

# Počítačová dokumentace a vizualizace v archeologii

# Využití trojrozměrného laserového scanneru v archeologii

Dagmar Dreslerová, Jan Frolík, Tomáš Mikolášek

## Abstrakt

Příspěvek prezentuje výsledky prvních aplikací trojrozměrného laserového scanneru na českých pravěkých a středověkých archeologických lokalitách. Laserové scanování představuje novou úroveň v dokumentaci, virtuální konzervaci a interpretaci památek. Pomocí scanneru bylo dokumentováno zdivo a podlahy románského kostela neznámého zasvěcení na III. nádvoří Pražského hradu, chodba, která ho spojovala s přílehlou románskou bazilikou sv. Víta, dále sklepy středověkého městského domu v Chrudimi a vápenická pec z přelomu 17. a 18. stol. v Kutné Hoře. Poslední ukázka přibližuje dokumentaci a analýzu kamenného ohrazení výšinné lokality Boudy ze starší doby železné.

The contribution presents the results of the first applications of a 3D laser scanner on Czech prehistoric and mediaeval archaeological sites. Laser scanning is a new dimension in the documentation, virtual conservation and interpretation of heritage monuments. The scanner was used to document the masonry and floors of a Roman esque church of unknown consecration in the 3rd courtyard of Prague Castle, the corridor which connected it to the adjoining Roman esque Basilica of St. Vitus and the cellars of a mediaeval town house in Chrudim and a lime burning kiln from the turn of the 17th and 18th century in Kutná Hora. The last example describes the documentation and analysis of a stone wall around the Boudy ~~upland~~ site from the Early Iron Age.

## Klíčová slova

3D laserový scanner, virtuální konzervace, trojrozměrné modelování, dokumentace archeologických a historických památek

3D laser scanner, virtual conservation, three-dimensional modelling, documentation of archaeological and historical monuments

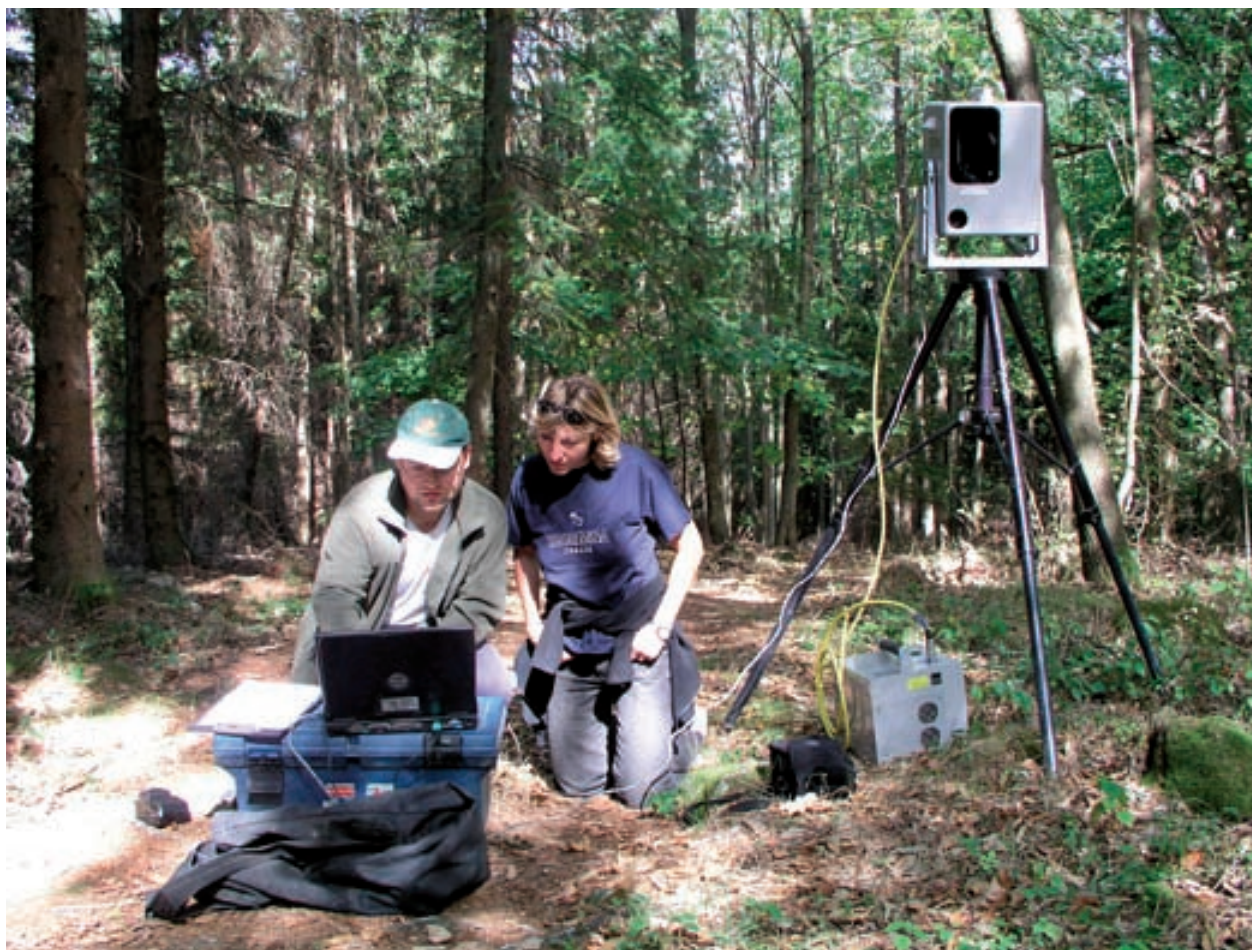
## Úvod

Otázka dokonalé technické dokumentace stavební památky, archeologické lokality nebo průběhu archeologického výzkumu by měla stát vždy v popředí zájmů badatelů. Vedle klasických metod geodetického zaměřování nivelačním přístrojem či totální stanicí mají nyní archeologové možnost využít výsledků nejnovějších technologií v podobě trojrozměrného laserového scanneru. Zavedení laserového scanování v geodetické praxi lze významem srovnat s využitím parního stroje jako zdroje neživé síly. Laserové scanování, původně jako vojenská technologie, je známo již dvě desetiletí. Do civilní praxe bylo uvolněno koncem 80. let minulého století, ale masivní rozvoj proběhl až během posledních deseti let, kdy se tato metoda dostala také do České republiky. Díky tradiční vnímavosti geodetů k technickému pokroku a jejich snaze hledat nová uplatnění techniky pro geodetické aplikace, se podařilo v minulých letech navázat spolupráci s archeology a metodu trojrozměrného laserového scanování otestovat na několika aplikacích, které budou dále předvedeny jako případové studie.

Základní idea geodézie je tvorba obrazu (modelu) reálného světa. Prakticky je však sběr dat, popisujících zájmový předmět, určený jednotlivými body  $(x, y, z)$ , velmi pracný. Tradiční metody popisu byly založeny na zobecnění reálných objektů. Model reálného světa byl tvořen z jednotlivých selektovaných bodů, které daný objekt charakterizují. Oproti tomu je metoda laserového scanování metodou neselektivní. Laserové scanovací systémy využívají nejmodernější pulsní laserovou technologii pro měření délek a určují polohu bodu prostorovou polární metodou. Detekují přirozený povrch na určitou vzdálenost a spolu s optickým systémem dovolují provést až milion měření (bodů) v několika minutách. Určené body jsou rozmístěny v pravidelném rastru a tedy obecně nejsou měřeny charakteristické body objektu, jako v tradičních metodách. Tyto body ale mohou být následně získány modelováním.

Přesnost určení polohy bodu a dosah přístroje jsou vlastnosti, podle kterých se scanery typově rozdělují. V současnosti je k dispozici řada typů scannerů pro snímání objektů od malých rozměrů (řádově v cm) až ke snímání celých krajinných celků.

V případě následujících ukázek byl použit laserový scanovací systém firmy Leica CYRAX 2500 (**obr. 1**). Výrobce garantovaná přesnost určených bodů do vzdálenosti 50 m je  $\pm 3$  mm. Dosah scanneru je cca 150 m v závislosti na klimatických podmínkách a vlastnosti povrchu scanovaných objektů. Detailní technické údaje systému jsou uvedeny na stránkách firmy Leica ([www.leica.com](http://www.leica.com)).



Obr. 1. Laserový scanner CYRAX 2500 v terénu. Foto: D. Dreslerová.

