Tartu Ülikool
Humanitaarteaduste ja kunstide valdkond
Ajaloo ja arheoloogia instituut
arheoloogia osakond

Karoline Mai

Rosma linnamäe väravakäigu kaevandi rekonstrueerimine fotogrammeetria abil

Bakalaureusetöö

Juhendajad: Ragnar Saage, PhD
professor Heiki Valk

Tartu 2023

Sisukord

Sissejuhatus 3

1. Rosma linnamägi ja selle uurimislugu 5

2. Fotogramm-meetria arheoloogias 7

2.1 Fotogramm-meetria kui dokumenteerimismeetod 7

2.2 Fotogramm-meetria Eesti arheoloogias 8

2.3 3D-modelleerimise praktilised väljundid 9

3. Fotogramm-meetria kasutamine Rosma kaevamiste dokumenteerimisel ja kaevamistulemuste analüüsil 11

3.1 Eeltöö ja 3D-mudelite tegemine 11

3.2 Ortofotod 14

4. Tulemused ja analüüs 15

4.1 Väravakäigu stratigraafia ja Harrise maatriks 15

4.2 Postiaugud 19

4.3 Sissekaeved, varing ja naelad 21

4.4 Profiilivaated 24

4.5 2022. aasta Rosma väravakäigu jätku-uuringud 31

4.6 Rosma väravakäik võrdluses teiste Eesti linnuste väravakäikudega 32

Kokkuvõte 34

Kasutatud kirjandus 37

Summary. Reconstruction of the Rosma hill fort gateway trench by using photogrammetry. . 41

Sissejuhatus

Käesolev bakalaureusetöö käsitleb fotogramm-meetria potentsiaali kaevamiste dokumenteerimisel ja muistise ning sellega toimunud sündmuste rekonstrueerimisel. Fotogramm-meetria on arheoloogias juba laialt kasutuses, kuid selle rakendamist muististel, mis on keerulise stratigraafiaga ja millest täielik ülevaade saadi alles kaevamiste lõppjärgus, on Eestis praktiseeritud vähe. Sellistel juhtudel pakub fotogramm-meetria võimaluse ühendada eri mudelitel dokumenteeritud ehitusjäänuseid ja kontekstid viisil, mis kirjeldab paremini nende tekkimist, hävimist ja mattumist (ja mitte tingimata seda, kuidas nad kaevamiste käigus välja kaevati ja dokumenteeriti).

Bakalaureusetöö lähtub Rosma linnuse kagupoolse väravakäigu 2020.–2022. aasta väljakaevamiste tulemustest ja digitaalsest kaevamisdokumentatsioonist. Töö käigus teen 3D-mudelid Rosma linnamäe väravakaevandist, kasutades välitöödel tehtud fotosid ja mõõdistusi.

3D-mudelite tegemiseks kasutasin programmi *Agisoft Metashape professional*, et teha üksteist mudelit, milles esineb Rosma kaevand erinevates kaevamisetappides. 3D-mudelitest tegin omakorda profiilijoonised. Kasutan programmi QGIS, et luua moonutusteta ortofotosid, mida saaks kasutada 3D-mudelite andmete kuvamisel kaardipõhjadena.

Töö esimeses peatükis esitan taustainfo Rosma linnamäe kohta. Toon esile teemakohased aruanded ning arutan 2020.–2021. a toimunud Rosma väravakäigu väljakaevamisi.

Teises peatükis käsitlen fotogramm-meetria kasutust 3D-mudeli tegemisel ja selle aktuaalsust tänapäeva arheoloogias ning vajadust efektiivsemalt säilitada kultuurilise väärtusega objekte, varemeid ja teavet arheoloogilistest kaevamistest. Samuti annan ülevaate fotogramm-meetria kasutusest Eesti arheoloogias, teemakohastest artiklitest ja uurimistöödest. Fotogramm-meetriat käsitlevates peatükis lähtun Mauro Lo Brutto ja Paola Meli (2012) artiklist, Favio Remondina ja Stefano Campana (2014) teosest ja Kärt Metsoja (2018) bakalaureusetööst.

Kolmandas peatükis keskendun praktilisele osale, milleks on 3D-mudelite ja ortofotode tegemine ning seletan nende tööprotsessi.

Neljandas peatükis esitan analüüsi ja järeldused. Esitan Rosma kaevandi Harrise maatriksi, mida kasutan sündmuste järjekorra ja profiilidel esinevate pindade seletamiseks. Väravakaevandi algseisu rekonstrueerimiseks esitan postiaukude asukohad ja seletan nende

eesmärki valliotste pinnase hoidmisel. Täiendavalt illustreerin sissekaevete asukohti ja arutan nende seost kaevamistel leitud naeltega – ainsate linnuse ehitustööde ajast pärit leidudega. Alapeatükis kirjeldan profiilide tegemise tööprotsessi ja esitan kaevandist tehtud profiilid pildi kujul. Arutan profiilivaadetel esinevaid sissekaevete, leeteliiva ja varingu piirjooni. Samuti kirjeldan 2022. aasta jätku-uuringuid. Käesolevas peatükis võrdlen ka Rosma kagupoolset väravakaevandit teiste Eesti linnuste väravakäikudega – Iru *Linnapära* väravakäikudega, Pada I linnuse väravakäiguga, Varbola *Jaanilinna* läänepoolse väravakäiguga ning Lõhavere linnamäe kirde- ja kagupoolse väravakäiguga.

Uurimistööl on rakenduslik külg, kuna kirjeldan seda, kuidas keerulise stratigraafiaga kaevandit kaevamiste eri faase kajastavate 3D-mudelite abil dokumenteerida ja analüüsida.

1. Rosma linnamägi ja selle uurimislugu

Rosma linnamägi (*Liinamägi*) asub ajaloolisel Võrumaal tänapäevases Põlva maakonnas, Põlva linnasüdamest 2,5 km lõuna pool. See asub põhja-lõuna suunalise laia ürgoru saarel oleval 15–20 m kõrguste järskude nõlvadega künkal, Ahja lisajõeks oleva Peri oja ürgoru saarel. Ebakorrapäraselt ovaalse õue läbimõõt põhja-lõuna sihis on 125 m, laius on 65–70 m; pindala 5900 m². Õu on ümbritsetud 300 m pikkuse siseküljel keskmiselt kuni 1–1,5 m kõrguse ringvalliga, mille väliskülg linnamäe lääne-, ida- ja põhjaküljel sulab kokku mäenõlvaga. Pinnast valli kuhjamiseks on võetud peamiselt selle õuepoolsest servast, kohati, eriti lõunaosas ka välisküljelt. Vallis on kaks suuremat väravakohta: mäe põhja- ja kaguosas. Kagupoolse väravakoha lõunaküljel on valliots märksa massiivsem ja kõrgem kui sama värava põhjaküljel. Võimalik, et siin on asunud väravat kaitsev tornitaoline rajatis (lad *summitas castri*) (Tõnisson 1981: 174 –181; Tõnisson; Valk 2008: 314–315). 2007. aasta välitöödel (Valk 2008 a, b) oli tegemist proovikaevamisega, mille käigus tehti 18 m pikkune tranšee läbi linnusevalli ja uuriti vallitagust ala põhjaväravast paarkümmend meetrit edela pool. Suur äärevall oli kuhjatud ühes järgus ja on tehtud osalt selle siseküljel olevast kraavist võetud, osalt mäepoolt toodud pinnasest, millest osa oli pudenenud kraavi põhja. Kraavi langenud põlengu varingu tukkidest võetud süsinikuproov viitas 13. sajandi II poolele või isegi 14. sajandile, aga tarast võetud dateering viitas viikingiaja lõpule või hilisrauaajale (Valk 2008: 9–10). Vanim tekstiilkeraamika leid on üle 1500 aasta vana. 2020. aasta kevadel mäe põhjaotsas tormikahjustuste alal toimunud uuringutes selgus, et mäel leidub laiguti käsitsikeraamikaga, nähtavasti viikingiaegset kultuurkihti (Valk 2020). 2007. aasta uuringud näitavad, et linnusevall on rajatud hiljem – Heiki Valgu oletuse kohaselt hakati vana linnust uuesti üles ehitama 1223. aasta ülestõusu ajal.

Töös käsitletava väravakäigu kaevamine algas 2020. aasta sügisel, kuna väravakohta oli metsaveomasinatega lõhutud (Valk 2020). 2021. aastal tegid Keiti Randoja ja Silver Jäger arheoloogilisi jälgimisi Rosma-Peri jalgratta- ja jalgtee rajamisel arheoloogiamälestiste linnuse (reg nr 11519) ja asulakoha (reg nr 11512) kaitsevööndites, kuid kummagi lõigu kaevamisel kinnismuistiseid ega arheoloogilise väärtusega leide ei tuvastatud (Randoja ja Jäger 2021).

Linnuste kaitseehitiste oluliseks osaks olid väravakäigud. Linnuste piiramisel ja vallutamisel olid väravakohad esmaseks ründeobjektiks. Uurimistöö lähtub 2020.–2022. aastal toimunud Rosma linnuse kagupoolse väravakäigu väljakaevamiste uurimistulemuste analüüsist kasutades

fotogramm-meetria abil tehtud 3D-mudeleid ning neist omakorda tehtud ortofotodest ja profiilijoonistest (joonis 1). Enne kaevamiste algust ei olnud teada väravakäigu pikkus ja laius, samuti kunagise teepinna paiknemissügavus ega kalle. Linnuse väravakäigu väljakaevamise eesmärgiks oli teada saada, mil viisil ehitati Lõuna-Eestis 13. sajandi kaitserajatiste väravaid. Heiki Valk kirjeldab linnust kui kiiruga tehtud hädaabilinnust, mis on arvatavasti ristisõdade ajal ehitatud, saanud enam-vähem valmis, kuid enne väravakäigu valmimist maha põletatud. Välitööde käigus võis tõdeda, et tukid on alla langenud ja liiv on läbi põlenud, valli harjal olevad heitekivid on samuti tugevasti läbi põlenud. Kõik see on kukkunud väravakäiku (Valk 2021: 34–36).

Radiosüsiniku analüüside tulemusena (tabel 2) selgus 2022. aasta juunis, et samas kohas on asunud kaks täiesti erinevat ja eriaegset väravakäiku – üks eelviikingiajast, teine 13. sajandist.

Joonis 1. Rosma linnuse alal tehtud arheoloogilised välitööd a 2020–2022. Punane – 2020.–2022. a kaevamised; sinine – tormimurru uurimisala (mustand autori valduses). Asendiplaan Maa-ameti kaardirakendusest www.xgis.maaamet.ee.

2. Fotogramm-meetria arheoloogias

2.1 Fotogramm-meetria kui dokumenteerimismeetod

Kultuurimälestiste digitaliseerimine on tänapäeva arheoloogia praktikas laialdaselt levinud. Kuna fotogramm-meetria on viimastel aastakümnetel muutunud kättesaadavamaks, siis selle kasutamine on nii teaduslikel kui ka kommertseesmärkidel plahvatuslikult kasvanud. Arheoloogid võivad fotogramm-meetria abil koostada kaevandi plaane, dokumenteerida erinevaid struktuure või uurida esemeid (Metsoja 2018: 9). Fotogramm-meetria on teaduslik-tehniline distsipliin, mis tegeleb objektide vormi, mõõtmete ja asetuse kindlaks tegemisega ning jaotub sateliitfotogramm-meetriaks, aerofotogramm-meetriaks ja maapealseks fotogramm-meetriaks (Liba 2005: 20). Fotogramm-meetria uurib fotode abil objektide parameetreid ilma nendega füüsilist kontakti loomata ja selle areng on suuresti mõjutatud järjest enam areneva arvutiteaduse ja elektroonika poolt (Schenk 2005).

Tõenäoliselt on nõue luua fotorealistlik 3D-mudel esemetest või varemetest tulevikus üks välitööde tavapäraseid osi, nii nagu varem olid käsitsi tehtud illustratsioonid maastikust ja objektidest. Teaduslikes distsipliinides on oluline tulemuste saavutamise korratavus ja teooria tõestamine. Arheoloogias ei ole see võimalik, kuna kaevamine on pöördumatu protsess ja uue välitöö korraldamisel on võimatu saada sama tulemust. Arheoloogilised uuringud nõuavad üksikasjalikke, kõrge eraldusvõimega registreerimis- ja dokumenteerimistehnikaid, eriti kui tegemist on mittekivist ehituskohtade jäänustega, nagu pinnas või orgaanilise materjali struktuurid (De Reu jt 2013). Seetõttu on kvaliteetne infosäilitusviis arheoloogias oluline, kuna see mõjutab otseselt hilisemaid tõlgendusi. Arvutite laiema levikuga seoses hakati kasutama programme nagu Computer Aided Design (CAD), et digitaliseerida käsitsi tehtud illustratsioone. Tänu tehnoloogia arengule on aga hakatud tegema 3D-mudeleid, mis on seni kõige ülevaatlikum viis informatsiooni säilitada (Remondino jt 2014: 151–152).

