

Univerzita Karlova

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie - kartografie



Miroslav Matthes

Detekce archeologických nalezišť z dat ULS/ALS

Detection of archeological sites by means of ULS/ALS

Bakalářská práce

Vedoucí práce/Školitel: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Praha, 2021

Vysoká škola: Univerzita Karlova v Praze

Fakulta: Přírodovědecká

Katedra: Aplikované geoinformatiky a kartografie

Školní rok: 2020/2021

Zadání bakalářské práce

pro Miroslava Matthesse

obor Geografie - kartografie

Název tématu: Detekce archeologických nalezišť z dat ULS/ALS

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je ověřit možnosti detekce mohylových hřebišť v zalesněném terénu z dat laserového skenování pořízených z UAV nosiče (ULS). Jako modelové území byla vybrána lokalita raněstředověkých mohylových pohřebišť Klobásná u Veselí nad Lužnicí. K dispozici budou ULS data ze dvou časových horizontů (listopad 2020 a březen 2021) a digitální model terénu DMR 5G. Postup řešení:

1. Rešerše literatury na téma detekce mohylových pohřebišť v zalesněném terénu z ULS dat,
2. Seznámení se s lokalitou Klobásná: rešerše archeologických pramenů včetně mapových podkladů, vlastní terénní průzkum včetně lokalizace mohyl ve vymezených zájmových územích pomocí GNSS,
3. Analýza georeferencovaných bodových mračen pořízených z ULS (software CloudCompare, LasTools, QGIS) a analýza dat DMR 5G,
4. Porovnání výsledku analýz bodových mračen s terénním průzkumem,
5. Zhodnocení možností detekce mohyl z dat ULS, praktická doporučení pro navazující průzkumy (hustota bodového mračenja, období pro snímkování apod.).

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Rozsah průvodní zprávy: cca 40 - 60 stran

Seznam odborné literatury:

Menšík, P. (2008). Mohylová pohřebiště na Táborsku. *Archeologické výzkumy v jižních Čechách*, 21, 33-58.

Risbøl, O., Gustavsen, L. (2018). LiDAR from drones employed for mapping archaeology—Potential, benefits and challenges. *Archaeological Prospection*, 25(4), 329-338.

Opitz, R.S.; Cowley, D. (Eds.) (2013): Interpreting Archaeological Topography: Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation; Oxbow Books: Oxford, UK; Oakville, CT, USA.

Štular, B., Kokalj, Ž., Oštir, K., Nuninger, L. (2012). Visualization of lidar-derived relief models for detection of archaeological features. *Journal of archaeological science*, 39(11), 3354-3360.

Devereux, B. J., Amable, G. S., Crow, P. (2008). Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, 82(316), 470-479.

Devereux, B. J., Amable, G. S., Crow, P., Cliff, A. D. (2005). The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity*, 79(305), 648-660.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 15. 1. 2020

Termín odevzdání diplomové práce: podzim 2021

Platnost tohoto zadání je po dobu jednoho akademického roku.

.....
Vedoucí diplomové práce

.....
Vedoucí katedry

V Praze dne: 1.12.2020

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 29. 07. 2021

Miroslav Matthes

podpis studenta

Abstrakt

Nové technologie umožňují archeologům prozkoumávat místa, která dříve byla jejich zrakům skryta. Zejména zalesněné oblasti byly dříve pro archeologický průzkum velice obtížným terénem. V posledních letech však technologie LiDARu tento problém mění spíše ve výhodu, vzhledem ke konzervační schopnosti lesa. Cílem této práce je ověřit možnosti detekce mohylových pohřebišť v zalesněném terénu z LiDARových dat pořízených z UAV nosiče a z letadla. V práci bude úspěšnost detekce těchto dvou typů dat vzájemně vizuálně porovnána v rámci jednotlivých, v archeologii běžně používaných vizualizačních technik. Výsledky budou dále porovnány s terénním měřením.

Klíčová slova: LiDAR, mohylové pohřebiště, UAV, LLS, bodové mračno

Abstract

New technologies allow archaeologists to explore places that were previously hidden from their view. In recent years, however, LiDAR technology has turned this problem more into an advantage, given by the preservative capacity of the forest. The aim of this work is to verify the possibilities of detection of mound burial grounds in wooded terrain with the help of LiDAR data obtained from an UAV and from an aircraft. In this work, the success of the detection of these two types of data will be visually compared by means of visualization techniques commonly used in archeology. The results will be further compared with field measurements.