### 3D laserové scanování v archeologické terénní praxi

Většina úloh využívajících laserové scanování vychází z navykých přístupů ke způsobu popisu reality. S využitím zřejmé vlastnosti modelu, získaného scanováním – při velké hustotě snímaných bodů, potažmo detailním záznamu 3D reality – získáme kvalitní dokumentaci stávajícího stavu. Tuto dokumentaci lze chápat jako „virtuální konzervu“, nebo ji lze využít pro virtuální prezentaci s pomocí vymožeností IT technologií.

To, co však dělá z metody laserového scanování metodu budoucnosti a ne pouze nástroj pro zvýšení kvality modelu reality, je nový přístup k jejím výsledkům. Vlastnost 3D modelů, reprezentovaná množstvím jednotlivých bodů, umožňuje zkoumání různých geometrických vztahů bodů či skupin těchto bodů, vyhledávat v „mraku bodů“ jevy ve skutečném světě neviditelné či jen tušené, protože překryté mlhou nedokonalosti lidského vnímání. Otvírá se prostor pro invenci uživatele modelu se vznikem nových vazeb k možnému zapojení dalších profesních disciplín pro hledání nových aplikací této metody.

### Dokumentace a virtuální rekonstrukce původního stavu historických památek

Spolupráce archeologů s geodety pracujícími metodou laserového scanování začala na nalezištích a objektech, u nichž převažoval dokumentační účel, tj. zachycení a „konzervování“ aktuálního stavu památky. Samozřejmým cílem bylo také ověření možností metody samé. Příkladem může být dokumentace zdiva a podlahy románského kostela neznámého zasvěcení na III. nádvoří Pražského hradu (**obr. 2**). V literatuře je znám pod (nesprávným) zasvěcením sv. Bartoloměji (*Borkovský 1969; Frolík – Smetánka 1997*). Objekt byl objeven již v roce 1920 a posléze zkoumán archeologickými metodami v letech 1925–1926. Uchován je pod betonovou deskou, kryjící III. hradní nádvoří jako součást rozsáhlého areálu vykopávek. Pro klasické měřičské zachycení představuje určitý problém zejména podlaha z opukových dlaždic, nepravidelně kryjící loď kostela. Dlaždice jsou zčásti rozlámané a podlaha sama se prosedá do předpokládaných starších archeologických situací. Druhou dokumentační možností představuje v této situaci fotogrammetrie, která však nezachycuje na rozdíl od laserového scanování konkrétní hloubku (např. spár mezi dlaždicemi nebo mezi kvádříky románského zdiva). Jiným

specifickým problémem je odstup od dokumentovaných ploch (podlah a zdív). Na rozdíl od fotogrammetrie bylo možno provést dokumentaci i z velmi šikmého úhlu. Problém se zákryty některých detailů (paprsek scanneru „nevidí“ na místa např. za nosnými konstrukcemi stropu apod.) lze překonat snímáním z několika míst. Nasnímaný obraz kostela neznámého zasvěcení slouží jako dokumentace stavu a do budoucna umožní srovnání stavu památky, která přes veškerou péči podléhá určité degradaci a erozi.

V dalším stupni bylo rozhodnuto zdokumentovat tímto způsobem další části téhož stavebního komplexu (**obr. 3**), tedy nejen kostela neznámého zasvěcení, ale i chodbu, která ho spojovala s přílehlou románskou bazilikou sv. Víta, a také zachované a přístupné části této baziliky (**obr. 4**). Uvedené památky jsou dnes částí tří nepropojených areálů a získat představu o původních prostorových vztazích je velmi obtížné [k románské bazilice sv. Víta: *Frolík – Maříková – Kubková – Růžičková – Zeman 2000*, 209–218]. Po skončení tohoto projektu bude nejen možné získat třidimenzionální představu o dochovaném stavu v reálných prostorových vztazích, ale využít ji pro rekonstrukci původního stavu. Výsledný elaborát názornějším způsobem dokumentuje nejen vlastní zdíva a jejich detaily, ale také výškové vztahy. Kostel neznámého zasvěcení je situován níže než bazilika sv. Víta a spojovací chodba se musela s touto skutečností vyrovnat.

Architektonické památky Pražského hradu nabízejí ještě další dokumentační pole. Jsou jím obtížně přístupné, ale důležité součásti památkových prostorů, např. gotické žebrové klenby. Vysokou výpovědní hodnotu mají také snímky zdív natolik rozrušených (erodovaných), že jejich běžné měřičské zachycení vždy obsahuje interpretační moment.

Stejný dokumentační záměr mělo nasnímání pozůstatků vápenické pece (**obr. 5**), objevené a zkoumané v letech 2002–2003 na horním (jižním) nádvoří Jezuitské koleje v Kutné Hoře (*Blažková-Dubská – Frolík 2005; Frolík 2007*). Uvedená pec představuje unikátní technické zařízení z 2. poloviny 17. a starší části 18. století, dochované s velkým množstvím stavebních detailů a vnitřního vybavení. Během dalšího výzkumu se druhotně přidružil i aspekt záchranný. Přestože investor souhlasil se zachováním pece a jejím zakomponováním do nově upravovaného nádvoří, problém s financemi na restaurování zdíva a stavbu ochranného přístřešku znamená, že pec je již čtvrtým rokem chráněna provizorním zakrytím a snadno se může stát, že výstup z laserového scanování bude jediným svědectvím původního nálezového stavu. Pokud by k tomu došlo, může se naopak stát podkladem pro rekonstrukci původního stavu památky samotné.

Ryze záchranný aspekt převážil v případě záchranného archeologického výzkumu v Chrudimi – Hradební ulici, provedený v roce 2006 (nepublikovaný výzkum J. Frolíka a J. Musíla). Objeveny byly mimo jiné sklepy zaniklého městského domu, který se vyvíjel v několika fázích od konce 13. století až do třicetileté války, kdy zanikl (**obr. 6**). Z hlediska Chrudimi je podstatné, že se zde poprvé podařilo doložit kamennou měšťanskou architekturu (staršího?) 14. století, která není jinde v historickém městském jádru průkazně dochována. Investor se k požadavku zachovat alespoň část objevené situace stavěl od počátku negativně a za vydatné netečnosti městských orgánů se mu tento záměr podařilo prosadit, neboť v momentu, kdy svítila naděje na zachování, nechal sklepy vybagrovat. Vzhledem k tomu, že toto nebezpečí bylo latentně přítomno od počátku, byly sklepy dokumentovány všemi dostupnými metodami (kresebně, fotograficky, fotogrammetricky), tedy i metodou laserového scanování. Scanování nejlépe dovoluje utvořit si představu o prostorových vztazích všech základních etap, tj. nejstaršího zděného sklepa ze 14. století s lomenou vstupní šíjí, sousedního sklepa s původně valenou klenbou a schodišťovou šíjí z 15. století a konečně nejmladšího sklepa křížového půdorysu dodatečně zahluobeného v pokročilém 15. nebo počátkem 16. století pod úroveň podlahy sklepa předchozího. Elaborát laserového scanneru umožňuje do budoucna studovat i detaily, jejichž význam nebyl během výzkumu dostatečně doceněn či rozeznán. Zároveň bude možné srovnání s podobně utvářenými strukturami, pokud budou v Chrudimi ještě objeveny.