3D-mudeli definitsiooniks on kolmemõõtmelise objekti matemaatiline kujutamine. Erinevalt 2D-mudelist saab 3D-mudelit tänu spetsiaalsetele programmidele vaadata erinevate nurkade alt ja säilib detailne informatsioon. Fotode töötlemine 3D-mudeliks kombineerib meetodeid, mis on välja töötatud graafikas ja fotogramm-meetrias (Kangur 2016: 8). 3D-mudelite ja nende väljundite täpsuste hindamiseks kasutatakse aga võrdlusena Maa-ameti andmeid (Huul 2016).

Esimene fotogramm-meetria etapp hõlmab mitmeid toiminguid nagu projekti määratlemine, planeerimine ja sobiva pildimaterjali omandamine. Samuti muude toetavate andmete kogumine, näiteks uuringutest tulenev maapealne juhtimine, markerite asetamine ja nende sisse mõõtmine (Memon ja Majid 2006). Fotogramm-meetria põhimõte on lihtne: objekti pildistatakse mitmest erinevast vaatenurgast. Seda kasutatakse 3D-mudeli saamiseks peamiselt kahel juhul – massiivsed või vähese detailsusega objektid ja väikesed äärmiselt suure detailsusega objektid. Fotogramm-meetria suureks eeliseks on täpsete värvi- ja mõõtmisandmete salvestamine. Piltide saamiseks kasutatakse fotokaamerat, allveekaamerat, drooni või isegi videomaterjali, mida saab töödelda erinevates rakendustes ja programmides (Laksa 2013: 6–8).

Lähifotogramm-meetria on enim kasutatud meetod ja viimaste aastakümnete jooksul toimunud arengute tõttu on tekkinud vajadus seda eraldi käsitleda. Samuti on erinevad seisukohad selle suhtes, kas droonifotogramm-meetrial on lähifotogramm-meetriaga rohkem ühist kui klassikalise aerofotogramm-meetriaga. Määrav on seejuures pildistamise distants, kaamera asendi stabiilsus, piltide ülekate ja piltide kauguse varieeruvus. Lähifotogramm-meetria all mõeldakse pildistamist, mis on tehtud lähemalt kui 300 meetrit (Remondino jt 2011: 26). Lähifotogramm-meetrial on oluline kaamera kvaliteet, piltide kvaliteet (valgus, teralisus) kui ka objekti taust. Kõikide pindade modelleerimisega ei saa fotogramm-meetria tarkvarad ühtviisi hakkama, probleeme valmistavad läikivad või liiga ühtlased pinnad, ka taimestikuga kaetud alad (Agsioft Metashape 2021: 8; Kangur 2016). Lähifotogramm-meetriat on artiklites ja teistes uurimistöödes põhjalikult kirjeldatud ning dokumenteeritud (nt De Reu jt 2013; Metsoja 2018; Remondino ja Campana 2014), mistõttu oma töös meetodi tehnilisi aspekte ei käsitle.

2.2 Fotogramm-meetria Eesti arheoloogias

Eesti arheoloogias on lähifotogramm-meetria kasutus hakanud jõulisemalt levima viimasel aastakümnel. Esimesed lähifotogramm-meetria katsed toimusid 2010. aastate alguses Salme teise muinaslaeva dokumenteerimisel ja 2012. aastal omandas Tartu Ülikool *Agisoft PhotoScan Professional Edition*'i kasutusõiguse. 2013. aastal kaitses Ragnar Saage (2013) Tartu Ülikooli arheoloogia osakonnas magistritöö, milles on Käku sepikoja lähifotogramm-meetria abil koostatud plaanid ja tegemisprotsessi kirjeldus. Lähifotogramm-meetriat käsitleb Edgar Laksa (2013) proseminaritöö, mis annab ülevaate selle tööprotsessist, alates pildistamise planeerimisest kuni lõpptoote valmistamiseni *Agisoft PhotoScan* (Metashape) programmis.

Eestis on mudelite täpsust uurinud droonifotogramm-meetria puhul näiteks Sepp jt (2016). Nende uuritav objekt oli Kuressaare linnus ja selle vahetu ümbrus. Eesmärk oli hinnata UAV fotogramm-meetria teel saadud ortofoto ja pinnamudeli horisontaalset ja vertikaalset täpsust (Sepp jt 2016: 47–56). Hembo Pagi ja Andres Kimberi (2017) välitööaruandes on Tallinna lennujaama territooriumil paikneva lohukivi (reg nr 2615) dokumenteerimiseks kasutatud laserskanneerimise, fotogramm-meetria ja RTI (*Reflectance Transormation Imaging*) meetodeid. Dokumenteerimise käigus kasutatud kolmest meetodist andis lohkude asukoha ja kuju tuvastamise ja jäädvustamise seisukohast parima tulemuse fotogramm-meetria (Pagi ja Kimber 2017). Kindlasti on oluline Kärt Metsoja (2018) bakalaureusetöö, mis käsitleb süvitsi lähifotogramm-meetriat ja mudelite tegemist erinevates programmides. Uurimistöö on kaitstud Maaülikooli geodeesia ja maakorralduse õppekava raames, kuid tööd on võimalik ka kasutada arheoloogia kontekstis. Seal on detailselt kirjeldatud kasutatud tarkvara ja kaamerate erinevaid tulemusi, tuues välja olulised faktorid ning võrdluspunktid. Samuti on viimase kümne aasta jooksul „Arheoloogilised välitööd Eestis / Archaeological Fieldwork in Estonia“ kogumikkes üha rohkem esinenud artikleid, milles esitletakse uurimisobjekte 3D-mudelite või nendest tehtud ortofotode abil (nt Saage jt 2015; Laneman jt 2015; Sperling jt 2019).

Fotogramm-meetriat käsitlevatest töödest toon järgnevalt välja mõned, mis ei ole seotud arheoloogiaga. Esimene neist on Kaspar Huule (2016) kaitstud bakalaureusetöö, kus objekt on Raadi karjäär, mitte arheoloogilise väärtusega muistis või ese. Huul kirjeldab oma fotogramm-meetria protsessi ja 3D-mudeli tegemist, mis on piisavalt sarnane minu enda tööga ja seda uurimust võib pidada ka aktuaalseks arheoloogias. Teine töö Jürgen Resevi (2019) Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna magistritöö, mis käsitleb UAV mõõdistuste täpsust ja sobilikkust hoonete 3D-mudeli koostamiseks Tallinna Lennusadama näitel. Töö oli väga detailne ja tutvustas süvitsi aeropildistamise tehnilisi ning füüsikalisi aspekte. Kolmas on Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonnas kaitstud Robert Juhkam (2021) rakenduskõrghariduse töö, kus rakendati fotogramm-meetriat Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži linnakul 3D-modelleerimiseks. Objekti puhul kasutati nii aero- kui ka lähifotogramm-meetria võtteid.

2.3 3D-modelleerimise praktilised väljundid

Uurimistöö raames oli oluline nõu pidada mõne Eesti arheoloogiga. Töö juhendaja Ragnar Saage soovituse kohaselt pöördusin Tallinna Linnaplaneerimise arheoloogi Ragnar Nurga

poole, et arutada 3D-mudelite kasutust. Esitasin omapoolsed küsimused, mis keskendusid 3D-modelleerimisega seotud probleemidele ja 3D-mudelite aspektidele, mis on muinsuskaitse ja arheoloogiapärandi dokumenteerimise seisukohalt vajalikud. Nurk leidis, et 3D-mudelitest on oluline aruandesse tekitada ka püsiv 2D-jooniste komplekt, mis on üldtunnustatud koordinaat- ja kõrgussüsteemis ning kus arheoloogi poolse panusena on oluline eristatud ja välja toodud. Oluline on teha mõõdistajale selgeks, et ei tellita punktipilve, vaid see hõlmab ka koostööd arheoloogiga aruandekõlbulike joonisteni jõudmisel. Näiteks tõi ta laevavraki, mille mõõdistuste kõrval võiks ka aru saada laeva ehitusviisist. Ta leidis, et vrakkide puhul on probleemiks see, et 3D-mudeli piltidest ei tule välja piisavalt arusaadavalt laeva konstruktsioon ning laeva detailide mõõdud ja kuju. Küsisin näidet kõige terviklikumast 3D dokumenteerimise tulemusest, milleks ta tõi Rünno Vissaku (2019) aruande Tallinna Apteegi tänava 5; 7 ja 9 arheoloogilisest uuringust. Uuringu käigus kasutati fotogramm-meetria meetodit dokumenteerimisel, kus jäädvustati sel viisil kolme kõrvuti asetseva hoone keldrid ning kõikide nende seinte profiilivaated. Samasugune fotogramm-meetria dokumentatsioon viidi läbi ka Rosma linnuse väravakaevandi puhul, mis võimaldas teostada ortofotode ja profiilivaadete loomist.

3. Fotogramm-meetria kasutamine Rosma kaevamiste dokumenteerimisel ja kaevamistulemuste analüüsil

3.1 Eeltöö ja 3D-mudelite tegemine

Praktilise osa esimene etapp hõlmas koordinaatpunktide kokku viimist pildimaterjalidega ja andmestikku süstematiseerimine. Murekohad ilmnesid seoses sellega, et nii Heiki Valk ja Ragnar Saage kasutasid erinevaid tähistusi koordinaatide märgiseks, mida oli kolmanda isikuna keeruline kokku viia. Pildimaterjali oli palju, kuna kaevamise käigus tulid pidevalt esile uued olulised aspektid, mida fotogramm-meetria abil säilitada. 2020. aastal tehtud fotogramm-meetriast läks uurimistöö raames kasutusele kaks seeriat: H0 ja R1 (joonis 20). 2021. aastal oli tehtud 24 fotogramm-meetriat Rosma kaevandist ja 2022. aastal kaks. Käesolevas töös analüüsitud 3D-mudelite arv oli kokku üksteist: H0, R1, H2, R2, R3, R4, R5, H10, H13, H17 ja H18. Mudelite valik põhines sellel, millised kaevandi olulisemad etapid esinesid fotogramm-meetrial. 3D-mudelite nimed põhinevad piltide autorite nimedel Heiki Valk (tähistatud H) ja Ragnar Saage (tähistatud R). Fotogramm-meetria süsteem on esitatud tabeli kujul (tabel 1).

Kõik töös valminud mudelid on tehtud Tartu Ülikooli arheoloogia kabinetis. 3D-mudelite valmistamiseks kasutasin programmi *Agisoft Metashape Professional Edition* (edaspidi Metashape), mille nimi oli eelnevalt *Agisoft PhotoScan*. Esmalt importisin fotod programmi, kus moodustatakse tarkvara algoritmide kohaselt fotoplokid (*chunks*). Programmis oli omavaheliste asukohtade paikapanek olemas käsklusega *Align cameras*. Piltide sobitamiseks on vaja kõigepealt leida iseloomulikud punktid, mida omavahel sobitama hakata. Selleks on loodud sobitamise algoritmid (*Matching Algorithms*), nagu näiteks SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), millele sarnast algoritmi kasutatakse ka Metashape programmis (Agisoft Metashape 2021; Sepp jt 2016: 48). SIFT algoritmi tulemusena transformeeritakse piltide andmed mõõtkavast sõltumatusse koordinaatsüsteemi. Programm leiab fotodelt iseloomulikud punktid, arvutab nende tunnusvektorid, mille alusel fotod omavahel joonduvad. Pärast fotode sobitamist tuletatakse kaamera asukohad, orientatsioon ja punktide asukohad ruumis (Metsoja 2018: 30–31). Seda protsessi nimetatakse *Structure from Motion* (SFM) ja aluseks on perspektiivgeomeetria reeglid (Snavely 2008; Westoby jt 2012). Fotogramm-meetria peamine väljund on punktipilv. Punktipilv on 3D-koordinaat-süsteemis andmepunktide kogum x, y ja z tasanditel (Juhkam 2021: 11). Piltide joondamisega samaaegselt luuakse esmane 3D-mudel ehk hõre punktipilv, kasutades kiirtekimbu optimeerimist. Punktipilv aitab programmil

konstrueerida visuaalselt arusaadava mudeli ja on tähtis esmase tervikliku kuva saavutamise jaoks. Hõre punktipilv, koos kaamera asukohtadega on MVS (*multi-view stereo*) algoritmi sisendiks, et luua tihe punktipilv (*dense point cloud/densified point cloud*). MVS eesmärgiks on konstrueerida täielik piirkonna või objekti 3D-mudel (Seitz jt 2006). MVS protsessi esimeseks etapiks on punktide sobitamine, seejärel nende laiendamine ja filtreerimine. Hõreda punktipilve punkte laiendatakse pidevalt, kuni tekib tihe punktipilv. Seejärel eemaldatakse tihedast punktipilvest mittesobilikud punktid (Furukawa ja Ponce 2010). Tiheda punktipilve alusel koostatakse võrgustik (*mesh*), mille põhjal on võimalik luua objektist või piirkonnast pindobjekt. Selleks kasutatakse erinevaid võrrandeid. Üheks viisiks on arvutamine kolmnurkade abil ehk triangulatsioonimeetod. Hiljem on võimalik piltide alusel lisada pinnale tekstuur (Snavely 2008; Huul 2016: 8). Töö raames oli vajalik, et programm teeks mitu mudelit korraga. Seetõttu kasutasin käsklust *Batch Mode,* mille kaudu lisasin vajalikud parameetrid ja lasin programmil iseseisvalt mudeleid teha, salvestades mudeli seisu pärast igat tulemust.

