

3D-mudeldamine konservaatori ja uurija töövahendina: rüütelkonna hoone plafoonmaal ja Bernt Notke altariretaabel

Andres Uueni 

Eesti Kunstiakadeemia, Põhja pst 7, 10412 Tallinn;
andres.uueni@artun.ee

Hilkka Hiiop

Eesti Kunstiakadeemia, Põhja pst 7, 10412 Tallinn;
hilkka.hiiop@artun.ee

Sünne Remmer

Eesti Kohtuekspertiisi Instituut, Tervise 20, 13419 Tallinn;
synne.remmer@ekei.ee

Kokkuvõte. Artikkel tutvustab kahe kunsteose, 17. sajandist pärineva tasapinnalise lõuendplafoonmaali ja 15. sajandist pärineva kolmemõõtmelise Bernt Notke altariretaabli uuringutes kasutatud 3D-mudeldamise erilahendusi ning nende edasisi rakendusi. Artikkel ei keskendu niivõrd igapäevasele 3D-möödistamisele ja selle protsessi kirjeldamisele, kuivõrd toimivatele ja arenevatele lahendustele, mis võiksid huvi pakkuda ka teistele kultuuripärandi uurijatele ja konservaatoritele. Lisaks arutletakse 3D-möödistamise eeliste ja piirangute ning selle vähese kasutuse põhjuste üle, samuti uuritakse, kuhu valdkond on jõudnud ja kuhu suundumas.

Märksõnad: kultuuripärand, konserveerimine, 3D-möödistamine, 3D-dokumenteerimine, digikaksik, DEM-mudel, kompuutertomograafia

Artikli keskmes on kaasaegsed 3D-dokumenteerimislahendused, mida vaatleme kahe meistriteose, rüütelkonna hoone varauusaegse lõuendplafoonmaali ja Bernt Notke keskaegse altarietaabli juhtumiuuringu põhjal. Juhtumid teeb huvitavaks asjaolu, et esimese puhul on tegemist kolmemõõtmelise kunstiteosega, kus 3D-dokumentatsioon on ootuspärane, teise puhul aga tasapinnalise kunstiteosega, mille dokumenteerimisel piirdutakse enamasti traditsioonilise pildistamisega. Mõlemal puhul rakendasime edukalt 3D-mõõdistamise tava- ja erilahendusi, mis lähtusid teoste uurimis- ja/või konserveerimisküsimustest.

Tänapäevaste pärandi dokumenteerimise strateegiate ja juhendamaterjalide põhjal võib esmapilgul jääda mulje, et 3D-andmete talletamine mitmemõõtmeliste objektide (nt skulptuur, arheoloogiline ese, hoone) puhul on saanud iseenesestmõistetavaks töövoos osaks. Tegelikult see siiski nii ei ole. Seevastu tasapinnaliste kultuuriväärtuste (nt maalid, paberalusel teosed) korral tavapäraselt 3D-mõõdistamist ei rakendata üldse või tehakse seda harva.

Järgnevas kirjatükis selgitamegi kahe erivormilise kunstiteose näitel, milliseid täiendavaid eeliseid võib olla nii tasapinnaliste kui ka mitmemõõtmeliste objektide 3D-dokumenteerimisel. Selle kõrval proovime avada diskussiooni, miks rakendatakse 3D-mõõdistamist (kunsti)pärandi valdkonnas endiselt nii vähe, olgugi et see on märkimisväärselt efektiivsem viis olulist informatsiooni koguda. Artikkel sisaldab muu hulgas kriitilist arutelu 3D-dokumenteerimise praeguse kasutamise üle kultuuripärandi uurimise ja säilitamise praktikates, kokkuvõtlikku analüüsi 3D-mõõdistamise eelistest ja piirangutest ning mõtteid edasiste arengute kohta.

3D-LAHENDUSED PÄRANDI TEENISTUSES

Viimase paarikümne aasta jooksul on füüsilise pärandiga seotud uuringumeetodid ja nende võimaluste kättesaadavus tänu keemia, füüsika, info- ja kommunikatsioonitehnoloogia ning muudele lahendustele väga kiiresti arenenud. Mittedestruktiivsete ja osalt destruktiivsete uuringute kombineerimine 3D-andmetega rikastab teavet pärandobjektide kohta ning võib oluliselt aidata spetsialiste, eriti kui andmed on lihtsasti kättesaadavad, näiteks interneti vahendusel.

Erinevad 3D-tehnoloogiad ja nende kombinatsioonid on olnud kultuuripärandi dokumenteerimise valdkonnas kasutusel alates

1980. aastate algusest.¹ Pärandi dokumenteerimisel aitavad 3D-mudelid jäädvustada objekti elutsükli erinevaid ajahetki, teha pärandi säilitamise ja haldamise käigus otsuseid ning koguda ja jagada andmeid uuel tasemel. 3D-möödistuste tulemusi kasutatakse edasiste tööde planeerimisel ja elluviimisel ning kvalitatiivsel ja kvantitatiivsel analüüsil. Konserveerimise käigus on mitmeid tegureid, mida spetsialistid peavad visuaalse teabe põhjal kontrollima ja mille üle otsustama. Seetõttu on kriitilise tähtsusega, et 3D-andmed oleksid usaldusväärsed, kvaliteetsed, andmete loomise protsess vastaks standardile ja tulemused oleksid korratavad.

Nendest põhimõtetest lähtuv objekti asukoha- ja värviinformatsioon talletatakse edasiseks töötlemiseks geodeetiliste või lokaalsete koordinaatpunktidenä. Sõltuvalt objekti omadustest, uurimisküsimusest ja vajalikust täpsusastmest saab töödelda ja kasutada ka erinevate tehnoloogiate ja meetoditega kogutud andmete kombinatsioone. Näiteks on kultuuripärandi dokumenteerimisel paljudel juhtudel vajalik 3D-laserskanneri, digikaamera ja drooniga tehtud möödistuste kombineerimine. Erinevalt ühe tehnoloogia kasutamisega on siis lõpptulemuseks 3D-mudel, mis on oluliselt täpsem nii geomeetria kui ka värviinfo esitamisel.

Fotogramm-meetria

Fotogramm-meetria põhimõte on suure hulga osaliselt kattuvate fotode põhjal konstrueerida objekti 3D-mudel. Arvuti töötab siinkohal sarnaselt inimajuga, mis loob stereonägemise abil ruumilise pildi kahest silmast saadud info alusel. Fotogramm-meetrilise möödistuse käigus pildistatakse objekti süsteemselt ja piisava ülekattega paljudest punktidest, tagades, et igal järgmisel pildil on osa eelmisest nähtav. Mida rohkem on pilte ja mida parem on nende kvaliteet, seda täpsem on lõpptulemus. Tarkvara analüüsib pilte, otsides ja tuvastades ühiseid punkte. Kattuvad punktid moodustavad aluse 3D-mudeli loomiseks. Tarkvara arvutab punktide asukohad ruumis ja loob neist kolmemõõtmelise punkt pilve. Punkt pilvest saab genereerida võrk mudeli ja seejärel pinna, mis katab punkte ja moodustab 3D-mudeli.

1 P. Boulanger, M. Rioux, J. Taylor, F. Livingstone. Automatic Replication and Recording of Museum Artefacts. – International Symposium on the Conservation and Restoration of Cultural Property: Analysis and Examination of an Art Object by Imaging Technique. National Research Institute of Cultural Properties, Tokyo, 1988, 131–147; F. Remondino, S. El-Hakim. Image-based 3D Modelling: A Review. The Photogrammetric Record, 2006 21, 115, 269–291. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1477-9730.2006.00383.x>.

Meetodil on mitmeid eeliseid, sealhulgas paindlik kasutusala: meetod sobib nii mikrotasandil töötamiseks kui ka suurte objektide ja maa-alade, näiteks arhitektuuripärandi (hoonete, varemete), monumentide, arheoloogiliste kaevandite, maastike jm georuumiliseks mõõdistamiseks ja kaardistamiseks. Mudelite loomiseks saab kasutada nii mikroskoobisalvestisi, maapinnalt tehtud fotosid kui ka droonide abil tehtud aerofotosid. Olenevalt piltide hulgast, kvaliteedist ja valgusoludest on võimalik saavutada väga suur detaili- ja värviinfo täpsus. Meetod on suhteliselt odav ja kättesaadav, vajalik on kaamera, droon või nutitelefon ja vastav tarkvara.

Võtmetähtsusega on kaamera ja objektiivi omadused ning valgustundlikkus – kõik tulemused sõltuvad suuresti valgustingimustest ja pindade eripärast, näiteks võivad läikivad või läbipaistvad pinnad tekitada probleeme. Siiski saab kõrglahutusega fotogramm-meetriat kasutada ka juhul, kui objekti morfoloogia ja materjali omadused on keerulised. Kultuuripärandi puhul on selleks vaja luua konkreetse objekti iseloomu arvestav valgusskeem, kasutada sobivat objektiivi, vajadusel objektiivi filtreid (nt polarisatsioonifiltreid) ja digitaalset peegel- või hübriidkaamerat või drooni. Fotogramm-meetrilise mõõdistuse puhul on väga tähtis kasutada reepereid ja teha kontrollmõõtmisi – see aitab välistada võimalikke mõõtehälbeid.

Fotogramm-meetria on mitmekülgne ja tõhus tööriist füüsilise maailma jäädvustamiseks. Seda meetodit on muu hulgas võimalik kombineerida teiste pildindusuuringutega, näiteks infrapuna- ja ultraviolet-fotogramm-meetriga.

Välitingimustes on piiravaks teguriks halvad ilmastikuolud (nt udu, lumesadu), mis mõjutavad või takistavad pildistamist ja vähendavad andmete kvaliteeti. Samuti võib tulemust mõjutada ebasobiva objektiivi kasutamine, kuid enamasti sõltub kõik fotograafi kogemustest ja oskustest.

Skaneerimine

Üks levinumaid kultuuripärandi 3D-mõõdistamise viise fotogramm-meetria kõrval on skaneerimine. 3D-skaneerimisel kasutatakse spetsiaalselt selleks loodud seadmeid ja olenevalt eri (teadus)valdkondade nõuetest rakendatakse mitmeid tehnoloogilisi lahendusi. Levinuim seade on laserskanner, mis saadab välja objektilt tagasipeegelduvaid laserkiiri – nende abil on võimalik andmeid punktidenä kogudes distantisilt mõõta objekti pinda. Tagasipöördumise aja järgi arvutab seadme tarkvara punktide

kaugused ja pildisensoritega varustatud seadmed lisavad punktidele RGB-värviinfo. Moodsaimad laserskannerid on väga kiired ja salvestavad kuni 2 miljonit punkti sekundis; seadmete tööpiirkonna ulatus varieerub olenevalt otstarbest 0,1–2000 meetrini ja rohkem. Saadud andmetest moodustatakse tihe 3D-punktipily, millest saab järgnevas tööetapis genereerida 3D-mudeli. Laserskaneerimine on kohandatav, kiire, täpne ja efektiivne suurte alade, näiteks hoonete ja varemete mõõdistamiseks ning sobib ka keeruka morfoloogiaga objektide puhul, võimaldades saavutada väga täpseid tulemusi (isegi mikromeetrites).

