

UNIVERZA V LJUBLJANI

FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

**Primerjava 3D modelov paleolitske  
lesene konice**

Enej Guček Puhar

Ljubljana, 2018



UNIVERZA V LJUBLJANI

FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

# Primerjava 3D modelov paleolitske lesene konice

Enej Guček Puhar

Delo je pripravljeno v skladu s Pravilnikom o podeljevanju  
Prešernovih nagrad študentom, pod mentorstvom

prof. dr. Franca Soline

in somentorstvom

doc. dr. Aleša Jakliča in

mag. Mirana Eriča

Ljubljana, 2018

*Besedilo je oblikovano z urejevalnikom besedil L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.*

# Povzetek

Predmet diplomske naloge je z metodo študije primera raziskati pomen računalniških tehnologij, informacijskih metod, računalniških programov, 3D modelov in 3D grafičnih programskih orodij v arheologiji. Naloga je osredotočena predvsem na primerjavo in analizo parametrov petih 3D modelov paleolitske lesene konice v izbranih formatih (PLY in STL), ki so bili narejeni v časovnem intervalu 2009–2018. Primerjalna analiza podatkov in parametrov vseh 3D modelov je bila opravljena z odprtokodnim računalniškim programom CloudCompare. Dobljeni rezultati ter opravljene primerjave so potrdile začetno hipotezo o spremembah, ki so nastale na artefaktu po njegovem odkritju in izločitvi iz njegovega naravnega okolja. Ugotovljene razlike in spremembe (npr. upogib in deformacija, spremembe v teksturi in preseku, ipd.) so nazorno izpostavile nevarnost neželenih sprememb in degradacije arheoloških ostalin kopenske in podvodne kulturne dediščine po njihovi izločitvi iz naravnih pogojev najdišča. Izbrana programska oprema je izpolnila pričakovanja o njeni primernosti, uporabnosti in koristnosti pri arheološki analizi in vrednotenju ostalin kulturne dediščine.

**Ključne besede:** računalniški vid, 3D, CloudCompare, MeshLab, arheološka kulturna dediščina (CH), arheologija, arheološka informatika, virtualna arheologija, 3D arheologija, arheološka ostalina, London Charter, Seville Principles, Evropski arheološki svet (EAC), Amersfoortska Agenda



# Abstract

The subject of this dissertation was to investigate the importance of informatics, computer technologies, computing methods, computer programming, 3D models and 3D graphical software tools in archaeology and in interdisciplinary archaeological treatises, analyzes and evaluations of the artefacts and the past cultural heritage using case study. The task is focused primarily on the comparison and analysis of the parameters five 3D models of the paleolithic wooden artefact in the given formats (PLY and STL), which were made in the time interval 2009–2018. A comparative analysis of the data and parameters of all 3D models was carried out with open source software CloudCompare. The obtained results and the comparisons made confirmed the initial hypothesis of changes that occurred on the artefact after the discovery and exclusion from its natural environment. The differences and changes found (for example: bending and deformation, changes in texture and cross-section, color, etc.) highlighted the danger of unwanted changes and degradation of archaeological remains of land and underwater cultural heritage after their removal from the natural conditions of the site. However, the selected software fulfilled the expectations of its suitability and usefulness for archaeological analysis and for evaluation of the cultural heritage in general.

**Keywords:** computer vision, 3D, CloudCompare, Meshlab, cultural heritage, archeology, information archeology, virtual archeology, 3D archeology, archaeological remains, London Charter, Sevilla Charter, European Archaeological Council (EAC), Amersfoort Agenda





# Kazalo

**Povzetek**

**Abstract**

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Problem . . . . .	6
1.2	Motivacija, hipoteza in raziskovalni cilj . . . . .	6
1.3	Uporabljene metode in tehnologije . . . . .	8
1.4	Pregled sorodnih strokovnih člankov, raziskav in del v Republiki Sloveniji . . . . .	9
1.5	Vsebina poglavij diplomskega dela . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Arheologija, računalništvo in informatika</b>	<b>15</b>
2.1	Odnos med arheologijo, računalništvom in informatiko (historični pristop) . . . . .	23
2.2	Vloga računalniške strojne in programske opreme pri standardizaciji opreme in tehnik dela v arheologiji . . . . .	31
2.3	Namesto sklepa . . . . .	47
<b>3</b>	<b>3D modeliranje v arheologiji</b>	<b>49</b>
3.1	3D modeliranje v arheologiji . . . . .	49
3.2	Pomen zbirk 3D modelov pri ohranjanju in predstavljanju kulturne dediščine v državah EU . . . . .	55

<b>4</b>	<b>Programska orodja za 3D vrednotenje, interpretacijo in primerjavo nizov podatkov 3D modelov ostalin arheološke kulturne dediščine</b>	<b>61</b>
<b>5</b>	<b>40 000 let stara paleolitska lesena konica — odkritje, pomen, primerjava in problem</b>	<b>69</b>
5.1	Opis in posebnosti paleolitske lesene konice . . . . .	73
5.2	Dvomi v verodostojnost nastanka in izvora konice . . . . .	74
5.3	Metode določanja vrste lesa in starosti ter izbor načina hrambe	76
5.4	Dimenzije konice . . . . .	78
5.5	Pomen za svetovno kulturno dediščino . . . . .	80
5.6	Računalniška obravnava konice . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Študija primera</b>	<b>87</b>
6.1	Predmet študije primera . . . . .	88
6.2	Namen študije primera . . . . .	90
6.3	Izbor programskega orodja in priprava modelov za obdelavo .	90
6.4	Določitev izvedbe postopka volumetričnih meritev in izbor algoritma . . . . .	92
6.5	Načrt volumetričnih in geometrijskih meritev . . . . .	95
6.6	Primerjalna analiza 3D modelov - rezultati volumetričnih meritev in ploskovnih primerjav . . . . .	96
6.7	Razprava . . . . .	110
<b>7</b>	<b>Ideje za nadaljnje delo in odprta vprašanja</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Zaključek</b>	<b>119</b>
	<b>Literatura</b>	<b>122</b>
<b>9</b>	<b>Priloge</b>	<b>131</b>

# Slike

1.1	Primer sistema digitalne arheologije [37] . . . . .	3
2.1	Periodizacija razmerja med arheologijo, računalništvom in informatiko . . . . .	24
2.2	Obdobja standardizacije računalniške strojne in programske opreme . . . . .	32
3.1	Integrirani arheološki informacijski sistem ArchaeoCAD . . . . .	54
5.1	Severovzhodno območje Vrhniko z območjem Navporta na Dolgih njivah in Bregu (Mušič, Horvat 2007), a. območjem zaščitnih pregledov leta 2008 ter b. območjem raziskave ladje leta 2012; 1. Vrhniški deblak SI-60, 3. lega paleolitske lesene konice ter 4. lega rimske tovarne ladje iz Sinje Gorice (podlag© GERK MKO). Vir [19] . . . . .	70
5.2	Ljubljana pri Sinji Gorici z mrežo intenzivnega pregleda, morfološki podatki, značilnostmi struge, posebnimi najdbami in najpomembnejšimi odkritji. (podlaga: DMR 1-2 m; slika: M. Erič). Vir: [19] . . . . .	71
5.3	Fotografija paleolitske lesene konice (Vir: Osebni arhiv mag. M. Eriča) . . . . .	72
5.4	Risba lesene konice - a. lesena konica (Patarčec 2013) in kamnite lovorolistne szeletenske konice - b. (Bosinski 1967). Vir [18] . . . . .	73

5.5	: Mesto odvzema vzorca lesa za RR C14 (Vir: Osebni arhiv mag.M.Eriča)	77
5.6	Faksimile radiokarbonske datacije lesene konice [18]	77
5.7	Faksimile Poročila o postopku konzerviranja in 3D skeniranja Paleolitske lesene konice iz Ljubljane na Oddelku za znanstveno informacijsko tehnologijo Rimsko-nemškega osrednjega muzeja v sodelovanju z i3mainz, Inštitutom za prostorsko informacijske in meritvene tehnike Univerze uporabnih znanosti v Mainzu.	86
6.1	Pet izdelanih 3D modelov paleolitske lesene konice (izvajalci, uporabljeni snemalniki in 3D formati zapisa, št.točk v oblaku in triangulacijski mreži)	88
6.2	Oblak in triangulacijska mreža točk 3D modela vrha konice	91
6.3	Diagram izvedbe primerjalne deformacijske analize	93
6.4	Postopek primerjave 3D modelov (CC) S-vir: volumetrična tetraedrična mreža. T-cilj: volumetrična oblika, ki jo določajo vokslji. ICP: Iterative Closest Point algoritem	94
6.5	Primerjava med modeloma konice PP-2013 in PP-2015.	99
6.6	Simulacija deformacije konice do leta 2021 (v cm) ◇ - dolžina, □ - širina, △ - debelina	100
6.7	Poudarjena deformacija konice	104
6.8	Dinamika deformacije konice	105
6.9	Dinamika sprememb po začetku postopka konzerviranja - 1. G - geometrična sredina vrednosti razlik točk v primerjavi s PP-2009 $\sigma$ - standardni odklon za izračunano geometrično sredino	107
6.10	Dinamika sprememb po začetku postopka konzerviranja - 2. Porazdelitev odklonov točk v primerjavi z modelom PP-2009.	108
6.11	Dinamika sprememb – prečni rez	109

9.1	Priloga 1 . . . . .	132
9.2	Priloga 2 . . . . .	133
9.3	Priloga 3. Vir: <a href="https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=FILE_I/0">https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/ index.php?title=FILE_I/0</a> . . . . .	135



# Tabele

3.1	Amersfoortska Agenda — EAC: poudarki . . . . .	59
5.1	Preglednica doslej odkritih osmih paleolitskih lesenih ostalin v Evropi . . . . .	84
6.1	Primerjava možnosti izbranih formatov v CC glede na obseg obdelave . . . . .	92
6.2	Volumetrična primerjava 3D modelov (dolžina, širina, debe- lina) paleolitske lesene konice (2009–2018) . . . . .	98
6.3	Volumetrična primerjava volumna 3D modelov paleolitske le- sene konice (2009-2018) . . . . .	102
6.4	Volumetrična primerjava ovalnosti 3D modelov paleolitske le- sene konice . . . . .	106





*Zahvaljujem se prof. dr. Francu Solini za predlagano idejo in mentorstvo pri diplomski nalogi. Njegovi jasni nasveti, izjemna zakladnica znanja ter osebne spodbude in motivacija za sistematično delo so mi bile stalno vodilo pri obdelavi podatkov in končnem oblikovanju vsebine diplomske naloge.*

*Zahvaljujem se doc. dr. Alešu Jakliču za pomoč, svetovanje in koristne tehnične nasvete pri obravnavi, obdelavi in predstavitvi podatkov, ki so zajeti v diplomski nalogi.*

*Zahvaljujem se raziskovalcem v Laboratoriju za računalniški vid, ki so bili v vsakem trenutku pripravljeni priskočiti na pomoč pri premagovanju odprtih vprašanj, dilem in raziskovalnih stisk.*

*Zahvaljujem se tudi Žigi Stopinšku, ki je leta 2012 v svojem diplomskem delu pionirsko raziskal uporabnost 3D merilnikov v kulturni dediščini, s posebnim poudarkom na uporabnosti te tehnologije v kopenski in podvodni arheologiji. Njegova začetna opozorila, priporočila in izkušnje so bile neprecenljive pri mojem delu.*

*Posebna zahvalo namenjam slovenskemu slikarju, arheologu, strokovnjaku za moker les in najditelju paleolitske lesene konice mag. Miranu Eriču. Ne le, da je aktivno sodeloval v vseh fazah nastajanja diplomske naloge ter mi zagotovil in ljubeznivo odstopil za končno računalniško obdelavo vse doslej narejene 3D modele paleolitske konice v ustreznem računalniškem formatu, ampak me je stalno opozarjal, mi svetoval in posredoval aktualno tujo strokovno literaturo ter delil z mano svoja lastna arheološka spoznanja, izkušnje, prizadevanja in raziskovanja. Njegova pomoč, delo in entuziazem ter človeška toplina so moje diplomsko delo usmerila tudi v zanimanje za širšo in sistematično proučitev vloge in razvoja informacijskih in računalniških tehnologij v arheologiji. Ta okoliščina je pomembno vplivala na odločitev, da vsebino diplomske naloge v posebnem poglavju razširim s kratko predstavitvijo odnosa med računalništvom, informatiko in arheologijo.*

*Zahvala gre tudi številnim drugim strokovnjakom (dr. Katja Kavkler, dr. Anja Cramer, dr. Lidiya Korat, dr. Andrej Gaspari), s katerimi sem prišel v delovni stik ob pripravah, zbiranju informacij in računalniški obdelavi 3D modelov paleolitske lesene konice. Vsi so bili pripravljeni pomagati z nasveti, gradivi, mnenji, ocenami in priporočili.*

# Seznam uporabljenih kratic

kratica	angleško	slovensko
<b>3D</b>	three-dimensional	tridimenzionalnost
<b>CC</b>	CloudCompare	Odprtokodno grafično programsko orodje
<b>MeshLab</b>	MeshLab	Odprtokodno grafično programsko orodje
<b>Blender</b>	Blender	Odprtokodno grafično programsko orodje
<b>C2C</b>	Cloud-to-Cloud Distance	Računalniško orodje/algorithm za merjenje razdalje točk med dvema oblakoma
<b>C2M</b>	Cloud-to-Mesh	Računalniško orodje/algorithm za merjenje razdalje točk med oblakom točk in mrežo točk
<b>M2M</b>	Mesh-to-Mesh	Računalniško orodje/algorithm za merjenje razdalje točk med mrežama točk
<b>CH</b>	Cultural Heritage	Kulturna dediščina
<b>ICP</b>	Iterative Closest Point Algorithm	Iterativni algorithm najbližjih točk



# Poglavje 1

## Uvod

Varovanje arheološke kulturne dediščine postaja v 21. stoletju posebna odgovornost znanstvenih in državnih ustanov. Zlasti pri varovanju tistih artefaktov, ki so zaradi svojih strukturnih posebnosti izpostavljeni hitrejšim procesom degradacije. To so artefakti iz lesa, kože, kosti in drugih hitreje degradirajočih materialov. Arheologi so soočeni s težavo, kako te artefakte zaščititi in jih ohraniti prihodnjim generacijam. Pri tem pa potrebujejo zanesljive podatke o stanju in procesih degradacije. Te jim lahko zagotovijo le metode in tehnike drugih znanosti ob nujnem sodelovanju računalniške in informacijske stroke.

Sodobne računalniške in informacijske tehnologije arheologom in konservatorjem že danes zagotavljajo sistematično in merljivo spremljanje degradacijskih procesov ostalin. Zagotavljajo pa tudi zanesljive podatke in informacije za njihovo nadaljnjo celovitejšo analizo, interpretacijo in dokumentacijo.

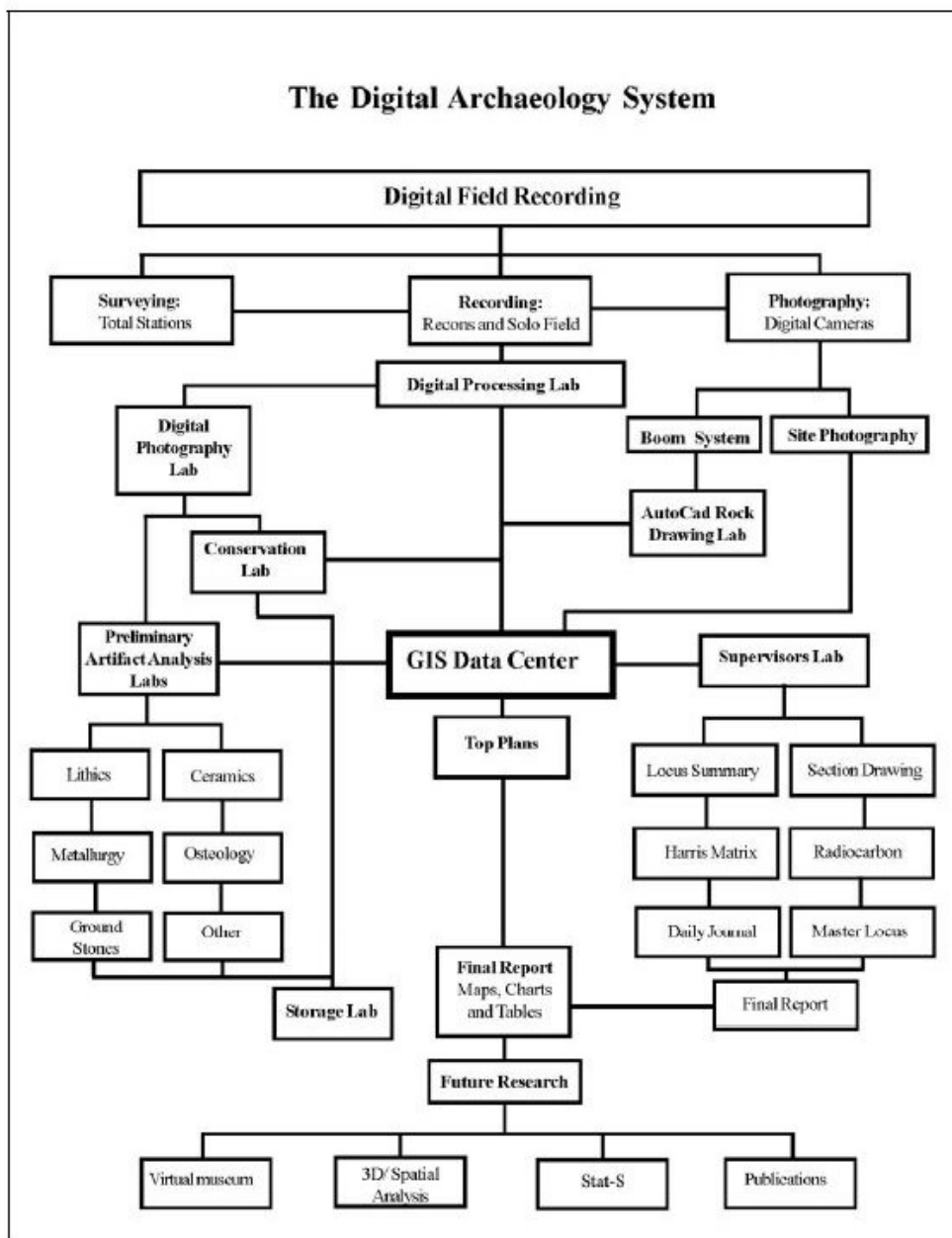
Odnos med arheologijo, informatiko in računalništvom že dobro desetletje nakazuje na nujnost tesnejšega interdisciplinarnega sodelovanja obeh znanstvenih disciplin tako na tehnološki, programski kot metodološki ravni. Interdisciplinarno sodelovanje vnaša v arheologijo nove metode, nove tehnike ter spodbuja nastanek novih znanstvenih disciplin, kot so: računalniška arheologija, arheološka informatika, virtualna arheologija, digitalna arheologija, internetna arheologija, e-arheologija, idr. Do novih znanstveno-raziskovalnih

smeri je klasična arheologija še vedno dokaj zadržana. Nesporno pa je, da bodo prihodnje arheološke študije temeljile tudi na obdelavah digitaliziranih zbirk arheoloških 3D modelov, zaradi česar bo postala dostopnost do ostalin kulturne dediščine globalna.

Pomemben premik v razmerju med arheologijo ter računalništvom in informatiko (RI) ter njuno soodgovornost za nacionalno in svetovno kulturno dediščino pomenita dva dokumenta in sicer: **Londonska listina** (*The London Charter — for the computer-based visualisation of cultural heritage*) za računalniški vizualizaciji temelječi kulturni dediščini iz leta 2009 in **Seviljska načela virtualne arheologije** (*The Seville Principles — International Principles of Virtual Archaeology*) iz leta 2011. Med osmimi izpostavljenimi načeli v seviljskem dokumentu je na prvo mesto postavljena **interdisciplinarnost**, ki zahteva od virtualne arheologije, da v sleherni arheološki projekt vključi uporabo novih tehnologij, ki so povezane z računalniško vizualizacijo ostalin arheološke dediščine. V arheološke raziskave, dokumentiranja, konzerviranja in ostale postopke mora arheologija vključiti skupine strokovnjakov z različnih strokovnih in znanstvenih področij (arheologi, računalničarji, informatiki, arhitekti, kemiki, tehnologi, geologi, biologi, idr.).

Zgovorna je grafična predstavitev (slika 1.1) sistema digitalne arheologije v članku *On-Site GIS Digital Archaeology GIS-based Excavation Recording in Southern Jordan*, avtorjev Thomasa E. Levya in Neila Smitha (2016), ki poudarjata nujen interdisciplinarni pristop, souporabo analogne in digitalne dokumentacije, 3D analizo in vzpostavitev virtualnih muzejskih zbirk artefaktov.

Zato lahko v bližnji bodočnosti tudi v Sloveniji pričakujemo zanimanje za nastanek arheološke oz. arheo-informatike, virtualne arheologije, e-arheologije, informacijske arheologije, ipd., saj so podlage za njihovo rojstvo že nastavljene z opravljenimi pionirskimi, tudi mednarodno odmevnimi, interdisciplinarnimi projekti slovenskih arheologov in informatikov (Erič, Solina, Stopinšek, Berginc, Čufar, Kovačič, Pugelj, Odar, Gaspari, Verbič, Štular, Ornik, Turk, Pleterski, Rihter, Novaković, Štuhec, idr.) pri odkri-



Slika 1.1: Primer sistema digitalne arheologije [37]

vanju, raziskovanju in dokumentiranju artefaktov na območju Ljubljanskega barja, pri projektih podvodne arheologije v Ljubljani in v Jadranu, naglavnega nakita iz najdišča župne cerkve v Kranju, ipd. Gre za procese, ki bi jih bilo primerno nadgraditi s skupnimi projekti na področju preventivne, digitalne in virtualne arheologije, zlasti pa pri enotni standardizaciji digitalnih zbirk arheoloških ostalin (digitalne gliptoteke) ter delni ali popolni nadomestitvi analognih arheoloških metod dokumentiranja s 3D dokumentiranjem. Slednje bi morale temeljiti na implementaciji in standardizaciji računalniške programske opreme in novih informacijskih tehnologij (računalniški vid, umetna inteligenca, IoT, idr.). Na ta način pridobljeni in obdelani podatki bi arheologom omogočili zanesljivejšo analizo in interpretacijo ter pravočasno in preudarno načrtovanje dela pri obravnavi arheoloških ostalin.

Številna odprtokodna 3D grafična programska orodja in 3D tehnologije vnašajo v sodobno arheologijo radikalne spremembe. Arheološkim raziskavam vse bolj dajejo verodostojnost in zaupanje, arheologom pa večjo stopnjo samozavesti pri vrednotenju, tipizaciji, rekonstrukciji, obravnavi, opisu in dokumentiranju arheoloških ostalin. 3D modeli in replike ter virtualne zbirke artefaktov že zagotavljajo, da lahko modele preučujemo, primerjamo, analiziramo, virtualiziramo, originali pa ostanejo nedotaknjeni in nepoškodovani. Arheologija ni več ozka domena arheologov. Postaja vse bolj interdisciplinarna znanost, kjer nove tehnologije in metode postajajo pri obravnavi ostalin kulturne dediščine skupni projekti arheologov, informatikov, fizikov, matematikov, geologov, biologov, kemikov, tehnologov in drugih. Še vedno je prisotna sramežljivost in cehovska akademska zaprtost, vendar je v globalnem okolju računalniških in informacijskih tehnologij ter umetne inteligence integracija, sodelovanje in soodvisnost le še vprašanje časa.

Računalniške metode, programska orodja in informacijske tehnologije počasi postajajo sestavine tudi akademskih izobraževalnih programov (v Evropi še vedno s sramežljivostjo razmišljajo o ustanovitvi samostojnih kateder za arheološko informatiko). V arheološka izkopavanja in predhodne sondaže, ki jih poleg arheologov opravljajo specializirana podjetja, redko vključujejo



računalniške in informacijske strokovnjake – enako velja tudi za slovenska specializirana podjetja, registrirana za izvajanje predhodnih arheoloških raziskav, kot so npr. Arhej, Arheoterra, Avgusta, Skupina Stik, Skupina Magelan, idr. Izjema je npr. skupina Magelan, ki pri svojem delu uporablja terestično lasersko skeniranje (TLS) ter ponuja 3D inženiring.

Izjemen pomen uporabe računalniških in informacijskih tehnologij in metod potrjuje tudi slovenska arheološka, računalniška in informacijska praksa. Uspešni so skupni arheološko-informacijski projekti pri obravnavi, dokumentiranju, rekonstruiranju in preiskovanju arheoloških ostalin, kot so npr. kolišča, drevak, zgodnjjerimska ladja, leseno kolo, paleolitska lesena konica, nakit in nenazadnje tudi koščena piščal iz Divjih bab. Šele temeljita in celovita računalniška obdelava (CT tomografija) je po večletnih fizikalnih in statističnih meritvah, testiranjih, simuliranjih živalskega ugriza, glasbenih testiranjih na ročno izdelanih replikah, uspela umiriti tuje dvome v to, da je piščal proizvod človeka ali človečnjaka. Tudi računalniško ugotavljanje razlik na 3D modelih paleolitske lesene konice ter njihova možna primerjava s 3D modeli tujih paleolitskih lesenih ostalin (Clacton, Lehringen, Schoeningen, Mannheim), bi lahko omejila še vedno prisotne pomisleke, da konico ni oblikoval človekov paleolitski prednik.

Nova strojna in programska orodja že omogočajo cenovno dostopno in časovno manj obremenjujoče računalniško podprto tridimenzionalno dokumentiranje, vizualiziranje in primerjanje arheoloških ostalin. Številne metode zajemanja podatkov (z merilniki, z fotogrametričnimi ovrednotenji množic slikovnega gradiva, ipd.) že sedaj omogočajo 3D dokumentiranje tako posameznih arheoloških predmetov kot tudi večjih arheoloških prostorskih celot. V zadnjih letih postaja tridimenzionalna dokumentacija, zahvaljujoč širši dostopnosti do strojnih orodij ter ceneni uporabi, nepogrešljivo orodje v sodobnem varstvu kulturne dediščine ter v arheoloških raziskovanjih. Vendar se še vedno soočamo s težavo pri sistematičnem izboru programskih orodij za namensko rabo na višjih nivojih obravnave, tj. pri analizi, interpretaciji in vrednotenju 3D dokumentiranih podatkov arheoloških ostalin. Teh orodij

je veliko, vendar niso dovolj preizkušena in raziskana, njihova uporaba in postopki v arheologiji pa niso standardizirani. Prav proučitvi uporabnosti odprtokodnega programskega grafičnega orodja CloudCompare na konkretnem primeru obdelave in primerjave podatkov petih, že izdelanih 3D modelov paleolitske lesene konice, je namenjen osrednji del te diplomske naloge.

## 1.1 Problem

Arheološka obravnava 40.000 let stare lesene konice je opozorila, da so na artefaktu nakazane določene spremembe (upogib, skrčenje enega dela ploskve, barva, idr.). Te so bile prvič zaznane po izdelavi drugega in tretjega 3D modela konice (2013–2015). Nastale so lahko torej po odstranitvi artefakta iz naravnih pogojev njegovega najdišča (peščena muljasta plast v strugi reke Ljubljance pri Sinji Gorici), po opravljeni dataciji vzorca konice z metodo AMS 14C in po postopkih konzerviranja.

Ker razpolagamo z ustrežno 3D dokumentacijo konice, lahko verodostojno in z ustreznim dokaznim postopkom potrdimo ali ovržemo izpostavljeno domnevo o spremembi ali celo degradaciji artefakta. Z uporabo izbranega odprtokodnega računalniškega programskega orodja lahko zanesljiveje raziščemo in primerjamo podatke med 3D modeli. Arheologom bi s tem preskrbeli eksaktne podatke za nadaljnjo analizo in interpretacijo artefakta. Preizkus domneve pa naj bi predstavljal tudi pomemben prispevek za določitev standardov uporabe računalniških odprtokodnih programskih orodij v arheologiji, zlasti pri kvalitetnejšem in zanesljivejšem dokumentiranju, konzerviranju, hranjenju, analiziranju in vrednotenju ostalin kulturne dediščine.

## 1.2 Motivacija, hipoteza in raziskovalni cilj

Dosedanja praksa pri obdelavi 3D modelov v arheologiji ter pri varovanju in ohranjanju kulturne dediščine je bila usmerjena predvsem v uporabo 3D merilnikov, tehnik snemanja in v različne načine zajemanja podatkov z

grafičnimi računalniškimi programskimi orodji. Na ta način je večplastno 3D gradivo sicer nadomestilo pomanjkljivosti analognega arheološkega gradiva, vendar pa je ostala množica tako pridobljenih in shranjenih podatkov računalniško neobdelana in mrtva za nadaljnjo obravnavo in interpretacijo. Večplastno 3D gradivo v različnih računalniških formatih zapisa namreč omogoča, z uporabo novih programskih orodij, vrednotenje in primerjanje 3D oblakov točk ter celovitejše razumevanje ostalin arheološke dediščine. Hkrati pa je sistematična obdelava 3D oblaka točk tudi učinkovitejše in s podatki ter meritvami podprto dokazovanje začetnih delovnih hipotez. Doslej v našem strokovnem okolju, vsaj po javno dostopnih podatkih, tovrsten pristop z uporabo odprtokodnega grafičnega programskega orodja ni bil načrtno uporabljen pri analizi in interpretaciji primera določene arheološke ostaline. To je bil dodaten motivacijski izziv za raziskavo.

Z diplomsko nalogo „Primerjava 3D modelov paleolitske lesene konice“ nameravamo odgovoriti na vprašanje, kakšna je lahko vloga, pomen in prispevek računalniških in informacijskih tehnologij pri obravnavi, varovanju in zaščiti artefaktov arheološke kulturne dediščine. Zato je predmet raziskovalne naloge, da z metodo študije primera raziščemo pomen 3D grafičnih programskih orodij v arheologiji in pri interdisciplinarnih arheoloških obravnavah, analizah in vrednotenjih artefaktov. V raziskavi smo se predvsem osredotočili na primerjavo in analizo sprememb podatkov, vozlišč, točk in poligonov že izdelanih petih 3D modelov paleolitske lesene konice, najdene v strugi reke Ljubljanice pri Sinji Gorici.

Primerjalna deviacijska analiza z izbranim programskim orodjem (Cloud-Compare – CC) naj bi predvsem odgovorila na začetno delovno hipotezo:

„ali je prišlo v časovnem intervalu 2009–2018 na 40.000 let stari leseni konici (v Evropi je bilo doslej odkrito samo osem podobnih lesenih paleolitskih artefaktov: Clacton – 1911, Anglija; Lehringen – 1948, Nemčija; Abric Romani – 1992, Španija; Schöningen – 1995, Nemčija; Mannheim/Vogelstang – 1976, Nemčija; Sinja Gorica – 2008, Slovenija; Poggetti Vecchi – 2012, Italija in Aran-

baltza – 2014, Španija) do določenih merljivih sprememb (velikost, volumen, upogib, profil, tekstura, ipd.) po njeni izločitvi iz naravnih pogojev najdišča v reki Ljubljanici ter po postopkih datiranja, konzerviranja, restavriranja, javne predstavitve in hrambe“.

Z obravnavo diplomske teme in izvedeno primerjalno študijo nameravamo oceniti tudi:

1. nujnost standardizacije računalniških programskih orodij in tehnik v terenskih arheoloških raziskovanjih in nadaljnjih laboratorijskih obravnavah,
2. primernost uvajanja RI tehnologij in 3D modeliranja v arheološko delo,
3. uporabnost odprtokodnih grafičnih programskih orodij pri analitičnem vrednotenju arheoloških ostalin,
4. pomen trajnejšega sodelovanja RI, arheologije in preventivne arheologije pri ohranjanju arheološke kulturne dediščine,
5. primernost družbenega in strokovnega odziva na neustrezno ali pomanjkljivo zaščito arheoloških ostalin z implementacijo *Seviljskih načel* in *Londonske karte* ter s posodobitvijo oz. revizijo veljavnih pravnih aktov, ki v Sloveniji urejajo pogoje izvajanja terenskih arheoloških raziskav (*Pravilnik o izvajanju arheoloških raziskav* in njegova Priloga 1 – Ur.l. RS, št. 70 -111/2012).

### 1.3 Uporabljene metode in tehnologije

Pri izdelavi diplomske naloge smo uporabili naslednje metode in tehnike:

1. pregled literature ter domače in tuje arheološke periodike (poglavji: Vloga in mesto informatike v arheologiji; 3D modeliranje v arheologiji),

2. odprtokodno programsko orodje CloudCompare (CC) za primerjavo 3D modelov,
3. študijo primera (Case Study) petih 3D modelov paleolitske lesene konic (2008–2018), ki vključuje deformacijsko in statistično analizo volumetričnih meritev in primerjav s programskim orodjem CC.

## 1.4 Pregled sorodnih strokovnih člankov, raziskav in del v Republiki Sloveniji

Strokovnih prispevkov, ki bi predstavili postopke primerjave večkrat izdelane tridimenzionalne dokumentacije iste arheološke ostaline z enim od odprtokodnih računalniških programov, nismo zasledili. Redke raziskave so se tega problema sicer dotaknile ter celo opravile ad-hoc obdelavo podatkov z izbranim programskim orodjem. Vendar je bila njihova pozornost primarno usmerjena v druga strokovna vprašanja (uporaba in preizkus orodij in naprav za 3D skeniranje, tehnike in standardizacija postopkov 3D skeniranja, tehnike in postopki 3D modeliranja, izdelava tehničnih napotkov za uporabo izbranih 3D merilnikov, uvajanje 3D tehnologij pri varstvu kulturne dediščine, segmentacija in rekonstrukcija, izdelava prototipov, vizualizacija, ipd.).

Pomembnejši prispevki, ki se nanašajo ali dotikajo vsebin te diplomske naloge so:

1. *The impact of the latest 3D technologies on the documentation of underwater heritage sites* [20]  
Mitja Pugelj, Žiga Stopinšek, Franc Solina, Gregor Berginc, Miran Erič, Rok Kovačič, 2013, objavljeni znanstveni prispevek na konferenci.  
Znanstveni prispevek se nanaša na uporabo tehnologije 3D modeliranja pri ohranjanju in dokumentiranju kulturne dediščine najdene pod vodo. Opisuje prednosti 3D tehnik pred klasičnimi in analognimi tehnikami.
2. *Volumetric models from 3D point clouds* [32]

Žiga Stopinšek, Franc Solina, Aleš Jaklič, Miran Erič, Igor Mihajlović, 2015, izvirni znanstveni članek.

Izvirni znanstveni članek predstavi, kako lahko volumetrični modeli iz oblakov 3D točk, ob ustreznih pogojih, vizualizirajo potopljeno kulturno dediščino. Obravnavan je konkreten primer arheoloških ostalin rimske ladje, potopljene pri otoku Braču na Hrvaškem.

3. *Uvajanje 3D tehnologij pri varstvu kulturne dediščine* [53]

Franc Solina, Miran Erič, Žiga Stopinšek, Gregor Berginc

Zelo pomemben članek, ki obravnava široko računalniško podprto tridimenzionalno dokumentiranje z vidika varstva kulturne dediščine. Ugotavlja, da je postala v zadnjih letih tridimenzionalna dokumentacija - zaradi dostopnosti in cenenosti orodij - nepogrešljivo orodje tudi v sodobnem varstvu kulturne dediščine. Žal pa je, za namensko uporabo pri analizi, standardizaciji, dokumentiranju, arhiviranju in interpretaciji tridimenzionalne dokumentirane kulturne dediščine, na razpolago zelo malo programskih orodij.

4. *Segmentacija in rekonstrukcija kulturne dediščine iz fotogrametrično pridobljenega oblaka točk : magistrska naloga*, 2016 [52].

Žiga Stopinšek, Franc Solina

Avtor se v magistrskem delu osredotoči na problematiko rekonstrukcije in segmentacije kulturne dediščine iz fotogrametrično pridobljenih oblakov točk. Opiše metodologijo arheološke 3D dokumentacije dediščine na suhem in pod vodo, ter povzame sodobne tehnike rekonstrukcije in segmentacije prostora. Opiše posodobitev orodja za segmentacijo s superelipsoidi in ga vključi v okolje MeshLab. Orodje je primerno za modeliranje teles amfor ter druge keramike.

5. *Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine : diplomska naloga* [56].

Blaž Vidmar, Mojca Kosmatin Fras

V diplomski nalogi avtor obravnava večslikovno ujemanje in njegovo primernost za izdelavo 3D modelov objektov kulturne dediščine. Osredotoči se na dva konkretna primera iz območja današnje Grčije. Določi metodologijo za zajem in obdelavo podatkov s programskim orodjem PhotoScan. Izdelane 3D modele opiše z vizualnimi, geometričnimi in topološkimi značilnostmi. Osnovo za geometrično primerjavo predstavljajo oblaki točk laserskega skeniranja. Postopek slikovnega ujemanja je v primerjavi z metodo laserskega skeniranja cenovno ugodnejši in hitrejši, hkrati pa zagotavlja geometrijsko in vizualno primerljive rezultate. Zaradi zgladitev značilnih krivin postopek ni primeren za natančnejše opise obravnavane površine in za določevanje deformacij na objektih.

6. *Uporabnost 3D merilnikov v kulturni dediščini : diplomsko delo* [51].

