

## Archeologický průzkum krajiny pomocí leteckého laserového skenování Dosavadní průběh a výsledky prvního českého projektu

Martin Gojda – Jan John – Lenka Starková

*Předmětem článku je zpráva o cílech, teoretických a metodologických základech a dosavadním průběhu výzkumného projektu zaměřeného na aplikaci leteckého laserového (lidarového) skenování – nejnovější metody dálkového archeologického průzkumu a 3D (výškopisného) mapování zemského povrchu s výskytem nemovitých archeologických památek. Projekt jako první svého druhu na území České republiky je koncipován tak, aby prokázal potenciál uvedené metody a jeho efektivitu z hlediska identifikace a dokumentace nemovitých archeologického dědictví v jeho kvalitativní (druhové) rozmanitosti a v různorodých krajinných typech (lesní prostředí, otevřená krajina, nížina včetně intenzivně oraných ploch, pahorkatina), a také ve srovnání s klasickým geodetickým zaměřováním památek.*

dálkový archeologický průzkum – letecký laserový průzkum – lidar – terénní průzkum – digitální model

*Archaeological remote sensing by means of airborne laser scanning. Interim report upon the first lidar research project in Bohemia. This paper brings report upon the goals, theoretical and methodological bases and current state of a research project which aims at the application of airborne laser (lidar) scanning (ALS) – the most recent sophisticated method of remote sensing used for the identification and 3D documentation of landscapes (terrain surfaces) containing prehistoric and ancient sites and monuments, specifically earthworks. As the very first project of this kind in the Czech Republic it is expected that the potential of this method and its effectiveness from the perspective of both identification and documentation of archaeological heritage, namely in terms of sites and monuments variability and placement in different landscape types (such as woodland, open landscape, lowland including cultivated fields, upland) will be recognized. Also, a comparison of costs between ALS and terrestrial survey of a site will be checked in the final section of the paper.*

archaeological remote sensing – airborne laser scanning – lidar – ground truthing – digital model

### 1. Úvod

Před šesti lety byla na stránkách tohoto časopisu publikována stať seznamující naši odbornou veřejnost s pojmem LIDAR (light detection and ranging; též LiDAR či lidar) a se základními parametry speciální metody dálkového průzkumu a trojrozměrného mapování povrchu Země prostřednictvím laserového skeneru, který se za uvedenou zkratkou skrývá (Gojda 2005). Od té doby došlo v ČR k několika pokusům o zapojení této metody do praxe archeologického výzkumu, ale vzhledem k různým okolnostem, oscilujícím převážně kolem vysokých nákladů nutných pro realizaci lidarového snímkování, k tomu fakticky dochází až na přelomu 1. a 2. desetiletí tohoto století.

Prvním projektem realizovaným na území České republiky, který v plné míře směřuje k testování možností leteckého laserového snímkování v podmínkách české krajiny a ke zhodnocení jeho budoucí role v oblasti heuristiky (identifikace a evidence), mapování a dokumentace území s archeologickými nálezy, je *Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování (LIDAR)*. Projekt, jehož nositelem je Západočeská univerzita v Plzni (resp. Katedra archeologie Fakulty filozofické), probíhá od r. 2010, a to díky přidělení finančních prostředků z fondů GA ČR na dobu dvou let. V ČR se tak poprvé naskytl možnost aplikovat nejmodernější a na dlouhou dobu nepochybně nejvýznamnější a nejefektivnější metodu mapování těch částí krajiny, na jejichž povrchu jsou v podobě tzv. antropogenního tvaru reliéfu zachovány pozůstatky minulých lidských aktivit, otestovat možnosti, které pro jejich identifikaci, evidenci a dokumentaci tato metoda nabízí a zhodnotit její efektivitu z hlediska vynaložených prostředků a kvality dosažených výsledků (zejména v porovnání s náklady na pořizování digitálního výškopisného modelu jinými – dnes již lze říci tradičními – postupy).

Při přípravě projektu jsme jeho celkové zaměření orientovali k dosažení takových výsledků, které by na jedné straně zřetelně ukázaly autonomní možnosti metody leteckého laserového skenování (LLS)<sup>1</sup> 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, přesnost/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 finančně zajištěných projektů zaměřených na evidenci a ochranu archeologického dědictví a na výzkum historické krajiny s relikty zaniklých sídelních stop.

V této studii představujeme základní charakteristiky lidarové technologie, shrnujeme dosavadní vývoj LLS a podáváme přehled o aktivitách, které jsme uskutečnili v průběhu první části zmíněného dvouletého projektu. Přinášíme v ní informace o charakteristikách krajinných transeptů (polygonů), které jsme vybrali tak, aby v nich byly zastoupeny co nejrozmanitější druhy památek pravěkého a historického původu, dále o heuristické fázi projektu, resp. o pořízení primárních dat a jejich základním zpracování; konečně pojednáváme o zahájení orientačních ověřovacích průzkumů v terénu, během nichž byla v r. 2010 a na počátku r. 2011 provedena srovnávací zaměření vybraných památek na Plzeňsku (pravěké mohyly a středověké tvrziště ve Stáhlavském polesí), a rovněž reliéfních pozůstatků středověkých/novověkých sídelních aktivit na Děčínsku. Kromě toho uvádíme stručné informace o dohledávání a dokumentaci rozmanité škály areálů a objektů archeologického zájmu dochovaných v terénním reliéfu (např. zaniklých vesnic, mlířišť, polních systémů, cest, těžebních míst, hradišť, hrádků).

## 2. Metoda leteckého laserového skenování a její dosavadní využití v evropské archeologii

Samotný sběr dat pomocí LLS je založen na kombinaci několika přístrojů. Klíčový je laserový skener emitující vysokou rychlostí laserové impulsy, směřující pod různými úhly směrem k zemskému povrchu. Ty jsou po odrazu od povrchu zachycovány citlivým detektorem. Díky sledování časových rozdílů mezi vysláním impulsu a přijetím jeho odrazu lze přesně (zpravidla na několik centimetrů) určit polohu bodů, od nichž se signál odrazil (viz *Dolanský 2004*, 10–11). Skener je přitom umístěn na letounu (nejčastěji malé letadlo nebo helikoptéra) vybaveným přesným přijímačem GPS a vnitřním (tzv. inerciálním) navigačním systémem, což umožňuje sběr dat během průletů ve vzájemně se překrývajících pásech, širokých dle výšky letu. Tato kombinace přináší jednu z podstatných výhod leteckého laserového skenování, a to možnost rychlého sběru georeferencovaných dat na velkých plochách.

Podobně jako letecký průzkum, může být LLS využito jak k dokumentaci krajiny a památek, tak při vyhledávání neznámých, resp. dosud neevidovaných lokalit. Oproti klasickému leteckému průzkumu je ovšem metoda méně závislá na stavu atmosféry (denní doba, oblačnost) a navíc umožňuje vytváření modelů terénu, z nichž jsou odfiltrovány nežádoucí objekty (vegetace, stavby), což je např. při použití letecké dvousnímkové fotogrammetrie prakticky nemožné.

Surová data LLS jsou zpravidla upravována do dvou typů digitálních modelů. Jedná se o tzv. model povrchu (DSM – Digital Surface Model) a model terénu či reliéfu (DTM – Digital Terrain Model; u nás se používá termín DMR – digitální model reliéfu). Rozdíl spočívá ve výběru odrazů laserového impulsu, zahrnutých do výpočtu modelu. Pokud se v trase laserového paprsku při jeho

---

<sup>1</sup> Poznamenejme hned na začátku, že pojem lidar se vztahuje také na přístroje téhož druhu, které skenují prostor z pozemního – stacionárního či mobilního – stanoviště (v této studii – a podobně je tomu i ve většině soudobých zahraničních prací – však tento termín používáme k označení výlučně leteckého laserového snímače). V odborné literatuře se pro dálkový laserový průzkum stále častěji používá pojmu *airborne laser scanning* – ALS (pro pozemní laserové měření *terrestrial laser scanning* – TLS) a v podobě českého překladu (LLS – letecké laserové skenování) tuto zkratku používáme i v našem textu.

cestě k zemskému povrchu nacházejí nějaké menší překážky, např. koruny stromů či nadzemní elektrické vedení, část impulzu se od nich odrazí (průměr laserového paprsku u země mívá několik desítek centimetrů). Z jednoho vyslaného impulzu je tak často zaznamenáno několik odrazů. Obecně lze říci, že pokud jsou ve výpočtu zahrnuty první odrazy, vzniká model povrchu včetně vegetace a nadzemních objektů. Pokud jsou použity jen poslední odrazy, vzniká model holého terénu, ze kterého mohou být navíc pomocí specializovaných algoritmů odfiltrovány nežádoucí objekty, jako např. střechy budov. Výsledné modely mohou být zobrazeny různými způsoby, v této práci budeme používat převážně tzv. stínování povrchu (*hillshade*; viz *obr. 1*).

