

Digitalno orodje za analizo srednjeveških grobišč z obsežno stratigrafijo. Primer grobišča Župna cerkev v Kranju

A Digital Tool for Analysing Medieval Cemeteries with Extensive Stratigraphy. The Case Study of the Župna Cerkev Cemetery in Kranj (Slovenia)

© Jernej Rihter

Inštitut za arheologijo ZRC SAZU; jernej.rihter@zrc-sazu.si

© Boštjan Rihter

Računalniško svetovanje Boštjan Rihter s.p.; bostjan.rihter@gmail.com

DOI: 10.5281/zenodo.14380423

Izvleček: Velika grobišča z obsežno stratigrafijo prinašajo velike količine arheoloških podatkov. Njihova vizualizacija in obvladovanje sta ključna izziva prvega koraka analize, zlasti kadar jih poskušamo vizualizirati in analizirati znotraj stratigrafskih povezav Harrisovega diagrama. Ta izziv je spodbudil razvoj prototipa digitalnega orodja »Link« za analizo srednjeveških grobišč z obsežno in kompleksno stratigrafijo, ki ga preizkušamo na (zgodnje)srednjeveškem grobišču Župna Cerkev v Kranju.

Primarna funkcionalnost orodja za analizo je povezovanje, čiščenje, združevanje in vizualizacija obstoječih spisovnih, stratigrafskih in prostorskih zbirk ter faziranje grobišča. Orodje omogoča poizvedovanje po atributih grobov z vizualizacijo znotraj Harrisovega diagrama ter vektorske in tabelarične izvoze. Druga funkcionalnost je kronološki model, delujoč na osnovi Harrisovega diagrama, ki sprejema relativne in absolutne datacije ter uporablja arheološka načela datiranja grobov, prevedena v algoritmne na osnovi teorije grafov in Allenove algebre.

V prvem delu prispevka predstavimo značilnosti grobišča Župna cerkev in primerljivih ter še večjih srednjeveških grobišč ob cerkvah, s poudarkom na analizah in pregledu uporabljenih orodij ter načinov vizualizacije stratigrafskih, kronoloških in drugih podatkov. Pregled pokaže, da večina raziskovalcev velikih srednjeveških grobišč za analizo razvije lastnim potrebam prilagojena orodja. Pregled sklenemo s podrobnim opisom dosedanjih strategij analize grobišča Župna cerkev kot motiva za razvoj lastnega analitičnega orodja.

V drugem delu prispevka je opisano delovanje prototipa analitičnega orodja »Link« s praktičnimi primeri in nadaljnje smernice razvoja.

Ključne besede: stratigrafija, vizualizacija podatkov, digitalno orodje, srednjeveška grobišča, Župna cerkev Kranj

Abstract: Large cemeteries with extensive stratigraphy yield large amounts of archaeological data. Their visualisation and management are key challenges in the first step of analysis, especially when trying to visualise and analyse them within the stratigraphic relations of a Harris matrix. This challenge has motivated the development of a prototype of a digital analytical tool Link for the analysis of medieval cemeteries with extensive and complex stratigraphy, which is currently being tested on the early (medieval) cemetery of the Župna Cerkev in Kranj.

The primary functionality of the analytical tool is the integration, cleaning, merging, and visualisation of stratigraphic and spatial datasets, as well as the phasing of the cemetery. The tool enables queries of grave attributes by visualisation within a Harris matrix, as well as vector and tabular exports. The second functionality is a chronological model based on a Harris matrix, which incorporates both relative and absolute datations and applies archaeological principles of grave dating translated into graph theory and Allen's algebra-based algorithms.

In the first part of the paper, we present the characteristics of the Župna Cerkev Cemetery and comparable as well as even larger, medieval churchyard cemeteries, focusing on analyses and a review of the tools, visualisation methods, and approaches used for stratigraphic, chronological, and other types of data. The review shows that most researchers of large medieval cemeteries develop tools tailored to their specific needs for analysis. The review concludes with a detailed description of the analytical strategies used thus far for the Župna Cerkev Cemetery as a motivation for developing our own analytical tool.

The second part of the paper describes the functionality of the Link analytical tool prototype with practical examples and outlines future development directions.

Keywords: stratigraphy, data visualisation, digital tool, medieval cemeteries, Župna cerkev Kranj

Uvod

V okviru projekta *Analiza grobišča Župna cerkev v Kranju* (Z6-4608),¹ ki ga izvajamo na Inštitutu za arheologijo

ZRC SAZU, trenutno poteka arheološko datiranje grobov celotnega grobišča. Grobišče je z 2943 arheološko izkopanimi grobovi eno največjih srednjeveških grobišč v Srednji Evropi in največje zgodnesrednjeveško grobišče na območju jugovzhodnih Alp. Z neprekinjenem, več

¹ Več o projektu: Splet 1.

kot 1000-letnim pokopavanjem med 8. in koncem 18. stoletja v Srednji Evropi (še) nima primerjave. Kot tako je grobišče unikatno in nosilno za pomemben del Srednje Evrope ter ni reprezentančno le za območje jugovzhodnih Alp.

Pri analizi se soočamo s podobnimi izzivi kot raziskovalci drugih primerljivih in večjih arheološko izkopanih srednjeveških grobišč ob cerkvah s kompleksno stratigrafijo grobov. Zato najprej predstavljamo kratek pregled značilnosti tovrstnih grobišč ter izzivov, s katerimi so se soočili, s poudarkom na poizkopavalnem delu raziskav.

Arheologija velikih in dolgotrajnih srednjeveških grobišč pri cerkvah

Grobišče Župna cerkev prištevamo med velika in dolgotrajna (zgodnje)srednjeveška grobišča ob cerkvah. V Srednji Evropi je podobnih grobišč z vsaj 500-letnim trajanjem pokopavanja in več kot 2000 arheološko dokumentiranimi grobovi le peščica. Še manj je takšnih, ki bi bila v celoti izkopana z moderno arheološko metodo; med njimi izstopata dve: Prvo je grobišče Domplatz (St. Pölten, Avstrija), kjer so v prejšnjem desetletju in do leta 2022 arheološko izkopali 22.230 grobov ter ugotovili neprekinjeno pokopavanje med 11. stoletjem in letom 1779, pri čemer je nekaj grobov še iz 9. stoletja (Risy 2022, 321). Drugo je grobišče Petriplatz (Berlin, Nemčija), kjer so med letoma 2007 in 2010 ter leta 2015 arheološko izkopali 3196 grobov s 3865 okostji, datiranimi od sredine 12. stoletja do leta 1717 (Melisch *et al.* 2016a, 51; Melisch, Sewell 2014, 169, 175, 183). To grobišče je po številu grobov trenutno najbolj primerljivo našemu grobišču in ga v nadaljevanju podrobneje predstavljamo. Med zahodnoevropskimi izstopa grobišče Spitalfields Market v sklopu najdišča St. Mary Spittal (London, VB), kjer so med letoma 1991 in 2007 arheološko izkopali 10.516 okostij, datiranih med 12. stoletjem in letom 1539 (Connell *et al.* 2012).

Pri vseh grobiščih je razvidna kompleksnost načrtovanja raziskav, dokumentiranja (prostorskih in drugih terenskih podatkov) ter ustvarjanja podatkovnih zbirk (Risy 2022, 302–304; Melisch, Sewell 2011, 117–119; Powers, Rauhlo 2015, 9–11). Razvijali so lastnim potrebam prilagojene načine dokumentiranja, načrtovali arhitekturo podatkovnih zbirk oziroma prilagajali že obstoječe ter jih med raziskovanjem dopolnjevali (Melisch, Sewell 2011,

117–119). Tako so pri izkopavanju grobišča Petriplatz v Berlinu vzpostavili sistem dokumentiranja NADA² (Melisch *et al.* 2016a, 52–54), ki je temeljil na konceptih dokumentiranja londonskega muzeja (MoLA), razvitega med izkopavanji najdišča St. Mary Spittal (Powers, Rauhlo 2015). Enoten metodološki pristop v tehnikah dokumentiranja in skupno ogrodje različnih podatkovnih zbirk omogočata primerljivost in povezovanje podatkov (Melisch *et al.* 2014, 1; Melisch, Sewell 2011, 118) v poterenjskih raziskavah dveh verjetno največjih evropskih srednjeveških serij okostij (Jakob 2014; Powers, Rauhlo 2015; prim. Melisch, Sewell 2014, 183; Melisch, Sewell 2011; Melisch *et al.* 2014; Melisch *et al.* 2016b).

Za srednjeveška grobišča ob cerkvah sta značilni prostorska omejenost in intenzivna pokopališka dejavnost. Zaradi dolgotrajnega pokopavanja na razmeroma omejenem prostoru so mlajši pokopi posegali (nad in) v grobni prostor starejših grobov. To je ustvarjalo številne medsebojne stratigrafske odnose, kar je sicer značilnost evropskih srednjeveških grobišč pri cerkvah (Renshaw, Powers 2016, 63; Vargha, Mordovin 2019, 145). Pomemben razlog zgostitve pokopov je pojav načrtne zunanje omejitve grobišča, običajno s kamnitim obzidjem (Kenzler 2019, 127), kot posledica religioznih pravil, duhovnih predstav in praktičnih vzrokov (podrobno: Sörries 2003, 27–52).

Arheološke posledice takšnega ravnanja se zrcalijo v obsežni in razvejani stratigrafiji grobov, kar je povsem drugače kot pri manjših, planih zgodnesrednjeveških grobiščih brez cerkva (Knific 1974) ali grobiščih z vrstami, s pretežno neprekrivajočo razmestitvijo grobov in redkimi medsebojnimi odnosi (Fehring 1992, 66–70, Fig. 12–13).

Dodatne zgostitve pokopov znotraj (zgodnje)srednjeveških grobišč na mikrolokacijah so lahko narekovali topografija liturgične simbolike (prim. Sattler 1983, 19, 71), različne kulturne zgradbe (Svoljšak, Knific 1976, 71–75, sl. 24; Nowotny 2011, 455–458, sl. 12; Vargha, Mordovin 2019, 145; Achino *et al.* 2019), simbolno pomembne prostorske točke (prim. Sagadin 2001, 366–367, sl. 7) ter različne statusne, rodovne in druge povezave med pokojniki (Nowotny 2011, 458–463; Macháček *et al.* 2016).

Dodaten problem nastopi, kadar imamo združeno oboje: spodaj prostorsko večje zgodnesrednjeveško grobišče, nad njim pa prostorsko skrženo in gosto srednjenovoveško

2 Podrobneje: Splet 2, ©NADA Software Entwickler André Teper, Archäologie Claudia M. Melisch, Dr. Jamie Sewell.

grobišče, kar je lastnost grobišča Župna cerkev. V relativnem kronološko-topografskem razvoju grobišča je šlo najprej za prostorsko širjenje, ki mu je sledilo krčenje in hkrati nalaganje pokopov v višino. Zato ustaljena načela in metode prostorske kronološke analize grobišča tu niso mogoči.

Osnovni cilj raziskav tega in podobnih grobišč je torej analiza, zasnovana na stratigrafiji. Harrisov diagram je standardno orodje za vizualizacijo in analizo stratigrafskih odnosov, vendar postane pri obsežnih grobiščih zaradi velike količine podatkov preobsežen za vizualno zajemanje in intuitivno interpretacijo celote. Metodološka pripomočka, kot sta faziranje in določanje stratigrafskih skupin (ang. *stratigraphic group*; Herzog 2004, 10), tu ne pomagata. Faziranje je neizvedljivo, dokler ni jasna celota, določanje stratigrafskih skupin pa je z obstoječimi orodji le delno uporabno in izjemno zamudno. Zato je za analizo potreben drugačen pristop in orodja, ki omogočajo »razplastitev« ter vizualizacijo posameznih delov kompaktne stratigrafije, obogatene z drugimi atributi (npr. tipološkimi in kronološkimi), shranjenimi v različnih podatkovnih zbirkah.

Pregled podobnih grobišč in drugih najdišč z obsežno stratigrafijo (v nadaljevanju) pokaže, da so bile za analize večinoma razvite lastnim potrebam prilagojene metode in specifična računalniška orodja. Osredotočamo se na primere, ki za izhodišče uporabljajo Harrisov diagram in izkoriščajo potencial obsežne stratigrafije pri datiranju.

Analiza velikih srednjeveških grobišč: Od problemov vizualizacije stratigrafije in načrtov do analitičnih orodij in kronoloških modelov

Zagotavljanje dobre, za analizo uporabne vizualizacije stratigrafskih odnosov (Mlekuž 2001; Opgenhaffen 2021) je problem, s katerim se je v poterenskem delu večina raziskovalcev srednjeveških grobišč soočila najprej (Štular 2020a, 110–114, Sl. 3.15; Vargha 2015, Fig. 17; Marcu Istrate *et al.* 2015, Fig. III.7, 34–36; Kjølbye-Biddle 1975, Fig. 20, 22; Valič 1985, 92). Poenostavljeno rečeno gre za zagato, kjer pri vizualizaciji kompleksnih skupin stratigrafskih odnosov grobov poskušamo siceršnje tridimenzionalno naravo grobišča (topografijo in stratigrafijo) prikazati na dvodimenzionalnih načrtih (Powers, Rauxloh 2015; prim. Day *et al.* 2005, 156) in Harrisovih diagramih. Zaradi gostote in množice preple-

tenih povezav je to skoraj nemogoče dovolj jasno prikazati. Prihajalo je do različnih rešitev, kot je ustvarjanje načrtov z ločevanjem barvnih odtenkov grobov (Valič 1985, 92) ali ustvarjanjem 2,5D načrtov, ki temeljijo na relativnih globinah (Dufton, Fenwick 2012, Fig. 11), toda za analizo izpovednejše vizualizacije so prišle šele z uvedbo 3D tehnik dokumentiranja stratigrafije (Day *et al.* 2005; prim. Demetrescu 2015; Opgenhaffen 2021).