Laserskannerite kõrval on olemas ka struktureeritud valguse skaneerimise lahendused, mille puhul projitseeritakse objektile valgusmuster (tavaliselt triibud või ruudustik) või valguskiir ning kaamera salvestab selle deformeerumise objektil. Niisugune info võimaldab arvutada objekti kuju ning olenevalt seadmest ja tarkvarast saab luua kohe isegi punkti- ja pinnamudeleid. Seda lahendust kasutatakse peamiselt väiksemate objektide mõõdistamiseks. Seadmed on portatiivsed ja paindliku kasutusala. 3D-skannerite peamised puudused on seotud seadme maksumusega, suurte hoolduskuludega, värviinfo (seni veel) halvema talletamisega ning eri valdkondade spetsiifikale ja vajadustele disainitud skannerite piiratud universaalsusega.

Nii fotogramm-meetria kui ka 3D-skaneerimine on võimsad tööriistad 3D-mudelite loomiseks. Fotogramm-meetria on hea valik, kui on vaja paindlikult ja odavalt mõõdistada väga täpse värviinfo ja keeruka morfoloogiaga objekte heades valgusoludes või ka suuri objekte (nt monumente) või maastikke. 3D-skaneerimine pakub aga veelgi suuremat täpsust ja sobib paremini suurte pindade, keeruka arhitektuuri või kesiste valgusolude puhul. Mõlemat tehnoloogiat kasutatakse eraldi ja kombineeritult eri valdkondades (nt arhitektuur, arheoloogia, tööstus, meditsiin, arvutimängude arendus).

Kahe juhtumiuuringu näitel tutvustame järgnevalt tehnoloogiad ja meetodeid, mille abil oleme teinud pildindusuuringuid ja kasutanud saadud andmeid teoste analüüsiks. Nii 3D-skaneerimise kui ka fotogramm-meetria kasutusvaldkonnad kattuvad, mõlemad annavad informatsiooni objekti kuju, suuruse ja asukoha kohta ruumis. Saadud andmeid on võimalik kasutada paljuski sarnasel moel: lisaks erinevatele 3D-mudelitele saab andmetöötlusega luua näiteks DEM-kõrgusmudeleid² või kombineeritud lahendusega ortofotosid. Samuti on

2 DEM-kõrgusmudel – mudel reljeefanalüüsi läbiviimiseks, vt täpsemalt tagapool.

pärandiuurimises järjest enam kättesaadav kompuutertomograafia, mis on eraldiseisev ja arenev tehnoloogia. Kompuutertomograafia kasutab röntgenkiirgust, olles osa traditsioonilisest röntgenuuringust. See pole küll otseselt seotud laserskaneerimise ega fotogramm-meetriaga, kuid kompuutertomograafia tehnoloogia abil saab lõpptulemusena luua sarnaseid 3D-mudeleid.

JUHTUMIUURINGUD

Järgnevalt analüüsivate juhtumite puhul moodustab 3D-andmete kogumine vaid ühe osa suuremast uuringute kogumist, kuhu kuuluvad ka analüütilise keemia meetodid, mikroskoopia ning alusmaterjali uuringud (puidul dendrokronoloogia ja -geograafia, lõuendil kiu-uuringud), lisaks mitmesugused pildindusuuringud, näiteks infrapuna-, ultraviolet- ja röntgenuuringud. Kogutud andmeid aitavad interpreteerida ja kontekstualiseerida humanitaaria distsipliinid arhiiviuuringutest (kunsti)ajalooliste tõlgenduste ja muuni. Kokku moodustavad need teravikliku ja ristinterpreteeritava andmekogumi, mis loob laiemat teadmist nii uuritavast objektist kui ka selle kontekstist. Valdkonda nimetatakse laiemas mõttes tehniliseks kunstiajalooks,³ kuid sõltuvalt uuringute eesmärgist võib igat üksikuuringut vaja minna ka konkreetse, näiteks konserveerimisküsimuse lahendamiseks või lihtsalt objekti dokumenteerimiseks.

JUHTUM I. RÜÜTELKONNA HOONE PLAFOONMAAL

2023. aasta alguses tuli renoveerimistööde käigus Toompeal rüütelkonna hoone barokse osa laest välja uhke leid – hiiglaslik lõuendalusel plafoonmaal. See oli peidus hilisema, 19. sajandi keskpaigas rajatud peegellae taga, ehkki maalingut oli värvikihtide ja toestustaladega varjatud märksa varem, ilmselt juba 18. sajandi keskpaigast. Maal on valminud ilmselt 1690. ja 1694. aasta vahel, mil ehitati rüütelkonna hoone barokne osa. Plafoonmaali teeb unikaalseks selle materjal (lõuend), teostuse erakordne meisterlikkus ja ka suurus: kogupindala on 60 ruutmeetrit, mis teeb

3 Vt täpsemalt: Tehniline kunstiajalugu – kunstiajaloo tehnikad? Koost. G. Koppel. (Eesti Kunstimuuseumi toimetised 2 [7].) Eesti Kunstimuuseum – Kadrioru kunstimuuseum, Tallinn, 2012.

sellest Eestis seni teadaolevalt suurima omataolise. Teos koosneb üheksast ligikaudu 8 meetrit pikast ja 80 cm laiast lõuendipaanist.

Enneolematu leid otsustati laest eemaldada, transportida habras meistriteos konserveerimisstuudiosse ning avada haruldane maaling lubjakihtide alt. Kogu keerulist konserveerimisprotsessi saatsid põhjalikud uuringud ja detailne dokumenteerimine. Muu hulgas dokumenteeriti plafoon kolmes konserveerimisfaasis fotogramm-meetriliselt, et luua andmetest detailsed ja mõõtkavas ortofotod. Lisaks täpsele jäädvustamisele andis see võimaluse analüüsida tasapinnalise objekti 3D-mõõdistamise otstarbekust konserveerimisotsuste tegemisel, aga ka konserveerimistöode efektiivsuse hindamisel.

DEM-kõrgusmudel

Rüütelkonna hoone plafooni sarnase erakordse lõuendplafoonmaali dokumenteerimist ei tule Eestis just sageli ette. Lisaks tavavalguses üldplaanide ja lähivaadete fotografeerimisele ning detailpiltide tegemisele oli oluline plafoonmaali seisukord üksikasjalikult dokumenteerida.

Tehniliste pildindusuuringute käigus kogusime informatsiooni eeskätt nähtava valguse, ultravioleti ja lähiinfrapuna lainelades. Neil kõigil on oma funktsioon ja otstarve: pildindusuuringute käigus saab mitmel juhul eristada uuritava objekti (sise)struktuuri, värviinfot ja morfoloogiat. Isegi kui värv visuaalselt sarnaneb, on sõltuvalt aparatuurist võimalik uuringute käigus tuvastada eripärasid, muu hulgas oletada ka materjalide keemilisi või füüsikalisi omadusi.

Kuna konserveerimistöode maht oli suur ja kõik üheksa plafoonipaanini valmisid eri ajal, otsustasime ootuspärase panoraamfoto asemel kasutada fotogramm-meetrilist mõõdistust. Nii on peale tavapärase ortofoto loomise lisahüvena võimalik plafoonmaal seada täpsesse mõõtkavasse. Lisaks saab ortofoto põhjal välja arvutada digitaalse kõrgusmudeli DEM (*digital elevation model*), mida tavaliselt tuntakse küll kõrgusandmetest koosneva maapinnakujutisena. Kõrgusmodelitega iseloomustatakse tavaliselt Maa, harvem ka teiste taevakehade pinda. Lihtsustatult on teaduslikus keeles digitaalse kõrgusmudeli kohta kasutusel kolm sarnast, kuid eriotstarbelist mudelilahendust: digitaalne kõrgusmudel DEM, digitaalne maastikumudel DTM (*digital terrain model*) ja digitaalne pinnamudel DSM (*digital surface model*). DEM- ja DTM-mudel iseloomustavad sellist maapinda, kus tehisobjekte ei ole. DEM-, DTM- ja DSM-mudeli lahendused on usaldusväärsed ja neid kasutatakse loodusteadustes eeskätt reljefianalüüsi tegemiseks. Traditsiooniliselt on

need mudelid seotud mäenduse, loodusgeograafia, ehituse ja maastiku parameetrite arvutamisega (sh arheoloogia, topograafiliste kaartide valmistamine, gravimeetriliste mõõdistuste parandamine).

Piisava hulga andmete olemasolul saab sel viisil analüüsida mitte ainult maastiku ja ehituspärandiga seotud pindade vaatevälja ja reljeefi, vaid ka kunstiteoseid.

Andmete kogumine ja interpoleerimine DEM-kõrgusmodeliks

Plafooni mõõdistamise planeerimisel oli oluline, et valitud tehniline lahendus võimaldaks kõik üheksa paani sarnasel viisil jäädvustada. Plafooni digitaalse kõrgusmodeli tegemiseks oli esmalt vaja iga paan mõõdistada fotogramm-meetriselt. Mõõdistustulemuste töötlemise käigus valmis väga tihe (0,5 mm/piksel) lokaalsete koordinaatidega punktipilv – XYZ-väärtustega andmestik, mis tuli vastavalt töö eesmärgile klassifitseerida. Edasise töötlemise käigus oli oluline kasutada eeskätt maali pinnapunkte ning andmetest välja sorteerida kõik ebaoluline (nt laiem laua- ja põrandapind), v.a reeperid.

DEM-kõrgusmodeli ehk kõrguspunktidest rasterkaardi⁴ koostamiseks tuleb vastavalt tehtava töö eripärale kasutada erinevaid interpolatsioonimeetodeid,⁵ saadud tulemusi vajadusel korrata ja võrrelda ning analüüsida näiteks QGIS-tarkvaraga.⁶ Tulemuseks saadav DEM-kõrgusmodel sünnib andmeanalüüsi käigus, kui on arvutatud iga piksli kõrguse absoluutne täpsus ja morfoloogia suhteline täpsus, mis sõltub kasutatavast interpolatsioonimeetodist. Päringu asukohale lähemal asuvatel punktidel või aladel on suurem mõju ja tulemuseks olev pind on detailsem. Andmemahutade optimeerimiseks valmisid plafoonipaanidest DEM-kõrgusmodelid resolutsiooniga 1,4 mm/piksel.

DEM-kõrgusmodeli kujutis on representatiivne, selle korrapärasus tagab arvutuste lihtsuse ja selge loogika ning võimaldab tuvastada ja analüüsida maalipinna väiksemaidki ebatasasusi. DEM-kõrgusmodeli kujutise puuduseks on enamasti selle rasterfailist tulenev suur andmemahut. Tulemuse täpsus võib varieeruda ning see ei pruugi alati täielikult kajastada algandmete detailsust.

4 Rasterkaart koosneb koordinaatidega seotud pikslitest.

5 Interpolatsioon on andmete vahepealsete väärtuste leidmine teadaolevate väärtuste alusel.

6 QGIS-tarkvara kohta vt <https://qgis.org>.

Tulemused konservaatori vaatenurgast

Arvestades rüütelkonna hoone plafooni vanust ja pika peidusoleku tingimusi, oli tegemist üllatavalt hästi säilinud leiuga. Kuna maali alusmaterjal on äärmiselt habras ja tundlik, oli selles ootuspäraselt suurel hulgal kortse, muhke, väljavenimisi, kokkutõmbeid ning auke ja rebendeid. Konserveerimistööde ettevalmistamise käigus asetati plafoonmaali paanid tasapinnale sirguma. Tööde esimeses etapis tehtud DEM-kõrgusmodel visualiseeris lõuendis olevad ootuspärased pinged.

