

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste valdkond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geoloogia osakond

Bakalaureusetöö geoloogias (12 EAP)

Suure Taevaskoja liivakivipaljandi kaardistamine fotogramm-meetria abil

Polina Shlykova

Juhendaja: Marko Kohv

Tartu 2024

Suur Taevaskoja liivakivipaljandi kaardistamine fotogramm-meetria meetodi abil

Suur Taevaskoda on liivakivipaljand, mis asub Põlva maakonnas Ahja jõe paremal kaldal. Käesoleval bakalaureusetööl on 2 eesmärki. Esimene eesmärk on fotogramm-meetria abil koostada ning analüüsida Suure Taevaskoja liivakivipaljandi 3D mudelit. Teine eesmärk on teada saada, kuidas toimub liivakivipaljandite muutumine. Selleks võrreldakse uuringu ajal tehtud mudelit 2015. aasta piltidest tehtud mudeliga. Uurimuse käigus saadud tulemused aitavad välja selgitada liivakivipaljandis toimuvaid erosiooniprotsesse ning uurida selle mõju ja ulatust.

Märksõnad: Fotogramm-meetria, liivakivipaljand, erosioon

CERS kood: P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

The mapping of Suur Taevaskoda sandstone outcrops using photogrammetry

Taevaskoda is a sandstone outcrop located on the right bank of the Ahja river in Põlva County. This bachelor thesis aims to create and analyze a 3D model of the Suur Taevaskoda sandstone outcrop using photogrammetry. Another aim is to find out how sandstone outcrops change. For this purpose, the model made during the study is compared with the model made with pictures from 2015. The results obtained during the research help to identify the erosion processes taking place in the sandstone outcrop and to investigate its impact and extent.

Keywords: Photogrammetry, sandstone outcrops, erosion

CERCS code: P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Lühendite loend.....	4
Sissejuhatus	5
1. Geoloogiline taust.....	6
1.1. Devoni liivakivid.....	6
1.2. Erosioon	7
2. Materjal ja meetodika	9
2.1. Fotogramm-meetria meetod.....	9
2.2. Välitööd.....	10
2.3. 3D Modelleerimine.....	11
2.3.1. 2024. aasta mudelid.....	11
2.3.2. 2015. aasta mudel	11
2.4. Mudelite võrdlemine.....	12
3. Tulemused.....	13
3.1. <i>Pix4Dmapper</i> tarkvaras koostatud mudelid	13
3.2. <i>CloudCompare</i> tarkvaras loodud mudelid	16
4. Arutelu.....	18
5. Kokkuvõte.....	24
Summary.....	25
Kasutatud kirjandus.....	27
Lisad.....	29

Lühendite loend

CERCS	Common European Research Classification Scheme
SfM	Structure from Motion
MVS	Multi-view Stereo
GCP	Ground Control Points
GNSS	Global Navigation Satellite System
RGB	Red, Green, Blue
MP	Megapixel
SOR	Statistical Outlier Removal

Sissejuhatus

Arvutite ja erinevate modelleerimisprogrammide suure arenguga on erinevate geoloogiliste struktuuride digitaalsete kaartide ja mudelite koostamine geoloogidel oluliselt lihtsustunud. Jaimes jt (2020) kasutasid mehitamata õhusõidukeid selleks, et saada andmeid Alam-Kriidiajastu Los Santose kihistu liivakivipaljandite kohta. Uurimuse eesmärk oli koostada mudel struktuurigeoloogia rakenduste jaoks. Uurimuse tulemusena jõuti järeldusele, et droonide kasutamine fotogramm-meetrias aitab saada informatsiooni kohtadest, kuhu tavalisel inimesel on raske pääseda. Loodud mudelit kasutati liivakivipaljandi üksikasjalikuks struktuurianalüüsiks ja tõlgendamiseks. Samuti on oluline mainida, et mudelit saab kasutada erinevatel otstarvetel: näiteks ka sellistes geoloogia allvaldkondades, nagu hüdrogeoloogia, geodünaamika ja -tehnika, karjääri rajamise planeerimine ning geoloogiliste ohtude ennetamine. (Jaimes jt 2020)

Eestis kasutas fotogramm-meetria meetodi mudeli koostamiseks Marko Kohv, kes 2015. aastal koostas 3D mudeli Suurest Taevaskojast (Kohv 2015).

Käesoleval bakalaureusetööl on 2 eesmärki. Esimene eesmärk on fotogramm-meetria abil koostada ning analüüsida Suure Taevaskoja liivakivipaljandi 3D mudelit. Teine eesmärk on teada saada, kuidas toimub liivakivipaljandite muutumine. Selleks võrreldakse uuringu ajal tehtud mudelit 2015. aasta mudeliga. 2015. aasta mudeli aluseks olevad fotod anti autorile juhendaja poolt. Uurimuse käigus saadud tulemused aitavad välja selgitada liivakivipaljandis toimuvaid muutusi ning teha järeldusi, mis võib seda mõjutada.

1. Geoloogiline taust

Eesti asub Ida-Euroopa platvormi loodeosas. Maakoore läbilõige koosneb kolmest osast: kristalne aluskord, mis tekkis 1,8–1,6 miljardit aastat tagasi, settekivimiline pealiskord ning pinnakate. Pealiskord koosneb setetest, mis ladestusid kunagises merepõhjas. Pinnakate moodustus viimasel jääajal. (Soesoo 2010)

1.1. Devoni liivakivid

416 miljonit aastat tagasi Laurussia ürgmandri moodustamise ajal algas Devoni ajastu. Sellel ajal toimus intensiivne pinnase ja kivimite erosioon. Peenem materjal liikus veevooludega tasandikule ja settis välja liivana, millest hiljem moodustus punaka värvusega liivakivi (*Old Red*). (Soesoo 2010)

Devoni perioodi esimese miljoni aasta jooksul ladestus Eesti piirkonda katvasse sooja ja madalasse merre liiv. Alam-Devoni (419-393 Ma) lõppedes toimus uus mere pealetung läänest ja Ida-Euroopa platvorm jäi mere alla. Kesk-Devoni (393-382 Ma) algust Eestis iseloomustab 15–50 meetri paksuse liivakivi settimine madalatesse meredesse ja delta-aladele. Mere pealetungi jätkudes hakkasid settima karbonaadid, peamiselt dolomiidid. See viitab suurema soolsusega basseini, mida tõendavad dolomiitkivimite levimus, seos kipsiga ja vähene fauna. Sellistes settetingimustes tekkis Devoni karbonaatide läbilõikes märkimisväärne osa segakivimeid, mis koosnesid võrdses koguses karbonaatidest ja Skandinaavia mäestikust pärinevast liivast. Kagu-Eestis leidub ka Devoni perioodi lõpust pärit karbonaatseid kivimeid. Neid katavad nooremad ja pehmed Kvaternaari vanusega setted. (Soesoo 2010)

Suur Taevaskoda on Devoni liivakivi avamusalal Lõuna-Eestis. Paljand koosneb Devoni ladestu Burtneiki kihistu põimjaskihilisusega liivakivist. Liivakivi on paljandis kollakas-punane, mõnedes kohtades hallikas või roosakasvalge, ühtlase terasuurusega ja peeneteraline. Paljandi pikkus lõunast itta on peaaegu 150 m ning kõrgus varieerub 15-20 m. (Pirrus jt 2002) (Lisa 1)

1.2. Erosioon

Paljandid on tekkinud erinevate erosiooni protsesside tulemusena. Paljandi säilimiseks on oluline alla varisenud materjali ärakanne. Juhul, kui ärakandumist veega või tuulega ei toimu, siis kasvab paljand aja jooksul taimestikuga kinni ning mattub varisenud pinnase alla. (Sedman, Talviste 2015). Erosiooniprotsesside mõõtmise meetodika põhineb piltide võrdlemisele. Erinevatel kuupäevadel tehtud pildid samast paljandi seinast pannakse kõrvuti või üksteise peale ja otsitakse erinevusi (Rose, Basher 2011).

Paljandi moodustamise juures võivad esineda erinevad erosiooni protsessid. Kõige levinumad on tuule tekitatud kulutus, veepiiril toimuv erosioon, mööda lõhesid toimuv erosioon ja paljandi ülaosas pehmetes setetes toimuv erosioon.

