

Dokumentace výzkumu ve složitých archeologických situacích raněstředověké lokality

Experimentální geodetická dokumentace v archeologii

Předkládaná studie přináší stručný přehled o vývoji metod dokumentace archeologických situací od padesátých let 20. století po současnost. V rámci digitalizace historické plánové dokumentace a jejího zpracování v prostředí CAD a GIS se podařilo detekovat několik nesrovnalostí a hrubých chyb, které bylo třeba rozklíčovat, pochopit a opravit. Nastalá situace ukázala potřebu exaktně porovnat efektivitu jednotlivých metod dokumentace archeologického výzkumu z pohledu časové i finanční náročnosti, nároků na odbornost obsluhy a kvality výstupů.

■ Jiří ŠINDELÁŘ
Marian MAZUCH
Marek HLADÍK
Lumír POLÁČEK

Porovnávány byly všechny v minulosti i dnes používané metody měřické dokumentace (tj. ortogonální metody měření a kresebná dokumentace na milimetrovém papíru, mapování metodou protínání vpřed, polární metoda měření za použití teodolitu a pásma i totální stanicí, jednosnímková fotogrammetrie, vícesnímková fotogrammetrie, měření metodou GNSS a 3D laserové skenování). Formou prezentace konkrétních příkladů dobré praxe seznamuje dokument s optimálním nasazením jednotlivých metod dokumentace v různých prostředích, v různých fázích výzkumu a upozorňuje také na časté chyby, které plynou z využívání moderních technologií bez znalosti teoretických základů geometrie, geodézie a dalších technických oborů.

Vzorovou spoluprací archeologů a geodetů byla v posledních letech vytvořena interní směrnice pro geodetickou dokumentaci archeologických výzkumů lokality Mikulčice-Valy. Tato směrnice doplňuje absenci legislativního rámce pro měřické práce v archeologii a na základě zkušenosti se zpracováním dat z více než šedesáti let zkoumání lokality definuje požadavky na terénní i kancelářskou etapu měřických prací a následnou formu archivace dat. Vychází přitom ze zkušeností autorů studie s definováním závazných směrnic pro dokumentaci inženýrských sítí ve veřejné správě a je koncipována tak, aby v budoucnu eliminovala nebezpečí vzniku hrubých (a často neodstranitelných) chyb při mapování zanikajících situací a cenných nálezových skutečností. Do určité míry se může stát vzorem pro obecná pravidla měřické dokumentace v archeologických a historických oborech.

Při zpracovávání měřických dat z archeologických výzkumů dlouhodobě zkoumaných archeologických lokalit se potýkáme s různorodostí dokumentace, respektive s rozmanitými způsoby jejího vedení a archivování. Zvláště v případě měřické dokumentace jsou často k dispozici různé zdroje metrických údajů, které si ne vždy plně odpovídají. V takové situaci je badatel nucen rozhodovat o relevantnosti jednotlivých zdrojů a určit, kterému údaji dá přednost. Rozhodování je to mnohdy velmi obtížné, viz příklad Pražského hradu (Maříková-Kubková – Herichová 2009). Podobná situace vystává v Mikulčicích, kde rozsáhlý archiv a především velmi dobře zdokumentované revizní výzkumy z poslední doby přímo vybízejí k exaktnímu porovnání všech běžně (i méně často) využívaných

metod měřické dokumentace a určení optimální a efektivní metodiky při archeologickém terénním výzkumu složitých stratigrafických situací raného středověku. Snahou autorského týmu, složeného z archeologů, terénního technika a geodeta, je popsat jednotlivé měřické metody, správně analyzovat jejich výstupy (případně experimentálně procesy opakovat) a fundovaně tak definovat silná a slabá místa jednotlivých postupů. Nastíněná problematika je řešena jako součást projektu „Virtuální model velkomoravské sídelní aglomerace v Mikulčicích jako systém interaktivní prezentace a archivace archeologického výzkumu“ (NAKI II, 2018–2022). Jedním z hlavních cílů projektu je zpracování výsledků šestašedesát let trvajícího terénního výzkumu do podoby webově založené interaktivní archeologické mapy jako prostředku moderní prezentace archeologického výzkumu a způsobu trvalého uchování exaktních archeologických dat. K tomu jsou primárně využity dostupné mapové a plánové podklady, letecké snímky, stará fotografická i nová fotogrammetrická dokumentace; to vše doplněné o možnosti aplikace metod a postupů z oblasti geoinformatiky. Nutno podotknout, že geoinformatika, respektive geoinformační technologie jsou pouze prostředníkem pro podporu řešení stanovených cílů a hypotéz výzkumu (Brůna 2005).

Při této práci se potýkáme právě se shora nastíněným problémem různorodých formátů i různé kvality dokumentace a musíme k jednotlivým datům přiřazovat různé priority. Vedlejším produktem projektu je tak exaktní porovnání různých měřických metod, které se na lokalitě v průběhu let používaly nebo se používají dodnes, tj. ortogonální

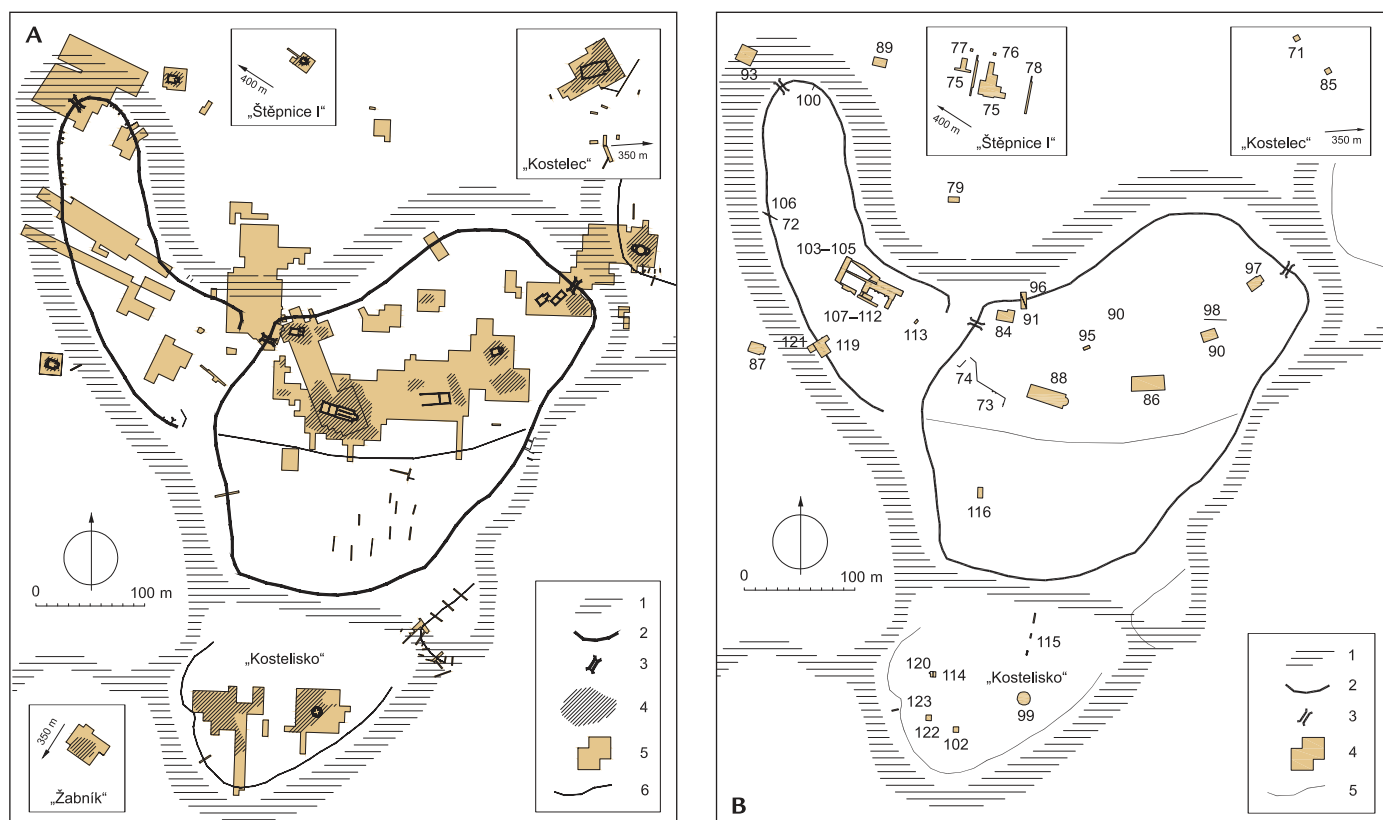
metody měření a kresebnou dokumentaci na milimetrový papír, mapování metodou protínání vpřed, polární metodu měření za použití teodolitu a pásma i totální stanice, měření metodou GNSS, jednosnímkovou fotogrammetrii, vícenámkovou fotogrammetrii a 3D laserové skenování, a to na příkladu jedné konkrétní zkoumané plochy v Mikulčicích (plocha R 2018, č. 119). To nám umožňuje porovnat všechny aspekty daného postupu, tedy jeho přesnost, časovou a finanční náročnost i nároky na odbornost obsluhy (dokumentátora). Na základě zkušenosti se zpracováním dat z více než šedesáti let zkoumání lokality definujeme požadavky na terénní i kancelářskou etapu měřických prací a následnou formu archivace dat. Výstupem je interní směrnice pro měřickou dokumentaci lokality, případně archeologického výzkumu.

Etapy mikulčického výzkumu

Celý dosavadní průběh archeologického výzkumu slovanského hradiště Valy u Mikulčic lze rozdělit do tří etap (Poláček *et al.* 2014, 192–195). Velkoplošné odkryvy byly zahájeny objevením lokality v roce 1954 a pokračovaly bez přerušení až do roku 1990. V letech 1991–1992 následovaly terénní práce menšího rozsahu, které sice měly charakter záchranného archeologického výzkumu, ale jsou chápány ještě jako součást (první) „uzavřené etapy výzkumu 1954–1992“ (obr. 1A). Tento pomocný termín byl vymezen pro potřeby přehledného zpracování a publikování obrovského a pro externího badatele těžko dostupného mikulčického fondu (Poláček 2001). Základními příručkami pro vyhodnocení této etapy výzkumu se staly přehledy metodiky a postupu

terénních výzkumů uspořádané podle jednotlivých sezón 1954–1992 (Poláček – Marek 1995) a podle jednotlivých uzavřených a jasně definovaných „prozkoumaných ploch“ z let 1954–1992 (obr. 1A; Poláček – Marek 2005).