Konserveerimistööde teises etapis tehtud model tõi aga esile ootamatuse. Kui n-ö tasandav lubja- ja värvikihtide raskus oli maalilt eemaldatud ja paanid olid olnud mõnda aega pressis, lõuendis olevad pinged mõneks ajaks isegi suurenesid. Lõuendikortsud ja -muhud tulid eriti selgelt esile fotogramm-meetrilisel DEM-kõrgusmodelil.

Pinnamudel aitas konservaatoril visualiseerida olukorda pärast originaalse maalikihi avamist ning selgusele jõuda, et tavapärane lõuendaluse sirutus- ja pressimismetoodika pole käesoleval juhul tulemuslik. Ka mehaaniline pingutamine traditsioonilisele puidust alusraamile poleks ilmselt toonud oodatud sirutust. Otsustasime nüüdisaegse alumiiniumist alusraami kasuks, kuhu lõuend kinnitus vedrusüsteemi abil. Selleks õmmeldi lõuendi serva tunnel, millesse paigutati metallvarras. Selle külge kinnitati 20 cm sammuga tross, mille küljes on kalibreeritud vedrud. Pingutades vedru teatud pikkusele, saavutasime vajaliku tõmbejõu. Sel moel on kontrollitud, et lõuendile rakenduv pinge jaguneb kogu pinnale ühtlaselt. Igale vedrule, mida on maali perimeetril kokku 147, rakendati tõmbejõudu 2,25 N/cm, mis teeb ühele meetrile rakenduvaks tõmbejõuks umbes 22,5 kg/m.⁷

Pärast maali pingutamist ja lakketõmbamist tegime kogu plafoonmaalist veel kord fotogramm-meetria, et saada lõppviimistlust peegeldav ortofoto ja DEM-kõrgusmodel. DEM-kõrgusmodeli visualisatsioon näitab, et 99% kortsudest on maalist kadunud ning pinge kogu perimeetri ulatuses on peaaegu ühtlaselt jaotunud.

Konservaatori õppetunniks oli arusaam, et ka (pealtnäha) tasapinnalise kunstiteose puhul võib 3D-mudeldamisest ning selle erilähendustest (nt DEM-pinnamudelist) olla väga suur kasu. See aitab kaasa nii konserveerimisotsuste tegemisel kui ka töö dokumenteerimisel ja tulemuste hindamisel.

7 H. Hiiop, K. Milsaar, A. Randla, H. Vinnal. Venuse triumf. Eesti Kunstiakadeemia, Tallinn, 2025, 113–115.



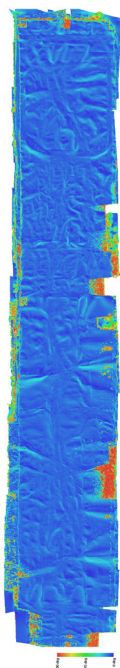
Illustratsioon 1. Rüütelkonna hoone plafoonmaal tavavalguses enne lubjakihtide eemaldamist.
Foto: EKA, Rasmus Kristofer Randla, 2023



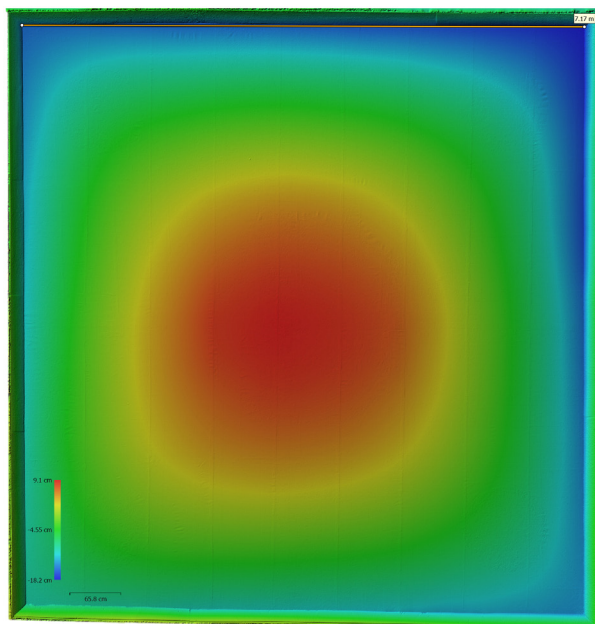
Illustratsioon 2. Rüütelkonna hoone plafoonmaal tavavalguses pärast lubjakihtide eemaldamist.
Foto: Andres Uueni, 2023



Illustratsioon 3. Rüütelkonna hoone plafoonmaal tavavalguses pärast alusraamile pingutamist.
Ortofoto: Andres Uueni, 2024



Illustratsioon 4.
DEM-kõrgusmudel
ühest paanist pärast
maalingu vabastamist
lubjakihtidest.
Foto: Andres Uueni,
2023



Illustratsioon 5. DEM-kõrgusmudel pärast alusraamile pingutamist.
Foto: Andres Uueni, 2024

JUHTUM 2. BERNT NOTKE PÜHA VAIMU KIRIKU ALTARIRETAABEL

1483. aastast pärinev Püha Vaimu kiriku kahe tiivapaariga kappaltar on üks väheseid kindlalt Notke töökojast pärinevaid meistriteoseid. Seda kinnitavad Bernt Notke allkirjaga arhiividokumendid, kus meister nõuab välja raha tehtud tööde eest.⁸ Just see teeb teose rahvusvaheliselt unikaalseks pidepunktiks, millele tugineb teiste samale meisterkonnale omistatud tööde analüüs. Intriigi lisab asjaolu, et retaabli maalits 1625. aastal üle teine, taas dokumentaalselt kinnitatud meister, kohaliku tähtsusega maali ja Pawel Blome.⁹ Hiljutiste arhiiviuuringute käigus on välja tulnud väga põnevat informatsiooni, mis teeb ka selle meistri siinses kultuuriloos oluliseks.¹⁰

2019. aastal alustasime projektiga, mille eesmärk oli ennekoike lõpule viia Nõukogude ajal pooleli jäänud konserveerimistööd, aga koos sellega teostada ka põhjalikud tehnilised uuringud ja dokumenteerimine. Varasemate konserveerimistöde käigus oli eemaldatud skulptuuridelt kõik hilisemad kihid, mis varjasid n-ö originaalset Bernt Notket. Uute arhiiviteadmiste valguses tekkis aga dilemma: kuidas käituda ajalooliselt tähenduslikuks muutunud ülemaalinguga? Siinkohal muutuski erakordselt oluliseks 3D-dokumenteering ja küsimus, kas nn digikaksik asendab mingilgi määral autentset materiat. Lisaks katsetasime uurin-gute käigus 3D-kompuutertomograafia mudelitega, et analüüsida selle rakendusvaldkondi parandiuuringutes.

3D-dokumenteering kui konservatori tööriist

Lisaks konserveerimisülesannete arutamisele oli projekti algetapis üks esimesi tegevusi dokumenteerimistöde kavandamine ja pikemaajaline planeerimine. Retaabli üks tehniliste uuringute ja dokumenteerimise eesmärkidest oli võimalikult täpselt 3D-möödistada nii teos tervikuna kui ka iga skulptuur eraldi. Selle käigus otsustasime rakendada kombineeritud möödistustöid. Esimeses etapis kasutasime laserskaneerimist ja ka fotogramm-meetrilist möödistust, et saada piisavalt andmeid

8 Tallinna Linnaarhiiv, TLA.230.1.Bl, p.1a; 44.

9 TLA.230.1.Bl 20, p. 35.

10 H. Hiiop, A. Randal, H. Vinnal, K. Aas. Whose Story to Tell? The Many Masters of Bernt Notke's Altarpiece in Tallinn. – Bridging the Gap: Synergies between Art History and Conservation. Ed. by B. Sauge, T. Ford, T. Frøysaker, K. J. van den Berg. Archetype, London, 2024, 17–27.



Illustratsioon 6. Püha Vaimu kiriku altarietaabel kolmes positsioonis: suletud, poolavatud, avatud.
Fotod: Andres Uueni, 2021

altarietaabli uuringuteks ja konserveerimistöödeks. Üks esimesi tegevusi oli kogu kooriruumi ja altarietaabli laserskaneerimine ning selle asukoha sidumine Eesti geodeetilise süsteemiga. Lisaks operatiivsele mõõdistusele kannab see informatsioon ka altarietaabli asukoha tõestusväärtust. Puhastatud laserskaneeringu punktipilv hõrendati, et seda oleks võimalik vajadusel ka mitmekülgsemalt kasutada, näiteks kuvamiseks veebis või lihtsustatud 3D-mudeli tegemiseks. Teises etapis mõõdistasime fotogramm-meetriliselt altarietaabli tiivad kolmes positsioonis ja selle info põhjal lõime täpse tekstureeritud pinnamudeli. Ühtlasi tegime maali-tahvlite fotogramm-meetrilise mõõdistuse lähiinfrapuna- (u 850 nm) ja ultraviolet-lainealas (u 375 nm).



Illustratsioon 7. Püha Vaimu kiriku kooriruumi hõrendatud laserskaneeringu punkt pilv. Ekraanivaade. Andres Uueni, 2019

Seejärel mõõdistati konserveerimis- ja uurimistööde käigus fotogramm-meetriliselt kõik altarietaabli skulptuurid ükshaaval. Need mõõdistusandmed ja 3D-mudelid on kappaltari figuuride jt detailide seisukorra dokumenteerimise oluline etapp, mida saavad kasutada Notke teoste uurijad ja konservaatorid ning mille põhjal loodud lihtsustatud 3D-mudelid võimaldavad veebi teel ka laiema avalikkuse ligipääsu altarietaablile.

Neitsi Maarja

Lisaks retaabli täpsele mõõdistamisele tõusid 3D-dokumenteermise eelised esile siis, kui 2022. aastal jõudis konservaatori töölauale¹¹ esimene skulptuur – retaabli keskel asuv Neitsi Maarja. Tookord oli meie lähtepunktiks teadmine, et Notke algset kihistust on hiljem kaks korda üle maalitud. Seda näitasid nii tehnilised uuringud (sondaažid,

¹¹ Konserveerimistööd teostas SA EVM Konserveerimis- ja Digiteerimiskeskuse Kanut konservaator Kristina Aas. Vt täpsemalt https://muinas.artun.ee/static/files/091/notke_koond_low.pdf (11.01.2025).



