

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

Bakalaureusetöö geoinformaatikas

Eesti suurimate rändrahnude 3D modelleerimine

Sten Varatu

Juhendaja: PhD Marko Kohv

Kaitsmisele lubatud:
Juhendaja:
Osakonna juhataja:

Tartu 2017

Infoleht

Eesti suurimate rändrahnude 3D modelleerimine

Sten Varatu

Töö annab ülevaate rändrahnude päritolust, suurusest, koostisest, levikust ja liigitamisest. Käsitletakse rahnude uurimise ajalugu nii Eestis kui mujal maailmas, tuues välja tähtsamaid isikuid. Käesoleva töö käigus loodi seitsme rändrahnude 3D mudelid. Rändrahnude modelleerimiseks kasutati *Structure from Motion* (SfM) meetodit. Valminud 3D mudelite põhjal anti hinnang SfM meetodi sobilikkusele rändrahnude mõõdistamisel. Mudelitelt arvutatud tulemusi võrreldi varasemate mõõtmistulemustega ning hinnati nende kattuvust.

CERCS:

P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

T111 Pilditehnika

Märksõnad: fotogramm-meetria, 3D modelleerimine, *Structure from Motion* (SfM), rändrahn

3D modelling of biggest erratic boulders in Estonia

Sten Varatu

This Bachelor's thesis gives an overview of the origin, size, structure, spread and classification of erratic boulders. It also brings out erratic boulders research history in the world and specifically in Estonia. 3D models of seven erratic boulders were created for this paper. Structure from Motion method was used for modelling erratic boulders. 3D models were used to evaluate SfM method eligibility for geotechnical engineering. Gathered results were analyzed and compared with previously collected data.

CERCS:

P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

T111 Image, image processing

Keywords: photogrammetry, 3D modelling, Structure from Motion, erratic boulder

Sisukord

Sissejuhatus	4
1. Ülevaade rändrahnudest	6
1.1 Rändrahnude üldiseloostus	6
1.3 Rändrahnude uurimise ajalugu maailmas	10
1.4 Rändrahnude uurimise ajalugu Eestis.....	12
2. Metoodika.....	14
2.1 Kasutatud andmed	14
2.2 Välitöö metoodika	16
2.3 Andmetöötuse metoodika.....	17
3. Tulemused ja arutelu	22
Kokkuvõte	27
Summary	28
Tänuavaldus	29
Kasutatud kirjandus.....	30
Lisad.....	32

Sissejuhatus

Rändrahnud on olnud juba aastatuhandeid silmapaistvateks maamärkideks. Eesti on üks rändrahnude rikkamaid paiku maailmas. Siin on hinnanguliselt 2500-3000 rändrahnud (Pirrus, 2009). Maailmas hakati suurte rahnude vastu suuremat huvi tundma 18. sajandil. Eestis alustas rändrahnude uurimist 19. sajandi lõpus G. Helmersen. Tema üleskutsel hakati koguma teavet suurte rahnude kohta, mida peetakse ka looduskaitse tegevuse alguseks Eestis (Suuroja ja Suuroja, 2008). Rändrahnude kohta on nende suuruse tõttu aegade jooksul rahvasuus levinud palju legende ning tänaselgi päeval on Eesti brändi üheks läbivaks teemaks just rändrahn.

Eesti hiidrahnude übermõõt ületab 25 meetrit, mistõttu on nende kivimürakate suurust olnud väga raske määrata. Rahnude mõõdistustöödega alustati 20. sajandi teisel poolel. 1986. aastal ilmunud H. Viidingu teos „Suurte rändrahnude kirjeldamise juhend“ oli esimene sellelaadne, kus kirjeldati mõõtmistööde metoodikat. Mõõtmisi tehti käsitsi, kasutades teodoliiti ja teisi mõõtmisvahendeid. Kõik teadaolevad mõõtmistulemused on vähemalt paarikümne aasta vanused. Kuigi neid on hilisemalt kontrollitud, on meetod jäänud samaks (Pirrus, 2009).

Tehnoloogia kiire areng on kaasa toonud palju muutusi mõõdistustöodes. Samuti on arvutitehnika inimestele laialdaselt kättesaadav olnud juba mitukümmend aastat, kuid antud kontekstis pole olemasolevaid võimalusi piisavalt kasutatud. Käesolevas töös kasutati *Structure from Motion* (SfM) meetodit 3D modelleerimisel, mis kogub aina enam populaarsust kõikides teadusvaldkondades, nii ka geograafias ja geoloogias. See võimaldab 2D fotodest luua kolme-dimensionaalse kujutise.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on SfM meetodi sobilikkuse analüüs rändrahnude 3D modelleerimiseks ning rahnude mudelite põhjal nende mahtude ja mõõtmete määramine.

Püstitatud on järgnevad uurimisküsimused:

1. Millised on SfM meetodi positiivsed ja negatiivsed küljed rahnude 3D mudeli loomisel?
2. Milline on SfM meetodi täpsus rahnude 3D mudeli loomisel?
3. Kui palju erinevad rahnude mõõtmed ja mahud varasematest andmetest?

Käesolev töö annab ülevaate rändrahnude olemusest, levikust, nende uurimise ajaloost ja SfM metoodika kasutamisest 3D mudelite loomisel rändrahnude näitel. Võrreldakse varasemate mõõdistustööde tulemusi praegustega ning arutletakse nende erinevuste üle.

Esimeses peatükis antakse ülevaade rahnude liigitamisest, levikust ja olemusest - suurusest, massist, koostisest. Kirjeldatakse nende liikumistrajektoori ning teel olnud takistusi. Käsitletakse rahnude uurimise ajalugu nii maailmas kui Eestis, tuues välja olulised isikud, kes on rändrahnude uurimisele kaasa aidanud.

Teises peatükis kirjeldatakse andmete kogumise ehk välitöö protsessi ning andmetöötluse meetodikat. Tuuakse välja käesolevad töös uuritavad rändrahnud ning selgitatakse detailselt SfM meetodil 3D mudelite loomist ja rahnude mõõtmete välja selgitamist. Töös kasutatakse võrdlusandmetena Suuroja (2008) Hiidrahnude raamatus olevaid andmeid.

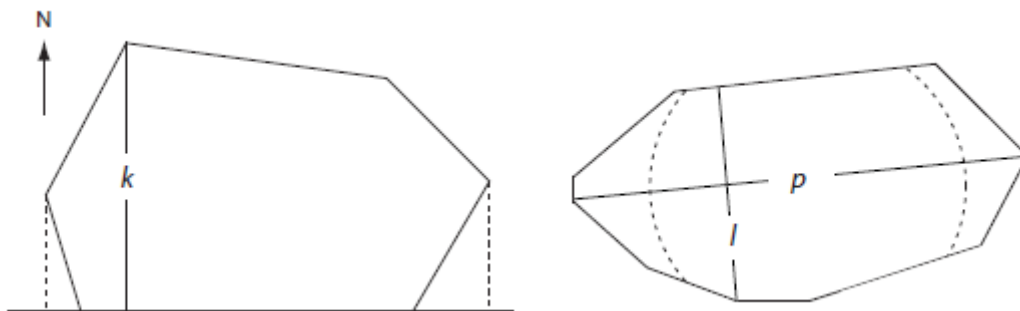
Töö kolmas peatükk sisaldab analüüsi ning arutelu SfM meetodi sobilikkusest Eesti rändrahnude modelleerimisel ning mudelipõhiste mõõtmete võrdlust varasemate andmetega.

1. Ülevaade rändrahnudest

1.1 Rändrahnude üldiseloostus

Rändrahnudest rääkides mõeldakse esmalt suurte kivide peale, millele viitab sõna rahn, ning rändamisele pööratakse tunduvalt vähem tähelepanu. Kuid just rändamine teeb need kivid silmapaistvaks. Ei ole oluline, kui kaugelt nad on oma praegusesse asukohta jõudnud. Oluline on see, kust kohast nad pärit on ja kust viimane jääaeg nad siia tõi. Rändrahnuks nimetatakse esinemiskohast erineva kivimilise koostisega alalt pärinevat kristalset kivimist kivi, mille läbimõõt on üle ühe meetri (Suuroja ja Suuroja, 2008).

Algselt liigitati rahne ümbermõõdu järgi – hiidrahnud (>25 m), hiidrahnudele lähedased rahnud (20-25 m), maakondlikult tähelepanuväärsed rahnud (16-20 m), kohaliku tähtsusega rändrahnud (10-16 m) ja väikesed rändrahnud (3-10 m). A. Kumari järgi oleks õigem rahnude suurust hinnata mahu järgi. Tolleaegsete vahenditega oli rahnu ruumala aga raske määrata. Kivi kontuurid joonestati käsitsi küljelt ja pealtvaatest. Mõõtmistõid tehti mõõdulindiga ja mahud arvutati. Mõõdeti kivi maksimaalne kõrgus kivi jalamilt tipuni, ümbermõõt, laius ja pikkus, mis projitseeriti põhiplaanile (Joonis 1). Ühtlustatud põhiplaani meetodika võttis kasutusele Karl Müttersepp (1907-1996) ning seda kasutati ka kogu ürglooduse raamatu andmebaasi loomiseks (Pirrus, 2009).



Joonis 1. Rahnu maksimaalsete mõõtmete määramine külj- ja pealtvaates (Allikas: Pirrus, 2009).

Raskustest olenemata arvutati hinnanguliselt 120 rahnu ruumala ning neid ei ole senini üle mõõdetud. Vajalike andmete kogumine võttis väga kaua aega ning tulemused polnud täpsed. Suurte rahnude ruumala arvutamise lihtsustamiseks võrreldi tahhümeetrilistest andmetest arvutatud ruumala joonmõõtmete põhjal arvutatud kumerkoonuse ruumalaga. Nende vahel esines tihe korrelatsioon. Seega on antud meetod tunduvalt kiirem ja tõhusam rahnude ruumala ja massi määramisel. Kirjeldatud meetodid võtavad arvesse ainult rahnu maapealset osa.

Üldmahu arvutamisel tuleb arvestada ka rahnu maa-aluse osaga, mis moodustab 20-30% kogu rahnu mahust (Pirrus, 2009).

Rahnu mass sõltub olulisel määral kivimi tihedusest. Eestis asuvate rahnude kivimiline koostis on väga vähe varieeruv. Põhiliseks kivimiks on graniit tihedusega $2,7 \text{ t/m}^3$. Vastavate andmete põhjal oli võimalik lihtsasti arvutada kivide massi. Summeerides Eesti rändrahnude kogumassi selgub, et suurte hiidrahnude kogukaal kompenseerib väikeste rahnude paljususe. Suurte rahnude kogukaal on hinnanguliselt 240 000 tonni, millele lisandub maa-aluse osa mass 60 000 tonni. Kui lisada veel väikeste rahnude mass, saame kogumassiks 0,6 miljonit tonni rändkivimeid, mis on mandrijääga siia kandunud Soome aladelt (Pirrus, 2009).

Rahnud koosnevad enamasti kristalsetest moondekivimitest. Eestis asuvate rändrahnude kivimiteks on amfiboliit, diabaas, dioriit, gabro, gneiss, graniit, migmatiit, migmatiitgraniit, neugrundbretša, Osmussaare-bretša, rabakivigraniit ja Suursaare kvartsporfüür. Neist levinuimaks on graniit, millest koosneb 80% kõikidest rahnudest. Suurtest rändrahnudest 80% koosnevad rabakivigraniidist (Suuroja ja Suuroja, 2008).

Eestis on enim levinud poolümardunud lapikud ja ovaalsed moondekivimist rahnud, mille pikitelg ei ületa üle kahe korra rahnu laiust. Üldiselt esineb rahnudel teravaid nurkasid ja nõgusaid külgesid harva. Hiidrahnude seas domineerivad rabakivirahnud on erandlikud enda kuju poolest, sest neile on omane tahulisus. Rabakivirahnudele on iseloomulik risti asetsevate lõhede süsteemide kujunemine algse magmamassi tardumisel, mis muutsid suurte kivimiplokkide lahti murdmise hõlpsamaks ja nende algne kuju on säilinud. Rahnude üldkuju maastikul sõltub tugevasti asukohast ja sealsest pinnasest. Põhja- Eesti rannikul olevad rahnud on suuremas osas maa pinnal, sest aluspõhja peal olev pehme pinnakate on väga õhuke. Kivid asetsevad 95% juhtudest maas lapiti. Eestist on leitud mõned üksikud rahnud, mille kõrgus on suurem kui laius, näiteks Tammispea rahn Harjumaal (Pirrus, 2009).

Looduslikud murenemis- ja lagunemisilmingud on rahnudel paratamatud nähtused. Murenemisel eristatakse kahte lagunemisviisi – keemilist (porsumine) ja mehaanilist (rabenemine). Keemilise lagunemise ilmingud on rahnudelt keeruline leida, sest need protsessid toimuvad väga aeglaselt. Selle eest on rabenemise märke küllaldaselt. Kõige lihtsamini mõistetavad kivi lõhkuvad protsessid on taimede kasv rahnul ning temperatuuri suured ja järsud muutused, mis põhjustavad vee jäätumise lõhedesse. Rahvasuus levivad jutud, et paljud lõhed on põhjustatud pikselöökidest, kuid rahnud on väga madala elektrijuhtivusega, seega

piksenoole tabamise tõenäosus on väga väike. Tänaeni pole ühtki tõestust, et välk oleks lõhestanud või purustanud suurt rahnu (Pirrus, 2009).