Hlavní náplní druhé etapy mikulčického výzkumu 1993–2003 bylo „systematické zpracování“ dosavadních výzkumů (obr. 1B). V té době probíhaly na hradišti jen nevelké výzkumy záchranného nebo zjišťovacího charakteru, doplněné poměrně rozsáhlými záchrannými pracemi v zázemí hradiště. Veškerá pozornost mikulčického pracoviště ARÚB se upírala k systematickému zpracování obrovského fondu z předchozí, uzavřené etapy terénního výzkumu. Ke zveřejňování výsledků tohoto zpracování byly primárně určeny nově založené publikační řady *Studien zum Burgwall*



■ Obr. 1 Mikulčice-Valy. A – prozkoumané plochy 1. etapy výzkumu (1954–1992; přehled ploch viz Poláček, Marek 1995, 2005), B – prozkoumané plochy 2. a 3. etapy výzkumu (1993 – současnost).

Přehled prozkoumaných ploch 2. etapy výzkumu 1993–2003: 71 – plocha T 1995, 72 – plocha P 1998, 73 – plocha Z 2002-I, 74 – plocha Z 2002-II.

Přehled prozkoumaných ploch 3. etapy výzkumu (od 2004 doposud): 75–78 – plochy B 2004-I-IV, 79 – plocha P 2005, 80 – plocha T 2005-I, 81 – plocha T 2005-II, 82 – plocha B 2006-07, 83 – plocha C 2007, 84 – plocha II. kostel 2007–08, 85 – plocha T 2009, 86 – plocha Palác 2010, 87 – plocha X. kostel 2010–11, 88 – plocha III. kostel 2011, 89 – plocha VIII. kostel 2011, 90 – plocha IV. kostel 2012, 91 – plocha R 2012-I, 92 – plocha Z 2012-I, 93 – plocha B 2012, 94 – plocha K 2012, 95 – plocha Z 2012-II, 96 – plocha R 2012-II, 97 – plocha V. kostel 2012, 98 – plocha Z 2012-III, 99 – plocha IX. kostel 2012, 100 – plocha R 2012-III, 101 – plocha VI. kostel 2013, 102 – plocha X 2013-2015, 103–110 – plochy P 2013-I-VI, 111–112 – plochy P 2014-I-II, 112 – plocha P 2014-II, 113 – plocha P 2016, 114 – 115 – plochy X 2016-I-II, 115 – plocha X 2016-II, 116 – plocha DV 2016, 117 – plocha T 2017, 118 – plocha T 2018, 119 – plocha R 2018, 120 – plocha X 2019, 121 – plocha K 2019, 122–123 – plochy X 2020-I-II.

von Mikulčice a Internationale Tagungen in Mikulčice.

Počínaje rokem 2004 hovoříme o třetí etapě výzkumu, která trvá v principu doposud. Je označována jako etapa „pramenného zpracování a verifikace starých výzkumů“ (**obr. 1B**). Cílem této etapy je pokračovat ve zpracování dosavadních výzkumů – zejména v kritickém zpracování jednotlivých prozkoumaných ploch etapy 1954–1992, a to mimo jiné za pomoci detailních revizních a doplňkových terénních prací. Díky propojení tohoto postupu s právě probíhající přestavbou a revitalizací NKP Mikulčice bylo možné provést revizní a doplňkové výzkumy celé řady klíčových nálezových situací a objektů objevených „starým“ výzkumem. Takto se mezi lety 2008 až 2018 podařilo znovu objevit a nově dokumentovat téměř všechny kostely a palác, rozšířit staré výzkumy mostu č. 1 a fortifikace obou opevněných útvarů aglomerace – akropole a předhradí – nebo nově prozkoumat zástavbu předhradí v prostoru přestavovaného muzea. Výše uvedený předstihový výzkum opevnění předhradí (plocha R 2018; č. 119; Hladík – Mazuch – Poláček 2019) se stal referenční zkoumanou plochou pro tento článek.

Metodika dokumentačních prací „starých“ výzkumů (před rokem 1992)

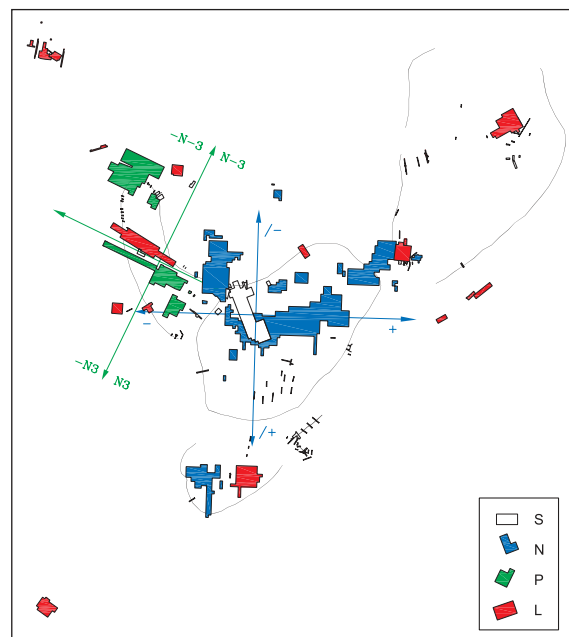
Metodika archeologických prací a systém dokumentace se od zahájení výzkumu v Mikulčicích vyvíjely postupně v závislosti na zkušenostech s místními podmínkami a byly přizpůsobovány aktuálním potřebám v konkrétních situacích. Zásadní inovace a proměny ve vedení výzkumu, a tedy i dokumentaci, lze pozorovat především v počátečních fázích etapy a v době personálních změn (např. s nástupem Z. Klanici v letech 1960–1963). Od poloviny šedesátých let až do roku 1992 lze metodiku terénních prací i systém dokumentace považovat za stabilní (blíže a podrobněji k metodám velkoplošných výzkumů viz Poláček – Marek 1995).

Základní jednotkou pro terénní výzkum a jeho dokumentaci byly a jsou čtverce 5×5 m čtvercové sítě (**obr. 2**). První plošné výzkumy na

lokalitě, tj. odkryvy v prostoru druhého a třetího kostela v letech 1955 a 1956 probíhaly ve „staré obecné“ čtvercové síti, jejíž hlavní směr byl dán právě pomyslnou spojnicí mezi těmito dvěma mikulčickými stavbami (delší osa plochy ve směru SZ–JV). Již v průběhu roku 1957 dochází k zásadní změně a na lokalitě je vytyčena „nová obecná“ síť, fixovaná pevnými body 50×50 m v ose S–J a V–Z. Tato síť jako základní rozměření pro další výzkum akropole přesahuje její opevnění a pokračuje do prostoru podhradí, respektive zaniklých říčních koryt na severozápadě a severovýchodě, do polohy Kostelisko na jihu. Třetí základní čtvercový systém byl vyměřen pro předhradí na západní straně aglomerace („obecný čtvercový systém předhradí“). Pro jednotlivé kostely v podhradí, stejně jako pro Těšický les, Žabník a další polohy podhradí, vznikly samostatné „lokální“ čtvercové sítě s vlastní orientací, která je zpravidla určována místními poměry (**obr. 2**; Poláček – Marek 1995, 25–28).

Základní dokumentace „starého“ terénního výzkumu v Mikulčicích se skládala ze slovní, kresebné, geodetické a fotografické dokumentaci jednotlivých čtverců čtvercové sítě. Tato „surová“ dokumentace je v rámci většiny zkoumaných ploch opatřena „celkovými poznámkami“. Tyto poznámky nejsou jednotně obsahově ani formálně a u řady zkoumaných ploch úplně chybějí. Celá dokumentace nepředstavuje v žádném případě pramen vhodný k celkovému zpracování výzkumu. V podstatě to samé platí o původních nálezových zprávách, které jsou k dispozici jen pro malou část prozkoumaných ploch 1954–1992 (Poláček – Marek 1995, 24).

Propojení terénní situace s nálezy zajišťovalo „nálezkové číslo“, přidělené jednotlivým nálezům nebo skupinám nálezů odkrytým blízko sebe. Nálezkové číslo neslo většinou informaci o přibližné lokalizaci v rámci čtverce 5×5 m a někdy také slovní popis charakteru vrstvy, ovšem nijak důsledně dodržovaný a často zaměnitelný s popisem jiných nálezových čísel (čili často nelze určit, zda šlo ve dvou nebo více případech o ten samý kontext, či nikoliv). Vazba nálezů na konkrétní kontext tak byla velmi vágní. Nakonec sám terénní



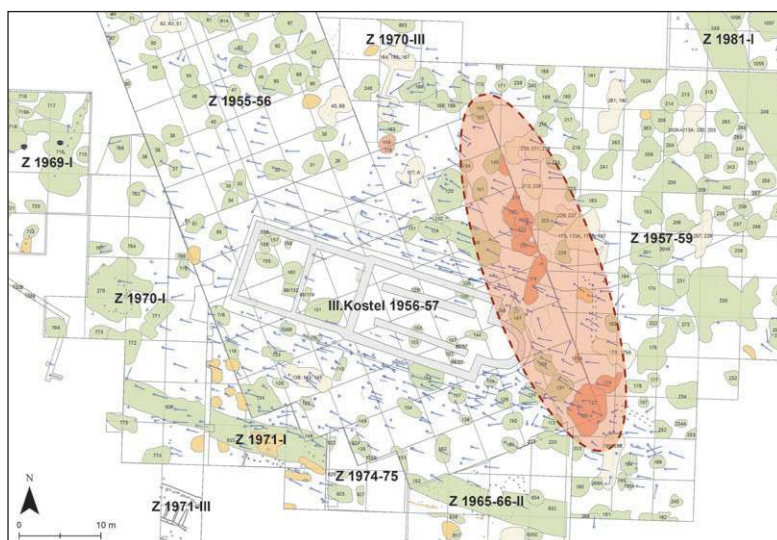
■ **Obr. 2** Mikulčice-Valy. Přehled měřických sítí používaných v rámci dosavadního výzkumu v Mikulčicích. S „starý obecný čtvercový systém“, N „nový obecný čtvercový systém“, P „obecný čtvercový systém předhradí“, L lokální čtvercové systémy. Podle Poláček – Marek 1995, aktualizováno. Grafika O. Marek, P. Čáp.

kontext nebyl ve většině případů exaktně definován. Tento způsob nálezové evidence byl v Mikulčicích v platnosti v podstatě po celou etapu „velkoplošných výzkumů“.