Illustratsioon 8. Püha Peetruse skulptuur hoiab käes raamatut, millesse on kantud altari ülemaalimise aastaarvud 1625 ja 1815. Fotod: Martin Siplane, 2023

ristlõike- ja pigmendianalüüs) kui ka Peetruse skulptuuri käes olev raamat. Nimelt on sinna sisse kantud aastaarvud 1625 ja 1815, mis tähistavad kahe ülemaalingukihi teostamise aega. Maarja ülemaalimisest oli teada 1625. aasta meistri nimi ja tööde eest saadud summa,¹² kuid ei midagi enam. 1815. aasta meistri kohta puudus igasugune informatsioon. Pärast arutelusid otsustasime jätkata varasema, nõukogudeaegse konserveerimiskontseptsiooni alusel, st avada skulptuuri kõige varasem ja vaieldamatult ka kõige väärtuslikum, Bernt Notke aegne maalingskiht. Arvestades ülemaalingute ajaloolisust ning võimalust sisuliselt koorida pealmised maalingud kiht-kihilt maha, talletati siiski iga eemaldatav ajastu väga täpse 3D-mudelina, mille eeldatav mõõdistushälve on väiksem kui 0,5 mm. Seeläbi tekkis Neitsi Maarja kuju kolmest erinevast maalikihist ka kolm digikaksikut: esimene 3D-mudel talletas 2022. aasta seisuga ehk 1815. aasta, teine 1625. aasta ja kolmas kõige alumise, 1483. aasta maalikihi. Kaks esimest, st kaks hilisemat ülemaalingukihti jäid pärast konserveerimist eksisteerima vaid virtuaalselt – füüsilise maailma jaoks on need jäädavalt kadunud.

12 Tallinna Linaarhiiv (TLA), 230.1.B1 20, p. 35.



Illustratsioon 9. Neitsi Maarja „kolm nägu“: 1483, 1625 ja 1815. Fotod: Martin Siplane, 2022

Apostel Filippus

2023. aastal jõudis konservaatori töölauale järgmine skulptuur, apostel Filippus. Selleks ajaks oli selgunud esimese, st 1625. aasta ülemaalija Pawel Blome olulisus Eesti kunstiloos. Arhiiviallikate põhjal näib olevat tegemist 1624. aastani Põhja-Saksamaal tegutsenud maalijaga, kes seejärel siirdus Tallinna. Siin tegi ta märkimisväärset karjääri väga prominentsete tööde teostajana, aga mängis ka olulist rolli kohalike käsitöögildide positsiooni muutumisel.¹³ Hoolimata suurejoonelistest tellimustest on ainus temalt säilinud töö just nimelt Notke teose ülemaaling. Kõik teised teadaolevad tööd, näiteks Tobias Heinze nikerdatud ja Pawel Blome maalitud Niguliste kiriku kantsel, on nüüdseks hävinud.

¹³ Just tema ja Tobias Heinze tüli viis puunikerdajate ja maalijate gildi eraldumiseni, mis on oluline teetähtis kohalikus käsitöölusel. Vt täpsemalt: H. Hiio, A. Randla, H. Vinnal, K. Aas. *Whose Story to Tell?*, 22.



Illustratsioon 10. Apostel Filippus enne konserveerimist (vasakul), pärast konserveerimist (keskel) ja detail pärast konserveerimist (paremal). Fotod: Martin Siplane, 2023

Teadmine, et tegemist on kohalikul väljal olulise meistriga, tegi konserveerimisotsuse veelgi keerukamaks ja tõi esile küsimuse, kas digikaksik 3D-mudelina asendab füüsilist materiat või on selle roll olla vaid materiaalsuse vahendaja. On selge, et teatud puhkudel, näiteks sõdade jm vägivaldsete või paratamatute kultuuripärandi hävingute puhul, tuleb leppida digikaksiku kui asendajaga, kuid olukorras, kus saaks mineviku materiaalsel tunnistust säilitada, on originaal asendamatu. Nii otsustati apostel Filippusel jätta üks näopool – see, mida altari vaatleja profiilis istuva kuju puhul tavaliselt ei näe – puhastamata ning füüsiliselt kättesaadavaks tuleviku uurijatele.¹⁴ Analoogiliselt Maarja figuuriga 3D-mudeldati ka selle skulptuuri puhul iga järgnev konserveerimisetapp.¹⁵

¹⁴ Vt täpsemalt: H. Hiiop, A. Randla, H. Vinnal, K. Aas. Whose Story to Tell?; H. Vinnal, A. Randla, H. Hiiop, K. Aas. Bernt Notke ja Pawel Blome – kaks Tallinna Püha Vaimu kiriku altarietaabli meistrit konservatori töölaual. – *Renovatum*, 2022/2024. <https://www.anno.renovatum.ee/ee/renovatum-anno-2022-2024/bernt-notke-ja-pawel-blome-kaks-tallinna-pha-vaimu-kiriku-altarietaabli-meistrit-konservatori-tlaual> (11.01.2025); konserveerimistööde aruanne: https://muinas.artun.ee/static/files/075/filippuse_konsveerimine_kanut_2024.pdf (11.01.2025).

¹⁵ Lisaks vt Bernt Notke altariga seotud 3D-mudeleid: <https://skfb.ly/oEz9Q>.



Illustratsioon 11. Apostel Filippuse puitfiguuri 3D-mudel. Ekraanivaade. Andres Uueni, 2024

Kompuutertomograafia kui uurija tööriist

Lisaks tavalisele röntgenuuringule¹⁶ alustasime Notke projekti käigus koostöös Eesti Kohtueksperitiisi Instituudiga (EKEI) ka kompuutertomograafia (KT) ulatuslikku katsetamist pärandi uurimisel. Märgiliseks esimeseks uuringuobjektiks oli Bernt Notke altarietaabli Maarja figuur. Varem on EKEI-s sama meetodiga uuritud Tartu Ülikooli kunstimuuseumi Egiptuse muumiaid.¹⁷

Kompuutertomograafia on suure potentsiaaliga radioloogiline uurimismeetod, mis võimaldab röntgenkiirguse abil salvestada uuritavaid objekte kihiliste ja ruumiliste kujutistena ning luua neist kolmemõõtmelisi rekonstruktsioone. KT-uuringul kasutatav kiirguse hulk on suurem

16 Tavapäraselt 2D-röntgenuuringut teeme koostöös Maksu- ja Tolliametiga. Selle eeliseks on portatiivne aparatuur, sest sageli ei ole võimalik uuritavat kunstiteost transportida ning oluline on seadme mobiilsus.

17 E. Oras, J. Anderson, M. Tõrv, S. Vahur, R. Rammo, S. Remmer, M. Mölder, M. Malve, L. Saag, R. Saage, A. Teearu, P. Peets, K. Tambets, M. Metspalu, D. Lees, M. Barclay, M. Hall, S. Ikram, D. Piombino-Masali. Multidisciplinary Investigation of Two Egyptian Child Mummies Curated at the University of Tartu Art Museum, Estonia (Late/Graeco-Roman Periods). – PLoS One, 2020, 15 1, 1–27. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227446>.

kui tavalise röntgenuuringu puhul ja tulemus oluliselt detailsem. Kui röntgenülevõttega jäädvustatakse objektist üks summeeritud kujutis, siis KT võimaldab jagada uuritava objekti hulgalisteks kitsakihilisteks (0,63 mm) ristlõigeteks. Meetod on laialdaselt kasutusel meditsiinis inimkeha uurimisel, kuid sobib ka elutute objektide kuvamiseks ja jäädvustamiseks. KT-uuring on mittedestruktiivne meetod, mis võimaldab saada detailset informatsiooni uuritava objekti sisestruktuuri kohta ilma seda kahjustamata. Lisaks meditsiinile on see oluline ka kultuuripärandi puhul, kus iga eemaldatud tükk, isegi kui see on mikroskoopiline, lõhub väärtuslikku substantsi. Uuring võimaldab teostada eri tasapindade virtuaalseid läbilõikeid, mis aitavad näha uuritava objekti sisse ja teha nähtavaks selle ehituslikud iseärasused. Neil kujutistel saab teostada mõõtmisi ning analüüsida erinevate struktuuride koostist vastavalt Hounsfieldi ühiku (HU)¹⁸ väärtustele. HU põhjal eristuvad muudest struktuuridest eriti hästi näiteks metallist detailid ja metalli sisaldavad pigmendid.

Kahemõõtmelistest kihtidest on omakorda võimalik luua 3D-kujutisi VRT- (*volume rendering technique*) ja veelgi realistlikumat tulemust andva CVR- (*cinematic volume rendering*) tehnoloogia abil. VRT võimaldab näha objekti sisestruktuuri, muutes selle läbipaistvust ja värvi vastavalt andmete tihedusele. CVR on VRT edasiarendus, mis kasutab keerukamaid valgustusmudeleid, varjude arvutamist ja muid renderdustehnikaid, et saavutada väga kõrge esitus kvaliteet. Informatsiooni saab salvestada nii eri formaatides piltidena kui ka pöörlevate videosalvestistena.

Notke figuuridele teostati EKEI-s kompuutertomograafilised uuringud. Maarja ja Filippuse figuurile tehti need tomograafia Siemens SOMATOM Emotion 6 vastavalt 2022. ja 2023. aastal ning donaatori figuurile tomograafia Siemens SOMATOM go.Top 2024. aastal. Uuringud salvestati parameetritega 130–140 kV, 20–120 mA, kitsa kihiga (0,63–1,25 mm) ning teostati luukerneliga rekonstruktsioonid. Siemensi tarkvara syngo.via abil analüüsiti saadud kahemõõtmelisi kujutisi ning loodi 3D-rekonstruktsioonid.

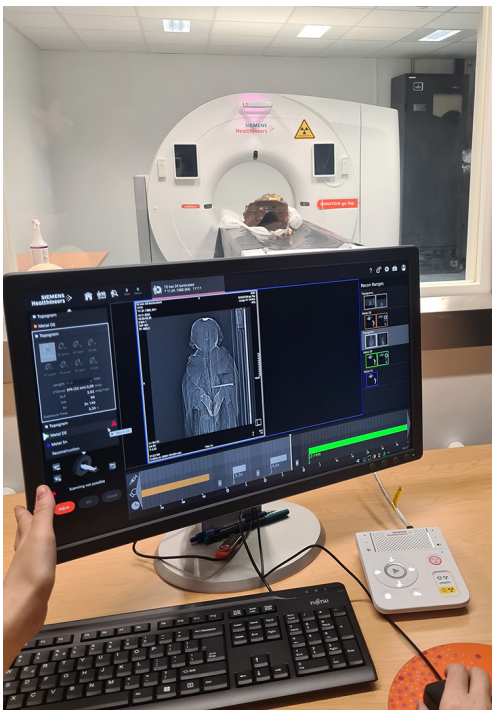
KT-uuringul salvestatud kahemõõtmelistest kujutistest tehti erinevates tasapindades läbilõiked, mis võimaldasid mittedestruktiivselt visualiseerida figuuride nn sisestruktuuri. Nähtavale tulid puidu aastarõngad ja figuuride sees paiknevad õõnsused, välispinnal nähtamatud metallist naelad ja muud ehitusdetailid. KT-uuringu rekonstruktsioonide abil oli võimalik eristada figuuride pinnal kasutatud erineva

¹⁸ Hounsfieldi ühik (HU) on suhteline kvantitatiivne radiotiheduse mõõt, mida radioloogid kasutavad KT-piltide tõlgendamisel.