Žiga Stopinšek, Franc Solina

V diplomskem delu je avtor osredotočen na problematiko razpadanja in uničevanja kopenske in podvodne kulturne dediščine. Opiše tehnike 3D snemanja ter izpostavi pomen podatkovnih zbirk za nadaljnje ekspertne obravnave. Predstavi tradicionalne in sodobne metode reprodukcije ter s 3D merilnikom posname nekaj predmetov ter jih predstavi v osnutku virtualne gliptoteke.

7. *Rekonstrukcija arheoloških najdb s pomočjo 3D tehnologij* [59]

Lovro Zajec, Bojan Dolšak

Avtor v diplomski nalogi (Fakulteta za strojništvo Univerze v Mariboru) s pomočjo 3D tehnologij opozori na zajemanje in obdelavo 3D podatkov ter na izdelavo replik s pomočjo slojevitih tehnologij. Gre za tehnologije, ki so svojo pot začele predvsem s hitro izdelavo prototipov in so se uveljavile tudi v arheologiji. S pomočjo takšnih tehnologij

lahko učinkoviteje in hitreje pridemo do zelenih rezultatov pri delu arheologov.

8. *Dvo-in-pol razsežnostna (2,5D) in tri-razsežnostna (3D) vizualizacija artefaktov : diplomsko delo* [55].

Seta Štuhec, Predrag Novaković

V diplomski nalogi avtorica predstavi uporabno vrednost 2,5D in 3D vizualizacij na področju arheoloških raziskav, restavriranja, konzerviranja, dokumentiranja in muzejskih dejavnosti. Povzame posebnosti postopkov oblikovanja 3D modela arheološke ostaline. S študijami primerov pa nazorno predstavi možnosti uporabe cenovno dostopnih orodij pri tridimenzionalni računalniški vizualizaciji.

## 1.5 Vsebina poglavij diplomskega dela

Poglavje 2 kronološko in tematsko povzame dinamiko in značilnosti odnosa med arheologijo, računalništvom in informatiko (RI). Izpostavljena je predvsem uporaba RI tehnologij v arheoloških raziskavah. Poglavje 3 je namenjeno predstavitvi razvoja 3D modeliranja v arheologiji. V poglavju 4 predstavimo splošne značilnosti izbranih grafičnih računalniških orodij za obdelavo oblaka in triangulacijske mreže točk 3D modelov. Omenimo pa tudi druga programska orodja, ki bi jim morali nameniti ustrezno pozornost pri izboru najprimernejšega računalniškega programskega orodja za standardizirano obdelavo arheoloških ostalin. V Poglavju 5 predstavimo značilnosti in pomen odkritja paleolitske lesene konice ter njeno primerjavo s sedmimi podobnimi primeri lesenih ostalin paleolitika, ki so jih arheologi odkrili v Angliji, Nemčiji, Italiji in Španiji. Poglavje 6 je v celoti namenjeno študiji primera. V njej smo predstavili numerične in grafične podatke, ki smo jih pridobili z volumetrično analizo ter primerjavami triangulacijskih ploskovnih mrež in oblakov točk 3D modelov. Podatki opozarjajo na razlike oz. pomembna odstopanja med posameznimi 3D modeli lesenih konic. Poglavju bodo dodane



sklepne ugotovitve, povzeti pomembnejši rezultati in trendi ter ocenjena primernost oz. pomanjkljivosti uporabe izbranega odprtokodnega grafičnega računalniškega programa (CloudCompare – CC) v arheoloških raziskavah. V Poglavju 7 sledi predstavitev možnih idej za nadaljnje delo. Opozorimo pa tudi na nekatera odprta vprašanja in dileme, s katerimi smo se soočili pri nalogi. V Poglavju 8 povzamemo temeljne ugotovitve diplomske naloge. Nalogo zaključimo z navedbo virov in literature. Besedilu so dodane tri priloge.



## Poglavje 2

# Arheologija, računalništvo in informatika

*„One of society’s stereotypes of the archaeologist is of someone at work with a paintbrush gently brushing away the sands of time.“*

Alan Vince

britanski arheolog

prvi urednik spletne revije Internet Archaeology

<https://doi.org/10.11141/ia.1.7>

Za celovitejše razumevanje odnosa med klasično in preventivno arheologijo na eni strani ter računalništvom in informatiko (RI) na drugi je nujno raziskati predvsem tista obdobja v razvoju arheoloških in RI praks, ko sta arheologija in RI znanost ugotovili, da je mogoče doseči kvalitativen napredek le s skupnim sodelovanjem in uporabo novih tehnologij.

V globalni digitalni vasi in globalni raziskovalni srenji je možen napredek le z globalno uporabo vseh razpoložljivih znanstvenih metod in tehnik. Prihodnost ni v tradicionalni delitvi na humanistične vede in naravoslovne znanosti. Arheologija to dokazuje v celotnem polstoletnem razvoju. Čeprav so jo dolgo obravnavali kot pomožno vedo zgodovine, je z implementacijo naravoslovnih tehnologij in metod dokazala svojo avtonomnost in se potrdila kot integralna znanost, ki združuje tako humanistična kot naravoslovna znanja.

Prihodnost je v standardiziranem interdisciplinarnem pristopu, ki se je sposoben v vsakem trenutku integrirano sistemsko odzivati na odprta vprašanja in razvojne dileme različnih strokovnih področij, tudi arheologije in sistema varstva arheološke kulturne dediščine. Gre za relacijsko uporabo integriranega znanja, metod in tehnik pri iskanju odgovorov na odprta vprašanja in dileme človekovih in hominidnih preteklih praks. Tudi takšnih, kot je npr. s podatki in meritvami nepodprta trditev o domnevni degradaciji paleolitske lesene konice ter dvomu o vlogi hominidov pri njenem nastanku.

Žal moramo ugotoviti, da se odnos med arheologijo in RI že več kot pol stoletja sooča z nekaterimi sistemskimi krči in ponavljajočimi težavami (razkorak med potrebo in ponudbo, finančne omejitve, usposobljenost kadrov, dvomi o primernosti novih tehnologij, strah pred umetno inteligenco, nedorečena standardizacija, neprilagojenost računalniških algoritmov arheološkemu delu, ipd.). Poudariti moramo, da je sodelovanje med obema področjema doslej potekalo bolj ali manj v korelaciji s splošnim tehnološkim razvojem. Šele v zadnjih dvajsetih oz. tridesetih letih dobiva to sodelovanje novo dinamiko, ki bo postala pri raziskovanju in ohranjanju arheološke kulturne dediščine del prihodnje integrirane arheološko-računalniško-informacijske raziskovalne prakse. Bodoče arheologije si ne bo mogoče več misliti brez aktivne in standardizirane rabe RI tehnologij in aplikativnih programskih orodij. V tem procesu bo morala prevzeti arheologija in zlasti nacionalni organi, odgovorni za ohranitev in varstvo kulturne dediščine, aktivnejšo vlogo.

Dosedanja spoznanja namreč kažejo, da se je arheologija v svojih terenskih ali laboratorijskih raziskavah bolj ali manj refleksno odzivala na RI izzive. Odvisno od možnosti, ki jo je ponujala RI znanost. Ta pa ni bila vedno v sozvočju s predstavami, pričakovanji in potrebami arheologov. Vedno pa, ko je arheologija, kot izrazito v vizualizacijo usmerjena veda, ugotovila v novih računalniških ali informacijskih rešitvah priložnost za učinkovitejšo obravnavo in predstavitev nepremične ali premične kulturne dediščine, je te rešitve takoj sprejela in jih vključila v terensko ali laboratorijsko delo

(npr. integrirane baze podatkov, arheologiji prilagojeni informacijski sistem, digitalizacija, GIS, CAD, LiDAR, lasersko in fotometrično snemanje, digitalno fotografiranje, cenena in dostopna računalniška strojna oprema, odprtokodna programska orodja, webografija, 3D modeliranje in repliciranje, virtualizacija, ipd.). Prej kot neposredno iz računalništva in informatike je arheologija rešitve sprejemala posredno iz drugih naravoslovnih znanostih, vojske in gospodarstva. To je bil tudi razlog, da računalniških algoritmov in specializiranih aplikativnih programskih orodij v polstoletni zgodovini skoraj ne zasledimo. So pa matematične, računalniške in informacijske rešitve postale konec 60-ih let predmet zanimanja dela arheologov, matematikov in inženirjev, ki so se želeli kot predstavniki ali simpatizerji „nove arheologije“ osvoboditi spon klasične arheološke teorije in prakse. V teh porodnih krčih je leta 1973 začela izhajati publikacija CAA – Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, ki je odločilno vplivala na računalniški in informacijski „boom“ v arheologiji. Ta je pomembno vplival tudi na razvoj teoretične arheologije, ki pa je še vedno izrazito vpeta v arheologijo kot izrazito humanistično vedo.

Šele s splošnim sprejemom in uveljavitvijo orodja CAD, geodetske metode LiDAR, računalniško podprtega podatkovnega sistema GIS, 3D modeliranja in računalniške simulacije navidezne resničnosti (VR – Virtual Reality) postaja RI vse bolj zelena, neizogibna in nujna sestavina arheologovega terenskega in laboratorijskega dela.

Na značilno posebnost odnosa med arheologijo in RI opozarja že ad hoc pregled strokovnih prispevkov, ki so bili v zadnjih petdesetih letih objavljeni v nekaterih uglednih in vplivnih mednarodnih arheoloških revijah, kot so npr.: *Journal World Archaeology* (1970–2018), *CAA — Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology* (1973–2018), *Internet Archaeology* (1996–2018) in idr. To so revije, ki so kritično obravnavale in spodbujale vključevanje RI v arheološko raziskovanje.

Obseg pregleda strokovne literature je bil sicer načrtovano omejen glede na zastavljene cilje diplomske naloge (primerjalna računalniška analiza 3D

modelov sinjgoriške paleolitske konice), vendar je vsebinsko dovolj zgovoren (slika 2.1). V splošnih obrisih bomo predstavili dinamiko sodelovanja arheologov z RI strokovnjaki. Pred nami se razgrne zanimiva razvojna avantura, ki na trenutke spominja na strastno iskanje „svetega grala“ (v Angliji pa izgubljenih ostalin Kralja Arthurja). Ta poteka od sramežljivega statistika, prek skrbnega oblikovalca in uporabnika arheoloških baz podatkov, navdušenega koristnika GIS in LiDAR tehnologije, digitalnega varuha kulturne dediščine, nad in podvodnega 3D modelatorja, do skorajšnjega virtualnega in kibernetkega arheologa.

Namen tega poglavja ni celovito predstaviti razvojna obdobja sodelovanja med arheologijo in RI. To bi zahtevalo posebno in samostojno študijo ter širši pregled virov. Namen tega dela diplomske naloge je le predstavitev ključnih razvojnih faz po letu 1950, ki potrjujejo, da je to sodelovanje potekalo z roko v roki s tehnološkim napredkom. Pregledana literatura kaže, da je bil ta odnos nemalokrat tudi nesistematičen in nenačrtovan. Odvisen od tehnoloških možnosti, osebnih znanstev, afinitet in iznajdljivosti, iz mladostnega uporništva do tradicionalističnih teorij in praks, nemalokrat prežet z dvomi, nezaupanji, entuziazmom, sramežljivostjo in predvsem finančnimi omejitvami<sup>1</sup>. Primarni cilj tega poglavja je, da s pomočjo historične metode dodatno potrdimo sklepno spoznanje naše študije primera, da lahko tudi računalniška analiza uspešno dopolni in nadgradi vedenje o premični in nepremični arheološki kulturni dediščini. In še več. Arheologu lahko zagotovijo izbrana programska orodja dodatno vedenje o ostalinah, ki mu jih druge tehnike in metode ne morejo dati.

Naš pregled razvojnih faz sodelovanja arheologije in RI ni povsem verodostojen in objektivni. Je podobno, kot so bili vsi doslej, subjektiven in prilagojen cilju raziskave. Ni bilo mogoče spregledati, da objavljeni članki,

---

<sup>1</sup>Tudi v tako arheologiji in kulturni dediščini naklonjenem okolju, kot je Anglija, lahko v zadnji polovici stoletja neprestano prebiramo v strokovnih razpravah in člankih apele in pozive arheologov in univerzitetnih arheoloških laboratorijev britanskim državnim ustanovam in gospodarskim subjektom po večji finančni podpori pri uporabi računalniških, informacijskih in drugih znanstvenih tehnologij v arheologiji – op.

recenzije in raziskovalna poročila v izbranem naboru arheoloških revij, ne izražajo časovno dosledno prave vloge RI v arheologiji. Raziskave, v katerih so bile npr. uporabljene nove in izvirne RI tehnike, metode in programska orodja, so bile javnosti nemalokrat predstavljene z daljšim časovnim zamikom ali pa komentirane le iz druge roke. Šele svetovni splet, elektronski in on-line objave so omogočili, da lahko po letu 1973 bolj ali manj tekoče sledimo (začetek spletnega izdajanja zbornika CAA – op.) uveljavljanju RI v arheologiji.

Ob nakazanem historičnem pregledu (slika 2.1) moramo opozoriti, da so podobne predstavitve posebnosti odnosa med arheologijo in RI že naredili ugledni nemški (Irwin Scollar [49]), angleški (Gary Lock [39], John Wilcock [57]) in francoski arheologi in informatiki (François Djindjian [15]). Ti so predstavili monografske in bibliografske preglede uporabe matematičnih, računalniških, informacijskih in drugih digitalnih tehnologij, orodij in metod v arheologiji. Tako je npr. Irwin Scollar periodizacijo izdelal na podlagi pregleda in klasifikacije 703 strokovnih člankov, objavljenih v CAA (*Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*) v letih 1973–1997. Pri tem je uporabil modificirano Berelsonovo metodo analize vsebine. Izdelana pa je bila tudi pregledna bibliografija o uporabi računalniških in informacijskih metod in tehnik po posameznih raziskovalni tematskih sklopih arheologije [49, 48].

Heterogena in nemalokrat spontana uporaba matematičnih, računalniških in informacijskih tehnik, tehnologij in metod v arheologiji otežuje jasno periodizacijo in razvrščanje. Zlasti to velja po letu 1980, ko v splošno rabo vstopata četrta in peta generacija računalnikov. To je razlog, da so omenjeni avtorji začetno časovno periodizacijo po letu 1976 hitro nadomestili s predstavitvijo uporabe računalniške strojne in programske opreme po posameznih področjih (npr.: uporaba RI tehnologij na področju statistike, seriacije, tipologije, matematičnega modeliranja, pri vzpostavitvi osnovnih in integriranih baz podatkov in dokumentov, grafični obdelavi podatkov in slik, grafični rekonstrukciji artefaktov, GIS v prostorski arheologiji, CAD, 3D

modeliranje, VR pri repliciranju artefaktov ali njihovi javni predstavitvi, v izobraževanju arheologov, pri ohranjanju arheološke premične in nepremične kulturne dediščine, ipd.). Zgovorna je npr. Scollarjeva statistična predstavitev itemske vsebine člankov, objavljenih v CAA. Njegova periodizacija posredno nakazuje spremembe trendov v arheološkem raziskovanju. Zanimiva bi bila vsebinska nadgradnja te analize člankov tudi za obdobje 1997–2018. Žal to onemogoča odsotnost ključnih pojmov v člankih. Zgolj z ad-hoc primerjavo lahko ugotovimo določeno spremembo trendov v arheologiji v primerjavi s Scollarjevo analizo. Tako se naj bi delež statističnih obdelav v skupni strukturi objav zmanjšal s 23% na 14%. Porasel pa delež člankov, ki opisujejo uporabo grafičnih tehnologij in metod (s 13% na 24%), GIS (z 9% na 21%), baz podatkov (s 23% na 36%) itd. Zgolj v ilustracijo smo v Prilogi 1 predstavili histograme Scollarjeve analize, ki nazorno nakazuje trende do leta 1997.

Naš pregled razvojnih faz uporabe računalniške strojne in programske opreme v arheologiji smo zasnovali na podlagi uporabe časovne premice, ki predstavlja korelacijska vozlišča medsebojno primerljivih kvalitativnih prelo-mnih obdobj:

- v razvoju računalniške strojne opreme (od 1. do 6. generacije),
- v uporabi strojne in programske opreme (od IBM360, PC do super-računalnikov; od Fortrana, Cobola, Basica, C, C++, Prologa, Jave, Python-a do Visual Basica, ipd.),
- v arheološki teoriji (od kulturno-zgodovinske, procesne, kognitivne do interpretativne smeri) in
- v metodologiji obdelave arheoloških podatkov (od kvantitativne, računalniške in informacijske arheologije do sodobne digitalne prakse in E-arheologije).

Pri določitvi razvojnih obdobj smo se v drugem delu tega poglavja odločili za kritično distanco obravnave vloge RI v arheologiji. Izbrali smo dodaten



kriterij razvrščanja in periodizacije, tj. **standardizacija**. To je kriterij sprejete (prevladujoče) standardizirane uporabe strojne in programske opreme ter RI metod in tehnologij v terenskem in laboratorijskem delu arheologov, pri hranjenju (dokumentiranje in arhiviranje), obdelavi in izmenjavi arheoloških podatkov ter sistemih javnega predstavljanja artefaktov (virtualne gliptoteke, muzejske zbirke, ipd.). Pri tem želimo prepoznati tiste ključne razvojne in prelomne faze v arheologiji, ko sta postala računalništvo in informatika nujen del raziskovalne in interpretativne arheološke prakse. Pri tem smo raziskali predvsem uporabo štirih skupin standardov v arheološkem terenskem in laboratorijskem delu in sicer:

- standarde strojne opreme,
- standarde systemske in programske opreme,
- standarde hranjenja in urejanja podatkov (sistemi za beleženje, zbiranje in dokumentiranje podatkov) ter
- standarde obdelave podatkov in metapodatkov (sistemi za obdelavo, vrednotenje, primerjanje in izmenjavo podatkov in meta podatkov).

Ta dodatni kriterij vrednotenja odnosa med računalništvom in informatiko ter arheologijo je po letu 2010 tudi del uradno priporočene splošne mednarodno standardizirane [4, 27] uporabe RI metod in tehnologij v preventivni arheologiji 21. stoletja.

Ta dodatni kriterij smo uporabili zgolj kot hipotetični delovni pripomoček razvrščanja in sledenja razvojnim fazam v arheologiji s stališča RI. Področju standardizacije RI tehnologij in metod se dosedaj pri periodizaciji razvojnih obdobj arheologije ni namenilo pričakovane pozornosti. Zato smo lahko zasledili tudi izjave uglednih domačih in tujih arheologov, da arheologija nima lastnih metod in tehnik, ampak si jih preprosto, glede na avtonomno odločitev arheologa, sposoja iz drugih humanističnih ved ali naravoslovnih znanosti.

Naš pristop želi spodbuditi širši premislek o pretekli in bodoči interakciji in integraciji arheologije in RI pri obravnavi in vrednotenju arheoloških ostalin, kot to izhaja iz priporočil Londonske listine [13] in Seviljskih načel [42]. Prav ta dva dokumenta, sicer na splošni mednarodni ravni in kot neobvezujoča, prvič doslej povsem nedvoumno zahtevata od preventivne arheologije standardizirano sistemsko vključitev RI tehnologij ter IT strokovnjakov v postopke ohranjanja arheološke kulturne dediščine. To pa je — po mnenju pobudnikov obeh dokumentov — mogoče doseči le z uveljavitvijo posebnega programskega inženiringa v arheologiji (SPLs – Software product lines) in v sistemu ohranjanja in promoviranja premične in nepremične arheološke kulturne dediščine.

Predstavitev razvojnih faz in odnosa med arheologijo in RI (glej sliko 2.1) je izdelana na podlagi pregledanih in ovrednotenih strokovnih člankov šestih arheoloških revij: *Journal World Archaeology* (1970–2018); *CAA – Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology* (1973–2018); *Internet Archaeology* (1996–2018); *Archeologia e Calcolatori* (1990–2017); *Virtual Archaeology Review* (2010–2018) in *Arheološki vestnik* (1950–2018). Periodizacijo smo dopolnili še na podlagi nekaterih drugih strokovnih knjižnih publikacij, kot so npr: *Using computers in archaeology: towards virtual pasts* (Gary Lock [40]), *Archaeology in the digital era* (Graeme Earl [17]) in *Digital archaeology: bridging method and theory* (Patrick Daly [11]).

Vsi dosedanji in najpogosteje navajani primeri kratkih pregledov razvoja vloge RI v arheologiji so bili predstavljeni na podlagi analitične in statistične obdelave prispevkov v *CAA - Computer Applications & Quantitative Methods in Archaeology*<sup>2</sup>.

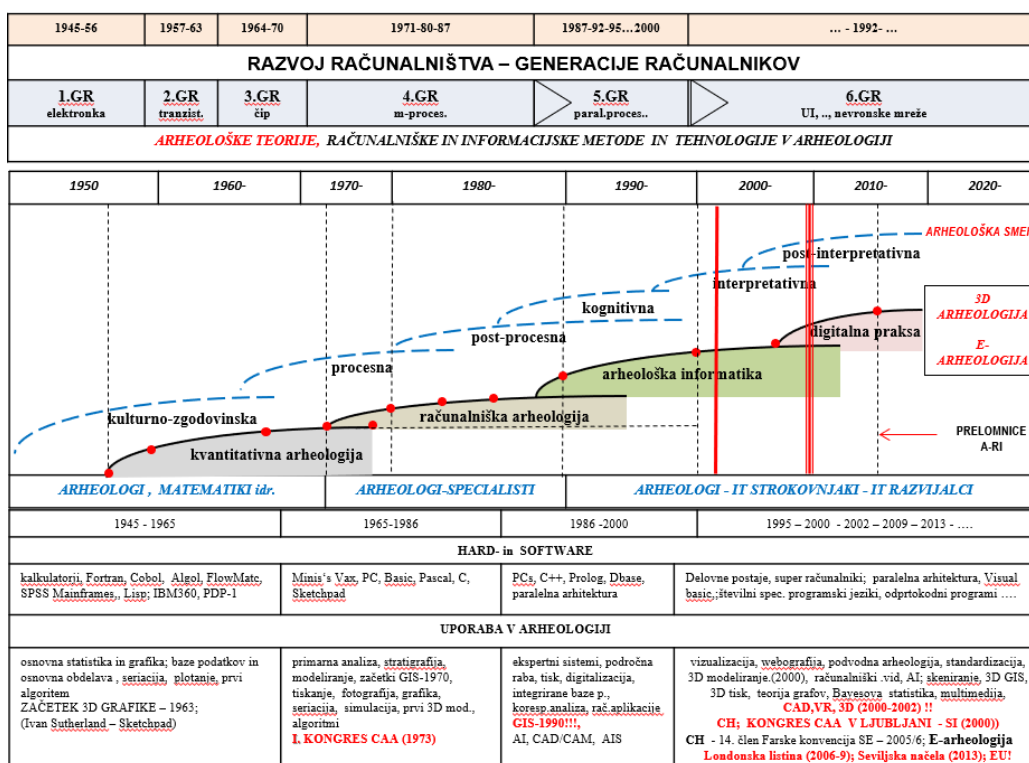
---

<sup>2</sup>Dostopno: <https://proceedings.caaconference.org/year/1973/>

## 2.1 Odnos med arheologijo, računalništvom in informatiko (historični pristop)

V tabeli (slika 2.1) povzemamo ključne razvojne stopnje v arheologiji. Te potrjujejo, da je postal računalnik v zadnjih sedemdesetih letih vse bolj nepogrešljivo orodje pri delu in raziskovanjih arheologov. Ta razvoj začenja z nastajanjem prvih poenostavljenih arheoloških računalniških baz podatkov in z objavami analognih statističnih raziskovalnih poročil. Mnogi to začetno spremembo v arheologiji povezujejo z nastankom znanstvene analitične arheologije. Šele, ko so arheologi v začetku 60-tih let zamenjali kalkulator z računalnikom, se začne dinamičen razvoj odnosa med arheologijo in računalništvom. Ta poteka od prvih preprostih statističnih analiz in indeksiranih baz podatkov do današnjih skrajno sofisticiranih uporab računalniške strojne in programske opreme, GIS tehnologije, 3D modeliranja in predstavitev virtualnih muzejskih zbirk arheoloških ostalin.

Brez uporabe računalnika si ni mogoče več zamisliti vodenja arheološke dokumentacije, analitične obdelave integriranih baz metapodatkov, ne dela na terenu ali v laboratoriju, niti analiz in kartiranj krajine, grafičnih obdelav, rekonstrukcij in vizualizacij artefaktov. Nove informacijske tehnologije so spremenile arheološko delo in v temeljih spreminjajo tudi arheologijo, ki postaja integrirana humanistično–naravoslovna znanost. Nastajajo nacionalni in mednarodni arheološki informacijski sistemi, uporablja se večdimenzionalna analiza podatkov, matematično in 3D modeliranje. Arheologija že trka na vrata računalniškega oblaka. Odpirajo se nove možnosti računalniške analize z uporabo učinkovitih in večnamenskih odprtokodnih grafičnih programskih orodij.



Slika 2.1: Periodizacija razmerja med arheologijo, računalništvom in informatiko

Do pete generacije računalnikov (1987) je bila uporaba računalnika omejena predvsem na laboratorijsko delo. S peto generacijo je postal računalnik nepogrešljivo orodje terenskih raziskovanj. Zgolj v ilustracijo. Leta 2014 je bilo na področju arheologije registriranih okoli 120.000 računalniških uporabnikov. V letošnjem letu naj bi računalnik v arheologiji uporabljalo že nad 2,5 milijona uporabnikov.

Še leta 1965 so bili kalkulatorji (marsikje tudi še danes – op.) pripomoček za osnovno statistično analizo podatkov. Računalniki 2. in 3. generacije pa so bili uporabljeni predvsem za vzpostavljanje prvih arheoloških baz podatkov in prvih dokumentacijskih zbirk. Že to je bilo dovolj za spoznanje, da arheologija brez računalnika ne bo preživela. Ko so bili na nekaterih angleških in ameriških univerzah leta 1971 nameščeni prvi računalniki ter ustanovljeni prvi univerzitetni računalniški centri in akademski raziskovalni laboratoriji,

je bil to signal, da bo arheologija morala načrtovati svoje nadaljnje aktivnosti z roko v roki z naravoslovnimi znanostmi, tj. najprej matematiko ter nato še z RI. Računalniki so bili namenjeni v 60-ih letih predvsem zahtevnejši statistični obdelavi in analizam večjih zbirk podatkov. To delo je najprej povežalo arheologe in matematike. Razvita so bila nova statistična orodja (SPSS, OSIRIS, BMDP), ki so že omogočala osnovno grafično obdelavo podatkov. S programskimi jeziki Fortran, Basic in Cobol so nastajale prve programske rešitve v arheologiji (npr.: ideksiranje in klasificiranje, tipologija artefaktov, matematično modeliranje, numerična taksonomija, seriacija, ipd.).

V 70-ih letih začno uporabljati računalniške programe pri kartografiranju in obdelavi prostorskih podatkov (SYMAP). Arheologija je to tehniko prevzela in jo uporabila pri simuliranju in odkrivanju možnih arheoloških najdišč.

Pomembno razvojno spodbudo je RI prevzelo po letu 1973, ko je začel izhajati zbornik CAA, ki je povežal novo generacijo arheologov, računalničarjev, matematikov in inženirjev, ki so bili zaposleni v univerzitenih računalniških centrih in raziskovalnih laboratorijih. Ti so se letno srečevali na konferencah, izmenjevali izkušnje ter snovali prve skupne projekte. V akademsko rabo je prišla 4. generacija računalnikov z mikroprocesorskimi čipi Intel. CAA skupina arheologov je pustila v začetku tudi močan vpliv v arheološki teoriji (Nova ali procesna arheologija – 1975). Zavzela se je za standardizirano uporabo metod eksaktnih znanosti in novih tehnologij v arheologiji, ki so bile tesno povezane z razvojem RI.

V drugi polovici 70-ih let so zagovornike procesne arheologije ostro napadli predstavniki post-procesualizma in tradicionalistov. Ti so izražali pomisleke glede zahteve po uvajanju novih tehnologij in metod v arheologijo, katerim velik del arheologov zaradi nepoznavanja ni mogel slediti. Nasprotniki so zahtevali avtonomno delovanje in odločanje arheologov ter se v nasprotju s predstavniki „nove arheologije“ zavzeli za tesnejše sodelovanje s humanističnimi vedami, kot so geografija, zgodovina, ekonomija, antropo-

logija, etnologija, idr. Podprli so le uporabo statistične analize (faktorska analiza, analiza grozdov) v okviru t.i. kvantitativne arheologije.

Nasprotje med kritiki in zagovorniki uvajanja računalniških tehnologij v arheologijo je ostalo nepremostljivo. Medtem, ko so zagovorniki humanistične smeri svoje delo uveljavljali predvsem v akademskem izobraževalnem okolju, so zagovorniki uvajanja novih tehnoloških znanj v arheologijo svoje delo razvijali predvsem v univerzitetnih raziskovalnih laboratorijih in inštitutih ter nastajajočih računalniških centrih. Obe skupini sta našli skupni interes le pri višji statistični analizi, saj si te ni bilo mogoče več zamisliti brez uporabe računalnika.

V tem času nastanejo prvi algoritmi, namenjeni uporabi računalniških programskih orodij v arheologiji. Najprej v statistični analizi, nato pa pri oblikovanju in obdelovanju računalniško vodenih arheoloških, muzejskih in knjižničnih baz podatkov.

Uporaba računalniške strojne in programske opreme je koncem 70-ih let prevzemala vse bolj vidno vlogo v arheologiji. Odločilen je bil pojav mikroračunalnikov. Namesto redke izbrane elite, ki je imela v nasprotju z večino v računalništvu neizšolanih arheologov privilegiran dostop do omejenih kapacitet akademskih računalniških centrov, se je z mikro in osebnimi računalniki krog uporabnikov računalnikov močno razširil.

Razvoj mikroračunalnikov v poznih 70-ih je spodbudil nastanek novih programskih orodij in komercialnih podatkovnih baz, ki jih je bilo možno prilagoditi tudi arheološki uporabi. Koncem 70-ih so nastale prve relacijske baze podatkov, vendar so te zahtevale povsem novo standardizacijo delovnih in raziskovalnih postopkov v arheologiji. V ospredje je stopilo pričakovanje, da velike baze podatkov nadomestijo manjše indeksirane, ki jih lahko uporabniki vnašajo in obdelujejo neposredno. Oba pristopa sta potekala vzporedno, čeprav je nižja cena in enostavna uporaba nagnila tehniko k mikro nivoju. Težave z zamudnim šifriranjem v 60-ih so postale preteklost.

V 80. letih stopi na trg 5. generacija računalnikov. Ta postane dostopna najširšemu krogu zainteresiranih uporabnikov. Zasnovana je na paralelni ar-

hitekturi, ki omogoča istočasno delovanje več računalnikov na isti problemski in vsebinski platformi. Nova tehnologija je arheologijo odmaknila od matematike in statistike (kvantitativna arheologija) k novim revolucionarnim računalniškim aplikacijam. Predvsem k vse bolj želeni grafiki. Ta je postala zanimiva za arheologe, saj naj bi najbolj ustrezala njihovim predstavam o uporabnosti RI pri arheologovem delu. Toda soočili so se z novo težavo. Arheologi, ki so do tedaj preveč pasivno in z nezaupanjem sprejemali nova orodja, uveljavljena predvsem v drugih znanostih, vojski in gospodarstvu, niso bili povsem pripravljeni in usposobljeni na hitro prilagoditev novemu tehnološkemu izzivu. Tradicionalistična arheologija pa tudi ni zbrala dovolj akademskega poguma, da bi dovolila dostop zagovornikom uporabe novih tehnologij do arheološkega akademskega izobraževalnega okolja. Procesa sta potekala paralelno, vendar z obojestransko toleranco in selektivno rabo novosti. V tem „spopadu“ je bil zmagovalec znan že vnaprej. Prihranek na času pri obdelavi podatkov (to kar je do nedavnega trajajo po več mesecev ali celo let, je bilo opravljeno s terminali in osebnimi računalniki v nekaj minutah – op.), uporaba zmogljivih odprtokodnih programov, izjemna natančnost meritev, zanesljivost obdelanih prostorskih podatkov, možnost rekonstrukcije in verodostojnejše analize, predikcija, računalniška grafika, 3D modeliranje in virtualnost, so jeziček na tehnici obrnili v prid uporabe RI v arheološkem raziskovanju.

Dodatno spodbudo h krepitvi vloge RI v arheologiji predstavljajo mednarodne iniciative (UNESCO, Svet Evrope) pri ohranjanju arheološke kulturne dediščine. Te zahtevajo uporabo RI metod in tehnologij v preventivni arheologiji ter pričakujejo od nacionalnih organov vzpostavitev arheološkega informacijskega managementa ter javnosti dostopnih integriranih arheoloških baz metapodatkov.

V arheologiji se postopno uveljavijo GIS (Geographic Information System), HR-CRM (Heritage Management – Cultural Resource Management), CAD, LiDAR, digitalna fotografija, lasersko in fotometrično snemanje, 3D modeliranje, učinkovita raba digitalnega in elektronskega tiska, standardizirani

rani urejevalniki besedil, ipd.

Prelomnico je pomenil kongres CAA leta 2000 v Ljubljani. To leto lahko označimo kot začetek aktivnosti, ki dokončno usmeri arheologijo v digitalno in virtualno prakso. V ospredje ponovno stopi potreba po dodatnem izobraževanju arheologov v RI. Izpostavljena je zahteva po doslednejšem standardiziranju in protokoliranju RI tehnologij v procesih odhranjanja arheološke kulturne dediščine. Na nacionalnih nivojih začne postopno pridobivati na pomenu preventivna arheologija oz. splošna javna skrb za ohranitev arheološke kulturne dediščine. Prelomnico v pomenu RI v arheologiji predstavlja vzpostavljanje nacionalnih sistemov, ki skrbijo za ohranitev kulturne dediščine. Ti sistemi imajo svoje idejne temelje že v 60-ih in 80-ih. Z Londonsko listino (2009) in Seviljskimi načeli (2011) so končno postavljeni temelji trajnejšega sodelovanja RI s preventivno arheologijo.

Dodatno spodbudo k razvoju prispeva uporaba svetovnega spleta. S tem, ko so začeli v 90-ih na univerzi v Birminghamu proučevati uporabo vizualizacije ter 3D modeliranja v arheologiji, je med delom arheologov in računalničarjev zaživela pobuda za nastanek novih arheoloških disciplin — arheološke informatike ter 3D in virtualne arheologije. V zadnjih letih stopa v ospredje tudi zahteva po E-arheologiji oz. kibernetski arheologiji. Slednja naj bi s svojim tehnološkim in metodološkim aparatom sčasoma dobila ustrežnejše mesto v arheološkem akademskem izobraževalnem procesu.

Kvalitativno prelomnico v odnosu arheologije in RI nedvomno pomenita leti 1989 in 1990, ko v arheologiji oživi ideja virtualnosti (Reilly [44]). Ta postavi temelje novega pristopa k dokumentiranju, interpretiranju in celovitejši obravnavi primarnih arheoloških materialov. V arheološke raziskave so aktivno vključeni IT-strokovnjaki. Nov pristop, uporaba novih tehnologij in protokolov zareže oster rez med digitalno in tradicionalno arheološko prakso. Ob tem Reilly poudari: „Virtual archeology described the way in which technology could be harnessed in order to achieve new ways of documenting, interpreting and annotating primary archaeological materials and processes, and invited practitioners to explore the interplay between digital



and conventional archaeological practice but also to explore and to represent that practice in new ways. An animated 3D computer model of hypothetical excavations of a 3D archaeological assemblage, or 'site', presented at CAA in 1990 was the first example of applying solid modeling technology as 'virtual archeology'."

Začetki virtualne arheologije so v arheološko terensko delo prinesli dodatna vprašanja, nove vidike, nove dileme in nove možnosti. „In other words, virtual archaeology was not only about 'what was' and 'what is', or just about developing digital tools to perform routine archaeological tasks using digital technology. It included a licence to imagine 'what ifs' and 'what might come to be'." Arheologi so prvič spoznali, da v roke dobivajo orodje, ki najbolj odgovarja njihovim naravi — varuha kulturnih artefaktov in vizualnega raziskovalca. Korak v virtualnost je bil le še vprašanje časa.

Razvoj 3D in virtualne arheologije po letu 1990, zlasti pa med leti 2000 in 2016, je odločilno vplival na pojav in uveljavitev računalniške grafike in 3D modeliranja pri obravnavi in vizualizaciji arheoloških ostalin. S tem pa so bile zanemarjene ali nekoliko pozabljene druge informacijske tehnologije znotraj virtualne arheologije, ki še čakajo na implementacijo v primarnih arheoloških raziskovanjih ter v poglobljeno in usmerjeno interdisciplinarno sodelovanje arheologije in RI na področju 3D grafike, virtualnih relacijskih baz in rudarjenja podatkov, uporabe novih analitičnih odprtokodnih programskih orodij in aplikacij, hiperteksta in 3D tiskov. „Virtual archaeology, as originally articulated, described the use of digital technologies as tools for mediating and engaging with conventional (analogue) archaeological processes and the subtle and contextual traces and residues that so often characterise archaeological 'sites'. This definition was broad and potentially encompassed a wide range of technologies and processes. It should be made clear that the term 'virtual reality' was deliberately avoided and the importance of the non-graphical aspects of 3D computer modelling was highlighted (Reilly).“

Preglednica (slika 2.1) kaže še na eno prelomnico. Ta se je zgodila v letih 2011-2014 na področju vizualizacije, 3D modeliranja in navidezne resničnosti

s platformo Sketchfab<sup>3</sup>.