Revize měřických systémů na bradišti Mikulčice-Valy

Od počátku terénních prací byla v Mikulčicích osnovou systematického odkryvu pravidelná čtvercová síť. Ačkoliv čtvercový systém 5×5 m nebyl pro celou lokalitu a jednotlivé časové fáze dosavadních výzkumů jednotný, jsou všechna získaná data kompatibilní, a to především díky skutečnosti, že jsou veškeré sítě usazeny do jednotného souřadnicového a výškového systému. Od začátku terénních prací (prvního polohopisného a výškopisného mapování lokality) byli na lokalitě přítomni geodeti a veškeré plány jsou usazeny v souřadnicovém systému JTSK a výškovém systému Bpv (Poláček – Marek 1995, 23–28). To výrazně usnadňuje naše úsilí při vynášení výsledků výzkumu v rámci všech etap do jednotné účelové digitální mapy v prostředí CAD a GIS. I přesto se toto snažení neobešlo bez obtíží.

Při sesazování půdorysných plánů se ukázaly velmi hrubé nesouhlady v místech spoju jednotlivých



■ **Obr. 3** Mikulčice-Valy, širší prostor třetího kostela (baziliky) na akropoli. Nesoulad ve vynesení objektů na styku ploch „III. kostel 1956–57 a Z 1957–59“. Podle připravovaného virtuálního modelu velkomoravských Mikulčic. Grafika M. Hlavica.

čtvercových sítí. Asi nejmarkantnější je případ hranice ploch „III. kostel 1956–57“ a „Z 1957–59“ (**obr. 3**). V jednom konkrétním místě, na hranici těchto dvou čtvercových sítí, byla zkoumána jedna polovina zahloubeného objektu ve

starším systému a druhá polovina téhož objektu již v systému novějším. Odchylka na styku obou systémů je tak veliká, že nejenže na sebe obě poloviny objektu nenavazují, ale zdá se, jako by šlo vždy o dva odlišné objekty. Tato prostorová chyba (přibližně 1,5 m) logicky vzbuzuje nedůvěru v přesnost vytyčené základní čtvercové sítě („nové obecné“) z padesátých let.



■ **Obr. 4** Mikulčice-Valy. Kontrola historických měřických sítí. Okrová barva – historické čtvercové sítě výzkumu vynesené dle původní plánové dokumentace. Modrá a zelená barva – rekonstrukce dvou hlavních historických, kontinuálně užívaných měřických čtvercových systémů (modře – „nový obecný čtvercový systém“, zeleně – „obecný systém předhradí“) podle aktuálního zaměření bodů sítě 50 × 50 m vytyčených v minulosti a dodnes stabilizovaných pomocí zabetonovaných železných trubek. Grafika J. Šindelář.

Z uvedeného důvodu byly body této sítě (body stabilizované dnes kovovou rourou zabetonovanou pod úrovní terénu v intervalu 50 × 50 m) v rámci revize měřických systémů v roce 2020 vyhledány a zaměřeny metodou GNSS. Pro zaměření byla použita geodetická GNSS RTK aparatura Trimble R6; měření bylo protokolárně dvakrát opakováno. Tím bylo docíleno přesnosti prostorového určení bodů, které splňuje přísná kritéria pro práci v katastru nemovitostí (zákon č. 256/2013 Sb., vyhláška č. 357/2013 Sb., ČSN 730415/80 Geodetické body). Po vynesení nově zaměřených bodů a jejich kritické konfrontaci s digitalizovaným plánem z padesátých let se ukázalo, že síť pevných bodů 50 × 50 m je vytyčena v terénu bezchybně a drží si vysokou přesnost v systému JTSK, a to v celé ploše akropole, v prostoru zkoumaných říčních koryt u druhého a šestého kostela i v části podhradí (severní podhradí a Kostelisko). To stejné platí o „obecné síti předhradí“ (**obr. 4–6**). Přesnost vytyčení bodů v síti 50 × 50 m se pohybuje v řádech prvních centimetrů a jejich chyba určení do souřadnicového systému JTSK nepřekračuje nikde 30 cm. Zmíněný nesoulad zákresu jednotlivých objektů a archeologických situací (viz **obr. 3**) vznikl – a jeho původ je třeba dále hledat – nejspíše při detailním zaměřování sond, jejich zakreslování do základní čtvercové sítě nebo při digitalizaci historické papírové dokumentace.

Detailní rozbor výše uvedené konfrontace je předmětem samostatné studie. Na tomto místě se problému dotýkáme hlavně proto, že velmi dobře ilustruje skutečnost, jak důležitá je preciznost při měřické dokumentaci v rámci archeologického výzkumu. Také to pro nás bylo jedním z impulzů pro sepsání základních teoretických i praktických pravidel a podrobné metodiky pro dnes tolik rozšířenou fotogrammetrii (viz Šindelář *et al.* 2019) a vytvoření zde předkládané interní směrnice pro měřickou dokumentaci archeologických výzkumů. Velkoplošný terénní výzkum lokality byl sice v principu ukončen v roce 1990 jako „uzavřená etapa výzkumu 1954–1992“, to ale neznamená, že na lokalitě a v jejím těsném okolí neprobíhaly a neprobíhají další terénní výzkumy. Pro potřebu nových, výlučně již

záchranných, ověřovacích nebo jiných cíleně prováděných terénních prací byly definovány základní požadavky na komplexní dokumentaci tak, aby splňovaly všechny požadavky vedoucího výzkumu, nevyžadovaly stálou přítomnost geodeta (zaručovaly však vysokou „geodetickou“ přesnost) a byly plně kompatibilní s výsledky předchozích šestašedesáti výzkumných sezón.

Porovnání použitých dokumentačních metod

Jedním z hlavních cílů této studie bylo porovnání měřických metod aplikovaných na lokalitě v průběhu dosavadního terénního výzkumu (1954–2020). Přitom jsme vycházeli z předpokladu odvozeného z letité praxe v Mikulčicích, že požadavky na běžnou měřickou dokumentaci dnes nejlépe splňuje jednosnímková fotogrammetrie kombinovaná s polární metodou měření prováděnou elektronickou totální stanicí. Jde o v terénu nejrychlejší metodu

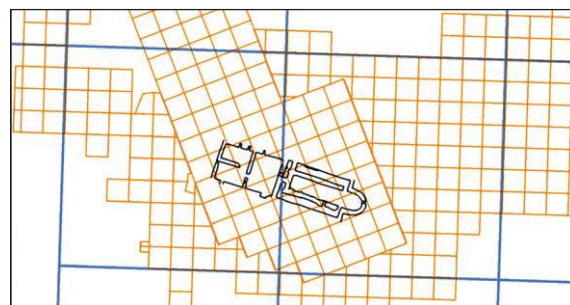


■ **Obr. 7** Mikulčice-Valy, výzkum R 2018. Perspektivní pohled na digitální model náleзовé situace (špatně přístupný profil v sondě). V Mikulčicích používaná kombinace polární metody měření a jednosnímkové fotogrammetrie s doplněním o sérii pomocných snímků (viz Šindelář et al. 2019) umožňuje nadstavbové zpracování ve 3D (vícesnímková fotogrammetrie), tj. velmi kvalitní, rychlou a přesnou fotogrammetrickou dokumentaci špatně přístupných profilů v sondách. Model J. Šindelář.

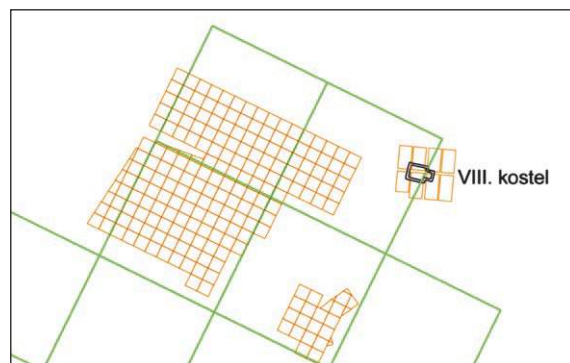
sběru metrických dat a při dodatečném zajištění několika sérií fotografií (viz metodiku podle Šindelář et al. 2019) i s možností budoucího vytvoření digitálního modelu již neexistujících situací (např. Šindelář – Břicháček 2019).

V počátcích aplikace jednosnímkové fotogrammetrie fixované na vlíčovací body zaměřené totální stanicí v Mikulčicích (poprvé v ploše T 2009) bylo experimentálně provedeno porovnání přesnosti této metody s klasickou kresebnou dokumentací. Hlavním ukazatelem přesnosti však nebyla vzájemná odchylka mezi georeferencovanou kresebnou dokumentací a fotoplánem, ale odchylka těchto dvou výstupů od polohopisného zaměření dokumentovaného kontextu totální stanicí. Výsledkem je konstatování, že jednosnímková fotogrammetrie je dostatečně přesná a také neporovnatelně rychlejší ve srovnání s kresebnou dokumentací, samozřejmě za předpokladu korektního aplikování obou metod.

Ovšem za neefektivnější metodu s ohledem na čas, finance, náročnost pořízení přístrojové techniky i požadavků na obsluhu považujeme vícesnímkovou fotogrammetrii. Tato metoda umožňuje velmi variabilní využití v nejrůznějších fázích výzkumu a je použitelná pro rychlou a maximálně přesnou měřickou dokumentaci i ve velmi stísněných prostorách (vzorově při dokumentaci profilů v úzkých výkopech či dutinách nepatrných rozměrů – viz **obr. 7–8**). Její aplikace v terénu vyžaduje obsáhnutí jen několika jednoduchých pravidel definovaných přehledně v odborných publikacích (pro archeologii např. Šindelář et al. 2019). Abychom mohli jednoznačně prokázat efektivitu posledně uvedené metody, přistoupili jsme k exaktnímu testování jednotlivých



■ **Obr. 5** Mikulčice-Valy. Ukázka ověření přesnosti historické měřické sítě („nový obecný čtvercový systém“) na příkladu prozkoumaných ploch v širším prostoru baziliky na akropoli. Výřez z mapy na **obr. 3**. Přesnost vytyčení čtverců 50×50 m se pohybuje v řádech prvních centimetrů a jejich chyba určení do souřadnicového systému JTSK nepřekračuje nikde 30 cm. Grafika J. Šindelář.