Samotné měření v terénu lze rozdělit na laserové scanování a na podpůrné geodetické metody jako je např. založení bodového pole, měření GPS a jiné. K tomu, aby si uživatel mohl udělat představu o časové náročnosti měření a zpracování dat, uvádíme v tabulkách stručný přehled hodin, věnovaných konkrétním úlohám.

| <b>Zaměření skutečného stavu vykopávky kostel sv. Bartoloměje (2002)</b> |                 |
|--|-----------------|
| Druh činnosti  | Počet hodin cca |
| Podpůrné geodetické metody   | 3               |
| 3D laserové scanování  | 6               |
| Vizualizace  | 14              |

Tab. 1. Časová náročnost měření a zpracování dat při laserovém scanování.



| <b>Zaměření skutečného stavu vykopávek v areálu tzv. malých vykopávek (2002–2006)</b> |                 |
|---|-----------------|
| Druh činnosti   | Počet hodin cca |
| Podpůrné geodetické metody  | 3               |
| 3D laserové scanování   | 70              |
| Vizualizace   | 170             |

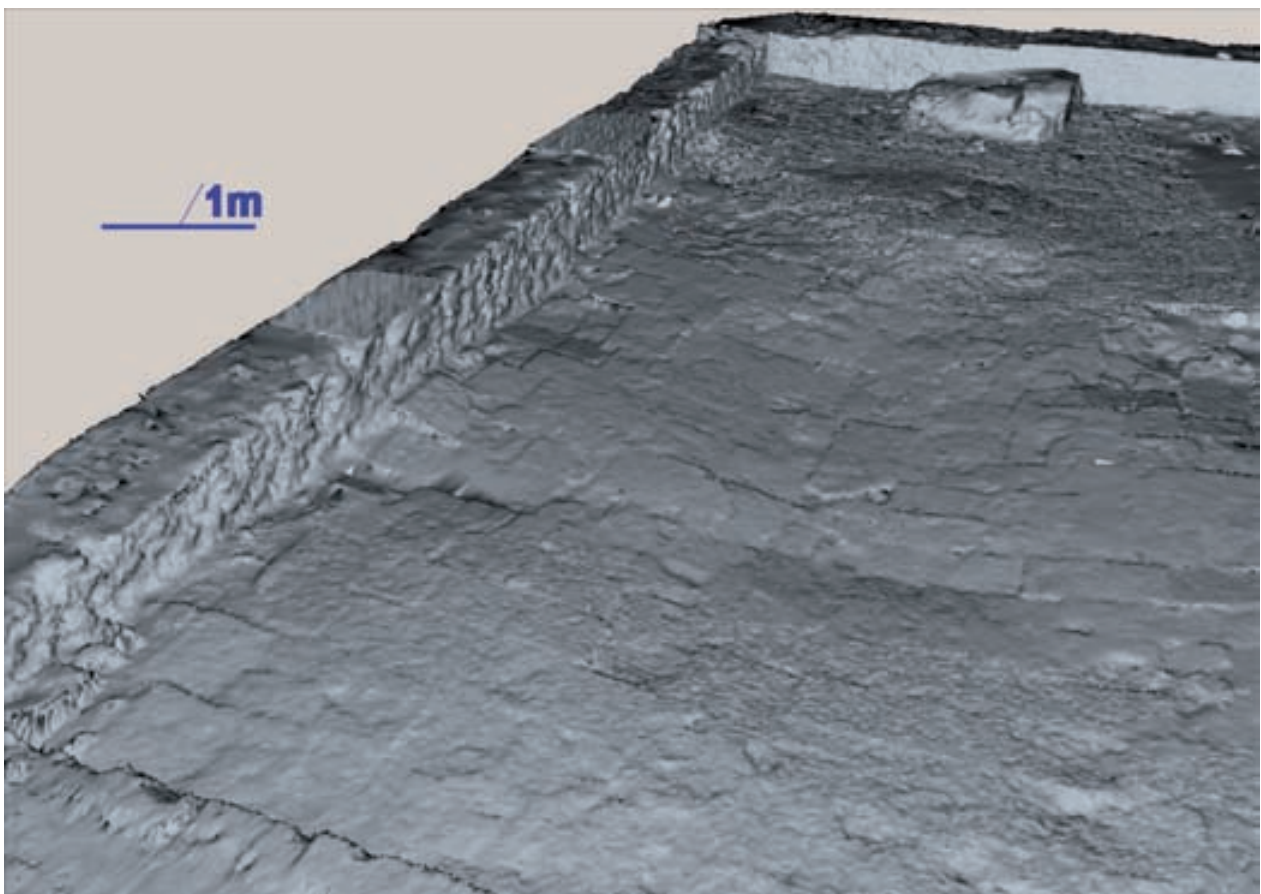
Tab. 2. Časová náročnost měření a zpracování dat při laserovém scanování.

| <b>Zaměření skutečného stavu vykopávek pozůstatků vápenické pece na horním (jižním) nádvoří Jezuitské koleje v Kutné Hoře (2003)</b> |                 |
|--|-----------------|
| Druh činnosti  | Počet hodin cca |
| Podpůrné geodetické metody   | 2               |
| 3D laserové scanování  | 7               |
| Vizualizace  | 16              |

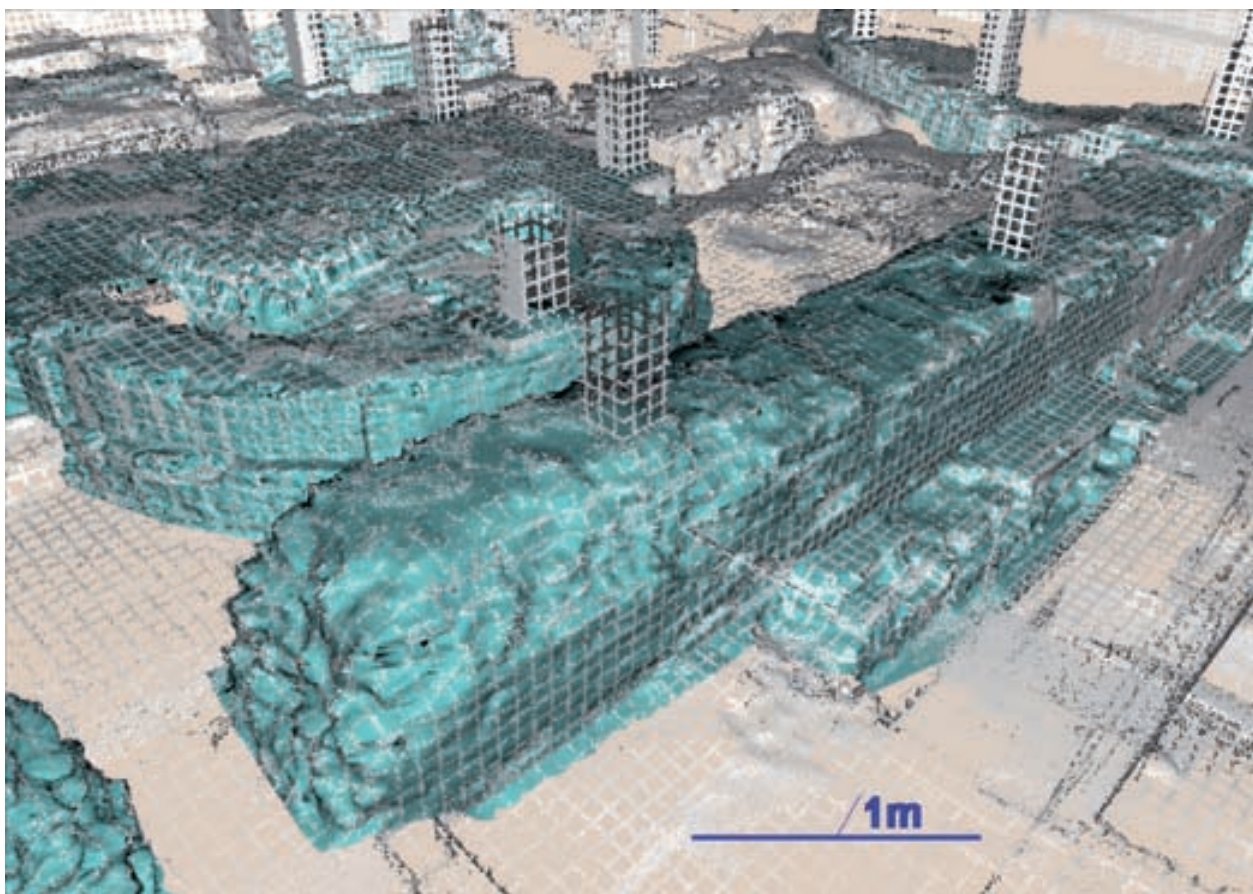
Tab. 3. Časová náročnost měření a zpracování dat při laserovém scanování.

| <b>Zaměření skutečného stavu vykopávek v Chrudimi – Hradební ulici (2006)</b> |                 |
|---|-----------------|
| Druh činnosti   | Počet hodin cca |
| Podpůrné geodetické metody  | 2               |
| 3D laserové scanování   | 6               |
| Vizualizace   | 20              |