Veepiiril toimuv erosioon on seotud vee voolurežiimi ja selle muutusega. Voolav vesi kannab paljandi alumisest osast materjali ära ja toimub kallaste erosioon. Kui veetase tõuseb, siis suureneb sügavate maalihete ja plokkide varingu tekke võimalus. Nõlvastabiilsus väheneb, kui toetav kivim mureneb ja pudeneb veepiiril. (Sedman, Talviste 2015)

Paljandeid kujundavad ka deluviaalsed protsessid. Liivakivi pinna murenemisel tekkinud deluviaalne materjal liigub gravitatsiooni mõjul mööda liivakivi pinda koos deluuviumile tekkinud taimestikuga, puruneb ning seejärel langeb vette või veepiirile. Deluuviumiga seotud nõlvadeformatsioonid intensiivistuvad veepinna alanemisel. (Mets 2015)

Mööda lõhesid toimuva erosiooniga on seotud sügavad maalihked ja plokilised varingud. Plokkide varing esineb lõhepindadega eraldatud liivakivimis, kus plokk libiseb piki kihipinda alla. Seda protsessi põhjustab nõlva stabiilsuse vähenemine plokkide toetava kivimi murenemise ja pudenumise tõttu. Varing võib toimuda ka koos paljandi purdesetest koosneva ülemise osaga. See toimub juhul, kui setted üleküllastavad vihmaveega, mille tagajärjel koormus suureneb ja materjal variseb alla. (Sedman, Talviste 2015)

Jää võib ka põhjustada erosiooni paljandites. Ühelt poolt põhjustab kivimi lõhedes oleva vee külmumine lõhede laienemist ning seega kivimi nõrgenemist, teisalt toimub veekogu kõrval

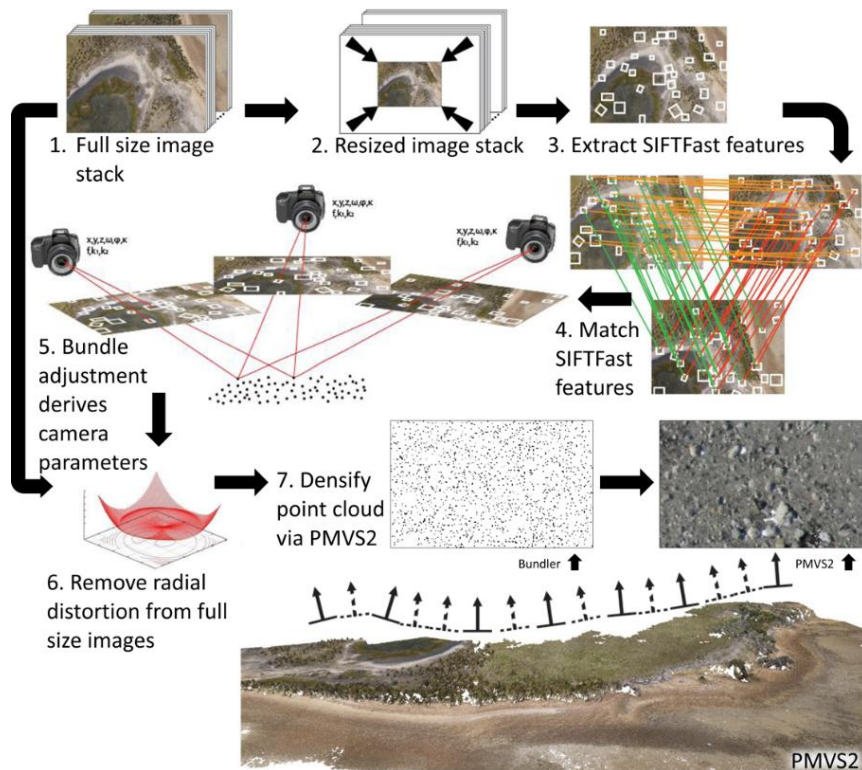
asuvate paljandite allosas kokkupuude veekogude pinnale tekkiva jääga. Jääkate võib olla täielik või mittetäielik ning selle paksus võib aasta-aastalt oluliselt erineda. Sulamisperioodi saabudes põhjustavad veetaseme muutused jää pragunemist ning see hakkab liikuma koos veega. Liikuvad jäämassid kulutavad kokkupuutel kaldaid ning võivad transportida koos veega lühikese aja jooksul suuri settekoguseid. (Chassiot et al. 2020)

2. Materjal ja metoodika

2.1. Fotogramm-meetria meetod

Fotogramm-meetria on andmetöötlusviis, mille abil saab luua 3D mudelid ja nende tuletisi kasutades objektist erinevate nurkade alt ning asenditest tehtud pilte. Fotogramm-meetria üks peamisi eeliseid on selle odavus ja täpsus 3D mudelite loomisel. Selle meetodi jaoks sobib nii maapealne kui ka õhust pildistamine lennuki või drooni abil. (GISGeography 2024)

Drooni fotogramm-meetria puhul kasutatakse *Structure from Motion* (edaspidi *SfM*) töövoogu, mille abil on kolmemõõtmeliste mudelite ja kvaliteetsete ortofotode koostamise protsess muudetud lihtsaks, intuitiivseks ja kiireks (Pepe et al. 2022). Mudeli koostamise esimene etapp on värvigradientide põhjal ja võtmepunktide otsing masin-nägemise *SIFT* algoritmi abil. Protsessi peamiseks piiranguks on aga *SIFT*i oskamatus leida võtmepunkte fotodelt maastikega, millel on kas tihe ja keeruline taimestik (nt kuiv põõsas, millel on palju kattuvaid oksid) või kus on pinnal homogeenne tekstuur (nt vesi või lumi) (Harwin, Lucieer 2012). Teise etapi käigus pildid joondatakse omavahel kasutades võtmepunkte. Kui geomeetriliselt kontrollitud võtmepunktid sobivad kokku, muutuvad nad sõlmpunktideks ja neid kasutatakse juba esmase 3D punktipilve koostamise jaoks. Kolmandas etapis võimaldavad *Multi-view Stereo* (edaspidi *MVS*) algoritmid suurendada punktipilvede tihedust, mis varem loodi *SfM* protsessi käigus. *SfM-MVS* algoritmidele põhinevate tarkvarade abil, on võimalik teha 3D-punktipilvi, mida saab kasutada 3D mudelite, pinnamudelite ja ortofotode koostamiseks. (Joonis 1.)



Joonis 1. Fotogramm-meetria töövoog 3D punkt pilvede loomiseks. (Harwin, Lucieer 2012)

2.2. Välitööd

Käesoleva uurimistö jaoks koguti andmeid välitöö ajal. Väljasõit Suure Taevaskoja paljandile toimus 26. aprillil. Selleks ajaks lumi oli sulanud ning puude ja põõsaste lehed ei takistanud pildistamist. Väljasõidu ajal tehti pildid paljandist 2 erineva kaameraga: esimene pildistamine toimus tavalise fotokaamera ja 24 mm objektiiviga, teine pildistamine toimus drooni kaameraga, mille kaugpiloodiks oli Marko Kohv. Ahja jõe äärel asetati 1 m pikkusega 4 tokki ja 5 markerit. Markerid on valmistatud veekindlast suure kontrastsusega materjalist (must ja valge), millel on matt viimistlus peegelduste vähendamiseks ja nähtavuse parandamiseks (Pepe et al. 2022). Markerite koordinaadid mõõdeti täppis GNSS seadmega (*TOPCON Hiper 5*), mille täpsuseks hindas seade ise mõõdistamise ajal 1-3 cm nii vertikaali- kui horisontaalsuunas. (Lisa 1, lisa 2).

2.3. 3D Modelleerimine

Fotogramm-meetriliseks modelleerimiseks kasutati tarkvara *Pix4Dmapper* 4.8.4 versiooni. Tarkvara võimaldab koostada 3D mudeli sisestatud piltide alusel. Mudeli kvaliteet ja täpsus sõltuvad kaamerateist ja nende objektiividest. Mida paremad pildid, seda detailsem on mudel. Aga mida detailsem on mudel, seda mahukam ta on ja võtab rohkem aega töötlemiseks.

2.3.1. 2024. aasta mudelid

Esimesena loodi mudel drooni *RGB* kaameraga tehtud piltidega (Joonis 2.) Drooni mudel oli *DJI Mavic 3M*, kaameral on sensor suurusega 20 MP (megapikslit). Droon võimaldab kõrgemalt pildistamist, mis on eriti oluline paljandi ülaosas. Kuna droon tegi pildid ülevalt, oli mudelilt oli näha markereid ja tokke, mille abil skaleeriti mudel ja teostati täpsem georeferimise. Selleks tähistati markerid Pix4D programmis pildidel kui *Ground Control Points* (edasid *GCP*). *GCP*-de kasutamine võimaldab loodavat 3d mudelit georeferida ja kontrollida georeferimise täpsust valitud koordinaatsüsteemis. (Pepe *et al.* 2022)

Teisena koostati mudel maa pealt 24 mm objektiiviga tehtud piltidest (Joonis 3). Kaamera mudel oli *Pentax KP*, sensori suuruseks on 24,3 MP. Markerid ei jäänud üldiselt piltidele. Tokke kasutati skaleerimiseks ja koordinaadid lisati nendele *GCP*-dena. Tähtis oli *GCP*-dele jätta samad nimetused, et nende abil hiljem mudelid ühendada.