Rändrahnude vanuse määramiseks kasutatakse kosmogeensete nukleiidide dateerimise meetodit. Kosmiline kiirgus jõuab Maa atmosfääri prootonite ja α -osakestena. Maapinnale jõudes on need osakesed läbinud hulga reaktsioone ning enamik osakestest on muutunud neutroniteks. Osakesed, mis langevad kivimile, reageerivad sellega ning tekivad uued isotoobid, mida nimetatakse kosmogeenseteks isotoopideks. Isotoopide vanuse määramiseks kasutatakse kiirendus-massispektromeetrit. Rahnudes olev kvarts (SiO_2) reageerib pommitamisel kosmilise kiirgusega ning nii saab kosmogeensete nukleiidide ja nende laguproduktide hulga põhjal määrata kivi vanuse. Eelduseks on, et rändkivide puhul satub peale lahti murdmist ja transporti kosmilise kiirguse kätte kosmogeensetest nukleiididest „tühi“ kvarts (Dunai, 2010). Eestis tegeles berüllium-10 meetodil rahnude dateerimisega A. Raukas koos oma töörühmaga selgitamaks välja mandrijää taandumise aeg ja suund Eestis. Dateeriti üle terve Eesti korjatud kivimite proove. Tulemuste põhjal väideti, et Loode-Eesti alad vabanesid jääst u 10 000 (± 1300) aastat tagasi. Kagu-Eesti alad avanesid jääkatte alt u 13 000 (± 1100) aasta eest (Raukas, 2004).

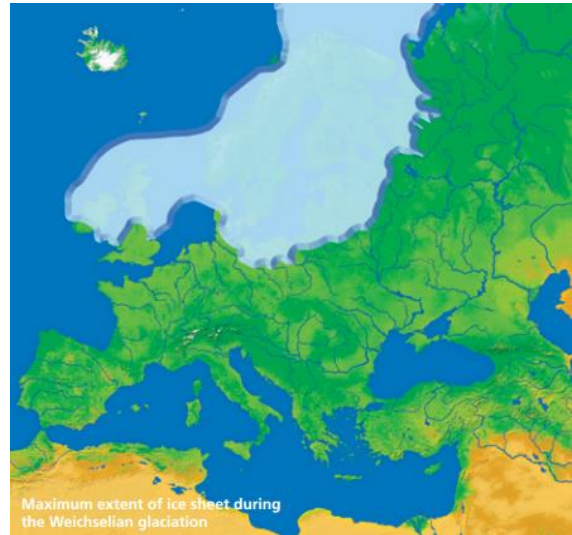
Suurt hulka väikesel alal paiknevaid rahnusid nimetatakse kivikülvideks. Sageli võib olla tegemist suure rahnu lagunemise tagajärjel tekkinud külviga, kuid mõned on siia toodud mandriliustikuga viimasel jääajal. Mandriliustiku liikumise tagajärjel tekkinud külvid koosnevad peamiselt väikestest rahnudest, mille ümbermõõt on alla 10 meetri. Eestimaises kliimas moodustuvad kivikülvid rannikul siiani. Jäämineku ajal tekkivad ajujää mäed lükkavad kive aina rohkem kokku. Eestis leidub rohkesti tehiskive kuhjasid, mis paiknevad põllumaade vahel. Eriti hoogustus kivikoristus peale Teist maailmasõda, kui hakati looma spetsiaalseid masinaid suurte rahnude liigutamiseks. Samuti võeti kasutusele lõhkeained, kuid piiratud kogustes. Õnneks on hiidrahnud suuremast inimtegevusest puutumata jäänud. Algselt ei hakanud inimeste ega tehnika jõud neile peale ja hiljem võeti need aktiivse kaitse alla (Pirrus, 2009).

Eesti looduskaitse alguseks loetakse Gregor Helmerseni üleskutset rahvale kaitsmaks ja teavitamiseks suurtest rahnudest. Rändrahnude kaitse hoogustus pärast Eesti iseseisvumist. Esimese Eesti Vabariigi ajal tegeles rahnude kaitsega Eesti Loodusuurijate Selts. Teise maailmasõja ajal ei hoolitud rahnude säilitamisest. Neid kasutati kaitseehitiste tegemiseks, kuid sõjategevusest tulenevad kahjustused olid väikesed. Alates 1952. aastast hakati taas rahnude kaitsele tähelepanu pöörama (Suuroja, 2008). Aastaks 1995 oli kaitse alla võetud 192 suurt

rahnu, 18 kivi­külvi ja 10 kivi­põl­du (Raukas ja Teedumäe, 1997). Praeguseks on kaitse alla võetud 373 rahnu ja kivi­külvi. Neist ligi 130 on üle 20-meetrise ümber­mõõdu­ga (EELIS andme­baas).

1.2 Rahnude levik

Rahnude peamiseks levimisviisiks peetakse mandrijääga eemale­kandumist avamus­alalt. Viimase 1,5 miljoni aasta jooksul on Põhja-Euroopat ja Põhja-Ameerikat katnud kuni kuus jääaega. Viimane jääaeg, mil mandrijää kattis 33% maakera pindalast, ulatus Kesk-Euroopasse – Suurbritanniasse, Poola ja Põhja-Saksamaale (Joonis 2). Tänapäeval katab mandrijää 10% maakerast (Raukas ja Karhima, 2007). Skandinaavias tuntakse seda jääaega Weichseli või Visla nime järgi ja Venemaal Valdai jääajana. See leidis aset umbes 110 000-12 000



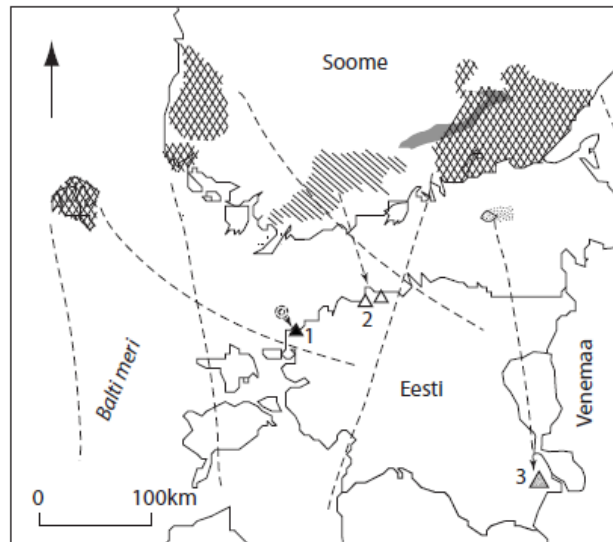
Joonis 2. Mandriliustiku levikuala viimasel jääajal. (Raukas ja Karhima, 2007)

aasta eest. Eesti alal hinnati mandrijää paksuseks 1,5-2 kilomeetrit. Ka rändrahnud jõudsid Eestisse viimasel jääajal (Suuroja ja Suuroja, 2008).

Viimaste teadaolevate andmete põhjal on Euroopas umbes 120 hiid­rändra­hnu, millest 111 on Eestis, üks Lätis, üks Leedus, üks Loode-Venemaal, kaks Poolas, kaks Saksamaal ja kaks Taanis (Suuroja ja Suuroja, 2008). Kesk-Euroopas asuvad rahnud on pärit Skandinaavia poolsaarelt. Eestis paiknevad hiidrahnud on pärit Lõuna-Soome kaljuselt pinnalt. Soome lahe telgjoon on piiriks Fennoskandia kilbile ja Ida-Euroopa lavamaale. Soome lahest lõuna poole liikudes rahnude suurus ja arvukus väheneb märkimisväärselt. Selline nähtus on igati loomulik, sest jäämass pidi ületama eelnevalt Soome lahe nõo ja Balti klindi, et maismaa pinnale tagasi jõuda. Sellest tulenevalt on Soome lahe põhi kõige rahnurikkam ning Põhja-Eesti rannik samuti silmapaistvalt kivine. Pankrannik oli mandrijää liikumisele suureks takistuseks, seetõttu jõudis Mandri-Eestisse märgatavalt vähem rahne. Samuti olid teised kõrgendikud takistavaks teguriks, kuid madalamad alad ja orud soodustasid jää liikumist lõunasse (Suuroja ja Suuroja, 2008).

Suurte rändrahnude kivimilise koostise põhjal saab kindlaks teha nende päritolu, mistõttu nimetatakse mõningaid kivimeid kohati ka juhtkivimiteks. Juhtkivim peab olema kergesti äratuntav, kordumatu ning selle rännutee primitiivne ja sirgjooneline. H. Viidingu järgi on Eestis 11 selgelt piiritletava lähtealaga kivimitüüpi. Neist tähtsaim ja suurim on rabakivi, mida võib leida kolmelt lähtealalt. Juhtkivimite liikumissuund oli loode-kagu suunaline (Joonis 3) (Pirrus, 2009).

Osa rahnudest on pärit 535 miljoni aasta vanusest Neugrundi meteoriidikraatrist. See asub Loode- Eestis Nõva läheduses, mõned kilomeetrit rannikust meres. Kivimi nimetuseks on neugrundibretša ning see on tekkinud meteoriidiplahvatuse tagajärjel (Joonis 4). Selle kivimi hajumislehvik on põhja-lõuna suunaline ning ulatub Ruhnu saareni. Kivim on omapärase väljanägemisega, koosnedes kristalsete kivimite nurgelistest, justkui ära sulanud tükkidest (Suuroja ja Suuroja, 2008).



Joonis 3. Eestisse jõudnud suurte rahnude avamusalad ja levikulehvikud. 1-Neugrundi struktuurilt pärinev bretša; 2-Soome edelapiirilt saabunuddiabaas; 3-Suursaari kvartsporfüür (Allikas: Pirrus, 2009).



Joonis 4. Neugrundibretša (Allikas: Wikimedia Commons).

1.3 Rändrahnude uurimise ajalugu maailmas

Suured rahnud on aegade jooksul köitnud paljude tähelepanu ning tekitanud huvi nende päritolu vastu. 18. sajandi alguses arvati, et rahnud pärinevad Kuul toimunud vulkaanipursetest või tundmatute planeetide plahvatustest (Tuuling ja Kirs, 2013). Rändrahnude vastu hakati suuremat teaduslikku huvi tundma alles 18. sajandi lõpus. Esimeseks tõsiseltvõetavaks rahnude

leviku teooriaks peeti driftihüpoteesi, mis kirjeldab rahnude laialikandumist ujuvatel jäämägedel. Eeskõnelejaks oli K. Werde, kelle innukateks toetajateks olid loodusteaduste suurkujud Ch. Darwin ja C. Lyell. Arvati, et rahnud olid jõudnud praegustesse asukohtadesse suurte üleujutustega, mis järgnesid jääaegadele (Suuroja ja Suuroja, 2008).

Mandrijäätumise hüpotees sõnastati esmakordselt 1815. aastal Peterburi akadeemiku Vassili Severgini poolt. Tema hüpotees põhines suuresti 1802. ja 1808. aastal Eestisse ja Liivimaale tehtud reisirid. Teda hämmastas võõra päritoluga kristalsete rahnude suurus ja rohkus. Sama ajajärgu geoloogiateaduste autoriteetide nagu Lyelli ja Darwini arvates oli Severgini hüpotees võimatu, sest Eesti ja Liivimaa alad ei olnud selleks sobilikud ning rahnud olid sinna kandunud jäämägedel ja veega. Severgin ütles 1840. aastal oma hüpoteesist lahti (Suuroja ja Suuroja, 2008). Charles Darwin kogus tuntuist 1830. aastatel oma merereisiga ümber maailma *HMS Beagle* pardal. Selle käigus kaardistas ta maa-alasid, kogus andmeid võõrliikide kohta, mida varem polnud nähtud ning uuris silmapaistvaid maamärke. Lõuna-Ameerika lõunapoolses tipus maabus *HMS Beagle* Tulemaa saarel (*Tierra del Fuego*), kus paelusid Darwinit suured rahnud. Ta nägi suurtel jääpankadel rahnusid, mis pärinesid Antarktikast. See kinnitas tema teooriat rahnude jõudmisest oma praegustesse asukohtadesse jääpankadel suurte üleujutuste ajal, mitte mandrijääga (Keynes, 2001). Hoolimata Darwini ja Lyelli uurimustest, oli 19. sajandi lõpuks väga palju mandrijää teooria toetajaid ning uutel uurimustöödel tugineti mandrijäätumise teooriale (Relve, 2006).

Tänapäeval ei tegeleta enam rahnude avastamisega, vaid nende mineviku uurimisega. Peamisteks uurimisteedeks on nende päritolu, vanus ja ränne. Kõige aktuaalsem neist on rahnude dateerimine, kasutades kaudseid meetodeid või uuemat, ülalkirjeldatud radionukleiidide meetodit.