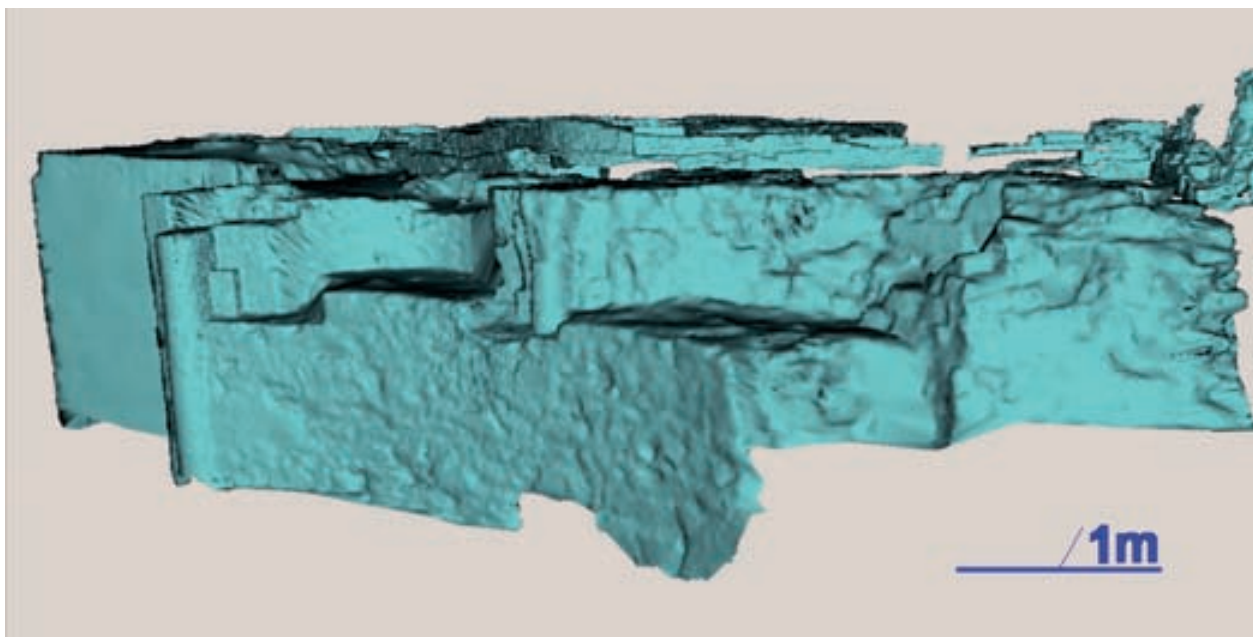
Tab. 4. Časová náročnost měření a zpracování dat při laserovém scanování.



Obr. 2. Kostel neznámého zasvěcení na Pražském hradě. Detail dlaždicové podlahy. Pohled na model v podobě trojúhelníkové sítě. Zobrazení: I. Koloušek.

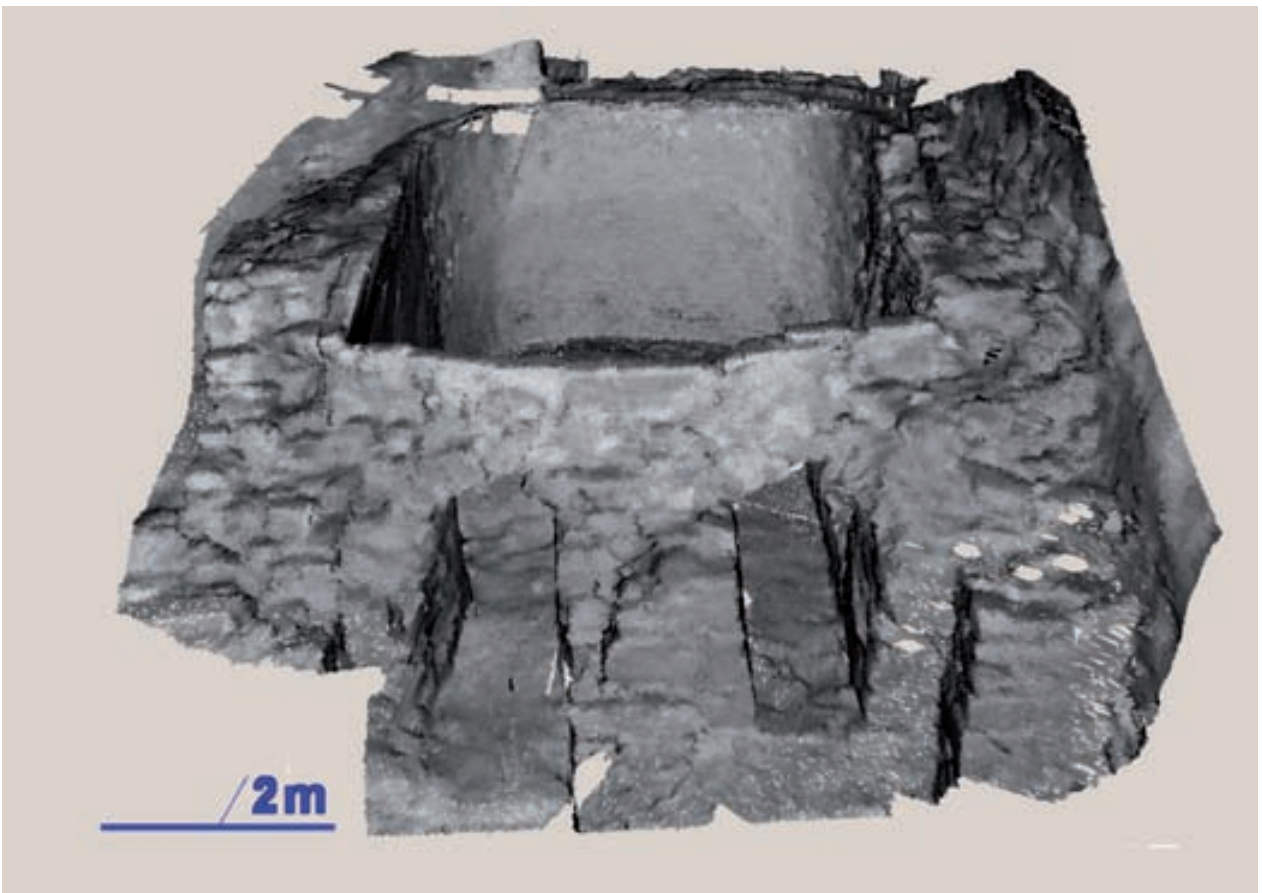


Obr. 3. Praha – Hrad, areál tzv. malých vykopávek na III. hradním nádvoří. Pohled na areál s částí jižního křídla transeptu románské baziliky sv. Víta (vpředu) a románskou biskupskou kaplí sv. Mořice (vzadu vlevo). Vyobrazení metodou trojúhelníkové sítě. Pohled od jihovýchodu. Zobrazení: I. Koloušek.