Viimase etapina ühendati koostatud mudelid tokkide ja *GCP*-de asukohtade alusel üheks, palju detailsemaks, mudeliks. (Joonis 4.)

2.3.2. 2015. aasta mudel

2015. aasta mudel koostati Marko Kohvi 2015. aastal tehtud piltide alusel. Pildid olid tehtud fotokaameraga *Pentax K-50*, sensori suuruseks on 16,3 MP. Mudel koostatisama tarkvaraga ja seadistusega, nagu varem kirjeldatud mudelid. Kuna 2015. aasta piltidelt puudusid käesolevas töös kasutatud tokid ja markerid, esinesid raskused skaleerimise ja georeferimise. Nende asemel

kasutati 2015 mudeli georefereerimiseks 2024. a mudelitel tuvastatavaid sissekraabitud tähtede ja lõhede nurki paljandi seinalt. (Joonis 5.)

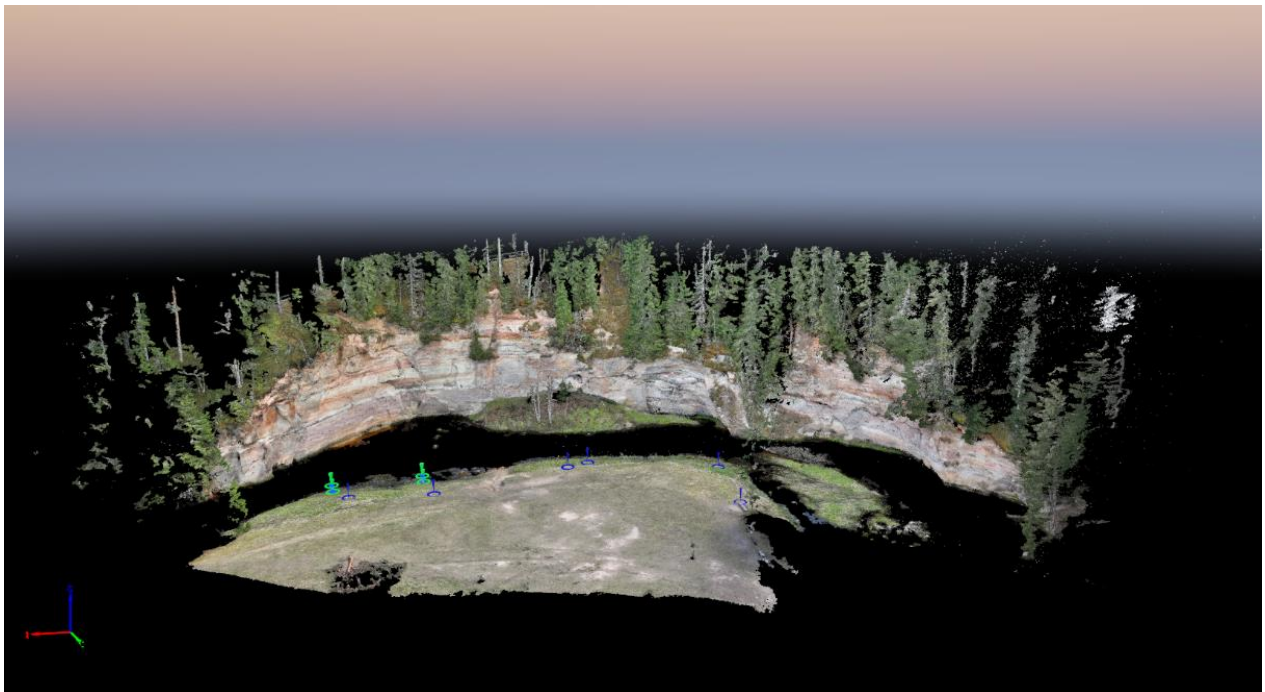
2.4. Mudelite võrdlemine

Mudelite võrdlemiseks kasutati tarkvara *CloudCompare*. 2024. a mudeli 24 mm fotodega ja 2015. aasta fotodega mudeli punktipilved laeti üles programmi. Võrdluseks valiti 24 mm objektiiviga tehtud pildid sellepärast, et nad olid tehtud maa pealt analoogselt 2015. a mudeliga. Hiljem valmistati mudelid ette puhastamiseks: puud, vana kungas alla varisenud materjaliga ja osad, mis ei läinud kokku, lõigati ära *Segment* tööriistaga. Peale mudelite valmimist puhastati punktipilved *SOR* filtriga. Filter vaatleb kuut punkti fookuses oleva punkti ümbrusest ning kustutab need, mis asuvad fookuses olevast punktist kas 3σ kaugusel või kaugemal, kui punktide keskmine kaugus. Kui punktipilved olid puhastatud, kasutati punktipilvede omavaheliseks täpsemaks refereerimiseks *ICP (Iterative Closest Point) fine registration* plugint, mis otsib matemaatiliselt parimat kattuvust kahe punktipilve vahel (ülekatteks määrati 75%). Järgmisena kasutati *M3C2 Distance* tööriista, mis arvutas mudelite vahekauguse piki normaale.

3. Tulemused

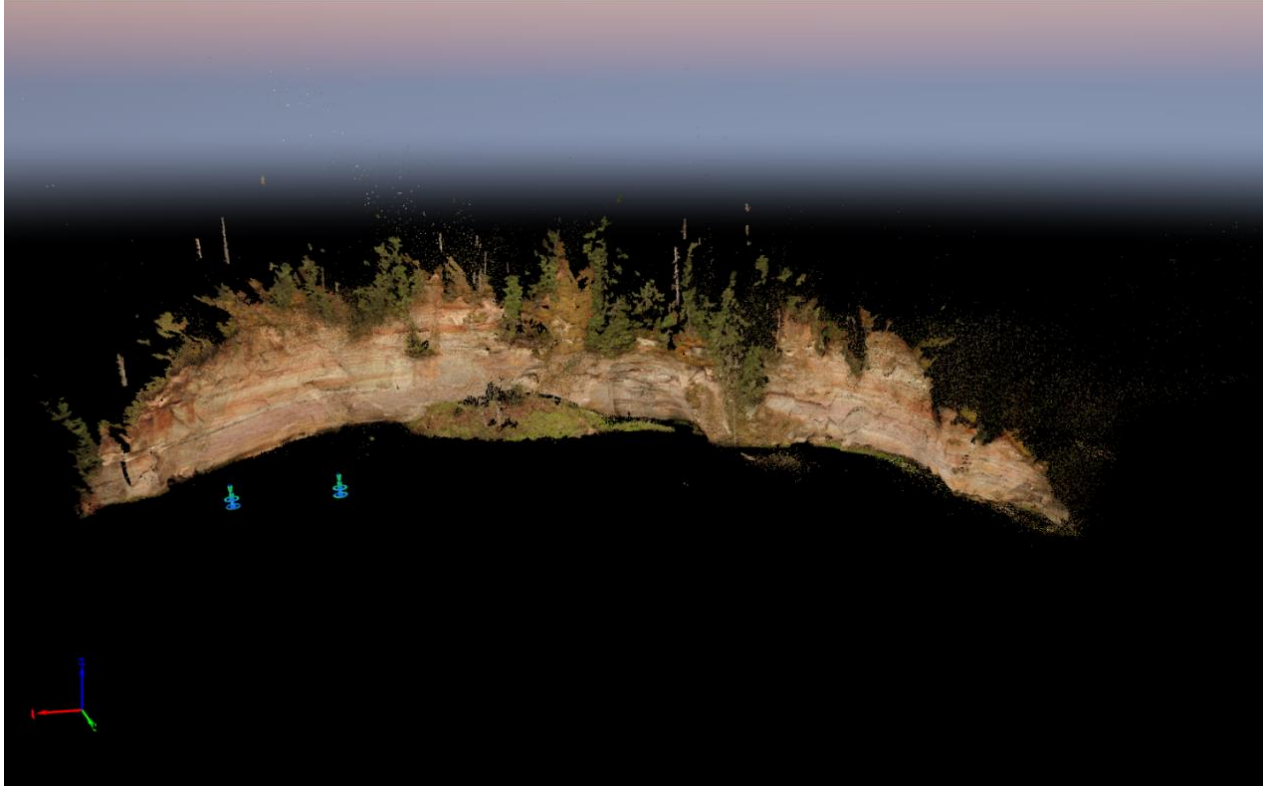
3.1. *Pix4Dmapper* tarkvaras koostatud mudelid

Drooni piltidest tehtud mudel on väga üksikasjalik. Mudelist saab näha ka kallast, kus olid tokid ja markerid, mida kasutati georefereerimiseks ja skaleerimiseks. Mudelis tokid on rohelised punktid, markerid on sinised punktid. (Joonis 2.)