Uvedba 3D tehnik dokumentiranja stratigrafije na velikih srednjeveških najdiščih (in grobiščih) (Melisch, Assig 2011) je omogočala 3D modelirane vizualizacije stratigrafskih enot v okolju GIS ter s tem integracijo različnih podatkovnih zbirk (Derudas, Sgarella, Callieri 2018, 389, 394–397; Dufton, Fenwick 2012, 158). Opazovanje grobov v 3D okolju z različnih zornih kotov je omogočalo boljši nadzor nad medsebojnimi povezavami v nasprotju s tistimi v abstrahiranih 2D prikazih Harrisovega diagrama (prim. Powers, Rauxloh 2015, 12). Šlo je za nekakšno funkcionalno alternativo klasičnemu Harrisovemu diagramu, ki pa zato ni bil nič manj pomemben. Ravno obratno; raziskovalci so pri analizah med prikazoma (2D in 3D) vseskozi iskali njune komplementarne učinke ter ugotovili nujnost razvoja orodij za povezane 2D in 3D poglede stratigrafije (Day *et al.* 2005, 155), ki omogočajo tudi fluidnost med 3D prikazom stratigrafskih sekvenc in abstrahiranim 2D prikazom Harrisovega diagrama (Drap *et al.* 2012, 123–124; prim. Ortega-Alvarado *et al.* 2022, Fig. 14a–b; Neubauer *et al.* 2018, Fig. 4). Najsodobnejše tehnike 3D vizualizacije stratigrafije so interaktivne in vključujejo tudi časovno, t. i. 4. dimenzijo (4D) (Demetrescu 2015). Omogočajo integracijo prostorskih in časovnih informacij. Takšna orodja lahko s pomočjo različnih filtrov in časovnih drsnikov ponujajo boljše možnosti vizualizacije najdišč v prostoru in času (Ortega-Alvarado *et al.* 2022, Fig. 7–9).

Konkretno, na grobišču Petriplatz v Berlinu so se problema vizualizacije stratigrafije lotili tako, da so v okolju GIS koordinatama groba x in y dodali komponento z, ki ni predstavljala neposredno izmerjene globine groba na terenu, temveč preračunano stratigrafsko globino glede na vse pokope v sekvencah. Standardne poizvedbe v okolju GIS so prikazovali na 2D načrt in v 3D stratigrafskem pogledu. Ta način so uporabili npr. pri antropoloških raziskavah, pri katerih so bila osrednji predmet opazovanja okostja. To je pomenilo, da je bilo treba za jasnejši prikaz sekvenc grobov očistiti stratigrafsko podatkovno zbirko,

tj. odstraniti vse »negrobne« enote (Powers, Rauxloh 2015, 12–13), ki zamegljujejo preglednost vizualizacije. Postopek »čiščenja odvečnih podatkov« s ciljem preglednejše vizualizacije diagramov pri analizi grobov pomeni združevanje različnih stratigrafskih enot groba (npr. okostje, pridatki, polnilo) v enotno skupino (Dufton, Fenwick 2012, 160–161), zaradi česar te v metodološkem smislu nastopajo kot stratigrafske skupine (Herzog 2004, 10), s ciljem zmanjševanja informacijskega šuma (Štular 2020a, 112), kar je pri nestratigrafsko izkopanih grobovih – kot pri grobišču Župna cerkev z okoli 80 % tako izkopanih grobov – tako rekoč izhodišče analize (Rihter 2020, 48, 51, Sl. 1–2).

Drug pomemben vidik berlinskega grobišča in vizualizacije je dejstvo, da so arhitekturo podatkovnih zbirk pri izkopavanjih sestavljali v mislih na poterenske analize, ki so jih nameravali opraviti sami. To je kasneje omogočalo njihovo nadgradnjo in optimizacijo funkcionalnosti, tudi kot analitičnega orodja (Melisch, Sewell 2011, 118). Eno takšnih (orodij) je razvoj »interaktivnega Harrisovega diagrama«,³ kot so poimenovali na vizualizacijo v obliki Harrisovega diagrama vezane attribute grobov, ki domujejo v različnih podatkovnih zbirkah (Melisch, Sewell 2011, 118). S tem so premostili vrzel med »golim« upravljanjem podatkov in interpretativnim procesom raziskave (Dufton, Fenwick 2012, 165). Interaktivni Harrisov diagram jim je pri analizi omogočil vizualizacijo stratigrafskih odnosov grobov in drugih elementov grobišča ter njihovih atributov (kot so datacije) in nanje vezane poizvedbe, hkrati pa – kar je korak dlje – je deloval kot datacijsko orodje (Melisch *et al.* 2016a). Pri modeliranju časovnega razmika med zaporednimi pokopi v sekvencah (ki jih pesti pomanjkanje predmetov v grobovih) so npr. dodajali arbitrarne 5-letne razmike, posamezne grobove v sekvencah pa so utrdili z absolutnimi datacijami in njihov učinek samodejno razširili po stratigrafskih povezavah (Melisch *et al.* 2014). S tem so izkoristili potencial Harrisovega diagrama, ki njegovo funkcionalnost pomika v smer delovanja kot kronološkega modela.⁴

Če se ozremo še onkraj grobišč – na potrebe kronološkega modeliranja stratigrafskih sekvenc v srednjeveški arheologiji –, so na to opozorile tudi analize stratigrafije stoječih arhitektur, ki temeljijo na 3D fotogrametriji in

Harrisovem diagramu (Drap *et al.* 2017). Tod so raziskovalci pri prenosu Harrisove paradigme na stoječe objekte (3D kontekste) naleteli na njene omejitve, zlasti pri izražanju koncepta trajanja stojećih stratigrafskih enot, kar je z uporabo novih 3D orodij postajalo vse bolj očitno (Drap *et al.* 2017, 2). Zato so skušali razviti orodja, ki bi iz 3D vizualizacije samodejno generirala takšne Harrisove diagrame, ki bi bili v svojo kronološko strukturo sposobni vključevati nelinearne časovne modele – kot posledice zapletenih časovnih povezav med stratigrafskimi enotami (Drap *et al.* 2017, 7). Rešitve so našli v omrežju kvalitativnih omejitev (Qualitative Constraints Networks – QCN) in Allenovi formalizaciji časovnih intervalov, ki omogočata natančnejšo analizo časovnih in prostorskih povezav pri modeliranju arheološkega časa (Drap *et al.* 2017, 21–27; za primere glej zlasti: Fig. 17–21, Tab. 2–5).

Podobne potrebe so se pojavile tudi pri preučevanju arheoloških krajin, kjer kronološko-prostorske analize topografskih podatkov zahtevajo večjo prilagodljivost Harrisovega diagrama pri izražanju časovnih intervalov človekovih dejavnosti in naravnih procesov, ki so lahko sočasni ali se prekrivajo (Neubauer *et al.* 2022). Zaradi negotovosti v arheoloških metodah datiranja in prekrivanja različnih časovnih intervalov so razvijalci orodja Harris Matrix Composer (HMC) uporabili Allenovo intervalno algebro, ki ponuja teoretični okvir za časovno sklepanje (ang. *temporal reasoning*), za združevanje časovnih razponov pojavov s stratigrafskimi sekvencami (Neubauer *et al.* 2018). Te rešitve so vključili v novo različico HMC+, ki omogoča vizualizirano povezavo stratigrafije s prostorskimi podatki (GIS) in izboljšano usklajevanje časovnih ter prostorskih analiz (Neubauer *et al.* 2022, Fig. 3d). Ta pristop je bil že preizkušen (Doneus *et al.* 2022), vendar orodje, različica 2.4.0a (Splet 4), raziskovalni skupnosti še ni širše dostopno.

Razvoj računalniških tehnologij, ki v poterenskih analizah omogočajo povezane poglede stratigrafije (Harrisov diagram) in topografije (2D, 3D) ter časa (4D), v ospredje postavljajo funkcionalnost Harrisovega diagrama kot kronološkega modela, kar je eden ključnih izzivov kronoloških in prostorskih analiz velikih srednjeveških grobišč, s katerim se spoprijemamo na Grobišču Župna cerkev in kar opisujemo v naslednjem poglavju.

3 Podrobneje: Splet 3, in sicer: *Interaktive Harris-Matrix*. ©NADA Software (André Teper), Arheologija (Claudia Melisch).

4 Claudia Maria Melisch. Osebna komunikacija (21. 10. 2024).

Motivi za razvoj orodja »Link« za analizo grobišča Župna cerkev in stanje raziskav

Izhodišče – stanje poterenjskih raziskav grobišča do leta 2020

Grobišče je bilo izkopano v več kampanjah med letoma 1953 in 2013. Večji del je bil izkopan do leta 1984, z arbitrarno arheološko metodo (Pleterski, Štular, Belak 2016; 2017; Pleterski *et al.* 2019), kasneje pa s stratigrafsko arheološko metodo (Urek, Rozman 2012; Urankar, Bešter 2014). Pristop k sistematični poterenjski objavi arheoloških podatkov se je pričel leta 2011, slabih 60 let po odkritju grobišča, ko je Inštitut za arheologijo skupaj s partnerji pričel s projektom »Grobišče Župna cerkev v Kranju« (J6-4057).⁵ Njegov rezultat so bile objave temeljnih arheoloških virov najdišča, terenske risarske in pisne dokumentacije (Štular, Belak 2012a; 2012b; Valič, Štular, Belak 2013; Osmuk, Valič, Belak 2013; Sagadin 2014; Belak 2014; 2021), znanstvenokritične izdaje katalogov grobov in antropoloških analiz ter prvi skupni načrt grobišča v modernem koordinatnem sistemu (Pleterski, Štular, Belak 2016; 2017; Pleterski *et al.* 2019). Ta (načrt) je že omogočil nekatere prostorske analize (Achino *et al.* 2019), predvsem pa pristop k analizi stratigrafije grobov in nekaterih drugih elementov grobišča (Rihter 2020). Grobne jame – kot na mnogih drugih dolgotrajnih srednjeveških grobiščih (Fenwick, Dufton 2012, 161) – pri najstarejših izkopavanjih povečini niso bile vidne (in dokumentirane). Večinoma so dokumentirali le posamezna okostja. Metodološko so bili grobovi nestratigrafskih izkopavanj dokumentirani kot stratigrafske skupine (prim. Herzog 2004, 10; Štular 2020a, 110–111). Stratigrafska analiza arhiva nestratigrafskih izkopavanj (podrobneje Clark 1993) je bila izdelana z uporabo metode retrogradne analize arheoloških podatkov na srednjeveških najdiščih (*sensu* Štular 2008). Rezultat analize stratigrafije je bila relativna kronologija grobov, ki smo jo vizualizirali v obliki Harrisovega diagrama (Rihter 2020). Ta korak je bil izhodišče za absolutno tipokronološko razvrščanje zgodnesrednjeveškega naglavnega nakita in prstanov (Rihter 2020) ter analize stratigrafsko najstarejših grobov in s tem pričetkov pokopavanja na tem grobišču (Rihter 2023a).

Problemi analize grobišča Župna cerkev– motivi za razvoj orodja »Link«

Pričetek analize grobov Župna Cerkev leta 2015 je temeljil na metodološkem načrtu, da bodo vse prostorsko-časovne analize grobišča temeljile na stratigrafiji grobov celotnega grobišča (Rihter 2016a; 2016b; 2017; 2018) in da bo datiranje grobov primarno potekalo znotraj obstoječih sekvenc in šele nato v sklopu topografsko-kronoloških lastnosti grobišča (Rihter 2020, 1–11).

Toda ko je bila analiza stratigrafije končana, rezultati pa vizualizirani v obliki Harrisovega diagrama, se je pojavila težava. Njegova vizualizacija bi v natisnjeni in uporabni velikosti merila več kot 16 metrov. Za cilj, ki je bil tipokronološka členitev zgodnesrednjeveškega naglavnega nakita in prstanov na podlagi relativne kronologije ter obstoječih absolutnih tipokronologij (Rihter 2020, 1–11), je bil diagram kot tak neuporaben (Rihter 2020, 119–120, Sl. 5). Zato ga je bilo treba razstaviti na posamezne sestavne dele ali unikatne sekvence grobov in jih ustrezno vizualizirati. Ker obstoječa orodja za analizo stratigrafije (Stratify, Harris Matrix Composer) te možnosti ne ponujajo, smo operacijo izvedli z orodjem EVA avtorja Primoža Jakopina (podrobneje o delovanju: Rihter 2020, 122–123) in s tem pridobili 16.098⁶ unikatnih sekvenc grobov (Rihter 2020, 121–122, pril. 2; 2.2.). Ker so bili spodnji deli stratigrafskih sekvenc z zgodnesrednjeveškimi grobovi razmeroma dobro omejeni s pojavom in izginotjem zgodnesrednjeveških predmetov iz grobov, smo po tem ključu izločili ustrezne zgodnesrednjeveške sekvence grobov in jih uredili kot »seznam«, v linearnih (stavčnih) oblikah, kjer najstarejši grob stoji na levi, mlajši pa mu sledijo na desni (Rihter 2020, Pril. 3). Ta način dela je omogočal dobro vizualno obvladovanje, s sistemom slovarskih zamenjav pa tudi dodajanje različnih kronoloških in drugih arheoloških podatkov za ročno datiranje grobov v sekvencah (Rihter 2020, 167–206, pril. 2), saj delovanje ni bilo avtomatizirano (Rihter 2020, 201).