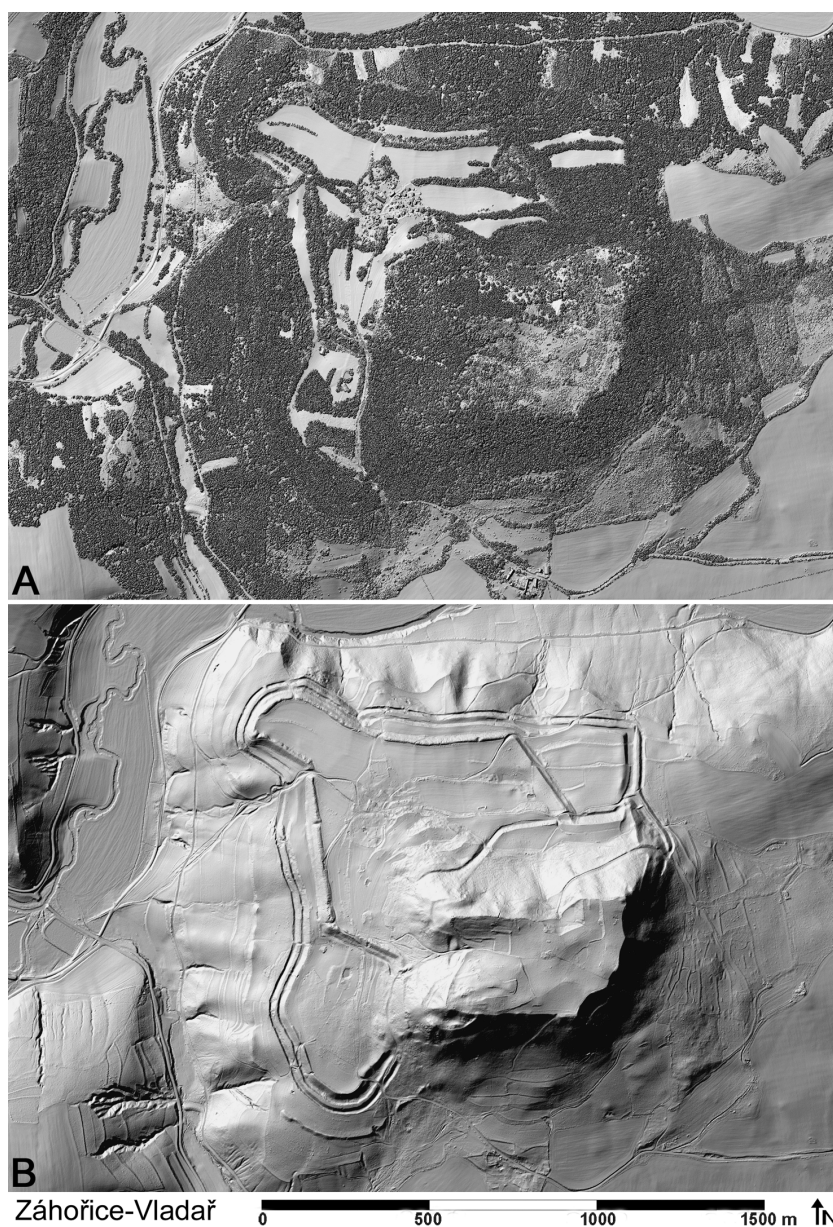
Protože základní informace o systému leteckého laserového snímkování pro účely archeologie byly zpřístupněny již dříve (*Gojda 2005*), omezíme se na údaje naprosto základní a takové, které v kontextu našeho projektu pokládáme za důležité (některé z nich souvisejí s teprve nedávným rozvojem této technologie).

Byla to právě 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 2010*, 3). Připomeňme v této souvislosti, že radary a lidary patří do skupiny tzv. aktivních radiometrů, tzn. přístrojů, které – na rozdíl od opticko-mechanických a elektronických skenerů – využívají k měření vlastností zemského povrchu svých vlastních zdrojů záření (*Gojda – John 2009*, 469; podrobně o principu a technických parametrech lidarů zejm. *Dolanský 2004*). 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. stol. se tato metoda prakticky neuplatnila, o to dynamičtější se pak ale začala využívat jak v lokálních, tak v mezinárodních projektech dálkového archeologického průzkumu. Přitom se tyto projekty neomezily 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 – Kühnreiter 2008*). V kontinentální části Evropy výrazněji zaujala také nedávno uvedená a v Bádensku-Württembersku 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 mikroreliefu, a to konkrétně za účelem detekce zaniklých polí, je věnována zvýšená pozornost např. v Nizozemsku (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*).

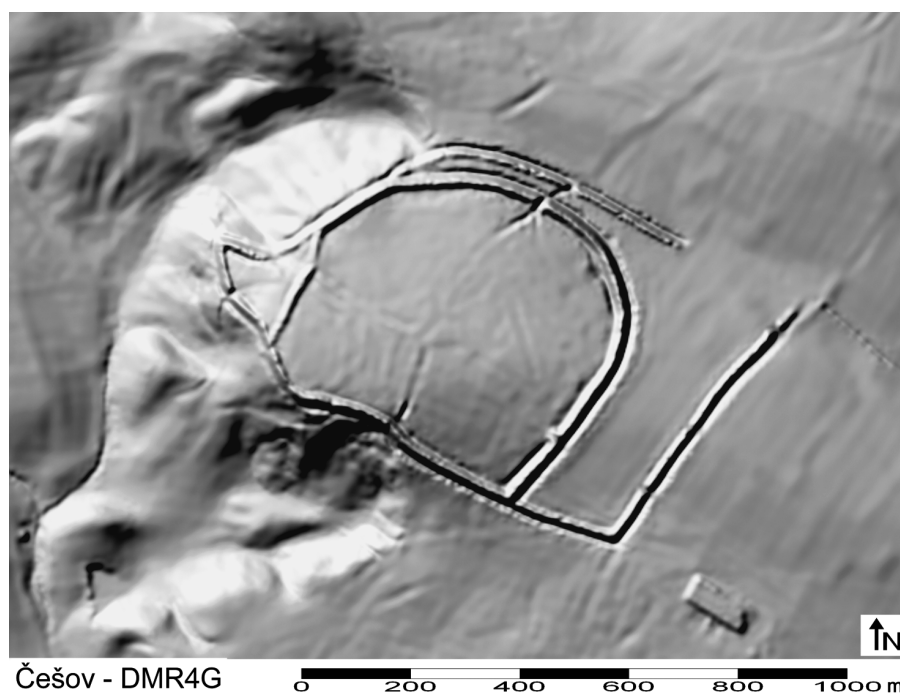
Od samého počátku rozvoje zájmu o LLS v první polovině minulého desetiletí se tomuto tématu věnuje několik pracovišť v Anglii. Vyniká zde jednak vědecko-výzkumné pracoviště univerzity v Cambridge (Unit for Landscape Modelling), které disponuje jedním z nejlépe vybavených systémů pro lidarové snímkování a paralelně prováděné fotogrammetrické snímkování skenovaných areálů (z posledních prací zejm. *Devereux et al. 2008*) a památková instituce English Heritage (zejm. práce *Crutchley 2010* 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). 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*). V Evropském archeologickém centru Bibracte – Glux-en-Glenne, se v březnu 2011 konal první mezinárodní workshop speciálně zaměřený na lidarové aplikace v archeologii, jehož účastníky byli také autoři této studie.

Připomeňme, že ojedinele se tato metoda začíná uplatňovat také v bývalých socialistických zemích. Nejdaleje je v tomto ohledu Slovinsko, kde se LLS uplatnilo v několika projektech, které proběhly ve druhé polovině



Obr. 1. Hradiště Vladař u Záhořic (okr. Karlovy Vary): srovnání digitálního modelu povrchu (A) s digitálním modelem terénu (B) vytvořených z leteckých lidarových dat. Prostorové rozlišení 1 m. Projekt *Potenciál archeologického výzkumu krajiny ČR prostřednictvím dálkového laserového 3D snímkování (LIDAR)*. © Katedra archeologie Západočeské univerzity v Plzni (platí pro všechny lidarové snímky v tomto příspěvku).

Fig. 1. Vladař, an Iron Age hillfort near Záhořice (distr. Karlovy Vary, western Bohemia): A – digital surface model (DSM) and B – digital terrain model (DTM) produced from rough airborne laser scanned data. Spatial resolution: 1 metre. Project *The potential of archaeological landscape survey through airborne laser scanning (LIDAR) in the Czech Republic*. © Department of Archaeology, University of West Bohemia in Pilsen.



Obr. 2. Hradiště Češov (okr. Jičín). Digitální model terénu vytvořený na základě dat zakoupených od Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (digitální model reliéfu 4. generace – DMR 4G). Prostorové rozlišení 5 m.

Fig. 2. Prehistoric fortified enclosure (stronghold) Češov (distr. Jičín, eastern Bohemia). DTM generated from data owned by the Czech Office for Geodetic Survey and Cadastre Evidence (the so-called 4<sup>th</sup> generation digital relief model/DMR 4G). Spatial resolution: 5 metres.

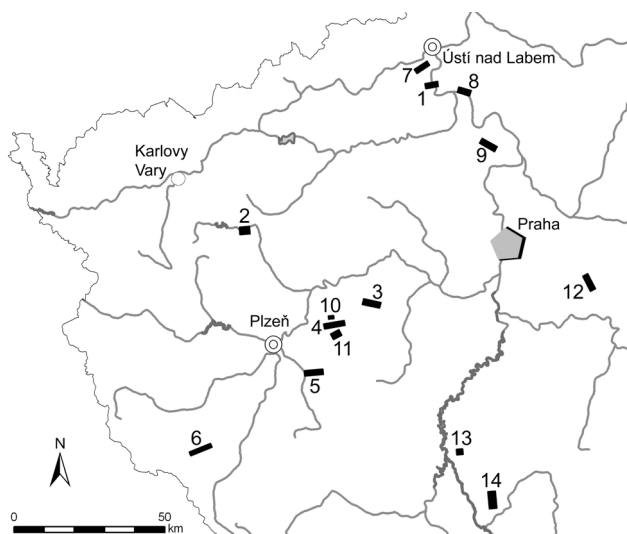
minulého desetiletí a pokračují i nyní (*Rutar – Črešnar 2011*). Podle předběžných zpráv a ústních sdělení se s lidarovými daty začíná pozvolna pracovat také na území východního Německa a v Polsku.