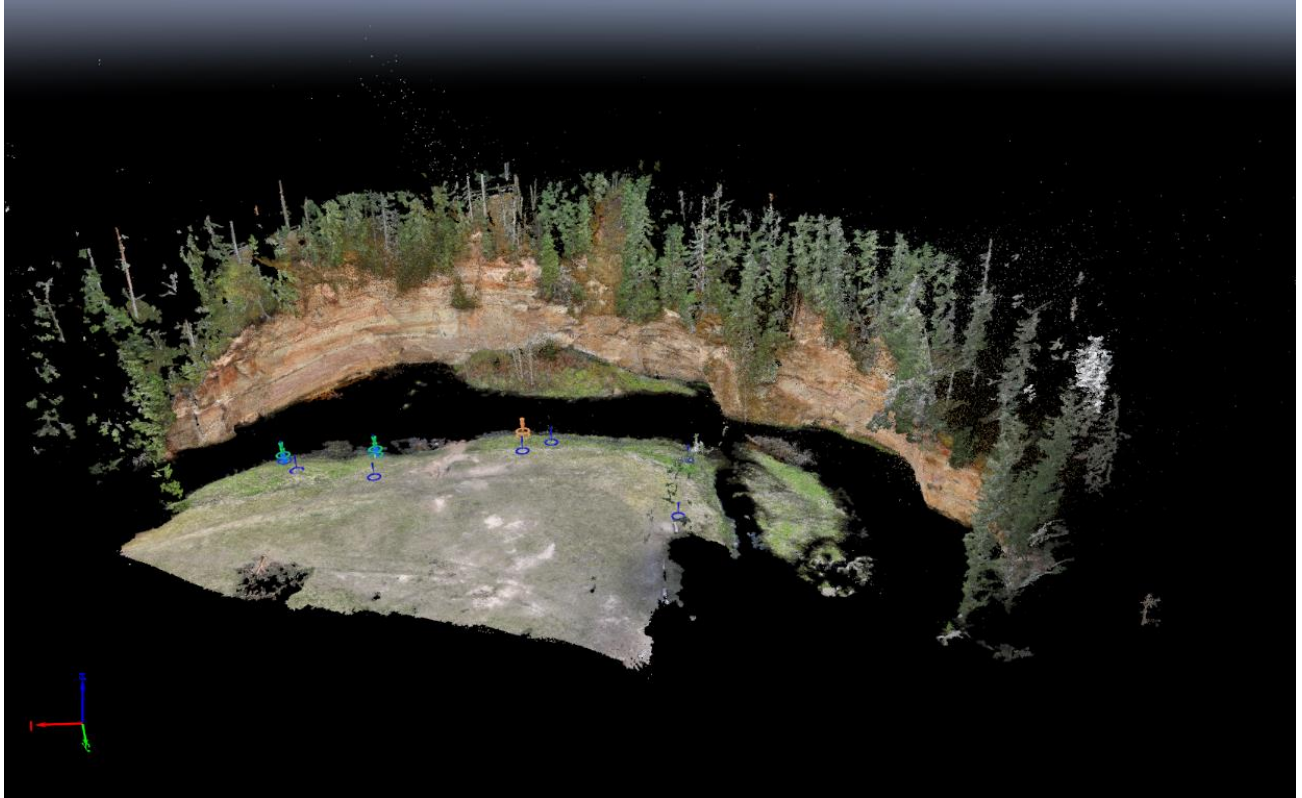
Joonis 2. 3D mudel drooni piltidest. Kahe rohelise punkti vaheline kaugus on 13,4 m.

24 mm objektiiviga piltidest tehtud mudelil saab näha, et see sarnaneb drooni mudeliga, kuid värvus on teine. Värvuse erinevus tuleb pilvisusest ja Päikese liikumisest. Nagu eelnevalt oli mainitud, markerid ei jäänud piltidele ning mudelilt saab näha ainult tokkide punkte.



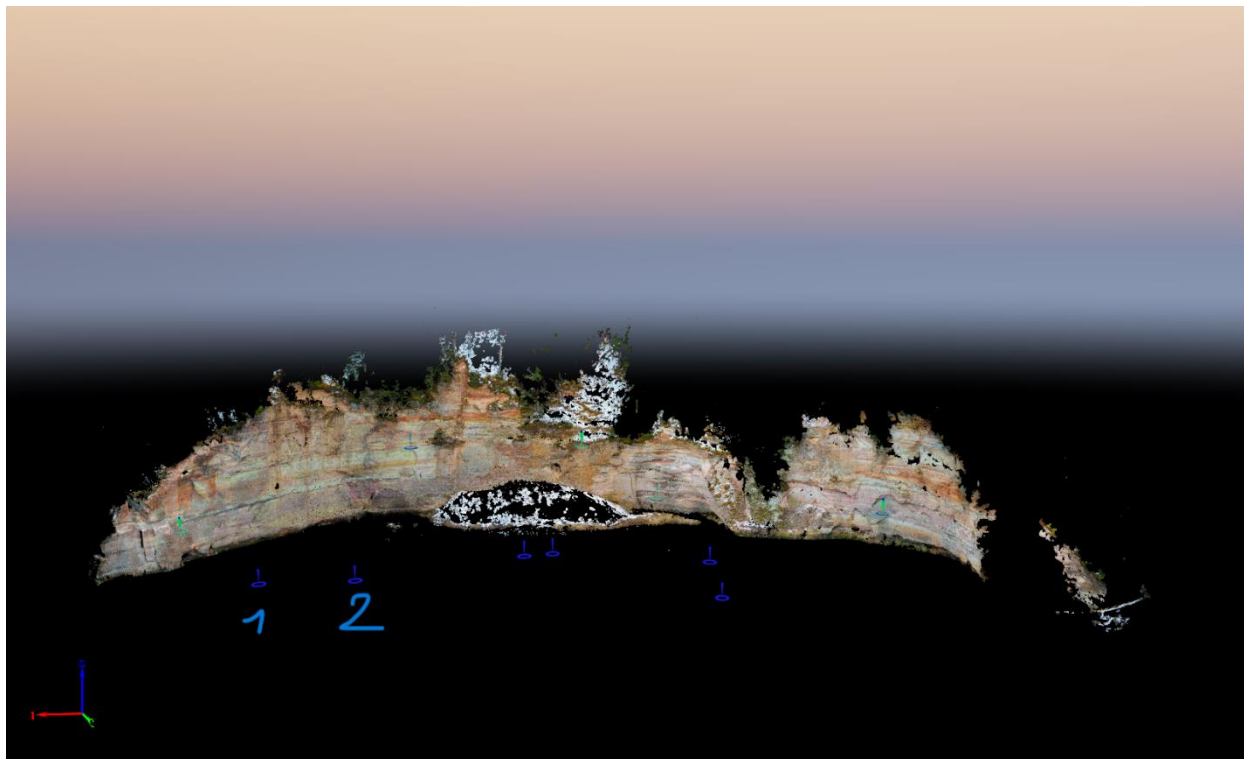
Joonis 3. 3D mudel 24 mm objektiiviga piltidest. Kahe rohelise punkti vaheline kaugus on 13,4 m.

Ühendatud mudel on kõigist käesoleva bakalaureuse töö ajal loodud mudelitest kõige üksikasjalikum. Kuid tema täpsus teeb mudelit mahukamaks ning selle töötlemine ja muutmine võtab palju aega. Kui kustutada mets ja teine kallas, millel ei ole tähtsust paljandi uurimiseks, siis see aitab mudelit kompaktsemaks muuta. (Joonis 4.)



Joonis 4. Kahest mudelist ühendatud 3D mudel. Kahe rohelise punkti vaheline kaugus on 13,4 m.