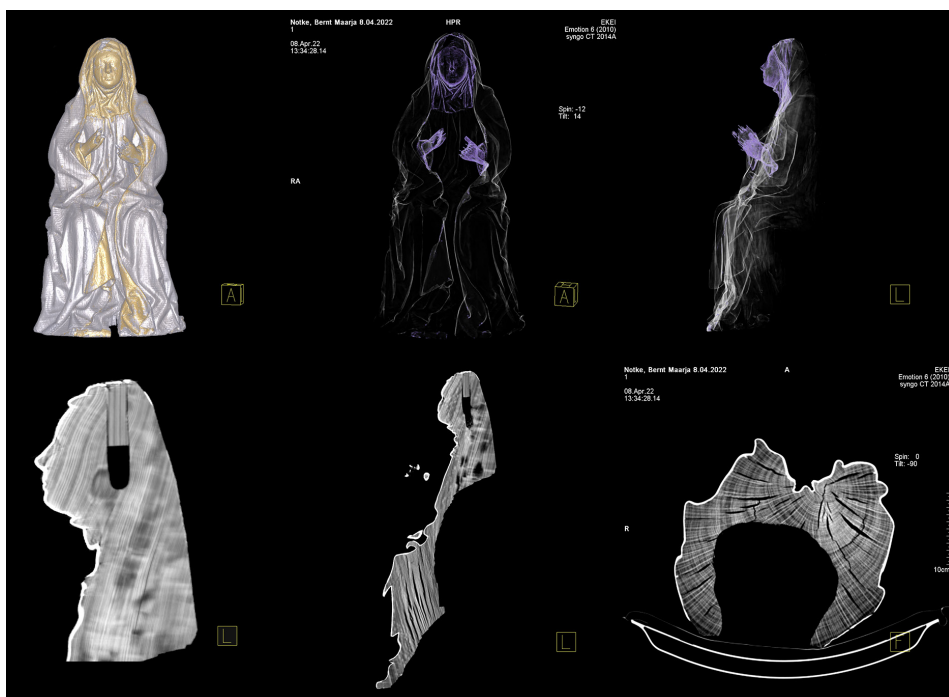
metallisisaldusega pigmente. KT on täiendav ja arenev tehnoloogia, mida saab artefaktiga seotud uurimisküsimusele vastavalt seadistada. Lisaks on selle tehnoloogia arengusuunad pärandi uurimisele soodsad. Nimelt ollakse arendamas kõrglahutusega footonlugemise tehnoloogial põhinevat KT-d, mille pildikvaliteet ja -kontrast on täiesti uuel tasemel. Lähiperspektiivis on paljulubav tehniline lahendus ka mikrokompuutertomograafia (mikro-KT): sarnaselt tavameditsiinilise KT-ga annab mikro-KT väikeste objektide puhul veel täpsemaid tulemusi. Objekti sisemisest ja välimisest struktuurist saab luua ülidetailseid 3D-mudeleid, mida on arvutis võimalik sarnaselt tava-KT-ga vaadata, pöörata, lõigata ja analüüsida. Samuti saab objekte väga täpselt mõõta (sh pikkusi, pindalasid, mahte ja nurki), määrata materjali tihedust ning visualiseerida ja kvantifitseerida materjali poorsust. Seadme omadustest johtuvalt on see väga sobilik vahend, millega artefakti sisemise struktuuri alusel teha dendrokronoloogilisi uuringuid.

Pärandiuurija vaatepunktist on KT kolmemõõtmelised kujutised tavaröntgenist oluliselt täpsem viis objekti sisse näha ning pealispinnalt mittenähtavate elementide paiknemisest uuritava objekti sees aru saada. Näiteks tulid kujutistelt väga selgelt esile donaatori figuuris paikneva sepanaela asetus ja Maarja pead läbiva tehnoloogilise augu sügavus. Veelgi paljulubavamaks KT-rakenduseks võib aga olla dendro-

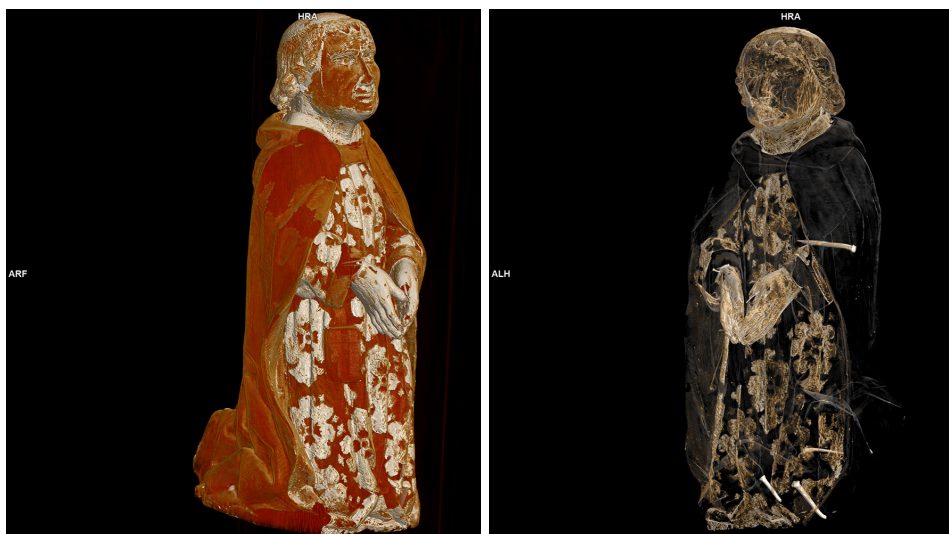
kronoloogiliste uuringute teostamine KT-kujutiste abil. Sageli on ühest tammeklotsist välja tahatud kujude kõige laiem ja dendrokronoloogile kõige huvipakkuvam ristlõikeala skulptuuri keskel, mitte füüsiliselt ligipääsetavas kohas. Ei tarvitse selgitada, et keskaegset kuju poolitada ei saa, ning siinkohal võibki abi olla KT ristlõikepinnast. Ka pigmendikasutuse uuringutes on KT metallituvastust edukalt rakendatud. Mõlemas valdkonnas, aga samuti KT-mudelite interpreteerimises laiemalt oleme alles katsetuste faasis, milleks Notke skulptuurid pakuvad suurepärase võimalust.



Illustratsioon 12. Donaatori figuur kompuutertomograafis.
Foto: Sünne Remmer, 2024



Illustratsioon 13. Neitsi Maarja figuuri kompuutertomograafia 3D-rekonstruktsioon. Erinevad rekonstruktsioonid visualiseerivad erinevaid detaile, sh ristilõige puidu aastarõngastest. Sünnel Remmer, 2023



Illustratsioon 14. Donaatori figuuri kompuutertomograafia 3D-rekonstruktsioon. Parempoolsel fotol on näha figuuri sees olevad sepanaeklad. Sünnel Remmer, 2024

ARUTELU.

3D-DOKUMENTEERIMISE ROLL TÄNASES PÄRANDIHALDUSES

Koos muude uuringuandmete ja 3D-tehnoloogiatega võimaldab nüüdisaegne dokumentatsioon märkimisväärselt kaasa aidata uurimistöole, konserveerimisotsuste tegemisele ning pärandi kohta käiva informatsiooni paremale säilitamisele ja esitamisele. Töid etapiti jäädvustades on võimalik 3D-dokumentatsioonile lisada neljas ehk ajadimensioon, milles on tuvastatavad artefakti võimalikud muutused teatud ajaperioodil ja teatud keskkonnas. 3D talletab keerukate artefaktide kohta kordades rohkem teavet kui traditsiooniline fotograafia.¹⁹ Lisades kolmele ruumimõõtmele ajadimensiooni, saab kasutada vähemalt mingeid ajahetki peegeldavaid 4D-andmeid. Täiendavalt on 3D-andmeid võimalik rikastada semantilise modelleerimise teel, mis kirjeldab objektide funktsioone, omadusi ja suhteid. Lisaks on 3D-mudeleid võimalik integreerida GIS-süsteemidesse, mis seob need geograafilise asukoha ja muude ruumiandmetega.

Siiski on 3D-andmete kogumise potentsiaali kultuuripärandi vallas seni selgelt alarakendatud. Reaalsuses on 3D universaalsemal kasutamisel endiselt takistusi, mis sõltuvad paljudest suurematest ja väiksematest künnistest. Kuna pärandobjektid on väga erinevate omadustega, on hulk artefakti iseloomust tingitud piiranguid, nagu näiteks materjaliuuringute teostatavus, pinnaomadused ja objekti mõõtmed, mis kõik mõjutavad tehnoloogilisi valikuid. Tehnoloogiate ja seadmete paljususe tõttu on raske kõige sobivamat lahendust leida. Lisaohuks on sõltuvus ühe toote või teenusepakkuja monopoolsest seisundist (nt Sketchfab²⁰, RealityCapture²¹). Samuti pole alati lihtne leida kultuuripärandis orienteeruvat pildindusspetsialisti, kel oleks 3D-rakendustes piisavad tehnilised teadmised, kogemused ja oskused. Veelgi keerukam on mäluasutustel paigutada ressursse valdkonda, kus mitmed lahendused ja süsteemid tuleb endal arendada, kusjuures puuduvad ühtsed standardid, arusaadavad juhised ja töövood. Näiteks ei olda arheoloogias kasutatud juhendeid²² varmad kohandama ja kasutama esemelise pärandi uurimisel, kuigi töövoos erinevused on tihti vaid pisidetailides. Just standardite,

19 Heritage Building Information Modelling. Ed. by Y. Arayici, J. Counsell, L. Mahdjoubi, G. A. Nagy, S. Hawas, K. Dweidar. Routledge, London, 2017.

20 Sketchfab on veebipõhine 3D-mudelite visualiseerimise platvorm: <https://sketchfab.com/> (11.01.2025).

21 RealityCapture on fotogramm-meetria mudelite loomiseks ja töötlemiseks loodud tarkvara: <https://www.capturingreality.com/> (11.01.2025).

22 Archaeology Data Service, Guides to Good Practice. <https://archaeologydataservice.ac.uk/help-guidance/guides-to-good-practice/data-collection-and-fieldwork/laser-scanning-for-archaeology/introduction/scope-of-this-guide/> (11.01.2025).

juhiste ja töövoo ühtsuse puudumine sunnib mäluasutusi ja pärandiga kokku puutuvaid organisatsioone tegema oma otsuseid märksa konservatiivsemalt, kui nad tegelikult sooviksid. Üheks 3D-informatsiooni alakasutamise põhjuseks on ka 3D-andmete hoiustamise keerukus ja puuduv infrastruktuur, ehkki mäluasutuse kohustus on andmeid pikaajaliselt säilitada.

Siin loetletu on vaid osa põhjustest, miks 3D-möödistamine ja saadud tulemuste kasutamine on nii rahvusvahelisel kui ka kohalikul väljal praegu kultuuripärandi valdkonnas pigem erand kui reegel.

Inertne juhendmaterjalide ja standardite loomine ei tohiks aga jääda ületamatuks takistuseks ja seetõttu on vaja endiselt 3D-dokumenteermise lahendusi esil hoida. Paralleelselt on oluline arendada ka pärandiuurimises rakendatavaid 3D-erilahendusi, nagu näiteks siin artiklis tutvustatud kompuutertomograafia või DEM-kõrgusmudeli kasutamine. Mõlemad on konserveerimisprotsessis suure potentsiaaliga, kuid harva kasutatud meetodid, mille abil saab luua märkimisväärsel hulgal 3D-andmeid ja teadmisi, mida efektiivselt konservatori töövoogu lisada.

