
ARCHEOLOGIE A LETECKÉ LASEROVÉ SKENOVÁNÍ KRAJINY

*ARCHAEOLOGY AND AIRBORNE LASER
SCANNING OF THE LANDSCAPE*



MARTIN GOJDA — JAN JOHN
A KOL.

Archeologie a letecké laserové skenování krajiny

elektronická verze

Archaeology and airborne laser scanning of the landscape

electronic version

Martin Gojda – Jan John a kol.

Roman Brejcha
Michal Bureš
Ladislav Čapek
Petr Dresler
Jiří Fröhlich
Daniel Hlásek
Lukáš Holata
Marek Kalábek
Petr Koscelník
Aleš Létal
Jiří Macháček
Ondřej Malina
Jan Martínek

Petr Menšík
Peter Milo
Jaroslav Peška
Jindřich Plzák
Filip Prekop
Jan Prostředník
Brita Raminnger
Lenka Starková
Daniel Stolz
Friedel Stratjel
Petr Šída
Pavel Šlézar
Jakub Vrána

**Katedra archeologie
Západočeská univerzita v Plzni**

Plzeň 2015

Recenzovali/Reviewed by:

Doc. PhDr. Jaromír Kovárník, CSc.

PhDr. Zdeněk Smrž

Publikace je výstupem grantů:

Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování

a

ArchaeoLandscapes Europe

© Martin Gojda – Jan John a kol. 2013

ISBN 978-80-261-0554-1

Obsah / Content

Předmluva	4	Preface	6
1. Ex caelo lux Principy leteckého laserového skenování a jeho využití pro dálkový archeologický průzkum	8	1. Ex caelo lux Principles of airborne laser scanning and its use for archaeological remote survey	20
2. Projekt Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3D snímkování (LIDAR), jeho cíle a dosažené výsledky	21	2. “The potential of archaeological survey of landscape in the Czech Republic using the airborne laser scanning” project (2010 – 2011): an overview	37
3. Výzkum, dokumentace a mapování novověkých polních opevnění prostřednictvím letecké prospekce, fotografie a laserového skenování	38	3. Identification, documentation and mapping historical field defensive features through aerial reconnaissance, photography and airborne laser scanning	48
4. Examinace procesu optimalizace „archeologicky korektních“ způsobů vyhodnocení dat z leteckého laserového skenování zalesněné krajiny Potenciál filtrace surových dat, problematika interpolačních algoritmů a způsobů vizualizace antropogenních tvarů v digitálních modelech reliéfu	49	4. Examination of the optimisation process of the “archaeologically correct” approaches to airborne laser scanning data evaluation in forested landscapes Potential of raw data filtration, issues of interpolation algorithms and methods of visualisation of anthropogenic features in digital terrain models	79
5. Neolitická těžba na Jistebsku v Jizerských horách a možnosti její detekce pomocí leteckého laserového skenování	80	5. Neolithic quarrying at Jistebsko in Jizera Mountains and the possibilities of its detection using airborne laser scanning ...	86
6. Potenciál využití leteckého laserového skeneru na archeologicky dlouhodobě zkoumaném území: případová studie z oblasti severně od Písku	87	6. The potential of the application of airborne laser scanning on long-studied archaeological sites: case study of a region north of Pisek	98
7. Letecké laserové skenování a jeho využití ke studiu archeologických nemovitých památek v lesním komplexu Bezinský na katastru obce Rataje, okr. Tábor	99	7. Airborne Laser Scanning and its use for the study of archaeological features in the forested complex of Bezinský in Rataje cadastral area (Tábor region)	110
8. LLS jako součást komplexní archeologické prospekce v zázemí raně středověkého centra na Pohansku u Břeclavi	111	8. ALS as part of a comprehensive archaeological prospection in the hinterland of Early Medieval hillfort Pohansko near Břeclav	126
9. Výpovědní hodnota leteckého laserového průzkumu při průzkumu vybraných archeologických lokalit v Karlovarském kraji	127	9. The validity of airborne laser scanning for the survey of selected archaeological sites in the region of Karlovy Vary	143
10. Příspěvek leteckého laserového skenování k poznání dvou zaniklých středověkých vesnic mezi Líšnou a Točnickem ...	144	10. Airborne laser scanning contribution to the survey of two deserted medieval villages between Líšná and Točník ...	149
11. Využití dat leteckého laserového skenování ke studiu středověké a novověké krajiny Velechvinského polesí, okr. České Budějovice	150	11. The application of airborne laser scanning for the study of medieval and modern landscape of Velechvinský forest, region of České Budějovice	158
12. Lidar a interpretace historického antropogenního reliéfu v zázemí dvou kostelů na Černokostecku	159	12. Lidar and the interpretation of historical anthropogenic relief in the vicinities of two churches in the region of Černý Kostelec	172
13. Využití leteckého laserového skenování na příkladu mapování a dokumentace zaniklých vesnic středověkého a novověkého charakteru v Čechách	173	13. The use of airborne laser scanning for mapping and documentation of medieval and modern deserted villages in Bohemia	189
14. Využití lidarových dat v archeologii konfliktu středověku: obléhač práce z 15. století	190	14. The application of lidar data in conflict archeology of the Middle Ages: 15th century siege works	199
15. Evaluace archeologického potenciálu lesního prostředí jihozápadní části Radečské vrchoviny s využitím lidarových dat	200	15. An evaluation of the archaeological potential of the woodland in south-western part of Radeč Upland with the use of LIDAR data	220
16. Odraz Železné opony v datech leteckého laserového skenování na příkladu Novohradských hor	221	16. “Iron Curtain” reflections in airborne laser scanning data: a case study from Novohradské Hory	227
17. Identifikace starých cest a dalších objektů za pomoci LLS První výsledky multidisciplinárního projektu	228	17. The identification of past communication routes and other features using ALS First results of an interdisciplinary project	240
Literatura	241		
Seznam autorů	254		

Martin Gojda – Jan John

Předmluva

Metodám, jejichž cílem je identifikovat nemovité archeologické památky a mapovat jejich rozsah na velké ploše, nebyla dlouho v naší archeologii věnována dostatečná pozornost. Teprve s nastolením témat spjatých s výzkumem větších územních celků, dále v důsledku technického rozvoje přístrojů a zařízení umožňujících jejich využití v bezkontaktním terénním výzkumu, a konečně v souvislosti s novými pohledy na problém etiky u tradičně vedených terénních archeologických výzkumů odkryvem se v naší zemi od posledního desetiletí minulého století stále výrazněji prosazuje trend k využívání potenciálu velkoplošných nedestruktivních metod.

V průběhu první dekády tohoto století byla evropská archeologie svědkem nástupu a rychlého rozšíření nového fenoménu, který v nezanedbatelné míře ovlivňuje prakticky všechny součásti procesu archeologického poznání sídelních aktivit člověka v minulosti. Jak v oblasti terénního výzkumu – identifikace, dokumentace a (výškopisného) mapování – nemovitých památek, tak i na poli interpretace se v posledních letech stále výrazněji prosazuje moderní metoda dálkového průzkumu krajiny, známá ponejvíce pod anglickými akronymy LiDAR (lidar = Light Detection and Ranging) a ALS (Airborne Laser Scanning). Podstatou jejího významu pro archeologii je dosažení georeferencovaného výškopisného záznamu antropogenních tvarů terénního reliéfu na zemském povrchu pomocí zařízení, které využívá energie světelného zdroje koncentrovaného do formy laserových paprsků.

Obě uvedené zkratky označují odvětví dálkového průzkumu Země, které vychází ze specifického (od dosavadních postupů kvalitativně odlišného) způsobu sběru polohopisných a výškopisných dat o zemském povrchu a o jejich následném využití k vytváření (digitálního) modelu reliéfu, resp. k tvorbě výškopisné mapy. Zatímco v prvních letech se využití leteckého laserového snímkování uplatňovalo pouze v bohatších evropských zemích, které si bez větších problémů mohou dovolit zapojení nejnovějších technologií do archeologických projektů zaměřených na výzkum pravěké a historické krajiny (nejdynamičtější se tato metoda rozvíjí a využívá v Anglii, Francii, Itálii, Německu a Rakousku), je v současnosti potenciál této metody postupně uplatňován a rozvíjen také v zemích střední a východní Evropy, které bývaly součástí bloku tzv. lidově demokratických (socialistických) států (podrobněji k tomu v kap. 1).

Aplikace lidarů a využití jeho potenciálu v archeologii se slibně rozvíjí a již několik let je jasné, že letecké laserové skenování se stává jedním z nejefektivnějších způsobů průzkumu a dokumentace kulturní/historické krajiny. Tedy takového prostředí, v němž jsou na povrchu terénu zachovány relikty minulých lidských aktivit spojených se sídlením a exploatací krajiny, například příkopy a valy hradišť, mohylová pohřebiště,

zaniklé středověké a novověké vesnice a jejich plužina, opuštěné těžební areály, rybníky, komunikace, milíře, polní opevnění atd. Tyto druhy nemovitých památek jsou v naprosté většině případů zachovány v zalesněném prostředí, v mnohem menší míře v otevřené krajině, v níž je terénní reliéf vystaven devastujícím účinkům dlouhodobě praktikované orby. Jak ovšem dokládají aktuální výsledky leteckého laserového snímkování, je možné i v zemědělsky dlouhodobě kultivované bezlesé krajině tímto způsobem detekovat a dokumentovat některé památky, ačkoli vizuálním povrchovým průzkumem jejich stopy neevidujeme. Dosavadní zkušenosti ukazují, že při standardním (nejčastěji uplatňovaném) nastavení hustoty skenovaných bodů může lidarové snímkování polí výjimečně zachytit i časově velmi vzdálené areály a objekty. Mnohem častěji se však jedná o památky, k jejichž destrukci došlo v nepříliš vzdálené minulosti (příklad pozdně novověkého opevnění severně od Terezína je představen v kap. 3).

V České republice se teprve nedávno naskytl možnost aplikovat zde prezentovanou sofistikovanou metodu výškopisného mapování pro potřeby výzkumu české pravěké a historické krajiny, otestovat možnosti, které pro jejich identifikaci, evidenci a dokumentaci tato metoda nabízí a zhodnotit její efektivitu z hlediska vynaložených prostředků a kvality dosažených výsledků. Prvním projektem realizovaným na území České republiky, který v plné míře směřoval k testování možností leteckého laserového snímkování v podmínkách českého prostředí a jeho rozmanitých krajinných typů a ke zhodnocení jeho budoucí role v oblasti heuristiky (identifikace a evidence), mapování a dokumentace území s výskytem nemovitých památek byl Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování (LIDAR). Nedávno (formálně) ukončený projekt, jehož nositelem byla Západočeská univerzita v Plzni (resp. katedra archeologie zdejší Fakulty filozofické, dále ZČU), probíhal v letech 2010 – 2011 a přinesl řadu zajímavých výsledků jak v oblasti heuristické (zviditelnění mnoha dosud neznámých památek a jejich následná evidence) a dokumentační (trojrozměrné mapy a plány různorodých objektů spojených s minulými sídelními aktivitami), tak interpretační (např. výklad vzájemných vztahů památek a jejich bezprostředního okolí, hledání pravidelností – struktur – v prostorových vztazích jednotlivých složek někdejších sídelních areálů; podrobně k projektu viz kap. 2).

Pro výzkum a ochranu nemovitého archeologického dědictví českých zemí má zásadní význam skutečnost, že v nedávné době zahájila ČR tvorbu nového výškopisného mapování celého území státu metodou leteckého laserového skenování. Díky tomu bude v blízké budoucnosti možné integrovat takto shromážděná prostorová data ve standardním prostorovém rozli-

šení do archeologických projektů a prakticky „od stolu“ analyzovat model terénu a interpretovat jej z hlediska přítomnosti a druhového zastoupení antropogenních reliktů (podrobněji k tomu v kap. 1).

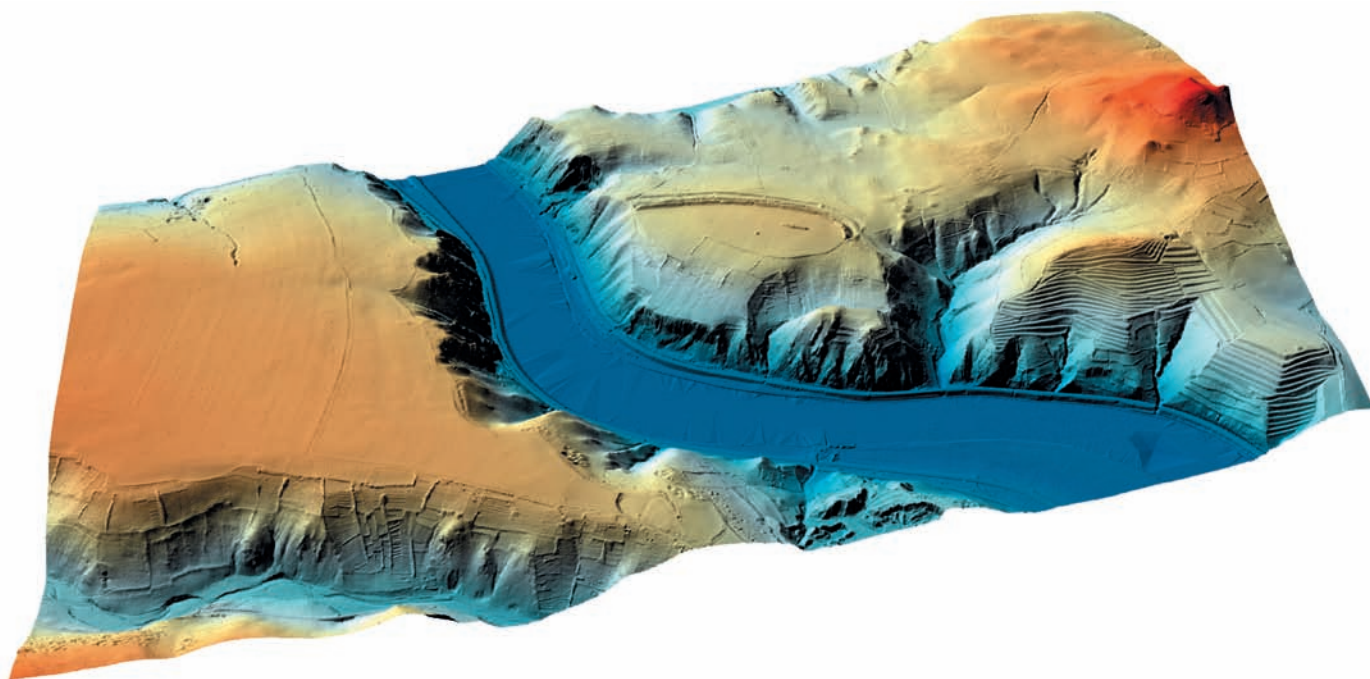
V tomto svazku zaměřeném tématicky na uplatnění leteckého lidarů v průzkumu krajiny s archeologickými památkami zachovanými na povrchu země předkládáme odborné veřejnosti jednak nejdůležitější výsledky výše uvedeného projektu plzeňské katedry archeologie, a jednak studie zaměřené na zhodnocení výpovědi leteckých laserových dat ve vybraných oblastech, které jsou předmětem dlouhodobějšího vědecko-výzkumného zájmu posluchačů doktorských studií naší katedry. Jsou to právě data získaná z projektu nového výškopisného mapování ČR, laskavě poskytnutých našemu pracovišti Českým úřadem zeměměřickým a katastrálním (naš dík patří především ing. K. Brázdilovi a Mgr. P. Dušánkovi), jejichž potenciál chceme předvést odborné veřejnosti a inspirovat zájemce z jejich řad k odbornému využití těchto dat jak v teoreticky postulovaných projektech, tak v péči o archeologické dědictví. Abychom nabídli co nejpřesnější obrázek o současném stavu zájmu profesionálních archeologů v českých zemích, s velkým

potěšením jsme do předkládaného svazku zařadili také studie z několika dalších pracovišť mimo ZČU, které jsou dokladem rychle se šířícího zájmu o danou problematiku u nás.

Předkládaný svazek je tak první ucelenou zprávou o začlenění leteckého lidarového průzkumu do naší archeologie. Je publikačním výstupem výše uvedeného projektu *Potenciál archeologického výzkumu...* (GAČR, ident.č. P405/10/0454), a zároveň jednoho z největších mezinárodních soudobých projektů evropské archeologie *ArchaeoLandscapes Europe* (zkrat. též *ArcLand*, Culture Programme 2007–2013 – CU7-MULT7, Agreement Number 2010-1486/001-001; viz <http://www.archaeolandscapes.eu>), jehož partnerem je ZČU v Plzni reprezentovaná jedním z editorů této monografie.

Věříme, že si tato kniha najde své čtenáře, že rozproudí zájem o výzkum a ochranu pravěké a historické krajiny prostřednictvím nejmodernější metody dálkového průzkumu a především – že nezůstane příliš dlouho osamocena.