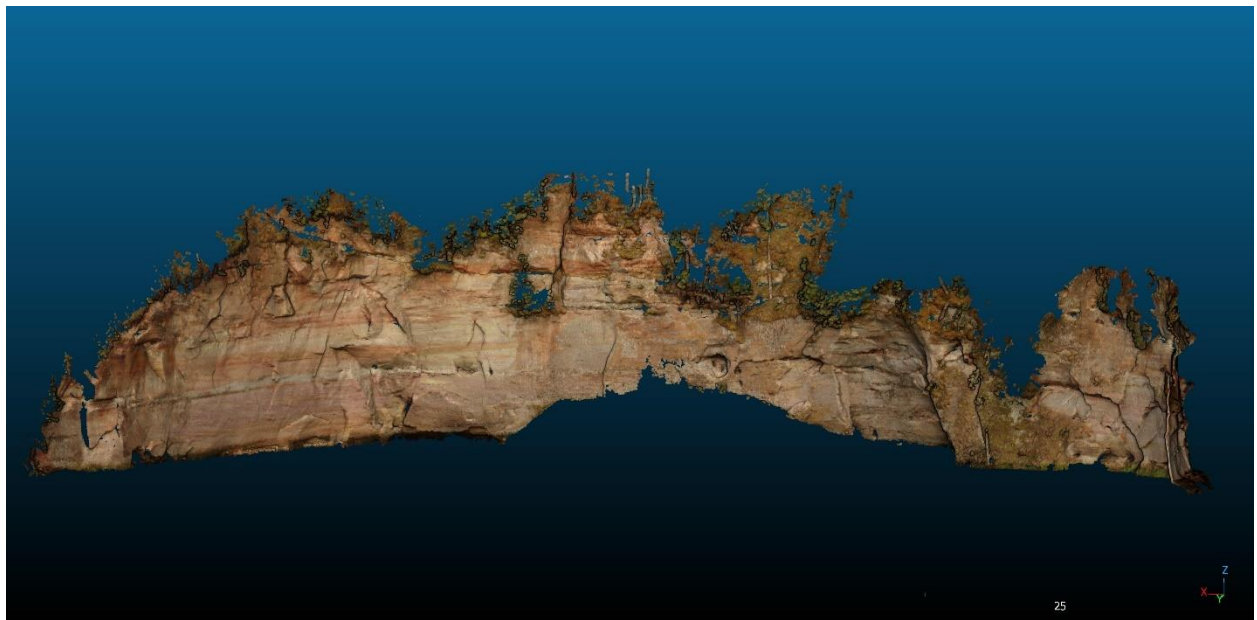
Mudel 2015. aasta piltidega tekkisid raskused skaleerimisel ja georefereerimisel. Selleks, et lisada mudelile koordinaadid, kasutati ka teistel mudelitel olemasolevaid tähtede ja lõhede nurki paljandi seinalt. Hiljem lisati sinna tokkide ja markerite koordinaadid *GCP*-dena (mudelis olevad sinised punktid), et *CloudCompare* tarkvaras oleks võimalik mudelid üksteise peale lisada. (Joonis 5.)



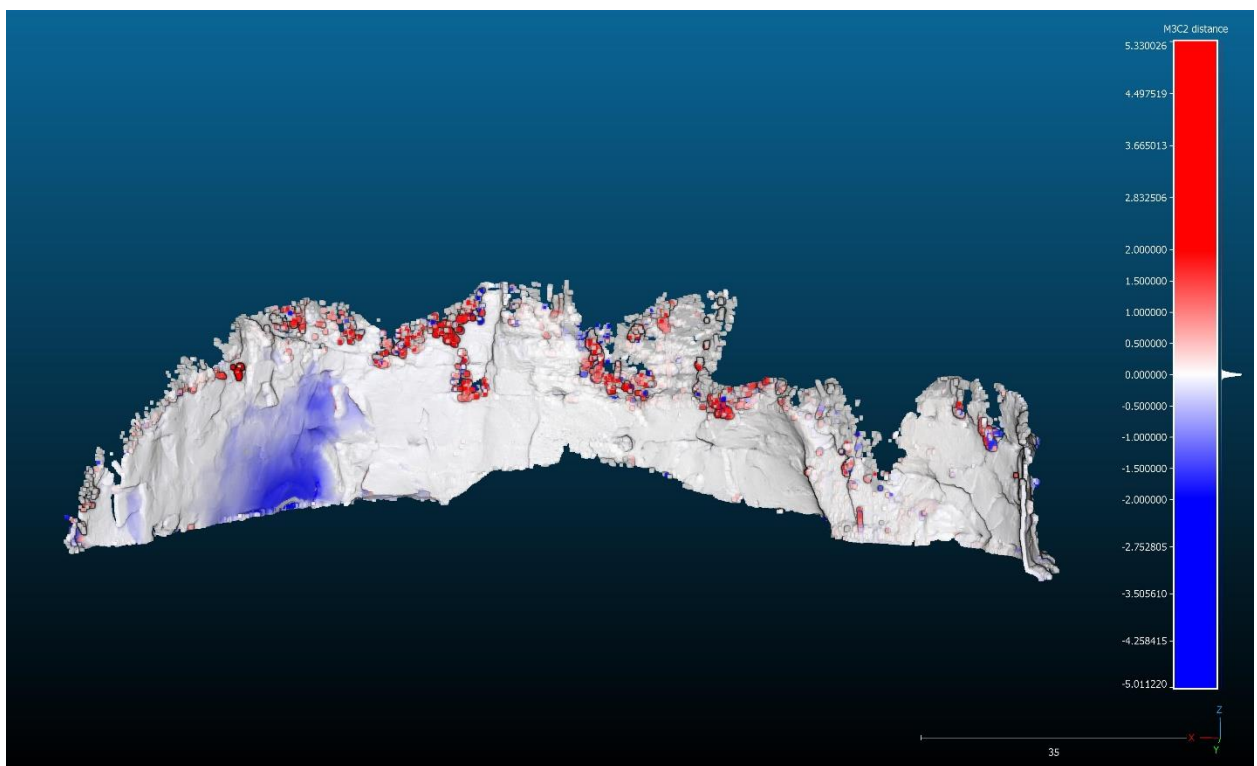
Joonis 5. 2015. aasta piltidest tehtud mudel. Punktide 1 ja 2 vaheline kaugus on 13,97 m.

3.2. *CloudCompare* tarkvaras loodud mudelid

Joonisel 6 saab näha puhastatud mudelit 24 mm objektiiviga tehtud piltidest. See mudel valiti võrdluseks 2015. aasta piltidest tehtud mudeliga sellepärast, et nende jaoks fotod olid tehtud maa pinnalt ning mudelid sobisid omavahel paremini kui näiteks ühendatud mudel. *M3C2* tööriist arvutas 24 mm mudeli ja 2015. mudeli vahekauguse. Tulemuseks on joonisel 7 illustreeritud mudel, mis näitab paljandis toimunud muutusi. Sinist värvi aladel toimus materjali äraanne, punast värvi aladel kuhjusid setted.



Joonis 6. 24 mm mudeli punktipilvedest koostatud mudel *CloudCompare* tarkvaras.

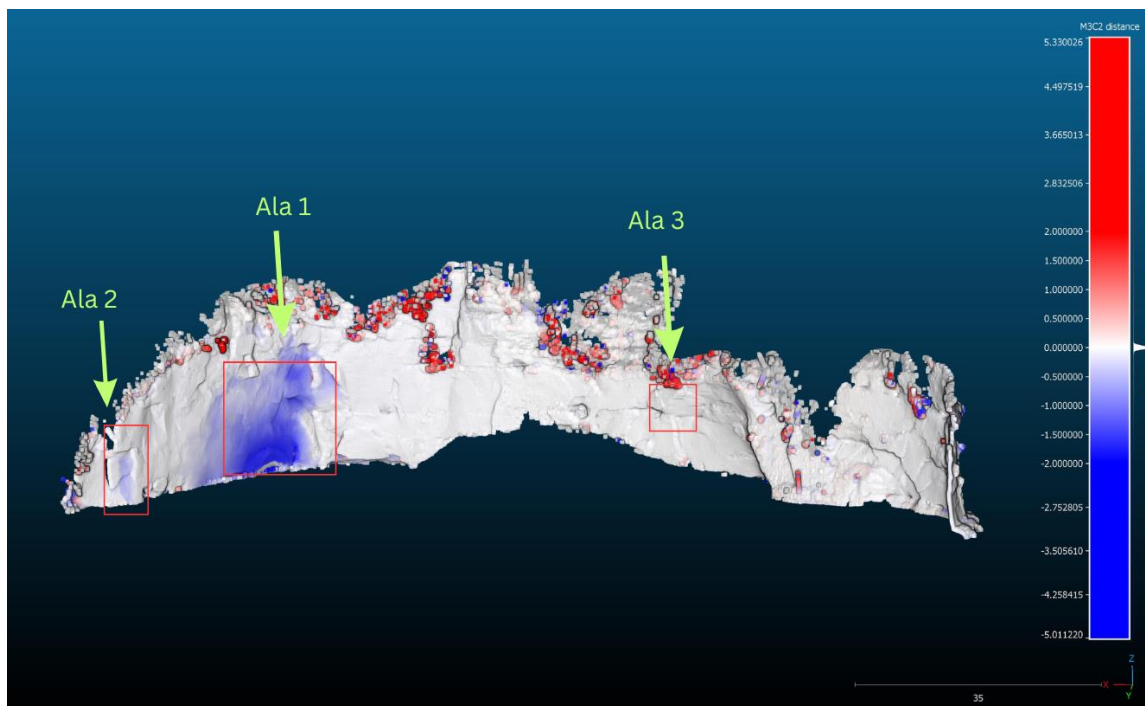


Joonis 7. Suure Taevaskoja paljandi mudel *M3C2* pluginaga tehtud.