Maailma suurimaks mandriliustikutekkeliseks rahnuks peetakse *Big Rock* i, Albertas, Kanadas (Joonis 5). Rahn paikneb Foothilli rändrahnude vööndis, mis on 930 km pikk. Kivimassiiv koosneb kahest osast ning kaalub 18 tonni. Rahn on 41 m pikk, 18 m lai ja 9 m kõrge (Jackson *et al.* 1999). Geoloogid on leidnud suuremaidki kivimassiive, kuid need asuvad maa sees või maa pinnal nii,



Joonis 5. Big Rock (Allikas: Wikimedia Commons).

et neid on raske eristada pinnasest. Samuti on need kilomeetreid suured. Üks suurimaid nendest on Elblagi hiidpangas Poola põhjarannikul Gdanski lähedal, mille pindala on 390 km² ja paksus üle 150 meetri (Ruszczynska-Szenajch ja Aber, 1997). Samuti leidub mitmel pool Põhja-Ameerikas hiiglaslikke kiviplateoosid, mis on oma algupärasest asukohast ligi 300 km eemale kantud. Üks neist on *Cooking lake* platoo, mis on 10 meetrit paks ja katab 10 km² ala (Aber *et al.* 1989).

1.4 Rändrahnude uurimise ajalugu Eestis

Esmakordselt mainiti kirjalikus väljaandes rändrahn (Võnnukivi) 1791. aastal J. Fisheri koduloolises ülevaates. Rändrahnusid hakati Eestis teadlikult uurima 19. sajandi teisel poolel. Esmauurijaks nimetatakse Peterburi TA akadeemikut Gregor Helmerseni (1803-1885). Oma geoloogilistes uurimustöodes tunnetas ta rändrahnude olulisust ja vajalikkust neid säilitada, seetõttu peetakse teda ka Eesti teadusliku looduskaitse alusepanijaks. Tema uurimustööde tulemusena huvituti rändrahnudest aina enam ning alustati suuremate rahnude registreerimisega. Eesti Vabariigi algaastatel hoogustus Eesti Loodusuurijate Seltsi tegevus. Seltsi liikmed pöördusid eesti keelse ajakirjanduse ja elanikkonna poole palvega teatamaks suurte rahnude kohta vastava andmebaasi loomiseks. Aastakümnete jooksul laekus väga palju teateid rahnudest. Andmete kogumise protsess kestis kuni Teise maailmasõja alguseni. Ühtne andmebaas jäi loomata, sest puudus kindel süsteem rahnude katalogiseerimiseks. Paljude rahnude andmed olid puudulikud, esines nimede kordumist (Suurkivi, Kalevipoja kivi jne.), mitmed kivid olid kultuuriloolise taustaga. Hoolimata sellest, olid kogutud andmed väga väärtuslikud (Suuroja ja Suuroja, 2008).

Looduskaitseline tegevus taashoogustus 1950. aastatel. Sellest innustatuna tekkis idee võtta süsteemselt arvele kõik geoloogiliselt tähtsad objektid, alustades tähtsamatest aluspõhjapaljanditest, silmapaistvatest pinnavormidest kuni eriobjektideni (meteoriidikraatrid, tektoonikailmingud). 1982. aasta 17. mail anti H. Viidingule luba luua Punasele raamatule analoogne ülevaade märkimisväärtetest elutalooduse objektidest, mida tänapäeval tunneme „Eesti Ürglooduse raamatu“ nime all. Tööd asus teostama tolleaegne Eesti Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituut H. Viidingu eestvedamisel. Alles 1986. aastal avaldatud H. Viidingu töö „Suurte rändrahnude kirjeldamise juhend“ oli esimene märkimisväärne väljaanne, olles alusepanijaks rändrahnude uurimise uuele ajastule. Töös kirjeldati täpseid meetodilisi uurimissoovitusi ning anti ülevaade sellel ajal teadaolevatest suurtest rändrahnudest. Samuti

toodi välja mõõdistamise ühtsustamise võtted, soovitades rahnude suuruse põhiliseks näitajaks maksimaalset ümbermõõtu. Kuid siiski polnud antud töö täielikult usaldusväärne, sest esines andmete ebatäpsusi, teadete lünklikkusi ja kivimite määramise ebausaldusväärsust (Pirrus, 2009). H. Viiding suri 1988. aastal ning tema tööd Ürglooduse raamatuga jätkas Ü. Heinsalu. 1990. aastal avaldati raamatu esimesed köited. Pärast Ü. Heinsalu surma 1994. aastal jätkas tööga Enn Pirrus, mille ta lõpetas aastal 2001. Kokku koosneb Ürglooduse raamat 17 köitest, milles registreeritud 2528 loodusobjektist on 1600 rändrahnud või kivikülvid (Eesti Entsüklopeedia). Silmapaistvateks geoloogia ja rändrahnude uurijateks peetakse ka Kalle ja Martin Suuroja, kelle kirjutatud raamat „Eesti Loodusmonumendid: Hiidrahnud“ on hetkel üks värskemaid raamatuid rändrahnudest Eestis.

2. Metoodika

2.1 Kasutatud andmed

Käesoleva töö valim koostati Kalle ja Martin Suuroja raamatus „Hiidrahnud“ esitatud 20 suurima rahnu ruumala järjestuse põhjal. Rahnusid selekteeriti ligipäätavuse alusel. Valimist jäid välja saartel ja sügavas vees asuvad rahnud ning tiheda taimkattega ümbritsetud rahnud. Valimisse jäi üheksa Põhja-Eestis asuvat hiidrahn (Joonis 6).



Joonis 6. Valimis olevate rändrahnude asukohad.

Valimis olevate rahnude andmed pärinevad K. ja M. Suuroja raamatust „Hiidrahnud“ (2008) (Tabel 1)(Lisa 1).

Aruküla hiidrahn ehk Hellamaa kivi asub Harjumaal Raasiku vallas Aruküla külas kohaliku puidutööstuse territooriumil. Mahult on see kuues hiidrahn Eestis. Rahn on 6,2 m kõrge, 14,2 m pikk, 8,4 m lai, ümbermõõduks on 34,4 ja maht 360 m³.

Augu Suurkivi asub Harjumaal Jõelähtme vallas Haapse külas, Kaberneeme-Valkla teest 50 m põhja pool luidetevahelises lohus männimetsas. Mahult on see 14. hiidrahn Eestis. Rahn on 6,9 m kõrge, 11 m pikk, 7 m lai, ümbermõõduks on 28,3 m ja maht 290 m³.

Ehalkivi asub Lääne-Virumaal Kunda lähisel Letipea neemest idas mererannas. Mahult on see suurim hiidrahn Eestis ja kogu Põhja-Euroopas. Rahn on 7,6 m kõrge, 16,6 m pikk, 14,3 m lai, ümbermõõduks on 49,6 m ja maht 930 m³.

Ellandvahe kivi asub Harjumaal Jõelähtme vallas, Tallinn-Narva maanteest 2 km põhja suunas, iidse Ristimäe asulakoha lähisel, golfiväljakute kõrval põllul. Mahult on see kaheksas hiidrahn Eestis. Rahn on 5,9 m kõrge, 12 m pikk, 8,9 m lai, ümbermõõduks on 31,3 m ja maht 332 m³.

Jaani-Tooma suurkivi asub Harjumaal Kuusalu vallas Kasispea külas. Üks tuntumaid ja enim külastatuid rahne Eestis. Mahult on see 19. hiidrahn Eestis. Rahn on 7,5 m kõrge, 11,8 m pikk, 8,6 m lai, ümbermõõduks on 27,6 m ja maht 274 m³.

Laulumäe kivi asub Harjumaal Jõelähtme vallas Jägala jõe vasakkalda lähedal metsas, Linnamäe hüdroelektrijaama ligidal. Mahult on see kümnes hiidrahn Eestis. Rahn on 4,5 m kõrge, 16,3 m pikk, 13,7 m lai, ümbermõõduks on 43,7 m ja maht 317 m³.

Muuga kabelikivi asub Harjumaal Viimsi vallas Muuga sadama külje all. Mahult on see teine hiidrahn Eestis. Rahn on 6,4 m kõrge, 19,3 m pikk, 14,9 m lai, ümbermõõduks on 58 m ja maht 728 m³.

Ojakivi asub Lääne-Virumaal Vihula vallas Koolimäe küla ürgmetsas. Mahult on see 13. hiidrahn Eestis. Rahn on 6 m kõrge, 11,6 m pikk, 10 m lai, ümbermõõduks on 29,6 m ja maht 294 m³.

Rohuneeme kivi asub üsna Tallinna külje all Viimsi vallas Püüsi küla lähedal riigimetsas. Mahult on see viies hiidrahn Eestis. Rahn on 7,4 m kõrge, 12,1 m pikk, 9,7 m lai, ümbermõõduks on 33,1 m ja maht 397 m³.

Tabel 1. Rändrahnude andmed.

Nimi	Maht (m ³)	Ümbermõõt (m)	Pikkus (m)	Laius (m)	Kõrgus (m)	Asukohta keskkond
Aruküla hiidrahn	360	34,4	14,2	8,4	6,2	Legendik, võsane
Augu Suurkivi	290	28,3	11	7	6,9	Männimets, nõlval
Ehalkivi	930	49,6	16,6	14,3	7,6	Rannas, vees
Ellandvahe kivi	332	31,3	12	8,9	5,9	Lage heinamaa
Jaani-Tooma suurkivi	274	27,6	11,8	8,6	7,5	Eramaal, metsa serval
Laulumäe kivi	317	43,7	16,3	13,7	4,5	Tihe mets
Muuga kabelikivi	728	58	19,3	14,9	6,4	Linnas
Ojakivi	294	33	11,6	10	6	Ürgmetsas
Rohuneeme kivi	397	33,1	12,1	9,7	7,4	Linna lähedal metsas

2.2 Välitöö metoodika

Aprilli alguses teostati pilootprojektina Ellandvahe kivi pildistamine, selgitamaks välja täpse välitöö metoodika. Tehtud piltidest sai edukalt koostada 3D mudeli, mis kinnitas metoodika sobilikkust. Välitöö viidi läbi aprilli keskpaigas. Antud ajaks oli lumikate sulanud ja taimede vegetatsiooni periood polnud veel alanud, mis soodustas välitööde tegemist. Töid aitas teostada geoloogia osakonna teadur Marko Kohv ja spetsialist Kristjan Rooni.

Mõõtmistöödel kasutati hübriidkaamerat Sony α 5100 16mm lainurkobjektiiviga ning objektide pealtvaadete pildistamiseks 9,5 meetri pikkust teleskoopstatiivi. Lainurkobjektiiv võimaldab pildistada suurt objekti lühikeselt distantsilt nii, et objekt jääb täielikult pildile. Samuti tuleb seada valgustundlikkus (ISO) võimalikult madalaks, mis tagab pildi maksimaalse kvaliteedi. Objekti märgistamiseks kasutati kolme tüüpi markereid: pikkuslatte, RTK markereid ja orientiirmarkereid. RTK (*Real Time Kinematic*) GPSi (*Topcon HiPer V*), abil saab määrata objekti täpse asukoha 2-5 cm veaga, orientatsiooni ruumis ja mõõtkava. Juhul kui looduslikud tingimused ei võimaldanud täpset asukohta positsioneerida, siis oli võimaik pikkuslattide abil 3D mudelid mõõtkavasse viia. Orientiirmarkereid kasutati kontrollpunktidenä, mis on vajalikud hilisemaks andmetöötluseks.

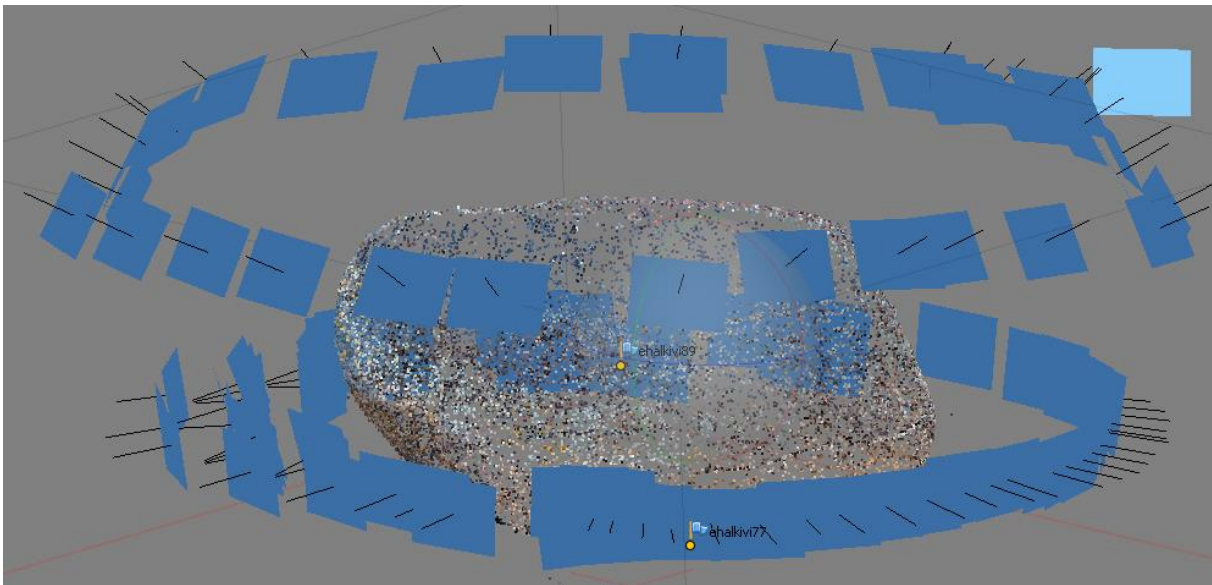
Objekti asukohas vaadati esmalt rahn üle ning puhastati rahnu ümbrus liigsest taimkattest ja prügist. Rahnu ääres olevate puude oksad eemaldati või seoti nõõriga tüve külge. Seejärel paigutati markerid strateegilistesse kohtadesse nagu rahn nurgad ja küljed. Pärast seda mõõdeti RTK GPS-iga tugipunktide koordinaadid.