3D-mudelite valmimise järgmine etapp on 3D-mudelite georefereerimine. Esmased hõredad punktipilved luuakse fotogramm-meetria programmi poolt suhtelises koordinaatsüsteemis (Liba 2005: 170), mida tuleb siduda geograafilise koordinaatsüsteemiga. Seda tehakse kasutades mõõdistatud sidepunkte (*Ground Control Points*). Markeerimispunktidena on mõistlik kasutada spetsiaalseid tähiseid, mida 3D-mudeli vaatamisel on lihtne tuvastada. Rosma 2021.–2022. a välitööde puhul kasutati markereid, mida programm ise automaatselt ei tuvastata, mistõttu tuli esmalt need käsitsi asetada. See tähendas seda, et igal mudelil oli vaja pildid läbi sirvida ja koordinaatide punktid asetada fotodel esinenud markeritele. Seejärel on võimalik kontrollpunktide koordinaadid otse Metashape programmi sisestada ja siis arvutab programm ise välja koordinaatide hälbed ning keskmised ruutvead (Metsoja 2018: 31–33).

Tabel 1. Rosmas tehtud pildiseeriad fotogramm-meetria jaoks. Lühendid: HV – Heiki Valk; RS – Ragnar Saage.

Nr.	kuupäev	Piltide autor	Leidis töös kasutust
R1	2020	RS	jah
H0	27.okt.20	HV	jah
H1	12.06.2021	HV	ei
H2	13.06.2021	HV	jah
H3	14.06.2021	HV	ei
H4	15.06.2021	HV	ei
H5	17.06.2022	HV	ei
R2	26.08.2021	RS	jah
R3	02.09.2021	RS	jah
R4	07.09.2021	RS	jah
H6	07.09.2021	HV	ei
H7	10.09.2021	HV	ei
R5	14.09.2021	RS	jah
H9	16.09.2021	HV	ei
H10	17.09.2021	HV	jah
H11	20.09.2021	HV	ei
H12	23.09.2021	HV	ei
H13	01.10.2021	HV	jah
H14	05.10.2021	HV	ei
H15	06.10.2021	HV	ei
H16	12.10.2021	HV	ei
H17	14.10.2021	HV	jah
H18	17.06.2022	HV	jah

3.2 Ortofotod

Käesolevas töös kasutasin Metashape'i praktilise väljundina tema võimet luua moonutusteta ortofotosid, mida saaks kasutada QGIS andmete kuvamisel kaardipõhjadena. Meetodi kirjeldusel lähtusin Ragnar Saage (2013) magistritööst. QGIS on vabavaraline geoinfosüsteem, mis võimaldab töödelda tahhümeetriga mõõdetud punktiandmeid. Ühtlasi lubab QGIS seada georefereerimise funktsiooniga enamlevinud pildiformaate kaardi- või joonisepõhjaks. Metashape programmis tegin eelnevalt mainitud *Batch mode'*i abil 3D-mudelitest ortomosaiigid, mille kandsin üle QGIS programmi. QGIS programmis tegin 3D-mudelitest kõrgusmudelid. 3D-mudelite puhul ühendasin QGIS tarkvara abil omavahel ortofoto ja kaldenurkade varjutused digitaalse kõrgusmudeli reljeefist. Ortomosaiigi täpsuse kontrollimiseks sisestasin QGISi vastava kaevandi koordinaadid ja võrdlesin neid 3D-mudelitel esinenud markeritega. See aitas tuvastada vigased markerid ja vales koordinaatsüsteemis ilmunud ortomosaiigid. Kirjeldatud meetodil tehtud plaanide tegemise eesmärgiks oli võrrelda kaevandit eri seisundites, et saada illustreerida neid kohti, kus olid tehtud sissekaeved pärast põlengujärgset väravakäigu täitumist vallikubatuuriga (joonised 8, 9, 10 ja 11). Samuti ka naelte (joonis 11) ja postiaukude (joonised 4 ja 7) ning tukkide (joonised 5 ja 6) asukohtade ja kontuuride esitamine. R5 3D-mudelil puudusid koordinaadid. Seetõttu tekitasin koordinaatpunktid R5 3D-mudelil R4 3D-mudeli järgi, asetades markerid mõlemal mudelil sama kohta. Valisin mõlemal mudelil detailsed kuid äratuntavad kohad, kuhu asetasin markerid (joonis 2). Seejärel tegin R5 3D-mudeli ortomosaiigi, mis QGIS programmis esines õigete mõõtmetega.

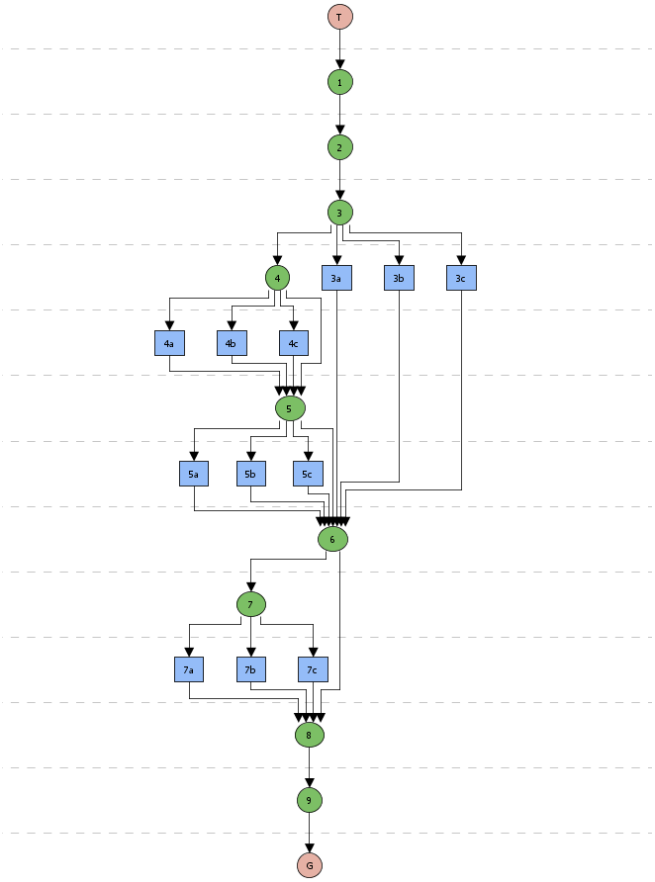
Joonis 2. R4 ja R5 3D-mudelitel asetatud markerid (üleval punkt 5; all punkt 7).

4. Tulemused ja analüüs

Rosma väravakäigu analüüs põhineb 2020.–2022. a välitööde juhendaja Heiki Valgu kirjeldustel ja tõlgendustel ning 3D-mudelitel.

4.1 Väravakäigu stratigraafia ja Harrise maatriks

Uurimistöö raames oli vajalik koostada Harrise maatriks, et esitada Rosma väravakaevandi stratigraafiline järjekord. Maatriksi töötas välja 1973. aastal Inglismaal dr Edward C. Harris ja selle põhiprintsiipe arutab raamatus *The laws of archaeological stratigraphy* (1979). Kirjelduses järgin Harrise teost *Principles of Archaeological Statigraphy* (Harris 1989).



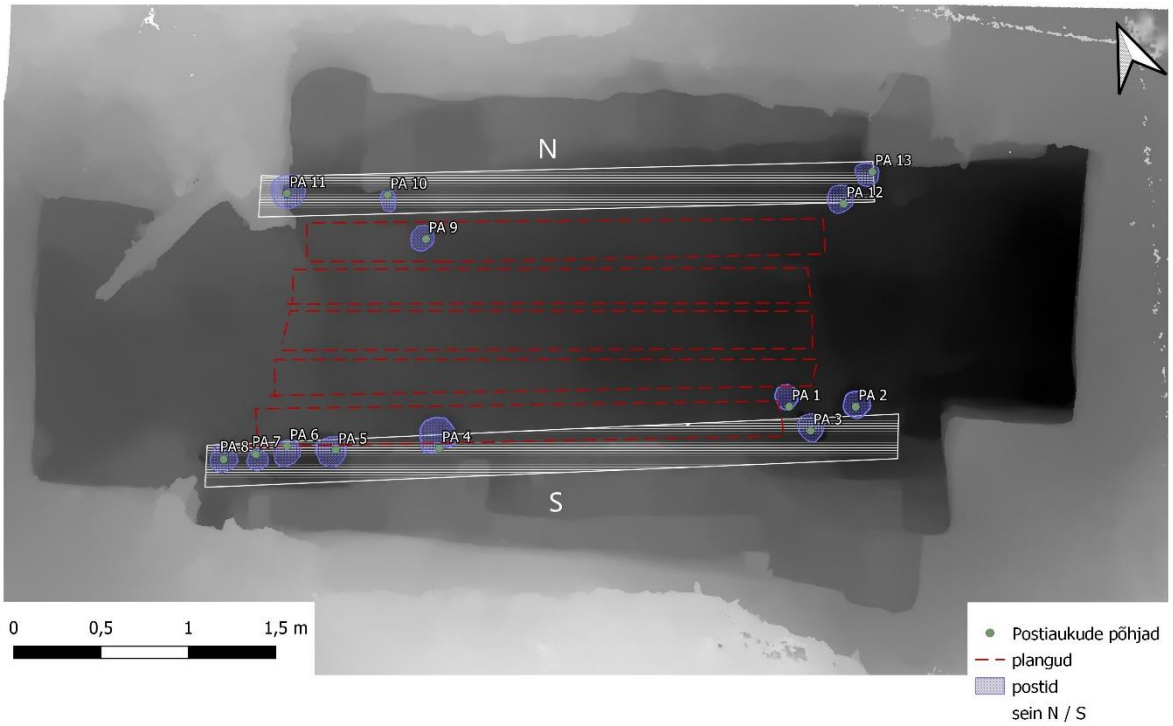
Harris kirjutab, et Harrise maatriks on nimi, mis antakse prinditud paberilehele, mis sisaldab ristkülikukujuliste kastide võrku. Nimel pole muud varjundit – ei matemaatilist ega muud – see on lihtsalt vorming kaevandi stratigraafiliste suhete eksponeerimiseks. Saadud diagramm, mida sageli nimetatakse lühendatult „maatriksiks“ kujutab kaevandi stratigraafilist järjestust. „Stratigraafiline jada“ on määratud kui kihtide ladestamise järjekord ja objektide liideste loomine aja jooksul arheoloogilisel alal (Harris 1989: 34–37).

Joonis 3. Rosma väravakäigu kaevandi Harrise maatriks. Koostamiseks kasutasin programmi Harris Matrix Composer (versioon v2.0b).

Maatriksis kasutatud kihinumbreid kasutan edaspidi kihtide üksteise eristamiseks. Stratigraafilise üksuste numbrid ja tähendused on järgmised:

1. Buldooseriga segatud pinnas.
2. Pärast sissekaeveid erosiooni toimel väravakäiku vajunud vallipinnas.
3. Väravakäiku varisenud naelte otsimisel tekkinud sissekaeved.
4. Väravakäiku varisenud pinnas ja tukid (sh „kilp“), tähistatud kui 4a, 4b ja 4c.
5. Must nõgiliiva kiht väravakäigu põhjas ja seal asetsevad tukid tähistatud kui 5a, 5b ja 5c.
6. Kohapeal säilinud – mitte varisenud – puitkonstruktsioonid.
7. Postiaugud, mis on individuaalselt välja toodud kui 7a, 7b, 7c kuid tegelik arv on 13.
8. Väravakäigu põhjas „musta kihi“ all olev ehitusaegse liikumise segi tallatud liiv.
9. Inimtegevusest puutumata looduslik mineraalpinnas.