4. Arutelu

Saadud tulemused näitavad 7 aasta vältel tekkinud märkimisväärseid muutusi Suure Taevaskoja paljandis. Selleks, et neid lähemalt uurida valiti välja 3 ala. Joonisel 8 on näha, et alad number 1 ja 2 asuvad jõe lähedal ning ala number 3 asub paljandi seina keskel. *M3C2* plugina mudelist lõigati mudelist välja iga ala, 2015. aasta mudeli värvi muudeti loodi *Cross Section* tööriistaga ristlõike profiilid, et näha paljandi muutust.

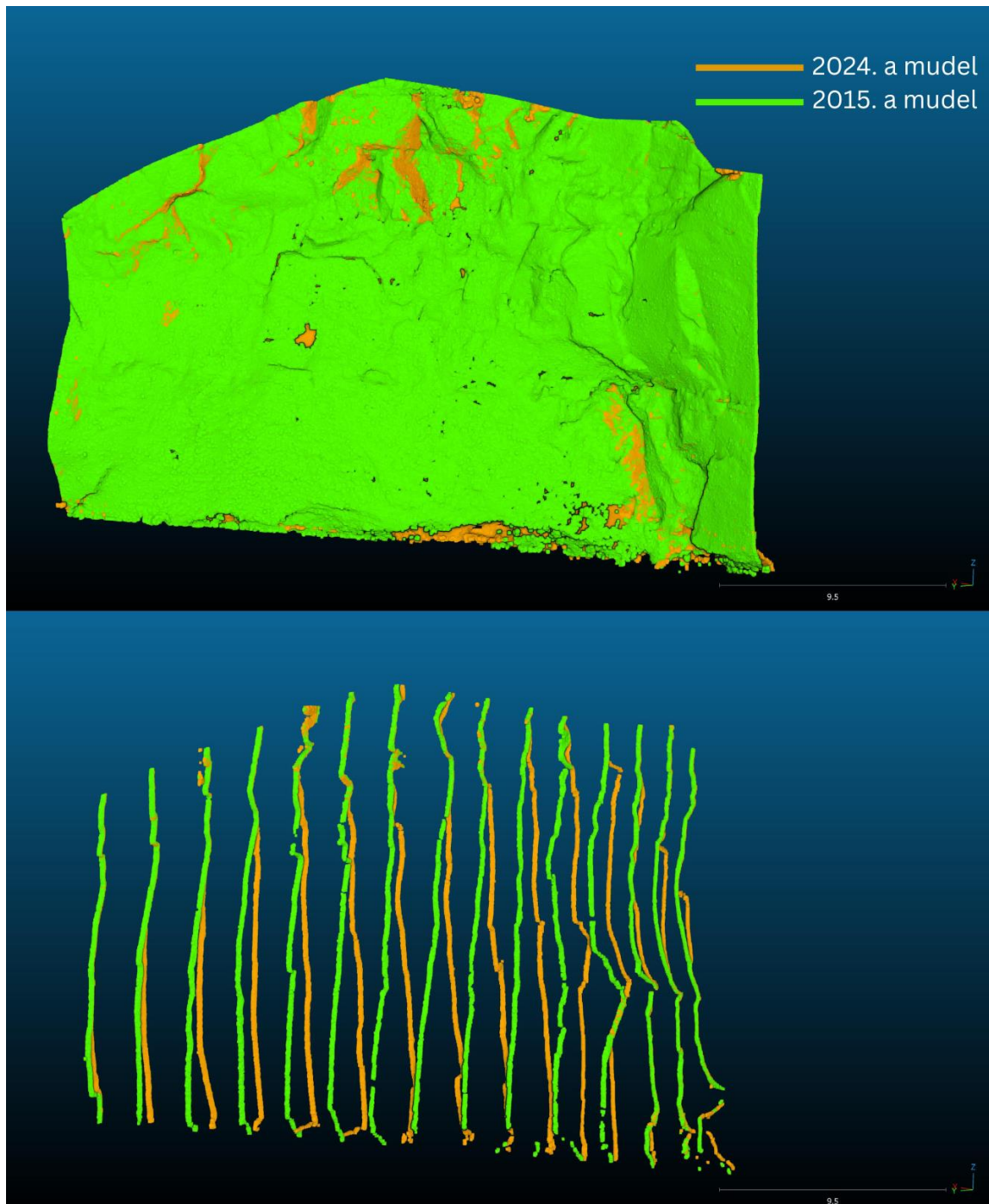
Kuna mudelid täpsusega 5 cm ei pruukinud kattuda 100%, siis tekkisid väikesed erinevused, mis olid peetud tarkvara jaoks tähtsateks. Näiteks kõik punased kohad, kus mudeli järgi toimus settimine, tegelikkuses on puude ja põõsaste punktipilvedest tulenevad erinevused. Nad ei ole seotud paljandi erosiooniga.



Joonis 8. Suure Taevaskoja paljandi *M3C2* plugina mudel koos uuringualadega.

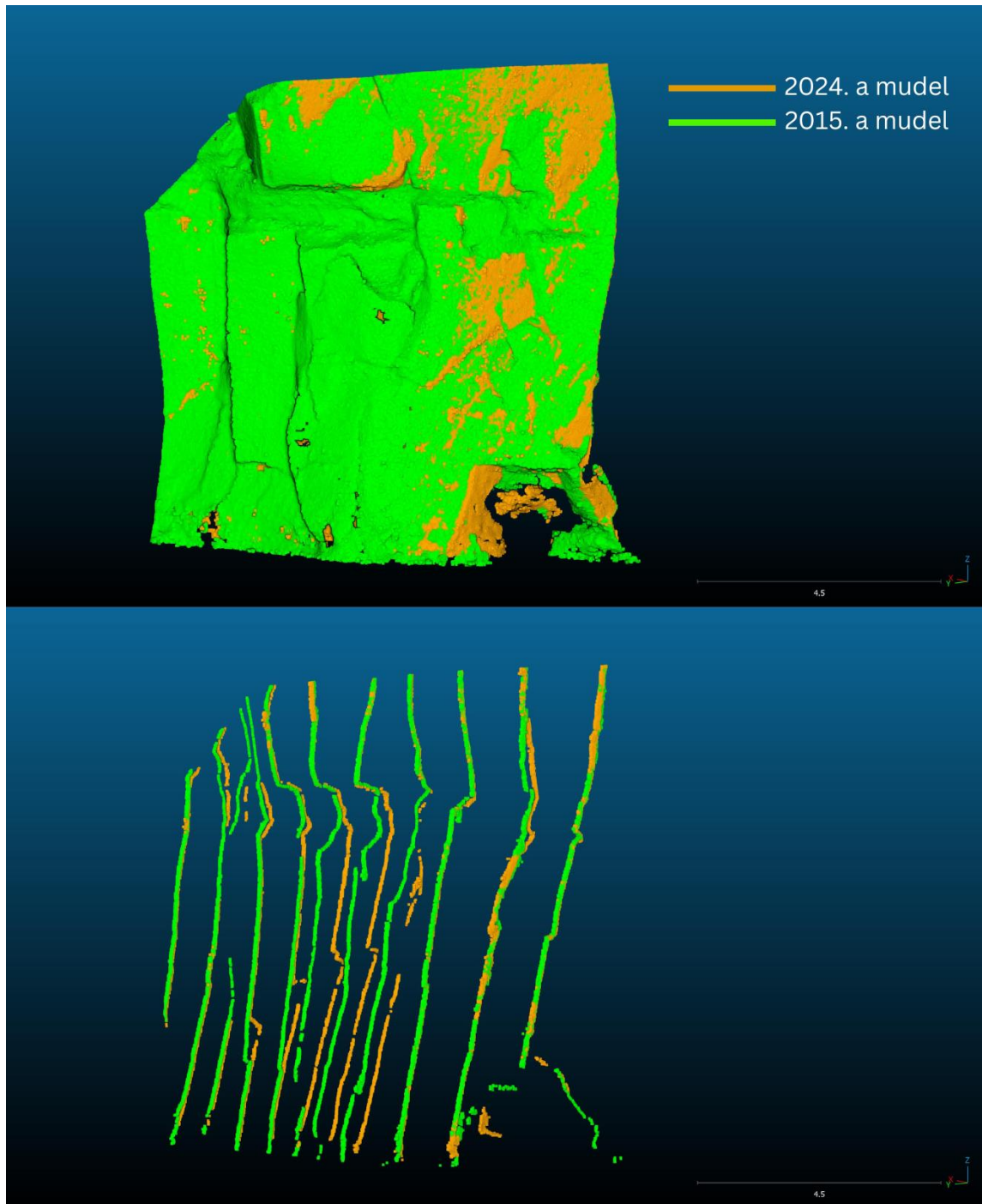
Joonisel 9 on näha, et alal 1 toimus kõige suurem negatiivne muutus. Sellel alal toimus varing. Varingu põhjus on veepiiril toimuv erosioon. Voolav vesi kannas paljandi alumisest osast materjali ära, külmadel perioodidel jää liikumine aitas erosiooni protsessidele ka. Mudelite vahekaugus

varieerus sõltuvalt sellest, kui lähedal oli jõgi. Ala ülaosas vahekaugus jäi vahemikku 0,6-0,8 m, alumises osas varieerus 0,9-1,8 m. Kõige suurem vahekaugus oli 2,02 m.