V současné době je – v celoevropském měřítku – archeologickým aplikacím dat LLS věnována zvýšená pozornost v projektech jak krajinné, tak sídelní (regionální, lokální) archeologie. 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).

Na území České republiky byla metoda LLS a možnosti jejího uplatnění v oblasti archeologického výzkumu poprvé představena širší veřejnosti na mezinárodní výstavě Lety do minulosti (*Gojda 2007*). Projekt, o němž v tomto příspěvku referujeme, může v prostředí ČR znamenat průlom v terénním výzkumu, dokumentaci a mapování archeologického dědictví, i když je možné, že z níže popsaných důvodů může zůstat do jisté míry výjimečný. Máme především na mysli fakt, že v jeho rámci byla účelově pořízena primární data, což se v budoucnu zřejmě nebude z důvodu finanční náročnosti (spíše zdánlivé než reálné) často opakovat, a to i přes to, že výhody práce s daty skenovanými letecným laserem takřkajíc „na míru“ archeologickému záměru netřeba dlouze rozvádět. Píšeme-li o projektu LLS, který vyžaduje relativně vysoké prostředky, je třeba doplnit, že v současnosti tomu jinak ani být nemůže. Do nedávné doby (začátek roku 2011) totiž neexistovala možnost získat lidarové snímky prakticky žádné části území České republiky – jednoduše proto, že její území jimi nebylo pokryto. Podle informací, které jsme průběžně získávali jak z literatury, tak především na workshopech a konferencích a z ústních sdělení, je zřejmé, že úplné (celostátní) pokrytí má v rámci EU zatím jen

Obr. 3. Čechy: rozmístění jednotlivých polygonů dokumentovaných v letech 2010 a 2011 leteckým laserovým skenováním.

Fig. 3. Bohemia: the distribution of individual polygons (landscape transects) documented in 2010/2011 by means of airborne laser scanning (ALS).



několik zemí (např. Belgie – srov. *Gojda 2005, 809*; Nizozemsko – *Humme et al. 2006*; Slovinsko). Velké evropské státy jsou většinou pokryty z větší či menší části, např. v Německu se jedná o Bavorsko a Bádensko-Württembersko (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*).

V nedávné době zahájila ČR tvorbu nového výškopisného mapování 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 nedávno zahájeno v rámci projektu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK), Ministerstva obrany ČR a Ministerstva zemědělství ČR (*Brázdil 2009*). Data ve formě digitálního modelu reliéfu (DMR = DTM) je již možné objednat u Zeměměřického úřadu, zatím však pouze pro střední část našeho území a pouze v omezeném rozlišení tzv. 4. generace výškopisu ČR. Data pro 4. generaci reliéfu jsou tvořena body v pravidelné síti 5 x 5 m, a jsou tudíž použitelná spíše pro rozsáhlé objekty s výraznými terénními relikty (*obr. 2*). Do r. 2015 by měla být k dispozici podstatně podrobnější data, označovaná jako digitální model reliéfu 5. generace. Ta nepochybně najdou v archeologii široké uplatnění.

### 3. Zájmové oblasti, jejich základní charakteristiky

Výběr území, které se stalo předmětem našeho zájmu, byl výsledkem jednak interního projednávání uvnitř řešitelského týmu, jednak konzultací se specialisty z jiných archeologických institucí. Oproti původním plánům – nasnímkovat každý rok jeden rozsáhlý areál (polygon, resp. obdélník) došlo k tomu, že byla upřednostněna varianta pořídít snímky většího počtu plošně nevelkých polygonů, protože tak bylo možno zachytit větší krajinnou 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 km<sup>2</sup> (obr. 3). Záměrně byly zvoleny oblasti s vyšším počtem dochovaných antropogenních terénních reliktnů, převážně v zalesněném prostředí.

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

**Ad 1.** Jedná se o první větší soubor dat leteckého laserového skenování, který byl u nás pořízen přímo pro potřeby archeologie a zahrnuje široké spektrum v terénu dochovaných památek (mohylová pohřebiště, hradiště, těžební areály, hrady, tvrziště, zaniklé vesnice a jejich plůžiny, úvozové systémy, reduty atd.). Pracovní názvy a rozlohu jednotlivých polygonů ukazuje následující tabulka, za níž uvádíme přehled jejich základních charakteristik.

Číslo	Pracovní označení polygonu	Rozloha (km <sup>2</sup> )	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	Přívětice	2	2011
11	Sloupek	6	2011
12	Černokostecko	10	2011
13	Kučer	4	2011
14	Hemera	14	2011

**1 – Porta Bohemica.** V oblasti tzv. České brány byly leteckým skenováním dokumentovány pravěké 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.

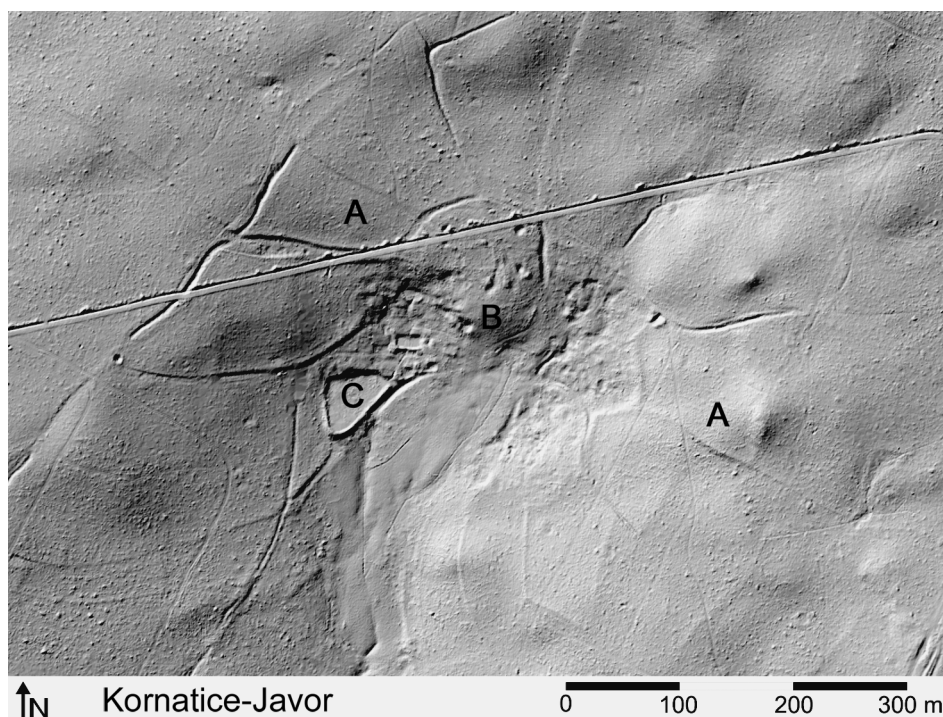
**2 – Vladař.** Polygonu dominuje rozsáhlá výšinná opevněná lokalita Vladař u Záhořic. Toto hradiště donedávna postrádalo přesnější zaměření, a to právě v důsledku své velikosti. První kvalitní plán vyhotovil Antonín Majer v r. 2003 v systému GPS, do té doby byla lokalita dokumentována jen pomocí nepřesných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

**3 – Líšná.** V rámci zalesněných ploch tohoto polygonu lze pozorovat terénní relikty, které můžeme s vysokou pravděpodobností spojit se zaniklými středověkými vesnicemi Líšná a Okrouhlík. 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.

**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.

**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. 4, tvrze a hrad Lopata) až po novověk (zámek Kozel, rybníky, stopy těžby).

**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



Obr. 4. Zaniklá středověká vesnice Javor na Štáhlavsku (okr. Plzeň-jih). Na digitálním modelu reliéfu z leteckých lidarových dat je dobře patrné prostorové vymezení intravilánu (B), paprskovitě uspořádané plázně (A) a rybníku (C). Drobné bodové objekty v okolí vesnice představují ve velké většině hromady větvi (malé body), v menším počtu případech milířiště (větší body).

Fig. 4. Deserted medieval village Javor near Štáhlavy (distr. Plzeň-jih). Distinctly visible on the DTM is the built-in area of the village (house plots; marked B), regularly spaced field system (A) and a local pond (C). Small points distributed over the whole area represent either current piles of collected wood or medieval to postmedieval charcoal heaps.

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).

**7 – Habrovany.** V tomto polygonu byla zmapována část velmi dobře dochovaného systému polního opevnění (zejména dělostřelecká postavení), které je známo rovněž z prvního (josefského) vojenského mapování a vzniklo někdy v průběhu druhé poloviny 18. století.