Rosma kagupoolse väravakäigu kaevand 2021. a oktoobri seisuga oli u 8,9 m pikk ja 3,9 m lai; pindala u 30 m². Väravakäigu enda mõõtmed postiaukude järgi olid väiksemad. Põhjaküljel oli kahe kõige äärmise posti vahe 5,1 m ning lõunaküljel 5,3 m. Väravakäigu laius oli lääne pool 1,5 m ja ida pool 2 m. Väravakäigu rajamisel oli mäeplatoo serva kaevatud nõlvaga ristuv 1,5–2 m laiune kraav, mille servadesse olid rühmiti pandud postid. Need võisid toestada kisklaudadest plankusid, mis pidid tõkestama valliotste pinnase varisemist väravakäiku (joonis 4). Heiki Valgu hinnangu järgi (suulised andmed) oli ilmselt tegemist ajutise rajatisega, mis pidi takistama valliotste liivapinnase varisemist väravakäiku ehitustööde ajal. Postiaukude paiknemine ja samm näitavad, et tõenäoliselt ei olnud need mõeldud väravakäigu alalise konstruktsiooni jaoks, kuna postide vahe oli liiga pikk. Väravakäigu väljaehitamine oli tõenäoliselt kavandatud linnusevalli kõige viimaseks ehitustööks, millel oli praktiline põhjus – piisav ruum on oluline materjali transportimiseks linnuse õue.



Joonis 4. H17 DEM-il (kõrgusmudelil) illustreeritud väravakäigu lõppseis.

Joonis 5. H10 3D-mudeli ortofotol esitatud tukid.

Joonis 6. R3 3D-mudeli ortofotol risti üle väravakäigu langenud postide nr 16 ja 28 kontuurid.

Põlengust tingitud varingud toimusid mitmes järgus. Kaevamisi juhendanud Heiki Valgu tõlgenduse kohaselt (suulised andmed) oli sündmuste käik järgmine: esimese kompaktse, põlengust tuleneva varingu käigus tekkis väravakäigu põhja u 10 cm paksune must nõgiliiva kiht (5), mis sisaldas esimesena varisenud tukke (4) (joonis 5). Seejärel langes suurem kubatuur vallipinnast (2) ja põlemise käigus kukkusid kaks suuremat posti alla (4), joonistel esitatud kui tukk nr 16 ja 28 (joonis 6). Tukkide kogum ehk „kilp“ (nr 149) (4) (joonis 5) paiknes alumise nõgiliiva kihis (5) ja koosnes tihedalt ja vahetult üksteise kõrval olevatest tukkidest, kujutades endast põlengus varisenud konstruktsiooni. Et väravakäiku said tukid sisse kukkuda selle servaplankudest nii põhja kui lõuna suunas laiemale alale, tähendab seda, et väravakäigu külgesid vooderdanud plankude (tukid nr 109 ja 166) ja valli otste vaheline ruum pidi mingist kõrgusest alates olema tühi. Sellesse tühja ruumi olid ülalt varisenud näiteks tukid nr 53 ja 10. 3D-mudelitest tehtud ortofotodest ilmnes kõige selgem tukistik H10 mudelil (joonis 5).

2020. aastal esimesest ilmunud tukist võetud süsinikuproov andis kalibreeritud dateeringu 1225.–1295. a. 2022. aastal tukkide kihist võetud süsinikuproovid andsid dateeringu 660.–774. a, mis viitab värava olemasolule juba eelviikingiajal (tabel 2) (Heiki Valgu suulised andmed). Süsinikudateeringud lükkavad ümber varasema arusaama, et värav on ehitatud ühes järgus ja 13. sajandil. Selgus, et Rosma väraval on kaks eri aegadest pärit ehitusjärku.

Tabel 2. Rosma väravakäigu kaevandist võetud proovid.

Proovi nimi ja labori nr	Kuupäev	Proovi kirjeldus	14C BP, standardhälve	Kalibreeritud dateering (a pKr)
Rosma 3 Poz-133223	2020. aasta sügis	Tukk nr 1	745 ± 30	1225-1295 (95,4%)
Rosma 3a Poz-150654	02.11.2020	Tukk nr 19	800 ± 30	1180-1189 (1,8%) 1210-1279 (93,7%)
Rosma 4 Poz-150645	28.09.2021	Väravakilbi N-poolseim tukk, välimised säilinud ringid	1300 ± 30	68.3% tõenäosus 669 (33.7%) 702 741 (34.6%) 772 95.4% tõenäosus 660 (95.4%) 774
Rosma 5 Poz-150650	28.09.2021	Väravakilbi keskosa, välimised säilinud ringid	1295 ± 30	68.3% tõenäosus 670 (33.4%) 704 739 (34.9%) 772 95.4% tõenäosus 659 (95.4%) 775
Rosma 6 Poz-150649	23.09.2021	Tukk nr 133 välised säilinud ringid	1320 ± 30	68.3% tõenäosus 660 (33.4%) 685 743 (34.9%) 772 95.4% tõenäosus 652 (51.9%) 709 723 (43.6%) 775

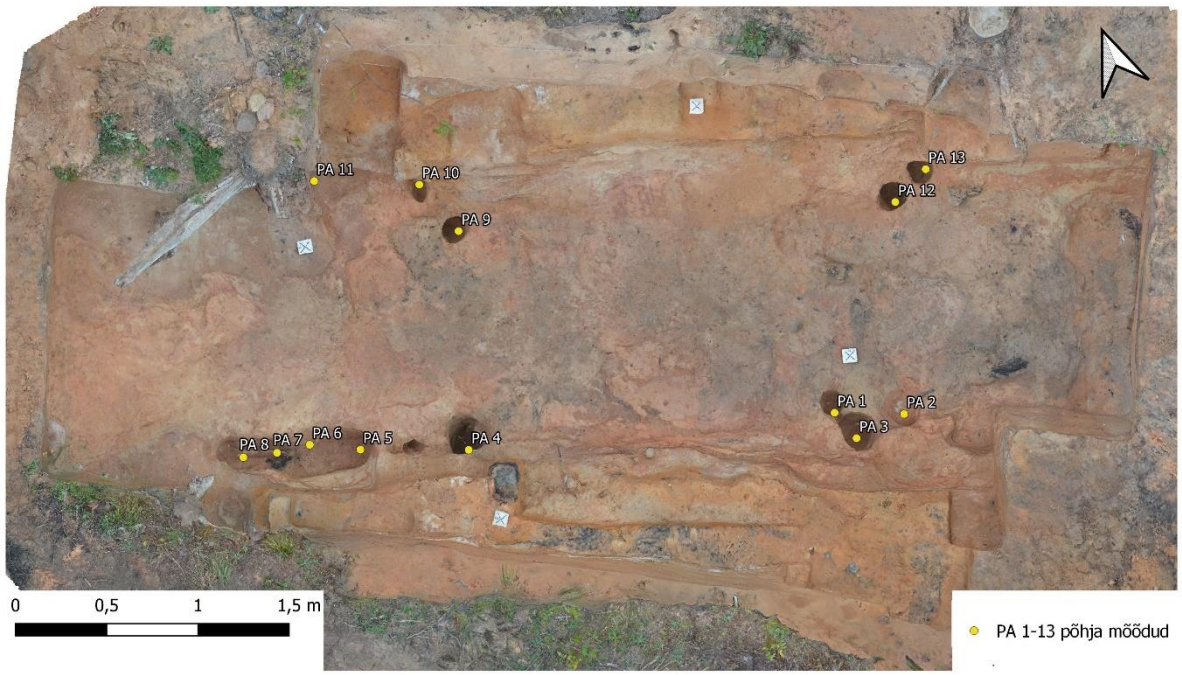
4.2 Postiaugud

Postide eesmärgiks näib olevat väravakäigu ajutiste tugiseinte hoidmine, et valliotste pinnas ehitustööde ajal alla ei langeks. Valgu hinnangu järgi (suulised andmed) on need olnud ajutised tugipostid, mis on hoidnud umbes meetri kõrgust seina. Nende vahel või postide ja vallipinnase vahel asetsesid 4–5 kisklauda, mis hoidsid ära valliotste varisemist väravakäiku. Väravakäigu põhjapoolsete postiaukude nr 9 ja 12 vahe oli 3,5 m ning aukude nr 10 ja 13 vahe oli 4,1 m.

Lõunapoolsete postiaukude nr 5 ja 3 vahe oli 4 m ning nr 4 ja 1 vahe oli 3 m. Rosma väravakäigus esines postide osas ebasümmeetria. Lõunaküljel oli kaheksa postiauku, põhjaküljel oli viis. Selle põhjuseks on Valgu hinnangul asjaolu, et lõuna pool oli toestamist vajav valliots laiem. Postiauk nr 8 oli pikliku kujuga ja selle funktsiooni selgitamisel tekkis küsimus, sest kaevamistel ei õnnestunud sellele teiselt poolt vastet leida (selleks mindi kaevamistel „koopana“ ka ortofotol (joonis 7) kujutatud kännu alla). Tehti järeldus, et post nr 8 toestas lõunapoolset, põhjapoolsest märksa laiemat valliotsa. Postiaukude nr 6 ja 11 kontuurid ei joonistu selgelt välja, mis võib olla tingitud sellest, et need olid kaevatud varem segatud pinnasesse (8), mitte inimtegevusest puutumata looduslikku mineraalpinnasesse (9). Postiaukude asukohad koos nimetustega on esitatud H17 kõrgusmudelil ja ortofotol (joonis 4 ja 7).

Tabel 3. Postiaukude mõõdetud kõrgused ja läbimõõdud.

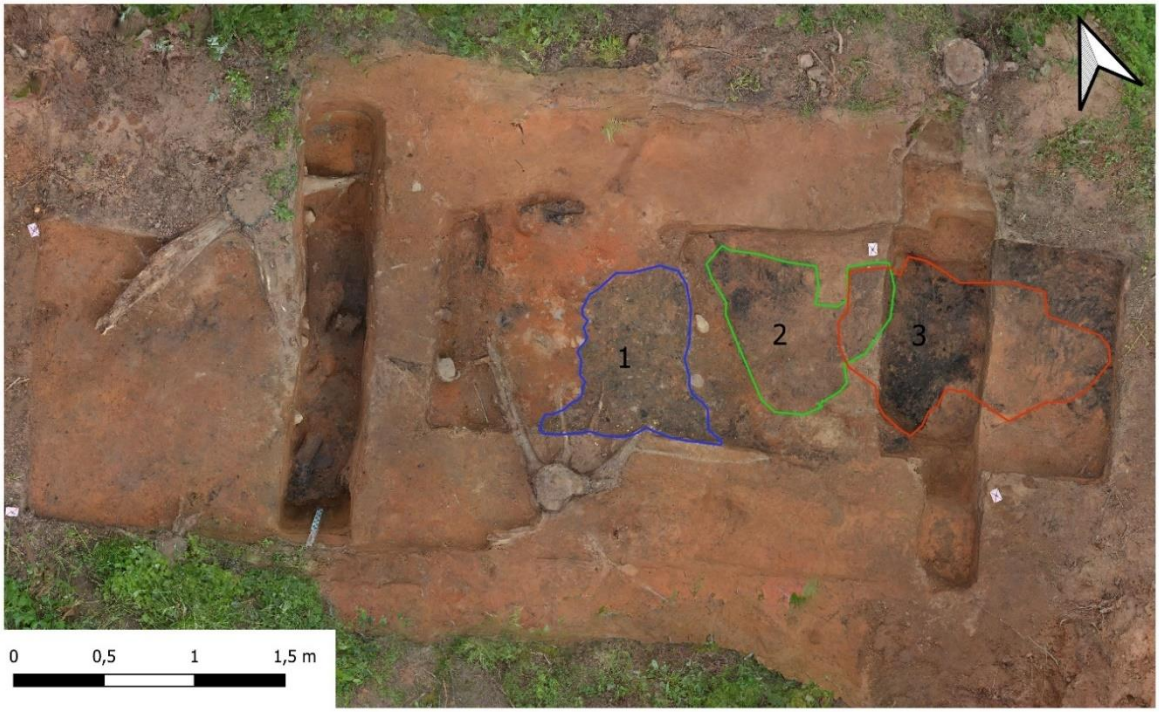
Postiaugu number	Kõrgus (m)	Läbimõõt (m)
1	68,64	0,14
2	68,51	0,15
3	68,36	0,16
4	68,64	0,16
5	69,04	Ei saa määrata
6	69,47	Ei saa määrata
7	69,07	0,14
8	69,45	Ei saa määrata
9	69,06	0,16
10	69,24	0,10
11	69,51	Ei saa määrata
12	68,44	0,17
13	68,49	0,15