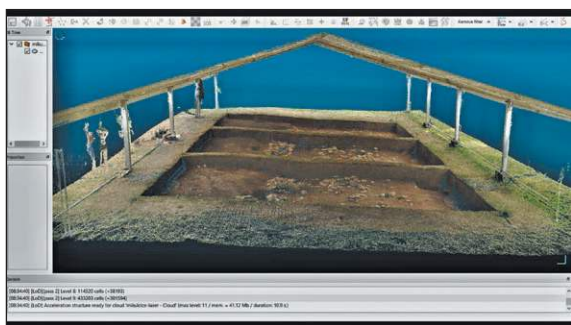


■ **Obr. 6** Mikulčice-Valy. Ukázka ověření přesnosti historické měřické sítě („obecný čtvercový systém předhradí“) na příkladu prozkoumaných ploch v širším prostoru prvního koryta a přilehlé části předhradí. Výřez z mapy na **obr. 3**. Přesnost vytyčení čtverců 50×50 m se pohybuje v řádech prvních centimetrů a jejich chyba určení do souřadnicového systému JTSK nepřekračuje nikde 30 cm. Grafika J. Šindelář.

metod měřické dokumentace. Metod, které byly v minulosti na předmetné lokalitě používány, ale i takových, které jsou chápány jako moderní, rychlá a přesná aplikace sběru metrických dat v průběhu archeologických odkvů (Šindelář et al. 2019; Zakrzewski 2019; Brejcha et al. 2015; Sokol et al. 2017). Jmenovitě jsme v rámci identické situace ve vybrané ploše (R 2018, č. 119) aplikovali měření ortogonální metodou a kresebnou dokumentací na milimetrový papír, mapování metodou



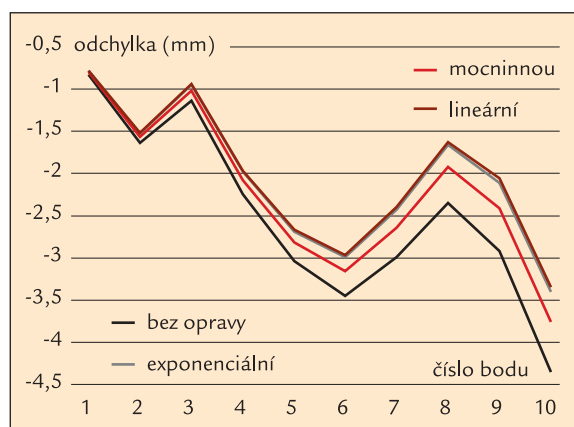
■ **Obr. 8** Mikulčice-Valy, plocha R 2018. Výsledné ortofoto profilu na předchozím **obr. 7** (profil ve čtvercích 3–4). Ortofoto J. Šindelář.



■ Obr. 9 Mikulčice-Valy, plocha R 2018 na perspektivním zobrazení mračna bodů, které bylo pořízeno terestrickým laserovým 3D skenerem. Grafika J. Šindelář.

Odchytky trigonometrické metody od nivelace

Číslo bodu	Bez opravy z refrakce	S uvážením vlivu refrakce s průběhem teploty v závislosti na výšce [mm]:		
		exponenciální	mocninovou	lineární
1	-0,83	-0,78	-0,8	-0,78
2	-1,64	-1,53	-1,57	-1,52
3	-1,14	-0,95	-1,02	-0,94
4	-2,25	-1,98	-2,08	-1,97
5	-3,04	-2,69	-2,82	-2,67
6	-3,45	-2,99	-3,16	-2,97
7	-2,99	-2,43	-2,64	-2,4
8	-2,35	-1,66	-1,92	-1,63
9	-2,92	-2,11	-2,41	-2,06
10	-4,35	-3,4	-3,76	-3,35



■ Tab. 1 Porovnání výšek získaných nivelací a trigonometrickým určením: Na deseti vybraných a dočasně stabilizovaných bodech jsme zjišťovali nadmořskou výšku nivelací i trigonometrickou metodou (zaměření totální stanicí Trimble 3605). V tabulce jsme uvedli rozdíl mezi výsledkem z přesné nivelace a následným trigonometrickým určením výšky v milimetrech (bez oprav z refrakce i po provedených opravách). Ukazuje se, že metoda trigonometrického určením výšek je pro potřeby dokumentace archeologického výzkumu naprosto dostačující a vyhovující (odchytky v řádech milimetrů). Při dodržení některých pravidel lze použít metodu i pro potřeby inženýrské a přesné geodézie. Největší vliv na přesnost trigonometrické metody mají vnější atmosférické podmínky při měření.

protínání vpřed, polární metodou měření za použití teodolitu a pásma i totální stanice, jednosnímkovou fotogrammetrii, vícenímkovou fotogrammetrii, 3D laserové skenování a určování polohy bodů metodou GNSS (globální navigační satelitní systémy). Vedle toho jsme simulovali praktický postup archeologického výzkumu a kombinovali tak vzájemně jednosnímkovou fotogrammetrii s polární metodou a trigonometrickým určením výšek, dále vícenímkovou fotogrammetrii s laserovým skenováním a samozřejmě vícenímkovou fotogrammetrii s polární metodou a trigonometrickým určením výšek.

Při testování jsme jednoznačně potvrdili, že pro potřeby měřické dokumentace v archeologii je jedno, zda jsou nadmořské výšky určovány trigonometricky, nebo nivelací (viz tab. 1). Obě metody určením výšek jsou dostatečně přesné (přesnost v rámci milimetrů). Výhoda trigonometrického určením výšky spočívá v rychlosti sběru dat. V rámci jednoho měření totální stanicí totiž získá měřič kompletní informaci o poloze i výšce (souřadnice X, Y a Z).

Pokud budeme testované prostorové metody hodnotit pouze podle kvality výstupu a úspory času v terénní fázi výzkumu, pak je

jednoznačným „vítězem“ **kombinace laserového skenování a vícenímkové fotogrammetrie**. Každá z těchto dvou metod v kombinaci má své silné i slabé stránky. Jak bylo v aplikovaném výzkumu opakovaně prokázáno (např. Šindelář et al. 2019; Brejcha et al. 2015), slabé stránky fotogrammetrické dokumentace velmi dobře nahrazuje výstup z laserového skenování a naopak (ostré hrany dokumentovaného objektu, složitá členitost ploch apod.). Tedy tam, kde je chybovost fotogrammetrie nad únosnou mírou, zpřesňujeme výsledek laserovým skenerem a maximální míru detailu na plochách, které jsou problematické pro laserové paprsky (průsvitné a průhledné materiály a plochy vysoce kontrastní), získáváme doplňujícím fotogrammetrickým výpočtem. Samotná **vícenímková fotogrammetrie** kombinovaná s polární metodou zaměřením vličovacích (a případně dalších významných) bodů se svou kvalitou výstupů a rychlostí sběru dat v terénu řadí hned za výše popsanou (a v současnosti považovanou za nejkvalitnější) metodu měřické dokumentace. Až na pomyslné třetí místo v kvalitě výstupů řadíme samotné **laserové skenování**, a to pouze za předpokladu, že je prováděno plnohodnotným terestrickým 3D skenerem, nikoliv skenerem mobilním (obr. 9–10). Mobilní skenery jsou určeny pro úplně jiné úlohy a v rámci archeologie je lze využívat například k dokumentaci jednotlivých artefaktů, případně jednotlivých detailů v sondě (Pierdicca et al. 2016; Frolík 2016; Konečný 2016).



■ Obr. 10 Mikulčice-Valy, plocha R 2018. Náhled na „ortofoto“ zkoumané plochy (prokopané tři pásy 4,5 × 10 m). Zdroj pro plán je mračno bodů získané laserovým skenováním. Třicet minut práce v terénu a třicet minut práce v kanceláři do vytvoření ortofotoplánu (použit laserový skener FARO Focus S150 a software Geus a RealWorks). Ortofoto J. Šindelář.

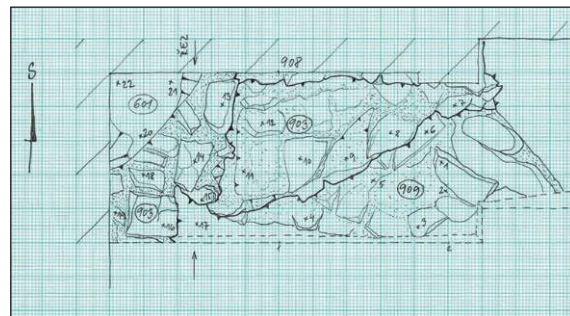
Nižší přesnost a výrazně menší informační pole (z hlediska prostorových dat) získáme **jednosnímkovou fotogrammetrii**. Tu je navíc potřeba vždy kombinovat s polární metodou měření, případně s ortogonálním zaměřením vličovacích bodů a nivelací výškových úrovní. Kvalita plánů vytvořených jednosnímkovou fotogrammetrií je silně ovlivněna použitím vhodné fotografické techniky, správným rozmístěním vličovacích bodů, znalostí teoretických základů fotogrammetrie a také přístupem k odpovídajícímu softwaru. Na mnoha pracovištích a v mnoha vědních oborech se setkáváme s tím, že jsou vytvářeny nepravé ortofotoplány tak, že je kolmý snímek zájmového objektu upravován (i několikanásobně)

jednoduchou podobnostní transformací v prostředí CAD a softwaru pro úpravu fotografií (vzorově Photoshop). Tak je ovšem vytvářena pouhá iluze skutečného plánu. Fotografie je obrázek reality, který je zaznamenán tzv. středovým promítáním. Ortofoto (také fotoplán) je už upravená fotografie převedená do pravoúhlého promítání (Pavelka 2003a; 2003b). V některých publikacích se sami autoři usvědčují z absolutní neznalosti základní teorie používáním nepřipustného pojmu fotogram. Fotogram je existující pojem, ale nejedná se v žádném případě o výstup z fotogrammetrie. Jde o uměleckou fotografickou techniku bez použití fotografického optického přístroje – fotoaparátu. Je to technika založená na stínových obrazech vytvořených v temné komoře umístěním světlocitlivého materiálu pod zdroj světla. Tím se vytváří charakteristické kompozice z různě průsvitných předmětů (Neussüss 1990; Peres 2007; Bezdek – Frouz 2014). Pro potřebu nejjednodušší metody fotogrammetrie (jednosnímkové) lze doporučit archeologům například software SIMphoto. SIMphoto je open-source šířitelný pod licencí GNU GPL (existuje v české i anglické verzi). Jedná se o jednoduchou a uživatelsky přívětivou aplikaci, která je zaměřená na zpracování rastrových dat metodou jednosnímkové fotogrammetrie. Byla vytvořena v rámci diplomové práce D. Čížka a obhájena v lednu 2011 na Fakultě stavební ČVÚT (Čížek 2011).