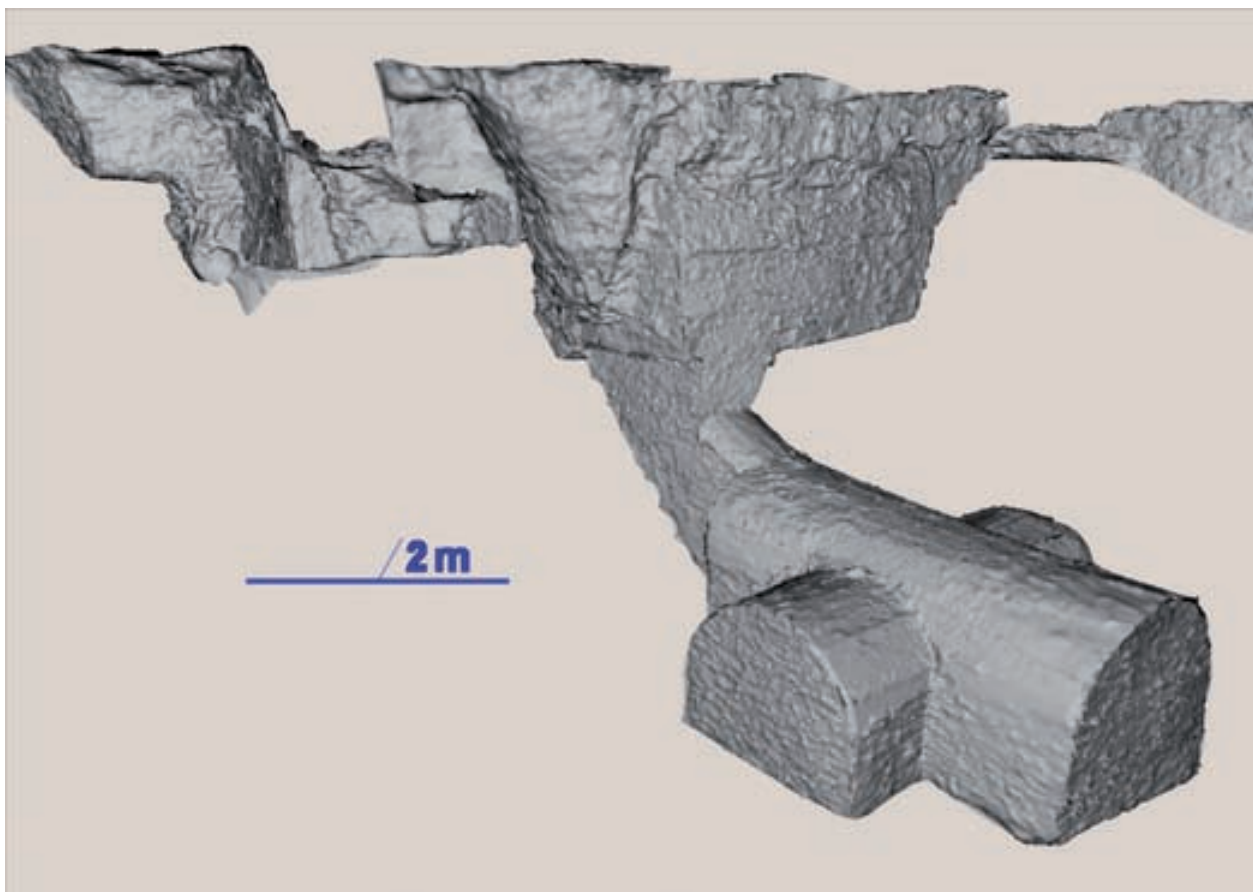


Obr. 4. Praha – Hrad, areál tzv. malých vykopávek na III. hradním nádvoří. Dochovaná část interiéru západní krypty románské baziliky sv. Víta. Vlevo a uprostřed románské sloupy, překryté mladší přízdívkou. Vyobrazení metodou trojúhelníkové sítě. Pohled od severu. Zobrazení: I. Koloušek.

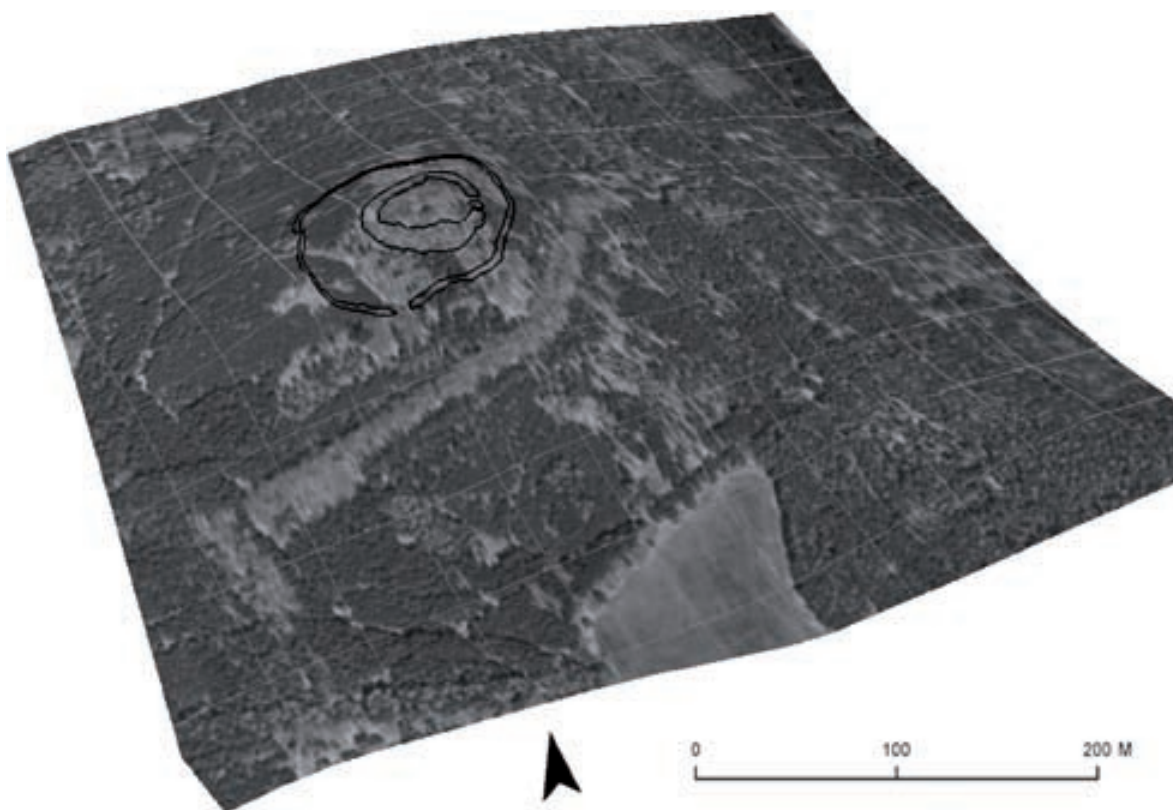




Obr. 5. Kutná Hora – Jezuitská kolej. Výzkum vápenické pece. Pohled v podobě trojúhelníkové sítě. Zobrazení: I. Koloušek.



Obr. 6. Hradební ulice v Chrudimí. Pohled na sklepy v podobě trojúhelníkové sítě. Zobrazení: I. Koloušek.



Obr. 7. Praveké ohrazení Boudy, okr: Písek. Zobrazení: Č. Čišecký.



## Analýza geometrické struktury pravěkého kamenného ohrazení

Výšinná ohrazená lokalita Boudy (okr. Písek) je známa archeologické veřejnosti přes 150 let. Poprvé ji popsal Josef Dastich v r. 1867 a ve shodě s tehdejší tradicí ji připsal Slovanům. Tento omyl odhalil v letech 1927 a 1928 Bedřich Dubský, který zde kopal a zmapoval systémy kamenných valů. Lokalitu zařadil do mladohalaštatského období (HD–LTA) a klasifikoval ji jako hradiště. O jejím pevnostním charakteru nepochyboval a tomu podřídil i interpretace všeho, co v terénu objevil (*Dubský 1949*).

*Popis lokality:* Kamenné ohrazení v nadm. výšce 574 m na vrcholu pravidelného kupovitého kopce (**obr. 7**). Na jihozápadní straně se připojuje nižší vrcholek, oddělený od hlavní vrcholové partie plochým sedělkem. Vrchol kopce je obehnan dvěma liniemi kamenných valů. Plocha vymezená vnějším ohrazením je 2,26 ha, vnitřní ohrazení uzavírá plochu 0,54 ha. Vnější val obkružuje vrcholek kopce v nepravidelné vzdálenosti od vnitřního valu, ale tak, že vzdálenost od středu monumentu zůstává stejná. Ve srovnání s vnitřním valem je zachovaná hmota nasucho navršených kamenů vnějšího valu asi poloviční až třetinová. Na západní straně se nalézá původní průchod vnějším valem, kdy dvě křídla valu dělí 4 m široká mezera. Průchod vnitřním valem, byl-li nějaký, byl nejspíš v místě dnešní cesty na východní straně ohrazení. Vnitřní val má obvod 244 m, v nejširším místě je 13 m široký a maximální zachovaná výška je asi 1,5 m. V základech valu jsou dvě linie kamenů, které tvoří vnitřní a vnější líc hradby. Prostor mezi nimi je vyplněn nasucho kladenými kameny bez jakékoliv další vnitřní konstrukce. Ve východní a severní části leží ve vzdálenosti 5 m od vnitřního valu směrem do středu lokality torzo kamenné zdi o šířce asi 1,5 m, rovněž postavené z nasucho kladených kamenů. Na západní straně je na místě podobného útvaru řada velkých kamenů či skal, na jižní straně val a zeď splývají v jedno těleso. V severní části vnitřního areálu nasedala na zeď uměle vyrovnaná plocha asi 10 x 4 m. Pokud byly na hradišti nějaké obytné objekty, ležely na východní a jižní straně v prostoru těsně přiléhajícímu k vnitřní zdi.

Jako k hradišti jsme přistupovali k lokalitě i na začátku revizního výzkumu, který probíhal v rámci projektu Pathways to Cultural Landscape v letech 2001–2003 (*Dreslerová 2004, Dreslerová – Hrubý 2004*). Zjištěné okolnosti nás však přiměly tuto myšlenku přehodnotit a to na základě následujících faktů: zjištěná konstrukce a průběh vnějšího valu by pravděpodobně neumožnila smysluplnou obranu. Ani v destrukci vnitřního, mnohem mohutnějšího valu nebyla výzkumem prokázána vnitřní zpevňovací konstrukce ani jiné prvky, nasvědčující existenci hradby. Zdá se, že původně val vypadal dosti podobně dnešnímu stavu, totiž jako hromada kamení, která hrála v jasně vymezeném ohrazení prostoru spíše symbolický než praktický význam. Vnitřní val nemá také prokazatelný původní vchod nebo bránu. Uvnitř ohrazení nebyla zjištěna žádná vnitřní zástavba. Konečně, do vzdálenosti několika stovek metrů není zdroj pitné vody.