Grobove v sekvencah pa je bilo treba ne le tipokronološko datirati, temveč (zaradi učinkov grobov brez pridakov) tudi »razlepiti«, tj. modelirati s časovnimi presledki med grobovi, kot je običajno pri stratificiranih (zgodnje) srednjeveških grobiščih (Melisch *et al.* 2014; Košťová *et*

5 Gl. op. 1.

6 Novejše raziskave navajajo novejša podatke o številu sekvenc, ki so lahko (skladno s potekom analize) ponekod dopolnjene ali korigirane (Rihter 2023a; 2024).

al. 2022, 214, Graf. 11, Obr. 41), in hkrati upoštevati učinek tipokronoloških datacij na celotno sekvenco. Na ta način analize grobišča pa ni bil pripravljen nihče (Rihter 2020, 1–11), saj idealnih rešitev, kot smo videli v uvodnem pregledu (gl. *Arheologija ...*), skorajda ni in gre le za različne poskuse.

V našem primeru nismo želeli uporabljati arbitrarnih časovnih presledkov (npr. Melisch *et al.* 2014) med grobovi, temveč smo iskali ustreznejše rešitve. Pri nas je predstavljal do tlej edini poskus soočenja s problemom velikega zgodnj srednjeveškega grobišča in učinkov modeliranja superpozicij grobov na obstoječe⁷ arheološke datacije grobov (pridobljene s tipokronologijami) leta 1990 pričet projekt A. Pleterskega – analiza bajuvarskega grobišča Altenerding. Tamkaj empirično potrjen rezultat, ki bi ga bilo mogoče uporabiti in preveriti tudi na našem grobišču, je bil, da se je povprečni 30-letni časovni razmik med nastanki zaporednih grobov izkazal za realen in uporaben kronološki element v okviru analize in kronologije celotnega grobišča (Losert, Pleterski 2003, 526–530).

Seveda se je potrebno zavedati, da povprečni 30-letni časovni razpon ne more zajeti vseh izjem, ki so na grobišču nedvomno obstajale, kar potrjujejo tudi sodobne kombinirane naravoslovne, antropološke in genetske raziskave, vključujoč stratigrafijo grobov (npr. Giostra 2022; Lemm, Meadows 2022; Leskovar *et al.* 2024). Prav tako je tudi mogoče, da je med dvema zaporednima grobovoma v stratigrafski sekvenci obstajal 200 ali več let dolg časovni razmik. Toda nasprotno – dolge sekvence grobov, ki jih je mogoče zanesljivo datirati s pridatki, kažejo, da je bil časovni razpon (presledek) med zaporednimi pokopi navzdol omejen (Rihter 2023a). Različne raziskave kažejo, da ta v preteklosti ni bil neproblematičen ali zanemarljiv, temveč, da ga je moč utemeljevati tako biološko (npr. Skóra 2017, 200–201; Tab. 4–5), kot kulturno ne glede na vzroke (podrobneje Rihter 2020, 15–32), znašal pa je lahko v veliki večini najmanj 30 let (Losert, Pleterski 2003, 527–530; Štular 2020b, 176–179; prim. Košťová *et al.* 2022).

Predlog povprečja 30 let se je v naših modelih, glede na tipokronologije in na celotno stratigrafijo (ter število vseh superpozicij) na podlagi dosedanjih poskusov, trenutno

izkazal za najprimernejšega (npr. Rihter 2023, 283). V kronološke modele pa ga vključujejo tudi drugod (npr. Lemm, Meadows 2022; Giostra 2022, Fig. 3). Modeliranja posameznih sekvenc, s krajšimi, do 20-letnimi časovnimi razponi, v našem primeru namreč niso bili skladni z obstoječimi, trenutno veljavnimi absolutnimi tipokronologijami (Eichert 2010; Pleterski 2013). Povedano tudi drugače, če smo v relevantne zgodnj srednjeveške sekvence grobov vrinjali prevelike časovne razpone (npr. daljše od 40 let), je to, trajanje, t. i. ketlaških predmetov v grobovih pomaknilo na prag 13. stoletja, kar je v nasprotju z vsemi trenutno veljavnimi tipokronologijami in naravoslovnimi ter historičnimi datacijami.

Ta način obravnave zgodnj srednjeveških sekvenc je pomenil, da je mogoče vsako izolirano in zaključeno sekvenco, ki je na kateremkoli mestu v zaporedju vsebovala vsaj dva grobova s kronološko izpovednimi zgodnj srednjeveškimi pridatki (tipokronološke datacije), obravnavati kot kronološki model, s 30-letnimi časovnimi razponi pa datirati tudi ostale grobove (brez pridatkov) med njima ter za njima v obeh smereh sekvence.

V arheoloških raziskavah srednjeveških grobišč je modeliranje kronoloških podatkov razširjeno pri uporabi radiokarbonskih datumov (Macháček *et al.* 2021, Fig. 19; Košťová *et al.* 2022; Lemm, Meadows 2022, 74), kjer pa zaradi stohastične narave razpada ogljika vrednotenje tako pridobljenih datacij temelji na verjetnostnih izračunih (Geeraerts, Levy, Pluquet 2017). Programi, kot so Oxcal (Splet 5), Bcal (Splet 6) in ChronoModel (Splet 7), zato temeljijo na Bayesovem teoremu, ki ob pridobitvi novih podatkov omogoča matematični opis spremembe verjetnosti nekega dogodka. Zato vsi omenjeni programi ponujajo tudi orodja, ki omogočajo (v sistem datiranja) vpeljavo dodatnih kronoloških informacij (npr. relativne kronologije in drugih omejitev), na podlagi katerih model izdela novo oceno starosti opazovanih spremenljivk. Poskusi na grobišču Župna cerkev pa so pokazali, da tovrstno modeliranje za zgodnj srednjeveške sekvence ne prinaša novih spoznanj, saj so tipokronološke opredelitve grobov že sedaj v večini primerov ožje. Na neuporabnost tovrstnega modeliranja sekvenc in zavajajoče posledice so nas opozorili predvsem rezultati preizkusov z dobro tipokronološko datiranimi sekvencami grobov, kjer so bili časovni razponi robnih grobov po modeliranju, ki vključuje radiokarbonske datume, izrinjeni v obdobje, ko zgodnj srednjeveških predmetov v grobovih jugovzhodno-

⁷ Posebej poudarjamo vrstni red pristopa in razmerja – *obstoječe datacije/tipokronologije : stratigrafija* in ne obratno (Pleterski 1982).

alpskega prostora že stoletje ni več (podrobneje: Rihter 2020, 186–200). To moramo razumeti kot napačno izbiro metode za naš problem in ne kot napako orodja oz. metode kronološkega modela kot takega, ki iz zgoraj navedenih razlogov temelji na verjetnostnih intervalih. V našem primeru smo namreč imeli preveč realnih relativnih in absolutnih kronoloških podatkov v dolgih sekvencah, kar je omogočalo strogo zunanjo kontrolo modeliranih sekvenc, v največ 300-letnem obdobju pojava pridatkov zgodnj srednjeveških predmetov v grobovih. Kjer takšnih kontrol ni, se lahko zdijo rezultati metode realni. Zato smo radiokarbonske datacije zgodnj srednjeveške starosti pri analizi našega grobišča uporabili kritično, pogosto le v funkciji TPQ in redkeje v TAQ (2 σ).

Sočasno s prvim delom naše raziskave, ki se je zaključila sredi leta 2020, se je interdisciplinarna arheološko-naravoslovna skupina raziskovalcev (Geeraerts, Levy, Pluquet 2017) ukvarjala s formalizacijo postopkov datiranja v arheologiji,⁸ ki temeljijo na relativnih in absolutnih kronoloških podatkih (Geeraerts, Levy, Pluquet 2017, 13:5). Leta 2017 so predlagali model, ki vključuje formalizirane arheološke kronološke pogoje ter s pomočjo matematičnih algoritmov preračunava optimalne kronologije in hkrati preverja kronološke posledice na ravni celotnega modela. Napovedali so razvoj orodja, ki bo arheologom omogočalo oblikovanje poljubnih kronoloških modelov z uporabo zahtevnih kronoloških pogojev (Geeraerts, Levy, Pluquet 2017, 13:1–2, 15). Leta 2020 je bilo na uporabo ponujeno kronološko orodje TPQ composer (Splet 8), namenjeno sinhroniziranju historično datiranih artefaktov s plastmi močno stratificiranih najdišč (Levy, Piasetzky, Finkelstein 2020). Naslednje leto (2021) pa je bilo na uporabo ponujeno orodje ChronoLog (Splet 9), ki združuje leta 2017 napovedane funkcionalnosti in je že bilo preizkušeno v praksi (Levy *et al.* 2022; Levy 2021). Kot je pokazal naš preizkus, zmogljivo orodje vključuje vse potrebne mehanizme za datiranje grobišča, vendar kot celota le deloma ustreza našim potrebam (v nadaljevanju podrobneje).

Ko smo leta 2022 v okviru projekta Analiza grobišča Župna cerkev v Kranju Z6-4608⁹ nadaljevali z analizo grobišča, tokrat z namenom datiranja vseh grobov, so se težave pomnožile. Med visoko- in poznosrednjeveški-

mi grobovi je zaradi prostorskega zmanjšanja grobišča bistveno več medsebojnih stratigrafskih povezav kot v starejših sekvencah, medtem ko so grobne najdbe v teh sekvencah skorajda izjema (Rihter 2022; 2024). Prehod iz zgodnj srednjeveških v visokosrednjeveške grobne sekvence (ki jih zaznamujejo grobovi brez pridatkov) je pri radiokarbonski metodi datiranja zaradi učinka visokosrednjeveškega platoja okoli let 1040–1160 (Lemm, Meadows 2022) časovno težje določljiv. Radiokarbonske datacije zadnjih zgodnj srednjeveških grobov z značilnimi, vendar različnimi poznimi oblikami zgodnj srednjeveškega nakita se namreč pričenjajo usklajeno, in sicer šele med letoma 1022 in 1047 (2 σ). Te datacije sicer lahko potrjujejo pozen in še možen pojav nekaterih poznih oblik nakita v grobovih (kar neodvisno predvidevajo obstoječe tipokronologije), vendar trenutno njihovo trajanje pričakujemo največ do okoli 1030–1050. Glede na obstoječe tipokronologije in stratigrafsko sliko grobišča Župna cerkev, bi pričakovali, da bi najstarejši robovi časovnih razponov teh grobov morali zajemati vsaj še čas zadnje četrtine 10. stoletja, kar sicer zajema tudi čas t. i. 5. Miyake dogodka¹⁰ leta 993 (Miyake *et al.* 2022).

Drug vidik visokosrednjeveških in predvsem kasnejših sekvenc so tudi nekatere prednosti. Najširši časovni razponi radiokarbonskih datacij grobov iz 12.–15. stoletja so občutno ožji od zgodnj srednjeveških. Sedaj dolge in razvejane sekvence se zaključujejo z novoveškimi grobovi, ki ponovno vsebujejo dele noše in devocionalije, ki jih je mogoče bolj ali manj natančno datirati. Povečan obseg števila medsebojnih povezav in številnejši raznorodni kronološki viri v sekvencah v skupnem povečujejo število ožje datiranih grobov, zatika pa se pri izvedbi datiranja in obvladovanju množice podatkov.

Dolgotrajno in sistematično raziskovanje grobišča je namreč rezultiralo v izjemno obsežnih podatkovnih zbirkah, ki obsegajo dokumentacijo skoraj 3000 grobov (prostorske podatkovne zbirke) ter več kot 2000 katalogiziranih in klasificiranih predmetov v podatkovni zbirki ZBIVA (Belak, Pleterski, Rihter 2023; Štular 2019), njihove medsebojne odnose pa opisuje več kot 14.000 unikatnih stratigrafskih sekvenc (Rihter 2023b) ter več kot 23.000 meritev v enajstih dimenzijah, pridobljenih z analizo predmetov.

⁸ Z njihovimi deli me je aprila 2020 seznanil Dimitrij Mlekuž Vrhovnik, za kar se mu zahvaljujem.

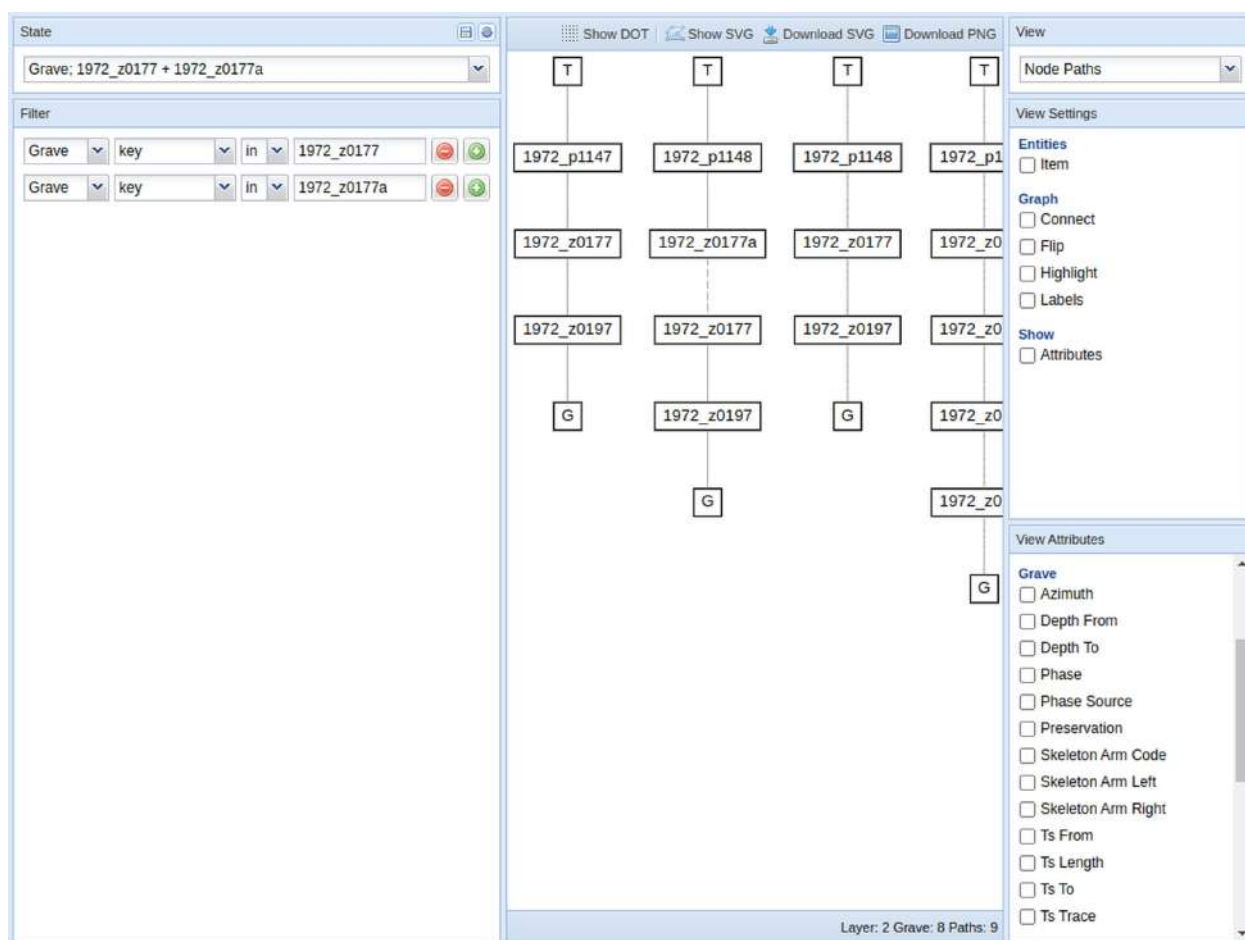
⁹ Gl. op. 1.