Siiski on tehtud ka katseid kultuuripärandi spetsiifilistest vajadustest lähtuvalt töövoogu kohandada, digiandmeid kureerida ja standardida. Nii on näiteks ehituspärandi vallas paarkümmend aastat püütud rakendada ajalooliste hoonete lähteolukorra infomudelit ehk Heritage BIM-i (HBIM). HBIM loob võimaluse keeruka artefakti dokumentatsiooni laiemaks analüüsiks, kaardistamiseks, visualiseerimiseks ja arhiveerimiseks. Kultuuripärandi- ja muinsuskaitse spetsialistid saavad seda oma töös edukalt rakendada, eriti kui see on optimeeritud kujul veebis kättesaadav.²³ HBIM keskendub peamiselt ehitiste detailsele kirjeldamisele (sh ajaloole, geomeetrilisele ja informatsioonilisele modelleerimisele) rõhuasetusega ajaloolisel täpsusel ja muutuste dokumenteerimisel, mis on vajalik eeskätt konserveerimis- ja restaureerimistöde planeerimisel.

HBIM lähtub eeskätt ehituspärandist ja selle kasutamisel on endiselt mitmeid tehnoloogilisi barjäre.²⁴ Kuna vastavad juhendmaterjalid

23 S. Logothetis, A. Delinasiou, E. Stylianidis. Building Information Modelling For Cultural Heritage: A Review. – ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W3, 2015, 177–183. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W3-177-2015>; Come funziona il sistema informativo per il restauro del Nettuno di Bologna. – Archeomatica, 2016. <https://www.archeomatica.it/restauro-e-conservazione/come-funziona-il-sistema-informativo-per-il-restauro-del-nettuno-di-bologna> (11.01.2025).

24 M. M. Vieira, G. Ribeiro, R. Paulo *et al.* Strategy for HBIM Implementation Using High-Resolution 3D Architectural Documentation Based on Laser Scanning and Photogrammetry of the José de Alencar Theatre. – Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage, 2023, 30, e00287. <https://doi.org/10.1016/j.daach.2023.e00287> (11.01.2025).

ei ole esemelisele kultuuripärandile kohandatavad, siis on selle kõrval hakatud paralleelselt arendama digikaksikute kontseptsiooni. Kontseptsioon on üle võetud tootmis- ja tööstussektorist ning see on oluliselt paindlikum, ehkki ressursinõudlikum lahendus.

Digikaksik

Termin „digikaksik“ (*digital twin*) või „digiteisik“ on 3D-dokumenteermise kontekstis üha laiemalt kasutuses. Mõiste tugineb toote elutsükli haldamise kontseptuaalsele mudelile, mis on levinud paljudesse valdkondadesse, näiteks tootmine (tootmisprotsesside optimeerimine, hooldus, kvaliteedikontroll), tervishoid (raviskeemide väljatöötamine, meditsiini-seadmete arendus), ehitus (projekteerimine, protsesside juhtimine ja haldamine) ja linnaplaneerimine (virtuaalsed mudelid, infrastruktuuri planeerimine, keskkonnamõjude analüüs). Kui tavaline 3D-mudel on ühel konkreetsel ajahetkel loodud muutumatu staatiline kujutis ja selle peamine funktsioon on info visualiseerimine, siis ideaalne digikaksik peaks olema dünaamiline ja elav mudel, mis on ühenduses reaalse maailmaga. Digikaksikud luuakse kas kontseptuaalsete mudelite (BIM, CAD või GIS) importimise või objektide 3D-mõõdistamise teel, et neid seejärel reaalses vastavate andmetega täiendada. Tulemuseks pole enam staatiline 3D-mudel, vaid midagi palju enam – kompleksne ja dünaamiline andmeid, otsuseid ja protsesse kirjeldav dokumentatsioon.

Kultuuripärandi vallas on terminit „digikaksik“ järjest enam kasutama hakatud, kohati ka ülekasutama, et kirjeldada pärandi 3D-dokumenteermisega seotud tegevusi. Näiteks kui artefaktist tehakse põhjalikke uuringuid ja selle raames kogutakse 3D-andmeid, valmistatakse lähteolukorra mudel, tehakse andmeanalüüse ja virtuaalseid simulatsioone ning kui teatud ajaperioodi vältel kogutud 3D-andmed seotakse dokumentatsiooniga, siis see on pärandimaailmas teostatav digikaksiku formaat. Samas on suurel osal juhtudest digikaksiku kontseptsiooni rakendamine keerukas või ka põhjendamatu. Enamasti piisabki kvaliteetsest 3D-mudelist. Aga oluline on aru saada, et 3D-mudel ei ole iseenesest veel digikaksik, vaid ainult esimene etapp selleni jõudmiseks. Käimas on ka laiem arutelu selle üle, kas kultuuripärandit saab täielikult vaadelda digikaksiku mõistes ja kas digikaksiku kontseptsiooni rakendamine on kultuuripärandi haldamisel jätkusuutlik tegevus.²⁵

25 L. F. R. Correia, R. Bartholo, A. Brufato, E. C. T. Sanchez. Toward a Digital Twin for Cultural Heritage. – *Advances in Tourism, Technology and Systems*. Ed. by J. V. de Carvalho, Á. Rocha, P. Liberato, A. Peña, Springer, Singapore, 2023, 419–430. https://dx.doi.org/10.1007/978-981-99-0337-5_35; M. Cosovic, M. Maksimovic. Application

Kultuuripärandiga seondult on tehtud mitmeid digikaksiku rakendamise katsetusi ja prototüüpe, sealhulgas pärandi riskihalduse mudeli uuringuid.²⁶ Digikaksiku ideest ajendatuna käivitas Euroopa Komisjon Europeana algatusel 3D Euroopa-kampaania, mis kutsus Euroopa Liidu liikmesriike üles valima ja jagama vähemalt üht sümboolset ja kvaliteetset 3D-mudelit ühisesse Euroopa kultuuripärandi – Europeana – andmeruumi.²⁷

Paljudele artefaktidega seotud otsustele ja tööloikudele (nt konserveerimisprotsessi haldamine, pärandi säilitamine, uurimine ja kättesaadavaks tegemine) võib selle kontseptsiooni osaline rakendamine olla vajalik ja kohati ka teostatav, näiteks nagu kirjeldatud rüütelkonna hoone plafoonmaali kahjustuste analüüs ja muutuste tuvastamine teatud aja-perioodi vältel või Neitsi Maarja ja apostel Filippuse konserveerimistöode etapiviisiline jälgimine.

Tuleviku vaates on kultuuripärandi vajadustele kohandatud digikaksikutel kindlasti kasvav roll pärandile erineval tasemel juurdepääsu tagamisel. Näiteks on tavakülastajal võimalik ajateljel liikudes objekte virtuaalselt külastada, uurida, võrrelda ja saada seeläbi ligipääs osale seni piiratud teabest. Meelahunusliku õppe (*edutainment*) lahendused võimaldavad aga mängulist õppimist interaktiivsel ja kaasahaaraval viisil, näiteks mõista kadunud tehnikaid, ajalooliste hoonete ehitusstiile või teatud arheoloogiliste leidude tähtsust.

Digikaksikud pakuvad kultuuripärandi haldamiseks ja populariseerimiseks mitmeid võimalusi. Nad aitavad säilitada kultuuripärandit tulevastele põlvedele, pakuvad selle uurimiseks uusi ja põnevaid lahendusi ning muudavad pärandi kättesaadavaks laiemale avalikkusele. Tehnoloogia arenedes muutuvad digikaksikud ilmselt üha olulisemaks vahendiks kultuuripärandi uurimisel, säilitamisel ja avalikul esitlemisel. Tuleviku vaates võiksid standardsetel alustel loodud digikaksikute kogumid olla väga oluliseks andmeanalüüsi allikaks ja ka digitaalsete andmete

of the Digital Twin Concept in Cultural Heritage. – VIPERC2022: 1st International Virtual Conference on Visual Pattern Extraction and Recognition for Cultural Heritage Understanding, 2022. <https://ceur-ws.org/Vol-3266/paper8.pdf> (11.01.2025); J. Hutson, J. Weber, A. Russo. Digital Twins and Cultural Heritage Preservation: A Case Study of Best Practices and Reproducibility in Chiesa dei SS Apostoli e Biagio. – Art and Design Review, 2023, 11, 15–41. <https://doi.org/10.4236/adr.2023.111003>; A. Vuoto, M. F. Funari, P. B. Lourenço. Shaping Digital Twin Concept for Built Cultural Heritage Conservation: A Systematic Literature Review. – International Journal of Architectural Heritage, 2023, 18, 11, 1762–1795. <https://doi.org/10.1080/15583058.2023.2258084>.

²⁶ Y. Guo, L. Liu, W. Huang *et al.* Extending X-reality Technologies to Digital Twin in Cultural Heritage Risk Management: A Comparative Evaluation from the Perspective of Situation Awareness. – Heritage Science, 2024, 12, 245. <https://doi.org/10.1186/s40494-024-01363-6>.

²⁷ Twin It! A pan-European collection of heritage 3D models. <https://www.europeana.eu/en/galleries/15694-twin-it-a-pan-european-collection-of-heritage-3-d-models> (11.01.2025).

kureerimise vahendiks, mille abil saab näiteks tehisaruga teha esemete morfoloogiat/geomeetriat puudutavaid otsinguid, kunstimälestiste ja ehituspärandi detailide segmenteerimist, võrdlust jm. Siinkohal on võimalik, et piisavalt standarditult ja 3D-andmetega varustatult annavad digikaksikud massandmetena uue võimaluse analüüsida kasutatud tehnikaid ja teha seeläbi uusi avastusi. Samuti saab seda kontseptsiooni kasutada artefaktide digitaalseks ennistamiseks: piisava info olemasolul on võimalik, et ka oluliste kahjustuse korral ei kao artefakti kultuuriline ja ajalooline väärtus ning seda saab hoolikalt rekonstrueerida.

Seni pole pärandimaailmas veel konsensust, millises ulatuses ja kuidas kõiki erilaadilisi pärandpaiku ja artefakte digikaksiku vaatenurgast käsitleda ning kuidas seda kontseptsiooni laiemalt adapteerida, kuid sel teemal peetakse kindlasti lähitulevikus olulisi debatte.

Standardimine

Ehkki 3D-andmete kogumist ja 3D-modelleerimist on ligi pool sajandit eri distsipliinides arendatud ning selle olulisust teadvustatud, on mitmesuguste uuringute käigus toodetud 3D-mudelid ja nende tõlgendused endiselt kasutusel pigem teaduslike kaastööde (ajakirjaartiklite, konverentsiväljaannete) illustratsioonidena. Nii moodustab paljudel juhtudel 3D-möödistuse protsessi tekstiline kirjeldus suure osa artiklist, omamata samas uudsust või olulist innovatsiooni. Kuna kultuuripärandi 3D-möödistamisel ja -mudeldamisel pole veel laiemalt aktsepteeritud standardeid ja puuduvad põhjalikud juhised andmete kogumiseks ja kvaliteedi hindamiseks, kasutatakse tihti teiste majandussektorite või riikide juhiseid, mis tuginevad teistlaadsele praktikale ja traditsioonidele.²⁸ Andmete arhiveerimise, pikaajalise säilitamise ja esitamise puhul aga lähtutakse n-ö paberipõhise maailma kasutusloogikast.