Pildistamise protsessi käigus tehti foto iga meetri järel, niikaua kuni kivile oli ring ümber tehtud. Iga uus pilt pidi katma kaks kolmandikku eelnevast pildist (Joonis 7). Keerukamate kohtades, näiteks teravatest nurkadest või õõnsustest, tehti pilte tihedamalt.



Joonis 7. Piltide ülekate (Allikas: <http://culturalheritageimaging.org>), Autori poolt modifitseeritud

Teiseks ringiks pandi kaamera statiivi külge ning statiivi pikkust reguleeriti vastavalt kivi kõrgusele (Joonis 8). Pildile peab jääma terve kivi, alumisest äärest tagumise pealmise servani. Kaamera ühendati tahvelarvutiga spetsiaalse äpi kaudu üle wifi võrgu, mis võimaldab kaamera pilti tahvelarvutis näha ja jäädvustada. Ekraanilt nähtava pildi põhjal sai juhendada kaamera operaatorit. Välitöö on kõige tähtsam osa kogu protsessist, sest sellest sõltuvad andmetöötuse tulemused. Piltidest mudeli loomist kiirendab objekti hoolas puhastamine kohapeal. Vastasel juhul ei pruugi mudel korrektselt välja tulla.



Joonis 8. Tehtud fotode asukohad kivi suhtes.

2.3 Andmetöötuse meetodika

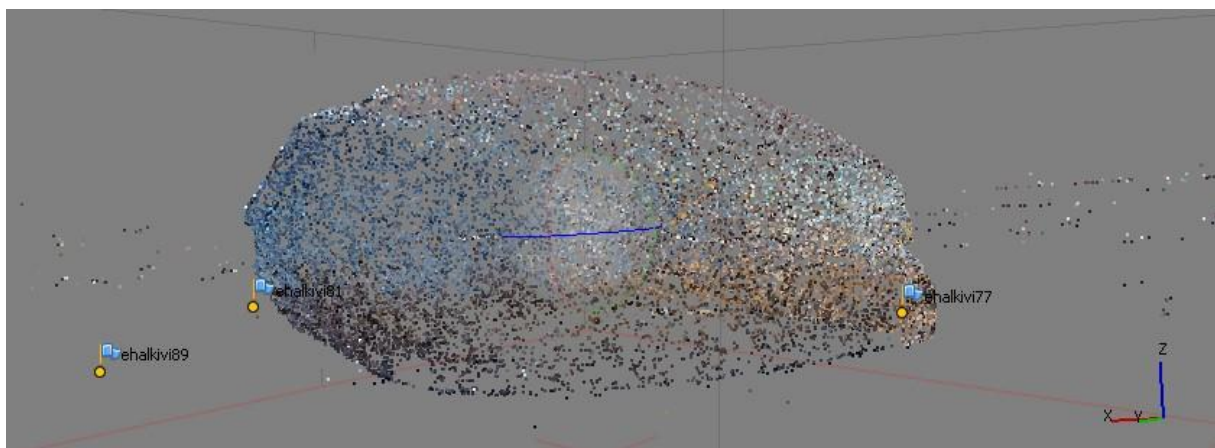
Fotograafia ja fotogramm-meetria pärinevad 19. sajandi keskpaigast, kui juba esimestelt piltidelt mõõdeti vahemaade pikkusi (Birdseye, 1940). Tänapäevaks on fotogramm-meetria väga palju edasi arenenud ning sellel on tekkinud mitmeid erinevaid rakendusmeetodeid ja -erialasid. Antud töös kasutati *Structure from Motion* (SfM) meetodit ehk tasapinnalistest piltidest kolme dimensioonilise kujutise loomist. Selle käigus reprodutseeritakse inimese ruumilist tunnetust. Kogu protsess on väga andmemahukas, kuid võimaldab täpselt kujutada keeruka kujuga ruumilisi objekte. Antud meetodi plussideks on võimalus teostada mõõtetöid kohtades, kuhu laserskannerid ei ulatu, kiirus ning odavus, kuna sisendandmeteks on fotod, mida saab tänapäeval teha isegi telefoniga. Mida kvaliteetsemad on pildid, seda rohkem punkte suudab arvuti sellel tuvastada ning mudelid on täpsemad (Liba, 2005). Võrreldes varasemate mõõdistustöödega on SfM meetod väga täpne ja usaldusväärne. Samuti erineb ta eelnevatest

sellega, et pildid on seotud kindla objektiga ja kaamera võib kalibreerimist vajamata ümber objekti ringi liikuda (Cultural Heritage Imaging koduleht).

Piltide ja andmete töötlemiseks on tarvis kasutada mitmeid spetsiaalseid programme. Esimese tööetapina tuleb pilte sorteerida ja töödelda. Eesmärgiks on halva kvaliteediga ja korduvate piltide kustutamine, piltide muutmine võimalikult ühtlaseks, selleks et modelleerimisprogramm suudaks piltidelt leida identseid punkte. Vastavalt vajadusele tuleb piltidel tõsta kontrastsust, reguleerida heledust, kaotada varjusid ja päikeselaike, eemaldada päikesest tingitud valgusdefekte jne. Selleks kasutatakse programmi Adobe Lightroom.

Mudelid luuakse programmiga Agisoft Photoscan. Programm suudab 2D fotodest moodustada keerukate algoritmide abil 3D mudeli. Täpse mudeli eeldusteks on piisav hulk pilte, mis katavad rahnu pinna erinevate nurkade alt. Liigne piltide katvus muudab mudeli väga andmemahukaks ning kogu pildimaterjali läbitöötamine võtab arvutil palju aega.

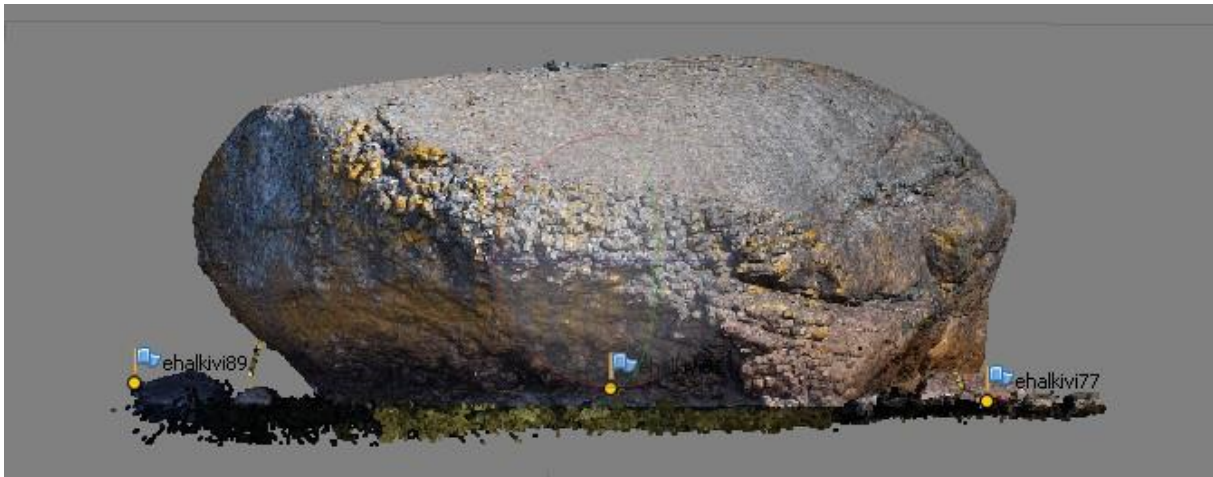
Piltidest tuleb luua hõre punktipilv (Joonis 9). Selle jaoks tuleb teha Agisoftis uus projekt ning lisada töödeldud pildid objektist. Selleks, et mudelil ei väljenduks segavad objektid, näiteks puud ja põõsad, tuleb need välja maskida. Hõreda punktipilve tegemiseks tuleb valida menüürest *workflow* tööriist *align photos*. Võtme- ja sidumispunktide arvuks tuleb määrata 5000. See on piisav, et tekiks detailne punktipilv. Pilve loomine võtab aega mõned tunnid, sõltudes piltide arvust ja arvuti võimsusest.



Joonis 9. Ehalkivi hõre punktipilv. Sinised lipud tähistavad RTK-markereid.

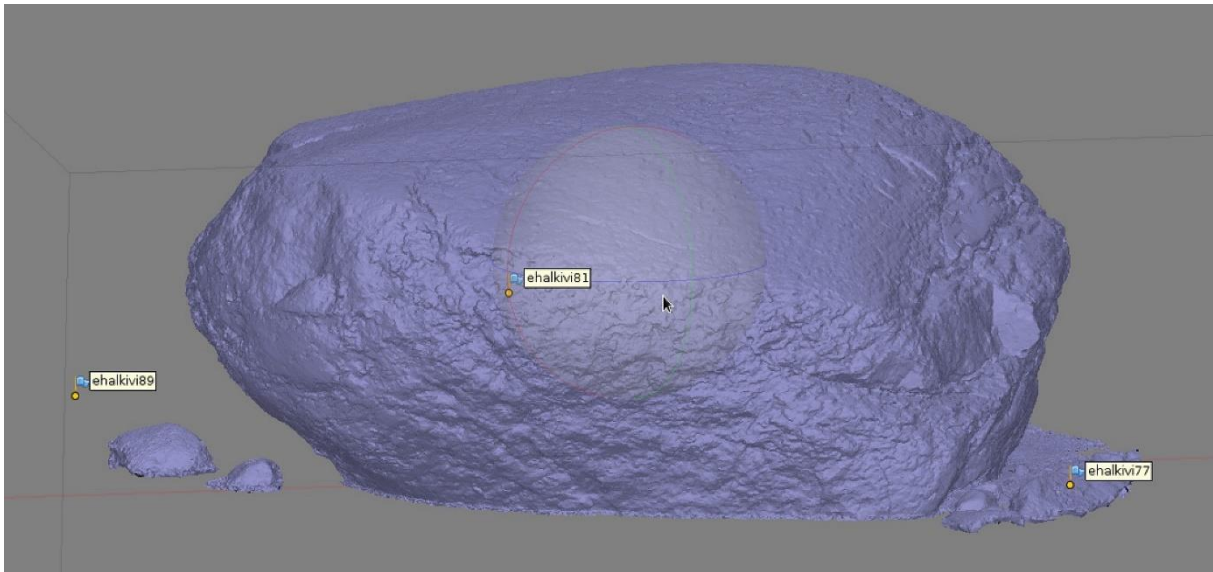
Hõreda punktipilve töötlemisel on esimeseks etapiks markerite määramine, mille abil saab objekt mõõtkava ja ruumilise asendi. Vähemalt kolme RTK-markeri olemasolul tuleb selleks määrata piltidel nende asukoht. RTK-markerite puudumisel tuleb objekti mõõtkavasse viimiseks kasutada pikkuslatte. Samuti peab objekti pöörama mudelivaates paralleelseks

aluspinnaga. Juhul, kui punktipilves esineb vigu, määratakse markerid ka objekti pindadel olevatele orientiirmarkeritele. Kõik markerid tuleb märkida vähemalt kümnel pildil, et tagada piisav täpsus. Täpsusviga võib olla kuni 5 cm, suurema vea korral ei ole mõõtmistööde tulemused usaldusväärsed. Piltide moonutustest tulenevate punktipilve vigade vähendamiseks optimeeritakse kaamerad *optimize cameras* tööriistaga. Seejärel puhastatakse punktipilve. Objekti taustal olevad punktid kustutatakse manuaalselt ja mürapunktide eemaldamiseks kasutatakse *gradual selection* tööriista. Kustutatakse 10% ebatäpsematest punktidest. Ebavajalike punktide eemaldamine muudab objekti täpsemaks ja protsessimise kiirus suureneb, kuna andmemahut väheneb. Kogu pilvetöötlus leiab aset selles etapis, sest hiljem suuri muutusi teha ei saa.



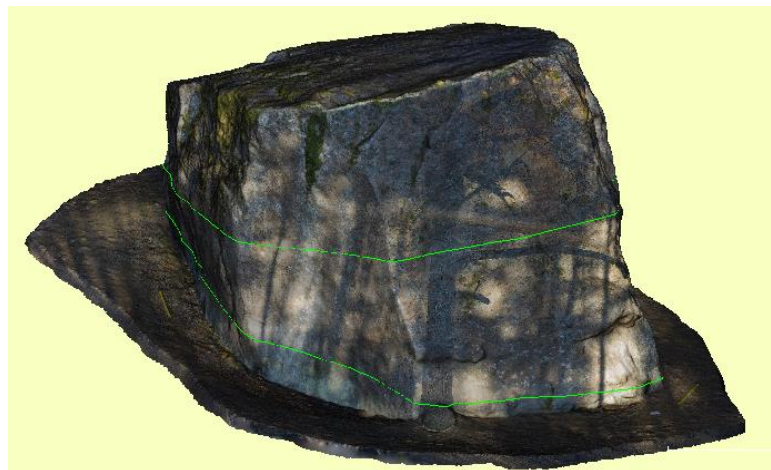
Joonis 10. Ehalkivi tihe punktipilv.

