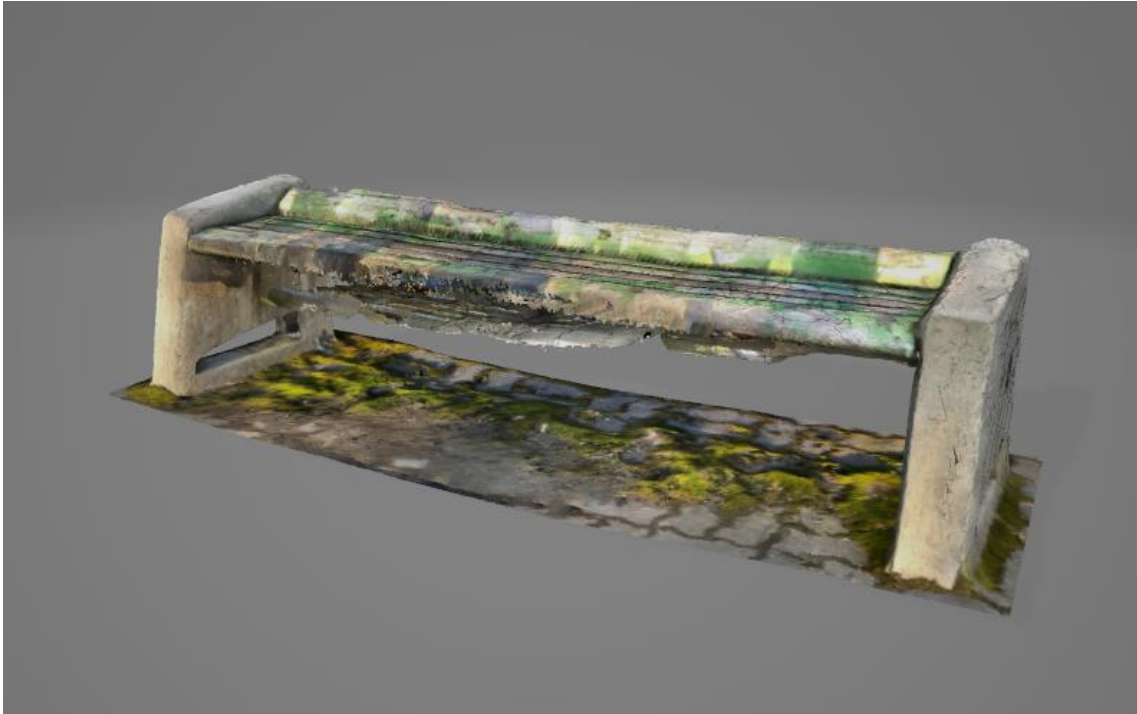
Waymo. (2021). *Waymo Driver*. Retrieved 11 10, 2021, from Waymo:

<https://waymo.com/waymo-driver/>

Zhang, J. (2002). *A comparison of digital photogrammetric and LIDAR high resolution digital elevation models*. Morgantown, West Virginia.