Virtualna in 3D arheologija v zadnjih petnajstih letih odločilno vplivata na razvoj arheologije. Nahajamo se pred tako pomembno spremembo, kot so jo v arheologijo na tehnološkem področju prineseli v osemdesetih letih mikro in osebni računalniki in nato integrirane in relacijske baze podatkov. Tokrat stojimo pred kvalitativno vsebinsko spremembo. Arheologija postaja integrirana znanost, ki zahteva skupen nastop vrhunskih interdisciplinarno izobraženih in usposobljenih strokovnjakov.

Trenutno smo pred redefinirano vlogo virtualne arheologije, ki jo arheologi in informatiki že označujejo kot „**novo virtualno arheologijo**“ ali kot predlaga soavtor stare besedne skovanke Maurizio Forte<sup>4</sup> „Cyber-Archaeology“. Ta naj bi tesneje povezala arheologe, IT-strokovnjake in IT-razvijalce. Širitev sodelovanja pa se naj bi potrdila z vidnejšo vlogo umetne inteligence, nevronskih mrež, kvantnih računalnikov, strojnega učenja, multimedije, računalniškega vida in interneta stvari (IoT).

Trendi v zadnjih letih nakazujejo, da bo morala arheologija dokončno stopiti v oblak in opraviti celovito digitalno preobrazbo, ki bo tudi na področju RI uveljavila t.i. bote kot novo zvrst inteligentnih aplikacij in nov kanal komunikacije ter namenila ustrezno pozornost tehnologiji veriženja blokov. In to s ciljem, da bi lahko arheološke ostaline postale splošno dostopne opazovanju, raziskovanju in obravnavanju, njihova varnost pa bo ostala neogrožena.

Odziv klasične akademske arheologije na „drugi kopernikanski obrat“ v arheologiji 21. stoletja je tradicionalno zadržan in sumničav. Še vedno ni npr. na nobeni evropski univerzi odprta samostojna katedra za arheološko infor-

---

<sup>3</sup>Sketchfab je platforma za objavlanje, skupno rabo, odkrivanje, nakup in prodajo 3D, VR in AR vsebin zagotavlja pregledovalnik na podlagi tehnologij WebGL in WebVR, ki uporabnikom omogočata prikaz 3D modelov v spletu. Ogled je možen v katerem koli mobilnem brskalniku

<sup>4</sup>Gostujoči profesor klasičnih študij, umetnosti, zgodovine umetnosti in vizualnih študij na Duke University. Kordinator številnih mednarodnih projektov, direktor DIG@Lab in avtor študij Virtual Archaeology in Virtual Reality in Archaeology.

matiko. V Mainzu in Kielu so narejeni prvi koraki (če izvzamemo Anglijo in ZDA) k interdisciplinarnemu študiju arheologije, računalništva in informatike (Archeoinformatik). Sodelovanje in izmenjava znanj med arheologi, informatiki, računalničarji in drugimi naravoslovci poteka še vedno predvsem v okviru univerzitetnih znanstveno-raziskovalnih inštitutov, centrov in laboratorijev. Sodelovanje pa se seli tudi v terenske arheološke raziskave.

## **2.2 Vloga računalniške strojne in programske opreme pri standardizaciji opreme in tehnik dela v arheologiji**

Eden, po našem mnenju, pomembnejših kriterijev vrednotenja odnosa med arheologijo in RI je nedvomno vpliv računalniške strojne in programske opreme na standardizirano uporabo orodij, delovnih postopkov, tehnik in metod v arheološkem terenskem in laboratorijskem delu. Razvoj arheologije to v celoti potrjuje. Še več. Brez RI si sodobne in tudi bodoče arheologije ni mogoče zamisliti. Doslej v strokovni literaturi temu kriteriju vrednotenja razmerja med obema znanstvenima področjema, vsaj po nam dostopnih in pregledanih virih, ni bila namenjena večja pozornost. Še manj pa je bilo poskusov izdelave periodizacije razvoja arheologije na podlagi kriterija standardizacije računalniške strojne in programske opreme. Razumljivo je to posledica, ker se standardizacija v arheologiji razlikuje od države do države. Zato smo se odločili, da poskusimo raziskati to delovno hipotezo predvsem v državah, ki so bile nosilke uvajanja novih tehnologij v terensko in laboratorijsko delo arheologov.

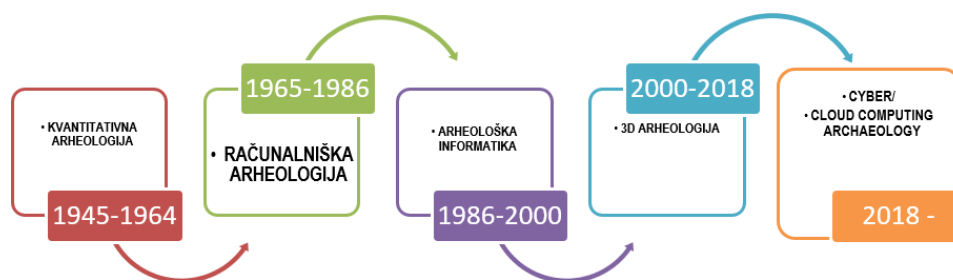
Želimo načelno odgovoriti na vprašanje, ki je pomembno tudi za vrednotenje odnosa med arheologijo in RI: ali je uvajanje računalniške strojne in programske opreme v arheološko raziskovanje v korelacijski zvezi s standardizacijo orodij, tehnik in metod dela v arheologiji.

Takšen pristop zahteva drugačno periodizacijo in klasifikacijo odnosa med

arheologijo in RI, kot ga poznamo iz dosedanjih poskusov členitve razvojnih obdobj digitalne arheologije [49, 39, 15, 57, 48] idr. Historično členitev odnosa med obema znanstvenima področjema lahko ugotavljamo z dinamiko uporabe strojne in programske opreme ter RI tehnologij v terenskem in laboratorijskem delu arheologov, pri vzpostavljanju, vodenju in upravljanju podatkovnih baz ter pri uporabi in obdelavi integriranih zbirk metapodatkov (dokumenti, poročila, slike, 3D replike, fotografije, digitalizirane prostorske karte, stratigrafske analize, pelodne analize, itd.).

Pri členitvi razvojnih obdobj smo izdvojili predvsem tiste standarde, ki so pomenili v določenem časovnem intervalu kvalitativno spremembo v arheoloških raziskovanjih in hkrati nazorneje potrjevali doseženo stopnjo odnosa arheologije in RI.

Periodizacijo na podlagi kriterija standardizacije RI orodij, opreme, programov, protokolov, tehnik in metod smo na podlagi zbranih podatkov razčlenili na pet razvojnih obdobj (slika 2.2). Izbrali smo tista poimenovanja obdobj (kvantitativna arheologija, računalniška arheologija, arheološka informatika, 3D arheologija in kibernetična arheologija), ki v svoji besedni konotaciji neposredno kažejo na sprejete in uveljavljene RI standarde v arheologiji.



Slika 2.2: Obdobja standardizacije računalniške strojne in programske opreme

Standardizacija RI strojne in programske opreme je predstavljena delovno. Upošteva okoliščino, da vse do uporabe mikroročunalnikov arheologija

ni imela odločilnega vpliva na izbor strojne in programske opreme pri svojem delu. V večini primerov so arheologi zgolj izkoristili možnosti obdelave podatkov na računalnikih 1., 2. in 3. generacije, ki so bili nameščeni izven univerzitetnih ustanov. Zato standardizacija strojne in programske opreme pri arheološkem delu v začetni fazi razvoja ni bila potrebna. Računalnik je bil, podobno kot kalkulator, le pripomoček pri že standardiziranih arheoloških opravilih (statistična analiza, risanje artefaktov, vzdrževanje večjih muzejskih ali osebnih zbirk, ipd.)

Večjo vlogo pri izboru in določanju osnovnih standardov uporabe RI strojne in programske opreme prevzame arheologija šele v 80-ih in 90-ih. To je čas, ko se v arheologiji uveljavi nova generacija računalniško izobraženih arheologov. Ta želi delo postaviti na nove, višje znanstvene in tehnološke podlage. Arheologi so se aktivneje vključili v iskanje rešitev, ki bi s pomočjo novih in hitro razvijajočih računalniških tehnologij izpolnile pričakovanja pri ohranjanju, dokumentiranju, vrednotenju in javnem predstavljanju arheološke kulturne dediščine. „Novi arheologi“ so videli v standardizirani uporabi računalnikov 4. generacije priložnost kvalitativne spremembe v arheološkem raziskovanju („prvi kopernikanski obrat v arheologiji“ — 1982–1986). Temelji tega obrata so bili postavljeni že davnega leta 1973 z ustanovitvijo CAA, skupine zanesenjakov in strokovnjakov različnih znanj in smeri. Skupina je verjela v poslanstvo uporabe računalnika ter neprestano spodbujala v nacionalnem in mednarodnem okolju iskanja in rešitve, ki so arheologijo spreminjale v integrirano znanost in neprestano strastno, na trenutke celo bolezensko išče možnosti preizkušanja in uveljavljanja novih tehnologij v arheološki praksi.

Po letu 1980 lahko spremljamo izjemno dinamiko uporabe računalnika v arheologiji. Ta je nadgrajena z določanjem standardov strojne in programske opreme, ki pa jih spremljajo nenehni pozivi arheologov podjetjem in državnim ustanovam za finančno podporo in splošno dostopnost do nove računalniške opreme, sistemskih in odprtokodnih programskih orodij.

Dinamičen razvoj ter hitro spreminjajoče možnosti, ki jih skozi čas po-

nujata RI strojna in programska oprema, so posredno vplivale na to, da načrtnega in sistematičnega pristopa k standardizaciji opreme in postopkov v arheologiji ni bilo v pričakovanem obsegu. Praktična uporabnost je bila na trenutke pomembnejša od formalne sistematičnosti. Res pa so bile spremembe do 5. generacije računalnikov tako silovite in hitre, da je bilo razmišljanje o standardizaciji skozi zamudne in dolgotrajne formalne postopke na meji razumnega in smiselnega. Je pa arheologija vse do prvih uporab računalnika (2. generacija) in tudi kasneje (do začetka 60-tih let) vendarle, kot se za znanost spodobi, standardizirala nekatere postopke v arheoloških terenskih ali laboratorijskih raziskavah, ki jih je prevzela od drugih znanosti (fizike, biologije, kemije, geologije). Večina teh je še vedno kot standard vključena v terensko, laboratorijsko ali analitično raziskovalno delo. Z razvojem so bile te tehnike in metode med prvimi informatizirane. To pa dodatno opozarja na ključno vlogo RI strojne in programske opreme v arheologiji. V mislih imamo tehnike in metode matematične statistike, stratigrafije, radiometričnega datiranja, pelodne analize, karbonske analize, idr.

Bolj kot standardi so se v začetni fazi uporabe RI strojne in programske opreme uveljavili protokoli. Z njimi so razvijalci ali lastniki opreme določali postopke za učinkovito rabo opreme v arheologiji.

Odločilno vlogo na področju standardizirane uporabe RI strojne in programske opreme je po letu 1973 opravilo združenje CAA, ki je na mednarodnem nivoju povežalo računalničarje, informatike, matematike, elektrotehnike in arheologe v skupnost, ki je neizbrisno spremenila arheologijo v kreativno iterdisciplinarno znanost.

Standardizacija strojne in programske opreme dobi poseben pomen v arheologiji in preventivni arheologiji šele potem, ko je leta 1983 UNESCOV Medvladni komite za zaščito svetovne kulturne in naravne dediščine<sup>5</sup> izpostavil odgovornost držav, arheologije in nevladnih organizacij za ohranitev kulturne dediščine. Zlasti pa po letu 1998, ko so snovalci grškega projekta POLEMON[5] pozvali mednarodno skupnost, Evropo in arheološko stro-

---

<sup>5</sup>WHC UNESCO (1983) - <http://whc.unesco.org/archive/opguide83.pdf>

kovno javnost k vzpostavitvi enotne mednarodne računalniške baze za izvajanje arheološkega menedžmenta pri ohranjanju svetovne kulturne dediščine. Ideja je bila leto dni kasneje preizkušena v arheološkem projektu PETRA 3.0 [41].

Ključni preobrat pri mednarodni standardizaciji uporabe določenih računalniških tehnik in metod v arheologiji in pri ohranjanju kulturne dediščine nastopi šele leta 2007, ko UNESCO zahteva od članic ZN sprejem in implementacijo enotne metodologije, ki mora zagotoviti potrebne finančne vire, standardizirati postopke in realizirati ustrezno usposabljanje kadrov na področju ohranjanja svetovne kulturne dediščine (tedaj 851 objektov in območij). V tehnični okvir realizacije UNESCOVIH zahtevanih „standardov“ je sodila tudi aplikacija DATARCH [21], ki protokolira arheološka opravila, shranjevanje, analiziranje in združevanje podatkov pri arheoloških raziskavah. Žal poteka proces izjemno počasi. Priporočeni standardi niso zaživel globalno. Nacionalni dokumenti, ki urejajo npr. arheološka izkopavanja, še vedno ohranjajo, če izvzamemo zahtevo po pisanju poročil „v digitalizirani obliki“, standarde tradicionalne arheologije.

Uvajanje standardov pri uporabi RI strojne in programske opreme v arheologiji ni enoten, enostaven in enoznačen proces. Razlikuje se od države do države. Izstopajo države z razvito tehnologijo in dolgotrajno znanstveno arheološko tradicijo v domačem in mednarodnem okolju. Zato je naša predstavitev standardov strojne in programske opreme v arheologiji omejena prav na te države, ki so nosilke razvoja v arheologiji. V prvi in vodilni skupini imata pomembno vlogo Anglija in ZDA. Sledijo Nizozemska, Francija, Nemčija, skandinavske države, Avstralija in Kanada. V drugi skupini z nekaj letnim zamikom, vendar zadnja leta z zelo izrazitim informacijskim vplivom, ob sodelovanju arheologov iz prve skupine, so Španija, Italija, Malta, Ciper, Grčija in Bolgarija. Po letu 2000 (po srečanju CAA v Ljubljani in prvi konferenci virtualne arheologije v Italiji) pa se področju široke in standardizirane uporabe računalniških programskih orodij pri ohranjanju kulturne dediščine pridružujejo tudi srednjeevropske države in Rusija.

V nadaljevanju povzemamo nekatere ključne značilnosti standardizacije v arheologiji po posameznih razvojnih obdobjih. Pregledno smo predstavili sprejete standarde po obdobjih v Prilogi 2.

### KVANTITATIVNA ARHEOLOGIJA (1945/50–1964)

Prvo obdobje, ki se začne po drugi svetovni vojni in končuje s kongresom arheologov in matematikov v začetku 60. let v Romuniji, predstavlja nastanek t.i. kvantitativnega gibanja v arheologiji. Zanimanje za delo z računalnikom je bilo v tem obdobju zanemarljivo. V ospredju je bila uporaba osnovnih in opisnih statističnih metod (npr.: cluster analiza, multivariantna analiza, seriacija, tipologija, X<sup>2</sup>, ipd.). Podatki so bili do 2. generacije računalnikov (1957) ročno klasificirani in obdelani s kalkulatorjem. Statistične metode so bile v arheologiji sicer standardizirane, vendar je bil njihov izbor in uporaba praviloma odločitev arheologa, ki je vodil arheološko raziskavo. Na prelomu 60-ih so bile posamezne statistične obdelave izvedene že na računalnikih druge generacije (IBM1401; Philco Transact S-2000) in v jezikih Fortran in Cobol. Statistika je numerično obdelavo podatkov dopolnjevala z nezahtevno statistično grafiko. Prvi so posegli k standardizirani uporabi računalnika britanski nacionalni muzeji. Pristopili so k projektu strojnega vnosa in začetne obdelave arheoloških podatkov na računalnikih druge generacije. V sodelovanju z arheologi je bil npr. standardiziran postopek vnosa podatkov o artefaktih (indeksiranje, klasificiranje, kodiranje) na posebnih obrazcih. Je pa to obdobje že opozorilo na pomen in možnosti uporabe računalniške strojne in programske opreme v arheologiji.

Poleg pionirskih začetkov uvajanja arheoloških baz so matematiki za nekatere standardizirane statistične metode in analize izdelali priročne računalniške programe, ali pa v arheologijo prenašali komercialne statistične računalniške pakete, ki so jih uporabljati predvsem v bankah. Prelomnico pomeni leto 1960. Na britanskih, ameriških, nemških in nizozemskih univerzah so bili nameščeni prvi računalniki. Ustanovljeni so bili prvi raziskovalni inštituti in računalniški centri. Programi so bili pisani v Fortranu. Razvita so



bila prva programska statistična orodja (BMDP, OSIRIS, SPSS) in napisani prvi algoritmi (npr.: faktorska analiza, kvantitativna prostorska analiza, numerična taksonomija ipd.). Te je analitična arheologija sprejela kot standard arheoloških raziskovanj.

Začetni proces je vodil v naslednjo fazo razvoja, ko računalnik dokončno zamenja kalkulator. S tem pa kvantitativne arheologije, ki se je deloma integrirala v računalniško arheologijo, ni bilo konec. Kvantitativna smer v arheologiji je aktivna še danes in npr. z več kot 45 računalniškimi programi in orodji (nekaj je odprtokodnih) za analitično obdelavo arheoloških podatkov<sup>6</sup>.

### RAČUNALNIŠKA ARHEOLOGIJA (1965–1986)

Drugo obdobje, ki smo ga poimenovali kot obdobje računalniške arheologije, v celoti opredelita 3. in 4. generacija računalnikov. Odkritje čipa (3GR) pomeni revolucionarni dosežek. Zaradi nižje cene, manjših dimenzij, velike zanesljivosti in hitrosti izvajanja operacij postanejo računalniki (IBM360, PDP-1) zanimivi za uporabo tudi v arheologiji. To pomeni začetek množičnejše uporabe mini računalnikov v raziskovalnih ustanovah. Odkritje mikroprocesorja (4GR) leta 1970 ta razvoj še pospeši in se zaključi leta 1986 z množično uporabo osebnih računalnikov. Sprememba, ki pomeni „prvi kopernikanski obrat“ v arheologiji, arheologovo delo in raziskovanje postavi na nove temelje. Dinamika tega razvoja ter vse bolj ključna vloga računalniške strojne in programske opreme v arheologiji ima za posledico prvo večjo standardizacijo opreme, programskih orodij in aplikativnih rešitev v arheologiji.

Na področju računalniške strojne opreme (STr–So)<sup>7</sup> je arheološka stroka standardizirala: mikroračunalnik MIDAS 3HD; APPLE II, mikroprocesor Z80A 4MHz, 62 KByte RAM; trdi disk 20 MByte in gibki disk 1Mbyte; operacijski sistem CP/M 2.2; AMSTRAD 8256 in 6128.

<sup>6</sup>Glej: Tools for Quantitative Archaeology - <http://tfqa.com/>

<sup>7</sup>STr – So – okrajšava v Prilogi 2 za „RAČUNALNIŠKI STANDARD – STROJNA OPREMA“; STr – Po – „RAČUNALNIŠKI STANDARD – PROGRAMSKA OPREMA“; STa – Bp – „ARHEOLOŠKI STANDARD – BAZE PODATKOV“ STa – Omp – „ARHEOLOŠKI STANDARD – OBDELAVA PODATKOV / METAPODATKOV“

Iz nabora programske opreme (STr-Po) so bili standardizirani jeziki Basic, C, Cobol, Fortran, Pascal, Prolog in Apes. Paketi dBase II, MiniSTAB, STRATA in Informacijsko dokumentalistični sistem (IDS). Izdelan je bil algoritem 3D histograma ter programska orodja za potrebe prostorske arheologije (GIS), statistične obdelave (SPSS) in obdelave besedil (WordStar).

Z uporabo računalniških programskih orodij so bili npr.: standardizirani (STa – Bp) sistem za prenos podatkov na daljavo Datel; kanadska zbirka arheoloških podatkov in MDS – Britanski arheološki knjižnični sistem (1967–1977). Pri oblikovanju bank podatkov je bil za vnos določen standard računalniškega jezika Fortran IV in uporabljeno orodje dBase III/PC.

Pri orodjih za obdelavo podatkov (STa-Omp) so bila standardizirana računalniško podprta statistična orodja za cluster, faktorsko in K-analizo.

To obdobje, ki ga opredeljuje pionirsko delo „novih arheologov“ in arheologov - informatikov, je izjemno bogato predvsem na razvijanju programskih rešitev tako za osebne računalnike kot za velike računalniške sisteme. Je pa že v tem obdobju spodbujen proces razvijanja sistemskih rešitev, ki usmerijo digitalno arheologijo na področje rasterske grafike, 3D modeliranja in vizualizacije, prostorskega informacijskega sistema (GIS), izgradnje relacijskih baz podatkov ter nadgradnje muzejskih zbirk z video arhivi (ustanovljen Britanski interaktivni video center/NIVC – 1985). Obdobje se zaključuje s prihodom 5. generacije računalnikov. Osnovno arhitekturo nadomesti paralelna. Razvoj mikroročunalnikov v tem obdobju omogoči premik računalniške arheologije od matematike in statistike k računalniškim aplikacijam (zbirke podatkov, arheološki in prostorski informacijski sistem, grafično risanje in rekonstrukcija artefaktov, ipd.). Spodbujene pa so razprave o nujnosti enotne mednarodne metodologije uveljavitve sistema ohranjanja kulturne dediščine, ki naj vključuje aktivno vlogo tako arheologije kot RI.

Ob zaključku obdobja računalniške arheologije so se arheologi kritično soočili s težavami, ki jih je v arheologijo prineslo računalništvo. To je obdobje, ko je računalnik postal pomembno orodje arheologa. Kewin Flude [23] je na srečanju CAA leta 1983 kritično opozoril na nove težave. Izrazil je

prepričanje, da mora postati računalnik standardno orodje arheologa. „Računalnik ni rešitev — je orodje. V petih letih bo računalnik v arheologiji nepogrešljiv.“ (Flude)

Hkrati je opozoril na ključne slabosti v arheologiji, ki so se pojavile z uporabo računalniških orodij. Med temi je izpostavil: pomanjkljivo računalniško znanje, težave pri enakovrednem sodelovanju računalničarjev in arheologov, odsotnost dialoga, razkorak med željami arheologov in ponudbo informatikov, neustrezno računalniško svetovanje, odsotnost IT-izobraževanja arheologov, pomankljiva standardizacija na področju grafike, ni razvitih programov za analitično obdelavo baz podatkov, slaba analitika, neustrezna zaščita računalniških baz in sistemov, neurejeno financiranje, pomanjkanje grafičnih ploterjev, odsotnost varnostnega kopiranja, ipd. Med prednostne naloge pa je uvrstil: ustanovitev arheoloških računalniških centrov, standardizacijo grafičnih orodij, razvoj 3D grafike (raziskati prednosti in slabosti rastrske in vektorske grafike) ter poenotenje vnosa in obdelave podatkov.

Tem zahtevam se je leta 1986 pridružil Julian Richards [46], ko je zahteval od arheologov ustrezna znanja za delo z računalniko strojno in programsko opremo. Delo arheologa z računalnikom si ne zamišlja brez uporaba sistemske analize, osnovnih znanj o delovanju računalnika, brez uporabe aplikacij dBase II, SPSS in WordStar. Od arheologov pričakuje sposobnost programiranja v Pascalu in Basicu. Glede slednjega je ocenil, da bi bilo mogoče časovno in strokovno primerneje programiranje prepustiti profesionalcem. Zavzel se je za uporabo komercialne opreme in orodij. V dodiplomske študije arheologije pa bi bilo treba vključiti RI.

### ARHEOLOŠKA INFORMATIKA (1986–2000)

Tretje razvojno obdobje t.i. arheološke informatike je eno najbolj dinamičnih. Predvsem na področju programske opreme. Arheologi začno govoriti o problemu babilonskega stolpa v arheologiji.

Prihod 5. generacije računalnikov povzroči radikalni obrat v arheologiji. S takšno revolucionarno spremembo se ni doslej soočila nobena od humanističnih ved. Arheologija je postajala z uporabo RI in programske opreme vse

bolj integrirana in v globalno družbo naravnana humanistično-naravoslovna znanost. Leta 1990 začne delo skupina francoskih arheologov in računalničarjev na ArcheoDATA Systemu<sup>8</sup> [1]. Projekt pomeni pripravo enotnega evropskega arheološkega dokumenta, ki bi standardiziral postopke arheoloških izkopavanj ter zagotovil enotno obravnavo, analizo in konzerviranje artefaktov. V sistem so bila vključena naslednja standardizirana računalniška strojna in programska orodja: GIS, AutoCADM 386, mikroračunalnik in delovna postaja IBM RS6000 RISC, grafična oprema, OS DOS, OS/2, Windows 3 in Oracle. Leto dni kasneje so bili pripravljene vsi obrazci enotnega evropskega arheološkega dokumenta, ki naj bi postali standardizirana delovna podlaga bodočega AIS – European Archaeological Information Service.

Prvič začno arheologi sami postavljati zahteve po nujni standardizaciji ter terjajo od IT-razvijalcev večji vpliv na razvoj RI strojne in programske opreme, predvsem pa večje razumevanje potreb, želja in pričakovanj arheologov. Zahteva za poenotenje standardov je bila posledica določene krize, ki je konec 90-ih nastopila v arheološki informatiki in je imela svoj vzrok v inflaciji ponudbe različnih operacijskih sistemov, tisočih vrst formatov in množice programov pisanih v različnih jezikih in na različnih platformah. Anomalijo naj bi odpravila enotna standardizacija programske opreme in postopkov na evropskem in nacionalnih nivojih.

V tem obdobju so bili položeni nastavki za nadaljnji razvoj arheologije od 3D, inteligentnih baz, hiperteksta do virtualnosti. Na univerzah v Yorku in Sauthamptonu so npr. postavili temelje virtualni arheologiji (Project SYASS). V Lancasteru so začeli delo na videoarhivu. Zmeda in inflacija uporabe programskih orodij je terjala sistemske rešitve. Te pa bi bilo mogoče doseči le z relacijskimi bazami, integracijskimi programskimi orodji ter vzpostavitev integracijskega sistema DBMS (Database Management System) [47]. Gre za sistem, ki naj bi vključeval elektronsko pošto, obdelavo teksta, shranjevanje, podatke CAD/CAM, GIS idr. Za takšen sistem je bil nujen skupni programski vmesnik. Rešitev pa sta poslovno izkoristila Microsoft

---

<sup>8</sup>ArchéoDATA est un système d'information archéologique européen – 1985 – 1995

Windows in Macintosh.

Pri računalniški strojni opremi je arheologija v tem obdobju standardizirala sistem terenske mreže računalnikov ter IBM PC /XT, delovno postajo IBM RS6000 RISC in fotoaparati (najprej klasični in leta 1999 tudi digitalni) kot standardno orodje pri terenskih raziskavah.

Leta 1990 Windows in Macintosh postaneta temeljna sistemska standarda v arheologiji.

Med standardizirano programsko opremo (STr-Po) so vključeni: dBase II in IV, MS DOS, Unix, OS/2, SQL, C, C++, SIMULA; MS-Pascal; GW-Basic, WordStar 2000, Notepad, Worwise, GIS, GIS-dBTools, SPSSX, ES-VANDAL 3D, AUTOCAD, Windows, Oracle, vmesnik GEM, Microsoft Works, Paradox, AVTOCADM, Quattro in Lotus123. Določen je standard strokovnega članka v arheologiji in standardiziran Graphical Kernel System – Standard ISO 7942. Arheologija se je aktivno vključila v evropski sistem ARHEODATA.  $\LaTeX$ , ki je bil standardiziran leta 1986, je standardizacijo dopolnil s spiskom formatov BMP, TIF, GIF, JPV in TGA. V programskem jeziku C razvijejo zbirko programov SUPERFILE – SMR za potrebe arheologov. Programska zbirka zagotavlja urejanje podatkov, sortiranje in kompresiranje. Dodana sta dva analitična programa LOOK in TAB.

Na področju večjih podatkovnih baz je bil javnosti zagotovljen dostop do angleškega arheološkega arhiva, grafičnih zbirk artefaktov in do gradiv CAA (BibTeX) ter enotne britanske evidence artefaktov.

Med arheologi-informatiki vse bolj zori pobuda, da je potrebno študij arheologije tesneje povezati s študijem RI. Ker niso uspeli s pobudo po reformi dodiplomskega študija, so vodstvom arheoloških kateder predlagali obvezne tečaje RI na univerzi.

Postopno dozoreva spoznanje, da so 3D modeli ključnega pomena za arheologijo in sistem ohranjanje kulturne dediščine. Preverjajo in preizkušajo različne tehnike in orodja 3D modeliranja. Raziskave se iz rastrske preusmerijo na vektorsko grafiko. Programske pakete pa nadgrajujejo v integrirana programska orodja in integrirane baze podatkov.

GIS (1993) postane prvi hit arheologije. Na Nizozemskem so leta 1991 razvili nov informacijski arheološki sistem (Projekt ARCGIS) usmerjen v GIS. Projekt je potekal na Informixu, GIS pa je potekal na aplikaciji Gass. Za povezavo med bazami podatkov pa je skrbel GIS-dBTools. Razvojno se je v tem obdobju delo usmerilo v iskanje rešitev, da bi klasično risbo artefakta zamenjalo ustrezno programsko orodje (CAD).

Obdobje se zaključí z usmeritvijo na področje 3D modeliranja in razvoja grafičnih orodij ter zagotavljanja pogojev za trajnostno skrb odhranjanja arheološke kulturne dediščine. To pa že pomeni začetek naslednje faze odnosa arheologije do RI.

### 3D ARHEOLOGIJA (2000–2018)

Osrednja pozornost arheologov v letih 2000–2018 je usmerjena k uporabi, preizkušanju, sprejetju in standardiziranju 3D tehnologij in računalniške grafike. Število 3D modelov v arheologiji v zadnjih letih skokovito narašča, vendar je uporaba v raziskovalne in analitične namene komajda zaznavna. Možnosti 3D arheologije še nekaj časa ne bodo izčrpane. Istočasno poteka v zadnjih letih v 3D arheologiji razvoj orodij in rešitev za virtualizacijo objektov (VR oz. virtualna arheologija). Vendar trendi pri določanju in izbiranju standardov v arheologiji kažejo, da virtualna arheologija še ne razvija novih orodij niti še ne sprejema novih standardov. Standarde prevzema od 3D arheologije. Zato menimo, da je virtualizacija le del in trenutno zgolj modifikacija standardov, ki jih uporablja 3D arheologija. Virtualna arheologija bi lahko bila le faza v razvoju oz. le ena od zunanjih manifestacij 3D arheologije. Prihodnja arheologija, ki bo morala na novo definirati in sprejeti standarde svojega dela, bi lahko bila kibernetska arheologija ali arheologija računalniškega oblaka.

Na pomen in bodoče mesto 3D modeliranja v arheologiji je opozorilo srečanje CAA v Ljubljani leta 2000. Izrazito usmerjenost arheologov v vizualizacijo — to so arheologi napovedovali že od leta 1980 — je omogočila dostopnost in cenenost strojne in programske opreme za izdelavo in tisk ter

vizualizacijo in virtualizacijo 3D modelov arheoloških ostalin. S tem replike arheoloških ostalin premične in nepremične kulturne dediščine ne ostajajo le privilegij arheologov. Omogočajo najširšo javno dostopnost, ne da bi izpostavljali originale nevarnostim uničenja in degradacije.

Arheologi so prepričani, da 3D modeliranje zagotavlja ohranitev in dokumentiranje številnih ostalin, ki bi lahko bile v postopkih izkopavanj uničene ali poškodovane. Hkrati pa so z uporabo 3D modelov ohranjeni natančnejši podatki (volumetrični, teksturni, geometrijski, ploskovni . . .) o ostalinah. Ti podatki so zanesljivejši in verodostojnejši kot pa analogne meritve in poročila, ročne skice, fotografije in spominski zapisi. 3D modeli zagotavljajo prihodnim generacijam arheologov še bistveno več. Podatki, zapisanimi v 3D datotekah, lahko ne glede na čas in prostor, omogočijo analitično poglobljene raziskave in primerjave, ki jih arheološka predhodna praksa ni zagotavljala. Gre za še vedno neizkoriščene možnosti analize vektorskih podatkov, ki lahko artefakt ne le ohranijo, ovrednotijo in rekonstruirajo ampak tudi virtualno oživijo.

Obdobje 3D arheologije že pripravlja s pomočjo 3D modeliranja vsebinske in tehnične podlage naslednji razvojni fazi arheologije — novi virtualni arheologiji oz. kibernetiki arheologiji. To bo faza, ko bodo arheološke ostaline zaživele v kibernetiki obliki ter postale vsakdanjik prihodnjim generacijam.

Odločitev arheologov za 3D modeliranje — kot tisto, kar iščejo že leta — je izhajala iz praktičnih izkušenj uporabe GIS tehnologije, vse večje potrebe po nadomestitvi akademske risbe artefakta z 2D repliko in 3D modelom ter iz prepričanja, da sta vizualnost in virtualnost v biti samega arheologovega dela („**One Picture Is Worth a Thousand Words**“ — starokitajski pregovor). Svoj prispevek pa je k temu dodala cenejša in dostopnejša strojna in programska oprema.

Ideja 3D modeliranja je v arheologiji prisotna desetletja. Lahko poenostavimo. Kar od srede 70-ih let dalje, ko je v ospredje arheologovega zanimanja stopila grafika. Določen preobrat je bil storjen leta 1986 na univerzi v Sauthamptonu, kjer so sistematično raziskovali metodologijo 3D zajemanja podatkov s CCD kamero in rastrsko sliko (512x512). Tega leta so ugotovili,

da je primernejša (tako cenovno kot analitično) uporaba vektorske slike, ki omogoča med drugim tudi primerjave med objekti.

Leta 2000 so arheologi usmerili svojo pozornost v GIS in 3D modeliranju. Avern [2] pa je izpostavil zahtevo: „*3D Techniques must be embedded at all levels of archaeological investigation, serving not only as sophisticated visual summaries, but also as primary recording methods, heuristic devices, and display and communication mechanisms.*“ In dalje: „*The author’s proposal is that archaeologists should use 3D modelling as a means of making the primary record of an excavation in place of the traditional techniques of drawing and photography. Note that the emphasis here is on high resolution, high accuracy, data-dense models of small excavated areas, complementary to, and for integration with, DEM’s and GIS models of entire sites or landscapes.*“

3D modeliranje, vizualizacija in virtualizacija morajo postati po Avernovem prepričanju tudi standard ohranjanja kulturne dediščine. Standardizirani in protokolirani uporabi 3D modeliranja [9] je namenila arheologija veliko pozornosti v prvih petnajstih letih 21. stoletja.

Tako so bili standardizirani 4 sistemi za 3D modeliranje, ki so bili prilagojeni arheološkemu delu (ShapeSnatcher from Eletronic; Metric 3D reconstruction Eletronic; FastSCAN). Standardizirana sta bila skenerja Leica Cyrax 2500 — Skener, Mini CT, Minolta 910, Trimble GX in FX in Nextengine. Izbor je bil opravljen na podlagi petih kriterijev: hitrost, natančnost, enostavna uporaba, primernost terenske uporabe ter cena in stroški vzdrževanja. Za obdelavo je bilo priporočeno programsko orodje MeshLab na mobilnih delovnih postajah Lenovo ThinkPad W520, Dell Precision M4500 in Dell Latitude E6420 XFR, PHOV Mementify, Hypr3D in 123D Catch. Za vizualizacijo pa so bili zgolj priporočeni OpenGL in sistem Nvidia 3D Vision.

Med programsko opremo je bil standardiziran oz. protokoliran postopek izdelave 3D modela (skeniranje, rekonstrukcija in volumetrična modifikacija). Priporočena je bila uporaba programskih orodij Java, SQL, MySQL in Ubuntu. Razvita ali nadgrajena so bila orodja AUTOCAD, ARCHAECAD, ARCHAEOCAD, ARCHAEOMAP, ARCHAEOGEOGRAPHY. Dopolnjeni so bili 3D protokoli



ob uporabi Web 2.0 oz. Web 3.0 ter formati ASCII, DXF, MPEG 1, 2 in 4, NTF in OBJ. Sprejet je bil standard platforme VRLM. Gre za jezik za modeliranje navidezne resničnosti, ki je platformsko neodvisen programski jezik. Ta ustvari prizor navidezne resničnosti, skozi katerega se lahko uporabnik „sprehaja“ in sledi povezavam, podobno kot pri „običajni“ spletni strani. V nekaterih kontekstih lahko VRML nadomesti konvencionalne računalniške vmesnike z ikonami, meniji, datotekami in mapami.

Množičen pojav različnih odprtokodnih programskih grafičnih orodij ter njihova uporaba v industriji in medicini je izpostavila zahtevo po standardizaciji odprtokodnih programov v arheologiji, vendar do izbora in sprejetja ni prišlo. V arheološki praksi je prevladala uporaba programskih orodij MeshLab in Blender.