Pärast punktipilve puhastamist luuakse tihe punktipilv (Joonis 10). Kui hõre Ehalkivi punktipilv koosnes 30 000 punktist, siis tihedas pilves on 45 miljonit punkti. Selle loomiseks tuleb valida menüüreast *workflow* tööriist *build dense cloud*. Jooniselt on näha, et visuaalselt on tegemist väga detailse kujutisega, kuid suurendamisel ilmneb, et punktide vahel puuduvad pinnad. Enne pindade loomist kontrollitakse punktipilv ning eemaldatakse kõik mittevajalikud punktid. Punktide vahelistele aladele pindade loomiseks tuleb valida menüüribalt *workflow* tööriist *build mesh* (Joonis 11). Pindade hulka tuleks vähendada umbes 500 000-ni, kasutades tööriista *decimate mesh*. See on vajalik mudeli sujuvamaks käsitlemiseks. Samuti tuleb täita pinnas olevad augud. Mudeli mahu saab teada siis, kui tegemist on kinnise objektiga. Enne rahnu põhja sulgemist tuleb eemaldada ümbritsev maapind. Rahnu pinnale reaalse välimuse andmiseks tuleb luua tekstuuri kiht. Tekstuur koostatakse piltide põhjal tööriistaga *build texture*.



Joonis 11. Ehalkivi rahnu pind.

Rahnude mõõtmete teada saamiseks kasutati kahte programmi. Übermõõtude andmete saamiseks kasutati programmi CloudCompare. Sellega tehti mudelist kindla intervalliga (10 cm) ristlõiked, mille joonpikkus väljendas übermõõtu (Joonis 10).

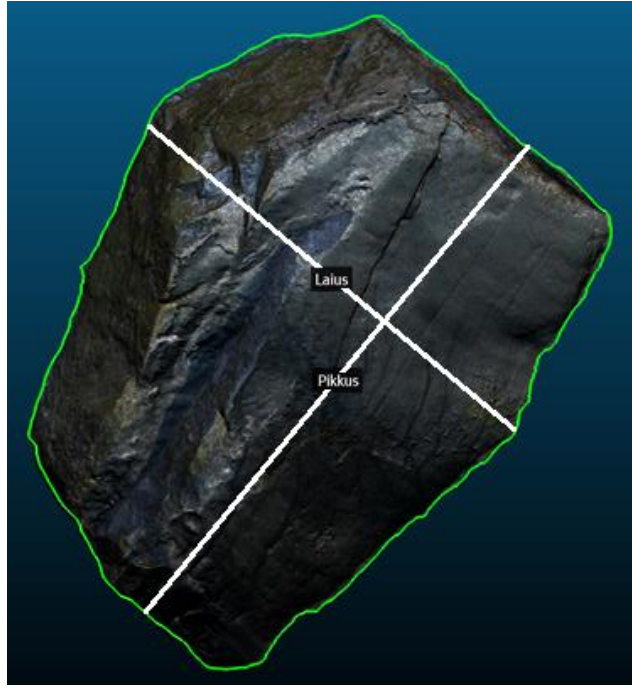


Maapinnalt rahnu übermõõdu saamiseks keerati rahnu mudeli alumine serv horisontaalseks

Joonis 10. CloudCompare mudel Augu Suurkivist, millel roheline joon märgistab suurimaid übermõõte maapinnal ja horisontaaltasandil.

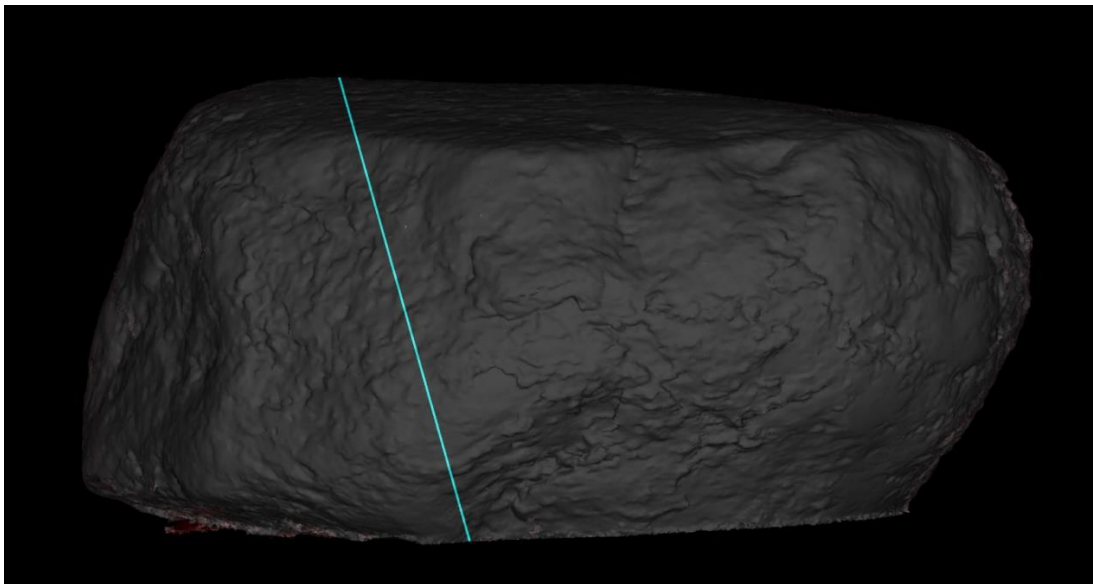
taustsüsteemiga. See võimaldab teha maapinnaga horisontaallõikeid. Maksimaalse übermõõdu saamiseks jäi mudel enda loomulikku asendisse ning sellele kuvatud ristlõigetest leiti suurim. Selleks, et tulemused oleks võrreldavad varasemate mõõtmistöödega kasutati K. Müürisepa kasutusele võetud põhiplaani meetodikat (Joonis 1), mida Pirruse raamatus (2009) on kirjeldatud järgnevalt: „Tihedalt ümber kivi maapinnale asetatud mõõtelindi abil määrati rahnu suurim übermõõt. Alt sagedasti aheneva rahnu puhul arvestati selle projektsiooni maapinnal. Teisisõnu, määramise aluseks võeti perimeeter, mida mõtteliselt saanuks näha vaid kõrgusest, näiteks lennuaparaadilt. Praktikas tähendas see, et rahnu maapinnast kõrgemal

olevad eenduvad osad kanti vertikaalprojektsiooniga maapinnale ning vastavad pöördepunktid tähistati vaiakestega, mille ümber siis asetati mõõdulint. Niiviisi saadi maksimaalsed übermõõduandmed ka eri kujuga rahnude puhul.“ Põhiplaani kujutatud rahnu übermõõt on alati teoreetiline maksimaalne übermõõt, millest reaalsuses ei saa olla suuremat. Rahnu mudeli pikkus ja laius mõõdetakse samuti põhiplaani. Pikkus mõõdetakse mööda rahnu pikema külje suunda ning laius vastavalt sellele rist.



Joonis 11. Muuga Kabelikivi projitseeritud übermõõt, pikkus ja laius.

Mudelite kõrgusi mõõdeti programmiga Lime VOG. Kõrgus mõõdeti rahnu mudeli madalaimast maaga ristuvast kohast kõrgeima punktini. Täpseima suhtelise kõrguse leidmiseks pöörati mudeli aluspind horisontaalseks taustsüsteemiga (Joonis 12).



Joonis 12. Ehalkivi kõrgus, rahnu kõrgeim ja madalaim punkt ühendatud.

3. Tulemused ja arutelu

SfM meetodil loodi seitsme rändrahnude mudelid. SfM meetodil on mitmeid positiivseid külgi. Välitööde läbiviimiseks on vaja väga vähe spetsiaalseid vahendeid. Piisab vaid kaamerast, teleskoopstatiivist ja markeritest. Ainsaks spetsiifiliseks vahendiks on RTK GPS. Kõiki neid on lihtne ja kompaktne objekti juurde kaasa võtta, mis võimaldab kiiremini välitööd teostada ka teedest eemal paiknevate objektide juures. Ojakivi asub lähimast teest umbes 1,5 km kaugusel. Sinna jõudmiseks tuleb läbida ürgmetsas paiknev jalgrada. Arvestamata keskkonnast tulenevaid takistusi, võtab rahnu jäädvustamine keskmiselt kaks tundi. Manuaalsele andmetöötlusele kulub keskmiselt 2-3 tundi, kuid inimese tehtava töö aega hoiab oluliselt kokku arvuti võime ise andmeid vajalikult töödelda. Võrdlemise lihtsakoelised vahendid töö tegemiseks tagavad ka madalad kulutused võrreldes alternatiivsete lahendustega nagu näiteks LiDAR-põhise laserskaneerimisega (Palmer *et al.* 2015). SfM meetodi puhul on oluline ka tehtud piltide arv. Mida rohkem pilte, seda suurem võimalus on valida hea kvaliteedi ja katvusega pilte. Tänapäevast piiramatut andmemahutu arvestades on see meetodi positiivne külg. Liigse arvu piltide kasutamine mudeli loomisel põhjustab aga ülemäärast ajakulu. Aruküla kivi mudeli loomiseks kasutati 450 pilti ning Ojakivi mudeli jaoks 94 pilti. Aruküla kivi hõreda punktipilve loomiseks kulus arvutil 47 minutit, Ojakivi punktipilvele ainult 6 minutit. Aruküla kivi tiheda punktipilve loomine võttis aega 10,5 tundi kuid Ojakivi oma 25 minutit. SfM meetodi kasuks on ka see, et salvestatakse konkreetse ajahetke reaalne kolme-dimensionaalne objekt, mis võimaldab vajadusel hilisemalt võrrelda saadud andmeid ja taasluua varasem olukord.

Üheks olulisimaks SfM meetodi eeliseks on täpsus. Mudeli täpsuse hindamiseks kasutatakse Agisoft tarkvaraga mudeli tegemise käigus loodud raporteid. Raportites kajastub RTKga kontrollpunkti mõõtmisel tekkinud viga ja pikkuslattice kasutamisest tulenev viga. RTKga mõõdeti kontrollpunktid kohtades, kus satelliidivastuvõtt on hea. Augu suurkivi ja Ojakivi asusid tihedas metsas, kus polnud võimalik asukohta positsioneerida. Nende puhul kasutati pikkuslatte. Keskmise mõõteviga Augu suurkivil oli 0,04 cm ja Ojakivil 0,2 cm. Jaani-Tooma suurkivi puhul kasutati mõlemat varianti, RTK punktide viga ületas 5 cm, mistõttu mudeli täpsust parandati pikkuslati abiga. Kõige väiksem mõõteviga (RTK puhul) on Muuga Kabelikivil - keskmiselt 1,57 cm, järgneb Ellandvahe kivi – 2,11 cm, Ehalkivi – 4,62 cm, Aruküla hiidrahn – 4,75 cm ja Jaani-Tooma suurkivi – 8,18 cm. Suurem viga võrreldes pikkuslattice kasutamisega on tingitud RTK enda mõõteveast (2-5 cm). RTK abil määratud

punktidel on xyz koordinaadid, mis võimaldavad lisaks asukohale määrata objekti orientatsiooni ruumis. Pikkuslattide puhul on objektidel vaid kindel mõõtkava. Palmer *et al.* (2015) on oma uurimuses käsitlenud SfM täpsust. Salt Lake Citys läbiviidud mõõtmistel saadud tulemused erinesid objekti reaalsest mõõtmest vaid 0,2%, mis oli antud juhul 3 mm. Selline täpsus on piisav enamikel geotehnoloogilistel töödel (Palmer *et al.* 2015).

SfM meetodiga rahnude modelleerimisel esineb ka puudusi. Suurimaks takistuseks on looduslikud tegurid. Välitööde läbiviimise aeg on piiratud lumevaba ja taimede vegetatsiooniperioodi välise ajaga, mida Eesti kliimas esineb vaid mõned kuud aastast. Välitööde teostamine sademeterohke ilmaga pole tulemuslik, kuna piltidele jäävad veepiisad moonutavad tulemusi. Samuti ei ole soovitatav päikseline ilm, mille tõttu tekivad rahnule varjud ja vastu päikest pildistades võivad tekkida fotole valguse defektid (valguslaigud, peegeldused). Antud meetodi rakendamise puhul võib raskendavaks osutada ka rahnu asukohta jõudmine. Rahn võib paikneda näiteks vees, soisel alal, üksikul saarel. Näiteks Painuva rahn Viinistu ranna kaldalt 100 meetri kaugusel meres või Vaindloo rahn Eesti põhjapoolseimal saarel. Olulisel määral häirib piltide tegemist rahnu ümbritsev taimestik. Aruküla hiidrahnu ümbritses pajuvõsa, mida pidi kõvasti harvendama. Augu Suurkivi asub liivaluigelise männimetsa all. Luite nõlval paiknemine ei raskendanud välitööde läbiviimist, küll aga raskendasid rahnu ümber paiknevad puud, mis piirasid statiivi küljes oleva kaamera liikumist ning puude varjud tekitasid pildidel suuri valguskontrastsusi. Ojakivi asub Lahemaa rahvusparki ürgmetsas. Tihe mets, osaline lumikate ning paks samblakiht muutsid täpsed mõõtmised keerukaks.