Praegu kasutusel olevates juhendites viitavad kvaliteediparameetrid protsessi eri etappidele ja varieeruvad olenevalt materiaalse pärandi tüübist, kasutatud seadmetest ja meetodikast ning lähtuvad saadud 3D-andmete võimalikest eesmärkidest või kasutusviisidest.²⁹

28 Fotogramm-meetria rakendamine ehituses, RT 103132-et: Juhend, november 2019, 1 (9). Eesti Ehitusteabe Fond. <https://ehituskeskus.ee/raamatud/rt-103132-et-fotogramm-meetria-rakendamine-ehituses/> (11.01.2025); Hoone laserskaneerimine, RT 103133-et, Hoone laserskaneerimine, RT 103133-et: Juhend, november 2019, 1 (7). Eesti Ehitusteabe Fond. https://ehituskeskus.ee/raamatud/rt-103133-et_hoone-laserskaneerimine/ (11.01.2025).

29 European Commission: Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology, Study on Quality in 3D Digitisation of Tangible Cultural Heritage. – Mapping Parameters, Formats, Standards, Benchmarks, Methodologies, and Guidelines: Final Study Report. Publications Office of the European Union, Brussels, 2022. <https://data.europa.eu/doi/10.2759/471776> (11.01.2025).

Olemasolevas informatsioonis orienteerumine nõuab aga spetsiifilisi teadmisi ja väga paljudel mäluinstitutsioonidel neid lihtsalt pole. Kindlasti on 3D-andmete kogumise ja arhiveerimisega seotud küsimused pidevad, mistõttu proportsionaalselt palju ressursi läheb sobivate lahenduste testimiseks ja loomiseks.

Samas on 3D-tehnoloogiad teinud just viimastel aastatel suure kvaliteedihüppe ja praegu oleks viimane aeg hakata sellega seotud tegevusi standardima, et tagada valdkonna areng.³⁰ Võimalikult kiiresti oleks vaja standardseid tehnilisi kirjeldusi, et tagada 3D-andmete ning kaasnevate meta- ja paraandmete³¹ koostalitlusvõime ja jätkusuutlikkus. Siiski, rahvusvaheliselt on selles vallas juba ka loodud terminite ja mõistete süsteem, millele on antud nimetus *Heritage Digital Twin Ontology*. Tegemist on kultuuripärandi dokumentatsioonis tuntud CIDOC CRM-i ISO standardiga³² ühilduva laiendusega, mis hõlmab kõiki praegu kultuuripärandi dokumenteerimiseks kasutatavaid eri süsteeme.³³ Eestis pole teadaolevalt ei MuIS ega kultuurimälestiste register sellele standardile kohandatud. See on aga oluline, et 3D-andmeid saaks harmoniseerida ja 3D-sisuga siduda, näiteks kasutada standardset annoteerimise võimekust, audiovisuaalse sisuga kombineerimist, erilahenduste käigus loodud andmete ühildamist, aga ka täiendavate dimensioonide – aeg, materjal ja lood – lisamist.

Vaatamata 3D-mudelite loomiseks vajalike teadmiste, oskuste ja vahendite kättesaadavuse paranemisele viimastel aastatel, on 3D-möödistamise valdkond endiselt väga dünaamiline ning teiste teadusharude ja majandussektorite poolt juhitud. Seetõttu näeme, et 3D-dokumenteerimine on jäänud pärandi perspektiivis pigem eksklusiivseks tegevuseks.

Kõik 3D-dokumentatsiooni töövoo komponendid peaksid olema paindlikud ja kohandatavad vastavalt objekti omadustele ja uurimisküsimustele, samas standardsed. Järjest olulisemaks muutub andmete masinloetavus ja juba loomise hetkel arhiivikõlblikkusega arvestamine.³⁴

30 F. I. Apollonio. The Three-Dimensional Model as a 'Scientific Fact': The Scientific Methodology in Hypothetical Reconstruction. – *Heritage*, 2024 7, 5413–5427; 3D Data Creation to Curation: Community Standards for 3D Data Preservation. Ed. by J. Moore, A. Rountrey, H. S. Kettler. Association of College and Research Libraries, Chicago, Illinois, 2022.

31 Paraandmed viitavad andmetele, mis on loodud andmekogumise otsuste ja protsessi läbiviimise kohta.

32 CIDOC (*International Committee for Documentation of ICOM, the International Council of Museums*) CRM (*conceptual reference model*), standard ISO 21127:2014, alates detsembrist 2006. <https://cidoc-crm.org/> (11.01.2025).

33 F. Niccolucci, B. Markhoff, M. Theodoridou, A. Felicetti, S. Hermon. The Heritage Digital Twin: A Bicycle Made for Two: The Integration of Digital Methodologies Into Cultural Heritage Research. – *Open Res Europe* 2023, 3, 64. <https://doi.org/10.12688/openreseurope.15496.1>.

34 M. Quantin, S. Tournon, M. Chayani, X. Granier, F. Laroche. Publishing and Long-Term Archiving 3D Data in Humanities. – *3D Research Challenges in Cultural Heritage V*:

Tehnoloogia areng võimaldab kasutada lahendusi, mis on varasematest meetoditest tunduvalt kuluefektiivsemad ja kättesaadavamad, kuid nõuavad samas ka sellega pidevalt tegelemist. Mitmed riigi- ja eraorganisatsioonid on huvitatud niisuguste andmete kogumisest, haldamisest, säilitamisest ja neile juurdepääsu võimaldamisest, kuid seda takistab terve hulk organisatoorseid ja tehnoloogilisi piiranguid. Selleks on oluline standardimine, mis tagaks usaldusväärse, läbipaistva, kontrollitava, korratava ja hallatava lahenduse kasutuselevõtu. Praegusel juhul on need lahendused sageli üles ehitatud ühte uurimisprojekti silmas pidades, mistõttu üldist head tava või kitsamat standardit näiteks digikaksiku kohta on keeruline aluseks võtta.

Teoreetiliselt võivad standardsed 3D-andmed samaaegselt toetada mitut valdkonda, sealhulgas arhitektuuri, restaureerimist, konserveerimist ja inseneritööd. Standardsed andmed aitavad kirjeldada eesmärgile või analüüsile omaseid tunnuseid.³⁵ Kui standardiseerimist aga andmete loomise faasis ei tehta, siis ei suudeta suuri andmehulki nõuetekohaselt koguda ega hallata, eriti kui puuduvad eksperdi tasemel mõõdistamise ja digiandmetega töötamise oskused.

Kogutud ja töödeldud 3D-andmete säilitamiseks ja paremate teenuste pakkumiseks laiemale avalikkusele ning hariduslikuks või teaduslikuks uurimistööks on vaja keerukat ja organiseeritud digitaalset kureerimist. Standardimise puudumise tõttu on probleemne ka andmete visualiseerimine ja pikaajaline säilitamine.³⁶

3D-andmete eelised ja piirangud

Nagu oleme korduvalt rõhutanud, on 3D-andmetega rikastatud dokumentatsioon traditsioonilisest märkimisväärselt efektiivsem ja detailsem. Tabelis oleme toonud senise kogemuse põhjal esile peamised eelised ja nendega seotud piirangud või ohud, mida valdkonnas tegutsedes oleme täheldanud.

Nagu ilmneb, taanduvad paljud piirangud ja ohud planeeringulistele aspektidele, mistõttu peaks projektide elluviimisel ühendama standardimise, kvaliteedi, tehnoloogia ja kasutuseesmärgi. Kuna

Paradata, Metadata and Data in Digitisation. Ed. by M. Ioannides, D. Baker, A. Agapiou, P. Siegkas. Springer, Cham, 2024, 75–88. https://doi.org/10.1007/978-3-031-78590-0_7.

35 J.-B. Barreau, E. L. Du Cardonnoy, F. Laroche *et al.* Specification Writing Guide: How To Manage a Project in 3D for Cultural Heritage: Recommendations of the “Consortium 3D for Humanities”, 2021. <https://hal.science/hal-03193142v1> (11.01.2025).

36 M. S. Bakken Storeide, S. George, A. Sole, J. Y. Hardeberg. Standardization of Digitized Heritage: A Review of Implementations of 3D in Cultural Heritage. – *Heritage Science*, 2023, 11, 249. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01079-z>.

Tabel. 3D-dokumenteerimise peamised eelised ja piirangud

EELISED	PIIRANGUD JA OHUD
Säästab aega. Kuigi andmetöötluseks kuluv aeg võib olla pikk, on tulemuste saamiseks vaja vähem inimese sekkumist	Optimaalsete lahenduste leidmiseks keeruliste objektide dokumenteerimisel on vaja palju kogemusi, samuti jätkusuutlikke tööprotsesse ja nende juhtimise töövoogu
Säästab raha. Hästi kavandatud, planeeritud ja läbiviidud 3D-möödistus on kulusäästlik ja tõhus	Vale otsus või ebamäärane projekti planeerimine võib põhjustada varjatud kulusid ja projekti kontrollimatut kestust ning sellega seotult kulude hüppelist kasvu
Loob täpsed andmed. Suur eraldusvõime võimaldab täpselt kindlaks teha mõõtmeid, nurki ja vahemaid, aidates objekti analüüsida ning toetades edasisi uurimis- ja säilitustegevusi. Väikseimadki detailid (nt ajaloolised tööriistajäljed) muutuvad nähtavaks, pakkudes ülevaadet kasutatud tehnikatest, objekti kasutusajaloost, objekti mõjutanud keskkonnateguritest ja muust	Möödistamise planeerimisel ja tööde käigus tehtud vead võivad akumuleeruda ning mõõtehälve võib seetõttu olla eeldatust suurem või sobimatu edasiseks kasutamiseks. Vaja on 3D-jäädvustamise meetodite ja tulemuste standardimist, samuti andmete kontrollimise ja tulemuste tõlgendamise oskust
Vähendab oletusi. Korduvate möödistuste abil on võimalik andmeid analüüsida ja muutusi võrrelda, vähendades 3D mudeli määramatust või kinnitades hüpoteese	Oletuste ja ebatäpsuste vähendamine võib sõltuda projekti ulatusest, kestusest, objekti keerukusest ja korrektselt püstitatud uurimisküsimustest
On ohutu ja ergonoomiline. 3D-möödistamine ja sellega seotud tegevused on mittelõhkuvad lahendused, võimaldades üksikasjalikku dokumenteerimist ilma objektile füüsilist kahju tekitamata	On vaja õigeid töövahendeid ja teadmisi ning erakordset tähelepanu suure riskiga keskkondades (nt varemed) möödistamise planeerimisel. Ohutuse tagamiseks vajalikud lisakulud ja vahendid (nt robotid, droonid) võivad projekti eelarvet oluliselt suurendada
Välistab ebavajalike andmete säilitamise. Töö etappidesse jaotamine planeerimisfaasis tagab, et ebaoluliste vaheetappide andmeid säilitatakse kokkulepitud perioodil lühiajaliselt ja seejärel need kustutatakse. Piisava hulga para- ja metaandmete sidumine otsuste kirjeldamisega	Projekti etappide jooksul on palju andmete tuletisi, näiteks algandmeid, erinevaid punktipilvi (detailsuse tasemed, formaadid), erinevaid tööversione, 3D-võrkmodelleid, erineva tasemega ehitusinfomodeleid (nt Level of Development: LOD350), ja suur hulk visualiseerimisi. Sellise andmemahu pikaajaline käitlemine, haldamine ja säilitamine suurendab oluliselt hooldus- ja arhiveerimiskulusid. Ilma täpse dokumentatsioonita andmete säilitamine tekitab probleeme tihti juba projekti vältel