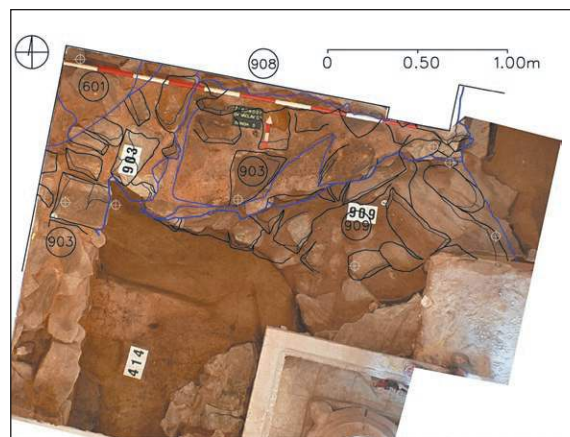
V případě nedodržení teoretických předpokladů a pravidel (viz Šindelář et al. 2019; Pavelka 2003a) se stává

z dokumentace „metodou kolmého snímku“ pouze obrázek do publikace, ale dále geodeticky nepoužitelný zdroj. Při testování (viz obr. 11A–E) jsme exaktně prokázali, že při špatném rozmístění vličovacích bodů a při použití jednoduché podobnostní transformace je přesnost „ortofota“ řádově horší než dokumentace kresebná s využitím ortogonálních metod měření a milimetrového papíru. Velmi dobře můžeme tuto skutečnost ilustrovat na příkladu archeologické sondy v interiéru kostela v Žabonosích z roku 2009 (výzkum Archeologického ústavu AV ČR, Praha). Měřická dokumentace zde byla prováděna primárně formou ortogonálního měření a zakreslování na milimetrový papír. Souběžně se prováděla vícenásobná fotogrammetrie, která dnes umožňuje vytvoření kompletní digitální kopie archeologické situace v sondě. Ze vstupních fotografických snímků můžeme vybrat jeden kolmý pohled na sondu a prakticky tak simulovat různé postupy při zpracovávání plánů (obr. 12–15). Za absolutně přesnou považujeme v tomto případě půdorysnou situaci v sondě, kterou získáme vytvořením ortofota z digitálního modelu. Při porovnání s kresebnou dokumentací na milimetrovém papíře (provedenou v tomto ohledu velmi zkušeným technikem) sledujeme pouze nepatrné a naprosto zanedbatelné odchylky, které svědčí jednak o velmi precizní práci kresliče, ale také o obecné skutečnosti, že jednoduchá metoda zaměření za použití pásma a milimetrového papíru je dostatečně přesná, všem jednoduše

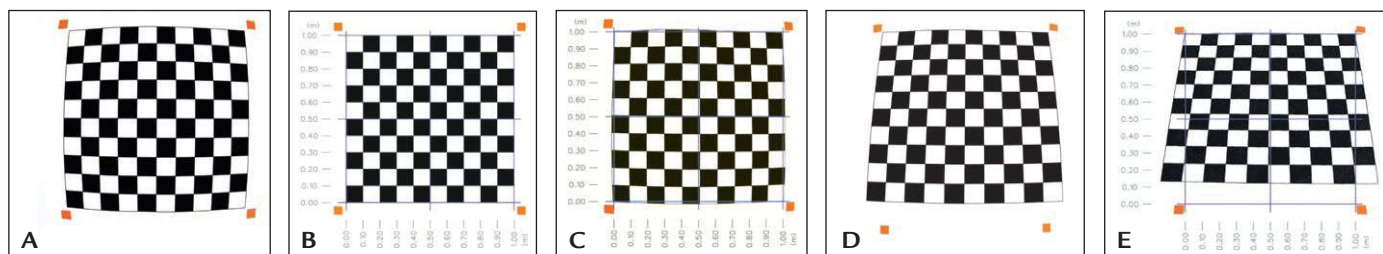
srozumitelná, velmi málo náchylná na hrubé chyby, a tudíž funkční (samozejmě za předpokladu správného použití).



■ Obr. 12 Žabonosy 2009. Ukázka kresebné dokumentace jedné sondy. Ortofonální zaměření. Plán P. Pinc.



■ Obr. 13 Žabonosy 2009. Porovnání kresebné dokumentace na milimetrovém papíru (digitalizováno v prostředí Microstation) a ortofotoplánu z vícenásobné fotogrammetrie. Technik po našem zaškolení nafotografoval archeologickou sondu podle pravidel „3 × 3 pravidla pro fotogrammetrii“ (viz Šindelář et al. 2019) a to umožnilo po deseti letech vytvořit přesný 3D model sondy (do výpočtu stačilo osm fotografií). Po letech je tak možnost exaktní kontroly plánové dokumentace. Vidíme pouze zanedbatelné lokální odchylky, což svědčí o bezchybné a precizní práci kresliče. Ukazuje také ortogonální metodu měření a kresebnou dokumentaci na milimetrový papír jako dobrou, přesnou a levnou metodu. Grafika J. Šindelář.



■ Obr. 11 Simulované testy v jednosnímkové fotogrammetrii, které lépe ilustrují tvrzení o chybách z běžné praxe při jednosnímkové fotogrammetrii. Grafika J. Šindelář.

A Zdrojová fotografie (širokoúhlý objektiv) pro fotogrammetrický výpočet. Rovina 1 × 1 m (šachovnice čtverců 10 × 10 cm).

B Ortofonoplán z fotografie na obr. 11A. Kolineární transformace. Modré linie – pomocné rovnoběžky, které prokazují přesnost a správnost výstupu.

C Ortofonoplán ze zdrojové fotografie na obr. 11B, který vznikl pouhou podobnostní transformací a časově velmi náročnou úpravou ve Photoshopu. Modré linie – pomocné rovnoběžky, které prokazují nepřesnost výstupu.

D Zdrojový snímek pro fotogrammetrii. Kontrolní plocha 1 × 1 m (šachovnice čtverců 10 × 10 cm). Oranžově je vyznačena signalizace, která simuluje případ nesprávného rozložení vličovacích bodů v terénu. Dva body v horní části jsou ve stejné ploše jako zájmová oblast (šachovnice) a dva body dole jsou ve stejné vzdálenosti (přesně pod spodními rohy šachovnice), ale výškově 0,5 m pod úroveň zájmové plochy.

E Fotoplán ze zdrojové fotografie na obr. 11D, který vznikl kolineární transformací na čtyři vličovací body v různých výškách. Modré linie – pomocné rovnoběžky, které prokazují nepřesnost výstupu.

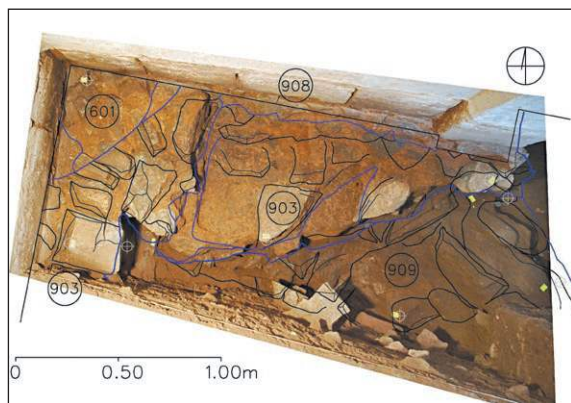
Problematictější je to už s výsledky jednosnímkové fotogrammetrie (viz **obr. 16–18**). I za předpokladu, že jsme použili správný program pro převod vstupní fotografie na pravouhlý fotoplán, se na výsledku projevují klasické nedostatky této metody, totiž nepřírozené prohnutí a protáhnutí některých částí (způsobené tím, že téměř vždy dokumentujeme situaci, která není v ideální rovině). V případě, že nemáme v rovině zájmové situace správně rozmístěné vlčovací body (na které fotografii transformujeme), se některé části dokumentované oblasti úplně hrouť a tvoří na výsledném fotoplánu lživé linie a plochy (příkladem může být např. zeď s korunou v jiné výšce než jsou vlčovací body – ve výsledném fotoplánu je šířka takové zdi vždy jiná

než ve skutečnosti). Jednoznačně nevyhovující je pak „fotoplán“, který se snažíme vytvořit jednoduchou podobnostní transformací v CADu. Směry linií (příkladově líce zdi) mají na takovém plánu nesprávný směr a výsledek (vypovídací hodnota) takové dokumentace je horší než zajištění tří základních měř (pouhá čísla) odečtených pásmem. Správně provedená dokumentace formou jednosnímkové fotogrammetrie však svou kvalitou plně dostačuje požadkům moderní archeologie a práci v terénu významným způsobem urychluje.