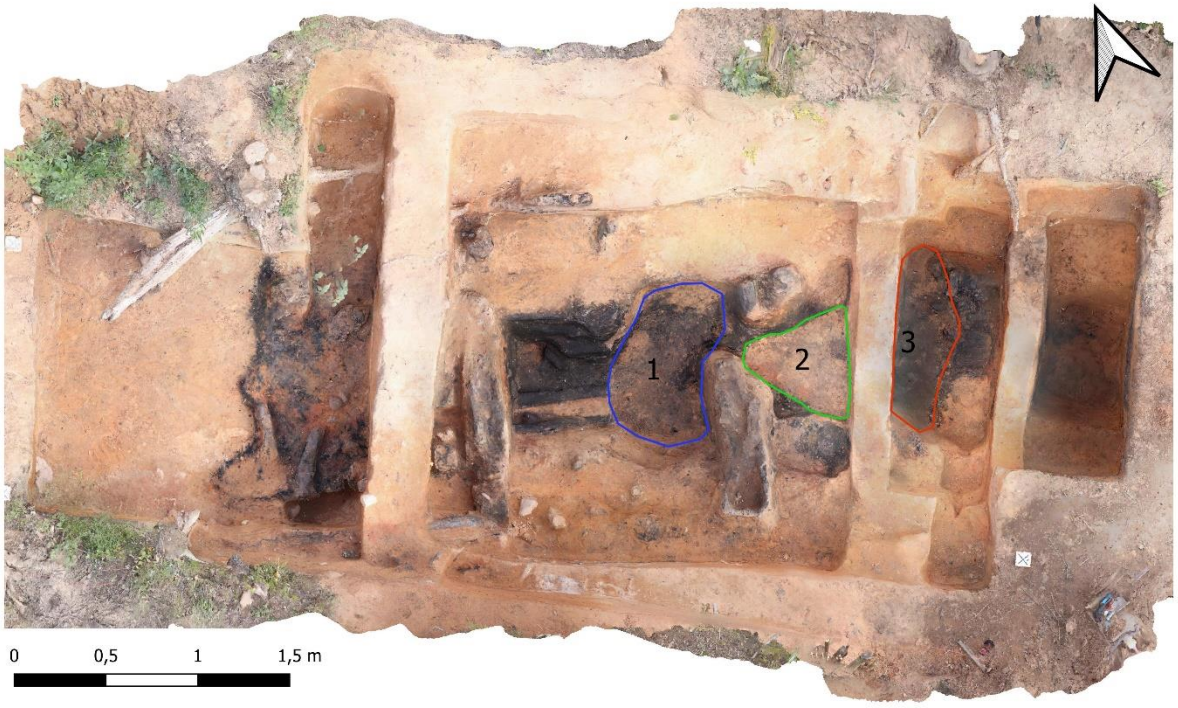
Joonis 7. H17 3D-mudeli ortofotol esitatud postiaugud.

4.3 Sissekaeved, varing ja naelad

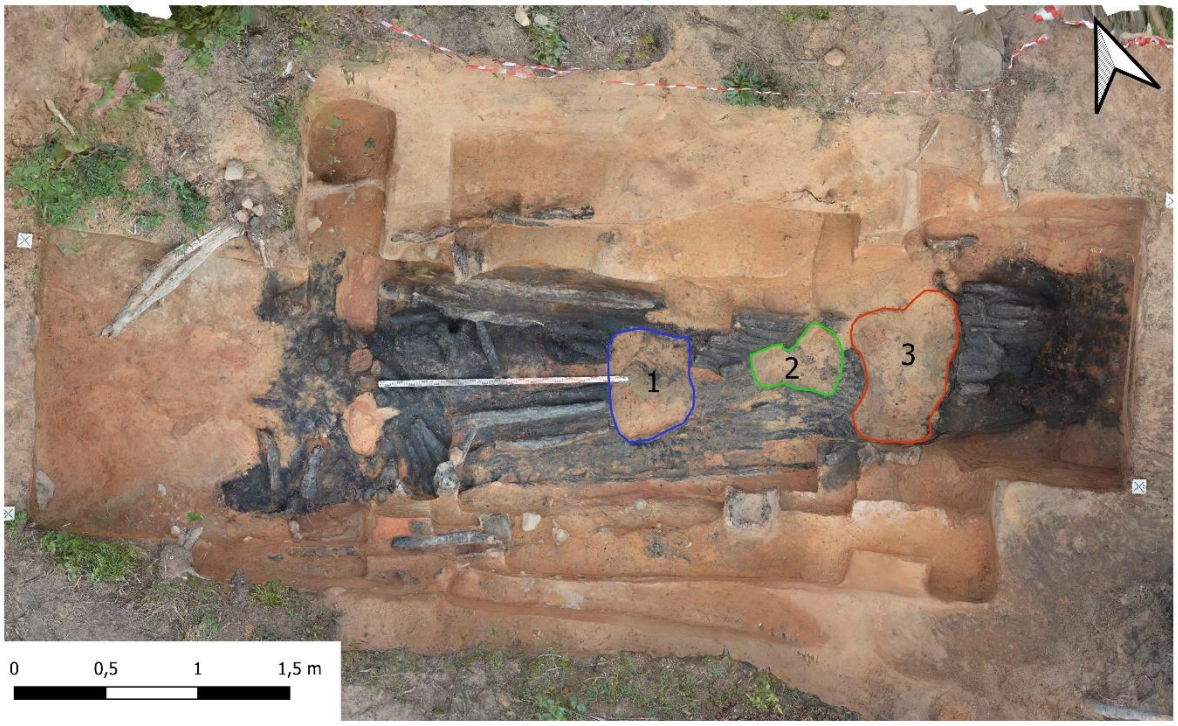
Pärast põlengu järgset väravakäigu täitumist ülalt varisenud vallikubatuuriga oli varingupinnasesse ja tukistikku tehtud mitu sissekaevet (maatriksis nr 3). Valgu arvates (suulised andmed) oli sissekaevete eesmärgiks leida põlenud puitkonstruktsioonidest pärinevaid naelu, mis olid ainukesed leiud peale vallipinnases esinenud, linnuse varasemast kasutusjärgust pärit keraamika. Sissekaevete piirid eri sügavustelt on illustreeritud H2, R3 ja H10 mudelitest tehtud ortofotodel (joonised 8, 9 ja 10). Sissekaevete piirjooned on H2 3D-mudeli ortofotol tehtud pinnase erinevuse järgi. R3 ja H10 3D-mudelitest tehtud ortofotodel moodustuvad tukistikus selged tühikud, mille alusel on piirjooned illustreeritud. Kaeved 2 ja 3 on tähistatud eraldi, kuid kõige väiksemas sügavuses (joonis 8) need osaliselt kattuvad. Seetõttu teen järelduse, et tegemist oli ühe suurema, kahte sügavamat kohta omava sissekaevega.



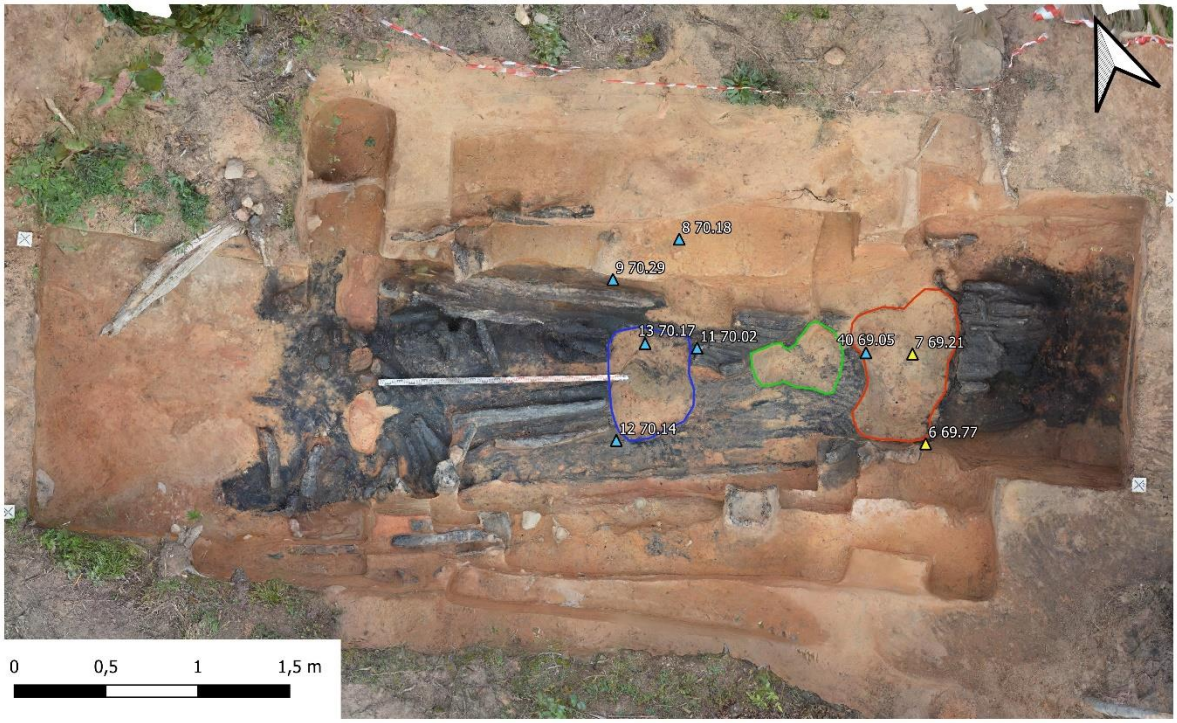
Joonis 8. H2 13.06.2021 3D-mudeli ortofotol sissekaevete piirjoontega tukistiku väljapuhastamise algusjärgus.



Joonis 9. R3 02.09.2021 3D-mudeli ortofoto sissekaevete piirjoontega pärast tukkide osalist väljapuhastamist.



Joonis 10. H10 17.09.2021 3D-mudeli ortofotol illustreeritud sissekaeved pärast tukkide väljapuhastamist.



Joonis 11. H10 17.09.2021 3D-mudeli ortofotol illustreeritud sissekaeved ning naelte asukohad koos nende numbrite ja kõrgustega.

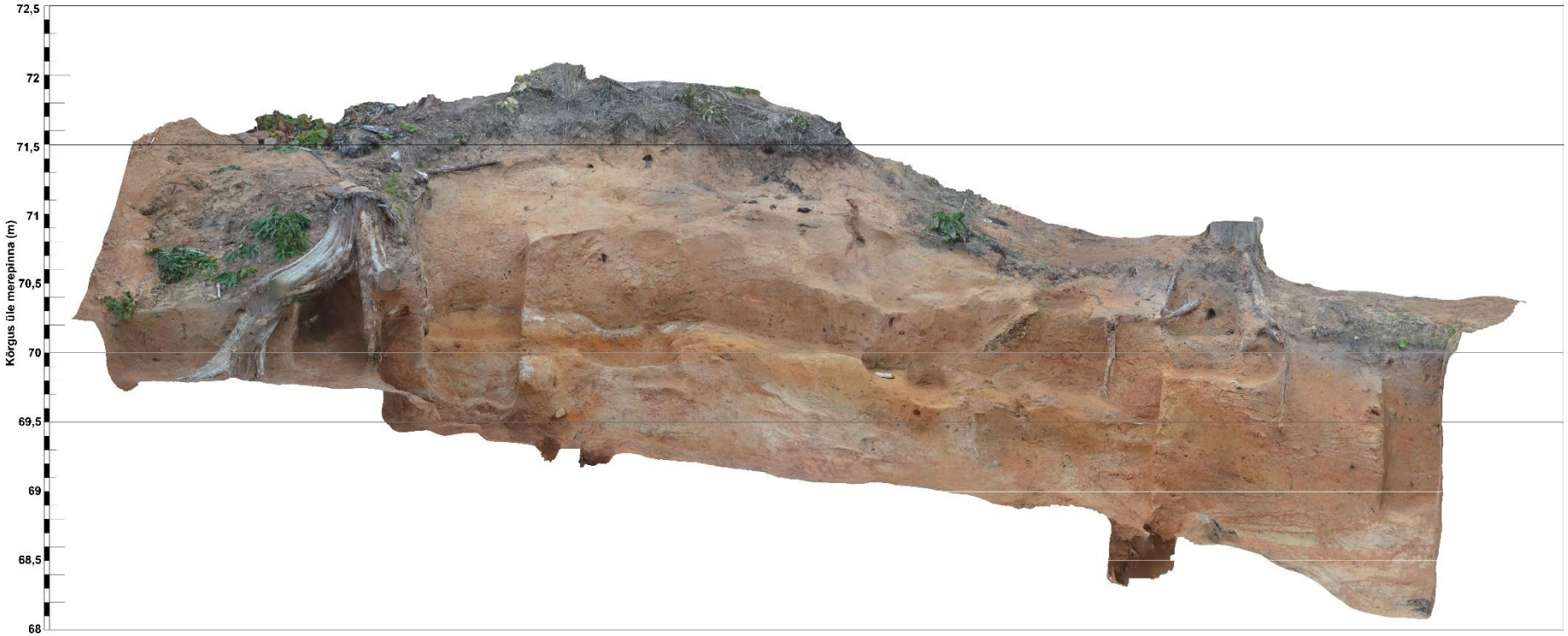
Kui lähtuda oletusest, et põlengujärgsete kaevete eesmärgiks oli leida naelu, siis on tarvis vaadata sissekaevete suhteid väravakäigust leitud naelte asukohtadega. Selleks esitan H10 mudelil sissekaeved koos 2020. a ja 2021. a tahhümeetriga mõõdetud naelte asukohtadega (leiunumbrid ja kõrgus) (joonis 11). Sissekaevete analüüsi esitan koos profiilivaadetega järgnevas alapeatükis.