Joonis 9. Ala 1 muutuste mudel ja ristlõiked.

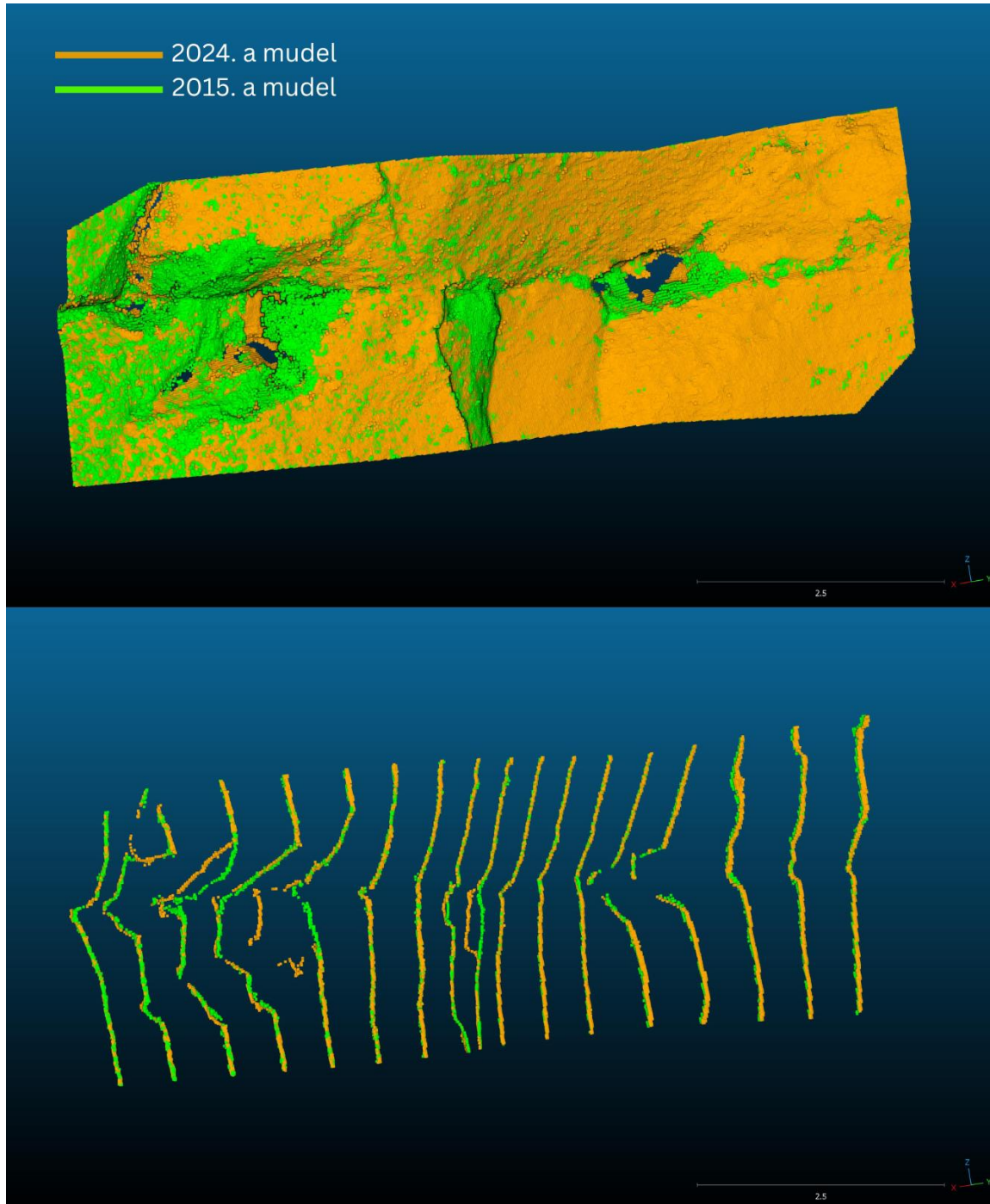
Joonisel 10 võib näha, et toimus materjali ärakanne, kuid vähem kui alal 1. Mudelite vahekaugus varieerus 0,2-0,6 m, kõige laiem koht oli 0,58 m vahekaugusega. Selle ala erosiooni põhjus on deluviaalsed protsessid. Kohtadel, kus ristlõike jooned kattuvad, erosiooni ei toimunud ja paljand ei muutunud. Samal ajal toimusid mõned varingud ala keskel. Paljandi nõlvast roomas liivakivi plokk taimeestikuga mööda ala 2 plokki, mille tulemusena plokk purunes ja langes vette. Parem alumine nurk jääb täitmata, kuna seal puuduvad punktipilved, mida kustutati mudeli puhastuse käigus.



Joonis 10. Ala 2 muutuste mudel ja ristlõiked.

Joonisel 11 on näha, et alal 3 toimus ka materjali ärakanne. Mudelite vahekaugus sellel alal jäi vahemikku 0,2-0,7 m, kõige suurem vahekaugus oli 0,73 m. Selle ploki alla varisemise põhjus on mööda lõhesid toimuv erosioon. Plokk asub paljandi keskel ning voolav vesi ei saanud seda

mõjutada. Erosioonile võiks vihmavesi siiski kaasa aidata, eriti külmal ajal. Kui vesi muutub jääks, selle maht suureneb ning see omakorda muudab lõhed liivakivis laiemaks. Sellest tuleneb ploki stabiilsuse vähenemine ja ta variseb alla.



Joonis 11. Ala 3 muutuste mudel ja ristlõiked.

Käesoleva töö käigus valminud mudel ei võimalda aga toimunud muutuste ja geoloogiliste protsesside täpset ajalist dateerimist. Selle eesmärgi täitmiseks oleks vajalik Suure Taevaskoja paljandi tihedam vaatlemine, mõõtmine, ja vastavate ajaliselt täpsete mudelite loomine.

Käesoleva töö raames loodud mudelid *Pix4Dmapper* tarkvaras saab internetti üles laadida, et huvilised saaksid uurida Suurt Taevaskoda ja seal toimuvaid erosiooniprotsesse. Samuti on tööl potentsiaali edasisteks uuringuteks - sarnase töö läbiviimine kindlate ajavahemike tagant annaks hea ülevaate Suures Taevaskojas toimuvatest muutustest, mille alusel saab luua ka prognoose tulevaste muutuste ennustamiseks nii Suures Taevaskojas kui ka teistes sarnastes paljandites Lõuna-Eestis või muudes sarnase geoloogilise ehitusega asukohtades.

5. Kokkuvõte

Käesoleval bakalaureusetööl oli kaks eesmärki. Esimene eesmärk oli fotogramm-meetria abil koostada ning analüüsida Suures Taevaskoja liivakivipaljandi 3D mudelit. Teine eesmärk oli teada saada, kuidas toimub liivakivipaljandite muutumine. Uuringu käigus koostati 4 3D mudelit *Pix4Dmapper* tarkvaras: 2024. aasta drooni piltidest, 24 mm objektiiviga piltidest, nendest ühendatud mudeli ning 2015. aasta piltidest. Hiljem 24 mm objektiiviga piltidest ja 2015. aasta piltidest mudelite punktipilvedest koostati mudeli *CloudCompare* tarkvaras. See mudel arvutas kahe mudelite vahekaugust ning näitas paljandis toimunud muutusi.

Vahekauguste mudel näitas, et 7 aasta jooksul erinevad erosiooni protsessid mõjutasid liivakivipaljandit. Kõige rohkem mõju avaldas voolav vesi ja selle taseme ja agregaatoleku muutus. Mudelist on näha, et vee ääres olevatel aladel (ala 1 ja ala 2) on erosiooni ulatus suurem kui aladel, mis asuvad paljandi kesk- või ülaosas (ala 3).

Samuti vihmavesi on ka oluline erosiooni põhjus. Vesi liigub liivakivi pooriruumidesse. Selle tõttu laienevad lõhed liivakivides, mis omakorda vähendab ploki stabiilsust ja suureneb varingu ilmumise tõenäosus.

Suures plaanis laiulatuslike muutusi ei esinenud 7 aasta jooksul, mis annab lootust, et Eesti üks tähtsamaid paljandeid jääb meile veel kauaks ajaks.