SfM meetodiga nagu ka varasemate meetoditega ei ole võimalik arvestada rahnu maa-alust või veealust osa. Ehalkivi paiknemine madalas rannikuvees mõjutab Eesti suurima rahnu ruumala hindamist. Samuti on teada, et Muuga kabelikivist suur osa asub maa sees, mida on tõestanud mitme meetri sügavused kaevetööd kivi ääres (Suuroja ja Suuroja, 2009). SfM meetodil on siiski veel üks negatiivne aspekt. Ehkki arvuti on võimeline ise suurt osa andmetöötlusest ära tegema, vähendades inimese sellekohast ajakulu, ei ole enne hõreda punkt pilve valmimist võimalik kindlaks teha, kas sisendandmed on piisavad mudeli loomiseks. Kui andmed osutuvad puudulikuks või ebakvaliteetseks, siis tuleb kogu protsess uuesti läbi teha. Käesolevas töös ei õnnestunud Rohuneeme ja Laulumäe rahnude mudelite loomine. Rohuneeme kivi mudeli loomine ebaõnnestus, sest rahn asub tihedas metsas, kus ei olnud võimalik RTK-ga asukohta positsioneerida. Põõsarinne rahn ühel küljel, paari meetri kaugusel rahnust, takistas pildistamist nii kaugelt, et kogu rahn pildile jääks. Tänu sellele ei suutnud programm tuvastada piisavalt kattuvaid punkte. Laulumäe kivi kattis paks samblakiht ning sellel kasvasid

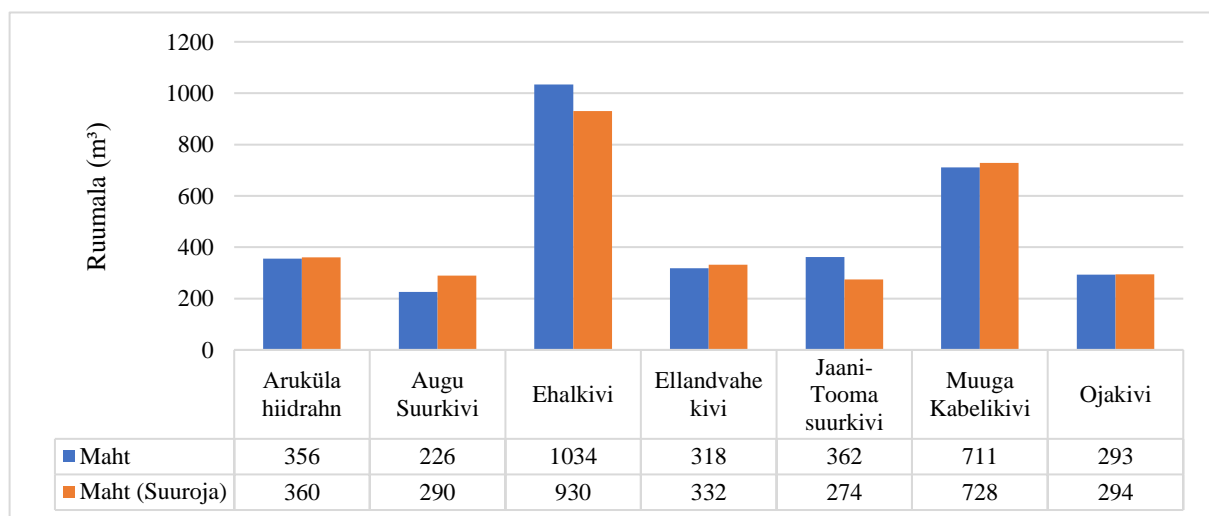
roosipõõsad. Kivi tagumine külg on lauge, ulatudes sujuvalt maani ja selle ääres on tihe põõsas, mis varjas vaatevälja piltide tegemisel.

Valimis olnud üheksast rahnust seitsme kohta oli võimalik arvutada maht ja mõõtmed (Tabel 2). Töös kasutatud vahenditega oli võimalik määrata mõõtmed ühe-sentimeetrise täpsusega. Varasemad tulemused on märgitud 10 cm täpsusega.

Tabel 2. 3D mudelitelt arvatud maht ja mõõtmed.

Nimi	Maht (m ³)	Maksimaalne ümbermõõt (m)	Projektsiooni ümbermõõt (m)	Pikkus (m)	Laius (m)	Kõrgus (m)
Aruküla hiidrahn	356	35,86	39,34	13,31	7,80	5,60
Augu Suurkivi	226	29,21	30,95	10,56	7,73	6,27
Ehalkivi	1034	50,54	50,85	16,96	14,65	7,26
Ellandvahe kivi	318	33,19	34,31	10,88	9,51	5,60
Jaani-Tooma suurkivi	362	38,98	40,84	14,70	7,40	7,65
Muuga Kabelikivi	711	58,43	60,52	19,14	15,15	6,42
Ojakivi	293	34,00	35,33	10,72	9,56	5,93

Aruküla hiidrahn, Ellandvahe kivi, Muuga Kabelikivi ja Ojakivi ruumalade arvutamisel saadud tulemused erinevad varasemalt mõõdetud andmetest 1-17 m³ ehk vähem kui 5%. See kinnitab võrdlusandmete head täpsust. Suurem muutus mahus on tingitud meetodilisest erinevusest või looduskeskkonna muutustest. Jaani-Tooma suurkivi mahu suur kasv on tõenäoliselt põhjustatud kivist murdunud osa mahu juurde arvestamisest. Augu suurkivi mahu

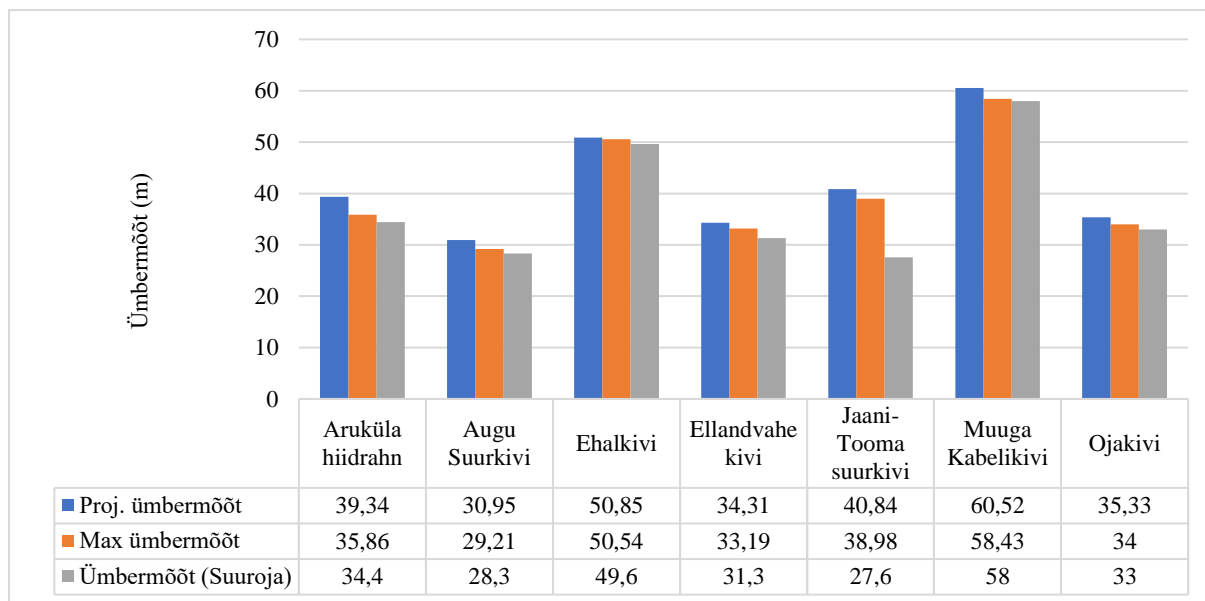


Joonis 13. Rahnude mudelitelt arvatud mahtude võrdlus varasemate andmetega Hiidrahnude raamatust (2008).

vähenev on tõenäoliselt seotud tema asukohaga. Paiknemine liivaluidete vahel, 100 meetrit vee piirist, soosib liiva alla mattumist. Meretuul kannab luidetevahelistesse orgudesse liiva. Ehalkivi mahu mõõdistamisel on aga väga oluline hetkeline veetase. Käesolevas töös olevate mõõtmete mõõdistamise ajal oli Ehalkivi ranna poolisel küljel vee sügavus 20 cm ja mere poolisel küljel 80 cm. Suurest tulemuse erinemisest võib järeldada, et eelnev mõõtmine oli teostatud kõrge veetasemega perioodil (Joonis 13).

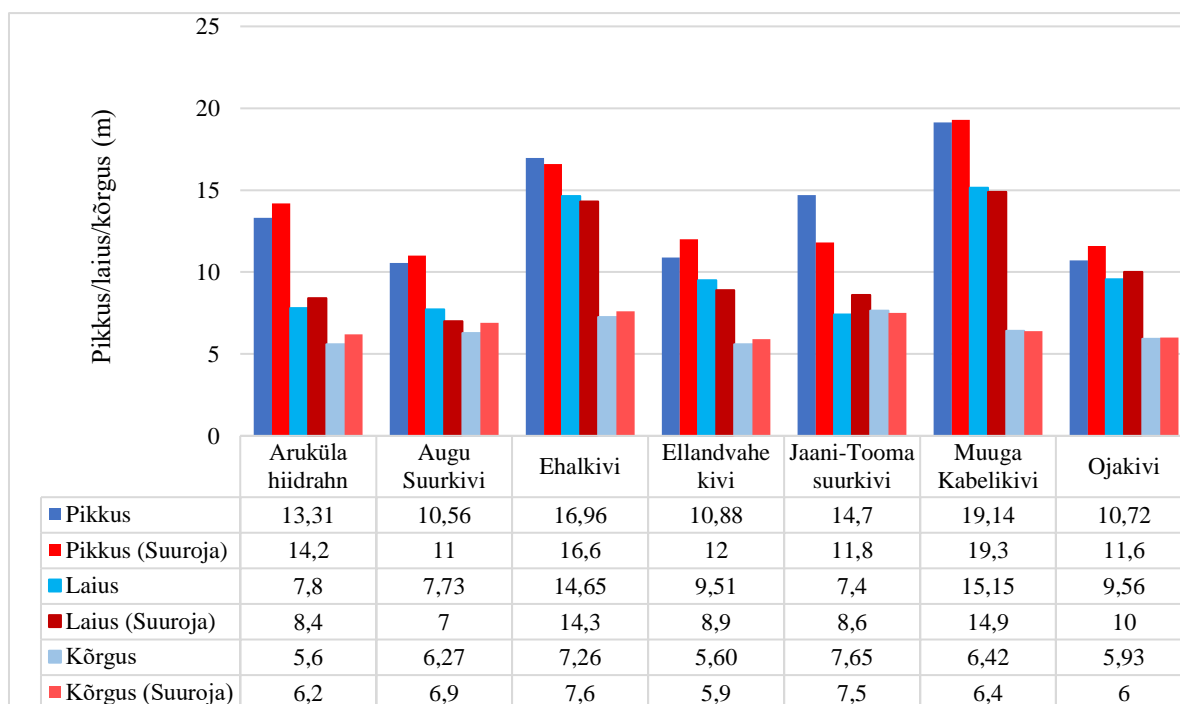
Rahnude ümbermõõtude väljaselgitamisel võeti aluseks K. Müürisepa kasutusele võetud ühtlustatud põhiplaani meetoodika (Joonis 1), et andmed oleks võrreldavad. Mudelitelt arvutatud ümbermõõdud on kõikide rahnude puhul suuremad kui varasemalt välitöödel käsitsi mõõdetud. Tänapäevane tehnoloogia võimaldab arvestada iga väiksemat kivi konarlust, mis kajastub ka mõõtmistulemustes. Suurusjärk on jäänud samaks, kuid mõõdulindiga sirgjooneliselt mõõdetud ümbermõõt on võrdlemisi umbmäärane.

Enamike rahnude projektsiooni ümbermõõt ületab olulisel määral võrdlusandmetes olnud ümbermõõte. Aruküla hiidrahnu mõõtmistulemused erinesid 4,96 m, Ellandvahe kivil 3,01 m, Augu suurkivil 2,65 m, Muuga Kabelikivil 2,52 m, Ojakivil 2,33 m ja Ehalkivil 1,25 m. Jaani-Tooma suurkivi on lõhenenud kaheks. Varasematel mõõdistustel on mõõdetud ainult suuremat osa, mis põhjustab ümbermõõdu suurt erinevust (13,24 m) võrreldes käesolevate tulemustega, kus on käsitletud kivi tervikuna. Kuna tulemuste erinevused on niivõrd suured, siis võib oletada, et Hiidrahnu raamatus kajastatavad mõõtmised ei ole saanud kasutades ühtsustatud põhiplaani meetodit või on antud meetod ebatäpne. Maksimaalne ümbermõõt erineb varasematest tulemustest tunduvalt vähem. Suurim vahe on Ellandvahe kivil – 1,89 m, Aruküla hiidrahnul 1,46 m, Ojakivil 1 m, Ehalkivil 0,96 m, Augu suurkivil 0,91 m ja Muuga Kabelikivil 0,43 m. Kõikidel rahnudel mõõdeti ümbermõõt ka maapinnalt. Ainult Ehalkivil ja Ellandvahe kivil ei olnud maksimaalne ümbermõõt maapinnal vaid kõrgemal maapinnast (Joonis 14).