EELISED	PIIRANGUD JA OHUD
Soodustab koostööd ja andmete jagamist. Hästi organiseeritud koostöö hõlbustab distantsilt andmete jagamist, uurimist ja digitaalset säilitamist. 3D-mudel hõlbustab distantsilt andmete uurimist: 3D-andmeid saavad teadlased kogu maailmas hõlpsasti jagada ja analüüsida, mis soodustab koostööd ja teadmistevahetust	3D-mudeli probleemide ja eksimuste kontrollimine on aeganõudev ning võib olenevalt tööriistadest ja projekti ulatusest olla kulukas. Ebapiisavate metaandmetega 3D-andmeid on keeruline jagada ja hallata
Aitab andmeid visualiseerida. Heal tasemel andmete esitamisega on interaktiivsete 3D-mudelite kaudu võimalik kaasata nii spetsialiste kui ka avalikkust ning selle abil tõsta teadlikkust ja toetada kultuuripärandi säilitamist	Vaja on keerukaid töövahendite komplekte, mida saab kohandada vastavalt publikule. Praegu on olemas lai valik sõltumatuid teenuseid ja tööriistu (sh tehisarule tuginevaid), mis võivad oluliselt mõjutada hoolduse, visualiseerimise ja digitaalse säilitamise kulude kasvu

3D-tehnoloogiad on pidevas arengus, tuleb neid uurida ja katsetada, et leida viise tehnoloogia optimaalseks kasutamiseks, aga ka eksperimentaalsemate erilahenduste rakendamiseks.

3D-dokumenteering tervikuna ja uued arengusuunad laiendavad ühelt poolt kasutusalasid, toovad turule uusi seadmeid ja rakendusi ning ületavad varasemaid tehnoloogilisi piiranguid, teisalt on aga väga nõrkade või puudulike standarditega keeruline tagada andmete ühtlust ja pikaajalist säilitamist. Digitaalse dokumentatsiooni standardimine on aeglane, kuid turu reguleerimiseks ja 3D-dokumentatsiooni pikaajalise tagamiseks siiski vajalik protsess. Lootusrikkalt tuleb siiski märkida, et praegu on tekkimas 3D-arhiveerimiseks sobilikke lahendusi, mis asendavad seniseid kalleid ja keerulisi süsteeme.³⁷

KOKKUVÕTE

3D-möödistamine on kättesaadav ja efektiivne viis keerukate pärandobjektide dokumenteerimiseks ning seetõttu oleme seda süsteemselt juurutanud ja katsetanud (kunsti)ajaloolaste ja konservaatrite töövoos osana. Tehnoloogilised lahendused, nagu fotogramm-meetria, 3D-skaneerimine ja nende erilahendused, aga ka näiteks kompuutertomograafia, võimaldavad luua pärandiuurimises uue tehnoloogilise taseme, uuele tasemele jõutakse ka eri valdkonna spetsialistide teadmiste sünergias. Ühelt poolt on väga oluline pidev valdkondlike ja

³⁷ N. Amico, A. Felicetti. 3D Data Long-Term Preservation in Cultural Heritage. – arXiv:2409.04507, 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.04507>.

valdkonnaväliste töövahendite ja -meetodite testimine ning kohandamine, teisalt aga standardimise poole pürgimine.

Alustasime 3D-andmetega eksperimenteerimist konserveerimise töövoos osana kümme aastat tagasi projekti „Rode Altarpiece in Close-Up“ (2013–2016) raames.³⁸ Siinses artiklis näidatena kasutatud rüütelkonna hoone plafoonmaali ja Bernt Notke altarijetaabli uurimis- ja konserveerimistööde osana teostatud 3D-mõõdistustes ja -mudeldamistes ning andmete interpreteerimises oleme mahu ja teostuse osas juba pika sammu edasi astunud. Hüppeliselt on arenenud ka tehnoloogiad ja vahendid, mida selliseks kompleksseks mõõdistamiseks saab kasutada. Protsessi käigus oleme jõudnud arusaamani, et isegi visuaalselt tasapinnaliste kunstiteoste puhul on 3D-mudeldamisel ja selle spetsiifilistel rakendustel (sh DEM-kõrgusmudel) märkimisväärne potentsiaal konserveerimisotsuste toetamisel, tööprotsessi dokumenteerimisel ning tulemuste hindamisel, nagu näitlikustas plafoonmaali juhtum. Samuti on 3D-andmed usaldusväärsed ja vajalikud oluliste konserveerimisotsuste talletamisel, seda eriti juhul, kui füüsilises maailmas pole neid otsuseid võimalik tagasi pöörata, nagu Notke skulptuuride kaudu näitasime.

Meie endi tegevus peegeldab paljus ka rahvusvahelisel pärandiväljal toimuvat arengut. On selge, et 3D-dokumenteering on traditsioonilistest viisidest kordades efektiivsem ja täpsem andmekogumisviis.

Nagu artiklis näitasime, on 3D-andmetega seotu arenenud viimase kümnendi jooksul hüppeliselt, aga paraku pole sellele samas tempos järele jõudnud juhendid ja standardid, mis toetaksid 3D-andmestiku levimist pärandi valdkonnas laiemalt. Endiselt on see pigem üksikprojektide ja -ekspertide pärusmaa, paradoksaalselt seda enam, mida spetsiifilisemaks seadmed ja oskused muutuvad.

Artiklis üritasime arutleda selle üle, kuhu 3D-valdkond liigub ning mis takistab sel pärandivaldkonna igapäevase töövoos osaks saamist. Jõudsime järeldusele, et suurim probleem on puuduvad standardid, mis aitaksid mäluasutustel 3D-andmete kasutamise vajaduse üle arutada, tegevusi planeerida, andmeid koguda, tõlgendada, hoida ja säilitada. Et lõpetada optimistliku noodiga, sedastasime, et nüüdseks on juba välja antud ka esimesed 3D-andmete kureerimise juhendmaterjalid, mis aitavad suurendada teadlikkust ja vähendada võimalikke eksimusi, ning valmimas on ka 3D-andmete arhiveerimiseks sobilikke rakendusi.

38 A. Uueni, H. Pagi, H. Hiiop. Pärandkultuuri uurimine erinevate tehniliste meetodite abil, Niguliste kiriku pealtari näitel. – *Renovatum*, 2015, 50. <https://www.anno.renovatum.ee/ee/renovatum-anno-2015/prandkultuuri-uurimine-erinevate-tehniliste-meetodite-abil-niguliste-kiriku-pealtari-nitel> (11.01.2025).

Tänuavaldused

Artikli autorid on seotud projektiga „Bernt Notke Püha Vaimu kiriku altari-
retaabli uuringud“ (01.01.2019–31.12.2026), number 8-3/96 (2019) PRO4019.

3D MODELLING AS A TOOL FOR
CONSERVATORS AND RESEARCHERS:
THE CEILING PAINTING OF THE
KNIGHTHOOD HOUSE AND BERNT
NOTKE'S ALTARPIECE

Andres Uueni, Hilikka Hiiop, Sünne Remmer

The article focuses on contemporary 3D documentation solutions, examined through case studies of two masterpieces: the 15th-century Bernt Notke altarpiece and a 17th-century canvas ceiling painting. The cases are of interest because the former is a three-dimensional work of art where 3D documentation is expected, while the latter is a two-dimensional artwork, the documentation of which is mostly limited to traditional photography. In both cases, we successfully applied standard and specialised 3D surveying solutions based on the artworks' research and/or conservation questions.

In the case of the 17th-century, 60-square-metre painting comprising nine panes, we used a Digital Elevation Model (DEM) derived from 3D data at three different stages of the conservation process. This model visualised the creases and unevenness of the canvas, which had long been hidden in unfavourable conditions. These imperfections did not disappear even with traditional treatment, as demonstrated by the DEM created during the second stage of conservation. This helped us decide in favour of a special spring-loaded aluminium frame for stretching the painting. After the painting was stretched on the frame, a new DEM showed that all deformations of the canvas had been eliminated. This case demonstrates that even for seemingly two-dimensional artworks, photogrammetry and its derivatives can be useful both in making conservation decisions and in checking their effectiveness.

In the case of the Bernt Notke altarpiece, dating from 1483, we used traditional 3D surveying methods, namely laser scanning and photogrammetry. We recorded this artwork of international significance both as a whole and in its separate parts. What makes this case intriguing

are the later overpaint layers from 1625 and 1815 covering the altarpiece's original painting, which were removed during conservation. As the memory of these physically irreversibly lost but historically important layers can only be preserved digitally, we created a highly accurate 3D model of each removed layer. With certain reservations, these could even be called digital twins of the conserved sculptures, as they recorded the life cycle of these unique artworks.

As a specialised solution, we conducted some of the first experiments on Notke's sculptures with 3D applications of computer tomography, which are useful for understanding the objects' internal structure and technical characteristics, as well as potential tools for dendrochronological studies and for determining colour composition.

The second part of the article discusses the current position of 3D surveying in the heritage field. Based on today's heritage documentation strategies and guidelines, it might seem that the recording of 3D data for multi-dimensional objects (e.g., sculptures, archaeological artefacts, buildings, etc.) has become a self-evident part of the workflow. However, this is not the case in reality. In the case of two-dimensional cultural assets (paintings, works on paper, etc.), 3D surveying is usually not applied at all, or only rarely. In the article, we try to open a discussion on why 3D surveying is still so rarely applied in the field of (artistic) heritage, even though it is a significantly more effective way to collect important information than traditional methods.

We conclude that this is primarily influenced by the lack of widely accepted standards and guidelines, which hinders data interoperability and long-term preservation. Standardisation is necessary to ensure data reliability, transparency, verifiability, and manageability. It is precisely the lack of standards, guidelines, and workflow consistency that forces memory institutions and organisations dealing with heritage to refrain from creating 3D data. However, there are positive developments, such as the terminology and concept system of the Heritage Digital Twin Ontology and the first guidelines for 3D data curation.

The article uses the Heritage Building Information Model (HBIM) as an example of an attempt to adapt workflows and standardise digital data in the field of built heritage. As HBIM is not adaptable to object-based cultural heritage, the more flexible but resource-intensive concept of digital twins has been developed. A digital twin is a dynamic 3D model that, unlike a static 3D model, is connected to the real world. In the context of cultural heritage, this means thorough research,

3D data collection, analysis, and virtual simulations, combined with documentation that is linked to the 3D models.

In conclusion, the article emphasises the potential of 3D surveying in the research and preservation of cultural heritage, highlighting its advantages and limitations and calling for further development and implementation.