¹⁰ Splošno: Splet 10.

Obstoječa orodja, kot sta npr. ChronoModel in TPQ composer, trenutno ne zmorejo procesirati tako velikih količin relativnih in absolutnih kronoloških podatkov, ročno obvladovanje pa ni možno ali je vsaj zelo zapleteno (prim. Rihter 2020, 198). Ročno modeliranje relativnih in absolutnih kronoloških podatkov znotraj več kot 14.000 sekvenc, ki jih premoremo za naše najdišče, bi v orodju ChronoLog zahtevalo (pre)velik časovni vložek, predvsem pa orodje ne bi odpravilo naše osnovne potrebe vizualiziranega obvladovanja celotne stratigrafije grobov skupaj z vsemi atributi (podatkovne zbirke ZBIVA), kar

je predpogoj za uspešno načrtovanje kronoloških analiz, torej še pred modeliranjem grobišča.

Potrebujemo torej namensko orodje, prilagojeno posebnostim zgodnesrednjeveškega grobišča z velikimi količinami različnih podatkov in našim zahtevam po njihovi vizualizaciji znotraj Harrisovega diagrama; takšno orodje torej, ki ima funkcionalnost kronološkega modela z delovanjem znotraj celotnega diagrama in ki upošteva ustaljena načela arheološkega datiranja. Prototip takšnega orodja predstavljamo v nadaljevanju.



Slika 1. Analitično orodje »Link«. Zajem zaslona prikazuje vse posamezne stratografske sekvence, ki jih tvori dvojni grob 1972_z0177/177a z ostalimi grobovi. Podatki iz nabora atributov (na desni) lahko z izbiro zapolnijo okenska grobov v sekvencah.

Figure 1. The „Link“ analytical tool. The screenshot displays all individual stratigraphic sequences formed by the double grave 1972_z0177/177a in relation to other graves. Data from the attribute set (on the right) can be selected to populate the fields of graves in the sequences.

Predstavitev digitalnega orodja – »Link«

Osnovno delovanje orodja

»Link« je prototip orodja za analizo srednjeveških grobišč z obsežno stratigrafijo, ki temelji na sodobnih podatkovnih tehnologijah in konceptih. Združuje zmogljivosti podatkovnega skladišča (ang. *data warehouse*) ter relacijske (ang. *relational database*) in grafne podatkovne zbirke (ang. *graph database*), kar omogoča celovito obvladovanje odnosov (ang. *relationships*) med raznorodnimi arheološkimi podatki (slika 1).

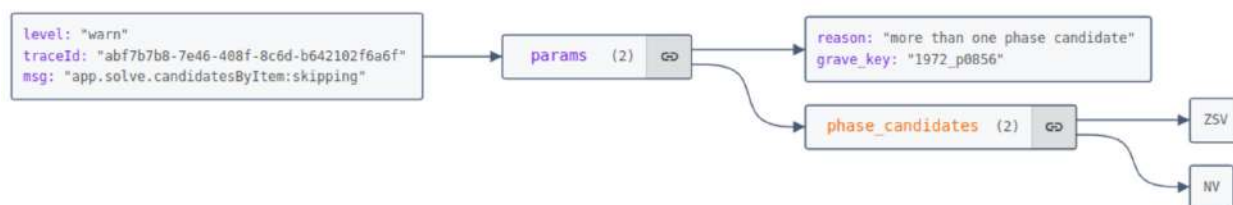
Uporaba podatkovnega skladišča zagotavlja enoten in zanesljiv referenčni vir (ang. *single source of truth*) ter omogoča analize prečiščenih podatkov. Relacijska podatkovna zbirka učinkovito upravlja s strukturiranimi podatki, medtem ko grafna podatkovna zbirka posebej naslavlja ključni izziv močno stratificiranih grobišč – tj. vizualizacijo in učinkovito upravljanje s kompleksnimi časovnimi in prostorskimi relacijami med grobovi in najdbami.

Orodje ponuja širok nabor funkcionalnosti, ki podpirajo proces arheološke analize grobišča. Omogoča enostavno integracijo z obstoječimi podatkovnimi zbirkami (kot so v našem primeru ZBIVA in prostorske podatkovne zbirke v okolju GIS) ter fleksibilno vzpostavljanje namenskih povezav z zunanjimi viri podatkov (kot so namenske podatkovne zbirke). Vgrajena orodja za analizo in čiščenje podatkov identificirajo in odpravijo nedoslednosti iz podatkovnih zbirk, pri čemer beležijo statistiko opravljenih popravkov za zagotavljanje sledljivosti procesa (slika 2).

Uporabniški vmesnik omogoča dinamično raziskovanje in vizualizacijo podatkov v realnem času, vključno z naprednimi grafičnimi prikazi stratigrafskih odnosov med grobovi in drugimi elementi grobišča znotraj Harrisovega diagrama (sliki 1 in 3). Za namen nadaljnje obdelave in izmenjave podatkov orodje podpira izvoz v različne formate, od strukturiranih tekstovnih datotek (ang. *comma separated values file – CSV*) do vektorskih grafičnih datotek (ang. *scalable vector graphics file – SVG*), kar omogoča učinkovito integracijo z drugimi raziskovalnimi orodji in platformami, kot npr. z informacijskimi sistemi (GIS).

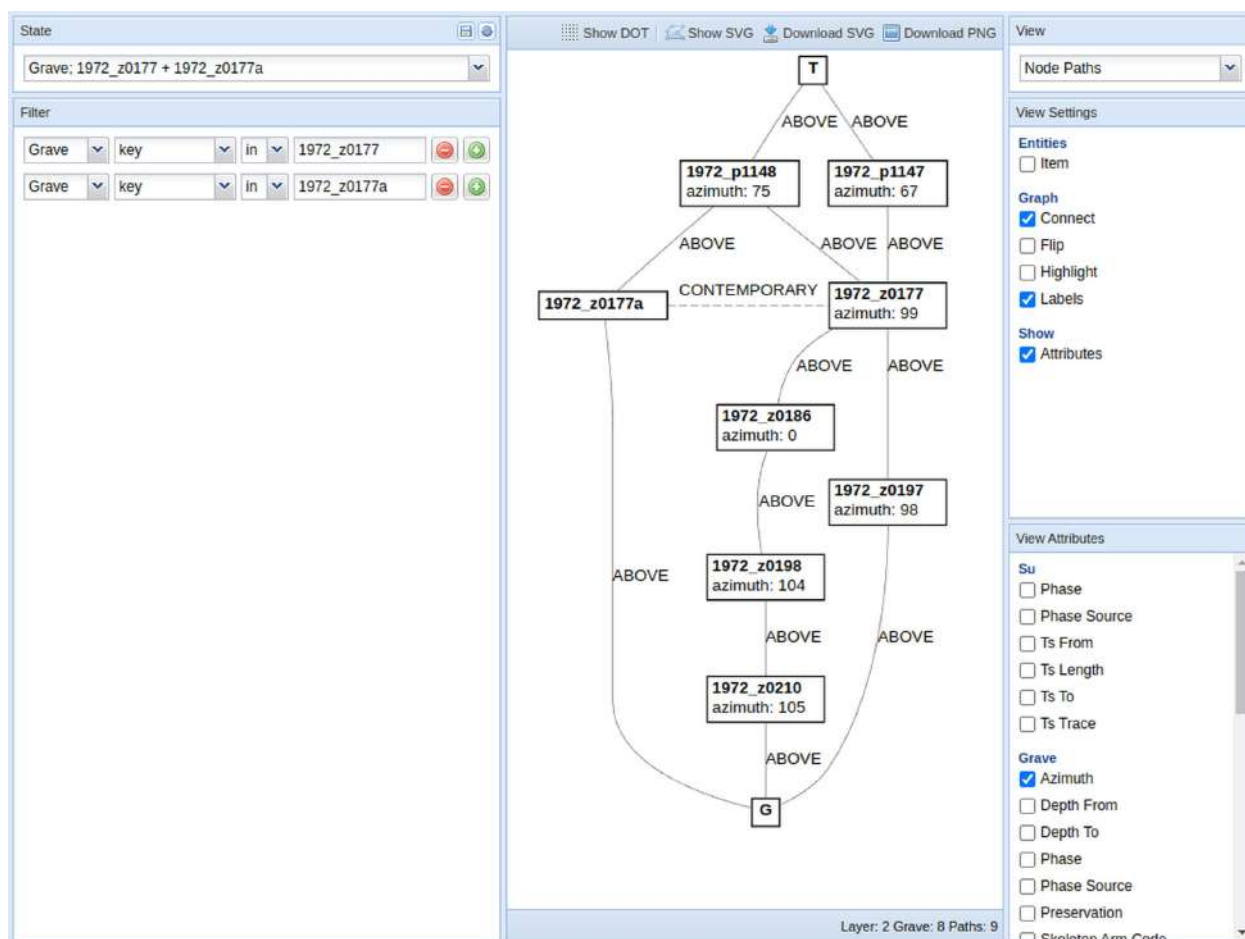
Napredno delovanje orodja – kronološki model

Druga funkcionalnost orodja vključuje napreden kronološki model za datiranje grobov v sekvencah. Kronološki model deluje znotraj povezav obstoječega Harrisovega diagrama, kar pomeni, da vključuje vse stratigrafske povezave in omogoča datiranje grobov v sekvencah na podlagi različnih vrst vhodnih kronoloških podatkov, kot jih prinašajo relativne in absolutne, arheološke, historične ter naravoslovne datacije (slika 4). Kombinacija različnih absolutnih in relativnih datacij v stratigrafskih sekvencah omogoča časovno opredelitev tudi tistih grobov, ki ne vsebujejo časovno opredeljivih arheoloških najdb. Bistveno je, da v kronološkem modelu istočasno nastopajo vsi grobovi, tudi tisti brez medsebojnih odnosov, ki sprva pridobijo najširšo možno datacijo, tj. med začetkom in koncem trajanja grobišča, kasneje pa jih lahko datiramo glede na druge kontekste, skladno z analizo (npr. pridobijo datacijo po predmetih, usmerjenosti ipd.).



Slika 2. Zajem zaslona prikazuje diagnostično sporočilo, ki opozarja na napako v procesu faziranja in na nekonsistenco v podatkih za grob 1972_p0856.

Figure 2. The screenshot displays a diagnostic message indicating an error in the phasing process and an inconsistency in the data for grave 1972_p0856.

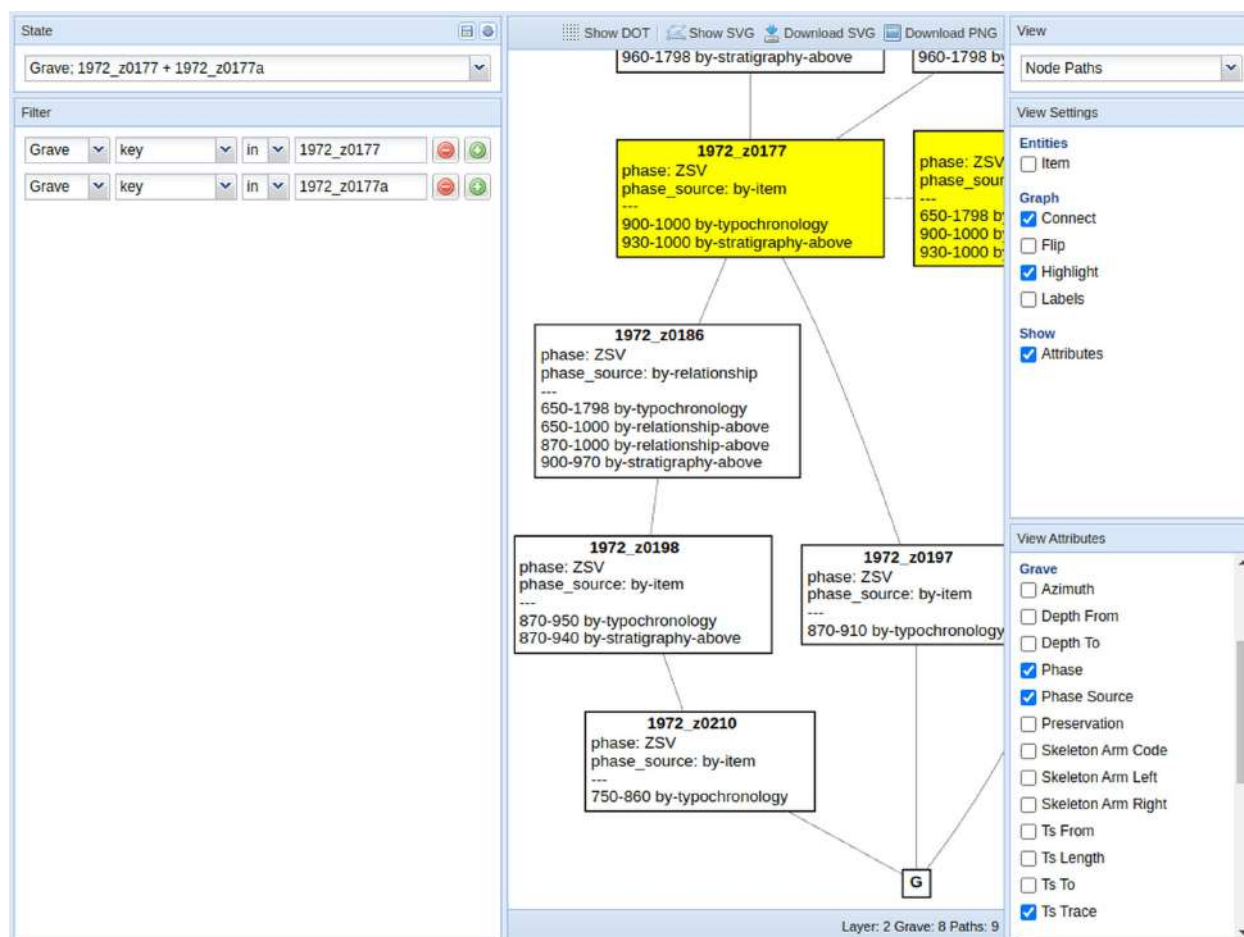


Slika 3. Analitično orodje »Link«. Zajem zaslona prikazuje vse stratigrafske povezave dvojnega groba 1972_z0177/177a in nabor atributov, ki jih je možno vizualizirati (primer: Azimut). Z dvojnim klikom na posamezen okvir/grob lahko sekvenco širimo lateralno, krčimo pa jo s filtriranjem (levo).