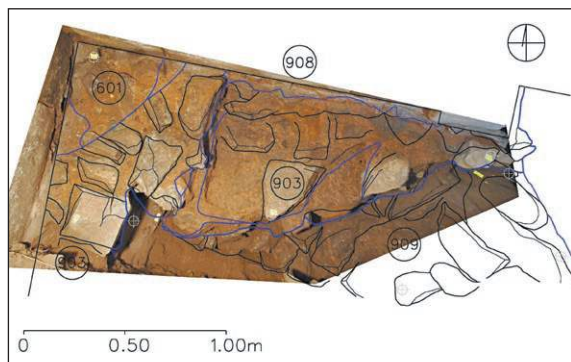
Na právě prezentovaných příkladech je nejlépe vidět, že aktuální rozmach a rozšíření moderních technologií v oblasti geodézie spolu s cenově stále dostupnější přístrojovou základnou ještě nemusejí nutně znamenat výrazný kvalitativní posun v geodetické dokumentaci archeologických výzkumů. Na rozdíl od jiných oborů neexistují v archeologii normy pro geodetické měření, které by jasně definovaly základní kvalitativní požadavky. Ústup od předem daných geodetických směrnic umožňuje tvorbu amatérských děl, jež nemají společné technické parametry ani prvky. V době, kdy tato amatérská díla vznikají, mají pro archeology (zdánlivě) dostatečnou určující hodnotu, ovšem z dlouhodobého hlediska považujeme takové výstupy za díla nepoužitelná. Využití technických znalostí zeměměřičů je žádoucí nejen z důvodů vytvoření kvalitních výstupů v podobě map a plánů, ale i službou pro budoucí badatele, aby tito mohli navázat na kvalitně zpracovaná měření a objektivně tak podchycovat další historické souvislosti (John 2008; Kuna et al. 2004).

Správnost výše uvedených tvrzení lze demonstrovat na příkladu projektu „Virtuální vědecký model“, řešeného momentálně na lokalitě Mikulčice-Valy, i na dalších projektech z poslední doby (viz výše). Při sestavování *Archeologického atlasu Pražského hradu* se musel autorský tým obdobně jako v Mikulčicích vypořádat s velmi variabilní měřickou dokumentací z historických výzkumů. Do jednotné mapy byly vynášeny polohy reliktních historických objektů z nejstarších výkopů (měřické skici, kresebná dokumentace vzniklá ortogonální metodou a metodou

protínání vpřed, tj. jednoduché zaměření pásmem z počátku 20. století) přes první zaměření polární metodou (teodolitem) a analogovou fotogrammetrií (geodetická skupina Archeologického ústavu ČSAV v Praze pod vedením J. Morávky) až po nejnovější zaměření totální stanicí, které si zajistili sami technici archeologického výzkumu. Z hlediska přesnosti byly shledány výstupy měřičů Archeologického ústavu (tedy zaměření teodolitem a výstupy z analogové, ale plně profesionální fotogrammetrie) jako ty nejvyšší. Nejenže tyto výstupy vykazovaly nejvyšší přesnost, ale forma uložení dat a jejich archivace umožňovala zpětnou kontrolu a případné opakování výpočtu i po desetiletích. Překvapivě nejstarší forma dokumentace z počátku 20. století vykazovala téměř srovnatelné (tj. vysoce kvalitní) výsledky. Zaměření ortogonální metodou a metodou protínání vpřed na plánech reliktních starší církevní architektury v katedrále sv. Víta na Pražském hradě vykazuje největší střední chybu 5 cm. Vzhledem k tomu, že se měřič musel potýkat s velmi složitou situací uvnitř staveniště (dostavba katedrál) a velkým převýšením mezi jednotlivými horizonty, jde o doklad pečlivé práce a skvělého zvládnutí všech teoretických základů geometrie. I tyto výsledky práce jsou archivovány tak, že dnes, po sto letech, můžeme jednoduše provádět celou řadu kontrolních měření a v případě nějakých pochyb správnost plánů ověřit (Maříková-Kubková – Herichová 2009). Kvalitativně nejhorší část plánové dokumentace historických archeologických výzkumů tak tvoří ta nejmladší, vytvářená techniky výzkumu za využití totální stanic. V naprosté většině případů neexistuje základní archivace prvotní dokumentace a dohledatelné jsou pouze vynesené plány bodů a textové seznamy jejich souřadnic. Nikdo už nikdy nedohledá, jakým způsobem byly body zaměřeny, nedošlo-li k nějaké hrubé měřické chybě a z jakého systému měřič vycházel. Opět se tak ukazuje, že moderní přístroje a metodiky (laserové skenery, totální stanice, dálkoměry, tzv. fotoskenery apod.) jsou na pečlivost práce, pochopení teoretických základů geometrie a kontrolu práce výrazně náročnější než nástroje tradiční. Chyba, která při použití takové techniky vznikne, je zpravidla



■ **Obr. 15** Žabonosy 2009. Porovnání kresebné dokumentace na milimetrový papír (digitalizováno v prostředí Microstation) a „ortofotoplánu z jednosnímkové fotogrammetrie“. V tomto případě však bylo použito pouze podobnostní transformace snímku a přesnost byla uměle zvyšována natahováním rohů „fotoplánu“ ve Photoshopu. Na první pohled možná dostačující plán. Při bližším zkoumání, ale zjistíme alarmující nepřesnosti v hlavních liniích zdi, které mohou v budoucnu způsobit výrazné interpretační chyby. Grafika J. Šindelář.



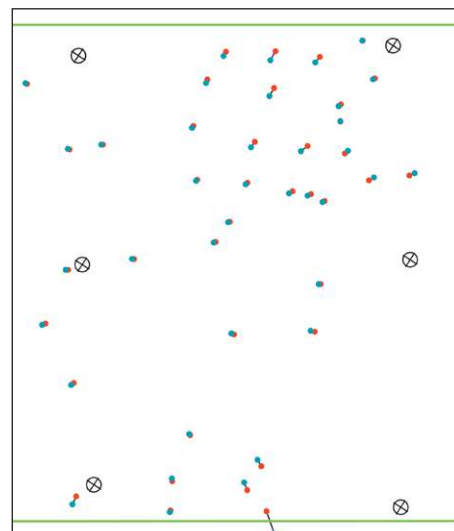
■ **Obr. 14** Žabonosy 2009. Porovnání kresebné dokumentace na milimetrový papír (digitalizováno v prostředí Microstation) a ortofotoplánu z jednosnímkové fotogrammetrie. Chyba fotoplánu je dána polohou vlčovacích bodů a poměrně velkou výškovou členitostí dokumentované situace. Základní linie zdi jsou na fotoplánu relativně správně. Grafika J. Šindelář.

špatně dohledatelná a mnohdy neopravitelná. Problémům lze předejít organizačně správně nastavenými kontrolními mechanismy a správnou volbou výstupů z projektu (srov. Šindelář *et al.* 2019). Není předmětem této studie rozvádět a popisovat charakteristiku jednotlivých testovaných metod. Na toto téma existuje celá řada publikací (např. Sokol *et al.* 2017; Brejcha *et al.* 2015 apod.). Podrobný přehled výsledků měřických testů jednotlivými metodami je uveden v **tabulce č. 2** a v doprovodných obrazových přílohách.

Ve světle výše uvedených skutečností a na základě společné multioborové diskuze jsme dospěli k vytvoření první směrnice pro geodetickou část dokumentace v rámci archeologického výzkumu lokality Mikulčice-Valy. Směrnice vychází z mnohaletých zkušeností archeologů a geodetů, kteří se více než dvacet let zabývají inženýrskou geodézií a v minulých letech definovali obdobné směrnice pro potřeby architektů v památkově chráněných objektech, archeologů Husitského muzea v Táboře (Šindelář – Krajčů 2005), speleologů České speleologické společnosti a správců inženýrských sítí. Vzniklý souhrn pravidel ukazuje optimální způsob pořizování a archivování měřických

dat a definuje požadavky na jejich přesnost. Pravidla jsou zobecněna natolik, že lze takový souhrn využít celoborově a není vázán pouze na konkrétní lokalitu. Při jejím dodržování se minimalizuje pravděpodobnost vzniku náhodných a hrubých chyb. I přes sebevětší snahu náhodné chyby při měření vznikají a je třeba s nimi počítat. Správně nastavené postupy však umožňují jejich včasné zachycení a eliminaci. Pro odhalování a následné odstraňování chyb využíváme manuálu pro zarovnání geodetických sítí a postupů z inženýrské geodézie (Gončarenko – Gladilin – Šiaudinytė 2019). Ačkoliv může někdo z odborné veřejnosti namítat, že jde zčásti o opakování teoretických základů geometrie a geodézie, případně o skutečnosti definované v zaběhlých státních normách a předpisech, je nutné poukázat na fakt, že v archeologických oborech není svázání s těmito normami nikterak zakotveno a také že ve velkém počtu odborných pracovišt (napříč republikou) dochází k hrubému porušování těch nejzákladnějších teoretických geodetických pravidel. Zavedení a dodržování této směrnice obecně může naopak zefektivnit dokumentaci archeologického výzkumu (zkvalitní výsledky, urychluje práci a je

významným vkladem do budoucnosti výzkumu na jakékoliv lokalitě). Do jisté míry tak může suplovat absenci legislativního rámce pro měřické práce v archeologii. Vůbec prvním krokem pro nastavení všeobecných pravidel geodetické dokumentace v Mikulčicích bylo (stejně jako v padesátých letech 20. století) vytvoření základního bodového pole lokality. Základní bodové pole bylo vytvořeno v roce 2009 a sestává z deseti bodů v ploše celé lokality, které jsou stabilizovány v terénu kamenným hranolem a signalizovány železnou tyčí. Body základního bodového pole jsou usazeny do souřadnicového systému S-JTSK a výškového systému Bpv. Určení souřadnic a výšek provedla profesionální geodetická kancelář metodou GNSS s upřesněním výšek jednotlivých bodů přesnou nivelací. Veškeré měřické práce v terénu dnes vycházejí výlučně z tohoto bodového pole. Výjimku představuje měření metodou GNSS, ovšem pouze tehdy, je-li zajištěna protokolární přesnost, která odpovídá požadavkům směrnice pro práci v katastru nemovitostí. Tím je zajištěno, aby všechny dokumentované situace byly usazeny správně do jednotného souřadnicového a výškového systému.



■ **Obr. 16** Mikulčice-Valy, plocha R 2018. Ukázka části plochy (čtverec 3–4). Kamenná destrukce na ortofotu z vícenímkové fotogrammetrie (kontrolním protokolem doložená maximální chyba 2 cm). Záběr cca 4,5 × 4,5 m. Červené značky – signalizované výrazné body na hranách kamenů. Grafika J. Šindelář.