Joonis 14. Rahnude mudelitelt arvatud ümbermõõtude võrdlus varasemate andmetega Hiidrahnude raamatust (2008).

Rahnude pikkuse, laiuse ja kõrguse mõõtmiseks pole loodud ühtset süsteemi. Seega on raske võrrelda varasemaid tulemusi praegustega. Mõõtude suurusjärk jääb samaks, kuid varasemaid mõõtmistõid on võimatu kopeerida, sest pole teada, kust mõõtmised on tehtud. Selgus, et varasematel välitöödel saadud mõõtmistulemused on üldiselt suuremad kui arvutis mõõdistamisel. Mõõtmistulemuste erinevus jääb üldiselt alla ühe meetri.



Joonis 15. Rahnude mudelitelt arvatud pikkuste, laiuste ja kõrguste võrdlus varasemate andmetega Hiidrahnude raamatust (2008).

Kokkuvõte

Eestis on rohkem rändrahne kui kuskil mujal Euroopas. Neid leidub üle terve Eestimaa, kuid suurimad paiknevad Põhja-Eestis ning saartel. Nende uurimise ja kaitsmisega on tegeletud siin üle saja aasta, kuid siiski pole suudetud täpseid mõõtmeid talletada. Rändrahnud võivad olla väga suured, mistõttu on möödunud sajanditel kasutusel olnud vahenditega neid äärmiselt keeruline täpselt mõõta. Tänapäeva digitaalajastul on muutunud see võimalikuks. Selleks kasutatakse kaasaegseid laserskännereid ja 3D modelleerimist. Spetsiifilise tehnika kallidus ja kättesaamatus piirab laserskaneerimise levikut ning laialdast kasutuselevõttu. Palju lihtsam, kiirem ja odavam meetod on *Structure from Motion* (SfM), millega saab tavalistest fotodest luua 3D mudeli. Selle muudab odavaks suhteliselt lihtne ja igapäevane tehnika nagu fotokaamera ja arvuti. Piltide tegemine on kiire ning suurema kalkuleerimistöö teeb arvuti inimese eest ära. SfM meetodi üks suurimatest eelistest on täpsus – mudelid on väga detailsed, mis võimaldab arvutada rahnude täpseid mõõtmeid. Meetodi rakendamise suurimaks takistuseks on rahnude paiknemine tihedas taimestikis ning ilma-tundlikus, mis muudab kvaliteetsete piltide saamise keeruliseks. Käesolevas töös loodi seitsme Põhja-Eestis paikneva rändrahnu 3D mudelid ning töö tulemusena arvutati mudelite põhjal rahnude mõõtmed ja võrreldi neid varasemalt tehtuga. Saadud rahnude mahud, ümbermõõdud, kõrgused, pikkused ja laiused erinesid veidi varasematest andmetest. Rahnude keeruka kuju tõttu ei pruugi aga suurused olla mõõdetud täpselt samast kohast, kust varasemate andmete omad. Käesoleva töö tulemusena on võimalik 3D mudeli abil mistahes ajahetkel taasluua varasem olukord, mis võimaldab ka hiljem saadud tulemusi kontrollida. Samuti võimaldab see jälgida rahnuga toimuvaid protsesse, näiteks mattumised, murenemine, purunemine, taimkatte kasv rahnu ümber ja pinnal.

Kuna antud töös käsitleti vaid seitset rahnu ning kahe pildistatud rahnu mudeli loomine ei õnnestunud, siis terviklikumaks SfM meetodi hindamiseks tuleks teha lisapildid ka neist kahest ning lisada valimisse rohkem erinevas looduskeskkonnas paiknevaid rahne. Tulevastes uurimustes võiks käsitleda kõiki Eesti hiidrahne, koostada nendest 3D mudelid ning arvutada mõõtmed.

3D modelling of biggest erratic boulders in Estonia

Sten Varatu

Summary

Estonia has more erratic boulders than any other European country. Biggest of them lie in Northern Estonia. In the past there have been trouble measuring them because of the size. Giant boulders measure more than 25 meters in girth and their volume may be more than 200 m³. Nowadays huge jumps in technology make it possible to measure them very accurately. Structure from Motion (SfM) method was used for modelling erratic boulders. SfM method uses 2D photos of an object or environment and tries to find overlapping points from every picture to create 3D model. Very conventional tools are needed for this method – camera and computer.

The aim of this paper is to evaluate SfM method eligibility and accuracy measuring erratic boulder dimensions and comparing them with previous data.

Fieldwork was conducted in the middle of April in order to make pictures of erratic boulders. Over 1300 pictures were taken. After the photos were gathered, an analysis was conducted to select images of good quality and improve them even more with Adobe Lightroom so these can be used in 3D modelling. The modelling was done using Agisoft PhotoScan software.

3D models of seven erratic boulders were created for this paper. They were measured using CloudCompare and Lime VOG software. 3D models were used to evaluate SfM method eligibility and accuracy for measuring erratic boulders. Gathered results were analyzed and compared with previously collected data. Comparisons showed that previous measurements were in the same range but computer-based measurements seemed more reliable. All measuring is repeatable on 3D model. SfM method is accurate enough to be used in geological measuring.

Tänuavaldus

Soovin tänada suure abi eest oma juhendajat Marko Kohvi. Samuti sooviks tänada välitööde teostamisel suureks abiks olnud Kristjan Roonit. Eriti sooviksin tänada Kertut, kellel oli alati aega mind aidata ja kontrollida minu tehtud tööd.

Kasutatud kirjandus

Aber, J. S., Croot, D. G., Fenton, M. M., 1989, Megablocks and Rafts, Glaciotectonic Landforms and Structures, 91-102

Aber, J. S., Ruszczyńska-Szenajch, H., 1997, Origin of Elbląg Upland, northern Poland, and glaciotectonism in the southern Baltic region, *Sedimentary Geology*, 111, 1-4, 119-134

Birdseye, C.H., 1940, Stereoscopic Phototopographic Mapping, *Annals of the Association of American Geographers*, 30(1), 1-24

Cultural Heritage Imaging koduleht, Technologies: Photogrammetry
<http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/> (15.05.17)

Dunai, T. J., 2010, *Cosmogenic Nuclides: Principles, Concepts and Applications in the Earth Surface Sciences*. Cambridge, MA: Cambridge University Press

EELIS, Alamleht: üksikobjektid, üksikobjektide artiklid, Alamartikkel: kaitsealused rändrahnud Eestis
<http://loodus.keskkonnainfo.ee/eelis/default.aspx?id=426538197&state=4;1883136884;est;eelisand> (13.05.17)

Eesti Entsüklopeedia, Otsing: Eesti ürglooduse raamat
http://entsyklopeedia.ee/artikkel/eesti_%C3%BCrglooduse_raamat (13.05.17)

Jackson, L. E., Jr., Leboe, E. R., Little, E. C., Holme, P. J., Hicock, S. R., Kazuharu, S., 1999, *CANQUA 99 Guidebook: Late Quaternary Geology of the Foothills: from Calgary to the Alberta–Montana Border*

Keynes, R. (ed), 2001, *Charles Darwin's Beagle Diary*, Cambridge University Press
<http://darwin-online.org.uk/content/frameset?itemID=F1925&viewtype=text&pageseq=1>
(13.05.17)

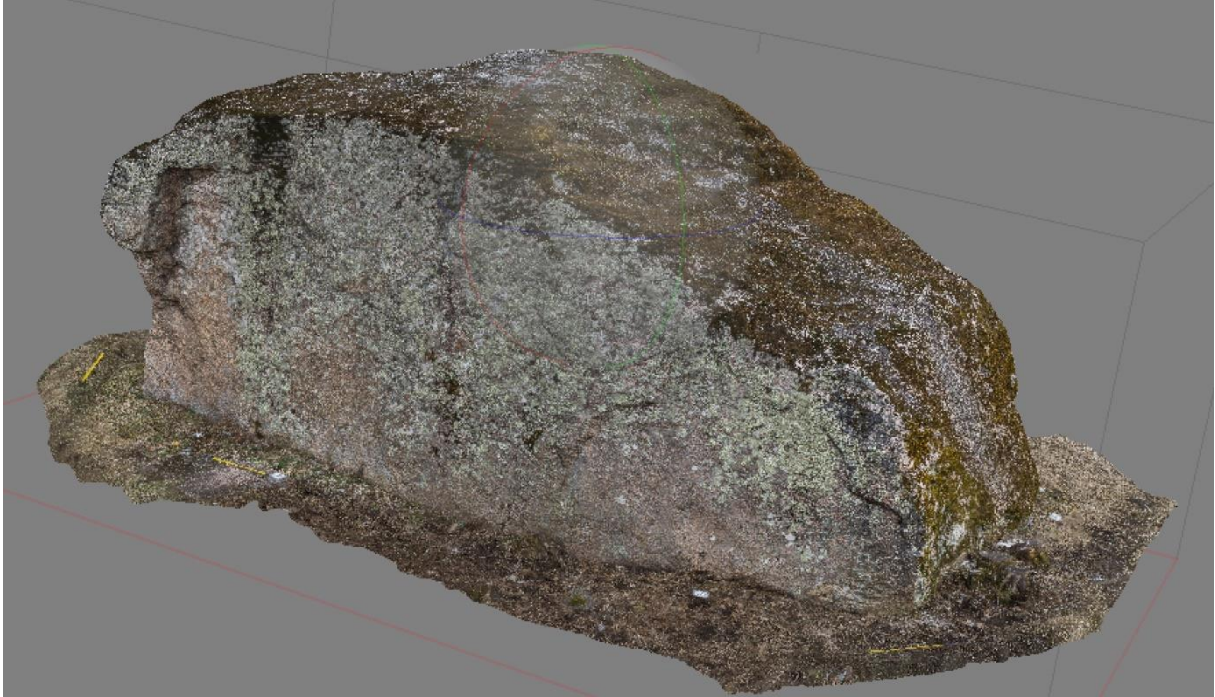
Liba, N., 2005, *Fotogramm-meetria alused*, Metsandus- ja maehitusinstituut, Eesti Põllumajandusülikool, Tartu

Palmer, L., Franke, K. W., Martin, R. A., Sines, B. E., Rollins, K. M., Hedengren, J., 2015, *The Application and Accuracy of Structure from Motion Computer Vision Models with Full-Scale Geotechnical Field Tests*, All Faculty Publications

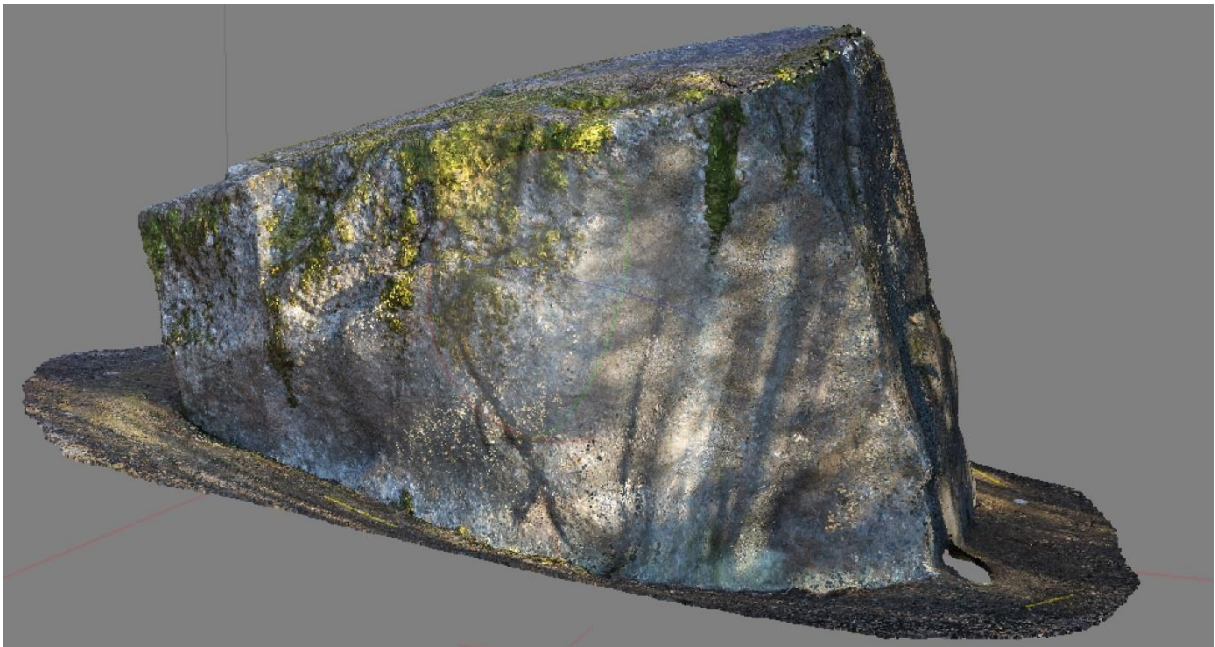
- Pirrus, N., 2009, Eestimaa suured kivid : suurte rändrahnude lugu. Teaduste Akadeemia Kirjastus, Tallinn
- Raukas, A., 2004, Application of OLS and Be-10 techniques to the establishment of deglaciation chronology in Estonia, Proceedings of the Estonian Academy of Sciences: Geology, 281-286
- Raukas, A., Karhima, A., 2007, Ice-shaped landscapes in Estonia and Southern Finland, MTÜ GEOGuide Baltoscandia, Tallinn
- Raukas, A., Teedumäe, A. (eds), 1997, Geology and Mineral Resources of Estonia, Estonian Academy Publishers, Tallinn
- Relve, H., 2006, Rändrahnudelt rikkaim maa Euroopas, Loodusesõber, 1
- Suuroja, K., Suuroja, M., 2008, Eesti loodusmonumendid: Hiidrahnud, GeoTrail KS, Tallinn
- Tuuling, I., Kirs, J., 2013, Eesti on rändkivide maa, Eesti Loodus, 3, 20-27