Martin Gojda – Jan John
Plzeň, listopad 2012



Martin Gajda – Jan John

Foreword

Methods, which aim to identify the immovable archaeological artefacts and map their distribution on a large scale, had long been neglected in Czech archaeology. It has been with the growing interest in themes connected with more extensive portions of landscape, in consequence of the technological development of tools and devices which could be used in remote survey and finally in connection with the new perspectives on the ethics of traditional methods of archaeological excavation in our country that from the last decade of the 20th century a trend towards the use of large-scale non-destructive methods has been more and more apparent.

During the first decade of this century, European archaeology witnessed the emergence and rapid spread of a new phenomenon, which considerably influences practically all stages of the archaeological research on past human settlements. In field research – the identification, recording and mapping – of immovable heritage, as well as in the interpretation stages, a modern method of remote sensing of the landscape is becoming more promoted in the recent years. This method is best known under its English acronyms LiDAR (Light Detection and Ranging) and ALS (Airborne Laser Scanning). The basis of its importance for archaeology lies in obtaining a georeferenced elevation model of anthropogenic features on the surface of the terrain employing a device, which uses light source energy concentrated into laser beams.

Both the above mentioned abbreviations are used for a type of remote sensing of the Earth's surface, which uses a specific (and from older approaches qualitatively different) way of the positioning and elevation data collection and for their subsequent use when a (digital) model, i.e. a hypsographic map, of the terrain is created. Initially, airborne laser scanning was used only in the “richer” European countries, which can relatively easily afford to apply the latest technology to archaeological research of prehistoric and historic landscapes (this particular method is being developed and applied the most dynamically in England, France, Italy, Germany and Austria). Nowadays, the potential of this method is gradually put to practice also in the countries of Central and Eastern Europe, i.e. the post-communist countries (for more detail see chap. 1).

The application of lidar and the use of its potential in archaeology are developing promisingly and in the recent years it has become clear, that airborne laser scanning represents one of the most effective methods of cultural/historical landscape survey and documentation. By that we understand the environment, in which there are preserved the remains of past human activities connected with settlement and resource exploitation, such as ditches and ramparts of hillforts, barrows, deserted medieval and modern villages and their field systems,

deserted mining sites, ponds, roads, charcoal burning platforms, field fortifications etc. These types of immovable features are in the majority of cases preserved in woodlands, considerably less so in open landscapes, in which the relief is exposed to the devastating effects of long-term manuring. The current results of airborne laser scanning attest that even in the agriculturally cultivated landscape with no protective tree cover, it is possible to detect and record a number of remains, although they are virtually unrecognisable visually during surface survey. Experience shows that the standard (most commonly applied) density of scanned points, lidar scanning of fields can sometimes record even very old sites and features. Much more commonly, however, we are dealing with remains which were destroyed more recently (an example of later modern fortifications of Terezín is presented in chapter 3).

It has been only recently when an opportunity arose in the Czech Republic to apply the presented sophisticated method of mapping for the research of Czech prehistoric and historic landscape, to test the possibilities this method has for their identification, recording and documentation and to evaluate its effectiveness considering the costs and quality of results. The first project undertaken in the Czech Republic, which was entirely dedicated to the testing of the potential of airborne laser scanning in Czech environment in a variety of landscape types and the evaluation of a future role of ALS in heuristics (identification and recording), mapping and documentation of environments with immovable archaeological remains was the *Potential of archaeological landscape survey in the Czech Republic using 3D airborne laser scanning (LiDAR)*. A recently (formally) finished project, which was undertaken at the University of West Bohemia in Pilsen (at the Department of Archaeology of the Faculty of Philosophy) during the years 2010 – 2011 and brought a number of interesting results in the heuristic field (documentation and recording of a number of previously unknown sites), new records (3D maps and plans of various features related to past settlements) and interpretations (e.g. the relation of various sites and their hinterlands, a search for patterns – structures – in spatial relationships of individual components of past settlements; for more detail see chap. 2).

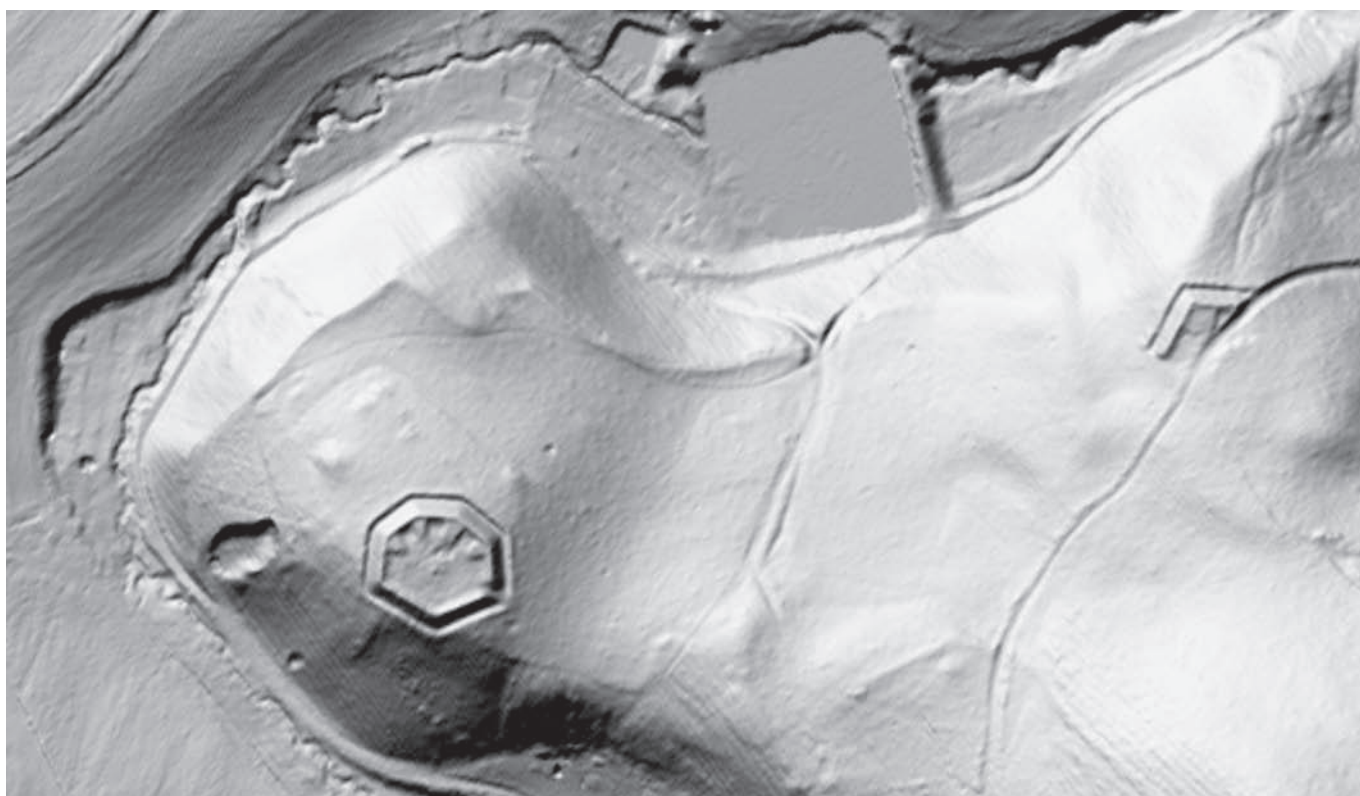
For the study and protection of immovable archaeological heritage in the Czech Republic it is crucial, that recently the state has launched a new mapping project of the whole of Czech Republic using airborne laser scanning. Hence, in the near future it will be possible to integrate the collected data in standard spatial resolution into archaeological projects and practically “from the desk” analyse a terrain model and interpret it as for the presence and typological representation of anthropogenic features (for more detail see chap.1).

In this volume which thematically focuses on the application of airborne lidar for the survey of landscape with archaeological features preserved on the surface, we present the most important results of the above mentioned project of the Department of Archaeology in Pilsen and also studies which deal with the evaluation of airborne laser data in selected areas, as objects of long-term research of the doctoral candidates at our institution. We want to present particularly the data collected as part of the new Czech Republic mapping project, kindly provided to us by the Czech Office for Surveying, Mapping and Cadastre (we are very grateful especially to Ing. K. Brázdil and Mgr. P. Dušánek), and inspire those interested to a further use of these data in theoretical projects as well as for the conservation of archaeological heritage. To offer the most accurate picture of the present-day state of Czech professional archaeologists' research interests, we are happy to include in this volume the studies from several other institutions outside the University of West Bohemia, which demonstrate the rapidly spreading interest in this topic in our country.

This volume hence represents the first inclusive report about the incorporation of airborne laser scanning in Czech archaeology. It is the publication outcome of the project *The Potential of archaeological landscape survey...* (GAČR, ID.no. P405/10/0454), and at the same time one of the largest current international projects in European archaeology *ArchaeoLandscapes Europe* (or *ArcLand*, Culture Programme 2007-2013 – CU7-MULT7, Agreement Number 2010-1486/001-001; see <http://www.archaeolandscapes.eu>), where the University of Bohemia cooperates as a partner represented by one of the editors of this volume.

We believe that this volume will find its readers, that it will promote the interest in the research and protection of prehistoric and historic landscape using the latest method of remote sensing and most importantly – that it will not remain the sole example of such study for long.

Martin Gajda – Jan John
Pilsen, November 2012



Jan John – Martin Gojda

1

Ex caelo lux

Principy leteckého laserového skenování a jeho využití pro dálkový archeologický průzkum

1. Úvod

Jedním z důležitých teoretických konceptů zastánců difuzionismu v archeologii byla idea pokroku (světla), přicházejícího z oblasti Předního východu (*Ex oriente lux* – viz např. *Montelius 1899*). Dnešní archeologie se při hledání odpovědí na své otázky obrací spíše k vlastním archeologickým pramenům v naší krajině a při této snaze dostává do rukou nový nástroj v podobě světla (laserového paprsku), přicházejícího z nebe (*Ex caelo lux*).

Zmíněným nástrojem, který na počátku třetího tisíciletí zahájil kvalitativně novou etapu archeologického výzkumu krajiny, je metoda leteckého laserového (lidarového) skenování (dále LLS, v angličtině ALS – *airborne laser scanning*), která se v posledních letech začíná postupně uplatňovat i v naší archeologii. Zásadním způsobem mění efektivitu (tj. především rychlost sběru dat a cenu za jejich pořízení) tradičně vedeného pozemního (geodeticko-topografického) způsobu vyhledávání, dokumentace a mapování archeologických nemovitých pramenů uchovaných v terénním reliéfu ve formě vyvýšenin a depresí, tedy tzv. antropogenních tvarů reliéfu (*Kuna – Tomášek 2004, Smetánka – Klápště 1981*). Také ve srovnání s klasickým fotogrammetrickým leteckým snímkováním přináší tato metoda významné zlepšení možnosti tvorby map prostřednictvím dálkového průzkumu. Souvisí to s poměrně velkou polohovou a výškovou přesností obrovského počtu zaměřených bodů na zemském povrchu, umožňující následnou tvorbu výškopisného modelu, resp. výškopisné mapy. Naprosto zásadní je v uvedeném srovnání jedna z největších předností leteckého laserového skenování, která vychází z podstaty technologie laseru založené na šíření světla emitovaného v koncentrované podobě laserových paprsků; touto předností je schopnost těchto paprsků proniknout na povrch země skrz vzrostlou (i když ne příliš hustou, resp. světlu propustnou) vegetaci.

V úvodní kapitole tohoto svazku se pokusíme shrnout nejdůležitější informace o principech, na kterých je letecké skenování povrchu země založeno, podáme přehled o způsobech sběru surových dat (v souvislosti s tím shrneme možnosti v přístupu k českým lidarovým datům, pořizovaným v současné době v rámci projektu tvorby nového výškopisu ČR), o jejich klasifikaci (filtraci) a následné interpolaci (transformaci dat do podoby digitálního výškopisného modelu); pozornost bude dále věnována možnostem vizualizace digitálního modelu a na ní založené interpretaci terénního reliéfu z hlediska přítomnosti (resp. identifikovatelnosti) nemovitých archeologických pramenů. Rov-

něž podáme stručný přehled o dosavadním využití této metody v kontextu evropské archeologie.

2. Lidar a principy leteckého laserového skenování

Termín *lidar* je akronymem (zkratkou) slovního spojení *light detection and ranging*, který se vztahuje obecně k fyzikální podstatě měření vzdálenosti a polohy pomocí laserového paprsku. Toto měření může probíhat třemi způsoby: ze země – a to buď z pevné, nebo pohyblivé základny (ze stojanu, resp. z automobilu), a ze vzduchu, kdy nosičem skenovacího zařízení je letadlo nebo vrtulník. Pozemní laserové měření je dnes běžně využívanou součástí projektování staveb včetně složitých zařízení energetických a průmyslových komplexů; také v archeologii (včetně naší) se již od minulého desetiletí tento způsob dokumentování terénních výzkumů uplatňuje relativně často, a to zejména v případě lokalit s různorodou skladbou komponent (vrstvy, zdivo, výplně objektů).

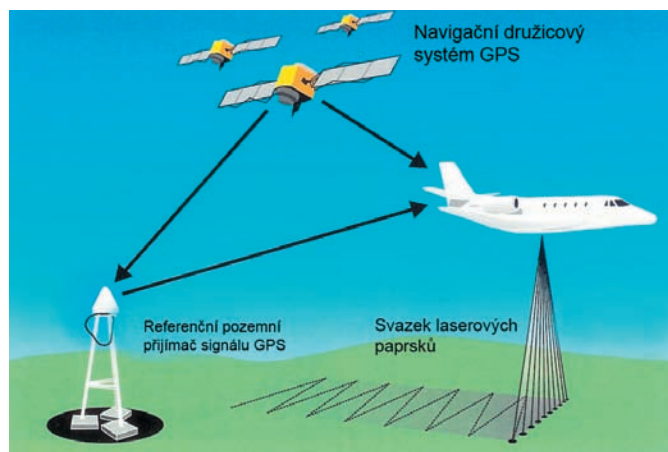
Zabýváme-li se výlučně aplikací lidarového principu na leteckých nosičích, pak můžeme tento pojem definovat jako označení technologie sloužící k 3D mapování, resp. k tvorbě výškopisného modelu prostřednictvím dat získaných laserovým skenováním zemského povrchu z výšky.

Letecké laserové skenování je jednou z dlouhodobě vyvíjených metod tzv. *dálkového průzkumu Země (DPZ)*. Tímto pojmem označujeme postupy, jejichž úkolem je získávání informací o povrchové vrstvě Země (jinými slovy informace o tom, kde se co nachází, jakou formu to má a jak je to daleko) bez přímého kontaktu s ní. Jsou založeny na měření intenzity přirozeně nebo uměle emitovaného a odraženého elektromagnetického záření, jehož hodnotu převádějí na elektr. signál a ten zaznamenávají v podobě digitálních dat. Do poměrně nedávné doby, kdy rychlý rozvoj digitálních technologií přinesl některé nové způsoby pořizování dat (termovize, radarové a laserové systémy) i na nosiče operující v menších výškách, tedy na letadla, vrtulníky a dálkově řízené bezpilotní prostředky, byl pojem DPZ spojován převážně s pořizováním dat z vesmíru. Sběr informací o povrchu Země prostřednictvím letadel býval označován pojmem letecká fotogrammetrie, která slouží zejména pro mapovací práce. Uvádí se, že cena souboru lidarových dat je přibližně o 40 % levnější než kolekce klasických fotogrammetrických dat, totéž platí o rychlosti jejich pořízení, zpracování a extrahování požadovaných informací (*Young 2011, 21*).

Techniku používanou v oblasti kosmického DPZ tvoří jednak dnes už prakticky vyražené klasické fotokomory a televizní kamery, pořizující analogový záznam, a jednak široká škála přístrojů obecně zvaných radiometry (měřiče záření). Zatímco družicové systémy jsou obvykle nosiči pasivních radiometrů (opticko-mechanických a elektronických skenerů a skenujících mikrovlnných přístrojů), které měří intenzitu přirozeného (slunečního) záření, raketoplány, letadla a vrtulníky bývají nosiči termovizní kamery, radaru a lidarů. Tyto tzv. aktivní radiometry využívají k měření vlastního zdroje záření: u radaru jsou to vysokofrekvenční rádiové vlny, u lidarů světelné paprsky (podrobně k metodám DPZ např. *Halounová – Pavelka 2005*; celkový přehled o družicových systémech a aplikaci satelitních dat v archeologii viz *Parcak 2010* a *Gojda – John 2009*).