4.4 Profiilivaated

Profiilivaadete koostamise eesmärk on illustreerida leeteliiva, sissekaevete ja varingu piirjooned. H17 3D-mudelist tegin profiilivaated kaevandi lõuna- ja põhjaprofiilidest. Profiili alumises osas on näha looduslikku hallikasvalget-punaseviirulist saviliiva, mille kohal on oranž liiv ja omakorda selle kohal on valge leeteliiva joon, mis ligikaudu märgistab maapinda enne linnuse tegemist (joonised 12 ja 13) – Heiki Valgu kogemuse põhjal algab leeteliiv maapinnast 10–15 cm sügavusel. Kaevamistel jäeti kaevandisse 3 profiilipeenart – õue, kesk- ja orupeenar. Nende ja kaevandi idaotsas oleva nõlvaprofiili asukohad illustreerin R3 3D-mudeli ortofotol (joonis 14). Profiilivaated tegin R3 (joonised 15 ja 16), R4 (joonis 17), R5 (joonised 18 ja 19) ja H17 (joonised 12, 13 ja 20) 3D-mudelitest, et illustreerida sissekaevete ja varingu piirjooned, kasutades Metashape programmi.

Profiilivaate tegemiseks tuleb 3D-mudeli originaalist teha koopia ja sealt profiil välja lõigata. See aga tekitab probleeme programmile, kuna mudeli geomeetria on tunduvalt vähenenud ja seetõttu tekivad tekstuuri loomisel vead. Nii R3 õuepeenra, R4 orupeenra ja R5 keskpeenra profiilidel tekkisid vigased profiilivaated. Vea parandamiseks sirvisin mudeli pilte ja keelasin kaamerad (*disable cameras*) piltidel, kus esines informatsioon, mis oli profiili segav. Seejärel kasutasin igal aktiivsel pildil peitetööriista (*masking tool*), et varjata ebavajalikud kivid ja kännud. Töös ei käsitle ma detailselt fotogramm-meetria tehnilisi aspekte – fotokaamera kvaliteeti ja pildistamise meetodit – kuid sellistel juhtudel, kus on jäetud kaevandi sisse profiilipeenar, on oluline kaevandit seestpoolt pildistada profiili suhtes võimalikult risti, et piltidel oleks kogu profiil teravalt üles võetud. Kuna kaevandis asetsesid orupoolsed profiilipeenrad lähestikku (näha R2, R3, R4 3D-mudelitel) ja nende vahel olev distants oli liiga väike – kõigest 0,84 m – et nende vahelisi profiile külgvaates pildistada, siis oli piltide ja hiljem 3D-mudelitest tehtud profiilide kvaliteet mõjutatud nendest oludest.

Joonis 12. H17 ja H18 3D-mudelitest kokku liidetud lõunapoolne profiilivaade (vasakpoolne madalam osa H18).



Joonis 13. H17 3D-mudeli põhjapoolne profiilivaade.

Joonis 14. R3 3D-mudeli ortofotol illustreeritud profiilipeenrad.

Orupeenra profiili täpsema kõrguse esitamiseks oli vajalik liita R3 profiilivaade H0 3D-mudeli profiilvaatega. Selle jaoks tuli Metashape programmis mudelid liita. Esialgu proovisin liita mudelite eraldi tehtud ortomosaiigid, mis ei õnnestunud. Seejärel proovisin 3D-mudelid omavahel liita käsklusega *Merge models*. Profiilivaade õnnestus, kuid esile kerkis asjaolu, et H0 mudeli koordinaadid, mis olid sisse mõõdetud aastal 2020, olid BK77 ehk Kroonlinna nulli süsteemis. Korrektse profiilivaate saavutamiseks tuli H0 koordinaatpunktid ümber arvutada praeguse, EH2000 ehk Amsterdami nulli kõrgusteks. H0 3D-mudelile määrasin parandatud koordinaatpunktid ning seejärel liitsin uuesti H0 ja R4 3D-mudelid (joonis 17).

Kahe 3D-mudeli liitmist kasutasin ka lõunaprofiili puhul. Liidetud on 2021. aasta viimne mudel H17 ja 2022. aasta väravakäigu „saba“ H18 (joonis 12).

Kui vaadata profiilijooniseid, siis keskpeenra idaprofiilil ulatub kaeve 3 hallikas segatud liivamass (3) kuni loodusliku mineraalpinnaseni (9) (joonis 18). Sarnaselt tuleb ka keskpeenra lääneprofiilis selgelt välja sissekaeve hallikas kausjas kuju, mis ulatub kuni kõrguseni 69.2 m. Selle ümber on heledam pinnas ja söeviirud ning kaeve põhjas on segatud tukid ja must nõgiliiv (5) (joonis 19). Need võivad illustreerida sissekaevete täitumist samast pärit pinnasega. Nõlvaprofiilil esineb selgesti kaeve 3 idapoolne serv, mida tähistab musta põhi kõrgusel 69.00 m. Kaeve põhjast allpool on tegemist varisenud erosioonipinnasega (2), mille all on must tukkidega kiht (6) (joonis 20).

Sissekaevete piirjoonte kõrval on ka varingut illustreerivad kohad. Põlengust tingitud varingud olid toimunud mitmes järgust. Kui vaadata orupeenart (joonis 17), siis siin ilmneb taas kausjas pinnase kuju ja keskosas selgete piirjoontega söeviirg. Kuna selle all leidus „kilp“ (tukkide kogum nr 149) (4), siis püstja sisselõike puhul ilmselt tegemist pärast erosiooni toimel väravakäiku vajunud vallipinnasega (2) ja sellesse tehtud sissekaeve (3) piirjoonega (joonis 18).

Joonis 15. R3 3D-mudeli õuepeenra idaprofiil.

Joonis 16. R3 3D-mudeli õuepeenra lääneprofiil.

Joonis 17. R4 ja H0 3D-mudelitest kokku liidetud orupeenra lääneprofiil.

Joonis 18. R5 3D-mudeli keskpeenra idapoolne profiilivaade.

Joonis 19. R5 3D-mudeli keskpeenra läänepoolne profiilivaade.

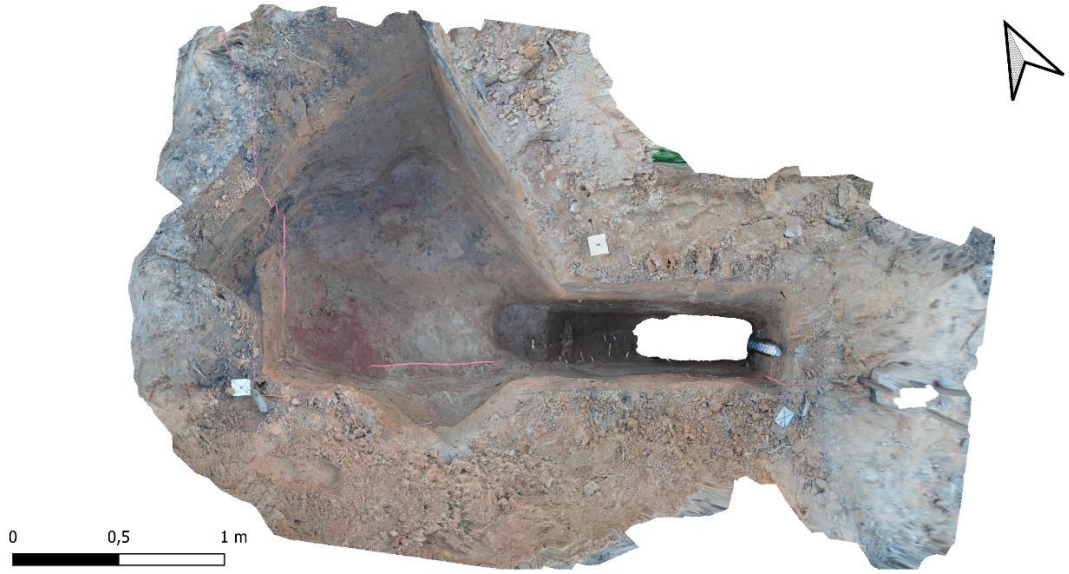
Joonis 20. H17 3D-mudelist tehtud nõlvaprofiil.

4.5 2022. aasta Rosma väravakäigu jätku-uuringud

2022. aasta juunikuus jätkusid Rosma väravakäigu arheoloogilised kaevamised. Eesmärgiks oli leida koht, kus väravakäigust viiv tee pöördub mäenõlval kõrvale lõuna poole, valliga paralleelseks. Selleks kaevati mulluse kaevandi lõunaprofiili pikendades alguses miniekskavaatoriga ja siis käsitsi 2,5 m pikkune „saba“ väravakäigu idaküljest edasi pärast seda, kui töös eelnevalt käsitletud väravakaevand oli eelmisel sügisel kinni aetud. 2022. aastal täiendavalt avatud osa kujutab mudel H18 (joonis 21). „Saba“ kõige sügavama osa punkt ulatub sügavuseni 67.80 m (joonis 12). Kaevamise käigus leiti, et väravakäigu tee viib kogu avatud ala ulatuses otse alla ning pöördepunkti ei esinenud.

H18 3D-mudeli liitmise meetod on kirjeldatud varasemas alapeatükis, kuid profiili vaadates võivad värvid tunduda petlikud. H17 3D-mudelile juurde liidetud H18 (joonis 12) tooni erinevus tuleneb sellest, et „saba“ olik kitsas ja sügav, 1,72 m sügavune ja 0,35 m laiune. Seetõttu on pildistamisel jäänud kitsas osa tumedaks ja erinevad valgusolud annavad tulemuse, mis pildil mõjuvad eksitavana – „must“ toon on pildistamisest tulenev, mitte pinnast.

H18 3D-mudeli profiilil (joonis 12) ilmeb taas looduslik hallikasvalge-punaseviiruline saviliiv, mida võib näha jätkuvana H17 3D-mudelist. Kaevandi põhjas edelaosas (joonis 21) ilmeb punane looduslik saviliiv. „Saba“ kaevamisel ei saadud ühtegi leidu ning puudusid tukid või muud põlengu ja vallivaringuga seotud pinnasemuudatused.



Joonis 21. H18 3D-mudeli ortofot

4.6 Rosma väravakäik võrdluses teiste Eesti linnuste väravakäikudega

Rosma linnuse kagupoolses väravakäigus esines kaks väravakäiku, mille ehitusaegadel oli ligi 400 a. pikkune erinevus. Seega võime väita, et tegu on kahe täiesti erineva linnusega, mis asusid samas kohas ning mitte sama värava erinevate ehitusjärkudega. 13. sajandi lõpuks oli vanemast väravakäigust väike „sissesõidutee“ jääk mäeplatoo serval. Seetõttu võrdlen Rosma väravakäiku nii eelviikingiaegsete Iru linnuse väravakäikudega kui ka 13. sajandist pärinevate väravakäikudega.

Iru *Linnapära* sisaldab asutusjälgi mitmest eri erinevast perioodist. Enamik leiumaterjalist ja avastatud ehitusrusudest kuulub 6.–11. sajandisse. Irus asus üks väravakäik linnuse põhjaküljel, kaks väravakäiku keskvallis ja üks õue lääneservas olevas taras (Tõnisson 2008: 102–103). Põhjakülje väravakäik asetses Artur Vassara (1939: 64) kohaselt sealse valli idapoolse otsa juures, kuid selle võimaliku väravakäigu ehitusest mingeid konstruktsiooni nähtavale ei tulnud. Keskvalli olulisem osa oli idaotsa läänejalamil asuv tornrajatis. Torn oli ilmselt rajatud selle kõrval olnud 3 m laiuse väravakäigu kaitseks. Keskvalli läänepoolses osas paiknes kitsam, 0,6–0,9 laiune väravakäik. Kitsas, 0,6–1 m laiune väravakoht avastati Irus ka linnuse õue lääneserva ääristavas kaitsetaras. Nii ida- kui ka läänepoolsed keskvalli väravakäigud olid kivimüüriga piiratud (Tõnisson 2008: 102–103). Torni kõrval asuva väravakäigu juures tekitab küsimuse selle ebatavaliselt suur laius – nimelt 3 m – mis on umbes 1 m võrra enam kui Lõhavere kagupoolne väravakäik, Pada I väravakäik, Varbola väravakäigud ja viimase paari aasta jooksul uuritud Rosma kagupoolne väravakäik.