## LISA 1

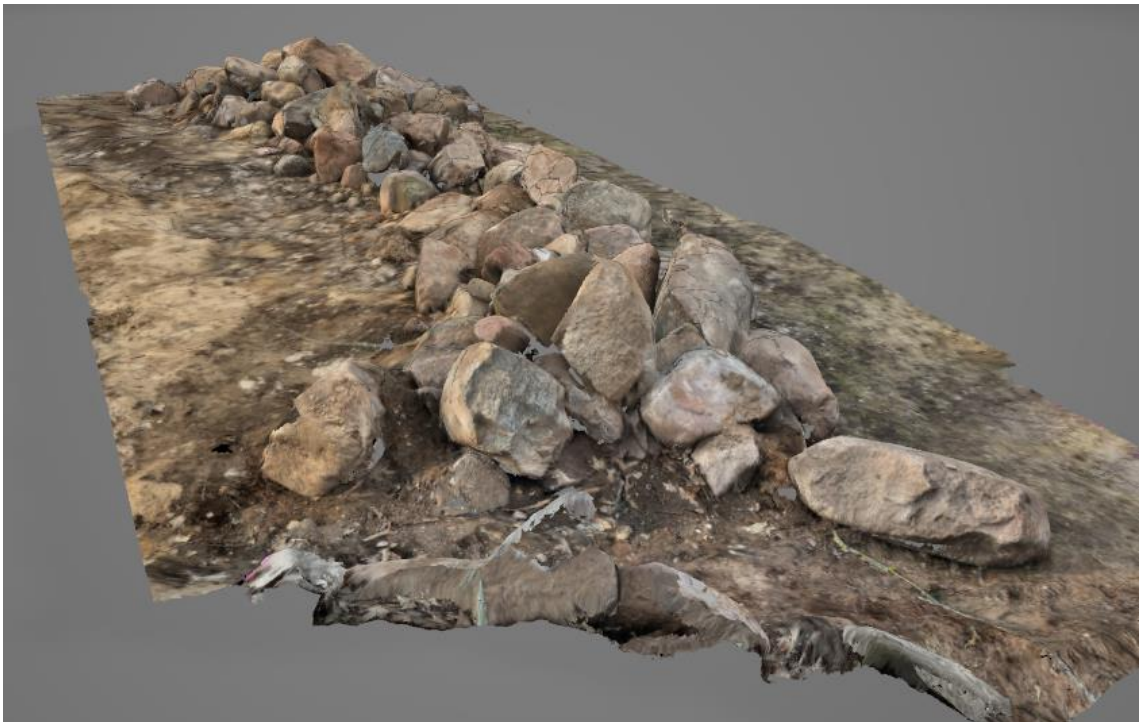
Välja toodud pildid kõigist mudelite toorandmetest, mis lõpetasid demorakenduses.