Posebnost tega obdobja, ki je tesno povezano s 3D modeliranjem, vizualizacijo in virtualizacijo v arheologiji, predstavlja dodatno poudarjena skrb za ohranitev svetovne kulturne dediščine. Načelne zahteve po standardizaciji uporabe tehnologij in metod v preventivni arheologiji, ki jih je priporočil UNESCO, zavezujejo pristojne nacionalne organe. Ti morajo načrtovati in zagotavljati potrebna finančna sredstva ter uveljaviti enoten sistemski menedžmenta pri ohranjanju arheološke kulturne dediščine. Del tega bi lahko predstavljal tudi spletni Portal Ariadne, ki naj bi zagotavljal napredno raziskovalno infrastrukturo za arheološke podatkovne mreže v Evropi.

Sprejeti mednarodni dokumenti: Londonska listina, Seviljska načela in Valletska konvencija (MEKVAD) sicer terjajo na zelo načelnem nivoju od nacionalnih organov ustrezno standardizacijo, vključitev in aktivno sodelovanje arheologov in IT strokovnjakov, vzpostavljanje virtualnih muzejskih zbirk ipd. Vendar konkreten izbor standardov prepuščajo nacionalnim organom in ustanovam, ki skrbijo za ohranjanje naravne in kulturne dediščine.

Razvit je bil generični informacijski mednarodni sistem DBMS (Data Base Management System). Danska, Grčija, Norveška, Nemčija in Avstrija začno urejati, digitalizirati in virtualizirati arheološke zbirke podatkov. Nizozemska vzpostavi avtonomni arheološki informacijski sistem. Z delom začne skupni

evropski projekt ArchTetra 1 (Bolgarija, Poljska, Romunija). Njegov cilj je oblikovanje enotne standardizirane virtualne knjižnice za potrebe evropske arheologije. Finančne težave, velike razlike v pristopu posameznih držav procese upočasnjujejo. Londonska listina in Seviljska načela sta v prvi plan postavili kot standard zahtevo po uveljavitvi virtualne arheologije kot tiste discipline, ki naj bi nadgradila sistem ohranjanja kulturne dediščine in ga približala najširši javnosti.

Virtualna arheologija je izraz, ki ga je leta 1990 predstavil arheolog in računalničar Paul Reilly [44], ko opisuje uporabo računalniških simulacij v arheoloških izkopavanjih. Kasneje ga je razdelal Maurizio Forte [24]. Besedno zvezo sta načelno kot integracijsko paradigmo „standardizirali“ v preventivni arheologiji *Londonska listina* (2009) in *Seviljska načela* (2013). Menimo, da virtualne arheologije še ni mogoče uvrstiti v samostojno obdobje odnosa do RI strojne in programske opreme, saj na področju standardizacije še ni uspela uveljaviti lastnih izvirnih rešitev. Prevzema dosežke in trenutne standarde 3D arheologije. Njeni cilji pa so oblikovanje virtualnih muzejev, spletnih strani, arheoloških gliptotek, TV dokumentacije in digitalnega založništva. Edina novost, ki pa ni standardizirana, je uporaba odprtokodnih programov Blender, MeshLab in geofizikalne magnetometrije. Po letu 2010 (prvi kongres virtualne arheologije v Italiji) je oblikovana po zgledu CAA skupina arheologov, ki izmenjuje izkušnje na področju virtualne arheologije. Ključni akterji so predstavniki Španije, Belgije, Velike Britanije, ZDA in Rusije. Leta 2012, 2015 in 2018 je srečanja gostil ruski Državni muzej v Sankt-Peterburgu.

## CYBER ARCHAEOLOGY ALI CLOUD COMPUTING ARCHAEOLOGY ALI ? (2020 ...)

Kašna bo prihodnja usmeritev digitalne arheologije, iz dosedanjih trendov pri izboru in možni standardizaciji RI strojne in programske opreme, še ni mogoče oceniti. Glede na dosedanjo potrjeno tesno soodvisnost arheologije in RI, lahko pričakujemo, da bo sodelovanje med njima potekalo še intenzivneje v smeri kibernetike arheologije in aktivnega vstopa 3D modeliranja

in virtualne arheologije v računalniški oblak. To ne bo zmanjšalo postopkov standardizacije, bo pa omogočilo njihovo poenotenje in pocenitev. Hkrati bo na globalnem nivoju zagotovilo enakopravne možnosti uporabe aplikacij v vsakem trenutku in na vsakem mestu (uporaba mobilnih laboratorijev, telefonskih aplikacij ipd.) ob asistenci evropskega in nacionalnih arheoloških informacijskih sistemov.

## 2.3 Namesto sklepa

Pregled dosedanjega sodelovanja in odnosa med arheologijo in RI je potrdil njuno tesno povezanost, soodvisnost in obojestransko naklonjenost. Ta se sicer razlikuje od države do države, vendar nemalokrat trpi zaradi bremena tradicionalnih odnosov med novim in starim, med naprednim in tradicionalnim. Brez RI si ni mogoče več zamisliti arheologije. To dejstvo terja v prihodnje od obeh znastvenih disciplin, da dvigneta sodelovanje na formalno višji organizacijski nivo. Tako na področju skupnega izobraževanja, raziskovanja, razvoja aplikativnih rešitev, standardizacije strojne in programske opreme kot tudi pri realizaciji programa arheoloških terenskih raziskav.



## Poglavje 3

# 3D modeliranje v arheologiji

„Imagination or visualization, has a critical role to play in scientific investigation . . . “

René Descartes 1637

### 3.1 3D modeliranje v arheologiji

Splošne značilnosti razvoja in pomena 3D modeliranja v arheologiji smo predstavili že v poglavju 2.

Zanimanje za grafiko in 3D modeliranje je bilo v arheologiji latentno prisotno vse od prvega srečanja arheologov z računalnikom. Že leta 1974 je bilo izdelano prvo programsko orodje za računalniško rekonstrukcijo artefaktov [3]. Računalniški animaciji pa je bil namenjen projekt Lernie IV, ki je za risanje 3D modelov in računalniško animacijo uporabil orodje CAD. Z enakim namenom so bile razvite aplikacije Selgem, Plutarch in Laffin. Na univerzi v Birminghamu, ki je postala nosilka raziskovanja 3D grafičnih orodij, je bil leta 1975 izdelan<sup>1</sup> program za 3D risanje rimske keramike. Program je 3D risbo segmentiral na kvadrate in trikotnike v kartezičnem prostoru (x,y,z) na podlagi skritega površinskega algoritma. Skriti površinski algoritem je kasneje

---

<sup>1</sup>glej [https://proceedings.caaconference.org/files/1982/13\\_Angell\\_Main\\_CAA\\_1982.pdf](https://proceedings.caaconference.org/files/1982/13_Angell_Main_CAA_1982.pdf)

postal izhodišče raziskovanj v vektorski grafiki. Drag postopek fotografiranja je delo na projektu upočasnil za več kot 10 let [29].

Finančno dostopna uporaba mikroračunalnikov in novih programskih orodij je obnovila idejo 3D grafike. Raziskovati so začeli Rosenfeldovo tehniko obdelave slike, ki je temeljila na rastrskem skeniranju. Leta 1985 je dozorela odločitev o prioritetni usmeritvi v arheološko grafiko. Ta naj bi nadgradila arheološke muzejske zbirke ter vzpostavila prve video arhive. Delo na tem projektu je bilo na univerzi v Birminghamu nekoliko upočasnjeno, ker je v ospredje stopila zahteva po elektronskem založništvu in elektronski pošti. Nosilec tega razvoja pa je postala univerza v Sauthamptonu, ki je v projekt vključila tudi pripravo metodologije za 3D zajemanje podatkov s CCD kamero [43].

V Nemčiji je bil tega leta razvit video-računalniško-dokumentacijski sistem v arheologiji (projekt Arcos – OS/BArcos) [33]. Slikovna obdelava je omogočila avtomatsko merjenje posnetih objektov. Istega leta je bila prioriteta raziskovalne in razvojne pozornosti v arheologiji preusmerjena v uporabo GIS (Geografski informacijski sistem). Razlog je bila zahteva EU, da GIS uporabijo kot orodje za upravljanje regionalnega okolja. Razvoj tega projekta je opozoril na tesno povezanost 3D grafike pri zapisu posnetih točk površine v žični/(o)mrežni diagram (wire diagram), ki predstavlja metodo prostorskega modeliranja. Na to je kritično opozoril Dick Spicer [50] (Research Centre for Computer Archaeology, North Staffordshire Polytechnic) z znamenitim kitajskim rekom, da je ena slika vredna več kot 1000 besed. „Laž preklete statistike . . . in slike“. S tem je pozornost arheologov usmeril na GIS in 3D grafiko, ki bi lahko imeli skupno delovno podlago pri obravnavi arheoloških ostalin. „Slika ni slika, če nima pomena, konteksta in strukture.“ Tem trem kriterijem je treba po Spicerjevem mnenju nameniti posebno pozornost pri razvoju 3D grafike. Prav žična/(o)mrežna slika je tisti „model“ (vizualni trik zaradi omejenih možnosti računalnika), ki je v GIS privzet iz računalniške 3D grafike.

Ko so IT-strokovnjaki leta 1986 arheologom ponudili programska orodja

za rastrsko 2D risanje kontur in 3D (SYMAP in SYMVU) programe za oblikovanje površin, ni bilo pričakovanega odziva. Razlog: predraga rešitev, ki ne izpolnjuje pričakovanj stroke. A bilo je le vprašanje časa, kdaj bo tehnološki napredek na tržišče poslal novo računalniško strojno in programsko orodje za tridimenzionalno obravnavo in vizualizacijo artefaktov.

Leto 1989 pomeni eno največjih sprememb pri uporabi računalniške strojne in programske opreme v arheologiji. Uveljavljen je bil koncept integrirane programske opreme. Kot najučinkovitejša grafična vmesnika sta se pokazala Microsoft Windows in GEM DeskTop. IT razvijalci so ponudili arheologom novo rešitev v 3D grafiki — **vektorski 3D grafični model** [45]. Rešitev ima izjemen pomen za arheologijo. Vektorski grafični model je omogočil nove možnosti v uporabi 3D grafike. Arheologom je dal povsem novo dimenzijo interpretacije. Novost pomeni tudi spremembo v praksi izkopavanj. Arheologi so namreč ugotavljali, da se pri izkopavanjih uniči veliko artefaktov. Z novim pristopom - virtualizacijo izkopov in 3D modeliranjem – bi lahko ohranili večino do tedaj poškodovanih ali uničenih artefaktov. Arheologi so novo rešitev sprejeli, kot tisto, na katero so čakali zadnjih dvajset let. Novost je korenito spremila stanje v arheologiji. Novim pogojem so se morale prilagoditi tako stroka kot tudi podatkovne baze in arheološke muzejske zbirke. Vendar pa prihodnost arheologije ni bila v rokah arheologov. Veliki (IBM idr.) so se morali odločiti za novo standardizacijo. Zamenjati so morali obstoječi operacijski sistem (CP/M Z 80).

Leta 1990 so raziskovalci univerz v Yorku in Sauthamptonu pristopili k projektu SYASS. Projekt je finančno podprla angleška civilna arheološka akademska iniciativa. Z njim so bili postavljeni razvojni temelji prihodnje virtualne arheologije. Projekt je sodil v okvir načrta vzpostavitve enotnega evropskega arheološkega dokumenta in enotnega evropskega arheološkega informacijskega sistema (ArcheoDATA System). Vzporedno je potekalo na univerzi v Lancestru tudi delo na projektu videoarhiva.

Z uporabo sistemov CAE in CAD so začeli v devetdesetih letih v industriji uporabljati 3D modeliranje. Arheologi [12] so pokazali veliko zanima-

nje in interes, da bi lahko uporabili sisteme za 3D modeliranje pri svojem delu, zlasti pri rekonstrukciji zgodovinskih spomenikov, artefaktov . . . Draga oprema v začetku 90-ih je bila temeljna ovira za širšo uveljavitev 3D modeliranja v arheologiji. Prvi projekt uporabe 3D modeliranja in laserskega skeniranja je bil izveden leta 1991 — „Sacret way“ [10]. Izdelani so bili 3D modeli artefaktov grškega svetišča boginje Demetre (Eleusis). V projekt izdelave fotorealističnega modela svetišča so bili prvič pritegnjeni strokovnjaki iz različnih strokovnih področij.

Draga oprema in visoki stroški modeliranja so preusmerili pozornost arheologije drugam – v vizualizacijo. Začetno navdušenje nad sodelovanjem arheologov z industrijo pri uporabi laserskega skeniranja je zastalo ob znanih razlogih (cena in visoki stroški). Poleg tega pa arheologi v projektih, ki so jih podprli npr.: IBM, FIAT idr, niso imeli večjega vpliva na samo modeliranje. Kljub slabi izkušnji je prevladalo med njimi mnenje, da so 3D modeli verodostojnejši od arheološke risbe.

Razvoj 3D modeliranja je iz navedenih razlogov zastal vse do konca devetdesetih let. Šele razprava o računalniški znanosti, umetni inteligenci in arheologiji ter cenejša uporaba strojne in programske opreme so pozornost arheologije znova vrnila k 3D grafiki in 3D modeliranju. Tako Wunsch [58] leta 1999 ugotavlja, da bi morala postati grafična predstavitev osnovno orodje za celovito razumevanje artefaktov. Razlog zastoja v razvoju je videl predvsem v nizki ravni RI znanja v arheologiji. „*Grafika je izhodišče za raziskovalno analizo podatkov o artefaktih. Danes je grafika zgolj dopolnitev statistični analizi. Mora postati neodvisno orodje. Zato je nadaljnja pot arheologije lahko samo vizualizacija.*“ Po mnenju dela arheologov bo 3D modeliranje dobilo na veljavi šele, ko bo postalo standardna tehnika v arheološkem terenskem delu [2]. Skupaj z vizualizacijo bi moralo biti 3D modeliranje načrtno vključeno v arheološko delo. Pogoji za to pa je — dostopnost opreme. „*3D Techniques must be embedded at all levels of archaeological investigation, serving not only as sophisticated visual summaries, but also as primary recording methods, heuristic devices, and display and communication mechanisms (Gil-*



lings).“ In dalje: „*The author’s proposal is that archaeologists should use 3D modelling as a means of making the primary record of an excavation in place of the traditional techniques of drawing and photography. Note that the emphasis here is on high resolution, high accuracy, data-dense models of small excavated areas, complementary to, and for integration with, DEM’s and GIS models of entire sites or landscapes.*“

Začetek novega tisočletja ponudi arheološki stroki širok nabor naprav in tehnik (stereometrija, laserska triangulacija, strukturirane svetlobne tehnike, metoda „time-of-fly“, sonarne tehnike idr.) za 3D modeliranje. Tehnični kriterij pa je bil za arheologe in IT strokovnjake jasen: hitrost, natančnost, enostavnost uporabe, primernost za delo na terenu ter cenenost dostopa in uporabe opreme.

V ospredje stopi zanimanje za 3D rekonstrukcijo mikromodelov in za vzpostavitev 3D podatkovnih zbirk. 3D modeliranje naj bi postalo pomemben člen v digitalni analizi artefaktov. Ta je bila predmet posebnega zanimanja francoske smeri v digitalni arheologiji [14].

Razvojne smernice za nadaljnjo uporabo 3D modeliranja v arheologiji je začela pripravljati interdisciplinarna študijska skupina matematikov, računalničarjev, antropologov in arheologov v ZDA (SHAPELab) [38]. Pripravljena je bila enotna metodologija 3D modeliranja. Priporočena je bila uporaba novih in cenenih orodij za dokumentiranje in risanje (lasersko skeniranje, strukturirana svetloba in računalniška tomografija). Sistem je bil preizkušen v Petri (projekt Archave).

Novo obdobje v razvoju 3D modeliranja v arheologiji začenja leta 2002. Tega leta je mednarodna skupnost izpostavila pomen 3D modeliranja in vizualizacije pri ohranjanju svetovne kulturne dediščine. Cena opreme se je zniževala in 3D modeliranje postane pogostejše prisotno pri arheoloških izkopavanjih. Prvi cenovno ugodni snemalnik s programsko opremo, specializirano za arheološko delo, je tega leta ponudilo podjetje Leica (Cyrax 2500). Navdušenje nad 3D modeliranjem arheologov je bilo vsesplošno. „*New technologies enable us to disclose the object as something unique, with a life of*

*its own.*“

Podjetje ArcTron ltd. je razvilo in ponudilo programsko opremo ArchaeoCad [8] kot integrirani informacijski sistem (slika 3.1), ki je bil prilagojen 3D modeliranju v arheologiji. Arheologi in računalničarji so začeli skupaj proučevati razlike, prednosti in slabosti 3D snemalnikov, možnosti novih programskih orodij za 3D modeliranje ter izbor ustreznih formatov zapisa. Tehnologije so bile preizkušene v različnih terenskih pogojih, tudi pod vodo. 3D modeliranje je postalo pri delu arheologov zelena tehnologija.



Slika 3.1: Integrirani arheološki informacijski sistem ArchaeoCAD

Kljub navdušenju in naklonjenosti je bila uporaba 3D orodij in tehnik do leta 2007 precej naključna. Ni bilo dodelanih metodologij in protokolov. Izvedenih je bilo nekaj odmevnih projektov, ki so dokazali hipotezo o pomenu 3D modeliranja v arheologiji in pri ohranjanje kulturne dediščine. Presežena

pa je bila tudi nekajletna kritika uporabe tehnologij vizualizacije. Ta je predvsem poudarjala, da vizualizacija ni raziskovalno orodje. Je le preprosti trik za poučevanje, ilustracijo in muzejski PIAR.

Leta 2008 je bilo 3D modeliranje prvič opredeljeno kot znanstveno raziskovalno orodje v arheologiji[30]. Izpostavljena je bila potreba po njegovi standardizaciji, vendar do realizacije, zaradi številne strojne in programske opreme, ni prišlo. Možnosti 3D modeliranja pa danes še niso izčrpane. Zaradi ogromnega števila podatkov, ki so zabeleženi v posamezni datoteki 3D modela, stopnja razvoja 3D modeliranja v arheologiji ni zaključena. Še vedno smo v fazi predvsem tehnične uporabe opreme za skeniranje in izvajanje osnovnih postopkov modeliranja. Ti so namenjeni shranjevanju 3D datotek oz. njihovi pripravi za arhiviranje, vizualiziranje ali repliciranje. Povsem neizkoriščene ostajajo 3D datoteke za analitično vrednotenje, interpretacijo in testiranje raziskovalnih hipotez. Programska orodja za analizo obstojijo. Njihov nabor je bogat in raznovrsten. Vendar pa niso izdelani protokoli analitičnih postopkov. Pa tudi arheološki ali informacijski kader še nista izšolana za sistematično in standardizirano analitično obdelavo v 3D modelih shranjenih informacij in podatkov. Delo na standardizaciji 3D strojne in programske opreme sicer poteka. Ni pa še pripravljena potrebna standardizacija izbora skenerjev niti določena namembnost nabora formatov datotek niti namenska in selektivna uporaba komercialnih in odprtokodnih programskih orodij (Maya, 3DStudioMax, Blender, MeshLab, CC, Rhinoceros, Ogre, C4, Unreal, AutoCAD, TurboCAD, SolidWorks, CAVEs idr.).

## **3.2 Pomen zbirk 3D modelov pri ohranjanju in predstavljanju kulturne dediščine v državah EU**

Varovanje arheološke kulturne dediščine je postalo v 21. stoletju z implementacijo dokumentov organizacij Združenih narodov (UNESCO), Sveta

Evrope<sup>2</sup>, Sveta EU<sup>3</sup>, Evropske komisije<sup>4</sup> in mednarodnih civilnodružbenih iniciativ (Londonska listina, Seviljska načela)

- splošna skrb in odgovornost posameznikov, organizacij civilne družbe, izobraževalnih ustanov in podjetij ter
- strokovna odgovornost znanstveno - raziskovalnih in državnih ustanov.

Doktrina varovanja kulturne dediščine [54] se je v zadnjih desetletjih korenito spremenila. Tako je danes kot zgodovinska in kulturna vrednota, ob arheološki in etnološki, varovana tudi tehnična, memorialna in vojna dediščina. V ospredju je zahteva po njeni javni dostopnosti in digitalizaciji. Zavest o pomenu raznovrstne in bogate kulturne dediščine v svetu, in še zlasti v Evropi, je zahtevala premišljen in sistemsko celovit pristop. Evropska komisija<sup>5</sup> je leta 2011 sprejela politiko na področju digitalizacije kulturne dediščine ter v splošno rabo posredovala pojem „digitalna dediščina“. V uvodu zasnove digitalne kulturne politike je zapisala:

*„Cultural heritage breathes a new life with digital technologies and the internet. The citizens have now unprecedented opportunities to access cultural material, while the institutions can reach out to broader audiences, engage new users and develop creative and accessible content for leisure and education. New technologies bring cultural heritage sites back to life. Virtual Museums offer visitors the possibility to see art works residing in different places in context and experience objects or sites inaccessible to the public.*

*The European Commission Directorate General for Communications Networks, Content & Technology has conducted extensive policy, coordination*

---

<sup>2</sup>European Convention on the Protection of Archaeological Heritage (Revised) (Valletta Convention); Framework Convention on the Value of Cultural Heritage for Society.

<sup>3</sup>Conclusions on cultural heritage as a strategic resource for a sustainable Europe

<sup>4</sup>Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Towards an integrated approach to cultural heritage for Europe.

<sup>5</sup>glej: EC: Digital Single Market. Policy. Digital cultural heritage. Dostopno: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/digital-cultural-heritage>

*as well as funding actions to supplement Member States' cultural policy in areas of digitization and online access to cultural material and digital preservation.*“

Evropski in svetovni javnosti naj bi bil do leta 2025 omogočen dostop do vseh ostalin, ki jih bodo v skupno spletno zbirko vključile države članice EU. Hkrati bo zbirka tudi podlaga za znanstveno-raziskovalno in izobraževalno delo. Pri tem bodo skrbniki zbirke lahko uporabljali najsodobnejša računalniška orodja, kamor sodijo tudi orodja in programska oprema za 3D modeliranje in VR. Predvideno je bilo, da bo Evropska komisija v različnih digitalnih oblikah v zbirko vključila do leta 2015 nad 30 milijonov ostalin. V okviru teh aktivnosti že potekajo evropski projekti, kot so ArchAIDE, INCEPTION<sup>6</sup>, GRAVITATE, Scan4Reco, DigiArt, GIFT, PLUGGY, EMOTIVE in iMARECULTURE.

Za umestitev in vlogo semantičnega 3D modeliranja pri varovanju, ohranjanju in populariziranju kulturne dediščine so posebnega pomena tisti evroprojekti, ki že potekajo v okviru enotne evropske digitalne politike. To so projekti INCEPTION, GRAVITATE, Scan4Reco, DigiArt, PLUGGY, EMOTIVE in iMARECULTURE. V projektih<sup>7</sup> je namenjen 3D tehnologiji, 3D modeliranju, 3D modelom in VR ključen pomen.

Evropska komisija je pri zasnovi skupne arheološke digitalne politike sledila sodobnim trendom. Načrtuje uporabo aplikacij za zajem, prikazovanje in vodenje 3D podatkovnih zbirk, ki bodo namenjene množični spletni uporabi in predvsem prikazu dovršenih 3D modelov v navidezni resničnosti. Ločljivost 3D modelov naj bi ustrezala potrebam zahtevnejših uporabnikov, torej bo namenjena tudi znanstveno-raziskovalnemu delu. Modeliranje navideznih 3D modelov bo temeljilo na odprtih formatih XML, kot so X3D, KML in vse bolj priljubljenem CityGML.

---

<sup>6</sup>Edini projekt, v katerem sodeluje iz Slovenije Univerza v Ljubljani – op.

<sup>7</sup>EC: HORIZON 2020. Povzetek vsebine projektov. Dostopno: [http://ec.europa.eu/information\\_society/newsroom/image/document/2017-40/horizon\\_2020\\_reflective\\_6\\_and\\_7\\_cult-coop\\_8\\_booklet\\_docx\\_6A5226F0-BC06-300B-1CE937CFD2BBD851\\_47561.pdf](http://ec.europa.eu/information_society/newsroom/image/document/2017-40/horizon_2020_reflective_6_and_7_cult-coop_8_booklet_docx_6A5226F0-BC06-300B-1CE937CFD2BBD851_47561.pdf)

Projekt INCEPTION rešuje npr. pomanjkljivosti dosedanjega 3D modeliranja. Uvaja postopke za 3D lasersko skeniranje in obdelavo podatkov. Predvidena je večja učinkovitost 3D zajemanja z integracijo sistemov GIS, GPS in IPS ob pomoči vmesnikov ter z novimi programskimi algoritmi. Projekt razvija odprt standard semantične spletne platforme za 3D modeliranje objektov in površin kulturne dediščine. Ta se bo izvajal v uporabniku prijazni virtualni resničnosti (VR in AR). Omogočena bo uporaba tudi na mobilnih napravah.

V okviru projekta Scan4Reco poteka razvoj prenosne, integrirane in modularne rešitve, ki bo na terenu omogočila avtomatsko digitalizacijo ostalin in njihovo takojšnjo analitično obdelavo. Projekt DigiArt zagotavlja novo, cenovno učinkovito rešitev za zajemanje, obdelavo in prikazovanje artefaktov ter semantično analizo slike. Orodja bodo omogočila obdelavo, 3D vizualizacijo in 3D primerjavo. Predvidena je uporaba posodobljenega X3D zapisa navideznega 3D modela prikaza objektov in prostora. Ta bo zagotovil prikazovanje različnih 3D modelov na spletnih straneh. VRML oz. XML (3. generacija) je izvedbeno neodvisen jezik, ki ustvari prizor navidezne resničnosti. Po njej se bo lahko uporabnik sprehajal ter sledil povezavam kot pri običajni spletni strani.

Uporaba 3D modeliranja pod vodno površino je prioriteta evro-projekta iMARKULTURA. Rešitve bodo omogočile virtualni sprehod med podvodno kulturno dediščino. Zbirka bo vsebovala 3D modele podvodnih ostalin. V muzejih ali prek spleta pa bodo zagotovljeni dostopi do t.i. info-kioskov (prodajaln).

Iz dokumentov skupne evropske politike na področju varovanja kulturne dediščine je razvidno, da Evropa pripisuje v prvi polovici 21. stoletja velik pomen 3D modeliranju in vzpostavitvi zbirk 3D modelov kulturne dediščine. To dejstvo predstavlja že danes poseben strokovni in organizacijski izziv tako arheološki kot računalniško-informacijski stroki. EU s temi projekti postopno vstopa v virtualno dobo, ko bo 3D arheologija pridobila na posebni veljavi.

Opozoriti velja tudi na odziv evropske arheologije do politike EU pri

ohranjanju in varovanju kulturne dediščine. Ta dodatno opozarja na posebno vlogo, ki ga 3D modeliranju in virtualni resničnosti pripisuje evropska arheološka stroka.

<b>OMOGOČITI ZAINTERESIRANIM UPORABNIKOM IN ŠIRŠI JAVNOSTI DOSTOP DO DIGITALIZIRANIH ARHEOLOŠKIH VIROV</b>	
- izkoristiti možnosti za obdelavo in nazorno javno predstavitev vsebin digitalnih baz podatkov.	- raziščejo se naj vse digitalne možnosti, da CH postane vidna in aktivno prisotna v svojem družnem okolju ( <b>virtualne muzejske zbirke</b> , spletni mediji, <b>3D modeli</b> , digitalne novice), - vključiti nove tehnologije v obdelavo ter izboljšati sintezo arheoloških podatkov.
<b>UPORABA NOVIH DIGITALNIH TEHNOLOGIJ ZA HITREJŠI IN PREGLEDNEJŠI DOSTOP DO ARHEOLOŠKIH VSEBIN</b>	
<b>Izboljšati sodelovanje med evropskimi arheološkimi združenji z aktivnim vključevanjem v nadnacionalne programe in omrežja (ARIADNE<sup>1</sup>, idr.)</b>	- spodbujati sodelovanje v projektih EU, - oblikovati evropske programe in smernice izvajanja skupnih arheoloških raziskav, - razviti enoten arheološki spletni portal, ki bo omogočil strokovni javnosti dostop do različnih baz podatkov
<b>SPODBUJATI SODELOVANJE Z DRUGIMI ZNANSTVENIMI PODROČJI</b>	
<b>Sodelovanje z nacionalnimi in mednarodnimi znanstvenimi mrežami in zainteresirano javnostjo</b>	- aktivna povezava z kreativnim industrijskim okoljem in inovatorji, - raziskava in implementacija novih tehnologij, - spodbujati interdisciplinaren pristop, - vzpostavitev integriranih baz podatkov in metapodatkov - spremembe v digitalni praksi zahtevajo premislek o delovni in strokovni etiki

Tabela 3.1: Amersfoortska Agenda — EAC: poudarki

Pomen zbirk 3D modelov pri ohranjanju kulturne dediščine je izpostavil Evropski arheološki svet (EAC) na svojem 16. letnem zasedanju v Lizboni (marec 2015), ko je potrdil in sprejel Amersfoortsko Agendo<sup>8</sup>.

<sup>8</sup>glej: European Archaeological Council (EAC). This so-called 'Amersfoort Agenda'

Agenda določa izhodišča in načine kako v prihodnje upravljati z evropsko kulturno dediščino. Uvodoma ugotavlja, da so se dvajset let po sprejemu Valetske konvencije (Evropska konvencija Sveta Evrope o varstvu arheološke dediščine) razmere v temeljih spremenile. Pred arheološko stroko so novi izzivi, ki zahtevajo odgovornejše ravnanje skrbnikov arheološke dediščine. EAC želi postati odgovoren oblikovalec prihodnje Evrope, zato meni, da je vključitev arheologije v sodobno družbo nujna. Pri tem pa izpostavlja pomen upravljanja z arheološkimi ostalinami.

To kar je pomembno za našo študijo, pa je dejstvo, da agenda pripisuje pomembno vlogo 3D modeliranju in 3D vizualiziranju ostalin kulturne dediščine (CH) ter pričakuje od nacionalnih arheoloških združenj odgovoren premislek in ustrezno ukrepanje.

V Tabeli 3.1 smo zgolj povzeli tista osnovna priporočila agende, ki se nanašajo na digitalizacijo, vizualizacijo in dodatno opozarjajo na pomen 3D modeliranja arheoloških ostalin pri ohranjanju kulturne dediščine.

---

is the result of the 15th heritage management symposium of EAC (held in 2014) which took the form of a working conference and was hosted by the Dutch Cultural Heritage Agency in Amersfoort. The input from EAC members and other participants during this event constituted the basis for preparing the EAC Agenda. <https://www.europae-archaeologiae-consilium.org/strategic-documents>



## Poglavje 4

# Programska orodja za 3D vrednotenje, interpretacijo in primerjavo nizov podatkov 3D modelov ostalin arheološke kulturne dediščine

*„All true alchemists know that the alchemical symbol is a mirage as the theater is a mirage. And this perpetual allusion to the materials. and the principle of the theater found in almost all alchemical books should be understood as the expression of an identity (of which alchemists are extremely aware) existing between the world in which the characters, objects, images, and in a general way all that constitutes the virtual reality of the theater develops, and the purely fictitious and illusory world in which the symbols of alchemy are evolved.“*

Antonin Artaud

The Theater and Its Double

1938

61

Današnja ponudba odprtokodnih grafičnih programov za 3D vrednotenje in 3D interpretacijo je tako številna, da je uporabnik postavljen pred resno dilemo primerne izbora. Celovitih primerjav uporabnosti, namenskosti in praktičnih možnosti posameznih programov ni. Uporabnik se mora zadovoljiti s skrajno formalističnimi pojasnili glede uporabe platforme (Windows, Mac OS X, Linux, Solaris, Unix, BSD, idr.) in nujnega zapisa v izbranem formatu (PLY, STL, OFF, VRML, U3D, OBJ, ASCII, idr.). Kadar gre zgolj za osnovno obdelavo 3D modela, kot sta arhiviranje ali kasnejše repliciranje, je izbor za uporabnika relativno enostaven. Težje pa je izbrati ciljem primeren grafični program tedaj, ko želimo s programom, kot analitičnim orodjem dodatno obdelati oblake in triangulacijske mreže točk 3D modela.

Za 3D analitično obravnavo in vrednotenje morajo 3D pregledovalniki uporabniku ponuditi določen nabor orodij za analizo in primerjavo, kot so npr.: meritve modela, primerjave in poravnave z drugimi modeli, umeščanje modelov v kartezični prostor, grafično in statistično obdelalo, vstavljanje novih aplikacij, prehajanje med različnimi programi, širši nabor formatov in njihovo konvertiranje v druge za obdelavo primernejše formate, ipd.

Da bi se uporabnik izognil začetni dilemi glede izbora primernejšega programskega orodja, je nujno, da predhodno določi jasne cilje in načine obdelave (grafični, statistični, numerični, volumetrični . . .), hipotetične predpostavke, razišče geometrijske značilnosti modela in izbere najprimernejši format za pisa. Koristno bi bilo, da predhodno izvede pilotsko preverjanje optimalne uporabnosti in funkcionalnosti izbranega programskega orodja.

Danes uporabljamo pri 3D modeliranju predvsem 17 grafičnih formatov. Izstopa uporaba dveh formatov: STL in PLY.

Format STL je predvsem uporaben pri hitri izdelavi prototipov in replik, 3D tisku in računalniško podprtem proizvodnem procesu. Primeren je za uporabo v programski opremi CAD. Datoteke STL opisujejo samo površinsko geometrijo, ne pa tudi teksture in barv. Format je naredilo ameriško podjetje 3D Systems in je najbolj uporabljan format za prenos podatkov modela tiskalniku. Izvoz v format STL podpirajo vsi pomembnejši programi za 3D

obdelavo. Format obstaja tako v tekstovni kot binarni obliki. Zaradi velikosti je pogostejša uporaba binarne oblike. Z njim ne moremo opisovati in obdelovati barv in tekstur modela. S tega vidika je format PLY v primerjavi s formatom STL primernejši za vrednotenje, interpretacijo in analitično primerjavo 3D modelov.

Format PLY shranjuje 3D geometrijo modela z vrsto dodatnih atributov (npr.: barva in prosojnost, koordinate teksture, ipd.). Ta format je namenjen predvsem opisovanju grafičnih modelov v obliki poligonov. Je enostaven in preprost, vendar lahko opiše zelo raznolike modele. Razvit in preizkušen je bil na Univerzi Stanford (znan sken Michelangelovega Davida). V primeru konvertiranja formata STL v format PLY je možnost manipulacije in obdelave 3D modela omejena le na obdelavo osnovnih atributov.

Iz velikega nabora odprtokodnih grafičnih programskih orodij smo v ožji delovni izbor izbrali tiste, ki jih najpogosteje omenjajo arheološka raziskovalna poročila. Ožji izbor za realizacijo naše začetne hipoteze smo osredotočili na tri grafična programska orodja: Blender, MeshLab in CloudCompare.

### **Blender<sup>1</sup>**

Blender je odprtokodno orodje za 3D modeliranje. Je najpogosteje uporabljen odprtokodni program. Primarno omogoča ustvarjanje 3D modelov, animiranih risank in vidnih učinkov, vgrajen pa je tudi 3D grafični pogon za igre. Fotorealistično izrisovanje s podporo HDR poteka tako preko procesorja kot preko grafične kartice (CUDA, OpenCL). Ponuja vrsto bližnjic, orodij za olajšanje določenih postopkov in skriptno ogrodje Python, ki omogoča avtomatizacijo določenih opravil. V sam program so predvgrajene nekatere matematične in fizikalne enačbe. Program je na voljo tudi v 64-bitni različici za vse glavne operacijske sisteme pod licenco GNU GPL (GNU General Public License). Na voljo je na platformah, kot so Windows, OS X, Linux, BSD in Solaris ter AmigaOS 4 in MorphOS.

---

<sup>1</sup>dostopno: <http://www.blender.org>

**Program podpira naslednje formate**

**pri uvozu:** 3DS, FBX, AC3D, COLLADA, OBJ, DEC Object File Format, Lightwave LWO,

**pri izvozu:** MD2, Motion Capture, Nendo, PLY, Radiosity, Raw Triangle, Softimage, STL, TrueSpace, VideoScape.

**MeshLab<sup>2</sup>**

MeshLab je odprtokodni, prenosni in razširljiv sistem za obdelavo, urejanje in analizo 3D modelov. Razvil ga je inštitut Italijanskega nacionalnega raziskovalnega sveta (ISTI-CNR) iz Pise. Zagotavlja nabor orodij za urejanje, čiščenje, poravnavo, presejanje, pregledovanje, upodabljanje in analizo (meritve, izdelava presekov, ipd). MeshLab je na voljo za večino platform, vključno z Linuxom, Mac OS X in Windowsi, z omejeno funkcionalnostjo pa tudi za Android in iOS. Deluje celo kot čista aplikacija JavaScript (MeshLabJS).

MeshLab uporabljajo v različnih akademskih in raziskovalnih okoljih, zlasti v mikrobiologiji, pri varstvu kulturne dediščine, paleontologiji, pri hitri izdelavi prototipov v ortopedski kirurgiji, ortodontiki in namiznem založništvu.