Klíčová slova: LiDAR, mound burial, UAV, ALS, point cloud

ÚVOD	7
1. TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1. Princip laserového skenování	8
1.2. Technologie skenování a její použití v zalesněných oblastech	9
1.2.1. Konvenční laserové skenery	10
1.2.2. Full waveform skenery	11
1.3. Zpracování bodového mračka	12
1.4. Vizualizace a interpretace bodového mračka	13
1.4.1. Hill shading	14
1.4.2. Slope gradient	16
1.4.3. Openness	16
1.4.4. Sky view factor	18
1.4.5. Local relief models	19
1.5. Výzkumy prováděné v oblasti laserového skenování v zalesněných oblastech	20
2. MOHYLOVÉ KULTURY	22
2.1. Historie mohylových kultur na našem území	22
2.1.1. Keltská historie v Evropě	22
2.1.2. Germánská historie v Evropě	25
2.1.3. Slovanská historie v Evropě	26
2.2. Mohylová pohřebiště na Táborsku	28
2.3. Lokality mohylových pohřebišť okres Tábor	29
3. PRAKTICKÁ ČÁST	31
3.1. Zkoumané území	31
3.2. Popis vstupních dat	33
3.3. Software použitý pro zpracování vstupních dat	34
3.3.1 funkce lasnoise	35
3.3.2. funkce lasground_new	35
3.3.3. funkce lasclassify	36
3.4. Lokalizace mohyl v bodovém mračku	37
3.5. Lokalizace mohyl v terénu	39
3.6. Výsledky	39
4. DISKUZE	40
5. ZÁVĚR	43
Použitá literatura	45
PŘÍLOHY	51

ÚVOD

Píše se rok 1827. Jan Laufberger, později známý jako první amatérský archeolog, klečí nad právě vykopaným hrobem a něco z něj vyjímá. V rukou mu leží zubem času poznamenaný bronzový náramek. Dne 11. listopadu 1827 Jan Laufberger odhalil u Nového Bydžova první keltský hrob v Čechách (Waldhauser a kol. 1999). Tento nález však nezůstal posledním a do dnešních dob mnoho dalších keltských hrobů, pohřebních mohyl a keltských opid vydalo svá tajemství a mnohá další čekají na své odhalení. Od čtyřicátých let 19. století se začínají množit zmínky o vykopávkách prováděných keltology, bohužel ne vždy prováděné zcela vhodnými prostředky. Waldhauser a kol. (1999) se zmiňuje například o páteru Václavu Krolmusovy provádějícím „vykopávky“ okovanou hůlkou.

Teprve kolem poloviny 19. století se stává zvykem napsat článek o odhaleném keltském hrobě, kde autor publikuje nálezné okolnosti, soupis obsahu hrobu a další informace provázející vykopávky (Waldhauser a kol. 1999), díky čemuž si můžeme udělat představu průběhu vykopávek a nalezeného inventáře.

Archeologické postupy a metody se stále vyvíjejí. Při prvních pokusech o využití technologií umožňujících geofyzikální měření k detekci keltských hrobů byl u Mokrotřas v roce 1974 použit protonový magnetometr, s jehož pomocí byla vytvořena mapa magnetických anomálií. Jak se ukázalo, největší anomálie byly zaznamenány právě nad hrobem keltského bojovníka, kde magnetometr reagoval na přítomnost pohřební výbavy z kovu, jako jsou meče, dýky, kopí atd. (Waldhauser a kol. 1999). Dalším pokrokem v metodách sloužících k objevování keltských pohřebišť bylo zjištění, že hroby jsou viditelné z leteckých snímků. Waldhauser a kol. (1999) uvádí, že je bylo možno identifikovat podle vyššího vzrůstu hospodářských plodin, který se projevoval tmavými jasně diagnostikovatelnými obdélníky se severozápadní orientací, jež byly vidět z letadla.

V posledních letech do skupiny metod používaných k detekci archeologických útvarů přibývají metody dálkového průzkumu země – optické multispektrální a LiDARové snímání z letadel, či systém dálkově řízeného letadla (RPAS či UAV), v případě větších nalezišť i z družic. Jak ukazují mnohé výzkumy (Doneus, Briese 2011; Schindling, Gibbes 2014; Bobál, Sipina, Škultéty 2017) tyto metody se jeví jako levné, rychlé a efektivní nástroje pro odhalování doposud skrytých nalezišť, která střežila svá tajemství o našem kulturním dědictví i stovky nebo i tisíce let.

Zejména letecké a UAV laserové skenování (LLS/ULS) díky své vlastnosti pronikat skrze vegetaci a poskytnout tak informaci o reliéfu pod korunami stromů otevírá archeologům

možnosti prozkoumat oblasti, které by byly za použití standardních metod pouze obtížně prozkoumatelné (Schindling, Gibbes 2014).