Figure 3. The „Link“ analytical tool. The screenshot displays all stratigraphic relationships of the double grave 1972_z0177/177a, along with the attribute sets that can be visualized (e.g., azimuth). By double-clicking on an individual frame/grave, the sequence can be expanded laterally and contracted through filtering (on the left).

Kronološki model trenutno deluje na naslednjih arheoloških predpostavkah: 1. Posamezen pokop je – razen določenih izjem – najverjetneje nastal v enem dnevu. 2. Kadar gre za grobove v stratigrafski sekvenci grobov, je lahko pokop nad poljubnim grobom relativno mlajši, ti isti pod njim pa relativno starejši. Grobova sta lahko tudi sočasna (npr. nastala drug za drugim, a v istem letu). 3. Grob je mogoče posredno ali neposredno datirati z različnimi arheološkimi in naravoslovnimi metodami. V grobovih je lahko več predmetov z različnimi datacijami. V zgodnesrednjeveški arheologiji se za datacijo grobov

najpogosteje uporablja presečna datacija različnih absolutnih datacij (Štular 2020b, 172, 178). Seveda je tu vrsta mejnih primerov, ki jih je potrebno pred vnosom v model individualno razrešiti s skrbno analizo materialne kulture (kot je izločitev starih predmetov v mlajših grobovih). 5. Med zaporednimi pokopi v sekvencah je lahko preteklo več ali manj časa, povprečno pa okoli 30 ali več let (več gl.: *Motivi* ...). 6. Trajanje pokopavanja v modelu je treba omejiti kot pri drugih kronoloških modelih. Na grobišču Župna cerkev je pokopavanje v absolutnem in najširšem smislu trenutno omejeno med letoma 654 (C14, Rihter



Slika 4. Analitično orodje »Link«. Zajem zaslona prikazuje situacijo stratigrafije omejeno na vse sekvence grobov 1972_z0177 in 1972_z0177a povezane v podgraf, faze grobov, njihove časovne razpone in določevalce. Iz slike lahko razberemo, da grobu 1972_z0210 pripada časovni razpon 750–860, določen po tipokronologiji (ang. by-typochronology) in da pripada fazi zgodnjega srednjega veka, ki jo določa predmet (ang. phase_source: by-item).

Figure 4. The „Link“ analytical tool. The screenshot displays the stratigraphic situation restricted to all burial sequences 1972_z0177 and 1972_z0177a, which are linked in a subgraph, including the burial phases, their time spans, and their determining factors. The figure illustrates that grave 1972_z0210 belongs to the time span 750–860, established by typochronology, and that it is assigned to the Early Medieval phase, determined by a particular object (phase_source: by-item).

2023a, 300, Tab. 2: Št. 3) in 1798 (opustitev grobišča, Žontar 1982, 280), glede na analizo stratigrafsko najstarejših grobov pa v čas okoli 700–1798 (Rihter 2023a, 300). Slednji letnici omejujeta delovanje trenutnega kronološkega modela.

Formalizacija opisanih arheoloških predpostavk za delovanje kronološkega modela je predstavljena v nadaljevanju. Teoretično ogrodje kronološkega modela povezuje teorijo grafov in Allenovo algebro, pri čemer slednjo za

časovno sklepanje prevajamo v Boolovo algebro, ki je osnova logičnega sklepanja v matematiki (podrobneje v nadaljevanju).

Teorija grafov

Kronološki model arheološko najdišče predstavi kot usmerjen graf G .

$$G = (V, E)$$

Množica vozlišč V vsebuje arheološke entitete vrh (v, T) in dno (v, G) – tj. skrajni točki, ki označujeta pričetek in konec časa trajanja grobišča, grobove in druge stratigrafske enote), množica robov E pa njihove medsebojne odnose.

$$E \subseteq V \times V$$

Vsakemu vozlišču in robu so dodeljeni atributi iz množice arheoloških podatkov (kot so tipološke, kronološke in merske značilnosti grobov in predmetov ...) A_v oziroma A_e .

$$\forall v \in V, \forall e \in E : \\ A_v \in \text{Attributes}(v) \wedge A_e \in \text{Attributes}(e)$$

Allenova algebra

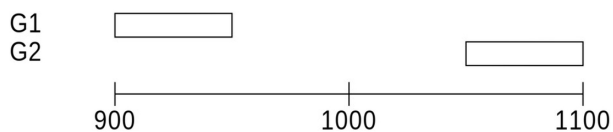
Allenova algebra je formalni sistem za sklepanje o časovnih odnosih med intervali, ki temelji na trinajstih odnosih med dvema časovnim intervaloma, ki omogočajo formalno predstavitev časovnih odnosov med dogodki (Allen 1983, 835).

Kronološki model uporablja dva izmed sedmih temeljnih Allenovih postulatov (Allen 1983, Fig. 2).

Prvi postulat, imenovan pred (ang. *precedes*), opisuje odnos med dvema intervaloma, kjer se prvi interval X konča pred začetkom drugega Y , brez prekrivanja. Ta odnos vzpostavlja časovno zaporedje dogodkov (slika 5).

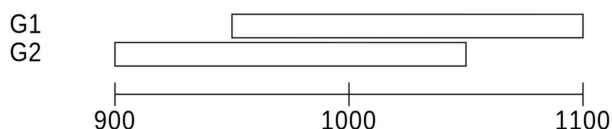
Četrty postulat, imenovan prekrivanje (ang. *overlap*), opisuje odnos, kjer se intervala delno prekrivata – začetek drugega intervala Y se pričenja pred koncem prvega X ali obratno (slika 6).

Ta postulata skupaj z usmerjenimi robovi grafa zadoščata za izražanje časovnih odnosov, potrebnih za datacijo groba.



Slika 5. $G1 < G2$, kar beremo kot: »G1 je nastal pred G2.«

Figure 5. $G1 < G2$, which is interpreted as: „G1 preceded G2.“



Slika 6. $G1$ o $G2$, kar beremo kot: »Časovni razpon $G1$ se prekriva s časovnim razponom $G2$.«

Figure 6. $G1$ o $G2$, which is interpreted as: „The time span of $G1$ overlaps with that of $G2$.“

Mehanizem delovanja

Model datacije grobov postopoma izboljšuje s konvergenčnim pristopom približevanja končni dataciji.

Konvergenčni pristop je način reševanja problemov, kjer se začetni približek rešitve postopoma izboljšuje skozi ponavljajoče se korake (iteracije), dokler ne dosežemo želene natančnosti ali stabilnosti sistema.

To lahko ponazorimo z matematično formulo:

$$x_{n+1} = f(x_n)$$

kjer je:

x_n trenutna rešitev

x_{n+1} naslednja izboljšana rešitev

f funkcija, ki izboljša trenutno rešitev

Ta pristop se uporablja pri numeričnem reševanju enačb, optimizacijskih algoritmi, strojnem učenju in raznih iterativnih simulacijah.

Datiranje

Algoritem za vsako vozlišče (tj. grob) v grafu hrani množico datacijskih kandidatov in trenutno datacijo. Kandidati so predstavljeni kot pari števil (začetek, konec), kjer števili predstavljata leto začetka in leto konca časovnega intervala. Pri dodajanju novih časovnih kandidatov algoritem najprej preveri, ali kandidat v množici že obstaja. V primeru novih kandidatov te dodamo v množico, nato pa izvedemo postopek ocene in prileganja.

Pri oceni določimo skupni časovni razpon vseh kandidatov, kjer med njimi poiščemo najzgodnejše začetno leto in najpoznejše končno leto.

Za vhodno množico kandidatov:

$$C = \{(z_1, k_1), (z_2, k_2), \dots, (z_n, k_n)\}$$

kjer sta:

z_i začetno leto

k_i končno leto

Nato funkcija prileganja poišče optimalni časovni interval, ki je skladen z vsemi kandidati. To stori tako, da kandidate uredi po končnem letu in iterativno gradi presek intervalov, dokler ne pride do prekinitve – situacije, ko se intervala ne prekrivata več (sliki 7 in 8).

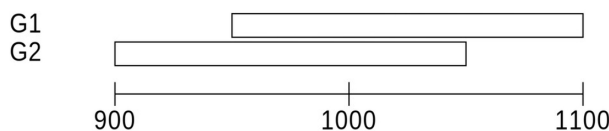
$$\text{prileganje}(C) = \begin{cases} \emptyset & \text{kadar } C = \emptyset \\ (z_k, k_k) & \text{kadar } |C| = 1 \\ (\max(z_i, z_j), \min(k_i, k_j)) & \text{kadar } k_j \geq z_i \\ (z_i, k_i) & \text{kadar } k_j < z_i \end{cases}$$

kjer so:

$C = \{(z_1, k_1), (z_2, k_2), \dots, (z_n, k_n)\}$ kandidati urejeni po končnem letu padajoče

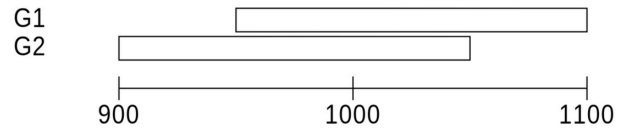
i predstavlja trenutni interval

j predstavlja naslednji interval v zaporedju



Slika 7. Primer odnosa C1 o C2, kjer funkcija prileganja vrne rezultat v obliki novega časovnega razpona, ki predstavlja presek obeh časovnih razponov.

Figure 7. An example of a C1 o C2 relationship, in which the fit function returns a new time span representing the intersection of the two existing time spans.



Slika 8. Primer odnosa C1 < C2, kjer funkcija prileganja vrne rezultat v obliki novega časovnega razpona, ki je enak časovnemu razponu mlajšega groba.

Figure 8. An example of a C1 < C2 relationship, in which the fit function returns a new time span corresponding to that of the younger grave.

Opomba: Pravilo, kjer je C1 < C2 (kjer funkcija prileganja vrne rezultat v obliki novega časovnega razpona, ki je enak časovnemu razponu mlajšega groba), ne dopušča izjem, zato model uporabniku med izvajanjem sporoči, v koliko in v katerih primerih gre za neprekrivajoče časovne intervale, kot so prikazani na sliki 8, da jih uporabnik – strokovnjak – individualno ponovno preuči. Realna sestava grobnih celot v povezavi s stratigrafsko situacijo v nekaterih primerih narekuje izbiro drugačne datacije groba, npr. v celoten razpon C1 in C2 ali v razpon med C1 in C2 (prazen presek). Dosedanje izkušnje kažejo, da je takšnih primerov med izvajanjem algoritma izjemno malo, saj jih večinoma izločimo že med pripravo/čiščenjem vhodnih podatkov (npr. določanje starih predmetov v grobovih).

Proces iterativno posodablja interval i dokler niso obdelani vsi intervali ali je najden interval, ki se ne prekriva.

Iterativni proces lahko zapišemo kot:

$$i_k = \begin{cases} (z_1, k_1) & \text{kadar } k = 1 \\ (\max(z_{i_{k-1}}, z_k), \min(k_{i_{k-1}}, k_k)) & \text{kadar } k_k \geq z_{i_{k-1}} \\ i_{k-1} & \text{kadar } k_k < z_{i_{k-1}} \end{cases}$$

kjer so:

i_k stanje intervala

k kandidat

Končni rezultat je tako najmlajši in hkrati najožji možni interval, ki je skladen z vsemi časovnimi kandidati. Vsaka uspešna posodobitev datacije se zabeleži v sled sprememb skupaj z zaporedno številko spremembe in virom podatka, ki je spremembo povzročil.

Algoritem

Algoritem, ki je uporabljen v orodju »Link«, deluje po načelu postopne stabilizacije sistema. Ob pričetku se vzpostavi začetno stanje, ki ga sistem obravnava kot nestabilno konfiguracijo datacij. Vhodni arheološki podatki se pretvorijo v podatkovno strukturo graf, nato pa se sproži iterativni proces reševanja sistema, ki poteka v treh korakih.