**Program podpira naslednje formate**

**pri uvozu:** PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, VRML 2.0, U3D, X3D in COLLADA,

**pri izvozu:** PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, VRML 2.0, U3D, X3D in COLLADA.

**CloudCompare (CC)<sup>3</sup>**

CloudCompare (CC) je odprtokodna programska oprema, ki omogoča 3D vrednotenje, interpretacijo in primerjavo nizov podatkov dveh oblakov točk in triangulacijske mreže 3D modelov. Možna je primerjava med oblaki točk

---

<sup>2</sup>Dostopno: <http://www.meshlab.net/>

<sup>3</sup>Dostopno: <https://www.danielgm.net/cc/>

in ploskovnimi modeli. Programsko orodje je bilo razvito na pariški visoki šoli za telekomunikacije (Télécom ParisTech) v sodelovanju z razvojnim oddelkom EDF Group. Temeljni namen uporabe CC je bil hitro in učinkovito zaznavanje sprememb v 3D oblakih z visoko gostoto točk, ki so bili pridobljeni z laserskimi snemalniki v industriji (termoelektrarne) in gradbeništvu. Kasneje so program uporabili v kontroli kvalitete izdelkov ter pri ugotavljanju razlik in napak v telekomunikacijskih, energetskih in gradbenih projektih. Uporabo programskega orodja lahko zasledimo danes predvsem v avtomobilski industriji, v strojništvu, pri tehnikah oblikovanja, dizajniranja in modeliranja izdelkov, v analizi materialov, ipd. V zadnjih letih uspešno preizkušajo njegove zmožnosti tudi v medicinski diagnostiki, kirurgiji, nevrologiji, ginekologiji, sodni medicini in ortopediji. Na njegovo uporabnost v arheologiji je leta 2004 opozoril Daniel Girardeau-Montaut[16] s sodelavci na 5. mednarodnem simpoziju o virtualni resničnosti, arheologiji in kulturni dediščini. Girardeau-Montaut je neposredno vključen v razvoj programa.

CC nudi uporabniku bogat nabor osnovnih orodij za ročno urejanje in prikazovanje oblakov točk 3D modelov. Predvsem pa zagotavlja numerično in grafično primerjavo referenčnega z drugim naključnim 3D modelom. Zagotavlja uporabo naprednih algoritmov za obdelavo, med katerimi so tudi metode za izvajanje:

- projekcije (na osi, cilinder ali stožčasti verižnik, ...),
- registracije (ICP, ...),
- izračuna na daljavo (C2C, C2M, M3C2 ...),
- statističnih izračunov (prostorski test Hi-kvadrat, ...),
- segmentacije (označevanje povezanih komponent, ...) in
- ocene geometrijskih značilnosti (gostota, ukrivljenost, hrapavost, geološka ravnina, ...)

CC lahko obdela neomejena skalarna polja v oblakih točk, na katerih je mogoče uporabiti različne namenske algoritme (ICP, C2C, M3C2). Dinamični sistem za barvno obdelavo zagotavlja učinkovito vizualizacijo skalarne polja za vsako točko. CC lahko uporabimo tudi za vizualizacijo podatkov N-D.

### **Program podpira formate**

**pri uvozu:** ASCII, PLY, OBJ, BIN, LAS-ASPRS, SCI, PN, PV, ICM ...

**pri izvozu:** BIN, PLY, PN, OV, OBJ, ASCII ...

\*\*\*

Med izdvojenimi tremi odprtokodnimi grafičnimi programskimi orodji smo se po ad-hoc programskih preverbah odločili, da deviacijsko analizo petih modelov paleolitske lesene konice izvedemo z grafičnim programskim orodjem CloudCompare (CC). Prednostni izbor je bil predvsem posledica dejstva, da je CC namenjen primerjanju dveh oblakov točk 3D modelov. Omogoča tako volumetrično analizo kot grafično primerjavo razlik med dvema 3D modeloma. Prav volumetrična in grafična primerjava petih 3D modelov s programskim orodjem CC bi lahko uspešno, eksaktno in dovolj nazorno odgovorila na našo začetno hipotetično domnevo o nastalih spremembah na paleolitski leseni konici v desetih letih po njeni izločitvi iz naravnih pogojev in okoliščin najdišča. Prav tako smo želeli preizkusiti programsko orodje glede njegove uporabnosti v arheologiji, zlasti pri ugotavljanju sprememb na artefaktih, ki so lahko posledica naravnih procesov ali premišljenega oz. nepremišljenega ravnanja človeka. Na podlagi pregledanih virov nismo ugotovili, da bi bila takšna primerjava v arheologiji že opravljena s tem programskim orodjem. Edini zadržek pri izbiri sta bila dva formata 3D datotek, od katerih format STL ne omogoča optimalnega izkoristka vsem možnostim primerjav, ki jih ponuja CC.

Pri izboru formata smo se najprej odločili za uporabo formata PLY, v

katerem so bili posneti trije 3D modeli (PP<sup>4</sup>-2013, PP-2015 in PP-2017). Načrtovali smo pretvorbo formata STL, v katerem sta bila posneta dva 3D modela (PP-2009 in PP-2018), v format PLY. Vendar smo ugotovili, da konvertiranje ni potrebno, ker CC omogoča hkratno obdelavo obeh formatov na osnovnem nivoju. Samo konvertiranje formata STL v format PLY te težave ne bi odpravilo.

V pregledu prednosti in pomanjkljivosti uporabe CC v naši analizi smo ocenili, da lahko tudi s STL formatom v celoti in zanesljivo odgovorimo na začetno delovno hipotezo.

---

<sup>4</sup>Op.: PP je okrajšava za „Paleolithic point“; okrajšavi je dodana letnica izdelave modela.





## Poglavje 5

# 40 000 let stara paleolitska lesena konica — odkritje, pomen, primerjava in problem

*„Muzejski predmeti pripovedujejo o preteklosti, zato so prvovrstni zgodovinski viri, enakovredni pisnim. Iz preteklosti se lahko učimo za prihodnost. Predmet, ki ne spregovori, je mrtev, nem, pravzaprav zaklenjen, zato ga moramo s svojim znanjem odkleniti in ga pripraviti do tega, da nam pove svojo zgodbo. S tem odkrijemo delček zgodbe posameznega predmeta in jo združimo v skupno predstavitev preteklosti.“*

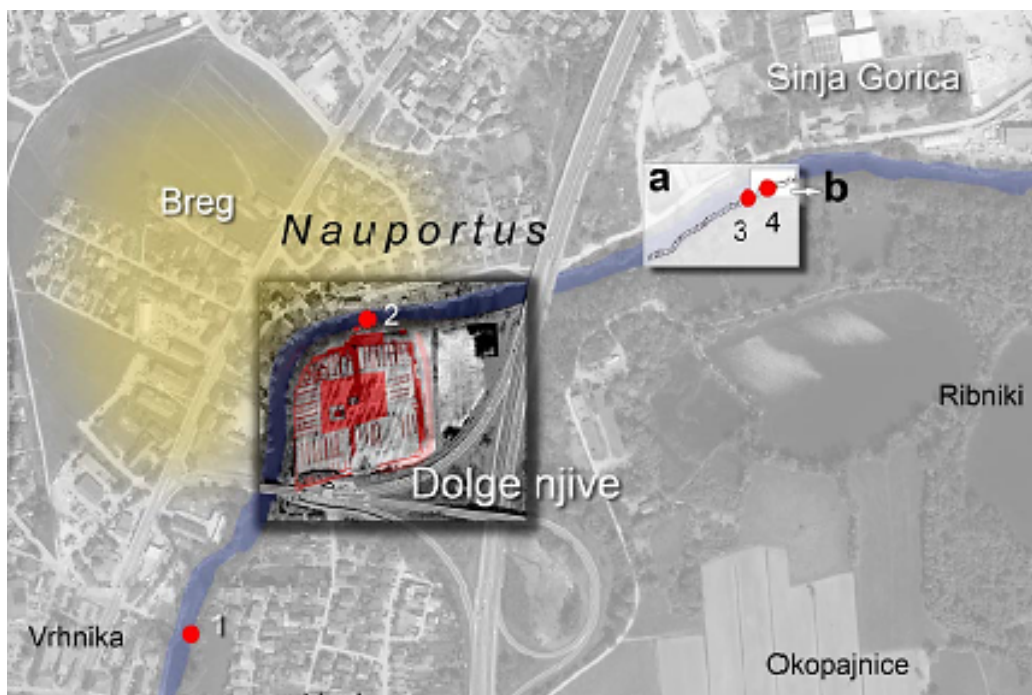
doc. dr. Mateja Kos  
Narodni muzej Slovenije

Skupina za podvodno arheologijo (SPA)<sup>1</sup> Zavoda za varstvo kulturne dediščine Slovenije (ZVKDS) je opravila med 4. 9. in 17. 9. 2008 preventivni podvodni terenski pregled[19] okoli 200 m dolgega odseka Ljubljaničice

---

<sup>1</sup>Terensko skupino so sestavljali Miran Erič iz SPA ZVKDS, potapljači Društva za raziskovanje morja Ljubljana Rok Kovačič, Marko Gasparič in Oskar Musić, potapljači športnega društva Trident Gašper Košir, Anže Košir, Marjan Vidmar in Zlatko Kovač ter Matej Draksler in geodetski tehnik Marko Gaspari.

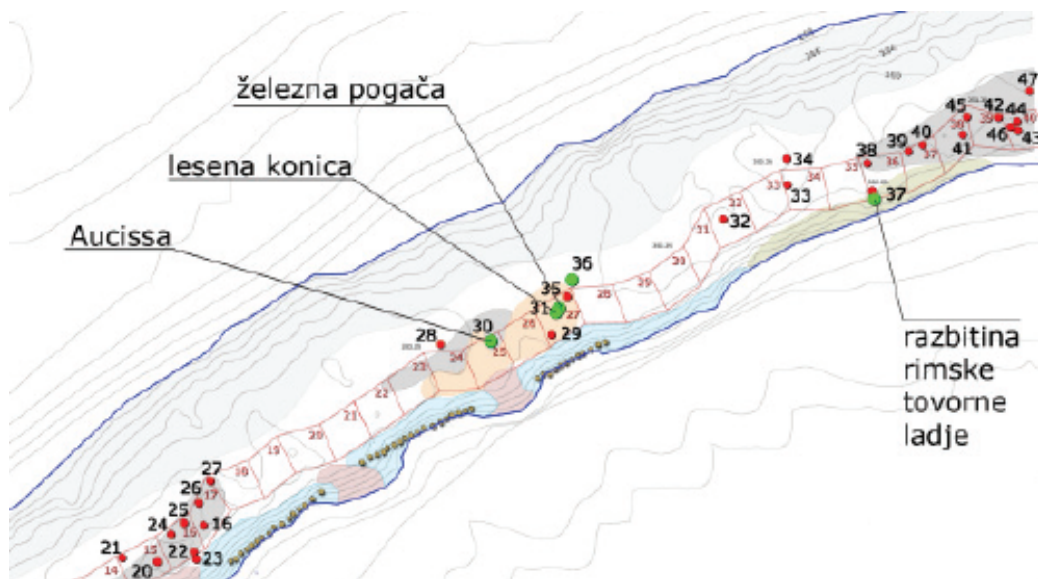
pri Sinji Gorici (slika 5.1). Pregled je potekal v okviru zaščitnega posega pred načrtovanimi vzdrževalnimi deli (utrjevanje desne brežine reke Ljubljanice).



Slika 5.1: Severovzhodno območje Vrhnike z območjem Navporta na Dolgih njivah in Bregu (Mušič, Horvat 2007), a. območjem zaščitnih pregledov leta 2008 ter b. območjem raziskave ladje leta 2012; 1. Vrhnški deblak SI-60, 3. lega paleolitske lesene konice ter 4. lega rimske tovorne ladje iz Sinje Gorice (podlag© GERK MKO). Vir [19]

V 44 kvadrantih (slika 5.2) je bilo med pregledom odkritih okoli 2.500 predmetov. Večinoma odlomkov prazgodovinskega, rimskega, srednjeveškega, novoveškega in modernega keramičnega posodja in gradbenega materiala. Pri ročnem odstranjevanju peščeno-muljaste plasti z organskim drobirjem je mag. Miran Erič odkril izoliran lesen predmet [19, 26, 18], ki je zaradi simetrične oblikovanosti pritegnil njegovo pozornost. Med ostalimi najdbami sta izstopali zgodnjerska fibula tipa Aucissa in okoli 10 kg težka, časovno neopredeljena, železna pogača (ingot), pod katero je ležala **paleolitska lesena konica** (slika 5.3). Začetni pregled konice je nakazoval, da gre za predmet,

najverjetneje del lovskega orožja. Lepo oblikovana lesena konica je bila odkrita v kv. 27. Začetne terenske meritve so pokazale, da gre za predmet dolžine 16 cm, širine 4,8 cm in debeline 2,4 cm. Elektronska oz. digitalna meritev predmeta ni bila opravljena.



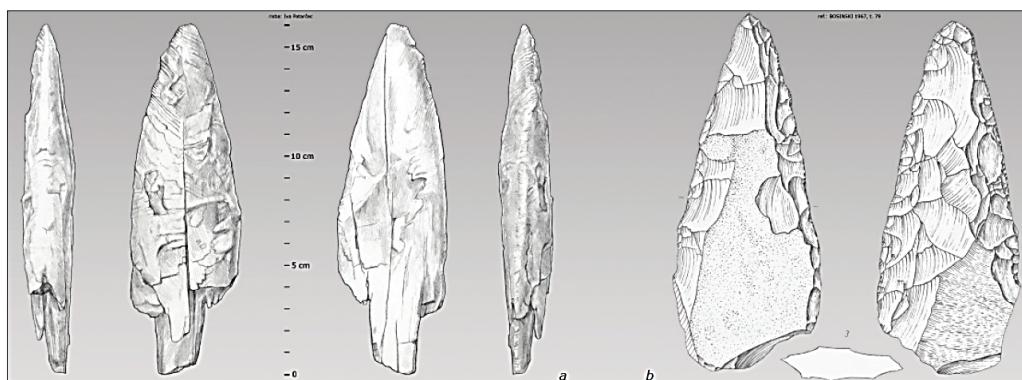
Slika 5.2: Ljubljana pri Sinji Gorici z mrežo intenzivnega pregleda, morfološki podatki, značilnostmi struge, posebnimi najdbami in najpomembnejšimi odkritji. (podlaga: DMR 1-2 m; slika: M. Erič). Vir: [19]

Oblika najdene lesene konice je arheologe, ki so sodelovali pri odkritju, spominjala na paleolitske listaste kamene in koščene konice (slika 5.4). Kmalu po odkritju predmeta je arheolog Boštjan Odar[26] opazil podobnost lesenega koničastega predmeta z nekaterimi ploskovno retuširanimi kamenimi konicami iz poznega mousteriena. Starost lesenega predmeta pa je ocenil na 40.000 let. Ob tem je še izrazil prepričanje, da je predmet izdelan iz lesa tise (*Taxus sp.* oz. *Taxus baccatta*). Raziskovalna skupina je domnevala, da predmet predstavlja konico iz tise, ki je bila pred približno 40.000 leti uporabljena kot del sestavljenega lovskega orožja (sulica ali kopje). To je bil razlog, da so bile načrtovane nadaljnje preiskave (starost in vrsta lesa; nenaravno/ročno oblikovanje lesa z drugimi orodji ali ognjem). Načrtovali



Slika 5.3: Fotografija paleolitske lesene konice (Vir: Osebni arhiv mag. M. Eriča)

so tudi preiskave neposredne lokacije najdišča (raziskava sedimentov, pelodna analiza, idr.) in ostalih okoliščin, ki so bile ugotovljene pri vizualnem pregledu konice (smolnata snov na enem delu konice, ipd.). Raziskave naj bi dodatno pojasnile starost in namembnost ostaline ter okoliščine oblikovanja konice.



Slika 5.4: Risba lesene konice - a. lesena konica (Patarčec 2013) in kamnito lovorolistne szeletienske konice - b. (Bosinski 1967). Vir [18]

## 5.1 Opis in posebnosti paleolitske lesene konice

Konica je simetrične oblike. Simetrija predmeta je očitna tako v narisu kot v stranskem pogledu in v presekih. To je potrdila tudi naša obravnava oblaka in triangulacijske mreže točk 3D modela konice v programu CC. Po dolžini je najdebelejši del na sredini, od koder se enakomerno oži proti obema koncema in ohranja dinamiko ovalnosti po celotni dolžini. Stopnja ovalnosti ( $O = (D-d)/D \times 100$ ) konice je med 52,2% in 48,9%. Tudi ta podatek posredno govori, da je predmet oblikovan namensko in ne po naravni poti, saj o naravni napaki ovalnosti [36] pri iglavcih govorimo, ko je  $O > 10\%$ , pri listavcih pa, ko je  $O > 20\%$ . V presekih ima konica sploščeno-ovalen obris, njen proksimalni del pa je poškodovan.

Skupna ročno izmerjena dolžina predmeta je znašala po naknadnem ročnem merjenju 16 cm, širina 5,1 cm in največja debelina 2,5 cm. Opredelitev vzorca lesa je potrdila, da gre za tiso (*Taxus* sp. oz *Taxus baccatta* – evropska tisa). Les je juvenilen, vsebuje stržen, branike so razločno vidne, ozke in nekoliko valovite. Pri prvem pregledu pod mikroskopom na površini lesa ni bilo ugotovljenih sledov obdelave z ostrimi orodji, čeprav je kasnejša analiza potrdila odrezan in zbrušen izrastek veje pod vrhom konice. Konica je bila premazana s smolo, ki je bila ugotovljena na eni od strani. Spodnji nasadni del konice ni v celoti ohranjen in kaže na tipičen zlom lesa, ki nastane ob preobremenitvi zaradi upogiba.

Na konici sta dve različni stopnji ohranjenosti površine. Na eni strani je s prostim očesom vidna vrsta linearnih in nepravilno oblikovanih vdolbin, ki so jih raziskovalci pripisali trkom in obremenitvam po odložitvi ter abraziji zaradi gibanja fino zrnatih delcev v rečnem toku. Abrazija je očitna tudi na nepoškodovanem koncu, kjer se njeni sledovi kažejo kot majhne izjede med lesnimi branikami. Drugo stran predmeta je skoraj v celoti prekrivala 0,2–2 mm debela, kompaktna črna snov. Njena površina je deloma napokana, gladka in daje hidrofoben videz. Ohranitev te snovi samo na eni strani naj bi bila domnevno povezana s poodložitvenimi pogoji in resedimentacijo.

## 5.2 Dvomi v verodostojnost nastanka in izvora konice

Raziskovalna skupina je v svojem poročilu opozorila [18], „da so se po javni predstavitvi odkritja v delu strokovne javnosti pojavili dvomi v interpretacijo raziskovalne ekipe. Nekateri arheologi menijo, da gre za naravno preoblikovan kos lesa, ki je svojo sedanjo obliko dobil s hidrogeološkimi procesi. V prid namernemu oblikovanju je potrebno izpostaviti, da gre za edinstven primer simetričnega lesenega predmeta v množici lesenega plavja, na katerega je naletela ekipa podvodnih arheologov v več kot 15 let trajajočih raziskavah najdišč Ljubljance in njenih pritokov.“

Oblika in les tise<sup>2</sup>, ki je zaradi svoje gostote, trdote in prožnosti vsaj od srednjega paleolitika naprej znan kot najprimernejši za izdelavo lovske opreme (lok, puščica, sulica, kopje), zelo verjetno kažeta na to, da je hominid namerno preoblikoval kos lesa v simetrično konico, ki je bila pritrjena na daljši drog. „Dodatna podrobnost, ki kaže na premišljeno oblikovanje predmeta, je vidna na spodnjem delu predmeta, kjer ima konica jasno poudarjen ramenski prehod iz njenega najširšega dela v trn. Ta je omogočal namestitev v razcep daljšega droga. Na prehodu iz ramenskega dela v trn je viden zlom, kakršnega lahko opazujemo tudi na koščeni konicah iz Potočke zijalke in drugih najdišč po Evropi. Tovrstni zlomi nastanejo zaradi sile upogiba na mestu, kjer je stičišče med lesenim drogom in nanj pritrjeno konico.“ [18]

Zaradi izraženih pomislekov je raziskovalna skupina prosila za strokovno mnenje Labor für Dendrochronologie v Zürichu. Slednji (Dr. Niels Bleicher) je zavrnil domnevo, da bi se les lahko po naravni poti preoblikoval v tako simetrično koničasto obliko. Potrdil je, da je bil odkrit leseni predmet povsem premišljeno - umetno preoblikovan. Ugotovil je, da je bil tik pod vrhom konice odrezan in zbrušeni izrastek veje, ki je v primerjavi z okoliškim lesom mnogo trši. Jasno je bil viden tudi rez, ki poteka prečno na naravni potek lesenih vlaken. Je pa opozoril, da je prisotnost tise na zamočvirjenih tleh izjemno nenavadna. To je potrdila tudi pelodna analiza, ki v doslej raziskanih sedimentih okolice najdišča ni odkrila prisotnosti tise.

Najdba je spodbudila pomislek tudi o načinu uporabe konice. Raziskovalna skupina je menila, da odgovor na ta pomislek ponujajo predvsem etno-

---

<sup>2</sup>Kot zanimivost – in tudi kot možnost razvoja bodoče računalniške aplikacije za identifikacijo in primerjavo sprememb določenih vrst lesa (anizotropna metoda obravnave sprememb lesa; čeprav je treba to računalniško forenzično metodo ugotavljanja dinamike sprememb lesa v smereh treh rezov šele temeljito raziskati na konkretnih vrstah lesa) – navajamo ugotovitev, da tudi naša deformacijska analiza modela nakazuje, da imamo opravka z lesom tise. Razmerja krčenja oz. nabrekanja lesene konice med postopkom konzerviranja so napreč v celoti potrjevala volumetrična razmerja sprememb konice po longitudinalnem, radialnem in tangencialnem rezu, ki so značilna za les tise (razmerje 1:1,8:6), medtem ko bi bilo to razmerje npr. pri lesu smreke 1:10:20. Razmerje bi lahko zanesljiveje preverili, če bi imeli na razpolago podatke o dejanski gostoti lesa paleolitske konice

grafski viri, ki omenjajo lovske tehnike severnoameriških staroselcev. Sulice za večkratno zbadanje pri nevarnem lovu na velike sesalce so imele praviloma na vrhu pritrjeno koščeno konico ali posebej oblikovano konico iz trdega lesa. Kamene konice za večkratno ponavljajoče zbadanje pri lovu (hitrejša izkrvavitev – op.) iz neposredne bližine so zaradi hitrega zloma neprimerne. Na podobno okoliščino opozarja tudi najdba paleolitske lesene sulice v Lehringenu, ki so jo odkrili (sicer večkrat zlomljeno – op.) v okostju mamuta. Takšno uporabo lesene sulice naj bi potrjeval tudi način lova na konje ali srnjad v paleolitiku. Ta je potekal tako, da so paleolitski predniki divje konje in jelene najprej nagnali v nizko vodo jezer ter jih nato pokončali z zbadanjem.

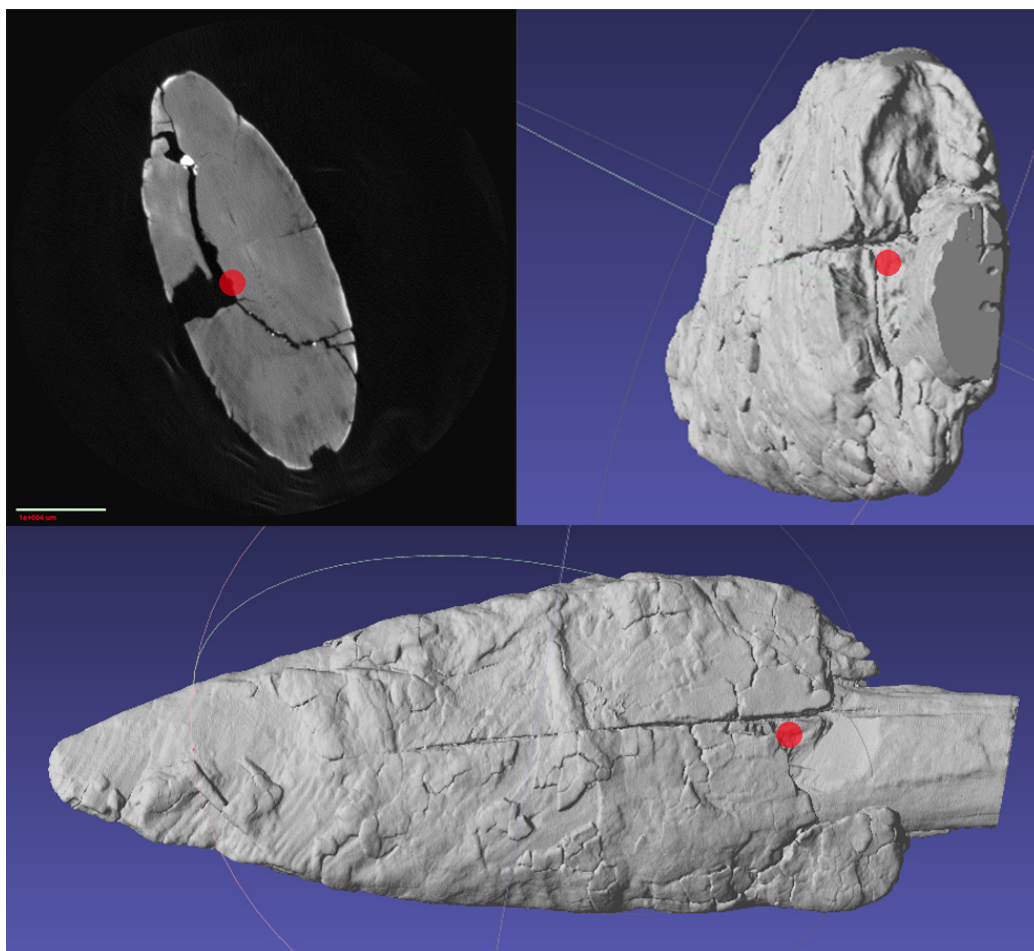
### **5.3 Metode določanja vrste lesa in starosti ter izbor načina hrambe**

Rezultati izbranih raziskav so v celoti potrdili začetne domneve o vrsti lesa in njegovi starosti. Strokovnjaki Oddelka za lesarstvo Biotehniške fakultete UL so potrdili, da je predmet izdelan iz tise (*Taxus* sp). Z ramansko spektrometrijo pa je Naravoslovni oddelek Restavratorskega centra ZVKDS ugotovil, da je bila konica na eni od strani premazana s smolo.

Radiometrična raziskava (AMS14C) je umestila konico v obdobje paleolitika (slika 5.5). Opravljeni sta bili dve dataciji (slika 5.6). Prva (Miami – ZDA) je pokazala, da je les starejši od 43.970 let (Beta-252943), ponovljena datacija v Oxfordu pa navaja starost konice  $38.490 \pm 330$  BP (OxA-19866).

Za dodatno pojasnitev najdiščnih okoliščin je bilo na mestu odkritja izvedeno vzorčenje sedimentov (35 cm visok vzorec peščene gline) iz dna rečne struge za izvedbo datacije z OSL analizo. Analiza ni dala zanesljivega odgovora glede okoliščin najdišča. Analiza je pokazala najverjetnejšo starost sedimentov med  $17.6 \pm 1.6$  in  $9.0 \pm 1.3$  ka. To pomeni, da med konico in sedimentacijskim vzorcem ni neposredne korelacijske povezave. Kako in kdaj je konica našla svoje počivališče pri Sinji Gorici ostaja skrivnost in enigma. Konica je namreč starejša od najmlajše slovenske reke (Ljubljanice).





Slika 5.5: : Mesto odvzema vzorca lesa za RR C14 (Vir: Osebni arhiv mag.M.Eriča)

Lab. oznaka/ Lab. Code	Oznaka vzorca/ Sample ID	Izmerjena radiokarbonska starost/ Measured radiocarbon date	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	Konvencionalna starost (PS)/ Conventional radiocarbon date (BP)
Beta 252943	LJ-SIG/08-900	NA	-24,7	>43970 BP
OxA-19866	LJ-SIG/08-900-3	NA	-26,48	38490 ± 330

Pregl. 1: Radiokarbonske datacije

Slika 5.6: Faksimile radiokarbonske datacije lesene konice [18]

Preživeti je morala v anaerobnih pogojih vse do njenega odkritja.

Z metodo SEMENS je bil preiskan tudi vzorec črne snovi na površini

konice. Preiskava je pokazala, da gre za lesno maso s približno 30% vsebnostjo ogljika in 65% kisika. To nakazuje, da je bila konica obdelana v ognju z namenom povečanja njene trdnosti. To bi lahko bil tudi razlog, da so bili zakriti sledovi drugih obdelav konice.

Posebna pozornost in skrb je bila od trenutka odkritja namenjena zagotovitvi pogojev trajnejše hrambe konice v njenem naravnem okolju. Vodja raziskovalcev in podvodnih arheologov (mag. M. Erič) je predlagal, da bi konico v posebni kapsuli potopili med globlje sedimente najdišča v strugi reke Ljubljanice. Na ta način bi konico optimalno zaščitili pred nevarnostjo hitrega propadanja. Javnosti pa bi predstavili njen 3D model in virtualno repliko.

Vendar je prevladalo drugačno stališče. To je predvidelo konzerviranje ter javno predstavitev paleolitske ostaline kot muzejskega eksponata. Konica je bila pet let hranjena v umetnih pogojih najdbe (potopljena v destilirano in periodično menjujočo vodo). Leta 2013 je bila konica poslana na inštitut v Mainz, ki je v letih 2013–2015 opravil postopek konzerviranja z melaminsko smolo. Konzerviranje je bilo zaključeno leta 2017. Leta 2018 je bila konica vrnjena Mestnemu muzeju Ljubljana v muzejsko hrambo.

Po vizualnem pregledu konice je bila ugotovljena njena sprememba. Konica naj bi bila manjša, lažja in v nasadnem delu vidneje ukrivljena. Računalniška volumetrična in geometrična deformacijska analiza oblaka točk petih 3D modelov je to ugotovitev potrdila. Izrazita degradacija in deformacija je bila ugotovljena v fazi konzerviranja. Po tem postopku, ki je bil zaključen 2015, ugotavljamo, da se je je proces deformacije upočasnil, vendar je še vedno prisoten.

## 5.4 Dimenzije konice

Za našo primerjalno študijo je posebnega pomena določitev točnih dimenzij paleolitske konice oz. osti. Predvsem je to pomembno pri volumetričnih primerjavah izdelanih 3D modelov konic. Te opozarjajo na možne degrada-

cijske in deviacijske procese, katerim je bila konica izpostavljena po izločitvi iz naravnih pogojev najdišča (vodno okolje in glineni sedimenti ter očitno anaerobno stanje) pred, med in po postopkih konzerviranja in ob okoliščinah hrambe. V splošnem bi lahko sklepali, da gre za zanemarljiva odstopanja (npr.: namakanje, sušenje, obdelava z melaminsko smolo, ipd.), vendar so odstopanja, zaradi primerjav v  $\mu\text{m}$ , bolj dramatična. So pa posebnega pomena za usmerjanje nadaljnjih postopkov ravnanja s konico.

V raziskovalni študiji (A. Gaspari, M. Erič in B. Odar: Paleolitska lesena konica iz Ljubljane) v zborniku *Potopljena preteklost* (str. 231-238 – Didakta/2012) na str. 234. (Opis predmeta) so navedene dimenzije konice: 16 cm  $\times$  5,1 cm  $\times$  2,5 cm [26]. Enaki podatki so navedeni tudi v zborniku *An offprint from Submerged Prehistor*. V zborniku *Sinja Gorica - poročilo o arheološkem podvodnem pregledu struge Ljubljane* (ZVKDS-2009) [18] pa so navedene naslednje dimenzije konice: 16 cm  $\times$  4,8 cm  $\times$  2,4 cm.

Žal o dejanski mikrometrski dolžini konice ob najdbi in ob prvem skeniranju ne moremo zanesljivo in z gotovostjo govoriti, ker meritve niso bile opravljene z mikrometrom ali digitalnim kljunastim merilom. Opravljene so bile le s priložnostnim merilom in vizualno ročno meritvijo. Tudi pri prvem in petem skeniranju konica ni bila ustrezno vpeta v podlago po osnovnih smereh kartezičnega koordinatnega sistema (y,x,z). Skeniranje je bilo opravljeno ročno pod določenim kotom. Zato je bilo potrebno dejansko dolžino konice iz leta 2009 in leta 2018 izračunati na podlagi diagonale kvadra oz. valja ter nato ročno poravnati v kartezičnem koordinatnem sistemu. Razumljivo je, da se v začetni fazi natančni meritvi ni namenilo večje pozornosti. Prioritete dela so bile usmerjene v druga odprta vprašanja (v dokazovanje starosti, vrste lesa in orodja oz. orožja). Poleg tega je bilo 3D skeniranje leta 2009 opravljeno predvsem z namenom pridobitve 3D modela, ne pa v funkciji bodočih primerjav, raziskav, geometričnih in volumetričnih meritev in analiz oblaka točk 3D modelov. Na podlagi izvedene poravnave 3D modelov je bila zato posebej izračunana delovna dimenzija velikosti konice 3D modela iz leta 2009 (tj.: 15,6cm  $\times$  5,0cm  $\times$  2,6cm ) in leta 2018 (15,0 cm  $\times$  4,8 cm

× 2,3 cm). Meritev je bila nato potrjena tudi po poravnavi v koordinatnem sistemu tako v CC kot MeshLab programskem orodju.

Ker razpolagamo s tremi ključnimi 3D modeli, ki jih je izdelal **Wissenschaftliche IT des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Kooperation mit dem i3mainz, Institut für Raumbezogenen Informations- und Messtechnik der Hochschule Mainz – University of Applied Science – Mainz**, lahko z veliko zanesljivostjo opravimo degradacijsko in deviacijsko analizo 3D modelov za celotno desetletno obdobje ravnanja in postopanja s paleolitsko leseno konico iz Ljubljane (2009–2018).

## 5.5 Pomen za svetovno kulturno dediščino

Konica je ena najpomembnejših arheoloških ostalin lesene mlajše paleolitike kulture na svetu ter predstavlja neprecenljivo vrednost tako za slovensko, kot evropsko in svetovno kulturno dediščino. Določena odprta in še ne povsem pojasnjena vprašanja glede najdišča konice in njene namembnosti tega dejstva ne spreminjajo. Konica dokazuje prisotnost ledenodobnih lovcev v enem od treh toplih obdobjih srednjega würma, ki predstavlja čas razcveta in zatona neandertalske populacije in se konča s širjenjem anatomsko modernega človeka na območju Evrope.

S konico širimo naša spoznanja in vedenje o mlajšem paleolitiku Ljubljanskega barja in Slovenije. Konica lahko z ostalinami Potočke zijalke in Divjih bab pomembno dopolni slovenski prispevek k razumevanju kognitivnih sposobnosti hominidov mlajšega paleolitika.

Konica dopolnjuje tudi vedenje o starejši kameni dobi Ljubljanskega barja. Do nedavna je bilo to omejeno na odkritje izgubljenega rogovja severnega jelena (Petričevi glinokopi pri Vrhniku)[25] in na musteriensko strgalo s Hruševca. Odpira pa tudi nove vidike vrednotenja in smeri raziskovanja mlajšega paleolitika na območju širšega zaledja Ljubljanskega barja.

## MEDNARODNI POMEN

Konica ima izjemen mednarodni pomen. Tako za arheologijo kot tudi svetovno kulturno dediščino. Pridružuje se doslej sedmim odkritim lesenim paleolitskim artefaktom (tabela 5.1) : Clacton – 1911, Anglija; Lehringen – 1948, Nemčija; Abric Romani – 1992, Španija; Schöningen – 1995, Nemčija; Mannheim/ Vogelstang – 2004, Nemčija; Poggetti Vecchi – 2012, Italija in Aranbaltza – 2014, Španija.

Ostanki paleolitskih sulic oz. kopij oz. konic so bili doslej najdeni v Evropi le na treh najdiščih: Clacton-on-the Sea (Anglija), Lehringen (Nemčija) in Schöningen (Nemčija). Konica iz Sinje Gorice predstavlja četrti primerek paleolitskega lovskega orožja v Evropi. Paleolitskim lovskim orožjem lahko dodamo še primerek paleolitskega loka iz tise, ki je bil najden v Mannheimu (Nemčija). Med vsemi temi lovskimi predmeti je bil poleg konice iz Sinje Gorice neposredno datiran le lok iz Mannheima. Ostale lesene sulice oz. kopja so bile časovno opredeljene oz. datirane le posredno.

Širši pregled strokovnih člankov in razprav, ki pomenijo odziv na odkritje lesenih paleolitskih artefaktov, kaže zanimivo posebnost. Pri vseh paleolitskih primerkih lesenih orožij ali orodij je del arheološke stroke izpostavil pomisleke in zadržke. Tudi naša konica ni izvzeta. Zanimivo je, da so ti pomisleki bolj ali manj enaki pri vseh osmih primerkih. Na eni strani so kritiki izpostavili prepričanje, da so artefakti svojo obliko dobili po naravni poti in ne s kognitivnim delovanjem hominidov. Na drugi je bil izražen dvom o izdelovalcih lesenih orodij in orožij, ker po prepričanju kritikov ni mogoče zanesljivo trditi ali gre za izdelek modernega človeka (ki je bil okoli leta 40.000 pr. Kr. šele na poti v Evropo), še manj pa neandertalca, ki po prepričanju kritikov še ne premore človeških lastnosti. Na tretji pa, da konica ne predstavlja dela lovskega orožja, ampak je lahko le naključno kopalno orodje, ipd. Kritiki so zadržani tudi do datacij, vendar je to posledica okoliščine, da v večini primerov (izjemi sta Mannheim in Sinja Gorica) niso bile opravljene neposredne datacije artefaktov, ampak le posredne s pomočjo stratigrafske, pelodne oz. drugih uporabljenih analiz lokacije najdišča.