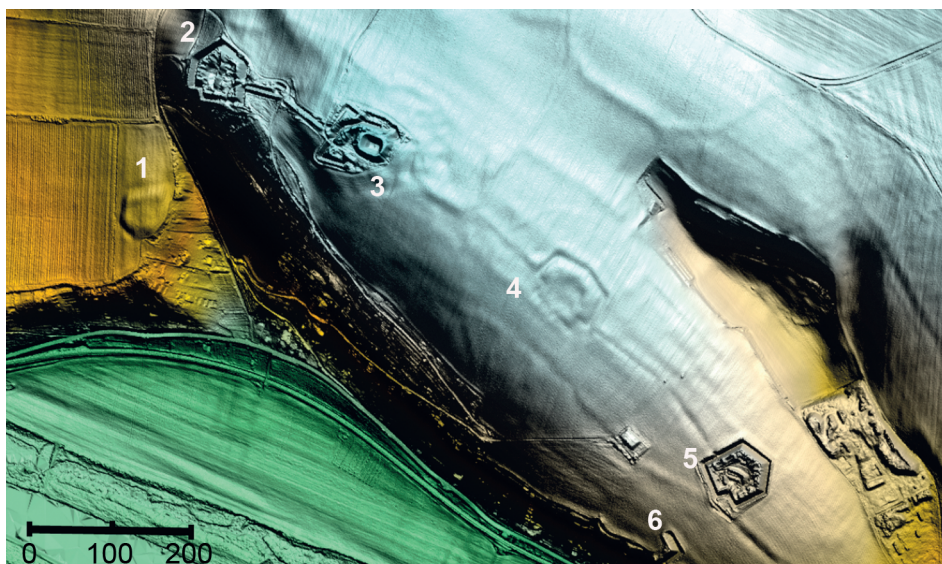
**8 – Třeboutice.** Rovněž v polygonu Třeboutice jsou zachyceny novověké fortifikace, konkrétně relikty představeného opevňovacího systému tereziánské pevnosti z poloviny 19. století. LLS potvrdilo, že část mohutného opevnění je dochována v nízkém reliéfu i na zdánlivě zarovnaných terénech zemědělsky obdělávaných ploch, což naznačila série leteckých fotografií z nedávné doby, pořízených v zimním období za velmi nízkého slunečního osvětlení (obr. 5).

**9 – Ctíněves.** Devátý polygon zahrnuje horu Říp a část jejího okolí. Z archeologických památek jsou zde zachycena zejména mohylová pohřebiště na katastrech Ctíněves, Kostomlaty pod Řípem a Horní Bečkovice.

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

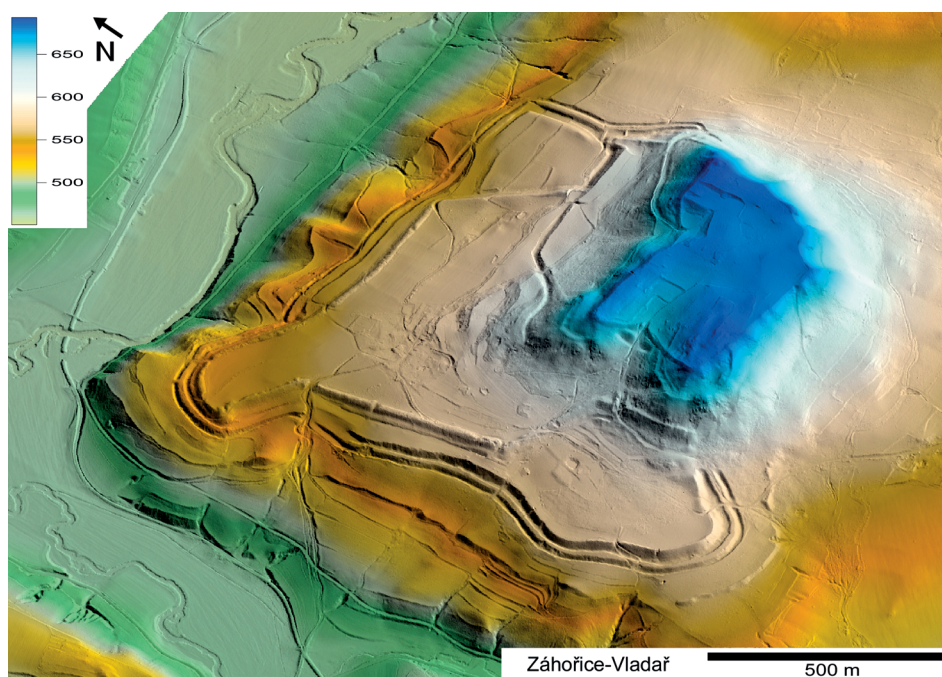
**11 – Sloupek.** Kromě velkého množství milířišť lze v polygonu identifikovat dobře dochovaný půdorys zaniklé středověké vesnice Sloupek (srov. Rožmberský 2006, 50).





Obr. 5. a – digitální model reliéfu terežínského předsunutého opevnění (kolem poloviny 19. stol.), který je výsledným produktem lidarového snímkování (březen 2011). Dokonale reprodukuje aktuální stav památky, resp. jejích komponent. Forty 1 a 4 jsou dnes zcela zarovnané s povrchem terénu, který je každoročně kultivován orbou, ostatní očíslované objekty jsou zachované v podobě antropogenních reliéfních tvarů v různém stupni destrukce. Zároveň je na tomto DMR zachycena rozsáhlá síť zaniklých cest a náspů, z nichž některé byly pravděpodobně součástí opevňovacího systému; severně a východně od fortu 3 jsou patrné stopy zásahů do povrchu terénu (těžba?). Poloha zdroje osvětlení (virtuálního slunce): SV, 45° nad obzorem. b – Pohled asi 20 m od vých. okraje fortu 3 (viz obr. 5a) směrem k vrchu Křemín, který uzavíral celý systém na jeho vých. konci (A), k dosud reliéfně zachovanému fortu 5 (zelený lesík na horizontu nad písmenem B) a k zaniklému fortu (C), který se jeví jako světleji zbarvená mírná terénní vlna. Foto 25. 3. 2011.

Fig. 5. a – DTM of the set of artillery forts (a later addition to the fortified town of Terežín which was constructed across the Labe river in mid-19<sup>th</sup> century), a result of ALS (March 2011). Current state of the monument which has been partly levelled (forts 1 and 4) is well illustrated by this way. Also, a dense network of former trackways and linear earthworks of which some may have been connected with the fort system is apparent. b – A view from the eastern side of the fort 3 (see fig. 5a) towards the Křemín Hill (A), to forts 5 (forest in the skyline marked as B) and 4 (marked as C) which is ploughed-out and visible only through white slightly undulated surface. Photographed on 25<sup>th</sup> March 2011.



Obr. 6. Digitální model reliéfu pravěkého hradiště Vladař na Žluticku (Karlovarský kraj), který je výsledným produktem lidarového (leteckého laserového) snímkování areálu (březen 2010); pohled od JZ. Dobře reprodukuje aktuální stav památky, resp. jejích dílčích komponent (tzv. akropole, která je jako nejvýše umístěný areál znázorněna modře; valy a příkopy na záp. a sev. straně stolové hory) a okolní krajiny.

Fig. 6. Digital 3D model of prehistoric hillfort Vladař (west Bohemia) which was produced from airborne laser scanned data acquired in March 2010. The image displays perfectly current state of the site and its individual components, such as the so-called acropolis situated in the highest part of the hillfort (coloured blue) and fortification system of ramparts and ditches in western and northern parts of the flat table hill.

**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 plužiny či zaniklé cesty.

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

**14 – Hemerské poleší.** V poleší Hemery na Bechyňsku je dochována řada mohylových pohřebišť z období pravěku a raného středověku. Přestože se jedná o velmi dobře prozkoumanou oblast<sup>2</sup>, díky LLS zde byly identifikovány zatím neregistrované objekty, a to zejména ojedinělé mohyly či jejich malé skupiny.

**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

<sup>2</sup> V letech 2009–2011 zde pod vedením O. Chvojky probíhal grantový projekt *Struktura osídlení mikroregionu říčky Smutné v době bronzové*.

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. Právě období časného jara je pro skenování za účelem vytváření modelů terénu nejvýhodnější, neboť vegetace je v tomto období dobře prostupná a zároveň již chybí sněhová pokrývka. V rámci této akce byla během jednoho dne zaměřena více než jedna miliarda bodů. Skenování proběhlo z výšky ca 600 m pomocí skeneru Riegl LMS-Q560 s deklarovanou výškovou přesností  $\pm 10$  cm a polohovou přesností  $\pm 30$  cm. Uvedená výška letu odpovídá hustotě měření ca 4 body/m<sup>2</sup>, což je zcela dostačující pro výpočet DMR s prostorovým rozlišením 1 x 1 m.

Polygony č. 7–14 byly podrobeny skenování 23. 3. 2011 za použití leteckého skeneru Riegl LMS-Q680i. Měření provedla brněnská společnost GEODIS. Měření proběhlo z výšky 900 m, což odpovídá hustotě měření ca 2–3 body/m<sup>2</sup>, tedy nižšímu rozlišení než u dat z r. 2010. Zároveň však byla pro účely srovnání část polygonu č. 12 skenována s pokrytím ca 10 bodů/m<sup>2</sup>.

Data byla dodána ve formátu ASCII/\*.asc, a to jak ve formě surových dat, tak filtrovaných podkladů pro DSM a DMR. Další zpracování dat (zejména výpočet DMR) probíhalo na univerzitním pracovišti. K výpočtu vlastního DTM z naměřených bodů byla použita metoda nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN). Následně byla pozorovaným stínovaným 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 zachovány v tak nízkém reliéfu, že při terénním povrchovém průzkumu je prakticky nelze rozpoznat (srov. *obr. 5a a 5b*).<sup>3</sup> Kromě zobrazení DMR pomocí funkce *hillshade* je vhodné – zejména kvůli prostorovému vjemu – zobrazovat DTM archeologických nemovitých památek také jako trojrozměrný perspektivní model (pomocí funkce 3D surface) (*obr. 6*).