Lidar je tedy v principu stejným druhem přístroje jako radar (akronym pro *radio detection and ranging*), jedná se o aktivní systém dálkového průzkumu, kterým se měří vzdálenost mezi nosičem lidarů a zemským povrchem na základě času, který uplyne mezi vysláním laserového paprsku (rádiových vln), jeho (jejich) odrazem od překážky a návratem do lidarového (radarového) přijímače odražených impulsů. Letecký lidar vysílá kontinuální impulsy, jejichž intenzita se pohybuje v intervalu od jednotek do několika set tisíc kHz (např. u lidarů, jehož výkon je nastaven na hodnotu 200 kHz dochází k vyslání 200 000 impulsů za sekundu). Laser přitom operuje v rozsahu 532 – 1550 nm světelného spektra (hodnota je odlišná podle toho, zda skenování probíhá ze země, z automobilu či z letadla).

K efektivnímu fungování leteckého lidarů je nutné integrovat jej s dalšími prvky, které dohromady tvoří sofistikovaný systém schopný jak identifikace, tak také přesné georeferencování detekovaných prvků a jejich trojrozměrného zobrazení (obr. 1).



Obr. 1 – Princip snímání povrchu terénu lidarem za podpory pozemních a palubních stanic systému družicové navigace (GNSS/GPS), jimiž je zajištěna správná georeferencování snímaných bodů. Na letadle je umístěn laserový skener sloužící k trojrozměrnému mapování terénu. Laserem se zjišťuje vzdálenost mezi přístrojem a zemským povrchem (měří se časový interval vypuštění a návratu odrazu paprsku). Upraveno podle *Holden a kol. 2002*.

Fig. 1 – The principle of LIDAR terrain surface scanning with the use of ground-based and airborne stations of satellite navigation (GNSS/GPS), which ensure for the correct georeferencing of the collected data. The airplane carries a laser scanner used for a three dimensional mapping of the terrain. The laser measures the distance between the beam source and the ground (it measure the time elapsed between the emitting and receiving of the laser beam). Modified after *Holden et al. 2002*.

Díky tomuto potenciálu je spektrum oborů, které mohou lidar s velkou výhodou používat, velice široké. Kromě výškopisného mapování se nejčastěji uplatňuje při monitorování a mapování lesní vegetace, při stavbě dálničních koridorů, monitorování urbanizovaných a zastavěných ploch a také v oblasti atmosférického měření (podrobně k technickým parametrům a uplatnění lidarů cf. *Dolanský 2004*, *Crutchley – Crow 2010* a *Young 2011*; převážně odtud pocházejí v této i v dalších kapitolách prezentované údaje).

Lidar má ovšem také určitá omezení, která je třeba při sběru dat respektovat a s ohledem na tuto skutečnost plánovat konkrétní lety. Ačkoli podle některých tvrzení je tato metoda málo závislá na stavu atmosféry, podle jiných údajů je LLS omezeno (nespecifikováno do jaké míry) oblačností, mlhou a kouřem (*Young 2011*, 4). Zdůrazněme na tomto místě, že laserové paprsky nejsou schopny proniknout skrz pevný materiál včetně zemského povrchu, takže v praxi archeologického průzkumu nelze touto metodou dosáhnout přímého odhalení objektů (plně) zahloubených pod povrch terénu, jako jsou například jámy, příkopy či obydlí.

Jak jsme již uvedli, samotná metoda LLS je založena na kombinaci několika přístrojových systémů. Klíčový je laserový skener emitující vysokou rychlostí laserové impulsy (zpravidla desetitisíce až statisíce impulsů za sekundu), směřované pod různými úhly směrem k zemskému povrchu pomocí rotujícího či oscilujícího zrcadla. Odrazy těchto impulsů od pevných překážek jsou poté opět zachycovány citlivým detektorem. Z každého impulsu je teoreticky zaznamenán jeden nebo více odrazů, přičemž k poslednímu odrazu zpravidla dochází od terénu. Neplatí to ale vždy, neboť k poslednímu odrazu paprsku, jehož průměr může mít u země až desítky centimetrů, může dojít i od větších objektů nad terénem (stavby, zvířata, rostliny atd.).

Díky možnosti měření velmi malých časových rozdílů (v řádu nanosekund) mezi vysláním impulsu a přijetím jeho odrazu lze poměrně přesně (zpravidla s přesností na 10 – 30 cm) určit polohu bodů, od nichž se signál odrazil (viz *Dolanský 2004*, 10–11). Skener je přitom instalován v letadle, případně vrtulníku vybaveném přijímačem GPS a využívá přitom také sítě referenčních pozemních stanic tohoto navigačního systému. Letoun navíc disponuje inerciálním navigačním systémem (INS, angl. IMU), který s vysokou přesností udržuje spolu s GPS letadlo v předem určené dráze letu. To vše umožňuje rychlý sběr georeferencovaných dat na velkých plochách (data jsou skenována ve vzájemně se překrývajících páscech/průletech, které se potom vzájemně doplňují). Velmi zjednodušeně můžeme LLS přirovnat k totální stanicí, která dokáže měřit jednotlivé body obrovským tempem a zároveň přitom létat nad krajinou. Doplnkem uvedené sestavy prvků lidarového systému bývá ještě fotografická kamera pevně zabudovaná do podlahy letounu, která pořizuje paralelní měřičké snímky laserem skenovaného území, a spíše výjimečně i multi/hyperspektrální senzor.

3. Vývoj LLS a jeho dosavadní uplatnění v archeologii: stručný přehled

Kořeny praktického použití technologie LLS sahají do 80. let 20. století (*Štular 2011*, 393), byla to ale až polovina minulého desetiletí, kdy se technologie dálkového (rozuměj leteckého) lidarového průzkumu začala velmi dynamicky uplatňovat v evropské archeologii. Komerčně dostupná data pro využití v civilním sektoru se objevila v polovině 90. let 20. stol. (např. v Anglii byla tato metoda poprvé využita k mapování r. 1996), ale systém dálkového lidarového měření začal být vyvíjen v souvislosti s vynálezem laseru v 60. letech a s armádními pokusy využít tehdy již propracovaný koncept radaru pro průzkum a detekci zájmových objektů pomocí laserových paprsků (*Crutchley – Crow 2010*, 3). Zatímco radar byl vyvinut již před 2. světovou válkou, počátky konstrukce lidarů se datují do 60. let 20. stol. (vynález laseru je datován do r. 1958; srov. *Chan-Chang Wang ed. 2011*, nejobsáhlejší moderní přehled o vývoji laseru a jeho využití v rozmanitých oblastech lidské činnosti včetně archeologie).

Uvedení lidarů do oblasti archeologické prospekce a výškopisného mapování mělo několikaleté zpoždění. Před počátkem 21. století se tato metoda prakticky neuplatnila, o to dynamičtěji se pak ale začala využívat jak v lokálních, tak v mezinárodních projektech dálkového archeologického průzkumu. Přitom se tyto projekty neomezovaly pouze na pasivní přísun prostorových archeologických dat nového druhu, nýbrž byly (a jsou) v nemalé míře cíleny metodologicky. Výrazně se do povědomí odborné veřejnosti dostal zejména rakouský program, který byl od počátku orientován na zdokonalování technických a softwarových možností zpracování lidarových dat (vývoj prostřednictvím mezioborové spolupráce specialistů z Univerzity Vídeň, Technické univerzity Vídeň a Rakouské akademie věd; např. *Doneus – Briese 2006a; 2006b; 2011; Doneus – Briese – Kühtreiber 2008*). V kontinentální části Evropy výrazněji zaujala také nedávno uvedená a v Bádensku-Würtembersku systematicky uplatňovaná metoda lokálních reliéfních modelů (LRM), jejíž pomocí je možné zvýraznit i nepatrné terénní nerovnosti, resp. velmi mělké objekty, a to přímo, bez ohledu na úhel jejich osvětlení (*Bofinger – Hesse 2011; Hesse 2010*). Podobné problematice analýzy mikroreliéfu, a to konkrétně za účelem detekce zaniklých polí, je věnována zvýšená pozornost např. v Nizozemí (identifikace a mapování pravěkých tzv. keltských polí; *Humme et al. 2006*), Německu (*Sittler – Schellberg 2006*) a v Itálii, kde v integraci lidarových dat s produkty dalších nedestruktivních metod vyniká v posledních letech především specializovaná laboratoř (LapetLab) univerzity v toskánské Sieně (např. *Campana 2011; Campana – Forte eds. 2006*).

Od samého počátku rozvoje zájmu o LLS v první polovině minulého desetiletí se tomuto tématu věnuje několik pracovišť v Anglii. Vyniká zde jednak vědecko-výzkumné pracoviště univerzity v Cambridge (Unit for Landscape Modelling), které disponuje jedním z nejlépe vybavených systémů pro lidarové sním-

kování a paralelně prováděné fotogrammetrické snímkování skenovaných areálů a jednak památková instituce English Heritage (zejm. práce *Crutchley – Crow 2010*, publikovaná nakladatelstvím této instituce, je první ucelenou příručkou v oblasti archeologického využití dálkového laserového měření, resp. syntézou nejdůležitějších poznatků dosažených touto metodou v archeologii, a zároveň zdrojem mnoha důležitých informací o publikacích, internetových stránkách a terminologii). Data z plošného skenování Anglie v roce 2001 byla využita při výzkumu krajiny v okolí známého monumentu Stonehenge (*Bewley – Crutchley – Shell 2005*), v roce 2004 bylo skenováno pravěké hradiště Welshbury Hill (*Devereux a kol. 2005*; cf. též *Devereux et. al. 2008*). V poslední době zaujal také pozornost irský projekt, který vyniká zaměřením na sběr dat o velmi vysokém rozlišení, resp. o velké hustotě skenovaných bodů ve sledovaném prostoru (např. proslulý areál Tara; *Shaw – Corns 2011*). Pominout nelze ani projekty francouzské (*Georges-Leroy 2011*) – právě v této zemi, konkrétně v Evropském archeologickém centru Bibracte – Glux-en-Glenne, se v březnu 2011 konal první mezinárodní workshop speciálně zaměřený na lidarové aplikace v archeologii.

Připomeňme, že ojedinele se tato metoda začíná uplatňovat také v bývalých socialistických zemích. Nepochybně nejdále je v tomto ohledu Slovinsko, kde se LLS uplatnilo v několika projektech, které proběhly ve druhé polovině minulého desetiletí a pokračují i nyní (*Rutar – Črešnar 2011*). Podle předběžných zpráv a ústních sdělení se s lidarovými daty začíná pozvolna pracovat také na území východního Německa a v Polsku, kde právě probíhá první rozsáhlý projekt, integrující do průzkumu a podrobného mapování areálů pravěké těžby silicítů kromě geofyzikálních metod také letecký laserový průzkum (referát přednesený na konferenci EAA 2012 v Helsinkách vedoucím projektu J. Budziszewskim z varšavské univerzity UKSW).

V současné době je – v celoevropském měřítku – archeologickým aplikacím dat LLS věnována zvýšená pozornost v projektech jak krajinné, tak sídelní (regionální, lokální) archeologie. Podle informací, které jsme průběžně získávali jak z literatury, tak především na workshopech a konferencích a z ústních sdělení, jej zřejmé, že úplné (celostátní) pokrytí má v rámci EU zatím jen několik zemí (např. Belgie – srov. *Gojda 2005*, 809; Holandsko – *Humme et al. 2006*; Slovinsko, Dánsko a Rakousko). Velké evropské státy jsou většinou pokryty z větší či menší části, např. v Německu se jedná o Bavorsko a Bádensko-Würtembersko (lidarová data právě odtud jsou nyní systematicky zpracovávána a vytěžována příslušným památkovým úřadem pro potřeby evidence a ochrany archeologických památek, srov. *Bofinger – Hesse 2011*, 161–162). Zajímavým příkladem mezioborové a mezinárodní spolupráce je např. právě probíhající projekt mapování bavorských úseků Zlaté stezky, při němž jsou data LLS úspěšně využívána (srov. *Kubů – Zavřel 2011*, 123–124; *Kersch 2012*). V sousedním Bavorsku se využití LLS v archeologii poprvé uplatňuje zhruba před deseti lety (viz *Kersch 2003*), postupem času se pak začaly objevovat i rozsáhlejší památkově orientované pro-

jekty, např. v letech 2006 – 2008 byl LLS podroben celý průběh římského limitu na území Bavorska. Dalším krokem je potom již zmíněná aplikace LLS na rozsáhlé územní celky, nejvýraznějším příkladem je v současnosti probíhající projekt, jehož cílem je kompletní archeologické mapování Bádenska-Württemberska pomocí LLS. Jedná se o území o rozloze 35 751 km², což představuje přibližně 1 terabyte dat LLS (*Bofinger – Hesse 2011a*).

4. Hlavní fáze práce s daty LLS

4.1 Sběr dat

Prvním krokem projektu využívajícího LLS je zpravidla sběr (akvizice) dat, respektive volba takových dat, která jsou adekvátní otázkám řešeného projektu. Samotné skenování je nutně záležitostí specialistů mimo archeologii, archeolog by však měl mít k dispozici metadata, obsahující informaci o tom, jak jím používaná data vznikla, jak s nimi bylo manipulováno a zda mohlo dojít v rámci jejich zpracování ke ztrátě informací, což platí zejména u dat vzniklých pro jiné účely, než archeologické (cf. *Doneus-Briese 2011*).

Metadata LLS zpravidla obsahují informace o výšce, rychlosti a datu letu, dále typu a frekvenci skeneru, vzdálenosti jednotlivých průletů, úhlu skenování, souřadnicovém a výškovém systému apod. Z hlediska odhadu vhodnosti pro potřeby archeologie jsou nejdůležitějšími metadaty:

1. *Hustota skenování.* Tento parametr se odvíjí od frekvence skeneru, výšky a rychlosti letu, a také velikosti překryvu jednotlivých letových pásů. Recentní studie potvrzují, že hustota skenování je klíčová z hlediska úspěšného zachycení antropogenních tvarů reliéfu pomocí LLS (*Bollandsås a kol. 2012*). Obecně řečeno: čím více naskenovaných bodů, tím lépe, přičemž za minimum vhodné pro účely detekce archeologických lokalit se považuje průměr alespoň 1 bod/m² (*Doneus – Briese 2011, 60*). Je však zároveň třeba vzít v potaz skutečnost, že se stoupající hustotou měření rychle roste počet letových hodin a tím i náklady na pořízení dat, přičemž navýšení ceny není vždy přímo úměrné navýšení informačního potenciálu dat. Volba hustoty skenování by se měla v první řadě odvíjet od velikosti objektů, které chceme prostřednictvím LLS sledovat.

Pro dosažení vyšší hustoty skenování jsou využívány skenery s vysokou frekvencí, umístění na pomalu létajících strojích (vrtulníky) a průlety v pásech s vysokým překryvem. Ku příkladu při detailním skenování významného komplexu Tara v Irsku bylo tímto způsobem dosaženo hustoty 60 bodů/m² (*Shaw – Corns 2011*). Pro celkovou představu uvedme, že při lidarovém mapování na úrovni velkých územních celků, např. krajů, se hustota bodů pohybuje obvykle mezi 1 a 20 body a letová hladina mezi 400 a 2 500 metry, při projektování např. komunikačních (silničních, železničních) koridorů se intervaly uvedených parametrů nacházejí mezi 20 a 100 body/m², resp. mezi 50 a 800 metry. U pozemního skenování dosahuje hustota až 4000 bodů/m² (*Young 2011, 11–13*).

2. *Datum skenování.* Je-li technologie LLS využívána pro dokumentaci reliéfních tvarů terénu, je vhodné, aby byly co nejméně zakryty vegetací, a to jak v lesích, tak na zemědělsky obdělávaných plochách. Nejlepších výsledků je zpravidla docíleno v jarních měsících po ústupu sněhové příkrývky, kdy vegetace ještě není plně rozvinutá. Dobrých výsledků je možné dosáhnout i na podzim, v tomto období ale může způsobovat problémy např. čerstvě spadané listí vyplňující terénní deprese (*Doneus – Briese 2011, 63*).

Ohledně získání dat existují v zásadě dvě hlavní možnosti:

1. *Skenování provedené na zakázku* specializovanou firmou (první domácí aparaturu schopnou dodávat data LLS zprovoznila v roce 2009 společnost Geodis, do té doby bylo nutno využívat služeb zahraničních dodavatelů; podrobněji k této možnosti viz kapitola 2).