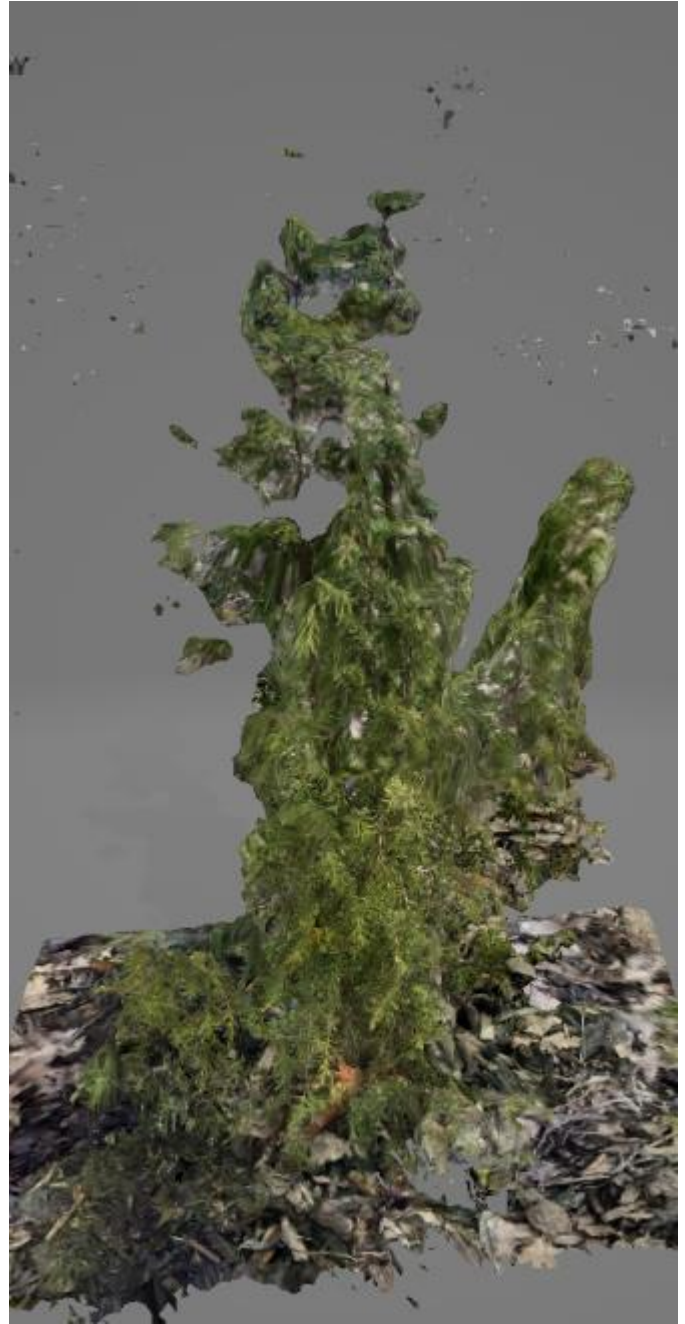


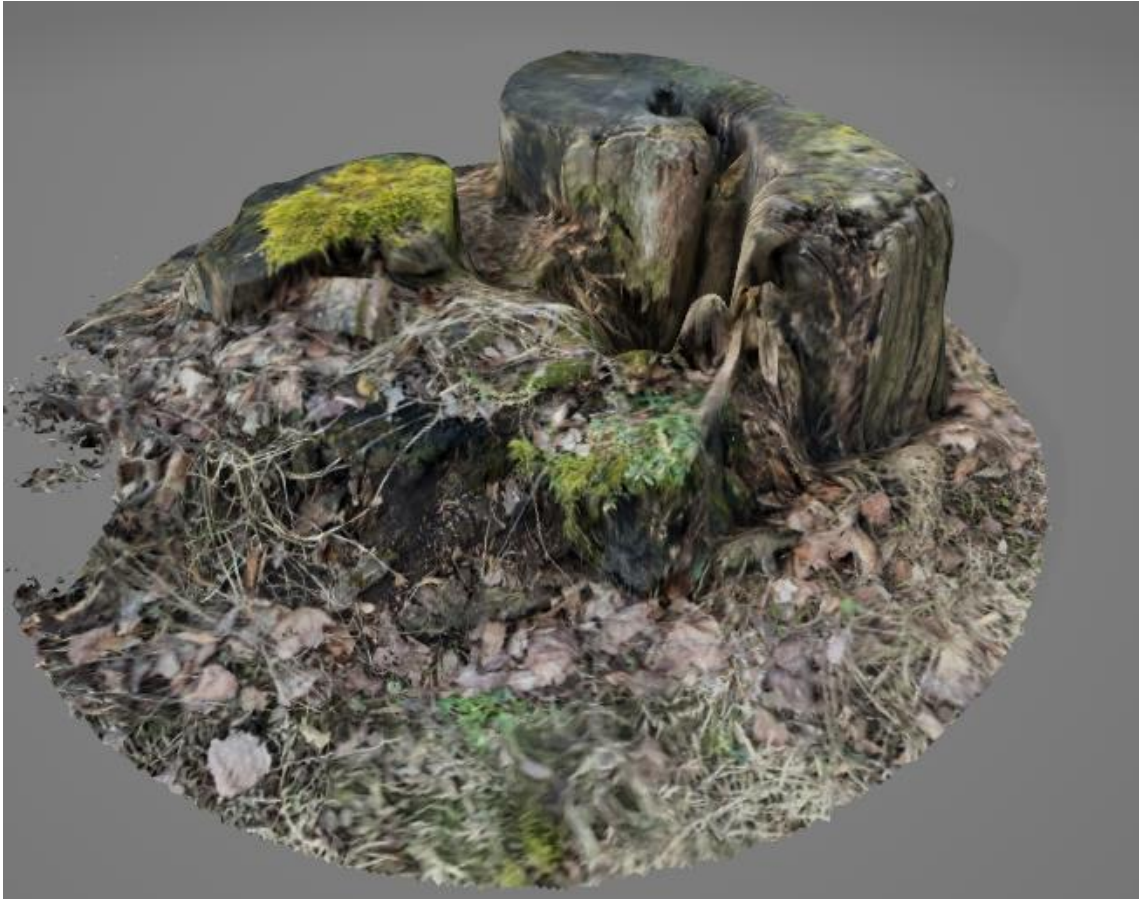














## LISA 2 LITSENTS

### Lihlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina,

Martin Nõmm

*(autori nimi)*

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihlitsentsi) minu loodud teose  
Tavakasutajale mõeldud LiDAR sensori kasutamine 3D rekonstruktsiooniks,

*(lõputöö pealkiri)*

mille juhendaja on

Madis Vasser,

*(juhendaja nimi)*

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

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Martin Nõmm*

**10.11.2021**