Izraženi dvomi in pomisleki imajo izhodišče očitno v klasičnih teoretskih razlagah in pojmovanjih paleolitika, ki priznavajo neandertalcem le kulturo obdelave kamna. Priznati obdelavo in izdelavo lesenih orodij in lovskih orožij, uporabo ognja, izdelavo glasbil (Divje babe) ipd. bi namreč pomenilo v temeljih spremeniti razlago o kognitivnih sposobnostih neandertalca, kromanjonca ali heidelberškega človečnjaka.

Dvomi, ugovori in preverjanja lesenih paleolitskih artefaktov še vedno potekajo. Tako so npr. še v letu 2006 preverjali na Lejre Center for Experimental Archaeology na Danskem [22] „obnašanje lesa“ tise v primeru obdelave z ognjem. S tem so preverjali hipotezo o kognitivnih sposobnostih hominida, ki naj bi s pomočjo ognja utrdil Clactonsko kopje. Vsa lesena paleolitska orodja in orožja so nastala na podoben način. Ta vključuje lupljenje, oblikovanje in odstranjevanje vej, poliranje, sekanje in tudi termično ekspozicijo.

S podobnimi težavami, kot se srečujejo arheologi pri sinjegoriški konici, so se soočili tudi po postopkih konzerviranja. Zaradi neustreznega in posamezni vrsti lesa neprilagojenega postopka konzerviranja, se je npr. kopje iz Clactona skrajšalo in stanjšalo za okoli 5,1%. Prišlo pa je tudi do upogiba in kasneje do preloma na dveh delih. S podobno težavo so se srečali tudi v Aranbaltzi (Španija). Po opravljenih postopkih konzerviranja so ugotovili, da je prišlo do deformacije in spremembe ter močne ukrivitve lesene strgalke.

Dilema o kognitivnih sposobnostih paleolitskih hominidov ostaja še naprej aktualna. Šele odkritje starejšega kopja v Nemčiji je nekoliko omililo dvome o kognitivnih sposobnostih paleolitskih hominidov. Nesporno je, da gre za artefakte, ki so jih ustvarili hominidi ter niso posledica naravnega razvoja in naravnih procesov. Ti artefakti, skupaj s konico iz Sinje Gorice, predstavljajo danes pomemben dokaz o kognitivnih sposobnostih človečnjakov. Naša konica dopolnjuje spoznanja iz Nemčije. Potrjuje prve sledi orožij za lov ter dokazuje obstoj aktivnega lova. Predvsem pa opozarja na to, da je bil les (poleg kamna) – in posredno tudi ogenj – aktiven material paleolitika. Paleolitski hominidi niso več le divjaki in mrhovinarji. Ta odkritja trajno spreminjajo predstavo o njihovih kognitivnih sposobno-

stih in kognitivnem razvoju. Leseni paleolitski artefakti potrjujejo obstoj kompleksne lesne in požarne tehnologije. Nesrečna okoliščina pa je ta, da je stopnja propadanja bioloških ostalin bistveno hitrejša od propadanja kamnitih in koščenih artefaktov. Zato so ti artefakti redki, in jih je treba dodatno zaščititi.

Naj na koncu povzamemo razmislek dr. Borisa Kavurja o mednarodnem in še vedno ne dovolj izpostavljenem in uveljavljenem pomenu odkritja paleolitske lesene konice iz Sinje Gorice (Potopljena preteklost – zbornik, 2013, str. 239):

*„Najdba iz Sinje Gorice, četudi ni konica oziroma del projektila, temveč ploščato obdelan, zašiljen kos lesa neznane namembnosti, je izjemnega pomena, ker dokazuje, da lahko na prostoru Ljubljanskega barja računamo na številčnejša odkritja najdišč in najdb staropaleolitske starosti. V evropskem in svetovnem merilu pa ponovno dokazuje, da so ljudje v času poznega srednjega paleolitika, kot tudi že prej, v velikem obsegu izdelovali predmete iz lesa ter dokazuje, da je bila ta materialna kultura veliko bolj variabilna in je ne moremo povezovati zgolj s koničastimi orodji oziroma orožji za lov in ubijanje. Tako izjemna najdba, ki presega regionalni pomen in daje nove podatke kulturni zgodovini celotnega starega sveta, ponovno izpostavlja prostor Ljubljanskega barja kot eno izmed najbogatejših zakladnic kulturne dediščine človeštva.“ [34]*


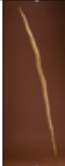






<b>LETO DATACIJE</b>	<b>SLIKA-RISBA</b>	<b>LESENI PALEOLITSKI ARTEFAKTI</b>	<b>POSEBNOST</b>
424 -374 ka		<b>Clacton-on-Sea</b> , Anglija 1911 konica kopja – najstarejša obdelana leseni artefakt l: 387 mm d: 39 mm  TISA	<i>Skrčenje (1922) in zlom (2013) v korenu in na vrhu. V času suhega skladiščenja (10 let) se je dolžina zmanjšala za 20 mm, debelina pa za 2 mm. Sulica se je zdravila z voskom – od leta 1952 ugotavljajo stabilizacijo.</i>
380-400 ka oz.novejše 337 -300 ka		<b>Schöningen</b> , Nemčija 1995 Lovsko kopje – najstarejši popolnoma ohranjen artefakt l: 1,82-2,25m d: 29-47 mm SMREKA Homo heidelbergensis	<i>Starost ocenjena posredno s stratigrafsko metodo</i>
~171 ka		<b>Poggetti Vecchi</b> , Italija 2012 Palica; kopalna palica l. 1m+ NAVADNI PUŠPAN Neandertalci	<i>Radiometrično datiranje. Požarna tehnologija.</i>
115-125 ka		<b>Lehringen</b> , Nemčija, 1948 Lovska sulica l: 15 cm SMREKA	<i>Večkrat zlomljeno (6x) ob izkopavanju. Posredna datacija na podlagi sedimentov in cvetnega prahu</i>
~90 ka		<b>Aranbaltza</b> , Španija 2014 kopalno orodje, grebljica (?) l: 15 cm TISA (Taxus baccata) Neandertalci SHRANJENO V POSEBNI KAPSULI V SEDIMENTU	<i>Barvne spremembe zaradi obdelave z ognjem Micro CT analiza (?) upogib datacija v MIS7-6 deformacija zaradi načina konzerviranja</i>
~45-49 ka oz. ~55 ka		<b>Abric Romani</b> , Španija 1992 lopatka-nožil: 22cm l: 32 cm š: 4 cm BOR (?) Neandertalci	<i>Micro CT analiza</i>
~43.970 oz. 38.490±330 BP		<b>Sinja Gorica</b> , Slovenija 2008 konica, ost (sulice) l: 16 cm š: 4,8 cm d: 2,4 cm TISA	<i>3D modeli (2019, 2013, 2015, 2017, 2018) ATHOS III, Micro CT  CC degradacijska analiza (2018) Deformacija: upogib, skrčenje po konzerviranju</i>
14,680 ± 70 BP		<b>Mannheim</b> , Nemčija 2004 lok, puščica l: 110 cm BOR	<i>Analiza lesa</i>

Tabela 5.1: Preglednica doslej odkritih osmih paleolitskih lesenih ostalin v Evropi



## 5.6 Računalniška obravnava konice

Ob samem odkritju konica ni bila digitalno niti računalniško obdelana, saj so bile najprej opravljene analize datacije in identifikacije vrste lesa. Šele leta 2009 je bila konica prvič 3D skenirana in izdelan prvi 3D model (podjetje Intri d.o.o.). Ob postopku konzerviranja v Nemčiji je tamkajšnji inštitut opravil dodatna tri 3D skeniranja (2013, 2015 in 2017)<sup>3</sup> (slika 5.7). Nemški inštitut je vse 3D modele odstopil za izvedbo nadaljnjih računalniških primerjav. Leta 2018 je Zavod za gradbeništvo Slovenije opravil še peto 3D skeniranje konice. Skeniranja so bila opravljena v dveh različnih formatih PLY in STL, in s štirimi različnimi 3D čitalniki (ATOS III, ATOS III triple, MicroXCT400, TScanner 800).

Posebne računalniško analitične obdelave 3D modelov konice ter njihove geometrične in volumetrične primerjave doslej niso bile opravljene. Nemški laboratorij je le preveril izdelane modele po opravljenem skeniranju v odprtokodnem programskem orodju MeshLab.

Na podlagi razpoložljivih petih 3D modelov bomo opravili primerjalno računalniško analizo oblaka in triangulacijske mreže točk 3D modelov paleolitske lesene konice.

---

<sup>3</sup>3D-Dokumentation und Aufbereitung der 3D-Daten erfolgte durch den Kompetenzbereich Wissenschaftliche IT des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Kooperation mit dem i3mainz, Institut für Raumbezogenen Informations- und Messtechnik der Hochschule Mainz – University of Applied Science.

Eigentümer: Stadtmuseum Ljubljana										
RGZM-Inventar-Nr.: WB_2013_0208					Fundzettel-Nr.: 510 0058948					
Holzart: Eibe					Fundmilieu: Fluss Ljubljana					
Nassgewicht: 96,7g		Unterwassergewicht: 16,3g			UMax: 98%		Abbaugrad: 3			
Beschreibung/Maße/Skizze: 1.10.2015 3D Scan nach Konservierung (mit Atos III alt) 20.1.2017 gescannt (Mit neuem Atos III triple)										
<b>Wässerung in dest. Wasser:</b>										
Wasserwechsel:	16.7.13									
Messdatum:	16.7.13	17.7.13	23.7.13	6.12.13						
Leitwert:	6,5µ	13µ	14,5µ	51µ						
pH:										
Lösungskonzentration: 25%					Lösungsmenge: 8l					
Kauramin 800 (Wirkstoffgehalt 90%): 30 l (±27l)					Deionisiertes Wasser: 81l					
<b>Zusätze % bzg auf Melaminharzgehalt:</b>										
Harnstoff: 5%			Triethylenglykol: 10%			Triethanolamin: 0,2%				
1,35l			2,7l			54ml				
Datum:	6.12.13	10.1.14	20.1.14	27.1.14	3.2.14	10.2.14	17.2.14	5.3.14	11.3.14	18.3.14
Dichte:	1,052	1,053	1,053				1,053	1,054	1,053	1,054
pH:	8,3	8,2	8,4	8,1	7,8	7,9	8,0	7,9	7,8	7,8
Tränkungsende/Trübungspt.: 14.4.14					Gewicht nach Tränkung: 103,3g					
Wärmeschrankbehandlung:										
Beginn: 14.4.14			Ende: 17.4.14			Temp.: 60°C		Gewicht nach Behandlung: 102,7g		
Kontrollierte Folientrocknung: 29.9.15: 73,4g										
Ende: 14.2.18			Gewicht nach Trocknung: 14.2.18 71,9g							
Nachbehandlung:										
Datum:										
Endgewicht: 71,9g										
Sonstiges: 28.9.15 kleine Fragmente mit Paraloid B72 fixiert										

Slika 5.7: Faksimile Poročila o postopku konzerviranja in 3D skeniranja Paleolitske lesene konice iz Ljubljane na Oddelku za znanstveno informacijsko tehnologijo Rimsko-nemškega osrednjega muzeja v sodelovanju z i3mainz, Institutom za prostorsko informacijske in meritvene tehnike Univerze uporabnih znanosti v Mainz.

# Poglavje 6

## Študija primera

### DEFORMACIJSKA ANALIZA OBLAKA TOČK PETIH 3D MODELOV PALEOLITSKE LESENE KONICE

SAPERE AUDE!

Drzni si vedeti!

I. Kant

Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije in Mestni muzej Ljubljana razpolagata s petimi 3D modeli paleolitske lesene konice, ki so bili izdelani v letih 2009-2018. Modeli doslej niso bili predmet posebnih računalniških analitičnih obdelav in raziskav. Po konzerviranju 40.000 let stare lesene konice, ki je bila najdena v strugi reke Ljubljanice pri Sinji Gorici, je bila izražena domneva, da je prišlo v desetih letih po izločitvi konice iz naravnih pogojev njenega nahajališča do določenih sprememb.

Fakulteta za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani je v študijskem letu 2017/2018 (univerzitetni program) razpisala diplomsko temo „Primerjava 3D modelov paleolitske lesene konice“, v kateri je treba raziskati pravilnost hipoteze o domnevni spremembi dimenzij konice. Primerjavo oblakov in triangulacijskih mrež točk petih 3D modelov lesene konice avtor diplomske naloge opravi z odprtokodnim grafičnim programskim orodjem CloudCompare.

## 6.1 Predmet študije primera

3D MODEL	PP-2009	PP-2013	PP-2015	PP-2017	PP-2018
	ZScanner 800	ATOS III		ATOS TRIPLE SCAN	Micro XCT400
3D SNEMALNIK					
FORMAT	STL	PLY	PLY	PLY	STL
IZDELAVA MODELA	Intri d.o.o., Ljubljana	Kompetenzbereich Wissenschaftliche IT des Roemisch-Germanischen Zentralmuseums v sodelovanju z i3mainz, Institut fuer Raumbezogenen Informations- und Messtechnik der Hochschule Mainz – University of Applied Science (D)			ZAG Slovenije
					
OBLAK TOČK	43430	2471704	2119869	788620	5127841
TRIA. MREŽA TOČK	86856	4941990	4228412	1557716	10255984

Slika 6.1: Pet izdelanih 3D modelov paleolitske lesene konice (izvajalci, uporabljeni snemalniki in 3D formati zapisa, št.točk v oblaku in triangulacijski mreži)

Raziskava je bila osredotočena predvsem na primerjavo in analizo parametrov oblaka in triangulacijske mreže točk že izdelanih petih 3D modelov (slika 6.1). Tri modele je v letih 2013, 2015 in 2017 izdelal Kompetenzbereich Wissenschaftliche IT des Roemisch-Germanischen Zentralmuseums v sodelovanju z i3mainz, Institut fuer Raumbezogenen Informations- und Messtechnik der Hochschule Mainz – University of Applied Science, model iz leta 2009 je izdelalo podjetje Intri d.o.o. iz Ljubljane, model iz leta 2018 pa Zavod za gradbeništvo Slovenije. Trije nemški modeli so bili izdelani v formatu PLY, dva slovenska pa v formatu STL.

Posebnost je predstavljalo sistematično 3D skeniranje v Nemčiji. Prvo (2013) je bilo izvedeno ob prevzemu konice v postopek konzerviranja, drugo (2015) ob zaključku konzerviranja in tretje (2017) dve leti po opravljenem konzerviranju. Cilj izdelave 3D modelov konice v Nemčiji je bil namensko integriran v celoten postopek konzerviranja in dokonzerviranja artefakta. Izvedba modeliranja je v celoti upoštevala kriterije za morebitne nadalj-

nje primerjave in analize. Prvo modeliranje (2009) ni imelo povsem jasno določenega namena uporabe 3D modela v nadaljnjih postopkih 3D obravnave. Tudi zadnje 3D snemanje (2018) ni v celoti upoštevalo standarda skeniranja, ki predvideva vpenjanje artefakta v posebno nosilo 3D snemalne podlage. Ta okoliščina v programskem orodju CC oteži izračun volumna po lepljenju artefakta in njegovi poravnavi. Zato je bilo treba obe 3D datoteki najprej poravnati in nato odrezati del 3D modela, ki se ni prekrival z 3D modelom prvega modeliranja. Šele, ko od izračunanega volumna 3D modela<sup>1</sup> odštejemo volumen neprekrivnega dela (manjši nasadni del konice – op.), dobimo pravi volumen 3D modela. Določena pomanjkljivost pri izdelavi 3D modelov v Sloveniji je bila tudi ta, da artefakt pri skeniranju ni bil modeliran v koordinatni sistem. Namesto, da bi bil artefakt nameščen po eni od osi kartezičnega koordinatnega sistema, je bil ta v koordinatni sistem postavljen pod določenim kotom snemanja, zato je bil artefakt po daljši stranici nameščen vzdolž diagonale navideznega telesa (valj ali kvader) in ne po eni od osi koordinatnega sistema (x,y,z).

Vendar pa moramo poudariti, da je bilo snemanje z MikroXCT 400, kljub navedeni pomanjkljivosti, opravljeno vrhunsko. Nazorno odkriva notranjo strukturo konice, določene pomanjkljivosti v postopku konzerviranja ter jasneje opozarja, v primerjavi z drugimi snemalniki, na težave, s katerimi bi se lahko soočila konica v prihodnje. Vidna je namreč notranja deformacija konice, ki se le delno manifestira v zunanjih spremembah artefakta, ki so predmet naše računalniške 3D analize. Uporaba MikroXCT 400 je opozorila na nujno uporabo tega snemalniki pred konzerviranjem. MikroXCT analiza artefakta bi bila zaradi globinskega vida pomembna pomoč pri odločitvi za izvedbo postopka konzerviranja ter pri načrtovanju in izvedbi tega postopka.

---

<sup>1</sup>KOMENTAR: Izračunani volumen poravnanega telesa, kljub združitvi in poravnavi v en model, avtomatsko sešteje volumna obeh datotek in ne prepozna oblaka točk novega in enotnega modela – pomanjkljivost algoritma C2C– op.)

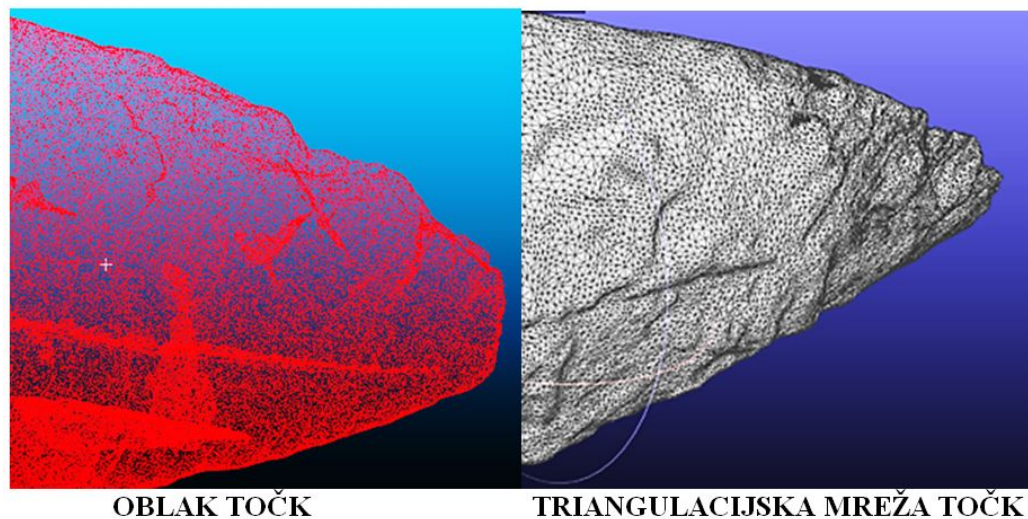
## 6.2 Namen študije primera

Primerjalna deformacijska analiza naj bi predvsem odgovorila na začetno delovno hipotezo: ali je prišlo do določenih sprememb (velikost, volumen, upogib, krivljenje, pokanje, ipd.) na 40.000 let stari leseni (tisa) konici. In, če je prišlo do spremembe, v kateri fazi je bila ta sprememba izrazitejša. Konica je v zadnjih desetih letih od najdbe, prešla nekaj faz obravnave: najprej je bila izločena iz pogojev nahajališča, opravljeni sta bili dve dataciji, zaradi katerih sta bila odvzeta dva vzorca arheološkega lesa. Do začetka postopka konzerviranja (2013) je bila ta hranjena v posebnih pogojih (potopljena v stalno menjujočo destilirano vodo). Postopek konzerviranja je bil izveden v posebnih pogojih in je potekal več kot dve leti (faza nabrekanja, faza dodajanja konsolidacijskega sredstva, faza intenzivnega toplotnega in naravnega sušenja, ipd.). Leta 2018 je bila konica vrnjena v hrambo Mestnemu muzeju Ljubljana.

## 6.3 Izbor programskega orodja in priprava modelov za obdelavo

Za volumetrično in geometrijsko primerjavo parametrov oblakov in triangulacijskih mrež točk (slika 6.2), ki je podlaga za deformacijsko analizo artefakta, smo izbrali odprtokodni grafični računalniški program CloudCompare 2.9.1 (dalje CC). CC omogoča uporabo vrste naprednih algoritmov (registracija, ponovitev vzorcev, obdelava barv / normalnega / skalarnega polja, osnovno statistično obdelavo, interaktivno segmentacijo, primerjave oblak-oblak, oblak-mreža/ploskev itd.). CC omogoča primerjave med oblaki točk in ploskovnimi modeli. Sistematične uporabe CloudComparea v arheologiji v povezavi z deformacijsko analizo artefaktov doslej nismo ugotavljali. To primerjavo nam je omočila okoliščina, ker razpolagamo s petimi 3D modeli istega artefakta. CC bi lahko postala metoda deformacijskega monitoringa v arheologiji. Z njo je mogoče zelo natančno spremljati stanje nadzorovanega

artefakta v določenih časovnih intervalih.



Slika 6.2: Oblak in triangulacijska mreža točk 3D modela vrha konice

Da smo lahko uporabili izbrano programsko orodje, so morali ustrezati naši vhodni podatki (3D modeli) naslednjim pogojem:

- predhodna groba določitev pravilne velikosti in orientiranosti vhodnih podatkov,
- medsebojna podobnost vhodnih podatkov,
- zagotovljeno zadostno prekrivanje,
- vsaj dva 3D modela istega objekta,
- zapis v ustreznem formatu za primerjavo in
- pravilna umeščnost 3D modela v kartezični koordinatni sistem (x, y, z).

Z dodatnimi postopki smo modele pripravili za volumetrično in geometrijsko primerjavo. V pripravi smo nameravali modela v formatu STL konvertirati v format PLY. Format PLY smo izbrali kot najprimernejši zaradi

širokega nabora možnosti primerjav. Za celovito in večnivojsko obdelavo oblakov točk v CC je sicer najprimernejši njegov lastni BIN format (slika 6.1). Vendar je bil naš nabor formatov omejen na formata PLY in STL. Med njima pa je bil primernejši format PLY. Žal smo ugotovili, da konvertiranje formata STL v format PLY ne more odpraviti omejenih možnosti obdelave podatkov in informacij, ki jih ponuja format STL v CC. Ta okoliščina je dodatno opozorila na nujno standardizacijo ali vsaj poenotenje postopkov pri zajemu oblaka točk. Pri zadnjem 3D modelu smo se soočili še z dodatno težavo. Model je bil posnet v dveh ločenih oblakih 3D točk (zaradi velikosti konice in okoliščin, ki so terjale dodatno vpenjanje artefakta). Zato smo morali najprej obe datoteki združiti in ju nato poravnati v kartezičnem koordinatnem sistemu.

Type	Extensions	Description	Read	Write	Binary/ASCII	Point Cloud(s)	Mesh(es)	Other	Features
BIN	.bin	CloudCompare's own format	X	X	binary	>1	>1	>1	Normals, colors (RGB), scalar fields (>1), labels, viewpoints, display options, etc.
PLY	.ply	Stanford 3D geometry format (cloud or mesh)	X	X	both	1	1		Normals, colors (RGB or I), scalar fields (>1), one or several scalar fields, a single texture
STL	.stl	STereoLithography file format (mesh)	X	X	ASCII		1	Other	Normals

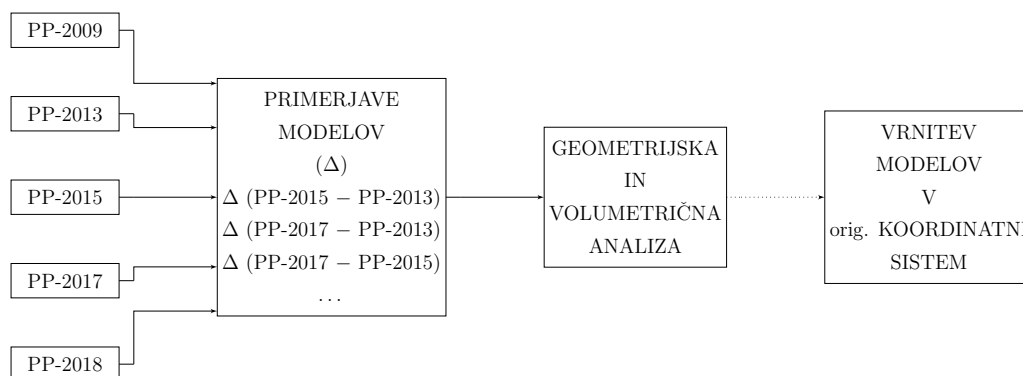
Tabela 6.1: Primerjava možnosti izbranih formatov v CC glede na obseg obdelave

## 6.4 Določitev izvedbe postopka volumetričnih meritev in izbor algoritma

Ker so naši vhodni podatki po prilagoditvi izpolnili zahtevane pogoje, smo najprej izbrali primeren algoritem (ICP) [6], nato na njegovi podlagi izdelali diagram izvedbe primerjalne deformacijske analize (slika 6.3). Sledila je določitev tehničnih korakov in postopkov primerjave 3D modelov (slika 6.4) v CC. Na podlagi pilotske začetne delovne primerjave oblakov točk vseh petih modelov smo izbrali referenčni 3D model lesene konice. Kot referenčne modele za primerjave smo izbrali modele PP-2009, PP-2015 in PP-2018. Prvi



(PP-2009) je začetni model, čeprav je slabše kvalitete od ostalih, in je najbližje dejanskemu stanju artefakta ob odkritju. Drugi (PP-2015) je nastal po koncu konzerviranja in bi moral biti teoretični približek prvemu modelu. PP-2018 je zadnji 3D model in predstavlja končno (trenutno) stanje artefakta. Modela PP-2013 nismo razvrstili med referenčne, čeprav ga primerjamo z ostalimi modeli. Ocenili smo, da njegove volumetrične vrednosti — zaradi načrtno izvajanih postopkov (namakanje, nabrekanje ...) — preveč odstopajo od ugotovljenih vrednosti ostalih modelov. Je pa pomemben, ker nakazuje na možni vzrok deformacije konice.

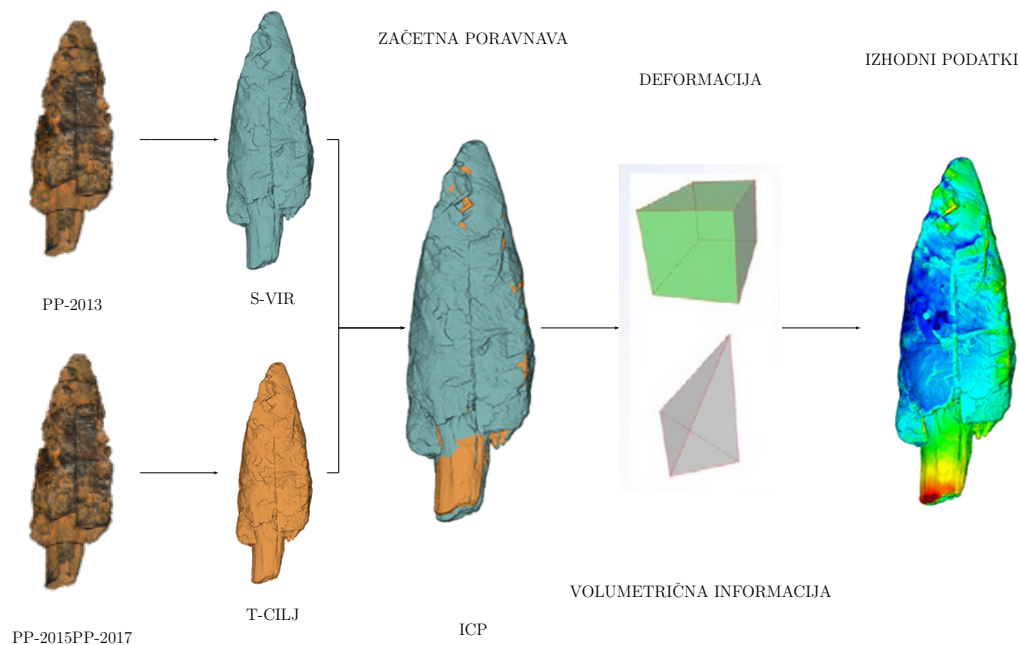


Slika 6.3: Diagram izvedbe primerjalne deformacijske analize

Po opravljenih predpripravah smo v sklepni fazi izbrali in preverili še uporabo nekaterih dodatnih algoritmov. CC namreč zagotavlja uporabniku različne napredne algoritme (ICP, C2C, C2M in M3C2) za obdelavo podatkov, med katerimi so tudi posebne tehnike za izvajanje:

- registracije (ICP, ...)
- volumetričnih meritev in geometričnih primerjav (cloud-cloud ali cloud-mesh ali mesh-mesh ; C2C, C2M in M3C2) [28, 35, 31].
- statistične obdelave podatkov in nizov (spatial Chi-squared ...)
- segmentacije (connected components labeling, front propagation based, ...)

VHODNI PODATKI



Slika 6.4: Postopek primerjave 3D modelov (CC)

S-vir: volumetrična tetraedrična mreža.

T-cilj: volumetrična oblika, ki jo določajo vokslji.

ICP: Iterative Closest Point algoritem

- geometrično vrednotenje in primerjavo,
- idr.

3D modele, ki smo jim predhodno pridobili od domačih in tujih raziskovalnih laboratorijev, smo uvozili v CloudCompare ter izvedli registracijo vhodnega 3D modela. Sledil je izračun razdalj in odstopanj med oblaki in triangulacijskimi mrežami točk 3D modelov (slika 6.4).

Primerjave 3D modelov so bile narejene s funkcijo, ki na podlagi algoritma ICP (Iterative Closest Point) določi najboljše ujemanje med nizi podatkov. Dodatno smo preverili in raziskali algoritme C2C, C2M in M3C2. Cilj tega postopka je bil preprečiti sistematične napake, ki bi nastale zaradi možnosti slabo določenega ujemanja različnih vhodnih podatkov.

Algoritem ICP (Besl in McKay) [7] privzame en niz podatkov kot osnovo, na podlagi katere določi najboljše ujemanje drugega niza. Nato postopoma spreminja transformacijske parametre (premiki in rotacije) primerjalnega niza podatkov in določa razlike med obema modeloma na podlagi cenilne funkcije, ki je enaka vsoti najmanjših kvadratov. Ko relativna razlika med vrednostima cenilne funkcije v dveh zaporednih ponovitvah postane manjša od določene meje, se izračun in meritev končata.

Splošni cilj algoritma ICP je oceniti togo transformacijo med točko iz referenčnega 3D točkovnega oblaka in 3D oblakom primerjanih točk. Z uporabo iskanja najbližjih sosedov in izračunom evklidske transformacije algoritem oceni najbližjo točko med korespondenčnimi točkami.

Algoritem C2C je najpreprostejša neposredna metoda pri primerjavi 3D točkovnih oblakov. Ne zahteva običajnega izračuna ali očitanja podatkov. Pri tej metodi algoritem za vsako točko primerjalnega oblaka išče najbližjo točko v referenčnem oblaku in izračuna njuno (evklidsko) razdaljo. Pri algoritmu M3C2 temelji izračun razdalje na nizu ključnih točk, za katere izračunamo razdaljo in interval zaupanja. Glavne točke so pod-vzorci oblaka referenčne točke, ki jih je mogoče nastaviti z nastavitvijo najmanjšega razmika: V M3C2 se normalni vektor izračuna za vsako točko in pod-oblake, ki so opredeljeni s presečiščem referenčnega in primerjanega oblaka.

V CloudCompare, ko se kliče ta funkcija, in po izbiri vloge vsakega oblaka (referenca in podatki, ki jih je treba primerjati), se avtomatsko izračunava razdalja. Tako je možno izračunati približno minimalno razdaljo, največjo in najmanjšo približno razdaljo, standardni odklon, srednjo vrednost, največjo relativno napako, ipd.

## 6.5 Načrt volumetričnih in geometrijskih meritev

Pred začetkom samih meritev smo pripravili in preverili načrt volumetričnih meritev (v  $\mu\text{m}$  in  $\mu\text{m}^3$ ) paleolitske konice (PP – Paleolithics points)

ter načrt statistične primerjave podatkov in parametrov.

V izvedbenem delu študije smo opravili meritve in izračune med oblaki modelov PP-2009 (leto dni po odkritju) in PP-2013 (ob začetku konzerviranja), med PP-2013 in PP-2015 (zaključek konzerviranja), med PP-2013 in PP-2017 (dokončano konzerviranje), med PP-2015 in PP-2018 (hramba v MM Ljubljana), med PP-2017 in PP-2018 ter med PP-2009 in PS-2018. Rezultati volumetričnih meritev in primerjav so predstavljeni v tabelah 6.2, 6.3 in 6.4.

## 6.6 Primerjalna analiza 3D modelov - rezultati volumetričnih meritev in ploskovnih primerjav

Rezultati volumetričnih meritev s programskim orodjem CC so predstavljeni v preglednih tabelah (tabele 6.2, 6.3, 6.4). V razlagi podatkov iz tabel izpostavljam predvsem značilna odstopanja in nekatere dodatne statistične in grafične primerjave, ki dopolnjujejo osnovne podatke. Zaradi nazornosti in lažje primerjave navajamo podatke v besedilu v relativnih številih. V tabelah so navedena absolutna in relativna števila meritev in izračunov.

V tabelah 6.2, 6.3 in 6.4 izrazito odstopajo volumetrične meritve za 3D model PP-2013 (označeno rdeče). Sken 3D modela je bil opravljen ob začetku postopka konzerviranja leta 2013, ko je bila konica načrtno izpostavljena postopku namakanja, zato je arheološki les močno nabrekli, spremenil dimenzije in volumen v primerjavi z modelom PP-2009 ( $l = +3,44\%$ ,  $b = +1,41\%$ ,  $h = +12,63\%$ ,  $V = +13,8\%$ ). Podatke v tabelah navajamo v  $\mu\text{m}$  in  $\mu\text{m}^3$  ter v odstotkih odstopanja.

### 6.6.1 Volumetrična primerjava 3D modelov paleolitske lesene konice po dolžini, širini in debeli

V Tabeli 6.2 navajamo meritve in dinamiko odstopanj konice po dolžini, širini in debelini.

V posebnem stolpcu na začetku tabele so navedene dimenzije konice (zgolj v informacijov- op.p.), ki je bila dvakrat izmerjena analogno in sicer leta 2011(16 cm - 5,1 cm - 2,5 cm) ter ob njenem odkritju leta 2008 (16 cm - 4,8 cm - 2,4 cm). Te mere različni avtorji navajajo v poročilih in strokovnih člankih. Odstopanje je razumljivo, saj točni meritvi ni bila namenjena posebna pozornost. Pri analognih meritvah lahko pride pri artefaktih do velikosti 1 m tudi do odstopanj med 2 in 5 mm. Pri meritvah s 3D snemalniki, ki so predmet naših primerjav, so ta odstopanja bistveno manjša, med 5 in 70  $\mu\text{m}$  (glede na vrsto snemalnika). Vse mere konice, ki so bile izmerjene digitalno, navajamo do  $\mu\text{m}$  natančno, kot jih podaja tudi CC. Te so tudi predmet naše analize in primerjav. V razdelkih navajamo razlike v  $\mu\text{m}$  in odstotkih od izbrane vrednosti referenčnega 3D modela. Referenčni model je označen z grško črko Alfa ( $\alpha$ ).

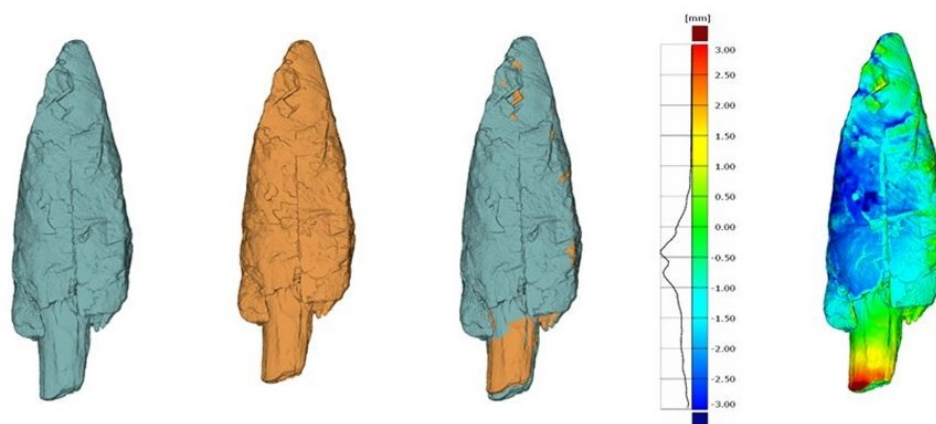
Volumetrične meritve so potrdile začetno domnevo, da je prišlo v zadnjih desetih letih do določenih sprememb v dimenziji in velikosti ter volumnu (posredno tudi v teži) konice. Trend sprememb poteka v negativni smeri in to v vseh treh razsežnostih (dolžina, širina in debelina). Izrazitejša je sprememba konice po debelini. Ta se je pri modelu PP-2018 v primerjavi z modelom PP-2009 v povprečju stanjšala za 11,3% ali 2,9 mm. Manjše spremembe so bile ugotovljene pri istih dveh modelih glede na dolžino in širino konice. Dolžina je krajša za 3,3% (5,2 mm), širina pa manjša za enak odstotek oz. 1,7 mm.