2. *Nákup již hotových archivních dat*, pořízených např. v rámci jiných projektů či mapování jednotlivých států. V souvislosti s dostupností lidarových dat pro potřeby české archeologie uvádíme, že v nedávné době zahájila Česká republika tvorbu nového výškopisu státu pomocí LLS. Vzhledem k nedostatkům a v některých ohledech i k zastaralosti a malé přesnosti dosud využívaných datových modelů ZABAGED a tzv. digitálních modelů reliéfu dvouapůlté a třetí generace bylo koncem minulého desetiletí rozhodnuto vytvořit novou kvalitní geografickou datovou infrastrukturu, jednotnou a standardizovanou pro celé území ČR. Ta má sloužit potřebám armády, krizových štábů (modelování přírodních jevů), orgánů státní správy a územní samosprávy, a pro mezinárodní účely ve smyslu požadavků evropské směrnice INSPIRE. Dlouho očekávané celoplošné laserové skenování České republiky bylo roku 2010 zahájeno v rámci projektu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK), Ministerstva obrany ČR a Ministerstva zemědělství ČR (*Brázdil 2009*). V tomto roce bylo ve střední části našeho území naskenováno celkem 32 610 km² (cca 40 % území ČR) což představuje zhruba 42,7 miliardy zaměřených bodů. V projektu jsou pomocí skeneru RIEGL LMS 680 získávána data s hustotou přibližně 1 bod/m², z výšky 1200 a 1400 m (nižší letová hladina se používá v letních měsících) (*Šíma 2011*). Právě fakt, že z časových důvodů je někdy nutno provádět skenování i ve vegetačním období, může být problematický z hlediska vhodnosti některých dat pro účely archeologické prospekce zalesněných oblastí.

Jistou nevýhodou těchto dat je skutečnost, že nejsou optimalizována pro účely archeologie, na druhou stranu jejich velkou výhodou je snadná dostupnost dat pro území celé ČR, které má být dosaženo v blízké budoucnosti (do konce roku 2015). Česká republika se tak v blízké době zařadí k zemím, které disponují celkovým pokrytím daty LLS (např. Bádensko-Württembersko, Bavorsko, Dánsko, Holandsko, Slovinsko, Rakousko, Velká Británie – cf. *Štular 2011, 427; Kerscher 2012, 324*).

V archeologii budou zřejmě nejčastěji využívány dva hlavní

výstupy tohoto projektu, a to digitální modely reliéfu ČR 4. a 5. generace (DMR4G a DMR5G).

DMR4G je již nyní dostupný pro střední a západní část ČR, jedná se však o data, která jsou generalizována do rastru 5 x 5 m. Lze na nich tedy identifikovat jen rozsáhlejší památky (viz *Gojda – John – Starková 2011*, 684) a jejich častější využití lze očekávat např. v oblasti predikce, či zjišťování přírodních parametrů archeologických lokalit (nadmořská výška, svažitost terénu apod.).

DMR5G je zatím dostupný jen pro střední část našeho území. Díky překryvu jednotlivých pásů skenování dosahuje hustoty kolem 1,6 bodu/m² a výškové přesnosti 0,18 m v otevřeném terénu a 0,30 m v zalesněných oblastech. Detaily lze najít v Technické zprávě k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace, která je zveřejněna na internetových stránkách ČÚZK (*Brázdil 2012b*). Nevýhodou DMR5G může být jeho vyhlazování v průběhu zpracování, což by mohlo mít vliv na zachytitelnost některých nízkých tvarů reliéfu. Je také třeba počítat s tím, že v oblastech, kde nebyla žádná data naskenována (např. kvůli příliš husté vegetaci), budou body pro tvorbu DMR5G interpolovány na základě bodů z nejbližšího okolí. Na výsledném modelu reliéfu tak mohou vznikat zdánlivě prázdná místa, která ovšem ve skutečnosti obsahují archeologické památky ukryté pod husou vegetací. Přestože kvalita dat DMR5G bude nejspíše silně proměnlivá, a to v závislosti na stavu vegetace a období snímání lokalit, zdá se, že v řadě případů se o tato data budeme moci opřít, a to zejména při vyhledávání nových lokalit.

Významnou výhodou těchto dat je jejich cenová dostupnost, pořizovací náklady DMR5G se pohybují v řádu stokorun (podle počtu objednaných dat) na 1 mapový list SM5 (5 km²). Ukázky více či méně úspěšného praktického využití dat DMR5G lze najít v řadě kapitol této knihy. K zevrubnějšímu posouzení jejich vhodnosti pro různé archeologické aplikace však bude třeba vyčkat na vyhodnocení větších souborů těchto dat.

4.2 Klasifikace dat

Během tzv. klasifikace se naměřené body rozdělují do jednotlivých skupin (terén, vegetace, budovy, nadzemní elektrické vedení, výškové chyby atd.). V první fázi se jedná zpravidla o *automatickou klasifikaci* založenou na různých matematických algoritmech, po které následuje *klasifikace manuální*, napravující chyby a nedostatky té automatické (úspěšnost automatických filtrů pro získání DMR se pohybuje zpravidla do 90 %).

Klasifikace vyžaduje nasazení speciálních programů, které jsou schopny pracovat s daty LLS. Za určitý standard se považuje program **TerraScan**, vyvíjený finskou společností Terra Solid a fungující většinou jako nadstavba programu MicroStation. Úspěšně je využíván i program **SCOP++**, rozvíjený ve spolupráci Technické univerzity ve Vídni a společnosti INPHO. Tento software je mj. používán i v rámci Projektu tvorby nového výškopisu ČR, jeho nevýhodou jsou ovšem pořizovací náklady licence, které se pohybují ve statisících korun. Z dalších komerčních programových balíčků častěji využívaných pro klasifikaci je možné zmínit např. **ENVI**, anebo **MARS**.

Pro identifikaci archeologických památek v zalesněném terénu je klíčové především přesné rozlišení odrazů od vegetace a od terénu, přičemž problém představuje zejména nízká a hustá vegetace. Na úspěšnost klasifikace může mít přitom vliv i typ použitého skeneru. Existují v zásadě dva typy skenerů, *konvenční* a tzv. *full-wave* (ten zaznamenává nejenom jednotlivé odrazy paprsku, ale i jejich vlnové křivky). Na základě zachycených křivek je poté možno posoudit, od čeho se signál odrazil. Při použití *full-wave* skeneru je možno pomocí vhodných algoritmů rozlišit odrazy od pevného povrchu a odrazy od nízké vegetace, hromad větví apod. Průkopnickou studií v tomto směru bylo vyhodnocení dat LLS z rakouské lokality Purbach, kde se podařilo pomocí *full-wave* dat rozlišit při klasifikaci mohylové násypy od tvarově velmi podobných hromad ořezaných větví (*Doneus a kol. 2008*). Naopak u konvenčních skenerů může docházet k problémům s odstraněním odrazů od nízké přízemní vegetace.

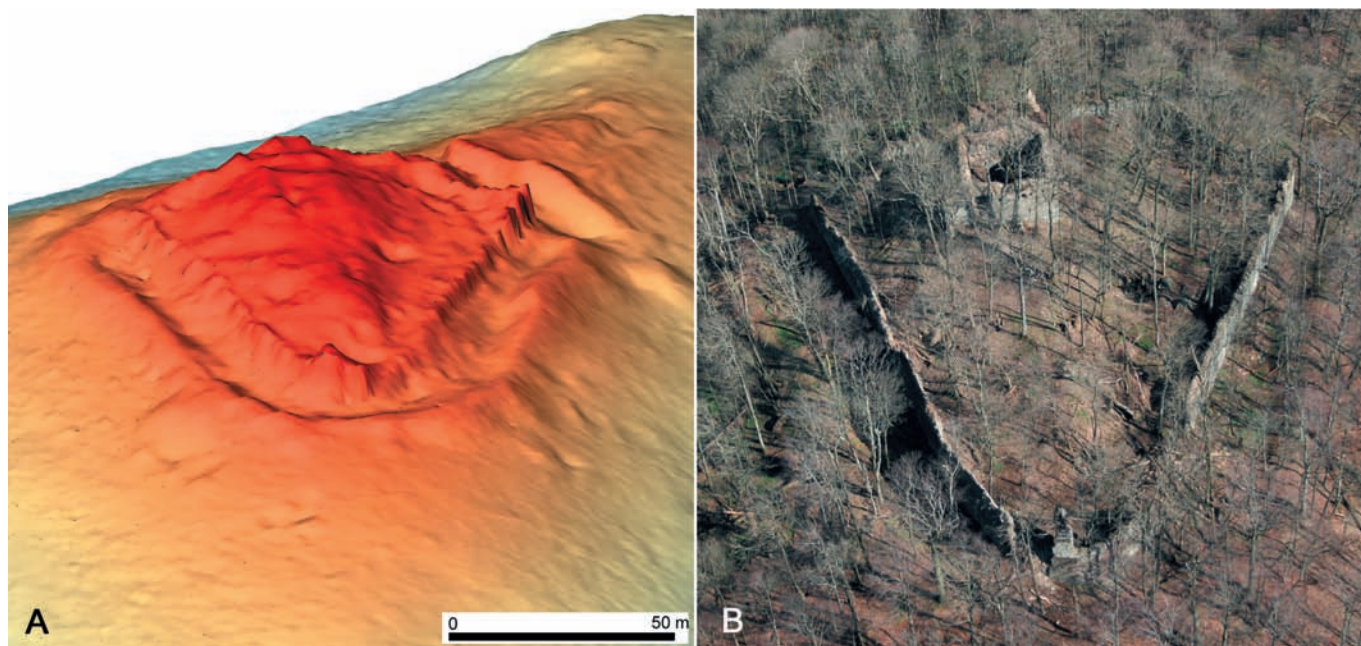
Vztah typu vegetace a úspěšnosti dokumentace terénu pomocí LLS byl detailně studován na příkladu dat z pravěkého ohrazení Welshbury Hill v Anglii. Skenování lokality v únoru 2004 ukázalo, že ve vybrané oblasti s řídkým listnatým lesem a omezenou přízemní vegetací pouze 5,3 % posledních laserových odrazů nepochází z povrchu terénu, ale právě od přízemní vegetace, přičemž vzrostlým listnatým stromovým patrem pronikly všechny impulzy. V další oblasti zastavila přízemní vegetace (zejména ostružiní) 11,3 % impulzů a pouze jeden byl zachycen vzrostlými stromy. Naopak v oblasti se smrkovým porostem k povrchu neproniklo cca 50 % impulzů (*Crow a kol. 2007*).

Problematické z hlediska klasifikace jsou památky obsahující jak terénní reliкty, tak zbytky architektury (typickým příkladem jsou ruiny středověkých hradů). Jelikož automatické klasifikační algoritmy odstraňují z terénu budovy, zanikají ve výsledku i pro archeologii podstatné informace (např. zbytky zdí – viz obr. 2), nehledě k tomu, že svislé plochy zdí jsou leteckým skenováním obtížně dokumentovatelné. V takovýchto situacích bude nutno ve zvýšené míře využívat manuální klasifikaci, doplňková pozemní měření a vytvářet digitální modely speciálně pro potřeby archeologie či památkové péče.

Klasifikovaná data jsou zpravidla distribuována ve formátu LAS (.las), což je binární formát, zachovávající informace specifické pro lidarová data (číslo odrazu, jeho souřadnice a intenzita atd.). Výhodou tohoto formátu jeho datová úspornost, nevýhodou je zatím omezený počet programů, které s tímto formátem dat dokáží pracovat. Jednotlivé kategorie klasifikovaných dat mohou být uloženy rovněž ve formátu ASCII (.asc, .txt, .xyz apod.). Tento formát přečte většina běžných programů, nevýhodou je ale velký objem dat, způsobující pomalé zpracování. V praxi se lze setkat rovněž s výměnným CADovým formátem .dxf.

4.3 Interpolace a vizualizace digitálního modelu

Zatímco u předchozích fází (sběr a klasifikace dat) je v zájmu kvality výstupů většinou nezbytná spolupráce archeologa a specialisty na LLS, fázi interpolace již může archeolog běžně



Obr. 2 – Němčice (okr. Domažlice), hrad Nový Herštejn. A – 3D vizualizace DMR, pohled od SZ (skenováno 25. 3. 2010), B – letecká fotografie téže lokality (7. 4. 2010). V případě DMR evidentně nejsou dokumentovány zděné konstrukce hradu. Některé jejich části však zachyceny byly a ovlivňují vzhled DMR.

Fig. 2 – Němčice (Domažlice region), Nový Herštejn castle. A – 3D visualisation of the DRM, a view from the NW (scanned on the 25th March 2010), B – aerial photo of the site (7th April 2010). The DTM evidently does not capture the masonry of the castle. However, some parts of it were detected and they had impact on the final DTM.

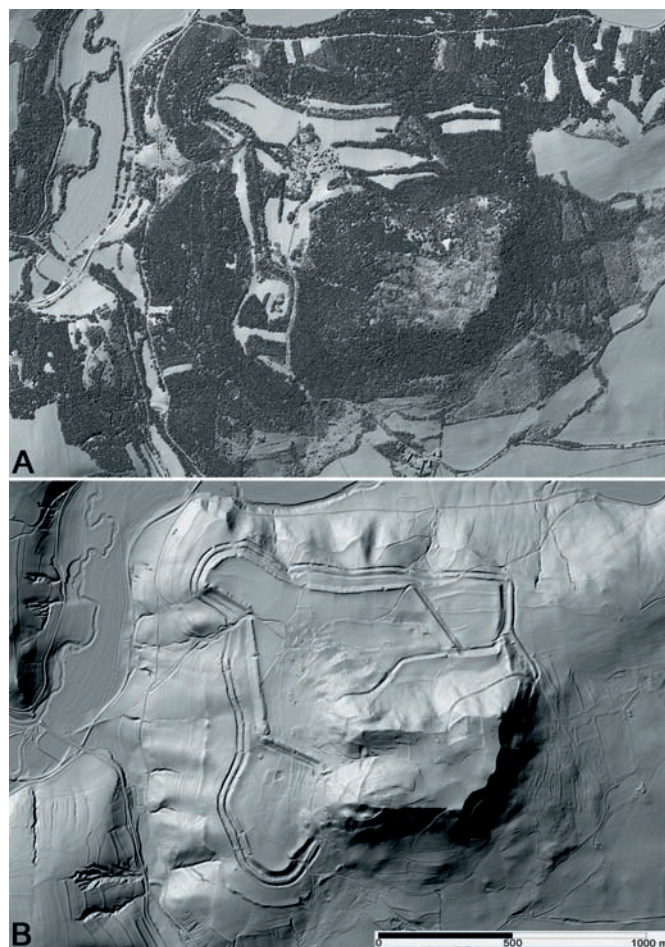
zvládat samostatně. Na základě úspěšné klasifikace vznikají dva základní digitální modely:

1. DMP (digitální model povrchu). V angličtině se používá ekvivalent DSM (Digital Surface Model), v němčině DGM (Digitales Geländemodell). Tento model odpovídá povrchu krajiny včetně vegetace, zástavby atd. (obr. 3A).

2. DMR (digitální model reliéfu). Lze se též setkat se zkratkou DMT (digitální model terénu). V angličtině je zaveden ekvivalent DTM (Digital Terrain Model), v němčině DOM (Digitales Oberflächemodell). Tento model obsahuje informace o „holém“ povrchu terénu (obr. 3B). Takovýto model terénu odvozený z dat LLS je podstatně přesnější a detailnější než běžně dostupné mapy, je ale nutno mít na zřeteli, že nemusí být a zpravidla ani není zcela přesnou kopií skutečného terénu, v důsledku nepřesností při skenování a klasifikaci.