Pro území NP ČŠ byly jako vstupní a podkladová data použity klasifikované a odfiltrované výstupy mezinárodního projektu Interreg IIIA GeNeSis (Geoinformační síť pro přeshraniční region národních parků Česko-saské Švýcarsko).<sup>4</sup> Laserovým skenerem bylo zaznamenáno ca 6 miliard bodů, ze kterých byl po přepočtu, kalibraci a filtraci v prostředí programu SCOP++ generován DMR s prostorovým rozlišením 1 m. Výstupy digitální kamery tvoří soubor kolmých ortosnímků s rozlišením 0,5 m v grafickém výstupu RGB a CIR. Poskytnutá data nebyla primárně pořízena ani určena k účelům archeologie.<sup>5</sup>

Kromě lidarových dat byly v mimovegetačním období pořízeny také šikmé letecké snímky vybraných areálů, které umožnily konfrontaci obou informačních zdrojů, resp. upřesnily interpretaci některých anomálií na DMR/DSM.

Součástí práce s výsledky analýzy lidarových dat je také jejich komparace s dokumentací evidovaných archeologických lokalit na území, které je předmětem výzkumu (ADČ/Archiv nálezových zpráv, odborné publikace),

<sup>3</sup> Při vytváření stínovaných modelů terénu se osvědčil program Surfer, který umožňuje parametry nasvícení operativně měnit v reálném čase.

<sup>4</sup> Projekt probíhal od ledna 2004 do prosince 2006 pod záštitou Katedry dálkového průzkumu Země Technické univerzity v Drážďanech. Na financování projektu se spolupodílelo Saské ministerstvo životního prostředí a zemědělství a dotační mezistátní organizace EU Interreg IIIA. Data byla pořízena, technikou laserového skenování (tvorba reálného zemského povrchu) doplněného o výstupy z digitální multispektrální kamery (ortosnímky pořízených v identickém časovém horizontu jako laserové skenování), a to v intervalu jedenácti dnů v dubnu 2005 firmou TopoSys GmbH.

<sup>5</sup> Vstupní data byla v r. 2009 prostřednictvím Správy Národního parku České Švýcarsko smluvně poskytnuta Technickou univerzitou v Drážďanech Katedře archeologie FF ZČU v Plzni.

a dále práce se starými mapami (zejm. první a druhé vojenské mapování, stabilní katastr), případně s ikonografickými prameny. Nejdůležitější je ovšem následná práce v terénu, kdy jsou anomálie (objekty), které jsou na lidarových snímcích interpretovány pozitivně, ověřovány povrchovým průzkumem (tzv. *ground-truthing*).

### 5. Terénní výzkum: ověřování interpretovaných lidarových dat a geodetické zaměřování vybraných areálů/objektů

Kromě prostého vizuálního průzkumu sledovaných oblastí jsme provedli kontrolní měření vybraných archeologických situací v terénu, a to v polygonu *Štáhlavsko*. Konkrétně se jednalo o mohylu č. 5 na pohřebišti Hádky/Javor (k. ú. Milínov) a o středověké tvrziště Javor (k. ú. Kornatice). V obou případech byla za pomoci totální stanice získána data pro vytvoření DMR (srov. *John 2008*), což umožnilo srovnání výstupů pozemního měření a LLS.

Na *obr. 7: B* a *7: C* můžeme oba výstupy porovnat na příkladu reliktu mohyly ze střední doby bronzové, kterou prozkoumal na pohřebišti Hádky/Javor F. X. Franc v r. 1878 (*Franc 1988*, 106). Za pozornost stojí i řada pozůstatků milířů, které jsou mezi mohylami rozptýleny (viz *obr. 7: A*).

Pozemní měření potvrdilo, že výsledky LLS jsou nejen dostatečně přesné (celková výšková chyba do 10 cm), ale i velmi detailní. Na plánu vzniklém z dat LLS (*obr. 7: B*) je sice patrná jistá generalizace, ta je ale nepochybně způsobena úpravou naskenovaných bodů do pravidelného rastru 1 x 1 m. Celkový tvar reliktu však odpovídá, což vyvolává otázku, zda bude v budoucnosti pozemní měření podobných objektů vůbec smysluplné, budou-li k dispozici podrobná lidarová data (více než 1 bod/m<sup>2</sup>). Tato otázka si vyžádá ještě další zkoumání na různých typech lokalit a reliktů. Lze předpokládat, že zachycení úzkých či drobných objektů (např. zdíva) bude v rámci metody LLS většinou problematické.

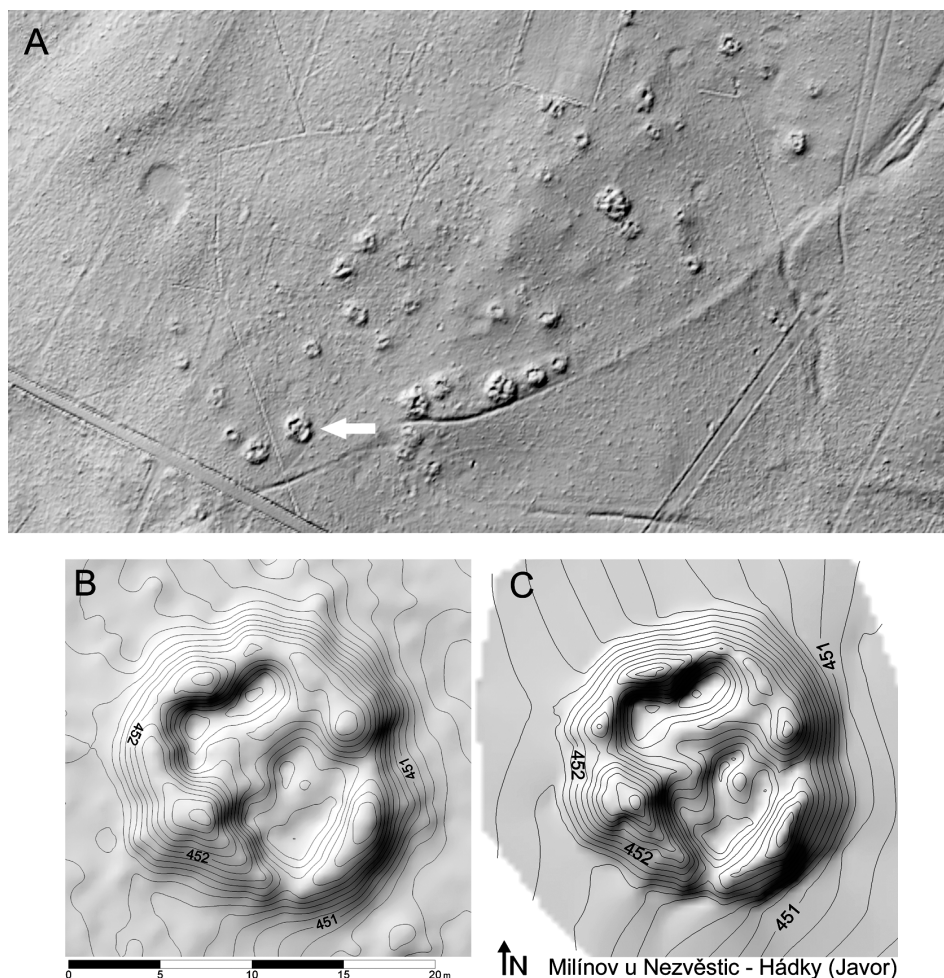
Nejzrozsáhleji byla v r. 2010 terénními postupy (povrchovou prospekci, resp. geodeticko-topografickým průzkumem) vytěžena část území Národního parku České Švýcarsko. Na území pokrytém lidarovými snímky byly pomocí archivní rešerše vybrány jednak výrobní areály (sklárna, dehtárna, vápenka), jednak sídelní areál – zaniklá vesnice včetně extravilánu. Zároveň byl výzkum koncipován jako analyticko-verifikační z hlediska terénního ověřování nejasných či obtížně interpretovatelných areálů a objektů. Ve druhé fázi byl výzkum orientován na podrobnou analýzu a mapování vybraných objektů za použití nedestruktivních analytických a mapovacích postupů.<sup>6</sup>

Konkrétně byly zkoumány tyto areály: *Doubická sklárna*, *Sklářská cesta Kyjov – Doubice* a *Doubická vápenka* (okr. Děčín). Základní postup zpracování dat probíhal tak, že v heuristické fázi byla vytvořena výchozí informační základna tvořená písemnými a archeologickými prameny, na jejichž základě byla provedena primární analýza lidarových dat a obecná lokalizace prostorových vlastností jednotlivých objektů (v prostředí softwaru GIS).

Jako případová studie byl vybrán areál *částečně zaniklé vesnice Hely* (německy Nassedorf, k. ú. Krásná Lípa, okr. Děčín), o níž první zmínka pochází z r. 1614 v souvislosti s nedalekou sklářskou osadou a hutí Doubice. Vesnice zanikla v 50. letech 20. stol. a v následujícím desetiletí byla srovnána se zemí. V současnosti jsme schopni díky lidarovým snímkům mapovat do velké míry území intravilánu této vesnice v podobě viditelných reliktů, stejně tak je výjimečně dobře detekovatelný původní extravilán vsi. To je metodickým předpokladem pro vyhodnocení míry archeologizace jednotlivých objektů a situací pomocí analýzy dat dálkového průzkumu Země (lidar, ortofotografie), historických pramenů a prostřednictvím terénních nedestruktivních archeologických metod (především geodetická měření, rekognoskace a vizuální průzkum terénu, dílčí geofyzikální měření a nahodilé povrchové sběry v bezprostředním okolí objektů).