Tyto a další úvahy nás vedly k myšlence, že hradiště sloužilo nejspíš jako centrální místo, na kterém se určitá komunita scházela při výjimečných událostech, prováděla slavnosti nebo obřady. Mohlo také sloužit jako svatyně. Tuto myšlenku také podnítil výsledek podrobného geodetického zaměření lokality, které zde v roce 2002 provedla firma Geonet Praha. V prostoru vnitřního valu bylo naměřeno 4 841 geodetických bodů a byl vytvořen vrstevnicový plán s vrstevnicemi v intervalech 20 cm a hustších. Kromě topografie vytvořili zaměstnanci firmy interpretační zakreslení průběhu a obrysů valu, jak se jim v té době jevily při zaměřování. Na plánu byl nápadný nepravidelný průběh vnější linie vnitřního valu a to zejména na nejlépe přístupné západní straně. Zde očekávaný nepravidelný průběh destrukce přechází ve více či méně pravidelné zubovité zahrocení (**obr. 8**). Po bližším ohledání destrukce shledala spoluautorka tohoto příspěvku, že destruované zdvo skutečně na několika místech tvoří jakési šipovité výběžky či paprsky. Pokusy o kresebné či fotografické zdokumentování tohoto jevu však selhaly, stejně jako snaha přesvědčit o existenci výběžků některé skeptické kolegy. Z těchto důvodů se pátralo po možnosti nezávislého objektivního zaměření a zobrazení reality, které vyústilo ve spolupráci s firmou Geotechnika a. s. a v použití trojrozměrného laserového scanneru.

Prvních 100 m budského valu se v terénu zaměřovalo pouhý den. Následné laboratorní zpracování však bylo zdoluhavé, protože se nejprve musel obraz vyčistit od šumů a nežádoucích objektů. Další zpracování a příprava hrubých dat pro analýzu pomocí programů CAD systémů tvoří asi pětinašobek času stráveného v terénu.

Obvod vnitřního valu byl snímán ve dvou kampaních po různě velikých segmentech, ze kterých se pak spojil celkový obraz. Velikost snímáných scén se řídila dohledností snímací kamery. První snímek, tzv. mrak bodů (**obr. 9**) byl následně počítačově vyčištěn (tzn. byla virtuálně vykáčena vegetace, **obr. 10**) a byla provedena homogenizace mraku bodů. Pro potřeby analýzy celého objektu bylo nutno od modelu valu, získaného scanováním, odečíst model okolního terénu, získaného klasickým geodetickým měřením. Výsledkem byl model valu, kde výšky bodů byly vztaženy k nulové ploše definované modelem okolního terénu. Tím došlo ke zviditelnění relativních výškových rozdílů jednotlivých částí valu. V takto upraveném modelu byly hledány předpokládané útvary,

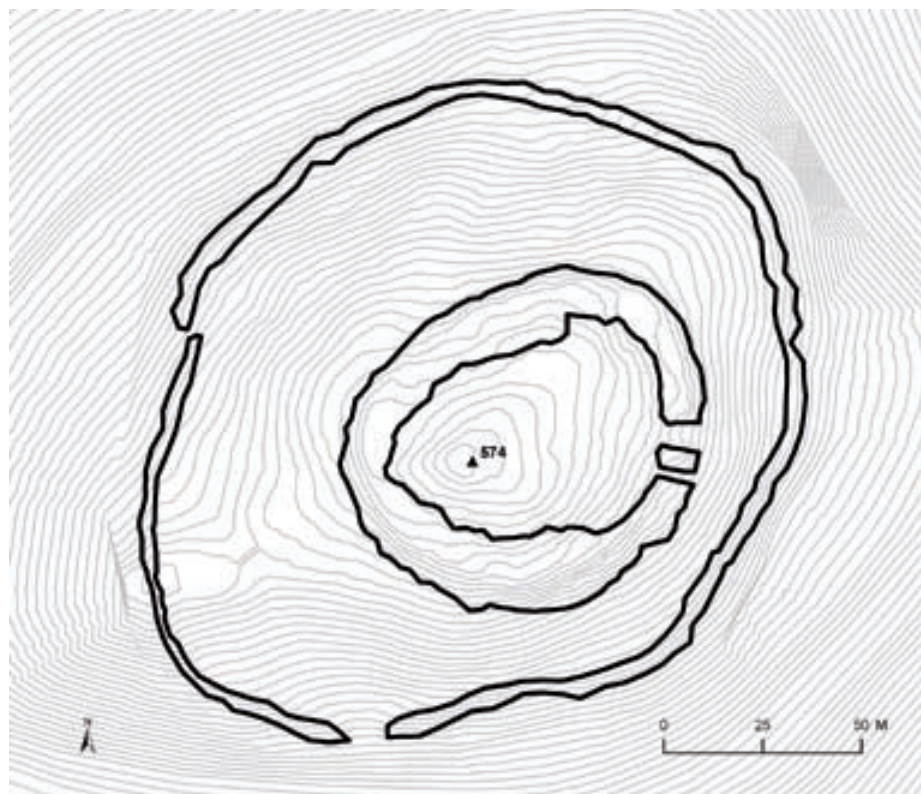
kteřé byly také nalezeny. První vizualizace byla provedena programy Atlas a Cyklon. Program Atlas vykreslil jednotlivé segmenty s velkou plasticitou a kýženým efektem: paprskovité útvary byly dobře patrné (**obr. 11**). Při zpracování dat pomocí programu Cyklon naopak nebyl výsledný snímek nijak přesvědčivý. Nejlepšího zobrazení se podařilo dosáhnout v programu Surfer (úpravy dat a zobrazení Alžběta Danielisová) a to jak ve dvourozměrné, tak samozřejmě i trojrozměrné verzi (**obr. 12, 13**).

Krátce před uzávěrkou tohoto článku byly tvar a struktura vnitřního valu ověřeny výzkumem. Val byl na západní straně protnut řezem, který odhalil ve vzdálenosti 2,5 m od vnějšího okraje destrukce jednoduchou, necelý metr vysokou vnitřní zeď z nasucho kladeného kamene, stavěnou pouze na šířku jediného kamene a lícovanou vně. Zeď byla zachycena v souvislém pásu asi 14 m a tvořila nikoli výběžky, ale měla pravidelný kruhový – oválný průběh. Pouze na jednom místě přiléhal ke zdi (a byl s ní zdívem svázán) jakýsi pilíř, či opěrák, postavený zjevně v místě, kde se zeď bortila. Paprskovité útvary mohly být výsledkem buď pozdější přestavby (v mase valu se ojediněle vyskytují zlomky keramiky ze 12. stol.), nebo spíše výsledkem pozdějšího rozebírání valu za účelem získání kamene na stavbu okolních vesnic. Hmota kamenů, která mezi jednotlivými segmenty „chybí“, by mohla odpovídat velikosti fůry kamene tažené volským spřežením.

Přestože se teorie původního paprskovitého tvaru vnitřního valu nepotvrdila (tj. val získal tento tvar pozdějšími úpravami nebo destrukcí), přinesla analýza dat pořízeným 3D scannerem jiné zajímavé výsledky. Dnešní maximální zachycená výška valu od terénu nepřesáhla 140 cm (potvrzeno výzkumem). Mohutný vizuální dojem, který hradba vyvolává, je ve skutečnosti způsoben jeho založením na prudkém svahu, který ho opticky zvyšuje. Stejný princip byl použit i při konstrukci mnohem skromnějšího vnějšího valu. V tomto případě evokuje dojem hradby prakticky jen několik řad kamenů, rovněž situovaných na prudkém podkladu.