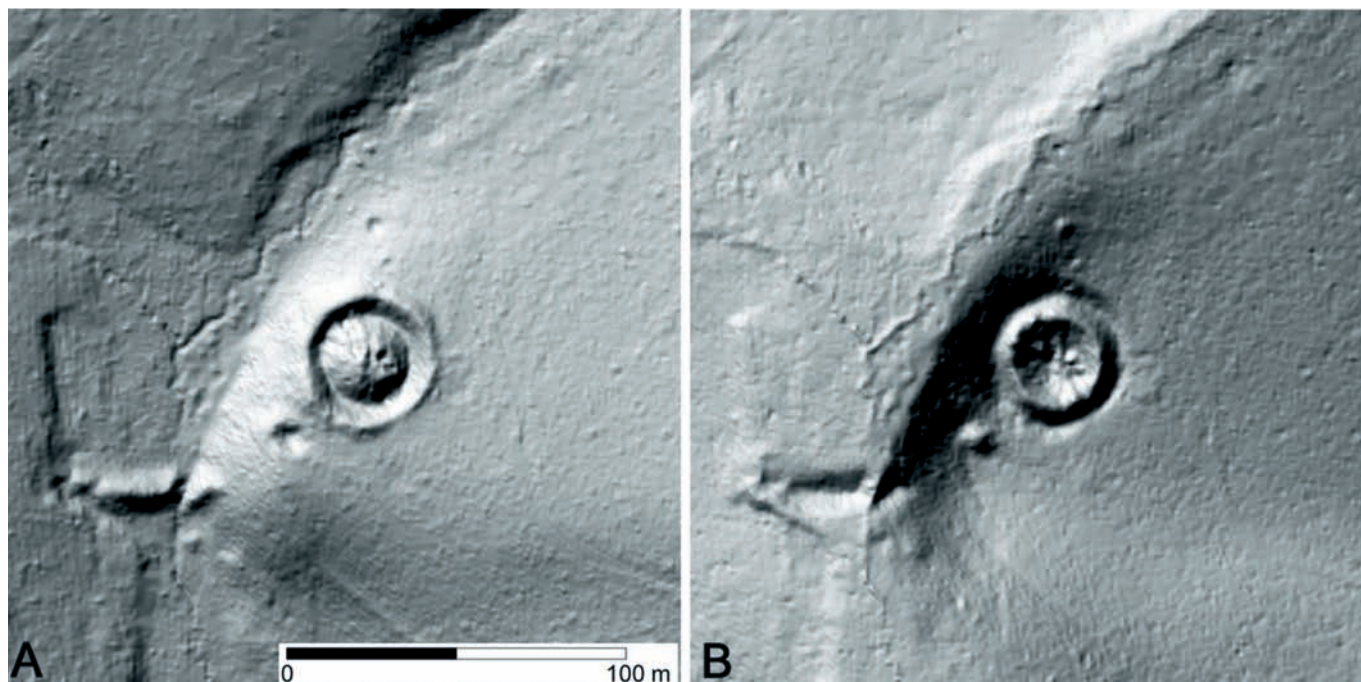
K interpolaci bodových dat do podoby spojitého modelu lze použít řadu výpočetních metod (cf. *John 2008*). Uspokojivých výsledků je dosahováno pomocí metody *nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN)*, metody *přirozeného souseda (natural neighbor)*, případně také *krigování (kriging)*. Při zpracování dat našeho grantového projektu (viz též kapitola 2) byla využívána především metoda nepravidelné triangulace (TIN) s lineární interpolací, která poskytuje přijatelné výsledky, a zároveň je dostatečně rychlá s výpočetně úsporná, takže umožnila zpracování jednotlivých polygonů (desítky milionů naměřených souřadnic) na běžných stolních počítačích.

Interpolační metody zvládají běžné programy typu GIS, s úspěchem lze použít např. rozšířený ArcGIS (cf. *Davis 2012*). Dobré výsledky poskytují specializované interpolační progra-



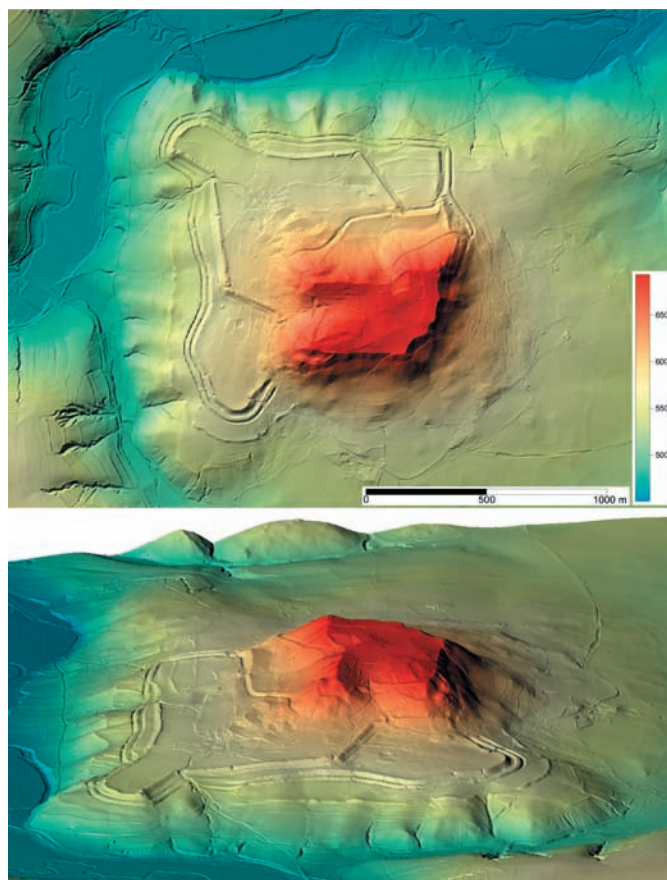
Obr. 3 – Vladav u Záhořic (okr. Karlovy Vary), pravěké hradiště skenováno 25. 3. 2010. A – stínovaný digitální model povrchu (DMP), B – stínovaný digitální model reliéfu (DMR).

Fig. 3 – Vladav u Záhořic (Karlovy Vary region), prehistoric hillfort scanned on the 25th March 2010. A – shaded digital surface model (DSM), B – shaded digital terrain model (DTM).



Obr. 4 – Kornatice (okr. Rokycany), tvrzíště Javor, skenováno 25. 3. 2010. A – DMR stínovaný světlem dopadajícím od SZ, B – DMR stínovaný světlem dopadajícím od JV (v tomto případě vzniká klamný dojem inverzního terénu).

Fig. 4 – Kornatice (Rokycany region), medieval stronghold Javor, scanned on the 25th March 2010. A – shaded DTM, light from the NW, B – shaded DTM, light from the SE (which creates a false impression of inverse terrain).



Obr. 5 – Vladař u Záhořic (okr. Karlovy Vary). Stínovaný DMR doplněný o barevnou škálu nadmořské výšky (nahore), tentýž model v perspektivním 3D zobrazení (dole).

Fig. 5 – Vladař u Záhořic (Karlovy Vary region). Shaded DTM with a colour-coded scale of height above sea level (top) and the same model in a 3D perspective (bottom).

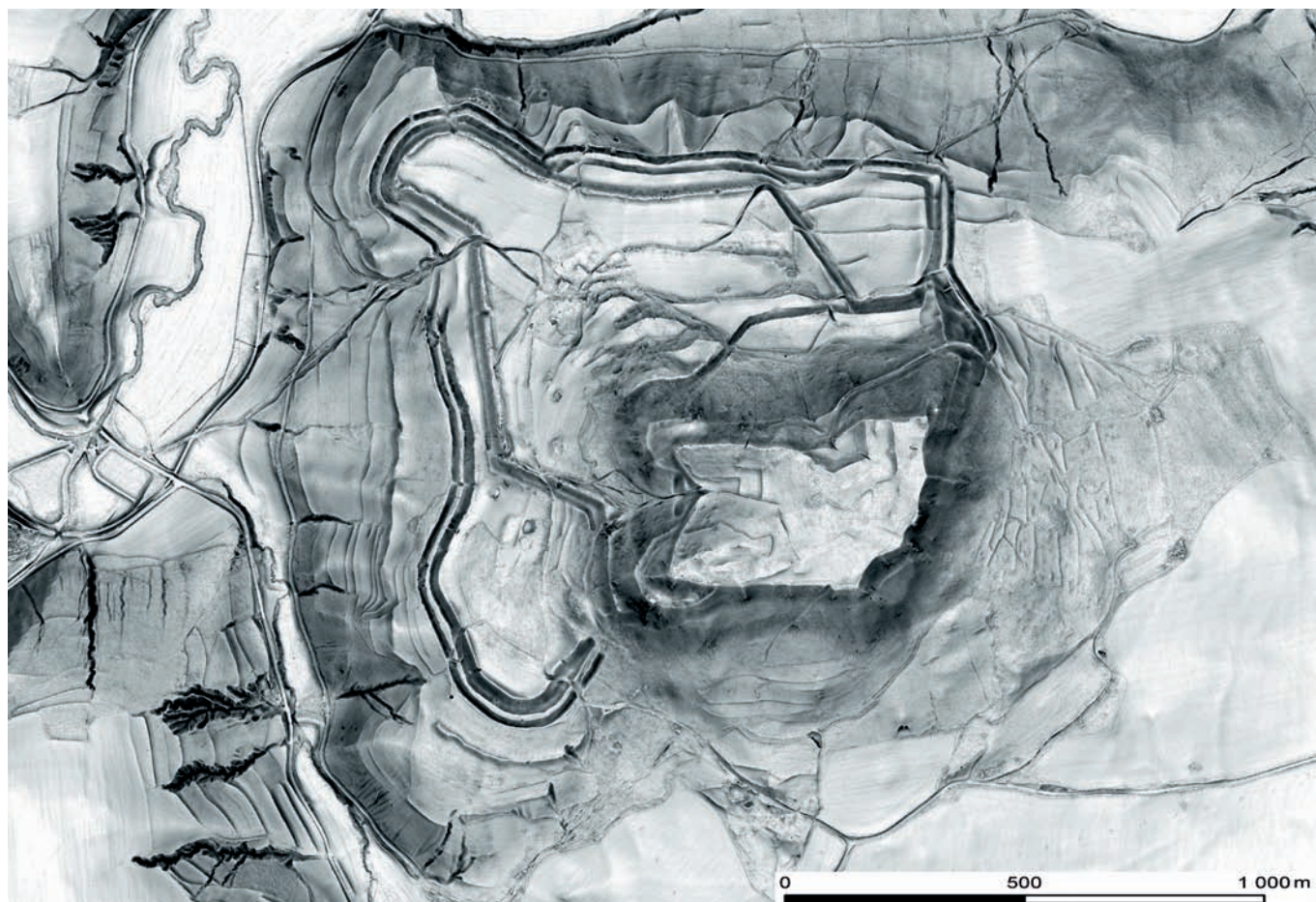
my, z nichž možno jmenovat Surfer (dokáže zpracovat až bilión naměřených bodů, což je ovšem v praxi většinou limitováno operační pamětí počítače), dále v ČR vyvíjený Atlas, a přirozeně též programy zaměřené přímo na práci s daty LLS, z nichž některé již byly zmíněny výše. V případě nedostupnosti komerčních produktů je možno zvolit i tzv. *open source* programy z rodiny GIS (např. GRASS, SAGA apod.)

Prostorové rozlišení (velikost pixelu) vypočtených modelů vychází z hustoty naměřených bodů. Běžně se používá prostorové rozlišení 1 m, které postačuje většině běžných typů terénních reliktnů. Pokud jsou ale k dispozici data s vysokou hustotou skenování (několik až desítky bodů na m², zpravidla bývá užitečné vypočíst model terénu s vyšším rozlišením (desítky cm). Zde je ale přirozeně nutno počítat s vyššími nároky na samotný výpočet (jeho čas, datový objem) a s tím spojený hardware.

Pro výsledné vyhodnocení dat LLS je důležitý rovněž *způsob vizualizace*, tedy *zobrazení vypočteného modelu*. Porovnávání výhod a nevýhod různých způsobů vizualizace je v poslední době věnována značná pozornost (viz např. *Challis – Forlin – Kincey 2011; Štular a kol. 2012*).

Na tomto místě pro stručnost uvádíme čtyři vizualizační metody, jejichž použití je nejčastější:

1. Stínování (hillshade). Ke zviditelnění antropogenních tvarů reliéfu se využívá simulované světlo, dopadající na model terénu, standardně pod azimutem 315° a úhlem 45°, čímž jsou vytvářeny virtuální stínové příznaky známé z letecké archeologie (např. obr. 3, 4 a 7A). Výhodou stínování je snadný a rychlý výpočet, a také implementace této metody prakticky ve všech programech



Obr. 6 – Vladař u Záhořic (okr. Karlovy Vary). DMR zobrazený pomocí faktoru výhledu (sky view factor).
Fig. 6 – Vladař u Záhořic (Karlovy Vary region). DTM – using sky view factor.

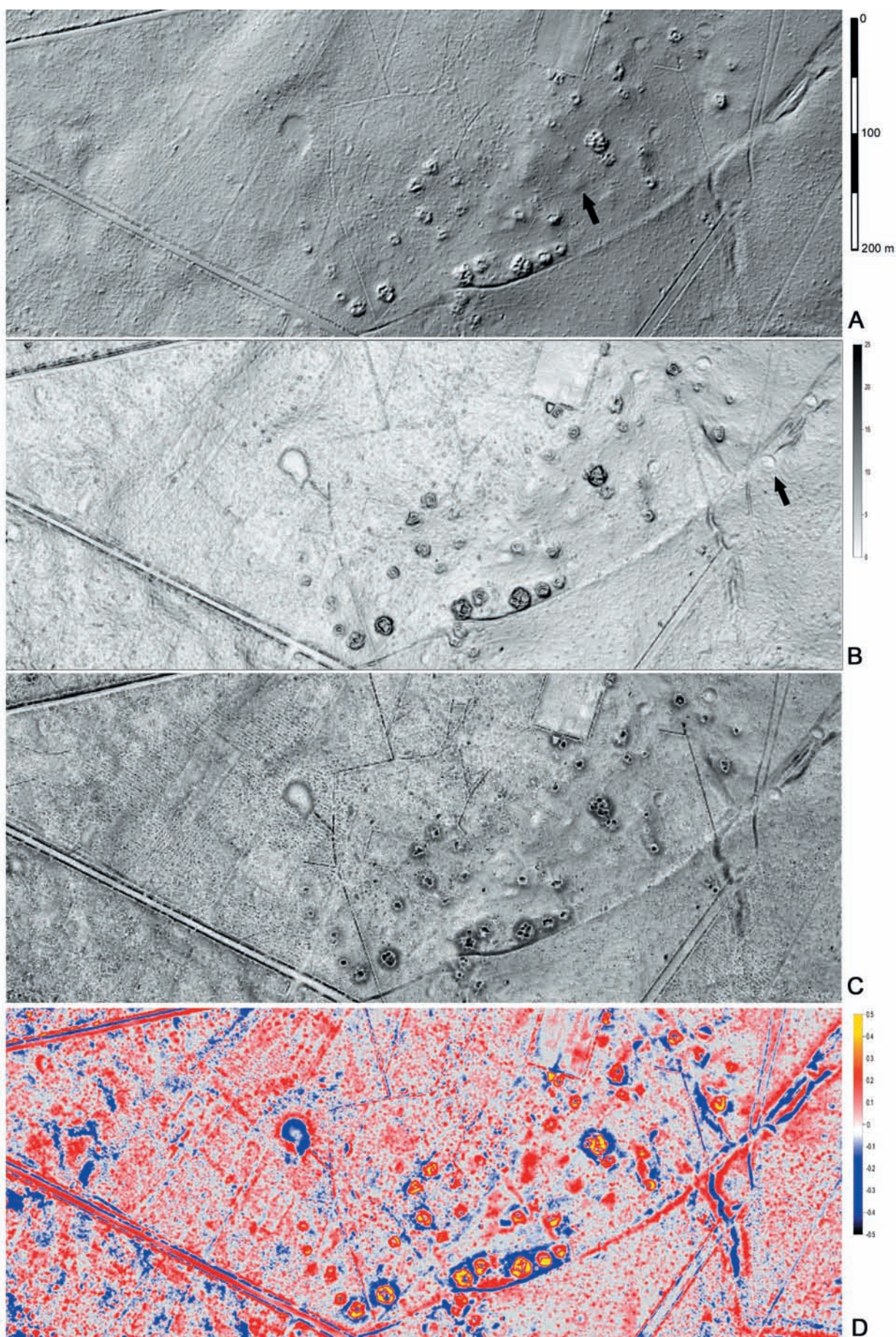
typu GIS. Rovněž výsledek je poměrně snadno interpretovatelný, neboť hra světla a stínů je pro naše vnímání reliéfu přirozená. Nevýhodou je, že v členitém terénu mohou vznikat zcela zastíněné (černé), anebo naopak přesvětlené oblasti. Další nevýhodou je nevýraznost lineárních objektů, pokud jsou rovnoběžné se směrem dopadajícího světla. Tuto nevýhodou lze eliminovat změnou směru nasvícení, tím mohou ale vzniknout nežádoucí optické efekty ve formě inverze terénu (viz obr. 4). Další možnost představuje výpočet několika stínovaných modelů a jejich kombinace pomocí analýzy hlavních komponent (Devereux – Amable – Crow 2008), což je ale výpočetně zdoluhavé a výsledný efekt je malý (cf. Challis – Forlin – Kinsey 2011, 287), přičemž problém optických klamů zůstává (cf. Hesse 2010, 68). Pro snazší interpretaci výškových poměrů může být vhodné stínovaný model doplnit barevnou výškovou škálou, případně ho zobrazit perspektivně (obr. 5).

2. Svažitost terénu (slope). Jednotlivé objekty jsou v tomto případě zobrazeny pomocí škály, reflektující svažitost terénu ve stupních (obr. 7B). Podobné výsledky jako výpočet svažitosti přitom poskytují i některé filtry, např. filtr Sobelův. I tato metoda je běžně dostupná v GIS programech. V literatuře jsou uváděny pozitivní zkušenosti s kombinací stínování a svažitosti (Doneus-Briese 2011, 66), lepšího vnímání reliéfu terénu může být dosaženo inverzí barevné škály, kdy svažitě plochy získávají tmavé odstíny (Štular a kol. 2012, 3356).