Mapping of Suur Taevaskoda sandstone outcrops using photogrammetry

Polina Shlykova

Summary

Taevaskoda is a Devonian sandstone outcrop located on the right bank of the Ahja river in Põlva County. This bachelor thesis aims to create and analyze a 3D model of the said sandstone outcrop using photogrammetry. Another aim is to find out how sandstone outcrops change and what affects it.

During this research were created 4 3Dmodels of the Suur Taevaskoda outcrop in Pix4dMapper programme. The first model was based on pictures made with a drone. The second model was based on the Pictures made with a camera and 24 mm lens. The third model was combined of 2 previously mentioned models. The fourth model was made with Pictures, which were made by the supervisor of this thesis Marko Kohv in 2015. For comparison were used models made with 24 mm lens pictures and with 2015 pictures. The point clouds of both models were uploaded to CloudCompare software. Later, the models were prepared for cleaning: the trees, the old hill with fallen material and the parts that did not fit together were cut off with the Segment tool. After completing the models, the point clouds were cleaned with the SOR filter. Once the point clouds were cleaned, the ICP Fine registration plugin was used, which superimposes one cloud on top of the other to make the models overlap at least 75%. Next, the M3C2 Distance tool was used to calculate the distance between the models.

The model with calculated distances showed that over 7 years different erosion processes affected the sandstone outcrop. The water in the river and the change in its level and aggregate state had the greatest impact. It can be seen from the model that the areas near the water have a greater erosion extent than the areas located in the middle or upper part of the outcrop. Rainwater is also an important cause of erosion. Water moves into the pore spaces of the sandstone. Due to this, the cracks in the sandstones widen, which in turn reduces the stability of the block and increases the probability of collapse.

Overall, there were no large-scale changes during 7 years, which gives hope that one of the most important outcrops in Estonia will remain with us for a long time.

Kasutatud kirjandus

Artiklid

- Chaussot, L., Lajeunesse, P., Bernier, J. 2020. Riverbank erosion in cold environments: Review and Outlook. *Earth-Science Reviews*, **207**, 103231. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103231>
- Harwin, S., Lucieer, A. 2012. The Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sens.*, **4**, 1573-1599. <https://doi.org/10.3390/rs4061573>
- Jaimes, C., Delgado, J, and Reyes, C. 2020. 3D Digital Outcrop Modelling of the Lower Cretaceous Los Santos Formation Sandstones, Mesa de Los Santos Region (Colombia): Implications for Structural Analysis. *Journal of Structural Geology*, **141**, 104214. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104214>
- Mets, M. 2015. Saesaare veehoidlas veetaseme langusele kaasnevate geotehniliste nähtuste ja protsesside hinnang. *Geoengineering*
- Pepe, M., Alfio, V.S., Costantino, D. 2022. UAV Platforms and the SfM-MVS Approach in the 3D Surveys and Modelling: A Review in the Cultural Heritage Field. *Appl. Sciences*. **12**, 12886. <https://doi.org/10.3390/app122412886>
- Pirrus, E., Kleesment, A., and Sööt, M. 2002. Joint Systems in Devonian Sandstones in the Kiidjärve-Taevaskoda Area, Southeastern Estonia. *Estonian Academy Publishers*, **51**, 121–132.
- Rose, R., Basher, L. 2011. Measurement of river bank and cliff erosion from sequential LIDAR and historical aerial photography. *Geomorphology*, **126**, 132-147. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.037>
- Sedman, P., Talviste, P. 2015. Tehniline ekspertiis tööle „Saesaare veehoidlas veetaseme langusele kaasnevate geotehniliste nähtuste ja protsesside hinnang“. *IPT Projektijuhtimine*
- Tuckey, Z. 2022. Integrated UAV Photogrammetry-Discrete Element Investigation of Jointed Triassic Sandstone near Sydney, Australia. *Engineering Geology*, **297**, 106517. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106517>

Internetiallikad

GISGeography, 2024. What is Photogrammetry? <https://gisgeography.com/what-is-photogrammetry/>

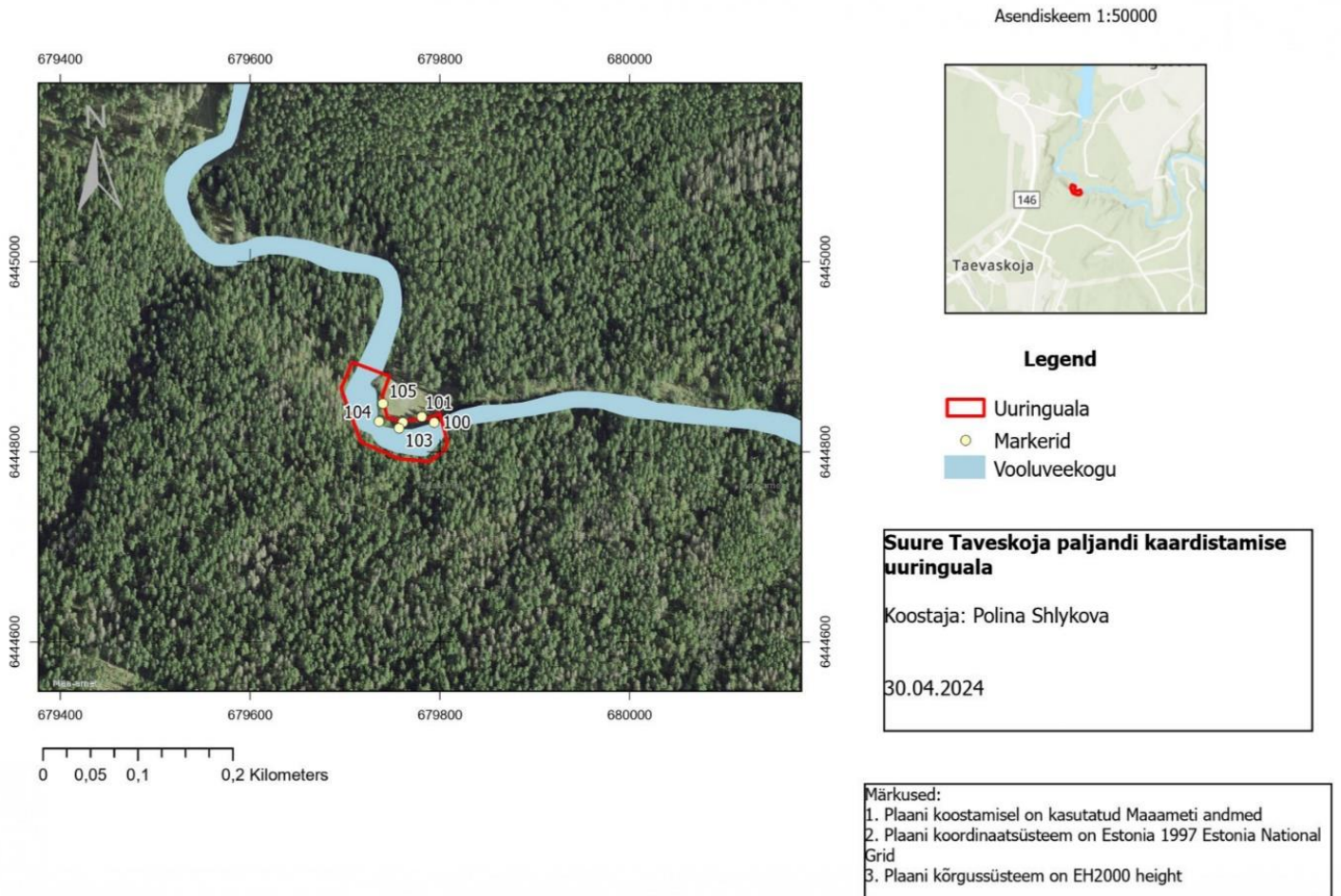
Kohv, M. 2015. Suur taevaskoda – Devonian Outcrop. <https://skfb.ly/CX6U>

Raamatud

Soesoo, A. 2010. Main Features of Geology of Estonia and Tallinn. 10–39.

Lisad

Lisa 1. Plaan uuringualast koostatud ArcGisi tarkvaras.



Lisa 2. Tabel markerite koordinaatidega.

Markeri number	X	Y	Z
100	679794.297	6444831.462	37.774
101	679781.841	6444837.502	39.650
102	679761.226	6444831.245	39.555
103	679757.102	6444825.785	37.904
104	679736.636	6444832.475	37.807

105	679740.047	6444851.769	40.260
-----	------------	-------------	--------

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Polina Shlykova,

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

Suur Taevaskoja liivakivipaljandi kaardistamine fotogramm-meetria meetodi abil

mille juhendaja on Marko Kohv,

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

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.

Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Polina Shlykova

24.05.2024