13. sajandist pärit väravakäike Eestis on uuritud Varbola, Pada I ja Lõhavere linnustel. Pada I linnuse väravakäik on ligi 2 m laiune ja postikohad olid jälgitavad paekivist valli kuivmüürseinas olevate tühikute järgi, kus postidest olid säilinud vähesed söestunud jäänused. Müüri süvendites leidus 12 postiauku ning postide läbimõõduks on olnud 20–30 cm. Keskosas seisid vastastikku kaksikpostid, kuid värava asukoht jäi lahtiseks. Üheks väravakäigu võimalikuks asukohaks oli kaksikpostide juurde jääv käigu keskosa. Käigust leiti rohkelt tukke, mis ilmselt pärinesid selle pealisehitusest (Tamla 1986; Tõnisson 2008: 109).

Varbola Jaanilinna läänepoolsest väravakäigus tulid pärast sisse varisenud kivilasu eemaldamist nähtavale selle algsed paekividest kivimüürina laotud ja puupostidega toestatud küljeseinad (Tamla ja Tõnisson 1986: 373–375). Nii lõuna- kui põhjapoolses seinas oli seitse

postikohta. Lõunapoolse seina iga posti vastas oli ka põhjakülje seinas olnud kaksikpost. Küljemüüri kõige alumiste kividega samal tasemel tuli käigu sees nähtavale ka paeplaate, mis arvatavasti pärinesid väravakäigu põhja sillutisest (Tõnisson 2008: 103–104).

Lõhavere linnuse kahest väravakäigust kirdepoolse küljemüüre ja ühtlasi ka käigu ülaosa toestasid tugevad puupostid, millest olid säilinud nende söestunud osad (Tõnisson 2008: 97–101). Väravakäigu postide ülaosad olid täielikult ära põlenud, mistõttu nende algne kõrgus jäi teadmata. Postide alumine, tulest puutumata osa oli täielikult kõdunenud. Jälgitavad olid aga postiaugud sinna postide kinni kiilumiseks pandud kividega. Postid olid asetatud paariviisi vastastikku. Väravakäigu laiusele vastav postipaari vahekaugus teineteisest oli 1,8 m. Kagupoolne väravakäik oli kitsam – laius ulatus 0,9 m. Küljemüüre toetasid paariviisi asetatud postid, mida seal esines rohkem ja tihedamalt. Selle väravakäigu jäänuste alt leitud alumise varasema väravakäigu laius on olnud ligi 2 m, mis vastab umbes linnuse peaväravakäigu laiusele linnuse kirdeküljel. Erinevalt ülemistest puudusid kagupoolsel varasemal väravakäigul kividest laotud küljeseinad. Viimaste asemel võisid arvatavasti olla postidega toestatud seinad (Moora ja Saadre 1939; Tõnisson 1978 a, b; Moora 1985).

Rosma väravakäigu varasem järk tundub olevat kõige sarnasem Lõhavere kagupoolse väravakäigu varasema järguga (tabel 4). Teistel kirjeldatud väravakäikudel on kivimüürseinad, milles esinesid tühikutes olevad postid. Rosma kagupoolses väravakäigus kivimüürseina ei ole esinenud ja tugipostide vahel või taga asetsesid puidust lauad (joonis 4).

Rosma linnamäe hilisema, ringvalli aegse väravakäigu kohta on andmeid üldistuste tegemiseks liiga vähe. Ilmselt pärinevad kõnesolevast ehitusjärgust väravakäigu kõrval olnud kõrgendik ja tõenäoliselt ka kaks sellelt risti üle väravakäigu langenud põlenud posti, käesoleva töö raames nimetatud kui tukk nr 16 ja 28 (joonis 6), kuid viimaste radiosüsinikudateeringute tulemused ei ole töö koostamise ajaks veel saabunud.

Tabel 4. Rosma ja Lõhavere kagupoolsete väravakäikude andmete võrdlus.

	Lõhavere	Rosma
Postide arv ja asend	14 (sümmeetriliselt)	13 (ebasümmeetriliselt)
Postide läbimõõt	0,30 (m)	0,15 (m)
Pikkus	5 (m)	5,3 (m)
Laius	0,9 (1. faas) ja – 2 (2. faas) m	1,5–2 (m)

Kokkuvõte

Eesti arheoloogias on laiemalt aru saadud sellest, et fotogramm-meetria on hea viis, kuidas dokumenteerida muistiseid ja kaevamisi. Oma töö raames proovisin leida täiendavaid võimalusi 3D-mudelite potentsiaali ärakasutamiseks. Uurimistöö lähtub 2020.–2022. aastal toimunud Rosma linnuse kagupoolse väravakäigu väljakaevamiste materjalidest: kasutasin fotogramm-meetria abil tehtud 3D-mudeleid ning genereerisin neist ortofotosid ja kaevandiprofiile.

2020. aastal tehtud fotogramm-meetriast läks uurimistöö raames kasutusele kaks fotoseeriat: H0 ja R1. 2021. aastal oli tehtud 24 fotogramm-meetriat Rosma kaevandist, 2022. aastal kaks. Käesoleva töö jaoks koostasin kokku üksteist 3D-mudelit: H0, R1, H2, R2, R3, R4, R5, H10, H13, H17 ja H18. Fotoseeriate valik 3D-mudelite tegemiseks põhines sellel, millised kaevamiste olulisemad etapid neil esinesid. 3D-mudelite valmistamiseks kasutasin programmi *Agisoft Metashape Professional Edition*.

Programmi Metashape'i esimene praktiline väljund oli tema võime luua moonutusteta ortofotosid, mida saaks kasutada QGISis andmete kuvamisel kaardipõhjadena. Selle jaoks tegin Metashape programmis ortomosaiigid, mille kandsin üle QGIS progammi. Ortomosaiigi täpsust kontrollides tuvastasin vigased markerid ja vales koordinaatsüsteemis esinenud ortomosaiigid. R5 3D-mudelil puudusid koordinaadid, mistõttu tekitasin koordinaatpunktid R5 3D-mudelil R4 3D-mudeli järgi, valides mõlemal mudelil detailsed kuid äratuntavad kohad, kuhu asetasin markerid. Seejärel tegin R5 3D-mudeli ortomosaiigi, mis QGIS programmis esines õigete mõõtmetega.

Töö raames koostasin Rosma väravakaevandi stratigraafilise järjekorra esitamiseks Harrise maatriksi. Töö ühe juhendaja Heiki Valgu tõlgenduste kohaselt esitasin väravakäigu rajamise, väljaehitamise ja põlengust tulenevate varingute järjekorra. Seejärel kasutasin H17 ortofotot, et esitada postiaukude asukohad koos nende vahel või ümber paiknenud seintega. Rosma väravakäigus esines postide osas ebasümmeetria: lõunaküljel oli kaheksa postiauku, põhjaküljel oli viis. Selle põhjuseks võis olla lõunapoolse, põhjapoolsest märksa laiema valliotsa toestus. Varsti pärast põlengu järgset väravakäigu täitumist ülalt varisenud vallikubatuuriga tehti varingupinnassesse ja tukistikku mitu sissekaevet, mida tähistasin kui kaeved 1, 2 ja 3. Sissekaevete piirid eri sügavustel illustreerisin H2, R3 ja H10 3D-mudelitest tehtud ortofotodel. Vaadates sissekaevete suhteid väravakäigust leitud naelte asukohtadega võis oletada, et need

võivad olla seotud põlenud kaitseehitisest pärit naelte otsimisega. 2020. ja 2021. aastal tukkidest võetud proovide andmete põhjal võib järeldada, et Rosma värav ehitati erinevatel aegadel ning vanim järk ulatub tagasi eelviikingiaega ja hilisem järk 13. sajandisse. See lükkab ümber senise arusaama, et värav ehitati ühes järgus.

Metashape programmi teiseks praktiliseks väljundiks oli profiilivaadete tegemine. Profiilivaadete koostamise eesmärk oli illustreerida loodusliku, inimtegevusest puutumata pinnast markeeriva leeteliiva, sissekaevete ja varingu piirjooned. H17 3D-mudelist tegin profiilivaate põhjaprofiilist, kuid lõunaprofiili esitamiseks liitsin H17 ja H18 3D-mudelid. Profiili alumises osas oli näha looduslikku hallikasvalget-punaseviirulist saviliiva, mille kohal oli oranž liiv ja omakorda selle kohal oli valge leeteliiva joon, mis ligikaudu märgistas maapinda enne linnuse tegemist. Profiilivaated tegin ka kolmest profiilipeenrast – R3 õuepeenrast, R4 orupeenrast, R5 keskpeenrast, et illustreerida sissekaevete ja varingu piirjooned.

Profiilivaadetes eristusid samuti sissekaevete piirjooned. Keskpeenra idaprofiilis ulatus kaeve 3 hallikas segatud liivamass kuni loodusliku mineraalpinnaseni. Sarnaselt tuli ka keskpeenra läneprofiilis selgelt välja sissekaeve hallikas kausjas kuju, kui põhjani see ei ulatunud. Nõlvaprofiilil ulatus sissekaeve profiili keskpaika. Kaeve põhjast allpool oli tegemist varisenud erosioonipinnasega, mille all oli must tukkidega kiht. Profiilides olid sissekaevete piirjoonte kõrval jälgitavad ka varingut illustreerivad kohad. Orupeenra profiilil ilmnes söeviirg, mille all oli kompaktne tukkide kogum. Tõenäoliselt tekkis söeviirg hilisema varingu käigus.

2022. aastal jätku-uuringutel kaevati mulluse kaevandi lõunaprofiili pikendades väravakäigust väljuv tee, et leida koht, kus see pöördub mäenõlval kõrvale, valliga paralleelseks. Kaevamisel ei leitud ühtegi leidu ega muutusi maapinnas. Edasises uurimises võrdlesin Rosma väravakäiku teiste Eesti linnuste väravakäikudega. Rosma väravakäigu varasem järk oli kõige sarnasem Lõhavere kagupoolse väravakäigu varasema järguga millel puudusid kividest laotud küljeseinad, kuid Rosma väravakäigu hilisema järgu kohta ei olnud võimalik praeguste andmete põhjal järeldusi teha.

Fotogramm-meetria abil dokumenteeriti Rosma linnuse kagupoolse väravakäigu keeruline stratigraafia, millest tehtud 3D-mudelite, ortofotode ja profiilide analüüs tõi välja täiendavaid aspekte nagu naelte seosed sissekaevetega ja kaevandi eri etappide rekonstrueerimine. 3D-mudelitest tehtud ortofotodel esitasin postiaugud koos nende vahel või postide ja vallipinnase

vahel asetsenud kisklaudadest tugiseinaga. Samuti oli võimalik 3D-mudelitest tehtud ortofotodel visualiseerida sissekaevete piirid koos nende sees ja ümber asuvate naeltega.

Fotogramm-meetria kasutamine ja 3D-mudelite loomine on tõhusad meetodid arheoloogiliste uuringute läbiviimisel. See võimaldab uurijatel saada üksikasjalikku ja täpset teavet kaevandi kohta ning visualiseerida seda ruumilises kontekstis. Fotogramm-meetria meetod on efektiivne mitte ainult kaevandi kujutise täpsuse ja täielikkuse tagamisel, vaid ka kaevandis asetsevate struktuuride vaheliste ruumide visualiseerimisel, võimaldades uurijatel täpsemalt otsustada kaevetööde jätkamise või katkestamise üle.

Kasutatud kirjandus

Agisoft Metashape … (2021): Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.7.

https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_7_en.pdf (17.05.2023)

De Reu, Jeroen & De Clercq, Wim & Sergant, Joris & Deconynck, Jasper & Laloo, Pieter. (2013). Orthophoto mapping and digital surface modeling for archaeological excavations an image-based 3D modeling approach. – 2013 Digital Heritage International Congress (DigitalHeritage), 205–208.

Deconynck, J., Herremans, D., Laloo, P., Meirvenne, V. M., Clercq, W. D. (2012). Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaelogical heritage. – Journal of Archaelogical Science 40 (2013), 1108–1121.

Furukawa, Y., Ponce, J. (2010). Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, no. 8, 1362–1376.

Harris, E. C. (1979). The Laws of Archaeological Stratigraphy. – World Archaeology, Vol. 11, No. 1, Early Chemical Technology (Jun., 1979), 111–117.

Harris, E. C. (1989). Principles of archaeological stratigraphy. London: Academic Press, 1989.