3. Faktor výhledu (sky view factor). Tato metoda během výpočtu přiřazuje jednotlivým pixelům digitálního modelu takové hodnoty, které odpovídají ploše virtuální oblohy nad horizontem, viditelné z každého pixelu (Kokalj – Zakšek – Oštir 2011). Místa s omezeným výhledem (konkávní objekty) získávají tmavé odstíny šedi, naopak konvexní vyvýšené plochy jsou světlé (obr. 6, 7C). Stejně jako svažitost, i tato metoda je tedy nezávislá na směru osvětlení. Poskytuje dobré výsledky i v členitém terénu a hodí se zejména pro detekci konkávních objektů, které je možno na první pohled odlišit od konvexních. Program pro jeho výpočet, vytvořený týmem slovinských badatelů, je volně dosažitelný jako nadstavba pro ENVI a rovněž jako samostatná aplikace (viz <http://iaps.zrc-sazu.si/en/svf#v>), což umožňuje běžné využití tohoto algoritmu.

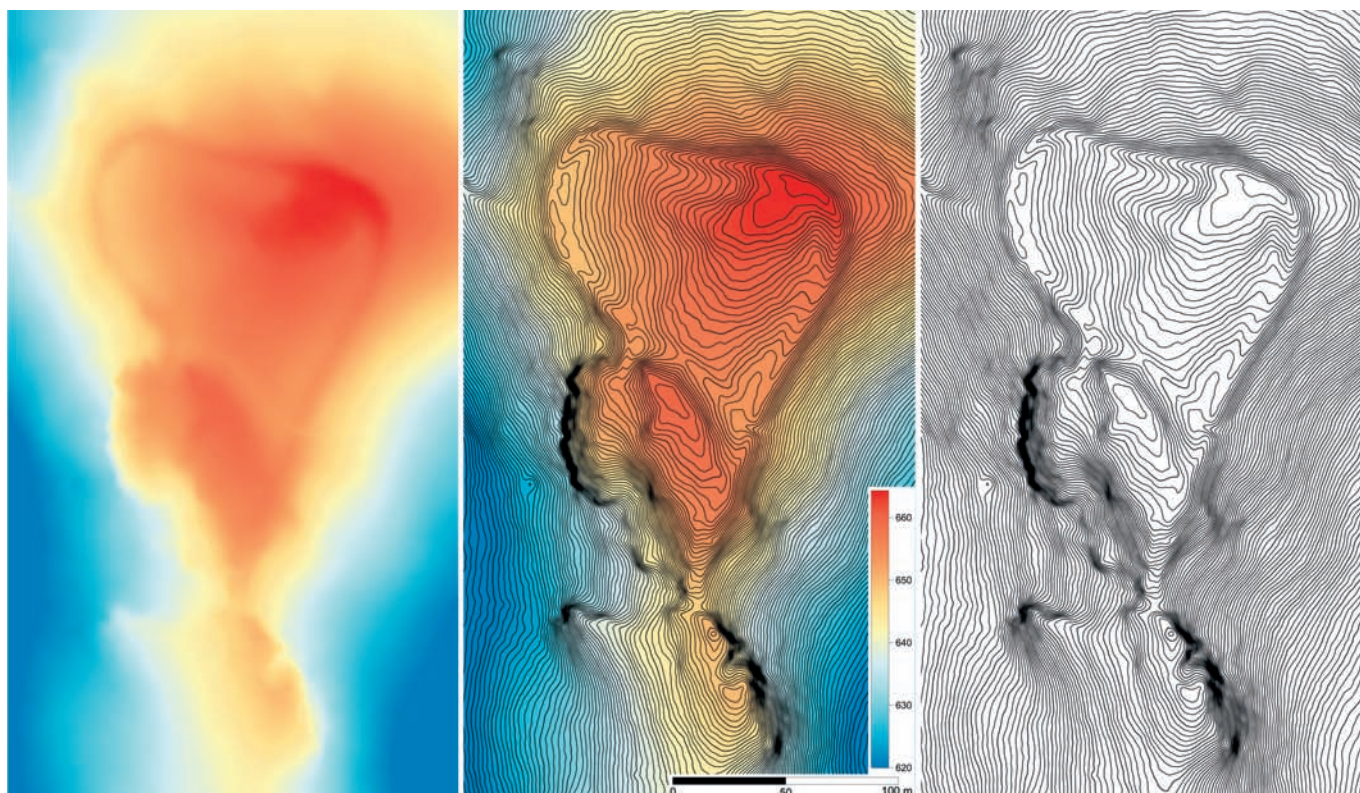
4. Lokální reliéf (local relief model). Jedná se o metodu, která z modelu terénu odstraňuje hlavní trendy, odpovídající přírodnímu reliéfu krajiny (Hesse 2010). Samotný postup spočívá ve výpočtu rozdílu mezi dvěma stejnými DMR, z nichž jeden je předem vyhlazen pomocí tzv. low-pass filtru. Tím jsou ve výsledku potlačeny výškové rozdíly odpovídající celkové morfologii terénu a naopak zvýrazněny lokální výškové rozdíly odpovídající zpravidla antropogenním reliktvům (obr. 7D).

Potlačení morfologie terénu také usnadňuje případný výpočet objemu terénních reliktvů (Bofinger – Hesse 2011b, 37).



Obr. 7 – Mohylové pohřebiště Milínov u Nezvětic – Hádky/Javor (okr. Plzeň-jih). Srovnání hlavních metod vizualizace DMR. A – stínování, B – svažitost, C – faktor výhledu, D – lokální reliéf.

Fig. 7 – Bronze Age burial mound cemetery Milínov u Nezvětic – Hádky/Javor (Pilsen-south region). A comparison of the main DTM visualisation methods. A – shading, B – slope, C – sky view factor, D – local relief.



Obr. 8 – Skočice (okr. Strakonice). DMR hradiště Hrad, zobrazený pomocí kombinace rastru obsahující informaci o nadmořské výšce terénu (vlevo) a vektorových vrstevnic s krokem 50 cm (vpravo). Vytvořeno z dat DMR5G.

Fig. 8 – Skočice (Strakonice region). DTM of hillfort Hrad, visualized using a combination of grid containing information on the altitude of the terrain (left) and vector contours with 50 cm step (right). Created from DMR5G data (5. generation of the Czech Republic altimetry data).

Výhodou je opět dobrá rozlišitelnost konvexních a konkávních tvarů, a to i ve svažitém terénu, nevýhodou složitější postup, který zatím zpravidla není jednoduše implementován v dostupných programech. Může také dojít k nežádoucímu vyhlazení povrchu zvolením nevhodného nastavení vyhlazovacího filtru. Další nevýhodou může být skutečnost, že výsledek musí být prezentován barevně, jinak je ho obtížné interpretovat.

Porovnání uvedených základních vizualizačních metod na příkladu mohylového pohřebiště Hádky/Javor (k. ú. Milínov), zkoumaného v 19. století F. X. Francem, je patrné z obr. 7. Použita byla metoda stínování (obr. 7A), svažitosti (obr. 7B), faktor výhledu (obr. 7C) a lokální reliéf (obr. 7D). Všechny použité metody poměrně dobře zobrazují výraznější reliéfní tvary, zejména mohylové násypy porušené výkopy a zaniklou středověkou cestu na jižním okraji pohřebiště. Na digitálních modelech jsou patrné i velmi nízké vyvýšeniny v centrální části pohřebiště, které by mohly představovat neprozkoumané mohyly, které díky své nepatrné výšce doposud unikaly pozornosti (jedna z nich označena šipkou na obr. 7A).

Naopak rozdílů si můžeme povšimnout, pokud se zaměříme na méně nápadná kruhová mířířště, která jsou roztroušena mezi mohylami, zejména ve východní části pohřebiště (jedno z nich označeno šipkou na obr. 7B). Jelikož tyto ploché tvary nemusí vždy vytvářet zřetelné stínové příznaky, jako vhodnější pro jejich vizualizace se ukazují metody svažitosti a faktoru výhledu (kupřím-

kladu bílou šipkou označený míř je na obr. 7A velmi málo zřetelný a lze ho snadno přehlédnout). Příliš se v tomto případě neosvědčila ani metoda lokálního reliéfu, snad v důsledku nastavení filtrace.

Výsledky využívající lokální reliéf a faktor výhledu dobře ukazují deprese (příkopy), lemující některé mohylové násypy. Tyto objekty pak nejsou příliš zřetelné u stínování a svažitosti.

Ve výsledku je zřejmé, že i když jsou výsledky jednotlivých vizualizačních metod podobné, některé typy objektů se mohou objevovat jen u některých z nich. Jako poměrně univerzální metoda, která zobrazuje prakticky vše podstatné, se v tomto případě jeví metoda faktoru výhledu (*sky view factor*).

Přestože jsou v současné době vyvíjeny a testovány různé vizualizační metody, v zásadě se ukazuje, že žádná z nich není zcela univerzální a jejich využití je třeba podřídit typu sledovaných objektů a krajině, v níž se nacházejí. Nově vyvíjené metody vizualizace však pravděpodobně nikdy zcela nenahradí základní metody stínování a svažitosti, jejichž kombinace poskytuje v mnoha případech dostatečně použitelné výsledky, při dobré dosažitelnosti uvedených metod. Platí to zejména pro programy, v nichž je metoda stínování (v kombinaci s umělým převýšením terénu) dobře propracována a její parametry je možno měnit v reálném čase (např. Surfer).

Jinou, velice jednoduchou vizualizační metodou, je kombinace rastru obsahující informaci o nadmořské výšce terénu a vektorových vrstevnic (obr. 8). Výsledek tak zahrnuje jak informace o výškových poměrech terénu, tak jeho morfologii

zvýrazněnou směrově nezávislým „stínováním“ pomocí vhodně zvolených vrstevnic.

4.4 Interpretace

Poslední fází představuje vyhledávání a interpretace objektů archeologického zájmu. Jedná se o čistě „manuální“ a poměrně zdoluhavou činnost. Pokusy o automatické vyhledávání objektů archeologické povahy jsou zatím poměrně vzácné (cf. *Doneus – Briese 2011, 67*), objevují se však nadějně pokusy, které by mohly zefektivnit tradiční metody zkoumání dat LLS (*Trier – Pilø 2012*).

Pro potřeby interpretaci je velmi vhodné, aby měl archeolog k dispozici přímo data LLS a nikoliv pouze např. obrázky z nich vytvořené. Jen tak mohou být data maximálně informačně vytěžena za pomoci vhodných vizualizačních technik.

Významným problémem je skutečnost, že data LLS zpravidla poskytují tak velké množství informací, že je velice obtížné všechny ověřovat přímo v terénu. Např. v rámci vyhodnocení LLS zalesněné oblasti jižně od Vídně (Leithagebirge v Dolním Rakousku – cca 190 km²), bylo identifikováno více než 10 000 „podezřelých“ objektů, jejichž počet byl pozemním průzkumem omezen na zhruba 400 (*Doneus-Briese 2011, 68*).

Relativně dobře lze interpretovat některé tvarově typické objekty, mezi něž lze počítat např. svazky úvozových cest, anebo pozůstatky milířů. Obtížněji se interpretují zejména bodové konkávní a konvexní objekty. U konkávních se může jednat o těžební jámy, pinky, krátery po explozích, vodní nádrže atd. Rovněž u konkávních objektů existuje celá řada možností (mohylové násypy, skalní výchozy, snosy kamení, zbytky vegetace neod-

straněné klasifikací, či pozůstatky těžby dřevy – hromady ořezaných větví). Právě takovéto pozůstatky lesních prací představují poměrně častý typ pseudo-objektů, zachycených během leteckého skenování – jeden z konkrétních případů ukazuje obr. 9.

Rovněž je třeba vzít v úvahu, že někdy mohou v důsledku nepřesností při skenování vznikat v datech rovnoběžné lineární nerovnosti (tzv. *striping*), které mohou v některých případech připomínat zbytky plužin.

Ověřování výsledků LLS přímo v terénu je v každém případě sice časově náročnou, ale nedílnou součástí jeho interpretace a lze očekávat, že v budoucnosti bude třeba věnovat ověřování a interpretaci celorepublikových dat LLS velké úsilí.

5. Význam LLS pro archeologii

Přínos LLS lze očekávat zejména v následujících oblastech:

Prostorová identifikace památek a dokumentace jejich současného stavu

Metoda LLS nepochybně přináší velkou polohovou přesnost. Např. při mapování okolí Stonehenge došlo k upřesnění polohy řady terénních reliktů, které byly dříve mapovány v rámci National Mapping Programme (NMP) zejména na základě leteckého snímkování s polohovou přesností 5 – 15 m. Pomocí LLS zde bylo dosaženo přesnosti kolem 0,15 m (*Bewley – Crutchley – Shell 2005, 640*). Podobně u nás může LLS napomoci s upřesněním polohy řady památek, které jsou mnohdy v našich archeologických či památkových informačních systémech lokalizovány chybně či nepřesně.



Obr. 9 – Podzámčí (okr. Domažlice), hrad Příkopy. A – stínovaný DMR lokality (skenováno 25. 3. 2010), B – letecká fotografie téže lokality (7. 4. 2010), pohled od SV. Šipka ukazuje zachycený lineární pseudo-objekt, který tvoří halda větví ořezaných při těžbě dřeva.

Fig. 9 – Podzámčí (Domažlice region), Příkopy castle. A – shaded DTM of the site (scanned on the 25th March 2010), B – aerial photo of the site (7th April 2010), view from the NE. The arrow points to a linear pseudo-feature, which represents a heap of branches from wood exploitation.

Zároveň můžeme očekávat zpřesnění polohy či tvaru antropogenních reliktů, zachycených na starších plánech, zejména těch, které nevznikly pomocí geodetických metod.

Dostatečně přesné DMR také zachycují současný stav terénních reliktů, a je tak možno sledovat jejich narušení či provádět různá měření jejich vlastností (vzdálenosti, objemy, řezy apod.)

Identifikace nových památek

Badatelé přicházející do styku s dostatečně podrobnými daty LLS ze zalesněných území, jsou zpravidla překvapeni množstvím terénních reliktů, které jsou v krajině obsaženy. S jistotou můžeme očekávat řadu nově objevených památek prostřednictvím LLS, byť v některých oblastech to mohou být převážně památky novověkého stáří (cf. Štular 2011, 426–427).

Kupříkladu předběžné výsledky interpretace celoplošného skenování Dánska v letech 2007–2008 naznačují nárůst počtu známých archeologických lokalit o 10 – 30 % (Niels-Christian Clemmensen – osobní sdělení). V rámci archeologického mapování Bádenska-Württemberska bylo zatím pomocí LLS v prvních fázích projektu zachyceno celkem 60 449 antropogenních reliktů různého stáří na ploše 3 300 km², přičemž známých archeologických lokalit je ve sledovaných oblastech jen 5 692 (Bofinger – Hesse 2011a, 166). V roce 2011 se již jednalo o 135 000 potenciálních objektů na ploše 10 500 km² (Hesse 2011).

K novým objevům může dojít i v zalesněných oblastech, které byly již v minulosti podrobeny detailním povrchovému průzkumu, jak ukazují nedávné výsledky prospekce mohylových pohřebišť v oblasti Hemerského polesí na Bechyňsku (John 2011b).

Metoda LLS může také přinášet informace o nových komponentách již známých památek, a to především těch, které jsou při klasické pozemní prospekci jen velmi obtížně viditelné (na lokalitě Purbach v Rakousku byl pomocí LLS zachycen dvojnásobný počet mohyl, než při pozemním průzkumu – Do-neus a kol. 2008, 890). Jiným typickým příkladem jsou pluziny

zaniklých středověkých vesnic. Z osobní zkušenosti můžeme říci, že některé reliкты viditelné na datech LLS (např. právě zbytky pluzin), jsou přímo v terénu prakticky nepozorovatelné.

Vyloučit nemůžeme ani zachycení objektů, které u nás zatím nejsou předpokládány. Do této kategorie můžeme řadit např. meze pravěkých polí (tzv. *celtic fields*). Jedná se zpravidla o čtvercové objekty o straně kolem 40 m, známé především se severní Evropy (Dánsko, Nizozemí, Velká Británie, severní Německo – cf. Arnold 2011). Tyto památky jsou většinou obtížně datovatelné, pokud ale jsou někde v naší krajině dochovány, budou pravděpodobně objeveny pomocí LLS. Pro srovnání ve středním Holandsku se podařilo pomocí LLS objevit více než 1 000 ha dosud neregistrovaných pravěkých polních systémů (Kooistra – Maas 2008, 2326).