Lisad

Lisa 1



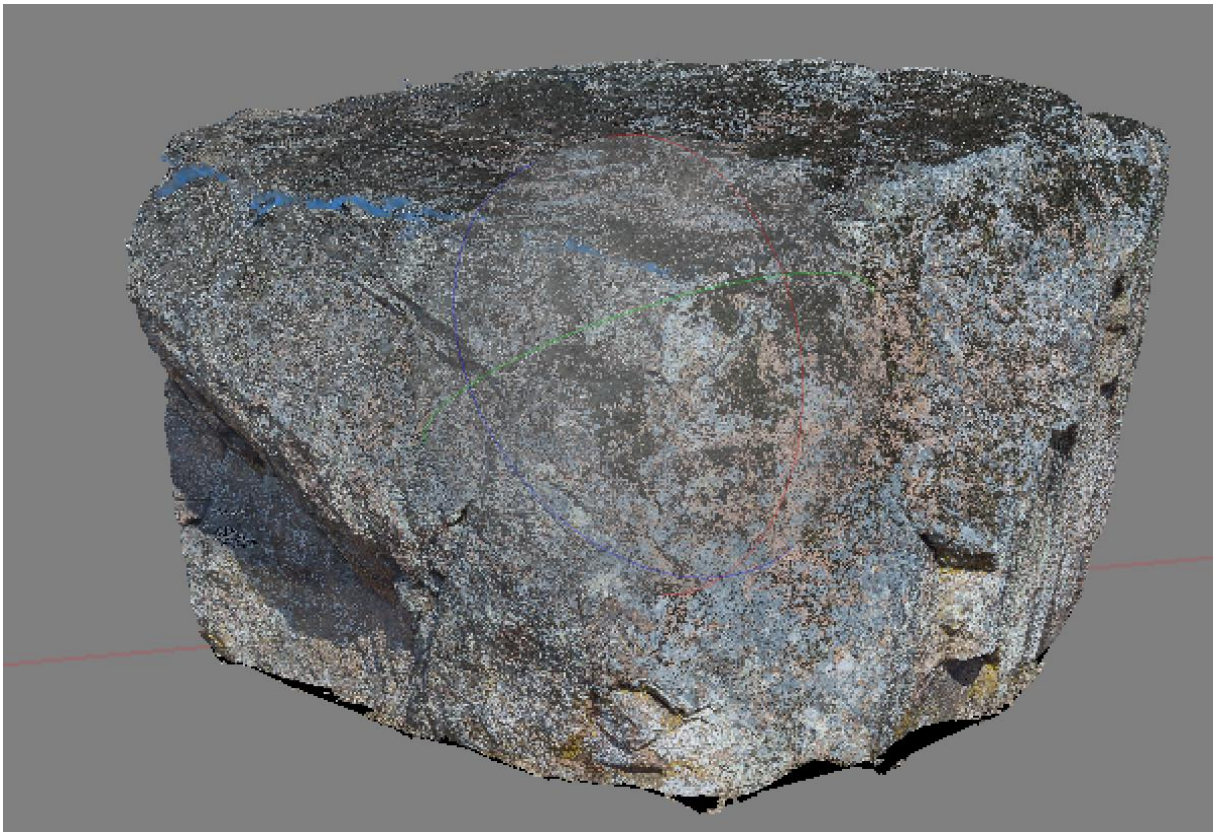
Aruküla kivi



Augu Suurkivi



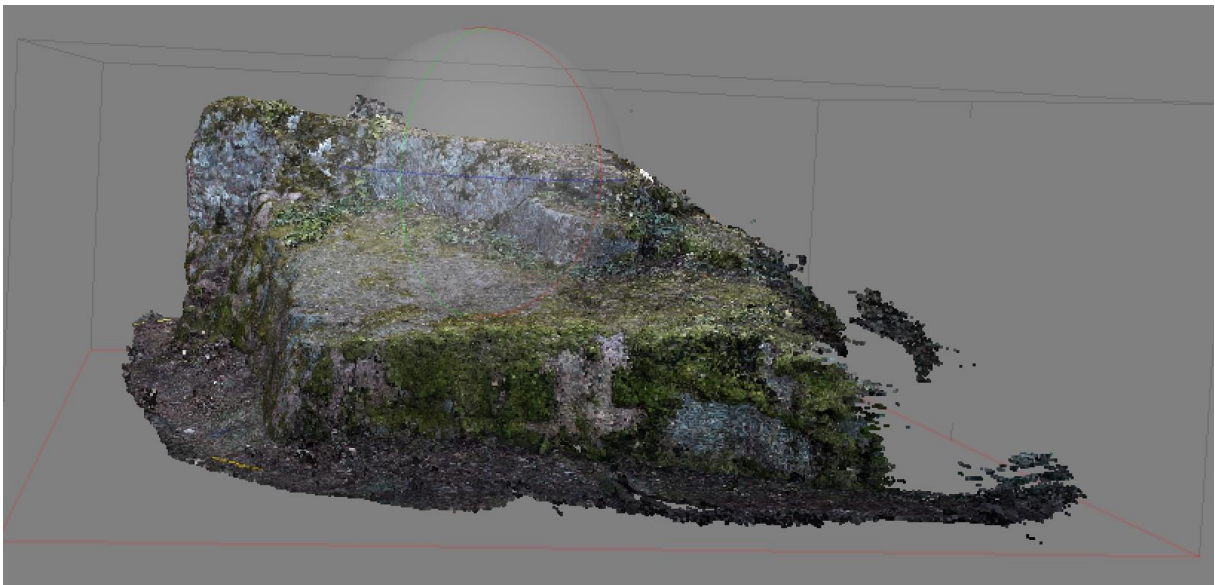
Ehalkivi



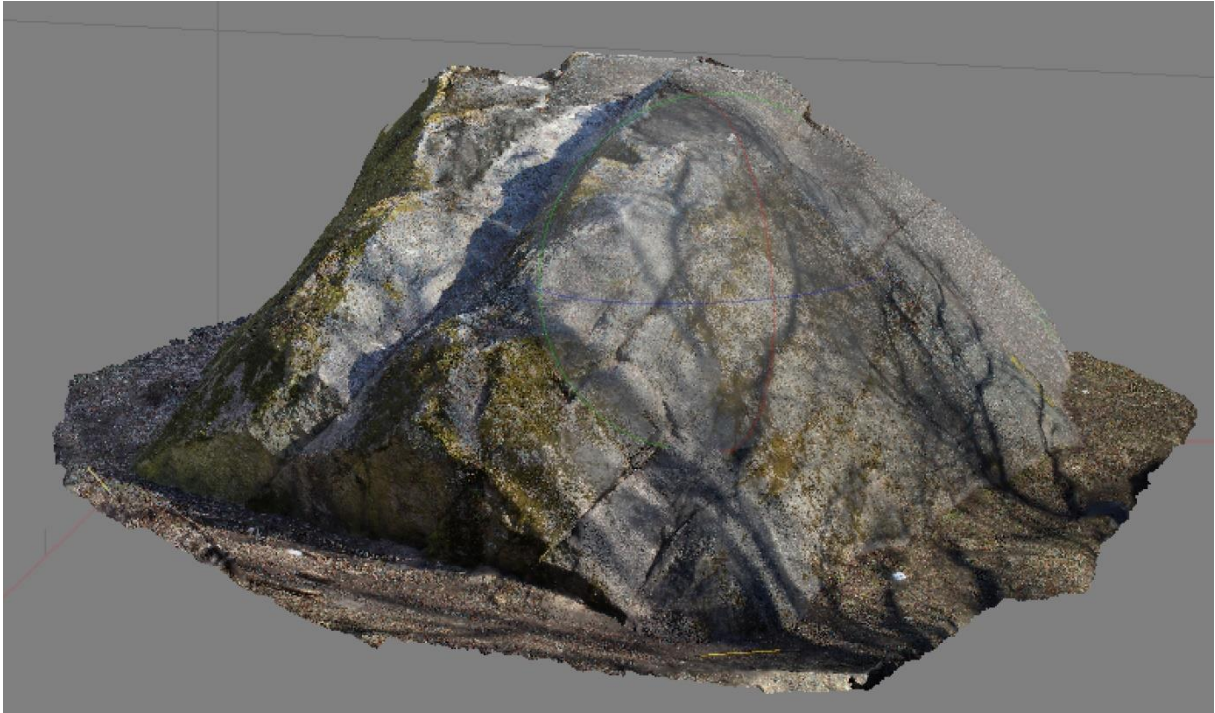
Ellandvahe kivi



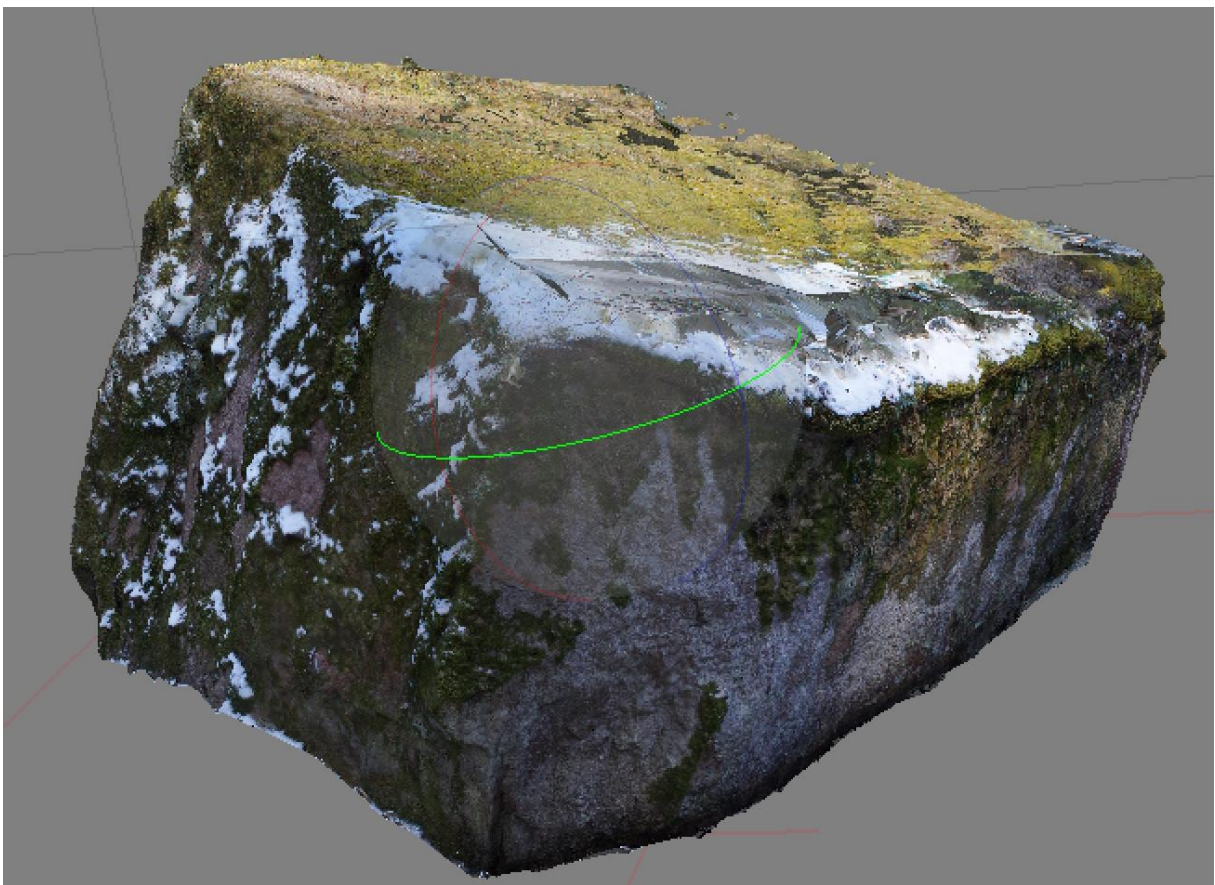
Jaani-Tooma kivi



Laulumäe kivi



Muuga Kabelikivi



Ojakivi

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Sten Varatu,

annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Eesti suurimate rändrahnude 3D modelleerimine“ ,

mille juhendaja on Marko Kohv,

- 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
- 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **29.05.2017**