■ **Obr. 17** Mikulčice-Valy, identická situace jako v obr. 16. Ortofotomikrograf z jednonímkové fotogrammetrie (zpracováno v software PMSAG – Elcovision 10). Modré značky – signalizované výrazné body na hranách kamenů, identické s červenými body na obr. 8. Grafika J. Šindelář.

■ **Obr. 18** Mikulčice-Valy, identická situace jako na obr. 16. Nesoulad na jednotlivých částech sondy při porovnání přesného plánu z vícenímkové fotogrammetrie (body červené) a chybné fotogrammetrie jednonímkové (body modré). Nepřesnost ortofota z jednonímkové fotogrammetrie je dána faktem, že je naprosto nevhodně volena poloha vlčivacích bodů (v různé nadmořské výšce). Maximální odchylka na kamenech ve dně sondy byla zjištěna v tomto případě 10 cm. U kamenů vyčnívajících do prostoru z profilu je logicky mnohonásobně vyšší. Při zpracování zdrojového snímku pouhou podobnostní transformací a „ohýbáním“ ve Photoshopu by byla chybovost ještě výraznější. Grafika J. Šindelář.

Efektivita jednotlivých metod měření

metoda	odhad ceny na pořízení hardware a software [tis. Kč]	časová náročnost (terénní fáze) [hod.]	časová náročnost (zpracování) [hod.]	střední chyba dokumentace [cm]	variabilita použitelnosti	požadavky na odbornost obsluhy	poznámka	kvalita	rychlost	cena	efektivita
ortogonální metoda a kresebná dokumentace na milimetrový papír	do 0,5	8	1	do 3	bez omezení	1	nutnost doplnit nivelaci	3	5	1	9
mapování metodou protínání vpřed	do 0,5	8	5	do 5	bez omezení	1	nutnost doplnit nivelaci	5	6	1	12
polární metoda (teodolit a pásmo)	do 100	3	4	do 3	bez omezení	2	musí být min. 3 osoby	4	4	2	10
polární metoda (totální stanice)	do 200	1	3	do 2	bez omezení	2		3	3	3	9
jednosnímková fotogrammetrie	do 100	1	3	do 5	nepoužitelná při výškově členité situaci	3	nutnost doplnit nivelaci	5	3	2	10
vícesnímková fotogrammetrie	do 250	0:30	3	do 0,1	bez omezení	3		1	2	4	7
3d laserové skenování	do 1100	0:10	3	do 0,1	bez omezení	3		2	1	6	9
určování polohy metodou GNSS	do 300	1	3	do 5	nepoužitelná bez signálu z družic a korekcí	2		5	3	5	13

■ **Tab. 2 Porovnání efektivit jednotlivých metod měření:** V rámci měřické dokumentace jedné archeologické sondy v Mikulčicích v roce 2018 (5×5 m) jsme provedli experimentální zaměření vybrané situace nejčastěji používanými metodami. To nám umožnilo exaktně porovnat metody z hlediska jejich efektivit (tj. kvality výsledku, rychlosti práce, finanční náročnosti a nároků na odbornost dokumentátora). Všechny uvedené metody byly aplikovány na identickou archeologickou situaci v téže sondě (pro hodnocení jsme využili i obdobné testy z jiných lokalit, prováděné autory studie v posledních deseti letech). Ve sloupci „Cena na pořízení ...“ jsou uvedeny částky platné pro první pololetí roku 2020 a předpokladem je pořízení zařízení, které je vhodné pro dokumentaci v archeologii (pro potřebu přesné geodézie by byla pořizovací cena přístrojů vyšší). Hodnoty „časové náročnosti“ ukazují čas potřebný pro sběr dat v terénu i pro následné zpracování v kanceláři (do podoby účelové mapy) a ve všech metodách za předpokladu, že dokumentaci provádí odborník s mnohaletou zkušeností v teorii i praxi. Zjištěné a publikované chyby jsou hodnoty zjištěné přímo testovacím měřením (u většiny metod opakovaně zjištěné z obdobných projektů). V požadavku na odbornost obsluhy jsou metody rozděleny do tří skupin (1 = nejnižší požadavky na odbornost, 3 = nejvyšší požadavky na odbornost). Ve sloupcích kvalita, rychlost a cena jsou bodově ohodnoceny jednotlivé metody s tím, že čím nižší hodnoty, tím lepší výsledek. Celkový součet bodů ze sloupců kvalita, rychlost a cena potom přináší porovnání efektivit (i zde platí, že čím nižší hodnota, tím lepší výsledek).

Návrh „Směrnice pro geodetickou dokumentaci archeologického výzkumu“

1. Úvodní ustanovení

Směrnice pro tvorbu a údržbu plánové dokumentace lokality Mikulčice-Valy (dále jen směrnice GDMV) je vytvořena pro potřebu tvorby, údržby a provozování plánové dokumentace lokality. Směrnice GDMV definuje postupy, které jsou závazné při tvorbě měřické dokumentace i podkladů pro tvorbu jednotlivých účelových plánů. Dodržování jednotlivých ustanovení této směrnice se vztahuje na data, která jsou vytvářena přímým měřením v terénu (případně může být doplněna o prvky převzaté z již existující dokumentace). Požadavky směrnice nelze aplikovat na vytváření nových mapových podkladů ze starších archivovaných dat.

2. Zásady měření dat pro účely tvorby plánové dokumentace lokality

2.1. Geodetické referenční systémy, přesnost měření

- Zásadně se používá souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální (SJTSK) a výškový systém baltický – po vyrovnání (BpV).

- Přesnost podrobných bodů účelové mapy je charakterizována základní střední souřadnicovou chybou 0,14 m a výška podrobných bodů základní střední výškovou chybou 0,12 m. Přesnost dočasně stabilizovaných bodů měřické sítě je charakterizována základní střední souřadnicovou chybou 0,06 m.
- Je-li realizováno měření na lokalitě, kde není k dispozici bodové pole požadované přesnosti a odpovídající hustoty bodů, zřizují se dočasně stabilizované polohové a výškové měřické body. Hustota bodů se volí podle obtížnosti terénu (cca dva body na 1 km trasy nebo 1 ha plochy při vzájemné viditelnosti).
- Přehled sítě nově zřízených a dočasně stabilizovaných bodů měřické sítě s místopisy včetně seznamu souřadnic a výšek jsou součástí dokumentace výsledků tvorby mapy a předávají se jako příloha geodetické technické zprávy o tvorbě mapy.
- Síť polygonových bodů musí svou přesností odpovídat Vyhl. 179/98 Sb. – musí mít kód charakteristiky kvality určení souřadnic $mxy = 0,06$ m (bývalá třetí třída přesnosti dle ČSN 73 0115 – Geodetické body).

Pro mapování na lokalitě je využíváno výhradně základního bodového pole lokality (vyjma měření metodou GNSS, při které je protokolárně zajištěna přesnost daná katastrální vyhláškou).

Pro zhuštění bodového pole lze použít:

- Volné stanoviště s orientací na dva známé body (délky i úhly), ale nutno doplnit záměrou na třetí známý bod (alespoň úhlově) nebo kontrolní podrobný bod zaměřený i z jiného stanoviště (rozdíl dvojího určení musí být menší 0,14 m; pozor na tvarové parametry – svíraný úhel orientací na volném stanovišti (orientace nesmí být v přímce ani v úhlu 100° a menším).
- Rajony ze základního bodového pole lokality (výjimečně i dvojnásobně) lze užít, pokud se měří jednoznačně identifikovatelné body, v případě měření je nutná zpáteční záměra na známý bod a další záměra na jiný známý bod (alespoň úhlově) nebo kontrolní podrobný bod zaměřený i z jiného stanoviště (rozdíl dvojího určení musí být menší 0,14 m). Pro dodržení geometrických parametrů (délka orientace musí být delší než záměra na určovaný bod) je potřeba zvážit, co se měří, atd.

2.2. Postupy měření v terénu

Měření v terénu je prováděno zpravidla polární metodou. Přesnost měřených délek a úhlů u přístrojů musí být dostatečná pro to, aby výsledné souřadnice určovaných bodů vyhovovaly nárokům na přesnost jejich určení dle odstavce 2.1. V případě využití metody GNSS je potřeba protokolárně doložit přesnost měření a toto dvakrát opakovat (s odstupem alespoň jedné hodiny). Pokud není dodržena příslušná přesnost ve výšce (zpravidla při metodě GNSS), je potřeba upřesnit výšku nivelací, případně trigonometrickým měřením ze základního bodového pole lokality.

Při určování nových bodů polární metodou platí několik základních pravidel:

- měří se ze známého stanoviště s minimálně dvěma orientacemi (jedna s délkou a druhá alespoň úhlově),
- délka na nově určovaný bod musí být vždy menší než orientace,
- po ukončení série polárního měření (z jednoho stanoviště) provede měřič kontrolní úhlovou orientaci (případně kontrolní vytyčení známého bodu),

Pro dokumentaci výzkumu ortogonálními metodami je předpokladem určení základních bodů v sondě (sektoru nebo jiné nejmenší plošné jednotce zkoumané plochy) polární metodou. Ortogonálně měřené body jsou doplněny o informaci výškovou nivelací.

Pro fotogrammetrickou dokumentaci se sběr obrazových dat řídí podrobně definovanými pravidly a postupy (viz Šindelář *et al.* 2019 – doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu).

Pro dokumentaci metodou laserového skenování se vyžaduje georeferencování skenu do souřadnicového a výškového systému lokality (S-JTSK a Bpv). Přesnost registrace

jednotlivých skenů je prokazována výpočtem protokolem a přesnost georeferencování 3D skenů odpovídá kvalitě určení souřadnic $mxy = 0,06$ m (bývalá třetí třída přesnosti dle ČSN 73 0115 – Geodetické body).

3. Organizační pravidla měřické dokumentace a archivace dat

Samotná sada fotografií a seznam souřadnic nestačí k vytvoření měřické dokumentace. Nedílnou (a povinnou) součástí plánové dokumentace jsou ještě doplňující data a dokumenty, které zajistí, aby se ve vzniklém informačním poli kdokoli v budoucnu rychle zorientoval, dokázal výsledky měření zkontrolovat a případně výpočty opakovat. Proto jsou vyžadovány následující komponenty:

- Kvalitní náčrt (polní měřická skica)

Dokument, z něhož vyplývá, kdy a kým byla situace zaměřena. Jednoduchý náčrt dokumentované situace (bez měřítka) s alespoň hrubou orientací k severu a zjednodušeným uvedením měřického systému (z jakých bodů se vycházelo a jaké rajony a volná stanoviště byla určována).