Začetno datiranje grobov

Za začetno datiranje grobov vsakemu vozlišču v grafu priredimo časovni interval na podlagi tipokronoloških podatkov. Za vsako vozlišče n v grafu algoritem določi časovni interval na naslednji način:

Če za grob obstajajo specifični tipokronološki podatki $TS(n)$, jih uporabi za določitev datacije:

$$T_n = TS(n)$$

kjer je T_n časovni interval groba n in $TS(n)$ množica tipokronoloških časovnih intervalov za grob n .

V nasprotnem primeru uporabi privzeto datacijo, ki jo določata vozlišči T (vrh) in G (dno):

$$T_n = \{(x_T, y_G)\}$$

kjer je:

x_T začetno leto vrhnjega vozlišča T

y_G končno leto spodnjega vozlišča G

Tako določen časovni interval priredimo vozlišču kot začetno vrednost za nadaljnje korake algoritma.

Stratigrafski odnosi med grobovi

Nato algoritem analizira neposredne stratigrafske odnose med grobovi. Obravnava tri vrste stratigrafskih odnosov: vertikalno superpozicijo (ang. *above*), časovno sosledje (ang. *later*) in sočasnost (ang. *contemporary*).

Vertikalna superpozicija

Pri vertikalni superpoziciji imamo dva grobova, kjer je eden stratigrafsko nad drugim. V tem primeru algoritem določi časovni interval tako, da je spodnji grob starejši od zgornjega, pri čemer lahko oba grobova časovno sovpadata. Formalno za grobova u in v , kjer je v nad u :

$$T_u = [x_u, y_u], T_v = [x_v, y_v] \\ candidate = (x_v, y_u)$$

kjer sta T_u in T_v začetna časovna intervala grobov.

Časovno sosledje

Pri odnosu časovnega sosledja je en grob nedvoumno mlajši od drugega, njuna časovna intervala pa se ne prekrivata. Formalno za grobova u in v , kjer je v mlajši od u :

$$T_u = [x_u, y_u], T_v = [x_v, y_v] \\ candidate = (x_v, y_u)$$

Sočasnost

Pri odnosu sočasnosti algoritem predpostavi, da sta grobova nastala v istem časovnem obdobju, zato njuna časovna intervala združi v presek obeh intervalov. Za grobova u in v :

$$T_u = [x_u, y_u], T_v = [x_v, y_v] \\ candidates = \{T_u, T_v\}$$

Za vsak par grobov (u, v) , ki je v stratigrafskem odnosu, algoritem ustvari nove časovne kandidate.

Pri vertikalni superpoziciji (odnos nad, ang. *above*) in časovnem sosledju (odnos kasneje, ang. *later*) ustvari kandidata z začetkom, ki je enak začetku mlajšega groba, ter koncem, ki je enak koncu starejšega groba. Pri sočasnosti za oba grobova uporabi množico časovnih intervalov obeh grobov kot kandidate za nov časovni interval. Nato nove kandidate doda obstoječim časovnim intervalom obeh grobov z uporabo funkcije prileganja.

Analiza stratigrafskih sekvenc

Za konec algoritma analizira stratigrafske sekvence. Za vsako posamezno sekvenco izdelava časovno matriko, kjer vrstice predstavljajo začetna in končna leta grobov, stolpci pa posamezne grobove v sekvenci.

Matrika se polni v dveh prehodih. V prvem prehodu od najstarejšega do najmlajšega groba postopoma določamo najzgodnejša možna leta. Pri tem za vsak grob g_i upoštevamo:

$$x_{g_i} = \max(x_{initial}, x_{strat}, x_{td})$$

kjer je:

$x_{initial}$ izhodiščno začetno leto groba

x_{strat} začetno leto določeno s stratigrafskimi odnosi:

$$x_{strat} = \max(x_{g_1}, x_{g_2}, \dots, x_{g_{i-1}})$$

x_{td} začetno leto, ki je za 30 let poznejše od predhodnega groba:

$$x_{td} = x_{g_{i-1}} + 30$$

V drugem prehodu od najmlajšega do najstarejšega groba določamo najpoznejša možna leta. Za vsak grob upoštevamo:

$$y_{g_i} = \min(y_{initial}, y_{strat}, y_{td})$$

kjer je:

$y_{initial}$ izhodiščno končno leto groba

y_{strat} končno leto določeno s stratigrafskimi odnosi:

$$y_{strat} = \min(y_{g_{i+1}}, y_{g_{i+2}}, \dots, y_{g_n})$$

y_{td} končno leto, ki je za 30 let zgodnejše od naslednjega groba:

$$y_{td} = y_{g_{i+1}} - 30$$

Nato za vsak grob v sekvenci iz matrike določimo nov časovni interval kot kombinacijo najzgodnejšega in najpoznejšega možnega leta, ki daje najkrajše časovno obdobje. Časovni interval je veljaven samo če:

$$x_{g_i} \leq y_{g_i}$$

Ob več možnih intervalih izberemo tistega z najkrajšim trajanjem:

$$interval_{g_i} = \min_{(x,y) \in candidates} (y - x)$$

kjer so kandidati množica vseh možnih parov (x, y) iz množic $\{x_{initial}, x_{strat}, x_{td}\}$ in $\{y_{initial}, y_{strat}, y_{td}\}$.

Proces reševanja sistema izvajamo, dokler je mogoče za katerokoli vozlišče v grafu (tj. grob) določiti boljše (ožjo) datacijo. Ko datacij ni več mogoče izboljšati, sistem obravnavamo kot stabilen in algoritem ustavimo.

Statistika

Trenutno je za stabilnost kronološkega modela potrebnih 5 ponovitev. V sklopu reševanja sistema za 17.641 datacij grobov izvedemo 115.850 izračunov, kar na povprečnem osebem računalniku traja manj kot 1 minuto. Takšna hitrost izračunov močno olajša znanstveni proces, saj je tako na voljo več časa za analizo rezultatov in nadaljnji razvoj metode.

Zaključek, omejitve in nadaljnje delo

Z razvojem prototipa analitičnega orodja »Link« smo zasnovali preverljiv in stabilen sistem za analizo in datiranje grobov grobišča Župna cerkev. Naš končni cilj je sistem, ki omogoča preizkušanje novih ali drugačnih datacij, vselej kadar so na voljo, saj so vse arheološke kronologije zgolj začasne in jih je treba nenehno posodabljanje (prim. Smith 1992, 29; Neustupný 1993, 178–179; Fehring 1992, 45; Pleterski 2013, 320; Harding 1999, 182–183, 216). Grobišče Župna cerkev je namreč v vseh pogledih – glede števila grobov, najdb in stratigrafskih povezav – reprezentativno in nosilno ter ima velik, a doslej skorajda neizkoriščen potencial. Presenetljivo je, da omogoča celo dopolnitve tipokronologije zgodnje-srednjeveške materialne kulture jugovzhodnoalpskega prostora (prim. Rihter 2024) in s tem preverjanje drugih kronoloških vprašanj, ki jih zaradi kratkotrajnosti grobišč drugod ni mogoče obravnavati, npr. kronologijo položaja rok (prim. Rihter 2023b).

Izhodišče analiz grobišč so običajno individualne datacije grobov, ki naj bi bile čim manj ohlapne. Množica različnih vhodnih kronoloških podatkov za grobove v obstoječi mreži povezav Harrisovega diagrama na grobišču Župna cerkev to omogoča, vendar je zaradi obilice

podatkov ročno težko izvedljiva naloga. Prototip našega orodja omogoča obvladovanje podatkov in datiranje grobov, vendar ima tudi omejitve, ki jih vidimo kot prostor za izboljšave, ki so v teku:

1. Implementacija dinamičnih časovnih razponov v sekvencah: Trenutni model uporablja statične, tj. 30-letne časovne razpone med vozlišči (grobovi), kar lahko v določenih primerih pomeni omejitev pri modeliranju kompleksnejših časovnih odvisnosti.
2. Samodejna zaznava ključnih vozlišč: Samodejno zaznavanje ključnih vozlišč bo omogočilo optimizacijo izbire grobov za radiokarbonsko datiranje. Metoda bo identificirala vozlišča z največjim številom povezav, kar bo omogočilo osredotočeno analizo najustrežnejših grobov kandidatov za datiranje največjega možnega števila grobov ob najmanjšem potrebnem številu radiokarbonskih datacij.
3. Izboljšanje napovedne natančnosti: Za izboljšanje napovedne natančnosti modela predlagamo razvoj novih metrik, ki bi kvantificirale natančnost rezultatov pri izbiri poljubnih časovnih razponov med nastankom dveh zaporednih grobov (npr. od 1 do 1000 let = čas trajanja grobišča) in evalvacijo različnih arhitektur nevronske mreže.

Predstavljeno orodje trenutno deluje kot prototip in ni pripravljeno za zunanjo uporabo. Orodje lahko prilagajamo in nadgrajujemo ob vsaki novi priložnosti uporabe, npr. pri analizah novih grobišč ali najdišč. Uspešna izvedba načrtovanih in dodatnih izboljšav bi omogočila širšo uporabo razvitih metod tudi v drugih arheoloških kontekstih. Za doseg končne produktizacije bo potrebna širša uporaba na različnih vrstah najdišč, kar zahteva dodatna prizadevanja in sredstva za uspešno izvedbo.

Vir financiranja

Članek je nastal v okviru projekta Z6-4608 Analiza grobišča Župna Cerkev v Kranju, ki ga financira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost RS.

Literatura / References

- ACHINO, K. F., B. ŠTULAR, J. RIHTER, J. RIHTER 2019, Assessing the intentionality of spatial organization. Cemetery of Župna Cerkev (Kranj, Slovenia) case study. – *Arheološki vestnik* 70, 297–313. <https://zalozba.zrc-sazu.si/p/9212>.
- ALLEN, J. F. 1983, Maintaining knowledge about temporal intervals. – *Communications of the ACM* 26/11, 832–843. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/182.358434>.
- BELAK, M. (ur. / ed.) 2014, *Grobišče Župna cerkev v Kranju. Grobni zapisniki*. – E-Monographiae Instituti Archaeologici Sloveniae 7. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612547042>.
- BELAK, M. (ur. / ed.) 2021, *Grobišče Župna cerkev v Kranju. Bloki, terenske risbe 1969–1973*. – E-Monographiae Instituti Archaeologici Sloveniae 12. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789610505778>.
- BELAK, M., A. PLETESKI, J. RIHTER 2023, *Zbiva v4.1*. – Ljubljana. <http://zbiva4.zrc-sazu.si/>.
- CONNELL B., A. JONES, R. REDFERN, D. WALKER 2012, A bioarchaeological study of medieval burials on the site of St. Mary Spital. Excavations at Spitalfields Market, London E1, 1991–2007. – London, Museum of London Archaeology.
- CLARK, P. R. 1993, Sites without principles: Post-excavation analysis of “pre-matrix” sites. – V / In: Harris, E. C., M. R. Brown III, G. J. Brown (ur. / eds.), *Practices of archaeological stratigraphy*. – London, Academic Press, 276–292.
- DAY, W., J. COSMAS, N. RYAN, T. VEREENOGHE, L. VAN GOOL, M. WAELENS, P. TALLOEN 2005, Linking 2D harris matrix with 3D stratigraphic visualisations: an integrated approach to archaeological documentation. – V / In: Figueiredo, A., G. Leite Velho (ur. / eds.), *The world is in your eyes. CAA2005. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 33rd Conference, Tomar, March 2005*. – Tomar, CAA Portugal, 155–160.
- DERUDAS, P., M. C. SGARELLA, M. CALLIERI 2018, A 3D Digital Approach for the Study and Presentation of the Bisarcio Site. – V / In: Matsumoto, M., E.