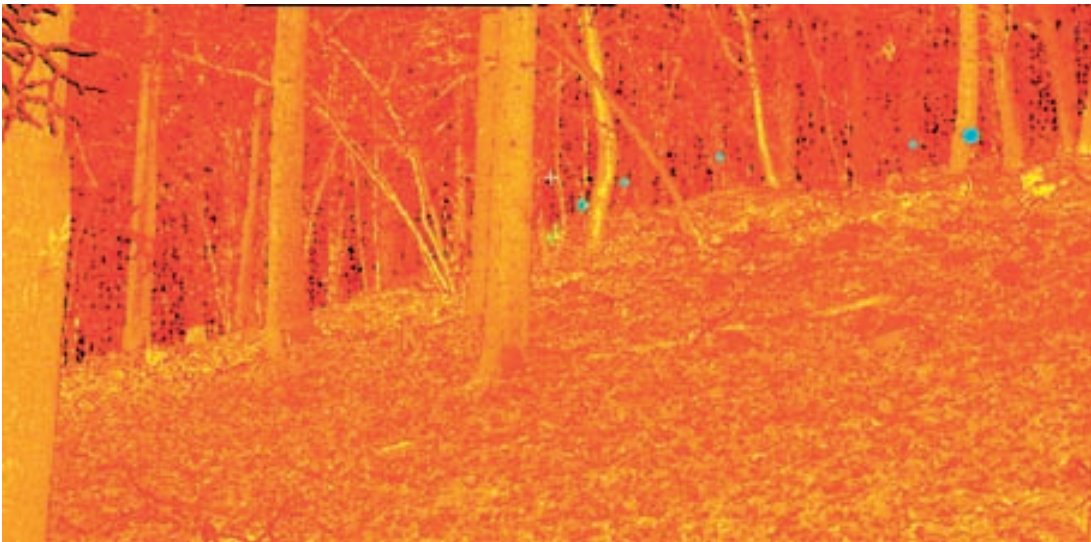
Jinou zajímavostí zjištěnou interpretací modelu je fakt, že úroveň koruny valu byla po celém obvodu zachována v relativně stejné výšce, lišící se mezi 10–20 cm. To ukazuje, že i při soustavném ničení památky je celá destrukce vnitřního valu zřejmě blíží své původní podobě, než jsme předpokládali. Výzkum totiž ukázal, že prostor za zdí, která nemohla vzhledem ke své chatrné konstrukci o mnoho překročit výšku jednoho metru, byl po celé šířce valu vyplněn naházenými kameny, původně navršenými nad výšku zdi. Konečně, celá koruna valu byla rozdělena více či méně pravidelnými mělkými prohlubněmi asi na 6 segmentů (**obr. 13**).

Další zpracování 3D modelu umožní výpočet původní kubatury kamene, použitého ke konstrukci vnitřního valu a snad i následnou rekonstrukci možné původní podoby této jedinečné pravěké stavební památky.

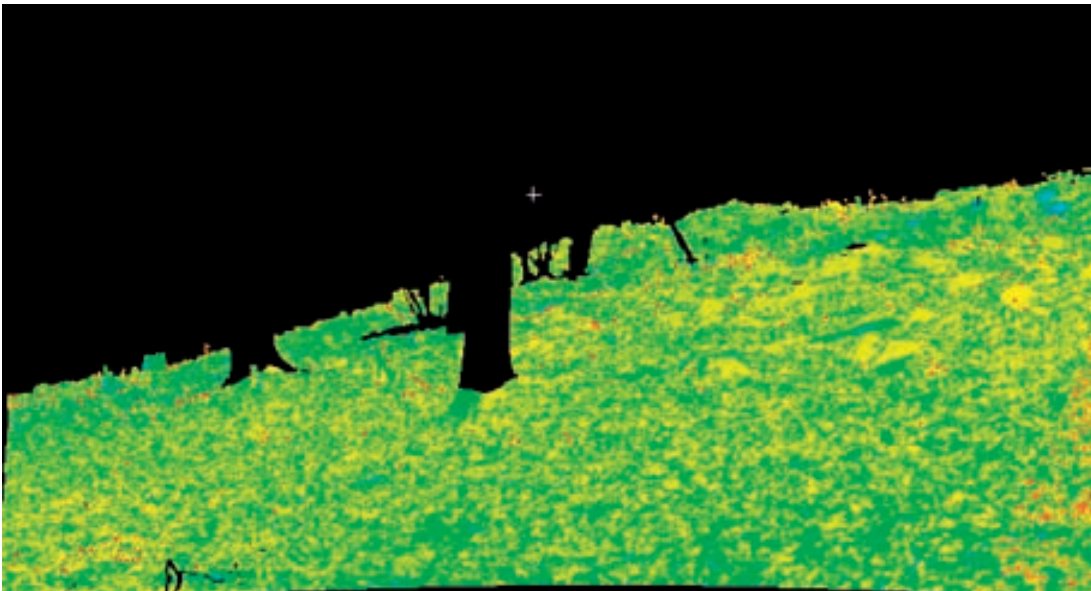


Obr. 8. Boudy, okr. Písek. Interpretací zakreslení průběhu valů. Zobrazení: P. Sankot.

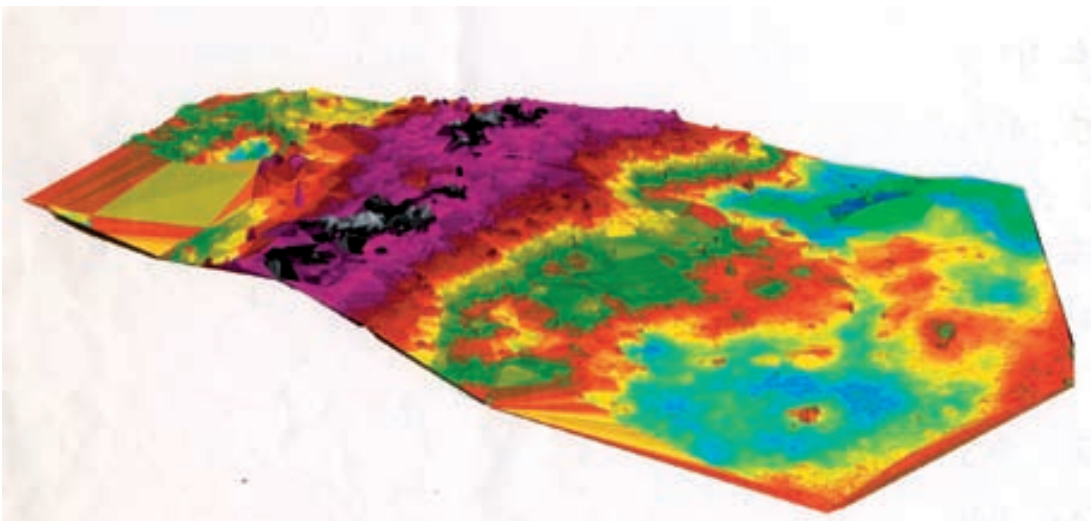




Obr. 9. Boudy, okr. Písek. Snímek segmentu valu v podobě tzv. mraku bodů. Zobrazení: I. Koloušek.

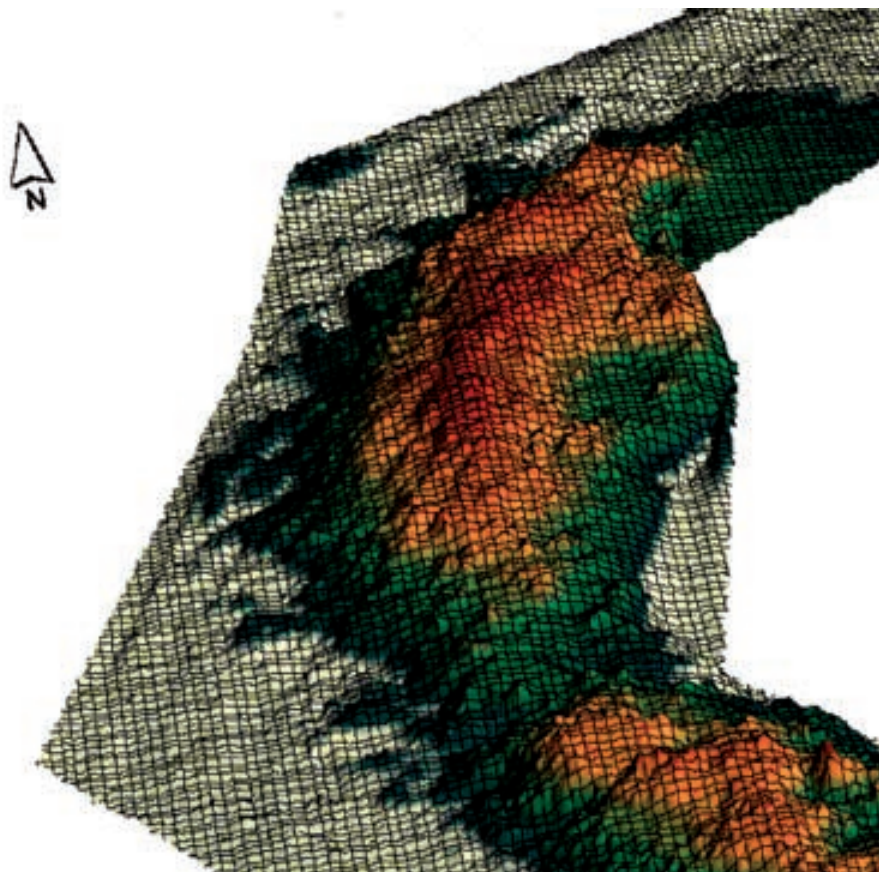


Obr. 10. Boudy, okr. Písek. Vyčištění tzv. mraku bodů od nežádoucího šumu. Zobrazení: I. Koloušek.