Huul, K. (2016). Drooni fotogramm-meetria rakendamine kõrgusmudelite ja ortofotode loomiseks Raadi karjääri näitel. Bakalaureusetöö. Tartu Ülikooli ökoloogia ja maateaduse instituut.

https://dspace.ut.ee/handle/10062/52945 (17.05.2023)

Juhkam, R. (2021). Fotogramm-meetria rakendamine Tallinna Tehnikaülikooli Tartu kolledži linnaku 3D-modelleerimiseks. Rakenduskõrghariduse töö. Tartu.

https://digikogu.taltech.ee/et/Item/f0e6abc6-619c-4d96-a648-8cd80c6c1e8f (17.05.2023)

Kangur, M. (2016). Fotokaameraga tehtud fotode põhjal loodud 3D mudeli kvaliteeti mõjutavad faktorid. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu.

https://dspace.emu.ee/xmlui/bitstream/handle/10492/2631/Martin_Kangur_2016BA_GE_t%C3%A4istekst.pdf?sequence=3 (17.05.2023)

Laksa, E. (2013). Lähifotogramm-meetria arheoloogias: Igaüks saab hakkama. Tartu Ülikool, Tartu. Proseminaritöö.

http://www.arheo.ut.ee/docs/proseminaritoo_edgar_laksa.pdf (17.05.2023)

Laneman, M., Lang, V., Saage, R. (2016). Burial site hidden in a clearance cairn at Alu, Raplamaa. – Archaeological Fieldwork in Estonia 2015, 35–46.

Liba, N. (2005). Fotogramm-meetria alused. Tartu.

Lo Brutto, M., Meli, P. (2012). Computer Vision Tools for 3D Modeling in Archaeology. – International Journal of Heritage in the Digital Era. 1. 1-6. 10.1260/2047–4970.1.0.1.

Memon, A. Z., Majid, M. Z. A. (2006). The Use Of Photogrammetry Techniques To Evaluate The Construction Project Progress. – Jurnal Teknologi. 44. 10.11113/jt.v44.358.

Metsoja, K. (2018). Fotokaamerate ja tarkvarade võrdlus lähifotogramm-meetriliste 3D-mudelite loomisel. Bakalaureusetöö.
https://dspace.emu.ee/xmlui/handle/10492/4177 (17.05.2023)

Moora, H., Saadre, O. (1939). Lõhavere linnamägi. – Muistse Eesti linnused. 1936.–1938. a. uurimiste tulemused. Tartu, 139–182.

Moora, H. (1985). Aruanne Lõhavere linnamäe kaevamistest 1958. aastal ja tööde lõpetamisest 1959. aastal.

Pagi, H., Kimber, A. (2017). Tallinna lennujaama territooriumil paikneva lohukivi reg nr 2615 dokumenteerimine 15. veebruaril 2017. Aruanne Muinsuskaitseameti arhiivis.
https://register.muinas.ee/ftp/Arheoloogia/2615_TLL-lennujaam_lohukivi_3Daruanne.pdf (17.05.2023)

Randoja, K., Jäger, S. (2021). Aruanne arheoloogilisest jälgimisest Põlvamaal Rosma-Peri jalgratta- ja jalgtee rajamisel arheoloogiamälestiste linnus (reg nr 1159) ja asulakoht (reg nr 1152) kaitsevööndites 11.01. ja 10.05.2021. Tartu-Tallinn 2021.
https://register.muinas.ee/ftp/Arheoloogiliste%20uuringute%20aruanded/L-25276_Ajlg_2021_RandojaKjt_linnus-11519_Polvamaa-Rosma.pdf (17.05.2023)

Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling-Current status and future perspectives. – ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXXVIII-1/C22. 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011, Zurich, Switzerland, 14–16.

Remondino, F., Campana, S. (2014). 3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. – Theory and Best Practices. – Archaeopress BAR.

Resev, J. (2019). UAV fotogramm-meetria kasutamine hoone välisgeomeetria mõõdistamisel ja deformatsioonide tuvastamisel Tallinna Lennusadama näitel. Lõputöö. Tallinna Tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituut.
https://digikogu.taltech.ee/en/Item/631b76ab-ed6f-4628-b70b-6cf20f828da5 (17.05.2023)

Saage, R. (2013). Käku sepikoda. Arheoloogia väljas ja sees. Magistritöö. Tartu Ülikooli ajaloo- ja arheoloogia instituut. Tartu.
https://dspace.ut.ee/handle/10062/30625 (17.05.2023)

Saage, R., Peets, J., Tiidu, E., Maldre, L. (2015). New research results from the smithy site of Käku in 2013–2014. – Archaeological Fieldwork in Estonia 2014, 193–204.

Saage, R. (2020). Metallitööpaigad Eestis 7.–17. sajandini. „Metalworking Sites in Estonia during the 7th–17th Centuries". Doktoritöö. Tartu Ülikooli Kirjastus.
http://dspace.ut.ee/handle/10062/67091 (17.05.2023)

Schenk, T. (2005). Introduction to Photogrammetry. The Ohio State University, Columbus.

Seitz, S.M., Curless, B., Diebel, J., Scharstein, D., Szeliski, R. (2006). A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. – *2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)* 1 (2006), 519–528.

Sepp, E., Oja, T. (2016). UAV-ga kogutud andmete põhjal loodud ortofoto ja reljeefimudeli täpsus. – Kaugseire Eestis 2016, Tõravere 2016: Tartu Observatoorium, 47–57.

Snavely, N. K. (2008). Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections. Phd thesis, University of Washington.

Sperling, U., Karlsen, H.J., Lang, V., Kimber, A. Lõugas, L., Lau, R. (2019). Ausgrabungen in der Bronzezeitsiedlung von Asva im Jahr 2019. – Archaeological Fieldwork in Estonia 2019, 51–60.

Tamla, T. (1986) = Тамла Т. Уникальная оборительная конструкция на первом городище Пада. – Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised, Ühiskonnateadused, 35: 4, 366–370.

Tamla, Ü., Tõnisson, E. (1986) = Тамла Ю., Тыниссон Э. Исследования на городище Варбола-Яанилинн. – Eesti NSV Teaduste Akadeemia Toimetised, Ühiskonnateadused, 35: 4, 373–377.

Tõnisson, E. (1978). Aruanne Lõhavere linnamäe kaevamistest 1959. a. Aruanne Tartu Ülikooli arheoloogiaarhiivis.

Tõnisson, E. (1978). Aruanne Lõhavere linnamäe kaevamistest 1960. a. Aruanne Tartu Ülikooli arheoloogiaarhiivis.

Tõnisson, E. (1981). Summitas castri tähendusest Henriku Liivimaa kroonikas. Eesti ajaloo probleeme. ENSV Teaduste Akadeemia korrespondentliikme Artur Vassara 70. sünniaastapäevale pühendatud teaduskonverentsi ettekannete teesid, Tallinn, (18. nov. 1981), 174–181.

Tõnisson, E. (2008). Eesti muinaslinnad. Muinasaja teadus 20. Tartu-Tallinn.

Tõnisson, E., Valk, H. (2008). Rosma linnamägi. – Tõnisson, E. Eesti muinaslinnad. Muinasaja teadus 20. Tartu-Tallinn, 314 –316.

Valk, H. (2008). Aruanne arheoloogilistest kaevamistest Rosma linnamäel 2007. a sügisel. Tartu. Aruanne Tartu Ülikooli arheoloogiaarhiivis.

Valk, H. (2008). Excavations on the hillforts of south-eastern Estonia: Luhtõ, Sangaste and Rosma. – Archaeological Fieldwork in Estonia 2007. Tallinn, 43–58.

Valk, H. (2020). Aruanne päästekaevamistest Rosma linnamäe tormikahjustuste alal 2020. aasta aprillis. Aruanne Muinsuskaitseameti arhiivis.

Valk, H. (2021). Rosma linnuse väravakäik – Tutulus 2021, 34–36.

Vassar, A. (1939). Iru linnapära- 1936.–1938. a uurimiste tulemused. – Õpetatud Eesti Selts 1939. Tartu, 53–100.
https://dspace.ut.ee/handle/10062/86139 (17.05.2023)

Vissak, R. (2019). Tallinn Apteegi tänav 5; 7 ja 9. Arheoloogiline uuring. Tartu, 2019.
https://register.muinas.ee/ftp/Arheoloogiliste%20uuringute%20aruanded/L-21107_A-pk_2018_VissakR_mka-2589_Tln-ApteegiTn5-7-9.pdf (17.05.2023)

Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J., Reynolds, J.M. (2012). "Structurefrom-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications – Geomorphology 179, 300–314.

Summary. Reconstruction of the Rosma hill fort gateway trench by using photogrammetry.

Among Estonian archaeologists, it is widely understood that photogrammetry is a good way of documenting monuments and excavations. As part of my work, I found ways to use 3D models to their full potential. This paper is based on the results of 2020–2022 archaeological excavations at the southeast gateway of Rosma hillfort (southeast Estonia, historical Võrumaa province).

Two series of photogrammetry conducted in 2020 were used in research: H0 and R1. In 2021, 24 sets of photo sequences were captured for photogrammetry, and two sets in the year 2022. The total number of 3D models analysed in this work was eleven: H10, R1, H2, R2, R3, R4, R5, H10, H13 H17, and H18 (table 1). The choice of models was based on which of them the most important stages of the excavation were captured on the models. The programme used to create the 3D models was Agisoft Metashape Professional. The models were then georeferenced using the markers that were measured with a total station during excavations.

In this work, the first practical output of the Metashape programme was its ability to create orthophotos free of distortions that could be used to display data in QGIS as bases of maps. To do this, I made orthomosaics in the Metashape programme, which I exported to QGIS. To check the accuracy of the orthomosaic, I entered the corresponding coordinates into QGIS and compared them with markers that appeared on the map. That helped to identify incorrect markers and the orthomosaics in the wrong coordinate system. Since one of the models (R5) had no coordinates, I created coordinate points on the model using another (R4). I placed markers on identifiable and detailed locations on both models. Then I made an orthomosaic of the R5 model and placed it in QGIS, which showed to have correct dimensions (figure 2).

As part of my work, I made a Harris matrix to present the stratigraphic sequence of the Rosma southeast gate (figure 3). According to the interpretations of one of my supervisors Heiki Valk, I presented the order of the building and collapse of the gateway – the latter was caused by a fire. I then used an H17 orthophoto (figure 4) to illustrate the locations of the post holes with walls that were between or around them. There is an asymmetry in the posts at Rosma's gate: there are eight post holes on the south side and five on the north side (figures 4 and 7). This may be due to the need to support the southern rampart, which was much wider than its counterpart. Soon after filling the gateway with sand that collapsed from the above, several

post-fire pits were dug in the collapsed ground, cutting also the of burnt pieces of fallen wood. I marked them as pits 1, 2, and 3. I illustrated the boundaries of the pits at different depths on orthophotos made of the H2, R3, and H10 3D models (figures 8, 9, and 10). A carbon sample taken from the first burnt piece of wood that appeared in the trench in 2020 gave a calibrated dating of 1225–1295. The samples taken to radiocarbon dating in 2021 showed results of 660–774, which indicates the existence of the gate in the pre-Viking period (table 2).

Another practical output of the Metashape programme were the profile views of the trench. The profile views were used to identify the different human activities. This included building of the gateway, the destruction of it and the subsequent digging in the area. The profile views also helped to illustrate the outlines of its natural white sand, untouched by human activity (figures 12 and 13). These features indicate the ground level before the hillfort was built.

The pit outlines differed in profile views. In the eastern profile of the middle bank, the third pit reached the natural mineral soil (figure 18), while the grey-mixes sand mass appeared on the western side of the central bank profile but did not reach the bottom (figure 19). This suggests the pits were filled with the same soil. The profiles also revealed evidence of gateway collapse, with a bowl-shaped depressioon and a clear coal seam in the hallow bank profile (figure 17). The presence of a compact set of burnt wood pieces (no. 149) underneath further indicates it as the collaps outline. The presence of nails near the pits suggests the digs may have aimed to find valuable items that were taken by the diggers.

The purpose of the follow-up research in the year 2022 was to find a place where the road leading from the gate turns away on the hillside, parallel to the rampart. The new excavation was dug – a 2,5 m long „tail“ from the east side of the gateway (figures 12 and 21). No finds were found during the excavation, and there were no logs or other ground changes after the fire and collapse, only natural sand.

I compared the southeast gateway of Rosma to those of Estonian hillforts. Rosma’s gateway seems to be most similar to the earlier stage of the southeastern gateway of Lõhavere hillfort (table 4), which did not have stone-laid walls, unlike other gateways in the strongholds of Iru, Varbola and Pada I. The documentation of the excavation at the Rosma hillfort with the use of photogrammetry, analysis of 3D models, orthophotos, and profiles revealed several aspects that were not confirmed during excavations, such as the links between nails and the pits. Capturing the excavation at different stages in the form of 3D models also made it possible to reconstruct the sequence of events at Rosma hill fort south-eastern gateway.

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Karoline Mai,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Rosma väravakäigu rekonstrueerimine fotogramm-meetria abil“, mille juhendajad on Ragnar Saage ja Heiki Valk,

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 Commonsi 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 lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karoline Mai
17.05.2023