- Uleberg (ur. / eds.), *CAA2016. Oceans of Data. Proceedings of the 44th Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. – Oxford, Archaeopress, 389–398.
- DEMETRESCU, E. 2015, Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice. – *Journal of Archaeological Science* 57, 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.02.004>.
- DONEUS, M., W. NEUBAUER, R. FILZWIESER, C. SEVARA 2022, Stratigraphy from topography II. The practical application of the Harris Matrix for the GIS-based spatio-temporal archaeological interpretation of topographical data. – *Archaeologia Austriaca* 106, 223–252. <https://doi.org/10.1553/archaeologia106s223>.
- DRAP, P., D. MERAD, J. SEINTURIER, J. M. BOÏ, D. PELOSO, G. VANNINI, M. NUCCIOTTI, E. PRUNO 2012, An information system for medieval archaeology based on photogrammetry and archaeological database: the Shawbak Castle Project. – V / In: Ioannides, M., D. Fritsch, J. Leissner, R. Davies, F. Remondino, R. Caffo (ur. / eds.), *Progress in Cultural Heritage Preservation. EuroMed 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7616*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 119–128. https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_12.
- DRAP, P., O. PAPINI, E. PRUNO, M. NUCCIOTTI, G. VANNINI 2017, Ontology-based photogrammetry survey for medieval archaeology: Toward a 3D geographic information system (GIS). – *Geosciences* 7/4, 93. <https://doi.org/10.3390/geosciences7040093>.
- DUFTON, A., C. FENWICK 2012, Beyond the grave: developing new tools for complex cemetery analysis at Villa Magna, Italy. – V / In: Chrysanthi, A., P. Murrieta Flores, C. Papadopoulos (ur. / eds.), *Thinking beyond the Tool: Archaeological Computing & the Interpretive Process*. – Oxford, BAR Publishing, 155–167.
- EICHERT, S. 2010, *Die frühmittelalterlichen Grabfunde Kärntens. Die materielle Kultur Karantaniens anhand der Grabfunde vom Ende der Spätantike bis ins 11. Jahrhundert*. – Klagenfurt, Verlag des Geschichtsvereines für Kärnten.
- GEERAERTS, G., E. LEVY, F. PLUQUET 2017, Models and Algorithms for Chronology. – V / In: Schewe, S., T. Schneider, J. Wijsen (ur. / eds.), *24th International Symposium on Temporal Representation and Reasoning (TIME 2017)*, Leibniz International Proceedings in Informatics 90. 1–18. – Saarbrücken/Wadern, Schloss Dagstuhl, Leibniz-Zentrum für Informatik. <https://doi.org/10.4230/LIPIcs.TIME.2017>.
- GIOSTRA, C. 2022, Genetica e statistica per una migliore conoscenza della cultura materiale barbarica. – *Hortus Artium Medievalium* 28, 222–230.
- HARDING, A. 1999, *Establishing archaeological chronologies*. – London, New York, Routledge.
- HERZOG, I. 2004, *Stratify* 1.5. – Bonn. http://www.stratify.org/Download/Stratify_Manual.Pdf (17. 10. 2024).
- FEHRING, G. P. 1992, *The Archaeology of Medieval Germany. An introduction*. – London, New York, Routledge.
- JAKOB, T. 2014, A Bioarchaeological Study of Medieval Burials on the Site of St Mary Spital: Excavations at Spitalfields Market, London E1, 1991–2007. – *Environmental Archaeology* 19/1, 88–89. <https://doi.org/10.1179/1461410313Z.000000000046>.
- KENZLER, H. 2011, Totenbrauch und Reformation. Wandel und Kontinuität. – *Mitteilungen der deutschen Gesellschaft für Archäologie des Mittelalters und der Neuzeit* 23, 9–34.
- KENZLER, H. 2019, Post-medieval burial customs in Germany – an archaeological perspective on materiality and spatiality. – *Mortality* 24/2, 123–144. <https://doi.org/10.1080/13576275.2019.1585781>.
- KJØLBYE-BIDDLE, B. 1975, A cathedral cemetery: problems in excavation and interpretation. – *World Archaeology* 7/1, 87–108. <https://doi.org/10.1080/00438243.1975.9979623>.
- KNIFIC, T. 1974, Horizontalna stratigrafija grobišča Bled – Pristava II = Die horizontale Stratigraphie des Gräberfeldes Bled – Pristava II. – *Situla* 14/15, 315–326.
- KOŠTOVÁ, N., K. KAPUSTKA, E. ZAZVONILOVÁ, R. KŘIVÁNEK, S. D. KAPOVÁ, H. VONDROVÁ, A. BRAJER, R. KOČÁROVÁ 2022, Raně středověké pohřebiště v Přezleticích (okr. Praha-východ). – *Památky Archeologické* 113, 183–255. <https://doi.org/10.35686/PA2022.4>.

- LEVY, E. 2021, *Chronology of the Iron Age in the Levant: a Computational Approach* (Neobjavljeno doktorsko delo / Unpublished PhD Thesis, Tel Aviv University). – Tel Aviv.
- LEVY, E., I. FINKELSTEIN, M. A. MARTIN, E. PIASETZKY 2022, The date of appearance of philistine Pottery at Megiddo: a computational approach. – *Bulletin of the American Society of Overseas Research* 387/1, 1–30. <https://doi.org/10.1086/719048>.
- LEVY, E., E. PIASETZKY, I. FINKELSTEIN 2020, Strata, Scarabs and Synchronisms: A Framework for Synchronizing Strata and Artifacts. – *Journal of Computer Applications in Archaeology* 3/1, 1–17. <https://doi.org/10.5334/jcaa.41>.
- LEMM, T., J. MEADOWS 2022, Die Grablege der Udonen in Harsfeld. – *Zentrum für Baltische und Skandinavische Archäologie, Jahresbericht 2022*, 74.
- LESKOVAR, T., T. KNIFIC, I. ZUPANIČ-PAJNIČ, D. POTOČNIK, M. ČREŠNAR 2024, Potencial interdisciplinarnih raziskav človeških skeletnih posmrtnih ostankov: četverni grob s poznoantičnega grobišča Bled – Pristava = The Potential of Interdisciplinary Research of Human Skeletal Remains: Quadruple Grave from the Late Antique Cemetery at Bled. – *Arheološki vestnik* 75, 323–354. <https://doi.org/10.3986/AV.75.11>.
- LOSERT, H., A. PLETERSKI 2003, *Altenerding in Oberbayern: Struktur des frühmittelalterlichen Gräberfeldes und „Ethnogenese“ der Bajuwaren*. – Berlin; Bamberg; Ljubljana, Scripvaz.
- MACHÁČEK, J., M. BERNER, P. DRESLER, S. D. KA-
UPOVÁ, R. PŘICHYSTALOVÁ, V. SLÁDEK, 2021, Arms-bearers in separate graves from Great Moravia and the emergence of the Early Medieval military-aristocratic organization in East-Central Europe. – *Praehistorische Zeitschrift* 96/1, 248–285. <https://doi.org/10.1515/pz-2021-0020>.
- MACHÁČEK J., P. DRESLER, R. PŘICHYSTALOVÁ, V. SLÁDEK 2016, *Břeclav – Pohansko VII. Kostelní po-hřebiště na Severovýchodním předhradí*. – Opera Facultatis philosophicae Universitatis Masarykianae 455. – Brno, Filozofická fakulta, Masarykova univerzita. <https://doi.org/10.5817/CZ.MUNI.M210-8455-2016>.
- MARCU ISTRATE, D., M. CONSTANTINESCU, A. SOFICARU 2015, *The medieval cemetery from Sibiu (Hermannstadt) Huet Square. Archaeology, Anthropology, History*. – Tübinger Forschungen zur historischen Archäologie 6. – Büchenbach, Verlag Dr. Faustus.
- MELISCH, C. M., M. ASSIG 2011, Die Wiedergewinnung des mittelalterlichen Cölln am Petriplatz: Moderne Dokumentations- und Visualisierungsverfahren in der archäologischen Praxis. – *Acta Praehistorica et Archaeologica* 43, 81–94.
- MELISCH, C. M., I. GARLISCH, B. JUNGKLAUS, K. KILLGROVE, M. NAGY, N. POWERS, J. ROTHE, B. TEßMANN, M. TICHOMIROVA, K. WHITE 2016a, Auf der Suche nach den ersten Berlinern. Das internationale Forschungsprojekt „Medieval Space and Population“. – *Mitteilungen der Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte* 37, 51–64.
- MELISCH C. M., P. RAUXLOH, N. POWERS 2016b, Harris-Matrix as key for understanding time in cemeteries. – V / In : Djuricic, A., P. Dorninger, S. Rasztovits, C. Nothegger, M. Harzhauser, O. Mandic, N. Pfeifer, N. (ur. / eds.), *Proceedings of the 21st International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (CHNT) held in Vienna, Austria, November 16-18, 2016*. <https://archiv.chnt.at/harris-matrix-as-key-for-understanding-time-in-cemeteries>.
- MELISCH, C. M., P. RAUXLOH, N. POWERS, I. GARLISCH 2014, Medieval space and population. – V / In: *Proceedings of the 19th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, Vienna 2014*. <https://archiv.chnt.at/chnt-19-2014-proceedings>.
- MELISCH, C. M., J. SEWELL 2011, Historische Chance – eine umfangreiche, mittelalterliche bis neuzeitliche Skelettserie vom ehemaligen St. Petri-Kirchhof in Berlin-Mitte. – *Mitteilungen der Berliner Gesellschaft für Anthropologie, Ethnologie und Urgeschichte* 32, 107–120.
- MELISCH, C. M., J. SEWELL 2014, Omnia mors aequat and other problems with processing large data from a cemetery. – V / In: Nijboer, A., P. Attema, S. Willemsen, J. Seubers (ur. / eds.), *Research Into Pre-Roman Burial Grounds in Italy, Caeculus: Papers in Mediterranean Archaeology and Greek and Roman Studies* 8. – Leuven, Paris, Dudley, Peeters, 169–183.

- MIYAKE, F., M. HAKOZAKI, K. KIMURA, F. TOKANAI, T. NAKAMURA, M. TAKEYAMA, T. MORIYA 2022, Regional differences in carbon-14 data of the 993 CE cosmic ray event. – *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* 9, 886140. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.886140>.
- MLEKUŽ, D. 2001, Harrisovi Diagrami in Računalnik. – *Arheo* 21, 43–48.
- NEUBAUER, W., C. TRAXLER, A. LENZHOFER, M. KUCERA 2018, Integrated Spatio-temporal Documentation and Analysis of Archaeological Stratifications Using the Harris Matrix. – V / In: Fellner, D. W., R. Sablatnig, M. Wimmer (ur. / eds.), *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage*. – Goslar, Eurographics Association, 235–239. <https://doi.org/10.2312/gch.20182025>.
- NEUBAUER, W., C. TRAXLER, A. BORNIK, A. LENZHOFER 2022, Stratigraphy from Topography I. Theoretical and Practical Considerations for the Application of the Harris Matrix for the GIS-based Spatio-temporal Archaeological Interpretation of Topographical Data. – *Archaeologia Austriaca* 106, 203–221. <https://doi.org/10.1553/archaeologia106s203>.
- NEUSTUPNÝ, E. 1993, *Archaeological method*. – Cambridge; New York, Cambridge University Press.
- NOWOTNY, E. 2011, Mehrfachgräber im Gräberfeld von Thunau, Obere Holzweise. Methodik, Ausprägungen, Deutungsmöglichkeiten = Vícečetné hroby na pohřebišti Thunau – Obere Holzweise. Metody, charakteristika, interpretace. – *Archeologické rozhledy* LXIII, 443–465.
- OPGENHAFFEN, L. 2021, Visualizing archaeologists: a reflexive history of visualization practice in archaeology. – *Open Archaeology* 7/1, 353–377. <https://doi.org/10.1515/opar-2020-0138>.
- ORTEGA-ALVARADO, L.M., ÁL. GARCÍA-FERNÁNDEZ, F. CONDE-RODRÍGUEZ, J. M. JURADO-RODRÍGUEZ 2022, Integrated and interactive 4D system for archaeological stratigraphy. – *Archaeological and Anthropological Sciences* 14, 203. <https://doi.org/10.1007/s12520-022-01667-3>.
- OSMUK, N., A. VALIČ, M. BELAK 2013, *Grobišče Župna cerkev v Kranju. Dnevnik izkopavanj 1969 do 1973*. – E-Monographiae Instituti Archaeologici Sloveniae 5. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612546557>.
- POWERS, N., P. RAUXLOH 2015, Medieval burial and the necessity of stratigraphy. – *Acta Praehistorica et Archaeologica* 47, 9–14.
- PLETERSKI, A. 1982, Časovna izpovednost plastovitosti staroslovanskega grobišča Sedlo na Blejskem gradu = Stratigraphy of the Old-Slavic Cemetery Sedlo na Blejskem gradu as a Source for Datation. – *Arheološki vestnik* 33, 134–150.
- PLETERSKI, A. 2013, Korak v kronologijo zgodnjesevnoevropskega naglavnega nakita vzhodnih Alp/A step towards the chronology of early medieval head ornaments in the Eastern Alps. – *Arheološki vestnik* 64, 299–334. <https://zalozba.zrc-sazu.si/p/9044>.
- PLETERSKI, A., B. ŠTULAR, M. BELAK 2016, *Izkopavanja srednjeveškega in zgodnjenovoveškega grobišča pri Župni cerkvi v Kranju v letih 1964–1970*. – Opera Instituti Archaeologici Sloveniae 35. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612549732>.
- PLETERSKI, A., B. ŠTULAR, M. BELAK 2017, *Arheološka raziskovanja grobov najdišča Župna cerkev v Kranju med letoma 1972 in 2010*. – Opera Instituti Archaeologici Sloveniae, 37. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789610500315>.
- PLETERSKI, A., B. ŠTULAR, M. BELAK, H. BEŠTER 2019, *Začetek in konec raziskovanj grobišča pri Župni cerkvi v Kranju (1953 in 2011–2013)*. – Opera Instituti Archaeologici Sloveniae 38. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789610501503>.
- RENSHAW L., N. POWERS 2016, The archaeology of post-medieval death and burial. – *Post-Medieval Archaeology* 50/1, 159–177. <https://doi.org/10.1080/00794236.2016.1169491>.
- RIHTER, J. 2016a, Digitalna arheologija? Primer uporabe digitalnih orodij za analizo arheološkega najdišča. – V / In: Erjavec, T., D. Fišer (ur. / eds.), *Zbornik konference Jezikovne tehnologije in digitalna humanistika, 29. september - 1. oktober 2016, Filozofska fakulteta, Univerza*

v Ljubljani, Ljubljana, Slovenija. – Ljubljana, Znanstvena založba Filozofske fakultete, 259–260.

RIHTER, J. 2016b, Uporaba digitalnih orodij pri izdelavi relativne kronologije grobišča: (primer Župna cerkev v Kranju) = The Use of Digital Tools in Establishing Relative Chronology of a Burial Ground: (Example of the Kranj Parish Church Site). – V / In: Lux, J., B. Štular, K. Zanier (ur. / eds.), *Zbornik povzetkov = Book of Abstracts / Simpozij Slovani, naša dediščina, Kranj, Slovenija, 28.-30. September 2016 = Symposium Our Heritage: The Slavs, Kranj, Slovenia, September 28-30, 2016*. – Ljubljana, Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, 41–42.

RIHTER, J. 2017. Dolgoletna izkopavanja ob kranjski župni cerkvi in urejanje arheoloških podatkov. – V / In: Perko, V. (ur. / ed.), *Povzetki predavanj: v spomin začetnikoma slovenske povojne arheologije, raziskovalcema in učiteljema prof. dr. Josipu Korošču in dr. Paoli Korošec. 7. Valičev arheološki dan, Kranj, 4. december 2017*. – Kranj, Gorenjski muzej, 38–45.