Obr. 11. Boudy, okr. Písek. Segment valu s paprscitým výběžkem. Zobrazení v programu Atlas: T. Mikolášek.





Obr. 12. Boudy, okr. Písek. Segment valu s paprscitým výběžkem. Zobrazení v programu Surfer: A. Danielisová.



Obr. 13. Boudy, okr. Písek. Celkový pohled na vnitřní val. Zobrazení v programu Surfer A. Danielisová.

Poděkování: firmě Geonet Praha (zejména panu P. Hulíkovi a P. Sankotovi) a firmě SG Geotechnika a. s. (zejména I. Kohouškovi, V. Kudláčkovi a M. Burdovi) za provedené měření a následné zpracování a za přátelské vztahy, které tato spolupráce přinesla.

Článek vznikl v rámci výzkumného záměru AVO 780020508

### Literatura

- Blažková-Dubská, G. – Frolík, J. 2005:* Architektura odhalená archeologickým výzkumem a problémy s její památkovou ochranou – Die durch archäologische Erforschung freigelegte Architektur und Probleme mit ihrem Denkmalschutz, *Archaeologia Historica* 30, 29–46.
- Borkovský, I. 1969: Pražský hrad v době přemyslovských knížat – Prager Burg zur Zeit der Přemyslidenfürsten. Praha.
- Dreslerová, D. 2004:* The North Prácheňsko region in prehistory. In: Gojda, M. (ed): *Ancient Landscape, Settlement Dynamics and Non-Destructive Archaeology*, Praha: Academia, 342–364.
- Dreslerová, D. – Hrubý, P. 2004:* Halštatské výšinné lokality v jižních Čechách – Nové výzkumy dvou hradišť – Hallstattzeitliche Höhensiedlungen in Südschwechien – Neue Grabungen auf zwei Burgwällen. In: *Študijné zvesti AÚ SAV* 36, Nitra, 105–129.
- Dubský, B. 1949:* Pravěk jižních Čech. Blatná: Jihočeské nakladatelství bratří Římsové.
- Frolík, J. 2007:* Jesuit college in Kutná Hora: courtyards and their layouts in the 17th–19th century. *Archaeological excavations in 1998–2005 – Jezuitská kolej v Kutné Hoře: nádvoří a jejich vybavení v 17.–19. století. Archeologický výzkumu v letech 1998–2005. Studies in Post-medieval Archaeology* 2, 43–56.
- Frolík, J. – Maříková-Kubková, J. – Růžičková, E. – Zeman, A. 2000:* Nejstarší sakrální architektura Pražského hradu. *Výpověď archeologických pramenů – Die ältesten Kirchenbauten der Prager Burg aufgrund der archäologischen Quellen. Castrum Pragense* 3. Praha.
- Frolík, J. – Smetánka, Z. 1997:* Archeologie na Pražském hradě. Praha – Litomyšl.

### Summary

#### Application of a 3D laser scanner in archaeology

Precise technical documentation of a historical building, archaeological site or the progress of archaeological excavation is an essential requirement for the work of a researcher. The traditional methods of geodetic surveying have now been extended by the option of three-dimensional laser scanning. 3D laser scanning, originally developed as military technology, has found a use outside the military in particular during last ten years when this method also reached the Czech Republic. The presented applications in the field of archaeological monuments and historical buildings are the result of a collaboration between the Geotechnika a.s. and the Prague Institute of Archeology of the Czech Academy of Sciences.

Three-dimensional laser scanning ensures high quality documentation of the existing condition which can serve as a background for a perfect virtual presentation, and can also be used for a virtual reconstruction of an original appearance. A 3D model of a scanned object permits investigating various geometrical relationships of points or clusters of points, and highlighting phenomena, in the “cloud of scanned points”, invisible, or only felt, in the real world as they are enshrouded in the fog of imperfections of human perception.

The case studies describe the application of the scanner in archaeological investigations of a prehistoric and mediaeval structures and in documenting historical monuments. The first example shows the documentation of the masonry and floor of a ~~Romanesque~~ church of unknown consecration in the 3rd courtyard of Prague Castle (fig. 2). Traditional survey methods have problems with the flooring of silt stone tiles, irregularly covering the church nave. Photogrammetry does not capture the actual depth (e.g. of the gaps between the tiles or the rectangular stones of the ~~Romanesque~~ masonry) and requires a sufficient distance from the documented surfaces. A 3D scanner permits making the documentation even from an acute angle. The problem of hidden details (the ray of the scanner does not see spots behind the load-bearing structures of the ceiling, etc.) can be resolved by scanning from several locations. The scanned image of the church serves as the documentation of the current condition and in the future enable evaluate the state of the historical monument which suffers from degradation and erosion regardless of the care.

The second application documents the church of unknown consecration including the corridor connecting the church to the adjoining Romanesque Basilica of St. Vitus and the surviving and accessible parts of the basilicas (figs. 3, 4). Today, these monuments are part of three distinct precincts and it is very difficult to get an idea of the original spatial relationships. After the project's completion it will be possible to create a three-dimensional image of the surviving state in real spatial relationships, and to use it for the reconstruction of the original state.

The next task is scanning the remains of the lime burning kiln uncovered and investigated in the courtyard of the Jesuit College in Kutná Hora (fig. 5). The kiln is a unique technological device from the 2nd half of the 17th and the early part of the 18th century surviving including a quantity of construction details and internal furnishing. The problems concerning the funding for the restoration of the walls and construction of a protective shelter suggest that the kiln might not be preserved for the future and the output from the laser scanning will be the only evidence of the original condition of the kiln at the time of its discovery providing data for the reconstruction of the technical heritage monument itself.

Rescue archaeology was at the heart of the excavation in Chrudim – Hradební St. The discoveries also included cellars of a vanished town house, which had developed in several phases from the end of the 13th century until the Thirty Years' War when the house went into decline (fig. 6). It is the first evidence of 14th century stone burgher architecture in Chrudim which has not been yet proven elsewhere in the historical core of the town. As the historical monument was to be destroyed later, it was documented using all the available methods. Scanning is the best option for obtaining an idea of the spatial relationships between all the principal stages, i.e. the earliest walled cellar from the 14th century with an entrance neck, the neighbouring cellar with the original barrel vault and the staircase neck from the 15th century, and finally the latest cellar with a cross-shaped plan additionally dug, in the late 15th or early 16th century, below the level of the floor of the previous cellar. The elaborate output of the laser scanner also permits the future study of details the importance of which was not sufficiently recognized or appreciated during the excavation.

The last example is the documentation of a dry stone rampart which is part of the enclosure of a hill top site from the Hallstatt Period – Hrad near Boudy (Písek district, fig. 7). In this particular case it was to verify the unusual shape of the destruction of the stone rampart. In several locations the more or less circular path of the destruction jutted out into irregular pointed spoke-like structures (fig. 8) which were virtually impossible to capture on a photograph or by any other method. After exposing the rampart to a 3D scanner a model was created where the point elevations were related to the zero surface determined by the model of the surrounding terrain. This ensured that the relative elevation differences of the different parts of the rampart became visible and the expected structures were clearly readable (fig. 11 – 13). Although the following archaeological excavation indicated that the structures are probably the result of the later destruction of the rampart, especially of "quarrying" the stone for buildings in the surrounding villages, the additional facts thus obtained supported the idea that the whole stone enclosure was rather symbolic in meaning as the structure could not warrant efficient defence. The site was re-classified – from an earlier functional determination of a fort to a central site of the region with a possible cult or ritual significance.