DMR také přináší důležité informace o stavu zachování archeologických památek a jejich narušení, který může být následně dokumentován přímo v terénu. Učinili jsme tak např. u západního ukončení mohutného opevnění hradiště Hrádek u Libochovan (viz *obr. 8a* a *8b*).

<sup>6</sup> Obou výzkumných fází se zúčastnili studenti 2. ročníku bakalářského a 1. ročníku magisterského stupně Katedry archeologie Západočeské univerzity v Plzni v rámci plnění jejich povinné praxe.

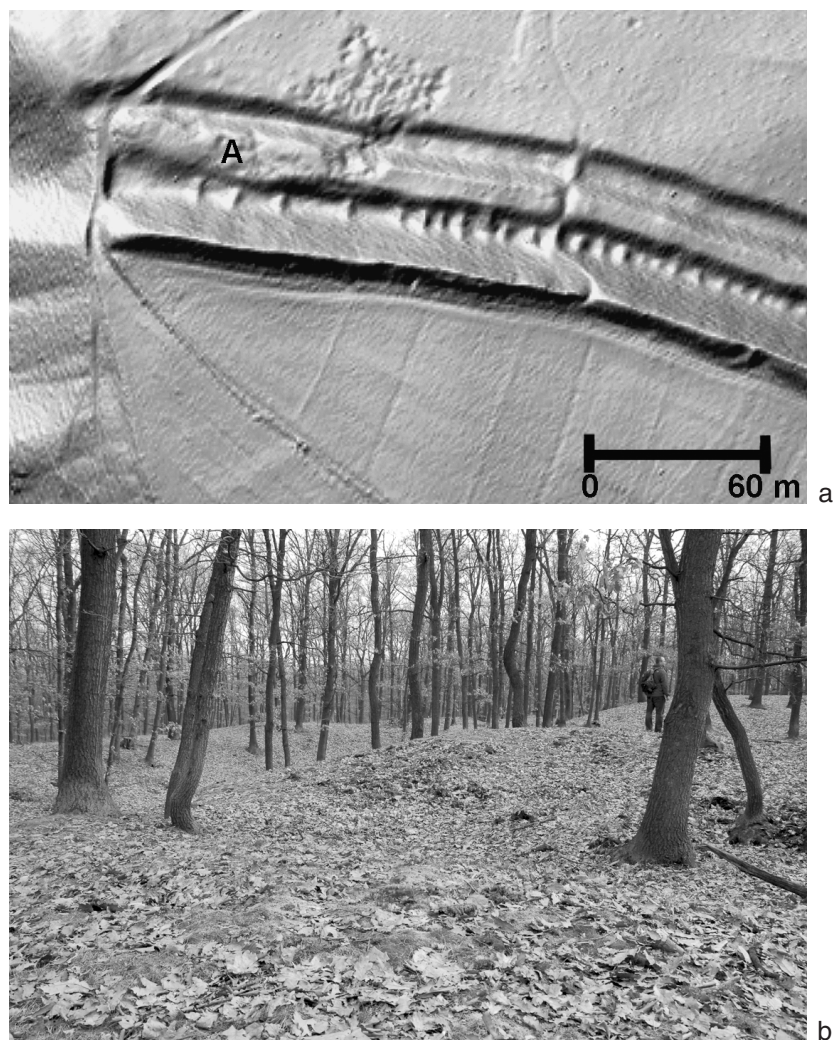


Obr. 7. Mohylové pohřebiště Milínov-Hádky/Javor (okr. Plzeň-jih). Porovnání výsledků leteckého laserového skenování (B) a podrobného pozemního měření (C) na příkladu mohyly č. 5 (označena šipkou na celkovém plánu lokality – A). Krok vrstevnic na plánech B a C je 10 cm.

Fig. 7. Barrow cemetery Milínov-Hádky/Javor (distr. Plzeň-south, western Bohemia). Comparison of results acquired by means of ALS (B) and via detailed ground survey by total station (C) at barrow No. 5. The barrow is marked by arrow on the general site plan (A). The contour equidistance on plans B and C is 10 cm.

## 6. Náklady na pořízení lidarových dat a srovnání s náklady na pozemní zaměření

Důležitou součástí projektu, deklarovanou již v žádosti o přidělení grantových prostředků na jeho realizaci, je analýza nákladů spjatých se získáním výškopisného digitálního modelu terénního reliéfu prostřednictvím leteckého laserového snímkování a srovnání finanční náročnosti na pořízení tohoto typu dat a dat pořízených pomocí klasického terénního geodetického měření. U lidarových snímků se jedná o náklady nutné k pořízení jednak surových dat a jednak odfiltrovaných podkladů pro DSM a DTM, které jsou výsledkem (technického) předzpracování surových dat. V ceně zakázky dodávané v této podobě je zahrnuta částka za použití a amortizaci přístrojů a zařízení, které jsou



Obr. 8. Hrádek u Libochovan (okr. Litoměřice). Detailní pohled na západní ukončení mohutné fortifikace pravěkého hradiště. Lidarový snímek (a) dokládá význam leteckého laserového skenování pro účely rychlé a přesné trojrozměrné dokumentace rozsáhlých nemovitých archeologických památek, jejichž pozemní zaměrování je v mnoha ohledech náročnější. Na obrázku je dobře patrný systém příčných násypů situovaných na dně vnitřního příkopu a porušení koruny středního valu a plochy přiléhající k vnější hraně severního příkopu druhotnými zásahy (nelegální výkopy, těžba?). A – místo pořízení pozemní fotografie 8, která dokumentuje reliéf porušeného valu v pohledu od Z k V.

Fig. 8. Hrádek near Libochovany (distr. Litoměřice). Detailed DTM (a) displaying western end of a large fortification system (double rampart and ditch) of prehistoric hillfort. This image indicates the importance of ALS for the purpose of fast and precise 3D documentation of vast archaeological monuments whose ground-based survey and mapping is in most respects more time- and money consuming. The DTM well documents a system of small linear earthworks placed at the bottom of the internal ditch, and also the intervention of the top of the southern rampart and of the area situated north of the outer ditch (results of illicit digging and stone extraction respectively). A – point from which the field (ground) photography (b) was taken (viewing to the east).

majetkem dodavatelské společnosti (vlastní skener, stanice GPS, letadlo), za letové hodiny, práci posádky letadla během sběru dat (pilotáž, obsluha měřících přístrojů) a následnou přípravu dat, která jsou předána zadavateli zakázky (v našem případě Katedra archeologie ZČU v Plzni) na externím velkokapacitním nosiči digitálních dat (harddisku).

Jak vyplývá z údajů uvedených v kap. 4, zvolili jsme k pořízení souborů lidarových dat každý rok jiného zadavatele. V prvním roce projektu (tj. 2010) to byla jedna z předních evropských společností v oblasti LLS *Milan Geoservice GmbH* ([www.milan-geoservice.de](http://www.milan-geoservice.de); v posledních letech provedla tato německá společnost např. lidarové snímkování římského limitu na Rýnu a Dunaji, a to při velkém prostorovém rozlišení prostřednictvím nízko letícího vrtulníku). Data ze šesti polygonů o celkové rozloze 60 km<sup>2</sup> (viz tab. v kap. 3), jejichž důležité kvalitativní parametry uvádíme v kap. 4, účtovala uvedená společnost v celkové ceně (vč. DPH) 314 000 Kč, takže průměrná cena za 1 km<sup>2</sup> se pohybuje kolem 5200 Kč.

Ve druhém roce projektu jsme pro srovnání zvolili za poskytovatele brněnskou společnost *GEODIS Brno s.r.o.* ([www.geodis.cz](http://www.geodis.cz)), která je první českou soukromou institucí disponující zařízením pro mapování terénu metodou LLS (laserový skener, letadlo Cessna 206, GPS). Za surová a filtrovaná data z celkové plochy 63 km<sup>2</sup> (rozdělené do osmi polygonů), jejichž technické parametry byly kvalitativně o něco nižší než v případě první zakázky (při porovnání kvality výsledného DTM však tento rozdíl nehraje velkou roli), bylo uhrazeno 344 000 Kč (z toho částka 57 000 Kč tvoří DPH). *GEODIS* deklaruje cenu za data z polygonu o velikosti 10 km<sup>2</sup> 27 000 Kč (bez DPH), v tom ale nejsou započítány náklady na letecké práce; ty činily 47 000 Kč za celkem nalétaných 500 km (trasa Brno – přelety mezi jednotlivými polygony a čas nalétaný při jejich skenování – Brno). Průměrná cena za pořízení lidarových dat z 1 km<sup>2</sup> tak u *GEODISU* vychází na ca 5400 Kč, a je tedy zhruba o 4 % vyšší než u společnosti *Milan Geoservice GmbH*. Je nasnadě, že např. pro potřeby moravské archeologie je výhodné orientovat se na poskytovatele, který má základnu prakticky v centru Moravy, zatímco pro snímkování zájmových polygonů v Čechách se zdá být o něco výhodnější využívat služeb společnosti *Milan Geoservice GmbH*, která má jednu ze základen (včetně letiště) v Sasku, vzdálenou asi 70 km vzdušnou čarou od českoněmeckých hranic. V této souvislosti je třeba zvláště upozornit na to, že náklady na letecké práce, resp. délka času potřebného k přeletům a k vlastnímu snímkování určitých polygonů poměrně výrazně ovlivňují výslednou cenu zakázky, takže v tomto směru je třeba připravovat a vybírat plochy určené k laserovému skenování co nejpečlivěji (tím míníme jejich vzájemnou polohu, resp. vzdálenost, a také jejich tvar, u něhož platí, že čím delší a užší je, tím méně průletů – a ve výsledku kratší čas – je potřeba k jeho naskenování s ohledem na finanční prostředky, které jsou k tomuto účelu k dispozici).