Zdroj dat pro GIS

Značným limitem dosavadních analýz krajiny a památek v ní obsažených jsou nedostatečně podrobné digitální modely terénu. Data LLS se tak jistě uplatní v takových oblastech jako je predikce archeologických lokalit, jejich vazba na morfologii terénu, analýzy dohlednosti, dostřelu, dostupnosti, a mnoho dalších. Na rozdíl např. od sousedního Německa, kde jsou data LLS již delší dobu běžně využívána pro potřeby archeologie a památkové péče, u nás se nyní nacházíme na počátku využití tohoto významného zdroje informací. Již nyní je ale zřejmé, že dostáváme do rukou neobyčejně silný nástroj, umožňující efektivně identifikovat a dokumentovat nemovitě archeologické památky v krajině. Spolu se stoupající dostupností dat se LLS nejspíše stane standardní součástí řady archeologických projektů a dojde k dalšímu rozvoji metod jejich zpracování a interpretace.

Jakmile odezní fáze prvotní fascinace vizuální stránkou dat LLS a překonávání technických potíží, spojených s jejich zpracováním, objeví se nepochybně řada archeologických otázek, při jejichž řešení mohou být lidarová data platným pomocníkem.

Jan John – Martin Gojda

1

Ex caelo lux

Principles of airborne laser scanning and its use for archaeological remote survey

The introductory chapter of this book brings some basic information about the principles, methods and applications of data derived from airborne laser scanning (ALS) in archaeology. Attention is paid particularly to the history of the application of ALS in the European context. This study can also serve as a basic textbook for those interested in the applications of ALS in archaeology, but who have had no practical experience with it so far.

We briefly comment on the individual phases of work with ALS data from their acquisition, interpolation and visualisation to the interpretation. Apart from the data from the individual narrowly focused projects, we shortly introduce the new elevation model of the Czech Republic (5th generation digital model of the Czech Republic), as in the future it will become an important source of LIDAR data. The possibilities of its use are also dealt with in a number of chapters throughout this book.

On the example of the barrow site of Hádky/Javor (Pilsen-south region), dated to the Bronze Age, we compare the four most common methods of visualisation of digital relief models. We used the shade, slope, sky-view factor and local relief methods. From the results it is apparent that although the results of individual visualisation methods are similar, some types of features may be visible only on some of them. A comparatively universal method, which depicts all the important features, appears to be the method of sky view factor. Although at present various visualisation approaches are being created and tested, none of them appears to be fully universal and their application needs to be suited to type of studied features and the landscape where they are located.

One of the main contributions of the ALS is of course the precise spatial identification of the archaeological heritage and the

documentation of its current state. ALS can aid with the specification of the location of a range of remains, which are often recorded inaccurately in the archaeological and heritage management records. At the same time we can expect more accurate data about the extent and shape of the sites depicted in older sources, especially those that did not include geodetic survey.

Another important contribution is undoubtedly the identification of a range of unknown remains in forested landscapes. There can be significant amount of these discoveries as the experience from other countries shows, although in some regions these remains are predominantly of modern date. ALS can also bring information about new features on previously recorded sites, particularly those that are difficult to recognise during surface survey (e.g. field systems of deserted medieval villages). From personal experience we can say that some features visible on the ALS data (e.g. the ridge and furrow remains) are virtually undetectable on the terrain surface.

The ALS data will undoubtedly widen the possibilities of GIS use in landscape archaeology thanks to the availability of precise digital terrain models. These can be applied for the prediction of archaeological sites, analysis of their ties to the terrain morphology, visibility analysis, shot range analysis, site catchment analysis and others.

Today, we stand at the beginning of ALS data application in archaeology, but it is already apparent that what we have is a very powerful tool for the identification and documentation of immovable archaeological features in the landscape. In the near future, ALS will probably become a very popular source of information and the methods of its application and interpretation will be further elaborated.

2

Projekt Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3D snímkování, jeho cíle a dosažené výsledky

1. Úvod

V naší zemi byla širší veřejnosti metoda LLS a možnosti jejího uplatnění v oblasti archeologického výzkumu poprvé představena prostřednictvím mezinárodní výstavy „Lety do minulosti“, která se konala v říjnu 2007 – lednu 2008 v Národním muzeu v Praze jako součást projektu Evropské unie *European Landscapes: Past, Present and Future* (Gojda 2007 a 2008b). Na ní byly zveřejněny základní informace o využitelnosti této metody dálkového průzkumu v archeologické praxi a vystaveny velkoplošné barevné snímky, zapůjčené z tehdy probíhajícího projektu vídeňské univerzity. Ty dokumentovaly digitální model povrchu pravěké a středověké krajiny na území Dolního Rakouska a proces transformace tohoto modelu do podoby digitálního modelu reliéfu (odstranění bodů, kterými tzv. první laserové impulsy zasáhly vegetaci a nikoli vlastní povrch země). Kratší verze této výstavy je v současnosti, resp. od října 2012 do ledna 2013, instalována v Kongresovém centru České národní banky v Praze, přičemž metoda LLS je tam již prezentována obrazovými výstupy z projektu ZČU, o němž podává zprávu tato kapitola. Odborná veřejnost u nás měla možnost získat základní informace o LLS v dosavadní praxi evropské archeologie ještě dříve, v polovině minulého desetiletí, kdy se na stránkách periodika *Archeologické rozhledy* objevila informativní studie (Gojda 2005).

Kolem poloviny minulého desetiletí se na území České republiky uskutečnily první kampaně cíleného skenování vybraných regionů pro potřeby vědecko-výzkumných projektů. Například v roce 2005 provedla Technická univerzita (TU) v Drážďanech laserové snímkování poměrně rozsáhlého území Krušných hor a tzv. Česko-saského Švýcarska (po obou stranách státní hranice). V letech 2008–2009 se začal připravovat bilaterální projekt Archeologického ústavu AV ČR a muzea v Drážďanech, který měl zhodnotit data z výše uvedeného lidarového průzkumu TU a pořídit omezené množství nových dat prostřednictvím podrobného skenování několika vybraných areálů. Projekt měl být financován z některého z programů Evropské unie zaměřených na rozvoj příhraničních regionů. I když stupeň rozpracovanosti projektu byl již poměrně značný, nakonec se jej nepodařilo dotáhnout do konce a nedošlo ani k odezdání žádosti o jeho přidělení na příslušnou grantovou agenturu. Přesto data z roku 2005 byla nakonec využita katedrou archeologie ZČU v Plzni; jejich zhodnocení provedla L. Starková a je publikováno v tomto svazku (cf. též Starková 2010 a 2011).

Podle našich znalostí vůbec první využití možnosti získat letecká lidarová data a cíleně je použít v archeologickém výzkumu představuje u nás projekt univerzity v Hradci Králové a Muzea Českého ráje v Turnově vedený P. Šidou. Jeho cílem bylo dokumentovat terénní reliéf neolitického těžebního areálu Jistebsko v Jizerských horách, kde skenování proběhlo na zakázku uvedených pracovišť v listopadu 2009 (podrobně viz dále v tomto svazku).

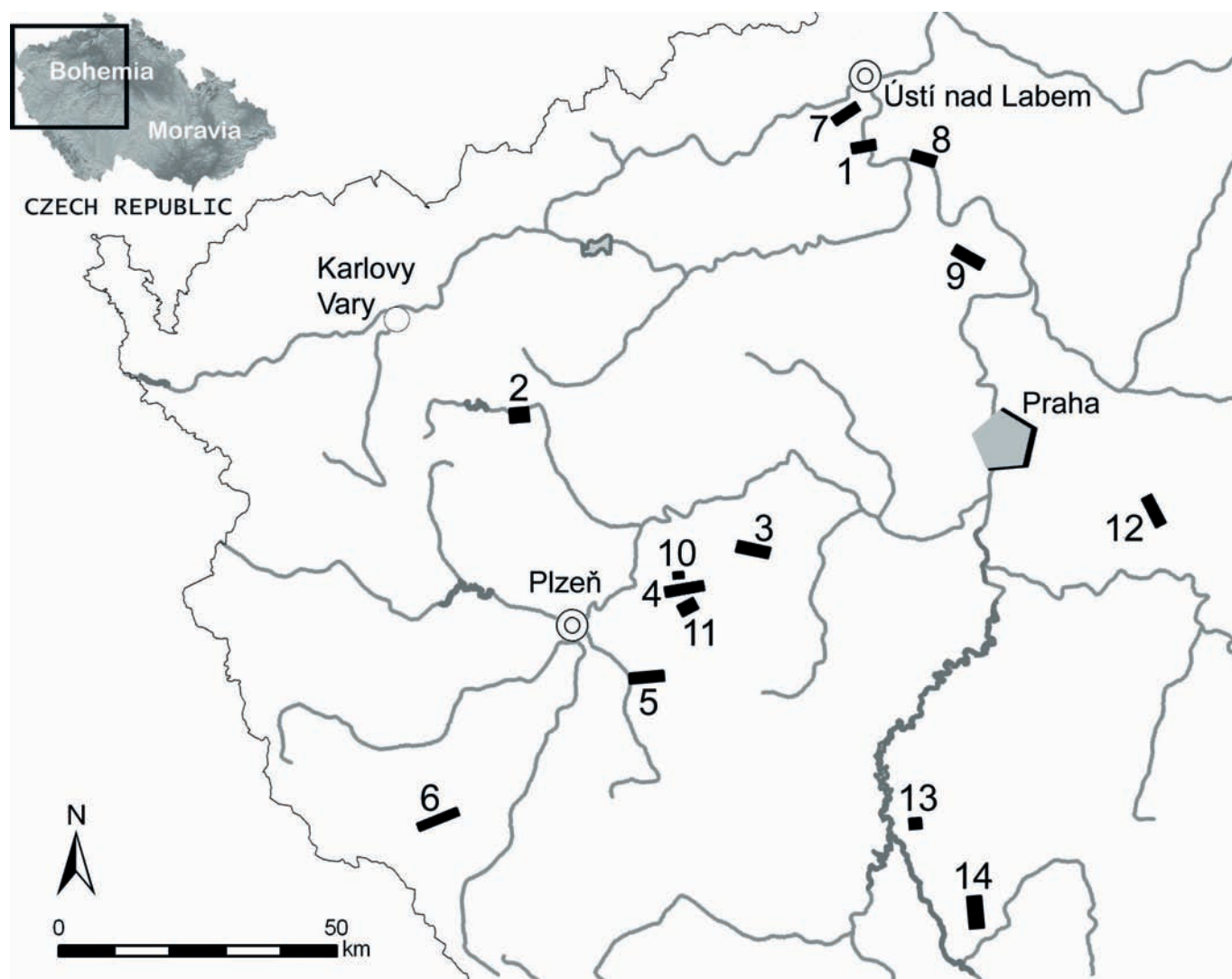
První komplexně pojatý a metodicky koncipovaný projekt české archeologie zaměřený na využití potenciálu leteckého laserového skenování (LLS) zemského povrchu se uskutečnil v letech 2010–11. V následujících částech této kapitoly předkládáme souhrn nejdůležitějších informací o jeho cílech, průběhu a dosažených výsledcích.

2. Cíle a charakteristika projektu

Projekt *Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování* uskutečnila v letech 2010 – 2011 katedra archeologie Fakulty filozofické Západočeské univerzity v Plzni za finanční podpory Grantové agentury ČR. Pod vedením M. Gojdy se na jeho řešení podíleli J. John a L. Starková (příspěvky všech jmenovaných publikované v tomto svazku vycházejí z velké části z jejich práce na referovaném projektu). V České republice se jeho provedením naskytla možnost uplatnit vyspělou a na dlouhou dobu nepochybně nejkompaktnější metodu mapování těch částí krajiny, na jejichž povrchu jsou v podobě tzv. antropogenního tvaru reliéfu zachovány pozůstatky minulých lidských aktivit, a otestovat tak možnosti, které pro jejich identifikaci, evidenci a dokumentaci tato LLS nabízí. Shodou okolností pak bylo možné na konkrétním příkladu zhodnotit její efektivitu z hlediska vynaložených prostředků a kvality dosažených výsledků, a to v porovnání s náklady na pořizování dat pro tvorbu digitálního výškopisného modelu klasickou geodetickou cestou (Gojda – John – Starková 2011).

Projekt tématicky rozvíjí dvacetiletou tradici českého dálkového archeologického průzkumu, který je od roku 1992 součástí vědeckého programu Archeologického ústavu AV ČR v. v. i. Praha; od roku 1999 je péčí řešitele projektu rozvíjen také na katedře archeologie ZČU v Plzni.

Tato kapitola přináší informace o základních aspektech projektu, o hlavních charakteristikách krajinných transektů (polygonů), které projektový tým vybral tak, aby v nich byly zastoupeny co



Obr. 1 – Rozmístění zájmových polygonů v projektu *Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování* (čísla u polygonů odpovídají pořadovým číslům z přehledné tabulky a z jejich popisu).

Fig. 1 – The distribution of the polygons studied during the project *The potential of archaeological landscape survey in the Czech Republic using 3D airborne laser scanning* (the numbers next to the polygons reflect the serial numbers from the overview table and their description).

nejrozmanitější druhy památek pravěkého a historického původu. Zmíněna bude fáze praktického řešení, jejíž náplní bylo pořízení primárních dat a jejich základní zpracování. Protože nemalé úsilí jsme věnovali – a to v přímé i nepřímé spolupráci s několika externími spolupracovníky z řad našich studentů – orientačním ověřovacím průzkumům v terénu, je součástí této kapitoly informace o dohledávání a dokumentaci rozmanité škály areálů a objektů archeologického zájmu dochovaných v terénním reliéfu.

V době, kdy se po četných konzultacích s odborníky na problematiku archeologického průzkumu krajiny – a to jak pozemního, tak dálkového – přistoupilo k přípravě vlastního projektu, bylo dosaženo shody v jeho celkovém zaměření. Bylo rozhodnuto, že je třeba jej orientovat k dosažení takových výsledků, které by na jedné straně zřetelně ukázaly autonomní možnosti metody LLS v oblasti dokumentace a průzkumu kulturní krajiny, resp. archeologických nemovitých památek, a na straně druhé umožnily srovnat její efektivitu (finanční náklady na získání primárních dat, dobu potřebnou k jejich pořízení a zpracování, přes-

nost/rozlišení výsledků apod.) s těmi postupy, které pomáhají shromažďovat srovnatelná (prostorová) data pro tvorbu digitálního výškopisného modelu. Využití tohoto způsobu trojrozměrného mapování krajiny jak v měřítku rozsáhlých oblastí (regiony, tzv. krajinné transepty, geomorfologické celky) a středně velkých ploch (širší okolí vybraných památek, např. stavebně-historických celků, hradišť), tak i územně nevelkých areálů (např. pravěké mohylníky, zaniklé středověké vesnice, novověká polní opevnění) se v posledních letech stává v západní Evropě takřka standardní součástí velkých, finančně zajištěných projektů zaměřených na evidenci a ochranu archeologického dědictví a na výzkum historické krajiny s relikty zaniklých sídelních stop.

3. Vymezení a základní charakteristiky zájmových oblastí projektu

V porovnání s původním plánem nasnímkovat každý rok jeden rozsáhlý areál (polygon, resp. obdélník) byla nakonec upřednostněna varianta pořídit snímky většího počtu plošně nevel-

kých polygonů, protože tak bylo možné zachytit větší krajinou rozmanitost zkoumaného souboru a zastoupení druhů památek v něm. Zájmová území lze rozdělit do dvou skupin:

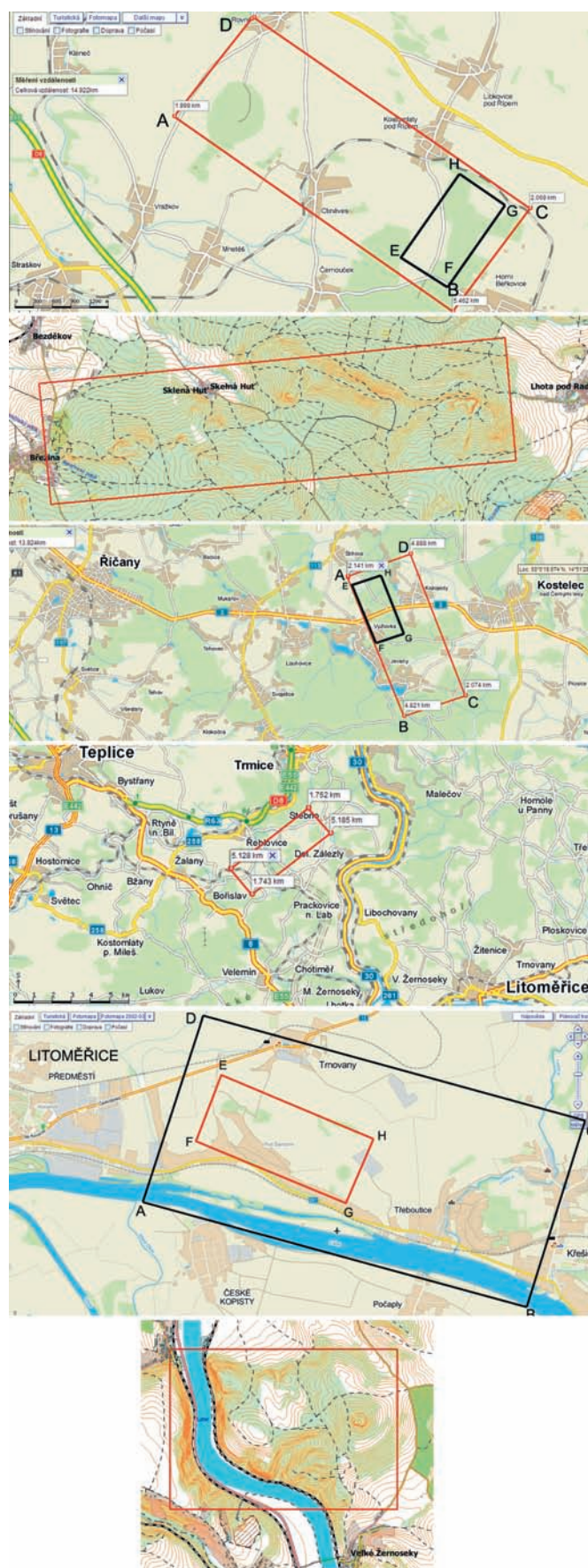
1. Plochy (polygony), které v požadované kvalitě dosud nebyly mapovány metodou LLS; primární data zde byla pořízena z grantových prostředků a z nich byla pokryta také filtrace dat. Celkem bylo zvoleno 14 testovacích polygonů o celkové rozloze 123 km² (obr. 1). Záměrně byly zvoleny oblasti s vyšším počtem dochovaných antropogenních terénních reliktnů, převážně v zalesněném prostředí.