Večje odstopanje v dimenzijah pri modelu PP-2013 je posledica že navedenih okoliščin (namakanje; nabrekanje, dodajanje konsolidacijskega sredstva, ipd). Vse volumetrične meritve nakazujejo, da je izbrani način konzerviranja močno (odločilno) vplival na proces deformacije konice. Spremembe dimenzij pri modelih PP-2015, PP-2017 in PP-2018 kažejo določeno umirjanje ne pa

Tabela 6.2: Volumetrična primerjava 3D modelov (dolžina, širina, debelina) paleolitske lesene konice (2009–2018)

	PP-R2008	PP-2009	PP-2013	PP-2015	PP-2017	PP-2018
	0	1	2	3	4	5
	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$
dolžina	160000	155606	160958	152709	151768	150435
širina	51000 48000	50014	52274	50594	50348	48359
debelina	25000 24000	25579	28810	23856	23585	22689
	$+\mu m / \%$	$+\mu m / \%$	$+\mu m / \%$	$+\mu m / \%$	$+\mu m / \%$	$+\mu m / \%$
dolžina+-% (l)		$\alpha$	+5352 +3,44%	-897 -1,86%	-3838 -2,47%	-5171 -3,3%
			$\alpha$	-8249 -5,12%	-9190 -5,74%	-10523 -6,54%
				$\alpha$	-941 -0,62%	-2274 -1,49%
					$\alpha$	-1333 -0,88%
širina+-% (b)		$\alpha$	+2260 +1,41%	+580 +1,2%	+334 +0,68%	-1655 -3,31%
			$\alpha$	-1680 -3,21%	-1926 -3,68%	-3915 -7,49%
				$\alpha$	-246 -0,49%	-2235 -4,42%
					$\alpha$	-1989 -3,95%
debelina+-%		$\alpha$	+3230 +12,63%	-1724 -6,74%	-1995 -7,8%	-2890 -11,3%
			$\alpha$	-4954 -17,2%	-5225 -18,34%	-6121 -21,3%
				$\alpha$	-217 -1,14%	-1167 -4,89%
					$\alpha$	-896 -3,80%

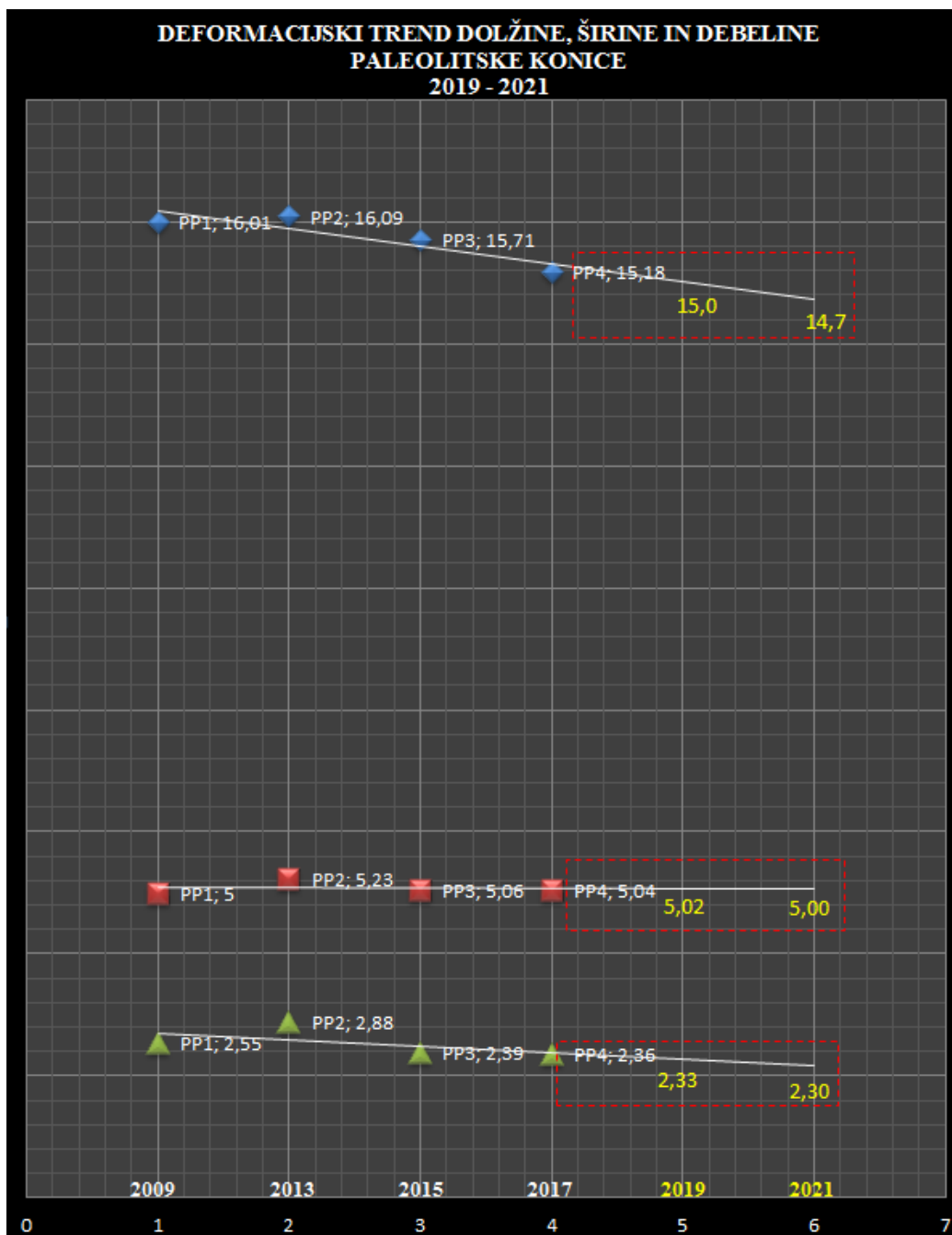
tudi stabilizacije. To je lahko tudi posledica zaključne faze konzerviranja (intenzivno toplotno in nato nadzorovano naravno sušenje) in uporabe izbranih konsolidacijskih sredstev (npr. melaminska smola). CT skeniranje artefakta je namreč opozorilo, da je notranja struktura konice močno degradirana in da določeni deli niso bili enakomerno konzervirani. Sklepamo lahko, da še vedno poteka nenadzorovano delovanje notranjih sil konice z različno stopnjo dinamike in odzivanja v longitudinalni, radialni in tangencialni smeri arheološkega lesa. Gre zgolj za hipotezo, ki presega domet te naloge, ki je usmerjena predvsem na ugotavljanje sprememb na površini 3D modelov artefakta. Vendar posamezne meritve in grafične primerjave sprememb kažejo na možnost, da v notranjosti konice potekajo deformacijski procesi, ki jih lahko „post festum“ spremljamo tudi z volumetričnimi meritvami in primerjavami 3D modelov konice.



	PP-2013		PP-2015		$\Delta$ (PP-2015 – PP-2013) / PP-2013
l:	160,958 $\mu m$	l:	152,709 $\mu m$		-5.12%
b:	52,274 $\mu m$	b:	50,594 $\mu m$		-3.21%
h:	28,810 $\mu m$	h:	23,956 $\mu m$		-17.20%
Volumen:	80,404 $\mu m^3$	Volumen:	66,383 $\mu m^3$		-17.44%

Slika 6.5: Primerjava med modeloma konice PP-2013 in PP-2015.

Dodatno je izvedena primerjava med modeloma PP-2013 in PP-2015 (slika 6.5), ki v deformacijski analizi najbolj izstopata, in modelom PP-



Slika 6.6: Simulacija deformacije konice do leta 2021 (v cm)

◇ - dolžina, □ - širina, △ - debelina



2017, ki naj bi predstavljal stanje konice po zaključku konzerviranja. Meritve kažejo, da je bil artefakt pomembno deformiran in degradiran v časovnem intervalu 2013 (začetek konzerviranja) in 2015 (zaključek konzerviranja). Dve leti po zaključku konzerviranja (2017) se naj bi proces degradacije in deformacije arheološkega lesa stabiliziral in umiril. Dinamika se je v tem intervalu pomembno zmanjšala. Dve leti po zaključku konzerviranja je konica tanjša po debelini za 1,14% (0,2 mm), krajša po dolžini za 0,62% (0,9 mm) in ožja po širini za 0,5% (0,3 mm). S podobnimi težavami so bili soočeni arheologi tudi pri odzivanju arheološkega lesa na postopek konzerviranja pri Clactonskem kopju (Anglija) in neandertalskem lesenem orodju iz Aranbaltze (Španija).

Volumetrične meritve dimenzij modelov (2013–2017–2018) kažejo, da je bila dolžina artefakta leta 2017 za 5,74% (9,190 mm) krajša, širina za 3,68% (1,926 mm) in debelina za 18,34% (5,225 mm). Prišlo je tudi do ukrivitve oz. deformacije nasadnega dela in vrha konice. Dolgoročno pomeni to nevarnost loma ali celo razpada konice. Konica je bila leta 2017 v navidezno stabilnem stanju. Proces degradacije in deviacije sta kazala na manjšo dinamiko kot v letih 2013–2015. Ker je dvoletna dinamika degradacije in deviacije leta 2017 opozorila na možnost postopne stabilizacije arheološkega lesa po konzerviranju, smo izvedli še primerjavo z modelom PP-2018. Te meritve pa so zavrnile delovno hipotezo o začetku stabilnega stanja konice. Volumetrične vrednosti so pokazale, da proces deformacije napreduje in še ne kaže tendence umirjanja. Tako se je v enoletnem intervalu po modeliranju PP-2017 dolžina konice dodatno skrajšala za 1,3 mm, debelina za 1,2 mm, medtem ko je konica po širini tanjša za skoraj 2 mm.

Na podlagi teh meritev smo izračunali možni deformacijski trend konice v naslednjih štirih letih. V tem času lahko pričakujemo ali stabilizacijo konice ali pa njen kolaps. Izdelava novih 3D modelov bi lahko to potrdila ali ovrgla. Glede na linearno trendno napoved (slika 6.6) pričakujemo v naslednjih letih (2019 in 2021), če ne bo dodatnih korekcijskih in zaščitnih posegov na konici, skrajšanje konice po dolžini na 15 oz. 14,7 cm, po širini na 5,02 oz. 5,0 cm ter po debelini na 2,33 cm oz. 2,30 cm. Ne izključujemo, da bi te spremembe

tudi ob stabilizaciji arheološkega lesa v naslednjih desetih letih povzročile kolaps konice.

### 6.6.2 Volumen konice

Volumen konice potrjuje enak trend (tabela 6.3), kot smo ga lahko ugotovili pri dolžini, širini in debelini. V primerjavi z letom 2009 (PP-2009) se je volumen leta PP-2018 zmanjšal za 9,6%. Po konzerviranju ostaja namreč letna dinamika zmanjševanja volumna na limitu 2%. Na zmanjšanje volumna in s tem tudi mase konice vplivajo isti dejavniki, ki so povzročili spremembe njene dolžine, širine in debeline. Če namreč primerjamo 3D modela PP-2013 in PP-2018, je volumen sedanje konice kar za 20,6% manjši, medtem ko se je zmanjšal volumen iste konice v primerjavi z volumnom PP-2009 za 9,6%.

Tabela 6.3: Volumetrična primerjava volumna 3D modelov paleolitske lesene konice (2009-2018)

	PP-2009	PP-2013	PP-2015	PP-2017	pp-2018
	1	2	3	4	5
	$+\mu m^3 / \%$	$+\mu m^3 / \%$	$+\mu m^3 / \%$	$+\mu m^3 / \%$	$+\mu m^3 / \%$
V	70653,6	80404,1	66382,8	65238,9	63871,9
V +-%	$\alpha$	+9751 +13,80%	-4271 -6,05%	-5414 -7,66%	-6781 -9,60%
		$\alpha$	-14022 -17,44%	-15166 -18,86%	-16532 -20,56%
			$\alpha$	-1145 -1,72%	-2511 -3,78%
				$\alpha$	-1367 -2,1%

### 6.6.3 Rizične deformacije konice

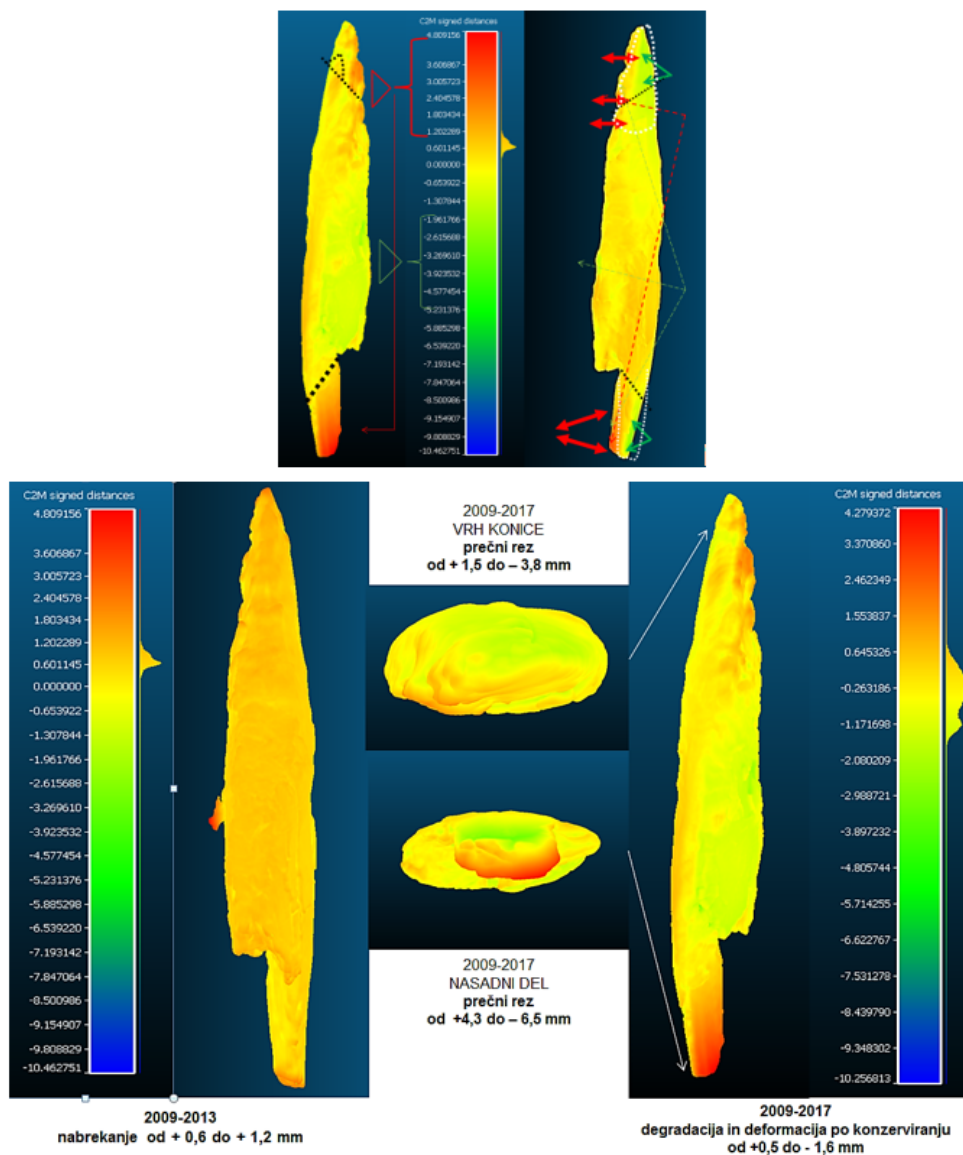
Meritve rizične deformacije konice smo opravili z algoritmom C2M (cloud-mesh). Primerjali smo prvi, drugi in četrti model. Drugi model je zaradi intenzivnega namakanja (priprava na konzerviranje) močno nabrekli ter izraziteje spremenil svoje dimenzije (po dolžini + 3,44%, širini +1,41% in debelini 12,53%). Čeprav so bili prvi znaki deformacije konice delno nakazani že pri modelu PP-2015, lahko proces deformacije konice povsem jasno ugotovimo pri modelu PP-2017. Meritve so pokazale, da deformacijski procesi potekajo v dveh smereh: v smeri upogiba in v smeri krčenja konice. Izrazitejši je bil upogib nasadnega dela. Odklon na stičišču nasadnega dela in konice je znašal v primerjavi z modelom PP-2009 0,8 mm, medtem ko je bil njegov upogib na korenu nasadnega dela že 4,1 mm (6.7).

Še očitnejša je bila deviacija korenkega dela pri prečnem rezu. C2M algoritem je ugotovil manjši upogib zgornjega dela konice (cca 3 – 6 cm pod vrhom), ki ga do tedaj nismo opazili. CT sken je pri modelu PP-2018 dodatno izpostavil možno domnevo, da je ugotovljena deviacija na vrhu konice posledica dveh nasprotnih notranjih procesov v zgornjem in srednjem delu artefakta. Prvi je krčenje, drugi upogib. Ta dva procesa sta se intenzivirala v PP-2018 ter postala dejavnika rizične deformacije. Grafične primerjave (slika 6.8) dodatno izpostavljajo, da se srednji del konice neenakomerno krči (modri raster) in povzroča krivljenje zgornjega stranskega dela konice. Poleg tega pa je pri PP-2018 ugotovljeno, da deviacija spodnjega korenkega dela že napreduje v smeri stičišča nasadnega dela in konice (poudarjeni rdeči raster).

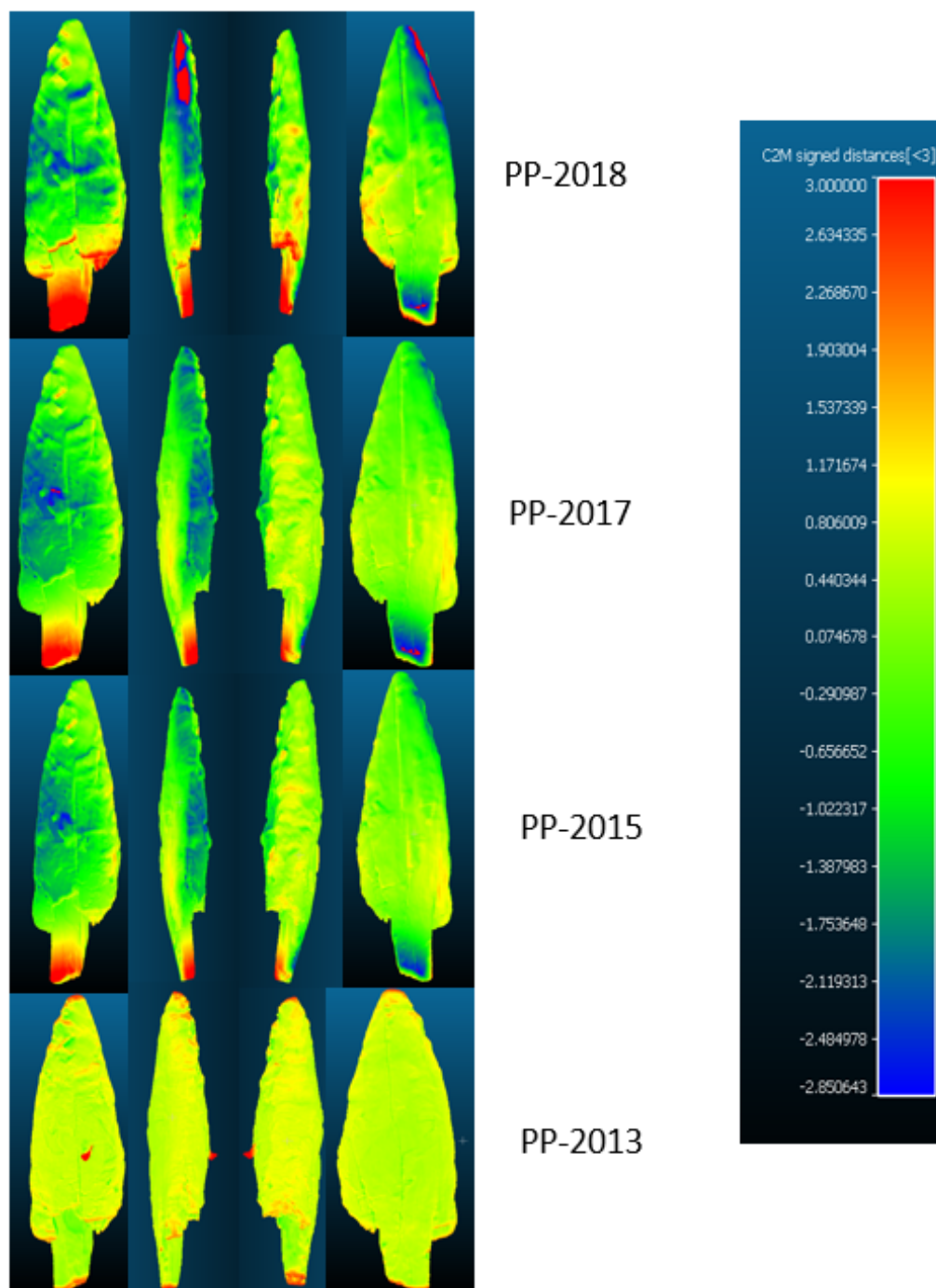
### 6.6.4 Stopnja ovalnosti (tabela 6.4)

Spremembe potrjuje volumetrična primerjava 3D modelov konice glede na stopnjo ovalnosti.

Po Pravilniku o merjenju in razvrščanju gozdnjih sortimentov (*Uradni list RS, 30/2017*) je ovalnost ali ovalni prerez razvrščen med naravne napake



Slika 6.7: Poudarjena deformacija konice



Slika 6.8: Dinamika deformacije konice

lesa. Stopnja ovalnosti opozarja na nenaravno preoblikovanje lesa. V našem primeru lesene konice tudi s strani človečnjaka. Ovalnost lesnega sortimenta (hlod, veja) je opredeljena kot razlika med večjim (D) in manjšim (d) premerom, ki je izmerjen s premerko na sredini sortimenta (v našem primeru na sredini konice – op.). Pri iglavcih govorimo o naravni napaki lesnega sortimenta, ko je ovalnost (O) večja od 10%, pri listavcih pa, ko je ovalnost (O) večja od 20%.

Stopnjo ovalnosti izračunamo po formuli  $O = (D-d)/D \times 100$  (%).

	PP-R2008	PP-2009	PP-2013	PP-2015	PP-2017	PP-2018
	0	1	2	3	4	5
O (ovalnost)	50,4	48,9	44,9	52,9	53,1	53,1
O < 10 nDEF		$\alpha$	-8,1%	+8,1%	+8,8%	+8,8%
			$\alpha$	+17,8%	+18,0%	+18,0%
				$\alpha$	+0,6%	0,6%
					$\alpha$	0,0%

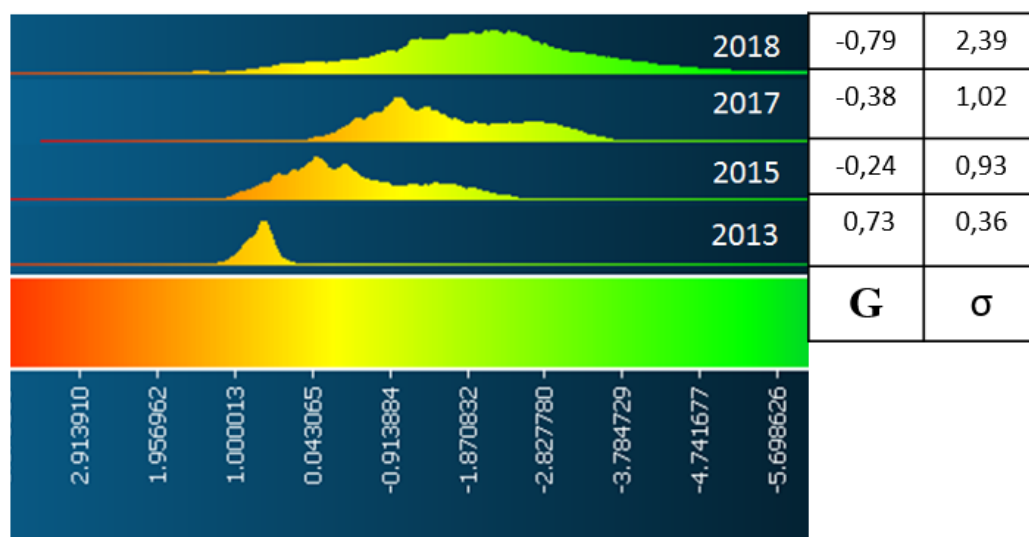
Tabela 6.4: Volumetrična primerjava ovalnosti 3D modelov paleolitske lesene konice

Ovalnost je bila pri modelu PP-2013, ki je bil izpostavljen postopku namakanja (nabrekanje), 44,9%. Pri modelu PP-2015 (po zaključku konzerviranja in po fazi sušenja) je bila stopnja že 52,9%, leto dni kasneje pri PP-2017 pa 53,1%. Enako stopnjo ovalnosti ohranja model PP-2018. Leta 2008 je analogno izmerjena ovalnost konice v povprečju znašala 50,4%. Ker je bila konica od odkritja do prvega 3D modeliranja potopljena v destilirano vodo, je bila na ta način izpostavljena naravnemu procesu namakanja arheološkega lesa (stopnja ovalnosti PP-2009 je bila 48,9%).

Med postopkom konzerviranja se je stopnja ovalnosti konice povečala za 8% (od 44% na 52,9%). Spreminjanje ovalnosti potrjuje značilen proces degradacije konice, ki je v korelacijski zvezi z drugimi volumetričnimi meritvami in primerjavami. Stopnja ovalnosti kaže na poudarjeno tanjšanje konice po debelini.

### 6.6.5 Dinamika sprememb

Na kratko povzemamo grafično in statistično predstavitev dinamike deformacijskih sprememb paleolitske konice od leta 2009 do 2018.



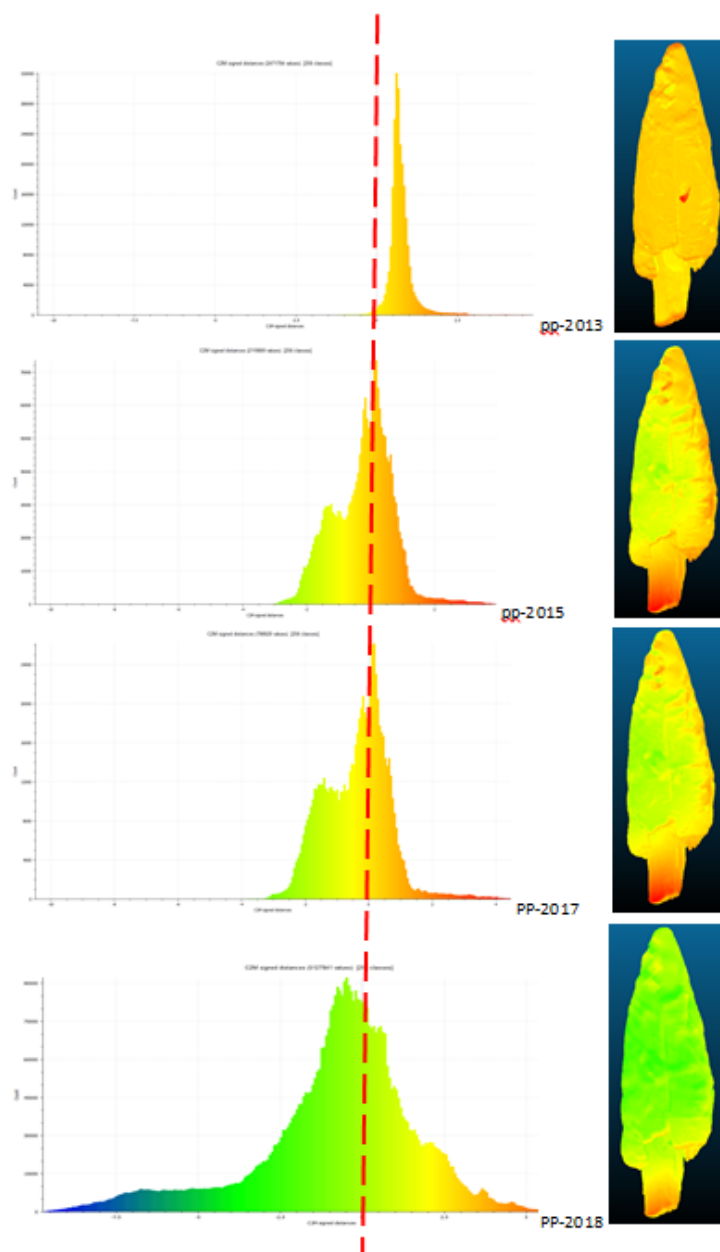
Slika 6.9: Dinamika sprememb po začetku postopka konzerviranja - 1.

G - geometrična sredina vrednosti razlik točk v primerjavi s PP-2009

$\sigma$  - standardni odklon za izračunano geometrično sredino

Predstavljeni podatki in grafični prikazi so tako zgovorni, da ne potrebujejo daljšega komentarja. Vsi pa potrjujejo (Slike 6.9, 6.10 in 6.11), da se je konica pomembno spremenila v zadnjih desetih letih. Da sta prisotna tako procesa deviacije kot degradacije. Podatki in meritve potrjujejo, da se konica po konzerviranju še ni stabilizirala, ampak se sooča z notranje nasprotnimi procesi, ki jih je potrebno skrbno nadzorovati in kontrolirati. Pripraviti bi bilo treba načrt zaščite konice, saj gre za preveč dragoceni artefakt svetovnega kulturnega pomena, da bi ga prepustili naravnim nenadzorovanim procesom, ki vodijo v možni kolaps konice.

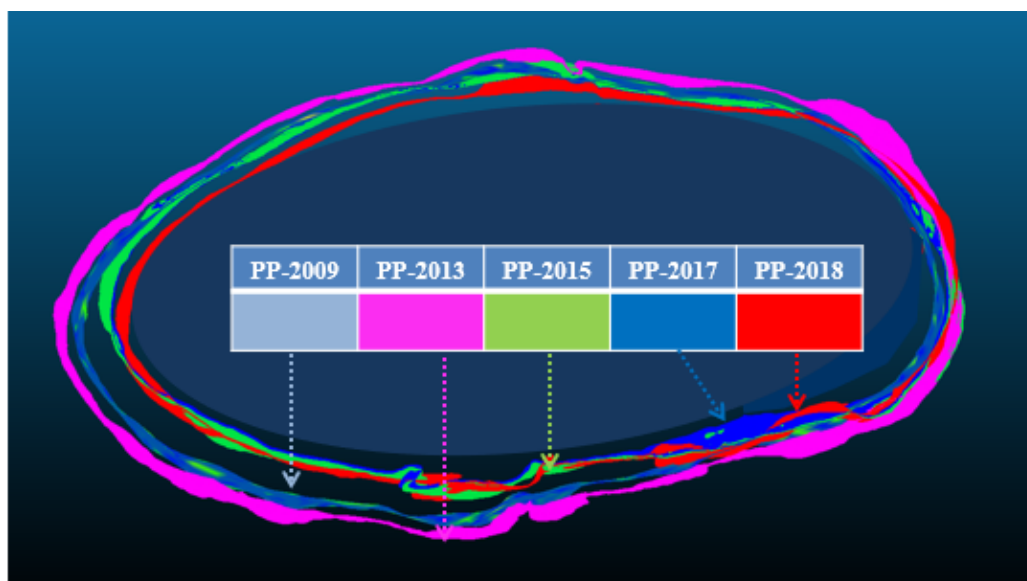
Na Sliki 6.9 smo grafično predstavili posebnosti sprememb, ki so bile povzročene z namakanjem konice, dodajanjem konsolidacijskih sredstev in sušenjem. Kot posledica namakanja je prišlo do povečanja dimenzij v raz-



Slika 6.10: Dinamika sprememb po začetku postopka konzerviranja - 2. Porazdelitev odklonov točk v primerjavi z modelom PP-2009.



ponu od 0,5 mm so 2,1 mm. Na to spremembo sta dodatno opozorili tudi geometrijska sredina ( $G=0,73$ ) in standardna deviacija ( $\sigma = 0,36$ ). Pri PP-2015 se je proces, ki smo ga ugotovili pri PP-2013 (nabrekanje), zaustavil ter prešel v nasprotni proces, tj. v proces krčenja. Na obrat kaže izračun geometrijske sredine ( $G = - 0,24$ ) in standardne deviacije ( $\sigma=0,93$ ). Ugotovili pa smo, da se je že pri modelu PP-2015 del konice upognil za 1 mm navznoter. Razpon spremembe dimenzij je v intervalu +1,4 in -1,8 mm. Proces krčenja in upogiba konice se ni ustavil pri PP-2017 ( $G= - 0,38$ ;  $\sigma = 1,02$ ). Razpon sprememb pri PP-2017 je potekal v intervalu + 0,04 in -3,7 mm. Dodatno pa se je proces krčenja intenziviral pri modelu PP-2018. Ta jasno izpostavlja proces ukrivljanja (med 1 in 2,9 mm) in proces krčenja (med - 1 in - 7,3 mm). To dodatno potrjujejo tudi podatki o geometrijski sredini ( $G= -0,79$ ) in standardni deviaciji ( $\sigma=2,39$ ). Slika 6.10 kaže enake značilnosti, kot smo jih ugotovili pri sliki 6.9.



Slika 6.11: Dinamika sprememb – prečni rez

Rezultate volumetričnih meritev in primerjav dopolnjujemo s prečnim prerezom 3D modelov (slika 6.11).

Za grafično ponazoritev procesa nabrekanja in krčenja smo pri vseh petih

modelih naredili prečni rez sredine vseh petih 3D modelov konice. Zunanje robove prečnih rezov smo različno obarvali in jih nato združili v eno sliko (slika 6.11). Slika 6.11 potrjuje ugotovitve o spremembi dimenzij konice ter njenem krčenju. Največji obseg prečnega reza ima npr. 3D model PP-2013 (roza linija), ki odstopa od ostalih modelov tudi po vseh ostalih dimenzijah (l, d, b, V) zaradi že znanih razlogov (nabrekanje; priprava na konzerviranje). Nekoliko manjši obseg od PP-2013 ima rez PP-2009 (modrosiva linija). Obrisa obeh modelov sta po obliki skladna, čeprav se razlikujeta po dimenzijah med 1 do in 1,8 mm. Ta okoliščina je pomembna, ker dokazuje, da do deformacije artefakta še ni prišlo v časovnem intervalu 2009-2013, ko je bil artefakt hranjen predvsem v destilirani vodi in pri ustrezni temperaturi. Ugotovljena je nabreklost, ki pa ni vplivala na spremembo oblike konice.

Prvič lahko zasledimo izrazitejšo deformacijo artefakta, tj. spremembo oblike, na spodnji in vzdolžni bočni strani PP-2015. Na podlagi te okoliščine lahko sklepamo, da je deformacija konice nastopila po končanem namakanju konice, torej ali v sklepnih fazah dodajanja konsolidacijskega sredstva ali v fazi hitrega toplotnega in naravnega sušenja artefakta. Artefakt PP-2015 je prevzel novo obliko. Na tej obliki potekajo vsi nadaljnji deformacijski procesi, kar potrjuje relativna skladnost obrisov prečnega reza pri modelih PP-2015, PP-2017 in PP-2018.

\*\*\*

**Volumetrične meritve in grafične primerjave, ki smo jih opravili na petih 3D modelih, potrjujejo hipotezo, da je v desetih letih prišlo do spremembe dolžine, širine in debeline paleolitske konice, do zmanjšanja njenega volumna in s tem tudi njene mase ter tudi do spremembe oblike.**

## 6.7 Razprava

Volumetrični podatki in grafične geometrijske primerjave ter izračuni stopnje ovalnosti, geometrijske sredine in standardnega odklona petih 3D mo-

delov paleolitske konice so potrdili začetno delovno hipotezo, da je prišlo v desetletnem obdobju do deformacije in spremembe konice. Konica se je izraziteje deformirala v letih 2013 in 2015, tj. v času izvajanja oz. zaključevanja postopkov konzerviranja. V tem času je bila konica izpostavljena načrtovanim in nadzorovanim postopkom, kot so nabrekanje, utrjevanje z melaminsko smolo in sušenje. Spremembe so bile z volumetričnimi meritvami in primerjavami potrjene po dolžini, širini, debelini, ovalnosti in volumnu. Potrjene pa tudi s primerjavo prečnega reza vseh petih 3D modelov konice. Izrazita sprememba, ki se kaže v vidni deformaciji konice, je ugotovljena v nasadnem delu, kjer ugotavljamo izrazit upogib konice. Značilne znake nove deformacije ugotavljamo tudi na nekaterih drugih delih PP-2018.

Analiza oblaka in triangulacijske mreže točk 3D modelov nazorno kaže, kaj se je s konico dogajalo med začetkom in koncem konzerviranja (volumen se je npr. zmanjšal za 7,7%, dolžina za 5,2%, debelina za 7,8%). Z meritvami pa smo uspeli potrditi ugotovitve, da se je proces deformacije konice v zadnjih dveh letih po opravljenem konzerviranju delno umiril. Ta proces še vedno poteka (volumen  $-1,72\%/2$  leti, torej v povprečju  $-0,8\%/leto$  oz. v povprečju  $-0,6$  mm<sup>3</sup>/leto). Šele dodatna 3D modeliranja in primerjave bi lahko potrdile ali ovrgle domnevo o stabilnem stanju konice. To pomeni, da bi se lahko v daljšem časovnem obdobju soočili s kolapsom konice v obliki loma nasadnega dela in vrha konice.