Pokud jde o cenu dnes již komerčně nabízeného a výše uvedeného digitálního modelu reliéfu (terénu) ČR 4. generace (DMR 4G), na jaře 2011 účtoval jeho poskytovatel Zeměměřický úřad za jeden mapový list SM 5 (resp. výřez o velikosti 2,5 x 2 km) 500 Kč (vč. DPH). Výhodu nízké ceny této kategorie dat je ovšem třeba hodnotit s ohledem na jejich kvalitu, resp. stupeň prostorového rozlišení, které je nepoměrně horší, než je tomu u dat pořízených u uvedených společností.

Při pokusu porovnat náklady, které je třeba vynaložit na práci s digitálním modelem reliéfu odvozeným z leteckých lidarových dat na jedné straně a z dat odvozených z pozemního geodetického zaměřování zemského povrchu na straně druhé, je samozřejmě třeba hodnotit několik faktorů, které vstupují do hry. Z těch důležitých je to jednak kvalita dat, čímž se míní jejich prostorové (geometrické) rozlišení, resp. jejich polohová a výšková přesnost, a jednak práce vynaložená na shromáždění surových dat a na jejich zpracování do podoby výškopisné mapy/plánu, resp. digitálního modelu reliéfu. Čas potřebný k dosažení finálního produktu je vyjádřen konečnou cenou zakázky, jejíž výše odráží hodnotu vynaložené práce a materiální náklady vložené do zakázky poskytovatelem.

Pro srovnání efektivity leteckého lidarového a pozemního geodetického zaměřování máme k dispozici velmi dobrý příklad. Je jím právě hradiště Hrádek u Libochovan (okr. Litoměřice; viz jeho stručný popis v kap. 3, polygon 1 – Porta Bohemica), které shodou okolností v r. 2007 zaměřovala společnost *GeoNet Praha, v.o.s.*, pro potřeby výzkumného projektu Archeologického ústavu AV ČR. Z konzultací s P. Hulíkem, vedoucím týmu, který hradiště a jeho okolí zaměřoval, vyplynuly tyto

skutečnosti: 1. Celkově bylo polohově a výškově zaměřeno 57,5 hektarů, tedy téměř trojnásobek rozlohy samotného hradiště (ca 20 hektarů), a to ve velmi dynamickém terénu s velkým převýšením (mírně svažité terén vlastní hradiště, geomorfologicky přirozeně vyčleněná poloha akropole na Tříkřížovém vrchu, víceméně strmé skalní stěny svahů labského údolí, břehy Labe); 2. Zaměřování probíhalo po dobu přibližně dvou měsíců a podílel se na něm tým deseti pracovníků; 3. Výsledným produktem geodetického zaměření hradiště a jeho okolí byl polohopisný a výškopisný plán ve vztáženém měřítku 1 : 500 a digitální model terénu, kde přesnost zaměřených bodů jak v polohopisu, tak ve výškopisu dosahuje minimálně 5 cm (a to jenom proto, že se jedná převážně o měření na nezpevněném povrchu, takže ve skutečnosti jsou body zaměřeny pravděpodobně ještě o něco přesněji; pro srovnání připomínáme již uváděnou absolutní přesnost u námi pořízených lidarových dat: výšková přesnost  $\pm 10$  cm, polohová přesnost  $\pm 30$  cm); 4. Cenu za výsledný produkt je v současné době možné stanovit spíše v intervalu než v podobě konkrétní sumy. Je to především proto, že do ceny se odráží aktuální poptávka po zakázkách na geodetické práce, která souvisí s momentální makro- a mikroekonomickou situací potenciálních zadavatelů, s počtem aktuálně existujících zeměměřičských firem, s roční dobou, v níž jsou zakázky požadovány apod. Z těchto důvodů je možné vyjádřit cenu za zaměření plochy hradiště Hrádek u Libochovan a jeho okolí v intervalu 140–160 tisíc Kč.

Z uvedených informací vyplývá, že i když absolutní polohopisná přesnost je výrazně vyšší u geodetického než leteckého laserového zaměřování, u výškopisu je tento rozdíl již menší. Z hlediska potřeb archeologie na přesnost zaměření tak rozsáhlých areálů, jakými jsou hradiště o rozloze několika desítek hektarů, je však podle našeho mínění přesnost zaměření v řádu jednoho nebo několika málo decimetrů téměř zanedbatelná. Porovnáme-li v kontextu tohoto konstatování prostředky, které je nutné vynaložit na provedení geodetického zaměření a lidarového snímkování dvacetihektarového hradiště, je evidentní, že celkové náklady vynívají výrazně ve prospěch druhé uvedené metody. Zatímco pozemní zaměření terénního reliéfu plochy o velikosti jednoho hektaru na hradišti Hrádek u Libochovan vychází na ca 3000 Kč, letecké lidarové skenování téhož hradiště a jeho širokého zázemí (ca 4 km<sup>2</sup>) vyšlo na 21 000 Kč (= 53 Kč/hektar). Významným faktorem podporujícím jednoznačně efektivitu tvorby DMR pomocí leteckých lidarových dat je samozřejmě také čas: skenování konkrétního zájmového areálu/polygonu trvá i s doletem desítky minut až 1–2 hodiny (srov. výše uvedenou dvouměsíční práci v terénu pro poměrně početný tým pracovníků), načtení surových a dat a jejich filtrace je obvykle záležitostí několika dní, maximálně 1–2 týdnů.

## 7. Závěr

Jedním z důležitých cílů projektu je získání zkušeností se zpracováním a využitím dat LLS, neboť ty v naší archeologii zatím postrádáme. I proto se průzkum zatím zaměřil především na oblasti, které jsou z hlediska terénních relikvů archeologické povahy relativně dobře prozkoumány. Nelze tedy očekávat, že by letecké skenování takových prostorově omezených oblastí přinesl objev většího množství dosud neznámých památek. Již nyní je ale zřejmé, že tato metoda přináší revoluci do dokumentace terénních relikvů, zejména v zalesněných oblastech. Jedná se o postup, který je výrazně rychlejší a ekonomičtější než pozemní měření a při jeho plošné aplikaci lze očekávat značný pokrok v dokumentaci a mapování archeologického dědictví, zejména u rozsáhlých památek, jako jsou např. úvozové systémy zaniklých cest.

V první řadě je nutné kriticky nahlížet na rozsáhlý okruh faktorů, jež více či méně ovlivňují kvalitativní a kvantitativní aspekty výstupů z lidarových snímků. K základním faktorům lze řadit parametry skenování, technický postup při zpracování surových dat, softwarové a hardwarové nároky velkoobjemových formátů dat, komplementárnost aplikovaných analytických metod, přírodní charakter zájmového území. Oproti tomu je potřeba zmínit pozitivní aspekty využití leteckého laserového skeneru, zejména časové úspory vzhledem k velkoplošnému rozsahu pokrytí vybraného území, možnosti aplikace této metody v zalesněných oblastech, detekce objektů v celé ploše, včetně terénu s relikty, které lze jinak běžnými metodami obtížně lokalizovat, možnost analýzy rozsáhlých krajinných transektů, a tedy syntézy prostorových vztahů vybraných archeologických pramenů, příležitost revidovat starší archeologické situace a zkoumat je novými prostředky. Je navíc pravděpodobné, že v nedaleké



budoucnosti by lidarová data pro území České republiky měla být obecně dostupným zdrojem informací, a výrazně tak obohatit možnosti archeologického výzkumu, evidence, dokumentace a ochrany památek.

*Článek vznikl v rámci projektu: Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování (Grantová agentura České republiky – P405/10/0454).*