V případě fotogrammetrického postupu doporučujeme doplnit náčrt o informace dle bodu 3.3. Organizační pravidla ve fotogrammetrii a příslušná infografika (viz Šindelář *et al.* 2019 – doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu).

- Záznam měření (vzorově výstup z totální stanice)

V žádném případě nestačí archivovat seznam souřadnic zaměřených bodů. Vedle seznamu souřadnic je potřeba z totální stanice stáhnout kompletní záznam o daném měření (tj. záznam s údaji o stanovišti, orientacích a všech podrobných bodech ve formátu – číslo bodu, měřená šikmá délka, horizontální úhel, vertikální úhel, výška stanoviště, výšky cílů, případně kódové označení jednotlivých bodů).

- Seznam souřadnic všech použitých i nových bodů

Textový dokument (optimálně ve formátu *.txt) obsahující v záhlaví stránky: seznam souřadnic a výšek v S-JTSK a Bpv, dále údaje o měřené situaci (datum zaměření, název, číslo sondy nebo podobný identifikant) a úplný seznam souřadnic všech bodů (včetně stanoviště a orientací)

- Výsledné plány v papírové a digitální formě

V případě fotogrammetrické dokumentace je dále vyžadováno:

- Série všech originálních vstupních snímků (včetně metadata)
- Zpráva o použité aplikaci a metodě výpočtu (optimálně doplněno o protokol z výpočtu)
- Náčrt ke každé sadě fotografií, z něhož je patrné, o jaký objekt jde, jaké je jeho okolí, jaká je situace při fotografování (postup fotografování, stanoviště, čísla snímků), a z něž vyplývá jednoznačná identifikace vlčivacích bodů, případně kontrolních měř, horizontál a svislic.

Použitá literatura

- Bezdek, L. – Frouz, M. 2014: Digitální a digitalizovaná fotografie pro vědecké účely v praxi památkové péče. Odborné a metodické publikace 46. Praha.
- Brejcha, M. et al. 2015: Metodika 3D dokumentace a vizualizace interiérů památkových objektů. Odborné a metodické publikace 75. Ústí nad Labem.
- Brůna, V. 2005: Geoinformatika při archeologickém výzkumu v Egyptě, *ArcRevue* 2005 (2), 9–12.
- Čížek, D. 2011: Tvorba software pro jednosnímkovou fotogrammetrii – 2. etapa. Rkp. diplomové práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie. Uloženo: Knihovna Katedry geomatiky.
- Frolík, J. 2016: Záchranný archeologický výzkum u kostnice v Sedlci u Kutné Hory. Rkp. nálezkové zprávy. Uloženo: Archeologický ústav AV ČR, Praha.
- Goncharenko, O. S. – Gladilin, V. N. – Šiaudimytė, L. 2019: Optimal use of quadratic programming method for alignment of geodesic networks, *Astronomical School's Report* 15 (2), 38–42. Dostupné z: http://astro.nau.edu.ua/issues/2019_V.15_Iss.2/Gladilin.html.
- Hladík, M. – Mazuch, M. – Poláček, L. 2019: Mikulčice (okr. Hodonín), Přehled výzkumů 60 (2), 284–286.
- John, J. 2008: Počítačová podpora dokumentace terénních reliktů v archeologii. In: J. Macháček (ed.), Počítačová podpora v archeologii II. Brno – Praha – Plzeň, 254–262.
- Konečný, F. 2016: Využití 3D laserového skeneru pro reverzní inženýrství – problematika skenování opotřebitelných dílů roztřískovacích strojů [online]. Rkp. bakalářské práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Uloženo: Digitální knihovna Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/38070>.
- Kuna, M. et al. 2004: Nedestruktivní archeologie. Teorie, metody a cíle. Praha.
- Maříková-Kubková, J. – Hrichová, I. 2009: Archeologický atlas Pražského hradu I. Katedrála sv. Víta – Vikářská ulice. Castrum Pragense 10. Praha.
- Mazuch, M. 2003: Předstihový výzkum na tzv. „akropoli“ velkomoravského hradiště Mikulčice-„Valy“, Přehled výzkumů 44, 51–56.
- Mazuch, M. 2006: Mikulčice (okr. Hodonín), Přehled výzkumů 47, 256–257.
- Neuss, F. M. 1990: Das Fotogramm in der Kunst des 20. Jahrhunderts. Die andere Seite der Bilder – Fotografie ohne Kamera. Köln, 341, 438.
- Pavelka, K. 2003a: Fotogrammetrie 10. Praha.
- Pavelka, K. 2003b: Fotogrammetrie 20. Praha.
- Peres, M. R. 2007: The Focal Encyclopedia of Photography. Digital Imaging, Theory and Applications, History, and Science. 4th edition. Amsterdam.
- Pierdicca, R. – Frontoni, E. – Malinverni, E. S. – Colosi, F. – Orazi, R. 2016: Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru [online]. Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage [online]. 3 (3), 80–90 [cit. 15. 6. 2019]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212054816300224>.
- Poláček, L. 1996: Mikulčice-Valy 1992 (okr. Hodonín), Přehled výzkumů 1992, 62–66.
- Poláček, L. 2001: Mikulčice a mikulčický výzkum v roce 2001, *Archeologické rozhledy* 53 (2), 361–372.
- Poláček, L. – Marek, O. 1995: Die Grabungen in Mikulčice 1954–1992. In: F. Daim – L. Poláček (Hgg.), Studien zum Burgwall von Mikulčice I. Spisy Archeologického ústavu AV ČR Brno 2. Brno, 13–82.
- Poláček, L. – Marek, O. 2005: Die Grundlagen der Topographie des Burgwalls von Mikulčice Die Grabungsflächen 1954–1992. In: L. Poláček (Hrsg.), Studien zum Burgwall von Mikulčice VII. Spisy Archeologického ústavu AV ČR Brno 24. Brno, 9–358.
- Poláček, L. – Mazuch, M. – Hladík, M. – Krupičková, Š. 2014: Between Science and Show – on the State of Research and Presentation of the early medieval Power Centre in Mikulčice (Czech Republic). In: C. von Carnap-Bornheim (ed.), Quo vadis? Status and Future Perspectives of Long-Term Excavations in Europe. Neumünster, 179–209.
- Poláček, L. – Mazuch, M. – Hladík, M. – Škojec, J. – Kalčík, L. 2013: Mikulčice (okr. Hodonín), Přehled výzkumů 54 (2), 231–237.
- Sokol, P. et al. 2017: Metodika terénní prostorové identifikace, dokumentace a popisu nemovitých archeologických památek. Odborné a metodické publikace 91. Praha.
- Šindelář, J. – Bricháček, P. 2019: 3D modelace nálezkové situace – Knížecí hrob z Berouna-Závodí. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Západočeské muzeum v Plzni.
- Šindelář, J. – Kraljic, R. 2005: Interní směrnice pro geodetickou dokumentaci archeologických výzkumů. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Husitské muzeum v Táboře.
- Šindelář, J. – Poláček, L. – Krupičková, Š. 2019: Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu, Přehled výzkumů 60 (2), 201–224.
- Zakrzewski, P. 2019: Geodesy and photogrammetry in archaeology. Advanced documentation methods used by the Kuwaiti-Polish Archaeological Mission. In: A. Pieńkowska – D. Szegal – I. Zych (eds.): Stories told around the fountain. Papers offered to Piotr Bieliński on the Occasion of His 70th Birthday. Warszawa, 759–777.

Summary

Documentation of Archaeological Excavation within the Complex Conditions of an Early Medieval Site – Experimental Geodetic Documentation in Archaeology

The study gives a brief overview of the development of the methods used for documenting archaeological situations. The Mikulčice-Valy site from the 1950s to the present day

is used as an example. The study compares all past and present methods of surveying documentation including orthogonal measurement, drawing on millimetre paper, triangulation, polar coordinates (using a theodolite, tape and total station), single and multi-frame photogrammetry and 3D laser scanning. This is the first time that the current archaeological excavation methodology, and the resulting requirements for the type, detail and accuracy of surveying documentation, has been published.

By providing specific examples of good practice, the study presents the optimal use of different documentation methods in different environments and at different fieldwork stages. The frequent errors that result from the use of modern technologies without knowledge of the theoretical foundations of geometry, geodesy and other technical disciplines is also highlighted. Through the experiment, we compared various measuring methods used for documentation in archaeological fieldwork in order to verify their efficiency. It turned out that the most modern does not always mean the best. Modern devices and methodologies (e.g. laser scanners, total stations, rangefinders, so-called photoscanners etc.) are significantly more demanding on careful work and an understanding of the theoretical basis of geometry, and on control mechanisms for work that has been undertaken, than traditional tools. Moreover, it is usually difficult to find and correct the measurement errors which occur when using these devices.

The study provides information on the development of an internal directive for geodetic documentation for archaeological excavations at the Mikulčice-Valy site, which is the result of many years of collaboration between archaeology and geodesy experts. This directive compensates for the absence of a legislative framework for archaeological surveying and, based on 60 years' experience of processing data from this site, defines the requirements for the field and office stages of surveying and the subsequent data archiving. The study can serve as a model for defining the general rules of surveying documentation in archaeological and historical disciplines.

Studie je výsledkem projektu Ministerstva kultury NAKI II „Virtuální vědecký model velkomoravských Mikulčic jako systém interaktivní dokumentace, prezentace a archivace dlouhodobého systematického archeologického výzkumu“ (č. DG18P02OVV029).

Jiří Šindelář, Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i., Čechyňská 363/19, 602 00 Brno, e-mail: sindelar@arub.cz

Marian Mazuch, Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i., Čechyňská 363/19, 602 00 Brno, e-mail: mazuch@arub.cz

Marek Hladík, Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i., Čechyňská 363/19, 602 00 Brno, e-mail: hladik@arub.cz

Lumír Poláček, Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i., Čechyňská 363/19, 602 00 Brno, e-mail: polacek@arub.cz