Sprememba dimenzij konice pri modelu PP-2015 (konec konzerviranja) je bila pričakovana glede na izbrane postopke konzerviranja in izbor konsolidacijskih sredstev. Slednji so lahko negativno vplivali na odziv arheološkega lesa tise v longitudinalni, radialni in tangencialni smeri. Vendar ne v pričakovanem obsegu. Zato lahko že govorimo o deformaciji konice. Spremembe (zmanjšanje dimenzij in volumna) opozarjajo, da bi bilo primerno pri tako dragocenih in redkih artefaktih predhodno temeljito premisliti o novih in posameznim vrstam lesa prilagojenih postopkih konzerviranja, optimalnem izboru konsolidacijskega sredstva in tudi o načinu konzerviranja ter ustrežnejših pogojih hrambe artefakov iz arheološkega lesa.

Analiza 3D modelov konice je v celoti izpolnila naša pričakovanja tudi glede uporabe izbranih algoritmov (ICP, C2C, C2M, M3C2). Res je, da so ti vgrajeni v programsko orodje in delujejo avtomatsko glede na uporabnikov izbor, vendar omogočajo zanesljive dodatne analitične obdelave in primerjave, vključno s testiranjem hipotez.

Deviacijska analiza 3D modelov artefakta, ki je bila izvedena z grafičnim programskim orodjem CC, je potrdila domnevo o nastalih spremembah. Analiza bi lahko bila orodje in metoda t.i. deformacijskega monitoringa v procesih načrtovanja in izvajanju konzerviranja arheoloških ostalin in izboru načina hrambe. Da bi v celoti izpolnili kriterije uporabe deformacijskega monitoringa, bi morali zagotoviti enotno strojno, programsko in postopkovno standardizacijo 3D modeliranja v arheologiji.

Izbor programskega orodja CC je potrdil primernost njegove uporabe pri primerjavi artefaktov. Zadostil je zastavljenim kriterijem, arheologiji pa ponudil možnost njegove vključitve med standardna odprtokodna programska orodja pri analitičnih obravnavah 3D modelov artefaktov. CC se je izkazal tudi z večjo natančnostjo meritev artefakta, ki jih z analognimi orodji ni mogoče doseči. Skupaj z MeshLabom bi lahko CC predstavljal kvalitetno grafično programsko orodje pri 3D modeliranju v arheologiji.

Ob analitični primerjavi smo ugotovili tudi nekatere slabosti in pomanjkljivosti. Te so tesno povezane z vprašanjem nujnega zagotavljanja enotne metodologije in standardizacije pri izvajanju 3D modeliranja. Zlasti tedaj, ko načrtujemo dodatno analitično obravnavo 3D modelov. Ker je bila v ospredju našega interesa volumetrična analiza, ki edina lahko eksaktno dokaže hipotezo o deformaciji 3D modela, je to pomenilo dodatno težavo. Kvalitetnih in zanesljivih rezultatov in primerjav ni mogoče doseči v primerih, ko pred tem nismo zagotovili enotne standardizacije opreme in računalniških tehnik zajemanja podatkov ter enotnega izbora 3D formatov. Zaradi neupoštevanja temeljnih standardov snemanja smo dobili npr. pomanjkljiv 3D model, ki je po dolžini kar za 4,7 mm odstopal od dejanskih dimenzij skeniranega artefakta. Dolžino modela smo nato morali približati dejanski velikosti artefakta.

z izračunom dolžine diagonale v navideznem stožcu oz. kvadru. To je vplivalo na zanesljivost in natančnost volumetrične analize, ki smo jo izvajali v  $\mu\text{m}$ . Pomanjkljivost je predstavljala tudi uporaba dveh različnih formatov zapisa 3D modelov, saj programsko orodje CC pri uporabi formata STL ne zagotavlja celovite obravnave.



## Poglavje 7

# Ideje za nadaljnje delo in odprta vprašanja

Ugotovitve o konici, ki so bile pridobljene z računalniško analizo in primerjavo 3D modelov, zahtevajo skrben, premišljen, odgovoren in načrten odnos do ohranjanja in varovanja ostalin arheološke kulturne dediščine. Zlasti pri tistih redkih artefaktih, ki so zaradi posebnosti gradnikov (npr.: les, koža, kost, ipd.) bolj izpostavljeni nevarnosti degradacijskih in deformacijskih procesov. To pa je najtesneje povezano z nadaljnjimi postopki ravnanja z ostalinami ogrožene kulturne dediščine, kot so dokumentiranje, hranjenje v posebnih okoliščinah (npr. podvodne zbirke artefaktov, ipd.), konzerviranje z ustreznimi postopki, virtualizacija, ipd.

Uporaba odprtokodnega grafičnega programskega orodja CC lahko zagotovi arheologom zanesljive podatke za nadaljnjo interpretacijo. Omogoči pa jim lahko zanesljivejše in točnejše (do  $\mu\text{m}$ ) merjenje dimenzij artefakta. Zato bi lahko postala obdelava 3D modelov s programom CC eno od standardiziranih orodij pri pripravi arheoloških analiz in poročil.

V diplomski nalogi smo z analizo podatkov in njihovo primerjavo ugotovili letni trend procesa deformacije lesene konice. Ta znaša  $-0,57 \text{ mm}^3/\text{leto}$  ali  $-0,8\%$  letno, upogib konice pa  $-0,2\text{mm}/\text{leto}$ . Trend opozarja, da bi lahko prišlo ob nakazani sedanji dinamiki do kolapsa paleolitske konice v naslednjih

15-20 letih. Glede na poudarjen upogib konice na dveh delih (trn nasadnega del in vrh konice) bi bilo primerno nadaljevati s periodičnimi (na dve leti) 3D modeliranjem v formatu PLY. Za 3D modeliranje bi lahko uporabili MicroXCT 400 in 3D snemalnik ATOS, s katerima razpolaga Inštitut za gradbeništvo Slovenije. Ročni snemalniki z manjšim številom točk oblaka in triangulacijske mreže 3D modela ter nezanesljivo poravnavo skeniranega predmeta v kartezičnem koordinatnem sistemu niso primerni za analitično in raziskovalno delo v arheologiji.

Primerjalna analiza je opozorila na nujen premislek arheološke stroke o primernosti:

- vključitve 3D snemalnikov (ne samo LiDAR) in 3D modeliranja v začetno arheološko obdelavo,
- vzpostavitev nacionalnih digitalnih zbirk 3D modelov artefaktov (digitalne gliptoteke in datoteke artefaktov) v formatih, ki omogočajo nadaljnjo celovito obdelavo 3D modelov ter njihovo vključitev v evropski arheološki informacijski sistem,
- vključitve deformacijskega monitoringa v trajno spremljanje sprememb na artefaktih pred in po postopkih konzerviranja ter v nadaljnjih časovnih periodah, da bi pravočasno preprečili nepričakovana presenečenja,
- standardizacije 3D modelov v formatu PLY ali BIN.

V okviru strokovnega sodelovanja arheologije, računalništva in informatike bi bilo koristno pripraviti skupni raziskovalni program (razpis diplomskih, magistrskih in doktorskih nalog ter raziskovalnih tem), npr:

- primerjalna študija uporabnosti in primernosti odprtokodnih programov in algoritmov za obdelavo 3D modelov v arheologiji (CloudCompare, Meshlab, Blender, Maya. idr.),
- primerjava in morebitna posodobitev algoritmov ICP, C2C, C2M, M3C2, K-D-tree,



- izdelava in verifikacija programa interdisciplinarnega študija arheologije, informatike in računalništva (arheološke informatike, 3D informatike in virtualna arheologija); Interdisciplinarni mednarodni študijski program arheologije, računalništva in informatike ... (z možnostjo mednarodne izmenjave: Sorbona, Stratford, Oxford, York, Birmingham ...),
- oblikovanje skupine arheologov, računalničarjev in informatikov za pripravo normativov in standardov uporabe računalniške strojne in programske opreme ter izdelavo načrta razvoja IT aplikacij, ki bi izboljšale terensko in laboratorijsko delo v arheologiji,
- organiziranje strokovnega posveta ali simpozija o leseni paleolitski konicni, na katerem bi problematiko paleolitskih lesenih artefaktov obravnavali s strani računalniške, informacijske, arheološke, arhivarske, konzervatorske, tehnološke, fizikalne, kemijske, lesarske in biološke stroke,
- organiziranje mednarodnega simpozija na temo uporabe in obdelave lesa v paleolitiku, kjer bi izkušnje, spoznanja in raziskovalne rezultate izmenjali strokovnjaki, ki so proučevali, raziskovali in konzervirali paleolitske lesene artefakte v Evropi.

Raziskava in študija primera je v celoti potrdila primernost implementacije izpostavljenih računalniških tehnologij in informacijskih metod v sodobno arheološko stroko. V skladu z *Londonsko listino* in *Seviljskimi načeli* bi bilo primerno nakazan pristop analitične obravnave 3D modelov z odprtokodnimi računalniškimi grafičnimi orodji vključiti tudi v nacionalne akte, ki določajo in urejajo metode, postopke in tehnike iskanja arheoloških ostalin in uporabo tehničnih sredstev pri tem (v Republiki Sloveniji npr.: *Pravilnik o iskanju arheoloških ostalin in uporabi tehničnih sredstev za te namene* (Uradni list RS, št. 0070-11/2014/19)).



# Poglavje 8

## Zaključek

Z diplomsko nalogo smo v uvodnih poglavjih potrdili pomembno soodvisnost arheologije, računalništva in informatike. Njuno tesno sodelovanje v preteklosti pomembno vpliva na sodobno delo arheologov. Računalništvo in informatika postajata nepogrešljivi sestavini tako terenskega kot laboratorijskega dela arheologov. Z novimi programskimi orodji in 3D tehnologijami, ki jih ponujata arheologiji računalništvo in informatika, so arheološkemu delu zagotovljene nove možnosti zanesljivejšega in verodostojnejšega vrednotenja, primerjanja, interpretiranja in predstavljanja ostalin arheološke kulturne dediščine. Ne le virtualizacija gibljive in negibljive kulturne dediščine, ampak tudi sodobni načini njene analize in interpretacije, vse tesneje povezujejo delo arheologa, računalničarja in informatika. Odpirajo nove možnosti in nova obzorja ter širijo znanje o materialni in kongnitivni kulturi človeka in njegovih hominidnih prednikov. EU ponuja arheologiji ter računalništvu in informatiki s svojo politiko na področju ohranjanja kulturne dediščine enkratno priložnost. Uveljavita in postaneta lahko zgled bodoči integrirani humanistično-naravoslovni znanosti, ki z roko v roki koristi najsodobnejše dosežke človekovega tehnološkega razvoja.

Naši rezultati in opravljene primerjave so potrdile začetno hipotezo o spremembah, ki so nastale na artefaktu po odkritju in izločitvi iz njegovega naravnega okolja oz. nahajališča. Ugotovljene razlike in spremembe (npr.

upogib in deformacija, spremembe v preseku, idr.) so z volumetričnimi meritvami in grafičnimi primerjavami nazorno potrdile začetno hipotezo.

Izbrana programska oprema (CC) je izpolnila pričakovanja o njeni primernosti, uporabnosti in koristnosti pri arheološki analizi in vrednotenju ostalin kulturne dediščine. CC in MeshLab bi lahko postala zanesljiva pripomočka, s katerima bi izpolnili vse kriterije in nivoje analitične obravnave 3D modelov v arheologiji. Medtem ko lahko MeshLab uspešno uporabimo pri korekcijah, analizi in meritvah 3D modelov, je CC učinkovito programsko orodje pri deformacijski analizi in primerjavi 3D modelov.

Ugotovitve in spoznanja študije terjajo skrben in odgovoren pristop stroke in nacionalnih državnih ustanov h kar se da verodostojni ohranitvi in predstavitvi 40.000 let stare ostaline, ki predstavlja enega od osmih lesenih artefaktov paleolitika v svetu ter je neprecenljiva vrednost za nacionalno in svetovno kulturno dediščino. Uspešna uporaba 3D grafičnih programskih orodij in tehnologij v raziskavi zahteva od arheološke in informacijske stroke:

- tehten premislek glede bodoče uporabe metod, sredstev in tehnik pri načinih hranjenja, konzerviranja in javnega predstavljanja ostalin arheološkega lesa ter
- skupno oceno potrebne standardizacije 3D opreme, 3D programskih orodij in 3D tehnik modeliranja pri terenski obravnavi, razvrščanju, analiziranju, dokumentiranju, rekonstruiranju ter vizualiziranju in arhiviranju arheoloških ostalin.

**Naj zaključimo z mislijo:**

*„The 21st century archaeologists are no longer excavators: they integrate other disciplines such as history, epigraphy, geography, anthropology, ethnology, economy, agronomy, physics, chemistry, mathematics, computer science, etc.“*

**François Djindjian**





# Literatura

- [1] Daniel Arroyo-Bishop. The archéodata system—towards a european archaeological document. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, pages 61–70, 1990.
- [2] Geoffrey John Avern. A new technique for recording archaeological excavations: Research progress report. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 931:3–8, 2001.
- [3] PC Barker. An exact method of describing metal weapon points. In *Proceedings of the Annual Conference Organised by the Computer Centre University of Birmingham*, pages 3–8, 1975.
- [4] Richard Beacham, Hugh Denard, and Francesco Niccolucci. An introduction to the London charter. *Joint Event CIPA/VAST/EG/EuroMed*, 2006.
- [5] Chryssoula Bekiari, Christina Gritzapi, and Dimitrios Kalomoirakis. Polemon: A federated database management system for the documentation, management and promotion of cultural heritage. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 757:317–330, 1999.
- [6] Paul J. Besl and Neil D. McKay. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2):239–256, Feb 1992.
- [7] Paul J Besl and Neil D McKay. Method for registration of 3-d shapes. In *Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures*, volume

- 1611, pages 586–607. International Society for Optics and Photonics, 1992.
- [8] Andreas Brunn and Martin Schaich. Archaeocad, archaeomap, archaeodata an integrated archaeological information system. *Beyond the artifact. Digital interpretation of the past. Proceedings of CAA*, pages 86–93, 2004.
- [9] Francesca Cantone. 3D standards for scientific communication. *BAR International Series*, 1016:163–172, 2002.
- [10] J Cornforth, C Davidson, CJ Dallas, and GR Lock. 30. Visualising ancient Greece: computer graphics in the Sacred Way Project. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, page 219, 1991.
- [11] Patrick Daly and Thomas L Evans. *Digital archaeology: bridging method and theory*. Routledge, 2004.
- [12] Ken Delooze and Jason Wood. Furness abbey survey project—the application of computer graphics and data visualisation to reconstruction modelling of an historic monument. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, pages 141–148, 1990.
- [13] Hugh Denard et al. The London Charter for the computer-based visualisation of cultural heritage. *no. February*, pages 1–13, 2009.
- [14] François Djindjian. Artefact analysis. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 931:41–52, 2001.
- [15] François Djindjian. Computers and mathematics in archaeology, anatomy of an ineluctable success. *CAA2014: 21st Century Archaeology—Concepts, Methods and Tools*, pages 1–6, 2015.
- [16] Florent Duguet, George Drettakis, Daniel Girardeau-Montaut, Jean-Luc Martinez, and Francis Schmitt. A Point-Based Approach for Capture, Display and Illustration of Very Complex Archeological Artefacts. In



- Y. Chrysanthou, K. Cain, N. Silberman, and F. Niccolucci, editors, *VAST 2004: The 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*. The Eurographics Association, 2004.
- [17] Graeme Earl, Tim Sly, Patricia Chrysanthi, Patricia Murrieta-Flores, Constantinos Papadopoulos, Iza Romanowska, and David Wheatley. *Archaeology in the digital era: papers from the 40th Annual Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Southampton, 26-29 March 2012*. Amsterdam University Press, 2014.
- [18] Miran Erič and Andrej Gaspari. *Sinja Gorica: poročilo o arheološkem podvodnem pregledu struge reke Ljubljanice na območju zavarovanja desne brežine ob Sinjgoriških ribnikih*. Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, 2009.
- [19] Miran Erič, Andrej Gaspari, Katarina Čufar, Franc Solina, and Tomaž Verbič. Zgodnjerimska ladja iz ljubljaniice pri sinji gorici= early roman barge from the ljubljaniica river at sinja gorica. *Arheološki vestnik*, 65:187–254, 2014.
- [20] Miran Erič, Rok Kovačič, Gregor Berginc, Mitja Pugelj, Žiga Stopinšek, and Franc Solina. The impact of the latest 3D technologies on the documentation of underwater heritage sites. In *Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress, Marseille, France*, pages 281–288. IEEE, 2013.
- [21] Giulio Fabricatore and Francesca Cantone. Pushing the archaeological interpretation by analysing workflow protocols: the variable transparency image stacker and datarch© archaeological data management system. 2008.
- [22] H Fluck. Initial observations from experiments into the possible use of fire with stone tools in the manufacture of the clacton point. *Lithics—The Journal of the Lithic Studies Society*, (28):15, 2015.

- [23] KEVW FLUDE. Problems in archaeological computing'. In *Computer Applications in Archaeology*, pages 7–14, 1983.
- [24] Maurizio Forte and A Siliotti. Virtual archaeology. *New York: Harry N. Abrams*, 1997.
- [25] Andrej Gaspari. *Zalog pri Verdu/Zalog near Verd: Tabor kamenodobnih lovcev na zahodnem robu Ljubljanskega barja/Stone Age hunters' camp at the western edge of the Ljubljansko barje*, volume 11. Založba ZRC, 2006.
- [26] Andrej Gaspari, Miran Erič, and Boštjan Odar. A palaeolithic wooden point from ljubljansko barje, slovenia. *Benjamin J, Bonsall C, Pickard C, Fischer A (Oxbow Books, Oxford)*, pages 186–192, 2011.
- [27] Juan M Carrillo Gea, Ambrosio Toval, José L Fernández Alemán, Joaquín Nicolás, and Mariano Flores. The london charter and the seville principles as sources of requirements for e-archaeology systems development purposes. *Virtual Archaeology Review*, 4(9):205–211, 2013.
- [28] Daniel Girardeau-Montaut, Michel Roux, Raphaël Marc, and Guillaume Thibault. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(part 3):W19, 2005.
- [29] NS Hall and Susan Laffin. A computer aided design technique for pottery profiles. In *Computer applications in archaeology*, pages 178–188. Computer Center, University of Birmingham Birmingham, 1984.
- [30] Sorin Hermon and Joanna Nikodem. 3d modelling as scientific research tool in archaeology. In *CAA Conference Proceedings, Berlin*, 2007.
- [31] Christoph Holst, Berit Schmitz, and Heiner Kuhlmann. Tls-basierte deformationsanalyse unter nutzung von standardsoftware. *Terrestrisches Laserscanning*, 2016.

- [32] Aleš Jaklič, Miran Erič, Igor Mihajlović, Žiga Stopinšek, and Franc Solina. Volumetric models from 3d point clouds: The case study of sarcophagi cargo from a 2nd/3rd century ad roman shipwreck near sutivan on island brač, croatia. *Journal of Archaeological Science*, 62:143–152, 2015.
- [33] Ulrich Kampffmeyer. *ARCOS: A Video-computer-documentation System for the Use in Archaeology and Historic Sciences*. Büro für Archäologie und Informatik in den Kulturwissenschaften= BAIK, 1986.
- [34] Boris Kavur. Prispevek lesene najdbe iz ljubljance pri sinji gorici za kulturno zgodovino palaeolithic wooden object from the ljubljana at sinja gorica and its significance for cultural history. *Uredila Andrej Gaspari in Miran Erič*, page 239.
- [35] Dimitri Lague, Nicolas Brodu, and Jérôme Leroux. Accurate 3d comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the rangitikei canyon (nz). *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 82:10–26, 2013.
- [36] Irena Leban. Napake v lesu.
- [37] Thomas E Levy and Neil G Smith. On-site digital archaeology: Gis-based excavation recording in southern jordan. *Crossing Jordan: North American contributions to the archaeology of Jordan*, pages 47–58, 2007.
- [38] Frederic F Leymarie, David B Cooper, Martha Sharp Joukowsky, Benjamin B Kimia, David H Laidlaw, David Mumford, and Eileen L Vote. The shape lab: New technology and software for archaeologists. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 931:79–90, 2001.
- [39] Gary Lock. Archaeological computing, archaeological theory, and moves towards contextualism. *BAR International Series*, 600:13–13, 1995.
- [40] Gary Lock. *Using computers in archaeology: towards virtual pasts*. Routledge, 2003.

- 
- [41] Franco Niccolucci and Marco Crescioli. Petra 3.0 and the crusader border: new features of the petra archaeological dbms. *Computer Applications in Archaeology'99 (Dublino 1999)*, 1999.
- [42] OF SEVILLE PRINCIPLES. International principles of virtual archaeology, 2013.
- [43] Sebastian PQ Rahtz. Possible directions in electronic publishing in archaeology. In *CAA*, volume 86, pages 3–13, 1986.
- [44] Paul Reilly. Towards a virtual archaeology. In *Computer Applications in Archaeology*, pages 133–139. Oxford: British Archaeological Reports, 1990.
- [45] Paul Reilly and S Shennan. Applying solid modelling and animated three-dimensional graphics. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 1989:157–165, 1989.
- [46] Julian Richards. Into the black art: achieving computer literacy in archaeology. *Computer Applications in Archaeology 1986*, 1986.
- [47] Nick Ryan. Beyond the relational database: Managing the variety and complexity of archaeological data. *Computer applications and quantitative methods in archaeology*, pages 1–6, 1991.
- [48] NS Ryan. A bibliography of computer applications and quantitative methods in archaeology. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 1988.
- [49] Irwin Scollar. 25 years of computer applications in archaeology. In *Dingwall, S. Exon, V. Gaffney, S. Laflin and M. van Leusen (eds) Archaeology in the Age of the Internet. CAA97. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 25th Anniversary Conference, University of Birmingham*, pages 5–10, 1997.

- [50] Dick Spicer. Computer graphics and the perception of archaeological information: Lies, damned statistics and... graphics. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology-CAA*, 87, 1988.
- [51] Žiga Stopinšek. Uporabnost 3d merilnikov v kulturni dediščini. diplomsko delo, 2012.
- [52] Žiga Stopinšek. Segmentacija in rekonstrukcija kulturne dediščine iz fotogrametrično pridobljenega oblaka toč. Master's thesis, Univerza v Ljubljani, 2016.
- [53] Žiga Stopinšek, Gregor Berginc, Miran Erič, and Franc Solina. Uvajanje 3d tehnologij pri varstvu kulturne dediščine. article. 2013.
- [54] Žiga Stopinšek, Lara Prusnik, Gorazd Rajar, Gregor Berginc, Luka Šajn, Miran Erič, and Franc Solina. Fotogrametrično zajemanje 3d podatkov. article. 2014.
- [55] Seta Štuhec. *Dvoipolrazsežnostna (2, 5D) in trirazsežnostna (3D) vizualizacija artefaktov*. PhD thesis, S. Štuhec, 2012.
- [56] Blaž Vidmar. *Analiza uporabnosti fotogrametrično določenega oblaka točk za izdelavo 3D modela objekta kulturne dediščine*. PhD thesis, Univerza v Ljubljani, 2014.
- [57] John D Wilcock. Getting the best fit? 25 years of statistical techniques in archaeology. In *Archaeology in the Age of the Internet. CAA97. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 25th Anniversary Conference (Birmingham 1997)*, BAR International Series, volume 750, pages 35–52, 1999.
- [58] Germa Wünsch. Debating about the graphic representation of the spatial distributions of points: 3-d vs. 2-d. *BAR INTERNATIONAL SERIES*, 757:171–174, 1999.

- [59] Lovro Zajec. Rekonstrukcija arheoloških najdb s pomočjo 3d tehnologij: diplomsko delo, 2013.

## Poglavje 9

## Priloge

Slika 9.1: Priloga 1

## PRILOGA 1

Pregled zbranih statističnih kazalnikov vsebine člankov, objavljenih v on-line zbornikih *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* v letih 1973-1996  
(Avtor: Irwing Scollar (1))

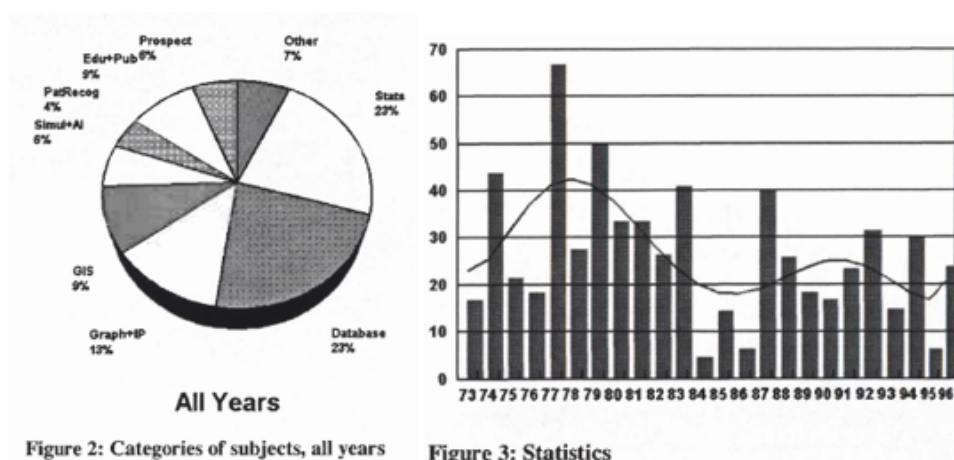


Figure 2: Categories of subjects, all years

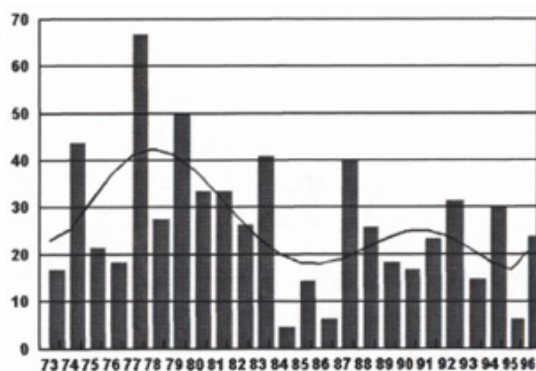


Figure 3: Statistics

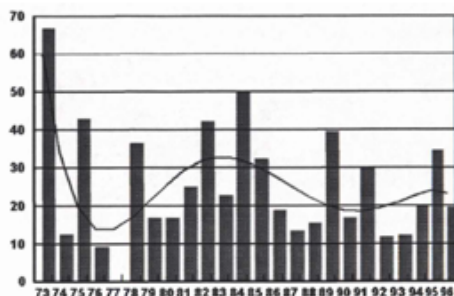


Figure 4: Database

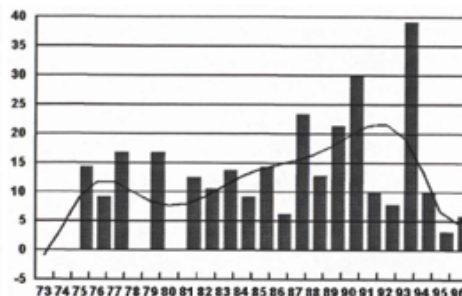


Figure 5: Graphics, Image Processing

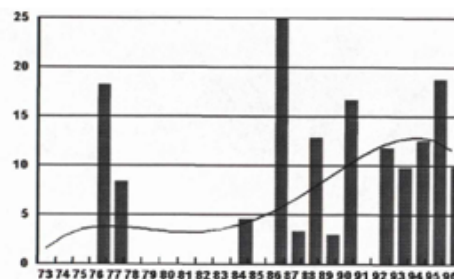


Figure 6: Education, Publication, The Web

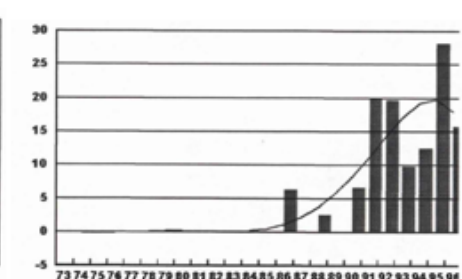


Figure 7: Geographic Information Systems (GIS)



Slika 9.2: Priloga 2

## PREGLED NAJPOGOSTEJE STANDARDIZIRANE RAČUNALNIŠKE STROJNE IN PROGRAMSKE OPREME IN Z NJO POVEZANIH STANDARDOV V ARHEOLOGIJI V LETIH 1950-2018

	1945/50 - 1964	1965 - 1986	1986 - 2000	2000-2018	2018 -	
	KVANTITATIVNA ARHEOLOGIJA	RAČUNALNIŠKA ARHEOLOGIJA	ARHEOLOŠKA INFORMATIKA	3D ARHEOLOGIJA	KIBERNETSKA ARHEOLOGIJA	
	ARHEOLOGI + MATEMATIKI		IT-ARHEOLOGI	ARHEOLOGI + IT STROKOVNJAKI + IT RAZVIJALCI		
RG	1RG	2RG	3RG	4RG	5RG	6RG
STr-So	ZGOLJ UPORABA ZA STAT. OBDELAVO IN UREJANJE PODATKOV ENIAC, UNIVAC, IBM-1401	MIKRORAČUNALNIK: MIDAS 3HD MIKROPROCESOR: Z80A 4MHZ, 64 KBYTE RAM TRDI DISK - 20MBYTE; GIBKI DISK 1MBYTE OPERAC.SISTEM: CPM 2.2 AMSTRAD 8256 IN 6128.	SISTEM TERENSKE MREŽE RAČUNALNIKOV IBM PC/XT, FOTOAPARAT	3D SKENERJI (VEKTORSKA GRAFIKA) GIS SHAPESNATCHER FROM ELECTRONICS; METRIC 3D RECONSTRUCTION ELECTRONICS; LEICA CYRAX 2500 - SKENER. MIMI CT		
STi-Po	COBOL, ALGOL, FORTRAN,	IBM RS6000 RISC JEZIKI: BASIC, C, COBOL, FORTRAN, PASCAL, PROLOG, APLS PAKETI: DBASE II PAKETI: MINISTAR, OBDELAVA BESEDIL, INFORMACIJSKO DOKUMENTALISTIČNI SISTEM, OBDELAVA BAZ PODATKOV, STRATA	SISTEM WINDOWS ALI MACINTOSH PROGRAMSKA: DBASEII, MS DOS, UNIX, OS/2, SQL, C, C++, SIMULA PROGRAMSKA: MS-PASCAL, DBASE IV, GW-BASIC, WORDSTAR 2000, NOTEPAD, WORWISE, GIS, GIS-DBTOOLS, SPSSX, ES-VANDAL, 3D, AUTOCAD	3D MODELIRANJE (ZA CH) 3D REKONSTRUKCIJA 3D VOLUMET. MOD. JAVA, SQL, MYSQL, UBUNTU, VRML STANDARD AUTOCAD, ARCHAECAD, ARCHAEOAPP, ARCHAEODATA, AIS LIDAR		

## PREGLED NAJPOGOSTEJE STANDARDIZIRANE RAČUNALNIŠKE STROJNE IN PROGRAMSKE OPREME IN Z NJO POVEZANIH STANDARDOV V ARHEOLOGIJI V LETIH 1950-2018

		ALGORITEM 3D HISTOGRAMA, GIS, SPSS, WORDSTAR,	MODELIRANJE, WINDOWS, ORACLE VMESNIKI GEM, MICROSOFT WORKS, PARADOX, AVTOCADM QUATTRO, LOTOS123 STANDARD STROK. ČLANKA SISTEM ARCOS GRAFIKA: GRAPHICAL KERNEL SYSTEM - STANDARD ISO 7942 ARHEODATA SYSTEM (EU) LATEX FORMATI: BMP, TIF, GIF, JPG, TGA WEB ORODJA, HTML	3D PROTOKOLI WEB 2.0, WEB 3.0 FORMATI: ASCII, DXF, MPEG 1, 2, 4, NTF IN OBJ	
STa-Bp	DELOVNE BAZE PODATKOV ZA STAT. OBDELAVO IN RAZVRŠČANJE DOKUMENTACIJSKI SISTEMI STANDARDIZIRANE STATISTIČNE METODE, KI PA SO SE V VEČINI PRIMEROV OMEJILE NA UPORABO KALKULATORJA IN SE ŠELE PO LETU 1958 IZVAJAJO S POMOČJO RAČUNALNIŠKE 2.GENERACIJE	DATEL BAZE PODATKOV: ZRAČNI POSNETKI, SERIACIJA, TOPOGRAFSKE RELACIJSKE BAZE BRITANSKI KNJIŽNIČNI SISTEM MDS ZAŠČITA PODATKOV UNESCO - VPRAŠALNIK	JAVNI DOSTO DO ANG-ARHEOLOŠKEGA ARHIVA IN GRAFIČNIH ZBIRK ARTEFAKTOV VIDEO ARHIV REGISTER POMORSKEGA GRADIVA DOSTOP DO GRADIV CAA (BIBTEX); ENOTNA EVIDENCA ARTEFAKTOV (GB) - (ORACLE /SQL PLUS.)	CH - SKUPNI EVROPSKI VIRI POBUDA; 3D STANDARD CH UNESCO LONDONSKA LISTINA, SEVILJSKA NAČENA, ... VALLETSKA KONVENCIJA	
ST-Op ST-Omp		ANALIZA GROZDOV; FAKTORSKA ANALIZA, ANALITIČNA STATISTIKA, K-ANALIZA	STATISTIČNE PRIMERJAVE IN ANALIZE; INTEGRIRANA BAZA PODATKOV		

## PREGLED NAJPOGOSTEJE STANDARDIZIRANE RAČUNALNIŠKE STROJNE IN PROGRAMSKE OPREME IN Z NJO POVEZANIH STANDARDOV V ARHEOLOGIJI V LETIH 1950-2018

ST-A	OSNOVNA STATISTIKA, SERIACIJA, RISBA, MERITVE				
------	---	--	--	--	--



Supported file formats

Type	Extension(s)	Description	Read	Write	Binary/ASCII	Point Cloud(s)	Mesh(es)	Other	Features
BIN	.bin	CloudCompare own format	X	X	binary	>1	>1	>1	Normals, colors (RGB), scalar fields (>1), labels, viewpoints, display options, etc.
ASCII	asc, txt, xyz, neu, pts	ASCII point cloud file (X,Y,Z, etc.)	X	X	ASCII	1			Normals, colors (RGB), scalar fields (all)
LAS	.las	ASPRS# lidar point clouds	X	X	binary	1			Colors (RGB) and various scalar fields (see LAS 1.4 specifications)
E57	.e57	ASTM E57# file format	X	X	mixed	>1		Calibrated picture(s)	Normals, colors (RGB or I), scalar field (intensity)
PTX	.ptx	LEICA# point cloud export format	X		ascii	>1		Sensor(s)	Robust normals can be computed at loading time
FARO	.fis, *.fivs	FARO# formats	X		binary	>1		Sensor(s)	Scalar field (reflection value)
DP	.dp	DotProduct# (DPI-7) format	X		binary	>1		Sensor(s)	Colors (RGB), robust normals can be computed at loading time
PCD	.pcd	Point Cloud Library# format	X	X	binary	>1			Colors (RGB), normals, scalar fields (>1)
PLY	.ply	Stanford# 3D geometry format (cloud or mesh)	X	X	both	1	1		Normals, colors (RGB or I), one or several scalar fields, a single texture
OBJ	.obj	Wavefront# mesh	X	X	ASCII	1	>1	Polyline(s)	Normals, materials and textures
VTK	.vtk	VTK# file format (triangular mesh or cloud only)	X	X	ASCII	1	1		Normals, colors (RGB), scalar fields (>1)
STL	.stl	Stereolithography file format# (mesh)	X	X	ASCII	1	1		Normals
OFF	.off	Object File Format# (mesh)	X	X	ASCII	1	1		
FBX	.fbx	Autodesk (Flimbox) File Format#	X	X	ASCII or BINARY	>1	>1		Normals, colors (RGB), materials and textures
DXF	.dxf	Autocad DXF# format	X	X	ASCII	>1	>1	polyline(s)	Normals, colors (RGB)
SHP	.shp	ESRI Shape# file format	X	X	binary	>1		Polyline(s), polygon(s), contour plot(s), etc.	Scalar fields (1 per entity)
PDM5	.pdms, pdmsnac, .mac	PDM5 macros	X		ASCII		>1	Primitive(s)	
RASTER	.gdal.tif, etc.	Common raster formats (GDAL#)	X	X (use the Rasterize tool)	binary	1			Layers (as scalar fields)
OUT (Bundler)	.out	Bundler# SMI output file (more information here)	X		ASCII	(1)		Calibrated picture(s), 3D keypoints	
2D images	.jpg, *.png, *.bmp, etc.	Standard images			binary				
PV	.pv	Point cloud + scalar field	X	X	binary	1			Scalar field (1)
PN	.pn	Point cloud + normals	X	X	binary	1			Normals
SOI	.soi	Mesa/Trimble Söcio laser scanner	X		ASCII	>1			Colors (I)
POV	.pov	Multiple stations (meta file)	X		ASCII + both	>1			All + sensor poses
ICM	.icm	Cloud + calibrated pictures	X		ASCII + both	1		Picture(s)	All + camera poses
Geo-Mascaret	.georef	Mascaret# profiles	X		ASCII			Profiles (polylines)	
Simux	.sx	Simux curves	X	X	ASCII			Polylines	
CSV matrix	.csv	Cloud as 2D/12 matrix	X		ASCII	1			

Slika 9.3: Priloga 3. Vir: [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=FILE\\_I/0](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php?title=FILE_I/0)