## Literatura

- Bofinger, J. – Hesse, R. 2011:* As far as the laser can reach... Laminar analysis of LiDAR detected structures as powerful instrument for archaeological heritage management in Baden-Württemberg, Germany. In: D. Cowley ed., Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. EAC Occasional Paper No. 5, Budapest: Archaeolingua, 161–172.
- Brázdil, K. 2009:* Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. Geodetický a kartografický obzor 55/97–7, 145–151.
- Campana, S. 2011:* „Total Archaeology“ to reduce the need for Rescue Archaeology: The BREBEMI Project (Italy). In: D. Cowley ed., Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. EAC Occasional Paper No. 5, Budapest: Archaeolingua, 33–42.
- Campana, S. – Forte, M. eds. 2006:* From Space to Place. 2<sup>nd</sup> International Conference on Remote Sensing in Archaeology. BAR International Series 1568. Oxford: Archaeopress.
- Crutchley, S. 2010:* The Light Fantastic. Using Airborne Lidar in Archaeological Survey. Swindon: English Heritage Publishing.
- Devereux, B. J. – Amable, G. S. – Crow, P. 2008:* Visualisation of lidar terrain models for archaeological feature detection. Antiquity 82, 470–479.
- Dolanský, T. 2004:* Lidary a letecké laserové skenování. Acta Universitatis Purkynianae n. 99. Ústí nad Labem: UJEP FŽP.
- Dolanský, T. – Gasior, M. 2006:* Laserové skenování na území Českého Švýcarska. GEOS 2006. Praha: VÚGTK.
- Doneus, M. – Briese, C. 2006a:* Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. In: M. Ioannides – D. Arnold – F. Niccolucci – K. Mania eds., The 7<sup>th</sup> International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST, Aire-La-Ville, 155–162.
- 2006b: Full-waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. In: Campana – Forte eds. 2006, 99–106.
- 2011: Airborne laser scanning in forested areas – potential and limitations of an archaeological prospecting techniques. In: D. Cowley ed., Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. EAC Occasional Paper No. 5, Budapest: Archaeolingua, 59–76.
- Doneus, M. – Briese, C. – Kührtreiber, T. 2008:* Flugzeuggetragenes Laserscanning als Werkzeug der Archäologischen Kulturlandschaftsforschung. Archäologisches Korrespondenzblatt 38/1, 137–156.
- Franc, F. X. 1988:* Štáhlauer Ausgrabungen. Ed. V. Šaldová. Praha: AÚ ČSAV.
- Georges-Leroy, M. 2011:* Airborne laser scanning for the management of archaeological sites in Lorraine (France). In: D. Cowley ed., Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. EAC Occasional Paper No. 5, Budapest: Archaeolingua, 229–234.
- Gojda, M. 2005:* Lidar a jeho možnosti ve výzkumu historické krajiny. Archeologické rozhledy 57, 806–810.
- 2007: Lety do minulosti – Flights into the Past. Průvodce výstavou. Praha: Národní muzeum.
- Gojda, M. – John, J. 2009:* Dálkový archeologický průzkum starého sídelního území Čech – Konfrontace výsledků letecké prospekce a analýzy družicových dat. Archeologické rozhledy 61, 467–492.
- Hesse, R. 2010:* LiDAR-derived local relief models – a new tool for archaeological prospecting. Archaeological Prospection 17, 67–72.
- Humme, A. – Lindenbergh, R. – Sueur, C. 2006:* Revealing celtic fields from Lidar data using kriging based filtering. In: H.-G. Maas – D. Schneider eds., Proceedings of the ISPRS Commission, vol. 36, part 5, Dresden, 22–28.
- Chan-Chang, W. ed. 2011:* Laser Scanning. Theory and Applications. Intech: Open Access Publisher.

- John, J. 2008: Počítačová podpora dokumentace terénních reliktvů v archeologii. In: Počítačová podpora v archeologii 2. Brno – Praha – Plzeň: Masarykova univerzita, Univerzita Karlova – Západočeská univerzita v Plzni, 254–262.
- Kubů, F. – Zavřel, P. 2011: Der Goldene Steig in Autopsie und Empirie: Archäologische Einsichten. In: F.-R. Erkens Hrsg., 1000 Jahre Goldener Steig, Passau: Klinger, 113–141.
- Majer, A. 2004: Mapování velkých územních celků s užitím globálního pozičního systému. In: Archeologické výzkumy v jižních Čechách – Supplementum 1, České Budějovice: Jihočeské muzeum, 307–320.
- Rožmberský, P. 2006: Soupis zaniklých středověkých vesnic na Rokycansku. In: P. Vařeka a kol., Archeologie zaniklých středověkých vesnic na Rokycansku, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 13–56.
- Rutar, G. – Črešnar, M. 2011: Reserved optimism: preventive archaeology and management of cultural heritage in Slovenia. In: D. Cowley ed., Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. EAC Occasional Paper No. 5, Budapest: Archaeolingua, 259–263.
- Shaw, R. – Corns, A. 2011: High resolution LIDAR specifically for archaeology: are we fully exploiting this valuable resource? In: D. Cowley ed., Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. EAC Occasional Paper No. 5, Budapest: Archaeolingua, 77–86.
- Sittler, B. – Schellberg, S. 2006: The potential of LIDAR in assessing elements of cultural heritage hidden under forest canopies or overgrown by vegetation: possibilities and limits in detecting microrelief structures for archaeological survey. In: Campana – Forte eds. 2006, 117–122.
- Smetánka, Z. – Klápště, J. 1981: Geodeticko – topografický průzkum zaniklých středověkých vsí na Černokostecku. Památky archeologické 72, 416–458.
- Valečka, J. a kol. 2005: České Švýcarsko. Geologie národních parků České republiky. Praha: Český geologický ústav.
- Waldhauser, J. 1981: Keltské rotační mlýny v Čechách. Památky archeologické 72/1, 153–221.

## Archaeological survey of landscape by means of airborne laser scanning Interim report upon the first Czech project

The project *Potential of archaeological landscape survey in the Czech Republic by means of airborne laser scanning (LIDAR)* may be – from the viewpoint of analysis of airborne laser scanning (ALS) use in the Czech geographic conditions – described as a certain form of a pioneering study. The principal aim is to assess the effectiveness and potential of the new method in the heuristic (identification and evidence of archaeological sights), mapping and documentation spheres, as well as to evaluate the degree to which this technology is efficient, especially in terms of the quality of the obtained results and their dependence on the amount of expended resources. Comparison with traditional methods, the output of which consists in similar digital terrain models (ground survey), is provided. The project's duration is between the years 2010–2012. The project is carried out at the Department of Archaeology of the University of West Bohemia in Pilsen.

The criteria for selection of the particular areas to be scanned were subject to various factors – the effort to enable comparison of mapping and documentation of extensive areas (regions, geomorphologic units, landscape transects), medium-sized areas (hillforts, structural-historical units) and smaller areas (deserted medieval villages, barrow sites, modern field fortification systems etc.) on one hand; on the other hand the selection focused on as extensive and varied representation of both prehistoric and historic sights as possible.

The main reason why Czech archaeology has so far not had the opportunity to use the ALS technique was the very limited, almost none, coverage of the Czech Republic by LIDAR imagery. The present project may therefore be considered as a certain breakthrough of the ALS application into field archaeological survey, documentation and mapping of archaeological heritage from the viewpoint of purpose-retrieval of primary data for selected regions and sites; this in turn brings vast potential of complex study of extensive landscape units. The project's results are relevant also because of the recently launched scanning of the entire Czech Republic, aiming at creation of a new elevation model by means of ALS.

The particular regions of interest to the project can be divided into two main groups:

1. Areas that have been mapped by means of ALS for the first time – 14 test polygons, including a wide range of typological features (barrow burial sites, hillforts, mining areas, castles, forts, deserted medieval villages, farm-tracks, ridottos, etc.)

2. Areas that were mapped in the past by means of ALS, but primarily for purposes other than archaeological; the obtained data can be used to identify archaeological aspects of such sites. This concerns the area of the National park Bohemian Switzerland with its unique geo-relief landscape nature that had in the past and has up to now great influence on the evolution of demographic aspects of this region.

The constituent data were obtained in several time horizons. Some polygons were photographed by the German company Milan Geoservice GmbH in March 2010 using the scanning device Riegl LMS-Q560 at flight level 600 m, density 4 points/m<sup>2</sup> which corresponds with the resulting resolution of 1x1 m<sup>2</sup> for the produced DTM. The remaining polygons were scanned by the Geodis company from Brno, using scanner Roegl LMS-Q680i at flight level 900 m, density 1 point/m<sup>2</sup> and (in one case) 10 points/m<sup>2</sup>. The raw data, as well as the filtered data (DSM, DTM), were both handed in in the ASCII/\*.asc formate. The area of the Bohemian Switzerland National park was scanned between 2004–2006 within the international project Interreg IIIA GeNeSis (Geoinformation network for cross-border national parks Bohemian-Saxon Switzerland) under the auspices of the Institute of Remote Sensing of the Earth of the Dresden University of Technology. The particular outputs were in the first phase subject to heuristic analysis in the form of comparison with documentation of the known archaeological sites within the individual polygons, as well as with historic maps and plans. The subsequent, very important step is the verification of the individual features in the field by means of surface survey, both visual reconnaissance and control measurements of selected archaeological situations, in this case the barrow burial site Hádky/Javor (Milínov) and the medieval fort Javor (Kornatice). Comparison of the terrestrial survey results and the results obtained by the ALS proved sufficient precision of this innovative method. The question of future effectiveness of terrestrial survey in comparison with the ALS use possibility (naturally if suitable conditions of data recording can be set) must therefore be posed. Similar verification technique applied also to the area of the National park Bohemian Switzerland during a two week's terrain survey of the area, focusing mainly on the production precincts of the region, detected by DTM (glassworks, tar workshops), and the settlement structures, in particular the after 1945 partly deserted Hely (Nassendorf) village where the ALS results enable us to map and record both the built-up areas and the surroundings of the given site.

The project also aims at critical evaluation of the effectiveness and potential of ALS use in archaeology and in particular situations where a number of aspects influencing the final data set must be taken into account (photography parameters, raw data processing technology, software and hardware requirements of large data sets, complementarily of applied analytical methods, landscape type of the area of interest). The undisputable asset of this technique for archaeology consists in time savings at mapping and analysis of extensive research areas and in its serviceability in woodlands and mountainous landscapes. To give an idea of the financial demands, the costs of ALS survey (approx. 2 €/hectare) and the standard geodetic survey (approx. 120 €/ha) of the same site are compared.

English by *Sylvie Květinová*

MARTIN GOJDA, *Katedra archeologie, Západočeská univerzita v Plzni, Sedláčkova 15, CZ-306 14 Plzeň  
gojda@kar.zcu.cz*

JAN JOHN, *Katedra archeologie, Západočeská univerzita v Plzni, Sedláčkova 15, CZ-306 14 Plzeň  
jjohn@kar.zcu.cz*

LENKA STARKOVÁ, *Katedra archeologie, Západočeská univerzita v Plzni, Sedláčkova 15, CZ-306 14 Plzeň  
lstarkov@kar.zcu.cz*