2. Území, pro něž existují lidarové snímky, a které tedy již bylo v minulosti mapováno pomocí LLS. Vybrána byla oblast výškové a morfologicky členité Děčínské vrchoviny (Národní park České Švýcarsko; dále NPCŠ), která se svými přírodními parametry výrazně odlišuje od většiny krajinných typů osídlovaných v minulosti.

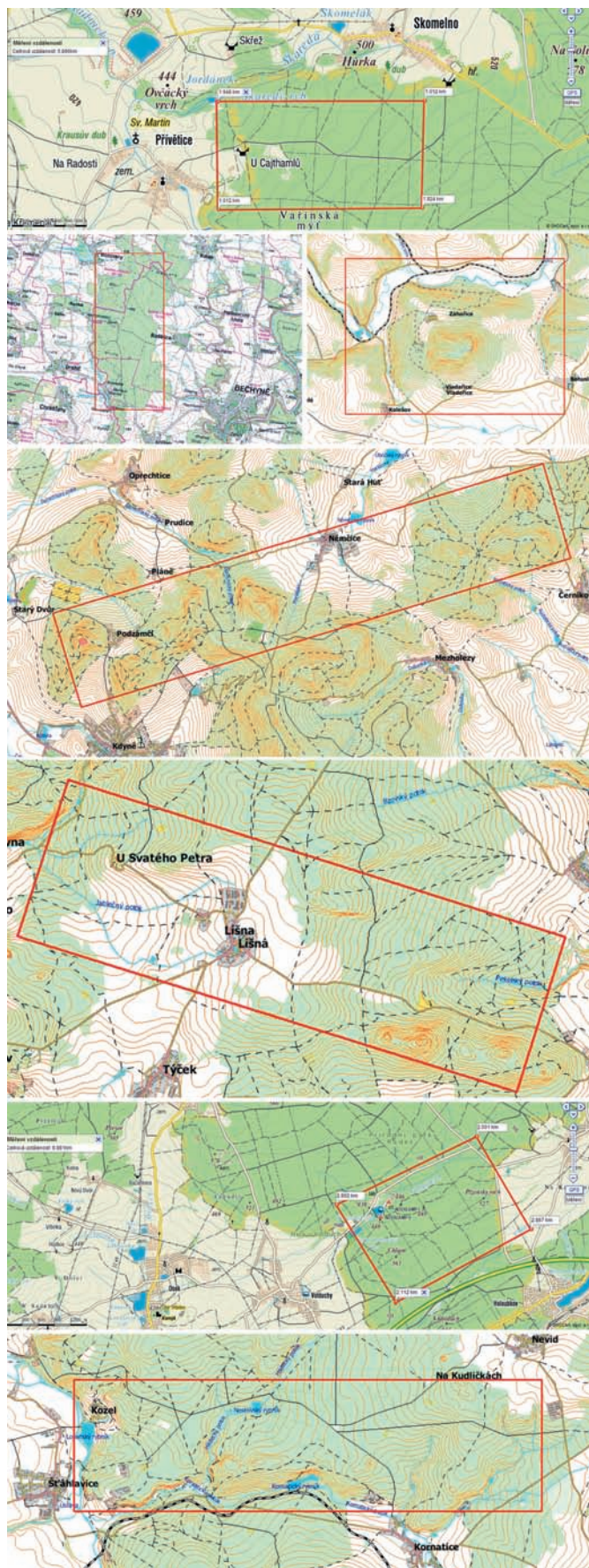
Ad 1. Jedná se o první větší soubor dat leteckého laserového skenování, který byl u nás pořízen cíleně pro potřeby archeologie. Reprezentuje široké spektrum v terénu dochovaných památek (mohylová pohřebiště, hradiště, těžební areály, hrady, tvrziště, zaniklé vesnice a jejich pluziny, úvozové systémy, reďuty atd.). Pracovní názvy a rozlohu jednotlivých polygonů ukazuje následující tabulka, po ní následuje přehled jejich základních charakteristik.

Číslo	Pracovní označení polygonu	Rozloha (km ²)	Rok Skenování
1	Porta Bohemica	4	2010
2	Vladař	9	2010
3	Líšná	12	2010
4	Březina	13	2010
5	Štáhlavsko	11	2010
6	Kdyňsko	11	2010
7	Habrovany	8	2011
8	Třeboutice	8	2011
9	Ctiněves	11	2011
10	Prívětice	2	2011
11	Sloupek	6	2011
12	Černokostecko	10	2011
13	Kučeř	4	2011
14	Hemera	14	2011

1 – Porta Bohemica. V oblasti tzv. České brány bylo leteckým skenováním dokumentováno pravěké (a pravděpodobně také raně středověké) hradiště Hrádek u Libochovan a těžební areál mezi obcemi Oparno a Malé Žernoseky. Digitální model terénu těchto lokalit je o to cennější, že dosud nebylo publikováno žádné moderní zaměření nemovitých památek uvedeného území. Na okraji sledované plochy se nachází rovněž hrad Oparno (obr. 2a).



Obr. 2a – Prostorové vymezení zájmových polygonů v projektu *Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování* I. Odshora dolů (v závorce uvedena pořadová čísla polygonů z přehledné tabulky): Ctiněves (9), Březina (4), Černokostecko (12), Habrovany (7), Třeboutice (8), Porta Bohemica (1). **Fig. 2a** – The spatial distribution of the polygons studied during the project *The potential of archaeological landscape survey in the Czech Republic using 3D airborne laser scanning* I. From top to bottom (in brackets there are the serial numbers of polygons from the overview table): Ctiněves (9), Březina (4), Černý Kostelec region (12), Habrovany (7), Třeboutice (8), Porta Bohemica (1).



Obr. 2b – Prostorové vymezení zájmových polygonů v projektu *Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování II*. Odshora dolů (v závorce uvedena pořadová čísla polygonů z přehledné tabulky): Privětice (10), Hemera (14), Vladař (2), Kdyňsko (6), Lišná (3), Sloupek (11), Štáhlavsko (5).
Fig. 2b – The spatial distribution of the polygons studied during the project *The potential of archaeological landscape survey in the Czech Republic using 3D airborne laser scanning II*. From top to bottom (in brackets there are the serial numbers of polygons from the overview table): Privětice (10), Hemera (14), Vladař (2), Kdyňsko (6), Lišná (3), Sloupek (11), Štáhlavsko (5).

2 – Vladař. Polygonu dominuje rozsáhlá výšinná opevněná lokalita Vladař u Záhořic (obr. 2b). Toto hradiště donedávna postrádalo přesnější zaměření, a to právě v důsledku své velikosti. První kvalitní plán vyhotovil A. Majer až v r. 2003 v systému GPS, do té doby byla lokalita zdokumentována jen pomocí nepřesných náčrtů (Majer 2004)..

3 – Lišná. V rámci zalesněných ploch tohoto polygonu lze pozorovat terénní reliкty, které můžeme s vysokou pravděpodobností spojit se zaniklými středověkými vesnicemi Zábdiší a Okrouhlík (blíže viz kapitola 10 v této knize). Tyto lokality byly doposud známy pouze z písemných pramenů a jejich přesnou lokalizaci jsme postrádali (srov. Rožmberský 2006). Výsledky leteckého skenování zachytily nejen půdorysy zaniklých vesnic, ale rovněž pozůstatky okolních polí, cest a dalších areálů v zázemí zaniklých vesnic (obr. 2b).

4 – Březina. Nejrozsáhlejší památkou tohoto polygonu je raně středověké hradiště Březina. U této lokality výsledky leteckého skenování naznačily existenci opevněného předhradí, které bylo zobrazováno na nákresech hradiště vyhotovených v 19. stol., dnes je již ale v terénu téměř nepostřehnutelné. Polygon Březina vykazuje rovněž zvýšenou koncentraci kruhových objektů, které lze interpretovat jako pozůstatky milířů (obr. 2a – blíže viz kapitola 15).

5 – Štáhlavsko. Štáhlavské polesí reprezentuje mimořádně dobře dochovaný příklad zaniklé kulturní krajiny, v níž můžeme dokumentovat stopy lidské činnosti od pravěku (mohylová pohřebiště), přes středověk (zaniklé vesnice – viz obr. 3, tvrže a hrad Lopata) až po novověk (zámek Kozel, rybníky, stopy těžby; obr. 2b).

6 – Kdyňsko. Polygon je mimořádný vysokou koncentrací středověkých šlechtických hradů. V tomto polygonu byla souběžně s leteckým skenováním prováděna fotografická dokumentace pomocí šikmých leteckých snímků. Kombinace dvou metod dálkového průzkumu potvrdila skutečnost, že u leteckého laserového skenování je velmi důležitá následná vizuální kontrola situace přímo ve snímaných lokalitách, aby bylo možno spolehlivě vyloučit různé pseudorelikty, které se mohou na výsledných modelech objevit (typickým příkladem jsou konvexní „objekty“ vzniklé navršením ořezaných větví během lesních prací; obr. 2b).

7 – Habrovany. V tomto polygonu byla zmapována část velmi dobře dochovaného systému polního opevnění (zejména dělostřelecká postavení), které je známo rovněž z prvního (josef-

ského) vojenského mapování a vzniklo někdy v průběhu druhé poloviny 18. století – blíže viz kapitola 3 (obr. 2a).

8 – Třeboutice. Rovněž v polygonu Třeboutice jsou zachyceny novověké fortifikace, konkrétně reliktů předsunutého opevnovacího systému terezínské pevnosti z poloviny 19. století (blíže viz kapitola 3). LLS potvrdilo, že část mohutného opevnění je dochována v nízkém reliéfu i na zdánlivě zarovnaných terénech zemědělsky obdělávaných ploch, jak naznačila série leteckých fotografií z nedávné doby, pořízených v zimním období za velmi nízkého slunečního osvětlení (obr. 2a).

9 – Ctiněves. Devátý polygon zahrnuje horu Říp a část jejího okolí. Z archeologických památek jsou zde zachycena zejména mohylová pohřebiště na katastrech Ctiněves, Kostomlaty pod Řípem a Horní Beřkovice (obr. 2a).

10 – Přívětice. V této oblasti je předpokládána zaniklá středověká vesnice Kaliště (srov. *Rožmberský 2006*). Data LLS zde indikují především zbytky úvozových systémů (obr. 2b)

11 – Sloupek. Kromě velkého množství milířišť a těžebních areálů lze v polygonu identifikovat dobře dochovaný půdorys zaniklé středověké vesnice Sloupek – blíže viz kapitola 13 (obr. 2b).

12 – Černokostecko. Zaniklé středověké vesnice Černokostecka (Lažany, Vyžlovka, Aldašín) patří k lokalitám s dlouhou tradicí povrchového průzkumu (viz např. *Smetánka-Klápště 1981*). Současné využití metody LLS zde výrazně přispívá k identifikaci méně nápadných komponent, jako jsou zbytky pluzžiny či zaniklé cesty (obr. 2a).

13 – Kučeř. Hlavním zdokumentovaným objektem tohoto polygonu je laténské čtyřúhelníkové ohrazení Kučeř-Obrovy hroby. Na příkladu této lokality byla testována schopnost LLS zachycovat reliktů zarostlé hustou vegetací.

14 – Hemera. V polesí Hemera na Bechyňsku je dochována řada mohylových pohřebišť z období pravěku a raného středověku (obr. 2b). Přestože se jedná o velmi dobře prozkoumanou oblast², díky LLS zde byly identifikovány zatím neregistrované objekty, a to zejména ojedinělé mohyly či jejich malé skupiny – blíže viz (*John 2011b*).

Ad 2. Děčínská vrchovina – Národní park České Švýcarsko. Výrazný skalnatý profil převážně zalesněné oblasti a obtížně přístupný terén jsou hlavní charakteristiky, které dlouhodobě podporovaly předpoklad o malém zájmu pravěkých až raně středověkých komunit o osídlování regionu, který je ovšem na podkladě soudobých archeologických akcí vyvrácen. Kolonizace a změny v sídelní dynamice na přelomu vrcholného

a pozdního středověku, jejichž důsledky přetrvávají do moderní doby, měly nejvýraznější vliv na podobu zdejší krajiny. Jejich stopy jsou v reliéfu čitelné dodnes, zejména jako reliktů zaniklých sídel (intravilánů a extavilánů vesnic, šlechtických sídel a těžebních areálů). Geomorfologická a ekologická komplexnost doprovázená nesystematičností archeologického zájmu o oblast Národního parku České Švýcarsko tvoří významné důvody, pro něž jsme tento region začlenili do referovaného projektu (*Valečka 2005*). Neopomenutelným faktorem, který ovlivnil integraci tohoto území do projektu je skutečnost, že patří k několika málo oblastem České republiky, kde již bylo letecké laserové skenování provedeno a data zde pořízená nám byla po dohodě zpřístupněna.

4. Pořízení dat, jejich zpracování, analýza a interpretace

Polygony č. 1 – 6 byly skenovány dne 25. 3. 2010 německou společností Milan Geoservice GmbH. Pro skenování za účelem vytváření DMR je v klimaticky průměrném roce období prvních jarních týdnů na přelomu března a dubna nejvýhodnější, protože vegetace je v tomto čase dobře prostupná a zároveň již chybí sněhová pokrývka. Skenování, v jehož průběhu byla během uvedeného dne zaměřena více než jedna miliarda bodů, se uskutečnilo z výšky cca 600 m nad terénem pomocí skeneru Riegl LMS-Q560 s deklarovanou výškovou přesností ± 10 cm a polohovou přesností ± 30 cm. Uvedená výška letu odpovídá hustotě měření ca 4 body/m², což je zcela dostačující pro výpočet DMR s prostorovým rozlišením výsledného rastru 1 x 1 m.

Polygony č. 7 – 14 byly podrobeny skenování 23. 3. 2011 za použití leteckého skeneru Riegl LMS-Q680i. Brněnská společnost GEODIS provedla měření z výšky 900 m nad terénem, což odpovídá hustotě měření cca 1 bod/m², tedy nižšímu rozlišení než u dat z roku 2010. Zároveň však byla pro účely srovnání část polygonu č. 12 skenována z výšky 450 m s pokrytím ca 10 bodů/m².

Data byla dodána ve formátu LAS a ASCII, a to jak ve formě surových dat, tak filtrovaných podkladů pro DMR a DMP. Společnost Milan Geoservis dodala hrubá data také ve formátu DXF. Další zpracování dat (zejména výpočet DMR) probíhalo na univerzitním pracovišti. K výpočtu vlastního DMR z naměřených bodů byla použita metoda nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN). Následně byla pozorováním stínovaného DMR sledována morfologie terénu a identifikovány anomálie v reliéfu, které vykazují pravidelnost tvarů, shlukování a prostorovou uspořádanost, a jsou tak interpretovatelné jako uměle vytvořené objekty. Přes některé nevýhody se osvědčila metoda zobrazení DMR pomocí stínovaného povrchu (*hillshade*), umožňující uměle nasvítit terén analyzovaného snímku pod libovolným úhlem a směrem, např. až v extrémně nízké pozici virtuálního světelného zdroje (slunce těsně nad obzorem při východu/západu), a využít tak principu tzv. stínových příznaků, který se využívá při leteckém průzkumu reliéfně dochovaných památek v otevřené krajině. Díky tomu jsme na sledovaných územích odhalili několik objektů, které jsou