RIHTER, J. 2018, Managing the Archaeological Data. Cemetery Župna cerkev v Kranju (Slovenia). – V / In: Krznar, S. (ur. / ed.), *Life and Death in Mediaeval and Early Modern Times : Book of Abstracts = Život i smrt u srednjem i ranom novom vijeku : knjiga sažetaka / 5th International Conference of Mediaeval Archaeology, Zagreb, 6th - 7th June 2018 = 5. međunarodni znanstveni skup srednjovjekovne arheologije, Zagreb, 6. - 7. lipnja 2018*. – Zagreb, Institute of Archaeology, 12–13.

RIHTER, J. 2020, *Stratigrafija grobišča Župna cerkev v Kranju in tipokronologija zgodnesrednjeveškega nakita: doktorska disertacija = Stratigraphy of Župna cerkev in Kranj Cemetery and Typochronology of Early Medieval Jewellery* (Neobjavljeno doktorsko delo / Unpublished PhD thesis, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta). – Ljubljana. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8188314>.

RIHTER, J. 2022, The last Early Medieval and first High Medieval burials with grave goods from the Župna Cerkev in Kranj Cemetery Slovenia in the light of stratigraphy and material culture (Neobjavljeno predavanje na mednarodnem posvetovanju / Unpublished lecture at the international symposium *Power in Numbers: The Role of the Rural Population in Christianisation and State Formation II*, Panel 7 Charles University Facul-

ty of Arts Prague, 12. 5. 2022). <https://doi.org/10.5281/zenodo.8188314>.

RIHTER, J. 2023a, Stratigrafsko najstarejši zgodnesrednjeveški grobovi in začetek pokopavanja na grobišču Župna cerkev v Kranju = Stratigraphically Lowest Early Medieval Graves and Beginnings of Burial in the Župna cerkev Cemetery in Kranj (Slovenia). – *Arheološki vestnik* 74, 263–308. <https://doi.org/10.3986/AV.74.08>.

RIHTER, J. 2023b, *Analysis of the Cemetery Župna Cerkev in Kranj (Slovenia). Preliminary observations of the research project (Z6-4608)* (Neobjavljeno predavanje na mednarodni konferenci / Unpublished lecture at the international conference). – Maribor. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10046192>.

RIHTER, J. 2024 (v tisku / in press), Chronological Remarks on Early Medieval Jewellery and Evidence for Pilgrimage. The Case Study of the Župna Cerkev Cemetery in Kranj (Slovenia). – V / In: Mária Vargha, M., I. Štefan (ur. / eds.), *Power in Numbers. State Formation and Christianization on the Eastern Edge of Europe*. – Turnhout, Brepols, 155–175.

RISY, R. 2022, Der Domplatz von St. Pölten. Eines der herausforderndsten innerstädtischen Grabungsprojekte Österreichs Pannonia Underground. – V / In: Bíró, S. (ur. / ed.), *Pannonia underground: proceedings of the international conference held at Szombathely, 25-26 November 2021*. – Szombathely, Savaria Museum, 299–329.

SAGADIN, M. 2001. Staroslovansko grobišče na Malem gradu v Kamniku = The Early Slavic Cemetery at Mali grad in Kamnik. – *Arheološki vestnik* 52, 359–375.

SAGADIN, M. 2014, *Grobišče Župna cerkev v Kranju. Dnevnik izkopavanj 1984*. – E-Monographiae Instituti Archaeologici Sloveniae 6. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612547035>.

SATTler, J. B. 1983, *Ikongraphische und psychologische Aspekte der „Seitigkeit“ in der Kunst: dargestellt an ausgewählten Beispielen der romanischen Plastik in Burgund* (Neobjavljeno doktorsko delo / Unpublished PhD thesis). – München.

SMITH, M. E. 1992, Braudel's temporal rhythms and cronology theory in archaeology. – V / In: Knapp, B. A. (ur. / ed.), *Archaeology, Annales, and Ethnohistory*.

– Cambridge, New York, Port Chester, Melbourne, Sydney, Cambridge University Press, 23–34.

SKÓRA, K. 2017, Opening of Graves in the Cemetery of the Wielbark Culture in Kowalewko. A Preliminary Analysis. – *Fasciculi Archeologiae Historicae* 30, 193–200. <https://doi.org/10.23858/FAH30.2017.016>.

SÖRRIES, R. 2003, Der mittelalterliche Friedhof Das Monopol der Kirche im Bestattungswesen und der so genannte Kirchhof. – V / In: Sörries, R. (ur. / eds.), *Raum für Tote. Die Geschichte der Friedhöfe von den Gräberstraßen der Römerzeit bis zur anonymen Bestattung*. – Braunschweig, Thalacker Medien, 27–52.

SVOLJŠAK, D., T. KNIFIC 1976, *Vipavska dolina: zgodnj srednjeveška najdišča*. – Situla 17. – Ljubljana, Nova Gorica, Narodni muzej, Goriški muzej.

ŠTULAR, B. 2008, Analiza dokumentacije nestratigrafskih izkopavanj. – *Arheo* 25, 45–52.

ŠTULAR, B. 2019, The Zbiva web application: a tool for early medieval archaeology of the Eastern Alps. – V / In: Richards, J. D., F. Niccolucci (ur. / eds.), *The ARIADNE Impact*. – Budapest, Archaeolingua Foundation, 69–82. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3476712>.

ŠTULAR, B. 2020a, Stratigrafska analiza in analiza nestoječih stavbnih ostankov = Stratigraphic analysis and analysis of non-standing building remains. – V / In: Štular, B. (ur. / ed.), *Srednjeveški Blejski otok v arheoloških virih*, Opera Instituti Archaeologici Sloveniae 42. – Ljubljana, Založba ZRC, 93–114.

ŠTULAR, B. 2020b, Kronologija = Chronology. – V / In: Štular, B. (ur. / ed.) *Srednjeveški Blejski otok v arheoloških virih*, Opera Instituti Archaeologici Sloveniae 42. – Ljubljana, Inštitut za arheologijo ZRC SAZU, Založba ZRC, 171–182.

ŠTULAR, B., M. BELAK (ur. / eds.) 2012a, *Grobišče Župna cerkev v Kranju. Dokumentacija o izkopavanjih v letu 1953*. – E-Monographiae Instituti Archaeologici Sloveniae 1. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612544232>.

ŠTULAR, B., M. BELAK (ur. / eds.) 2012b, *Grobišče Župna cerkev v Kranju. Kartoteka najdb iz leta 1953*. – E-Monographiae Instituti Archaeologi-

ci Sloveniae 2. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612544263>.

URANKAR, R., H. BEŠTER 2014, *Arheološka izkopavanja v Kranju, mestno jedro Kranja, Trubarjev trg s Pungertom, Cankarjeva, Vodopivčeva ulica, Glavni trg, Poštna ulica in vrt Kieselsteina, prvo strokovno poročilo o raziskavi* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani ZVKDS OE Kranj). – Kranj, PJP d.o.o.

UREK, M., L. ROZMAN 2012, *Poročilo o arheoloških zaščitnih izkopavanjih na lokaciji Tomšičeve – Tavčarjeve / južni del 2008–2010 v Kranju* (Neobjavljeno poročilo / Unpublished report, hrani ZVKDS OE Kranj). – Kranj, Magelan Skupina d.o.o.

VALIČ, A. 1985, Osnovna izhodišča arheoloških proučevanj mesta Kranja (Carnium). – *Kranjski zbornik* 1985, 88–94.

VALIČ, A., B. ŠTULAR, M. BELAK 2013, *Grobišče Župna cerkev v Kranju. Dokumentacija o izkopavanjih v letih 1964, 1965 in 1966*. – E-Monographiae Instituti Archaeologici Sloveniae 4. – Ljubljana, Založba ZRC. <https://doi.org/10.3986/9789612544775>.

VARGHA, M. 2015, *Hoards, grave goods, jewellery : Objects in hoards and in burial contexts during the Mongol invasion of Central-Eastern Europe*. – Archaeolingua 8. – Oxford, Archaeopress.

ŽONTAR, J. 1982, *Zgodovina mesta Kranja* (Ponatis). – Kranj, Skupščina občine Kranj.

Spletni viri / Online references

SPLET 1 /WEB 1: <https://iza2.zrc-sazu.si/sl/programi-in-projekti/grobisce-zupna-cerkev-v-kranju#v> (23. 10. 2024).

SPLET 2 /WEB 2: <http://www.teper.de/screenshots.html> (17. 9. 2024).

SPLET 3 /WEB 3: <http://www.teper.de/screenshots.html> (17. 9. 2024).

SPLET 4 /WEB 4: <https://www.youtube.com/watch?v=rXaruMkg81Y> (23. 10. 2024).

SPLET 5 /WEB 5: <https://c14.arch.ox.ac.uk/OxCal/OxCal.html> (1. 5. 2020).

SPLET 6 /WEB 6: <http://bcal.sheffield.ac.uk>. (1. 5. 2020).

SPLET 7 /WEB 7: <https://chronomodel.com> (1. 5. 2020).

SPLET 8 /WEB 8: <https://github.com/Eythan31/TPQ-Composer> (16. 5. 2020).

SPLET 9 /WEB 9: <https://chrono.ulb.be/download/> (31. 10. 2024).

SPLET 10 /WEB 10: https://en.wikipedia.org/wiki/Miyake_event (23. 10. 2024).

A Digital Tool for Analysing Medieval Cemeteries with Extensive Stratigraphy. The Case Study of the Župna Cerkev Cemetery in Kranj (Slovenia)

(Summary)

The article discusses the challenges of analysing large medieval churchyard cemeteries, which are characterised by an intensive stratification of graves and a wealth of archaeological data. Their visualisation and management is one of the major challenges in the first step of the analysis, especially when trying to visualise and analyse them within the Harris matrix. We approach this topic by examining the Župna Cerkev Cemetery in Kranj (Slovenia). With 2,943 archaeologically documented graves, it represents an outstanding example of large and long-lasting (early)medieval churchyard cemeteries. The burials took place in the same place without interruption for more than 1,000 years, from the 8th to the end of the 18th century. Cemeteries with at least 2,000 graves and a time span of 500 years are already very rare in Central Europe, for example. Even fewer have been fully excavated using modern archaeological methods. Notable examples are the cemeteries at the Domplatz in St. Pölten (Austria) and Petriplatz in Berlin (Germany). Among the Western European cemeteries, the Spitalfields Market cemetery in London (United Kingdom) stands out.

Medieval churchyard cemeteries are characterised by spatial limitations and intensive burial activities that lead to overlapping graves and complex stratigraphic relationships. The enclosure of the cemeteries by walls increased the density of burials, which distinguishes their stratigraphy from smaller early medieval cemeteries without churches, where the graves generally do not overlap as much. The situation at the Župna Cerkev Cemetery is characterised by both an early medieval spatial expansion and a later spatial contraction, which led to a dense accumulation of medieval and post-medieval burials. The cemetery contains more than 14,000 unique stratigraphic sequences of graves, which presents a great challenge for efficient visualisation and analysis.

Traditional spatial and chronological approaches to analysis prove ineffective with such complex stratigraphies. Therefore, alternative methods and tools are required to dissect the compact stratigraphy and visualise its individual components, enriched with typological and chronological attributes. A comparison with similar cemeteries and other archaeological sites that have extensive stratigraphy shows that researchers often develop their own methods and computational tools for this type of analysis. The development of computer technologies that enable a linked representation of stratigraphy (Har-

ris matrix), topography (2D, 3D), and time (4D) in post-excavation analyses underlines the functionality of the Harris diagram as a chronological model. This represents a key challenge in the chronological and spatial analysis of large medieval cemeteries.

For our analysis, we have developed a prototype of a bespoke tool “Link” adapted to the characteristics of an early medieval and medieval cemetery with a large amount of diverse data and our requirements for their visualisation within a Harris diagram, with the functionality of a chronological model working within the overall matrix and following established principles of archaeological dating.

Link is a tool for analysing medieval cemeteries with extensive and complex stratigraphy. It combines the capabilities of a relational database, a graph database, and graph theory, enabling comprehensive management of relationships among diverse archaeological data.

The relational database efficiently manages structured data, while the graph database specifically addresses the challenge of heavily stratified cemeteries – the visualisation and efficient management of complex temporal and spatial relationships between graves and archaeological finds.

The tool offers a wide range of functionalities that support the process of archaeological analysis of burial sites. It enables seamless integration with existing databases (such as ZBIVA and spatial databases in GIS environments) and connections with external data sources (for example, bespoke data exports). Built-in tools for data analysis detect and correct inconsistencies within the databases, recording detailed statistics of the corrections made to ensure full traceability of the process.

The user interface enables dynamic exploration and real-time visualisation of data, including display of stratigraphic relationships between graves and other cemetery elements within the Harris matrix. For further processing and data exchange, the tool supports export in various formats, from structured text files (CSV) to vector graphic files (SVG), enabling efficient integration with other research tools and platforms like geographic information systems (GIS) (Figures 1–3).

A chronological model for dating graves in stratigraphic sequences is included. This model operates based on the connections of the existing Harris matrix, incorporating all stratigraphic relationships and enabling dating based on various types of input chronological data provided by relative and absolute, archaeological, historical, and scientific datings. Combining different absolute and relative datings in stratigraphic sequences allows temporal definition even for graves that lack datable archaeological finds.

The article presents the foundational archaeological premises underlying the chronological modelling framework. The theoretical framework establishes a connection between graph theory and Allen's temporal algebra, effectively translating temporal logical constructs into Boolean algebraic expressions—a basis of logical reasoning in mathematics (Figures 4–8).

Although the tool effectively manages the data and dating of graves, it has several limitations that offer opportunities for further development. Further enhancements could extend the methodology's applicability to other archaeological contexts with extensive and complex stratigraphy. Furthermore, development into a full product would require testing at different archaeological sites, which would require additional research and implementation resources.

Funding

The author acknowledges the financial support from the Slovenian Research and Innovation Agency as part of the Z6-4608 project titled „Analysis of the Cemetery Župna Cerkev in Kranj (Slovenia)“.