Tato práce si klade za cíl ověřit možnosti detekce mohylových pohřebišť v zalesněném terénu z dat laserového skenování pořízených z UAV nosiče (ULS) a z letadla (LLS). Obě datové sady se kromě rozdílného nosiče liší i typem použitého skeneru a parametry vlastního skenování. Pro ověření správnosti výsledků bude proveden terénní sběr dat. Jako modelová území byly vybrány dvě lokality v okolí Veselí nad Lužnicí (Klobásná I, Klobásná II), kde se nacházejí raně středověká mohylová pohřebišť.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Princip laserového skenování

LiDAR (Light Detection And Ranging) se řadí mezi aktivní senzory dálkového průzkumu Země. Obvykle bývá nesen letadlem či UAV nosičem. Metoda pořizování dat o zemském povrchu se pak označuje jako letecké či UAV laserové skenování (LLS či ULS). Metoda je založena na principu měření vzdálenosti zkoumaného objektu a zařízení samotným (Bobál, Sipina, Škultéty 2017). Zařízení, zpravidla připevněné pod letadlem, vysílá krátké, v případě topografických skenerů nejčastěji infračervené pulsy (Doneus a kol. (2008) uvádí 30 000 - 100 000 pulsů za sekundu) do různých směrů a zaznamenává jejich odražené echo. Každý paprsek se směrem od zdroje rozšiřuje a skenuje tak kruhovou plochu. Tato plocha je nazývána jako laserová stopa. Velká většina skenerů má stopu o velikosti mezi 10 cm a 1,5 m (v závislosti na výšce letu). Podle toho, na jaký povrch laserová stopa dopadne, se odráží. Například na pevném povrchu jako je silnice, rovná střecha nebo posečený trávník se odráží celý svazek zpět ke skeneru. Na výškově členitém povrchu, například v lese, se ale odráží energie postupně. Při prvním kontaktu s korunou se část energie odrazí (tento odraz se nazývá „první pulz“), ale část projde. Pokud je paprsek dost silný a ve vegetaci jsou mezery, může se dostat až na zem a odtud se odráží tzv. „poslední pulz“. Tyto dva momenty jsou důležité pro další zpracování, aplikaci algoritmů a filtrů odstraňující vegetaci tak, aby bylo možné zkoumat reliéf pod ní (Devereux a kol. 2005). Množství energie přicházející zpět do skeneru dále ovlivňuje odrazivost materiálu s ohledem na vlnovou délku použitého záření (Doneus a kol. 2008). Na základě času potřebného k navrácení a úhlu dopadu odraženého echa následně vypočítává vzdálenost zařízení od objektu. Aby bylo možno zjistit zeměpisnou polohu konkrétního bodu, je nosič skeneru vybaven přijímačem globálního navigačního systému GNSS (pro zpracování se používá technologie diferenčního měření) a inerciální měřicí jednotkou (IMU) (Doneus a kol. 2008). Výstupem zpracování surových dat (skener, GNSS, IMU) pak bývá bodové

mračno, které slouží jako základ pro vytvoření digitálního modelu povrchu (DMP) popřípadě digitálního modelu reliéfu (DMR). Přesnost digitálního modelu závisí na hustotě bodového mračna a přesnosti GNSS a IMU. Je možné dosáhnout prostorové přesnosti u jednotlivých bodů pod 15 cm. Dnešní LLS poskytují většinou hustotu bodového mračna při prvním přeletu kolem 1 - 20 bodů na m². Dodatečnou hustotu lze získat větším počtem přeletů nad oblastí (Devereux a kol. 2005). S ULS lze díky nižší výšce letu docílit hustoty bodového mračna více než 100 bodů na m².

V závislosti na požadavcích na budoucí data a s ohledem na jejich využití je nutné naplánovat letový plán nad oblastí a dosáhnout kompromisu mezi kvalitou dat a letovými možnostmi daného nosiče. Bobál, Sipina a Škultéty (2017) uvádí tři metody pro plánování letu pro komplexní oblasti. Mimo tyto možnosti existuje celá řada dalších variant.

1. Letová stopa s odstupňovanou výškou. Tato metoda je použitelná na oblasti s velkými vertikálními výškovými rozdíly. Pokud se vyskytnou i oblasti s malými výškovými rozdíly, lze létat ve stejné výšce a skenovat pouze s malým příčným překrytím.
2. Opakované snímání. Tato metoda slouží pro oblasti, ve kterých kvůli velkým výškovým rozdílům nelze dosáhnout požadované hustoty bodového mračna. V tomto případě se let naplánuje tak, aby hustota bodového mračna dosahovala pouze poloviny požadované hustoty a stejný let se provede dvakrát.
3. Opakované snímání s překrytím přes 50%. Třetí metoda je založena na podobném principu jako druhá metoda. Rozdíl mezi třetí a druhou metodou spočívá ve zvětšení přesahu překrytí stopy skenování. Při běžných měřeních se stopy překrývají tak, aby se zamezilo tomu, že by v měření vznikly mezery zapříčiněné různými iregularitami při měření, například silným větrem. V této metodě je překrytí stop větší než 50%, čímž se dosáhne dvojitého skenování oblasti jedním letem.

1.2. Technologie skenování a její použití v zalesněných oblastech

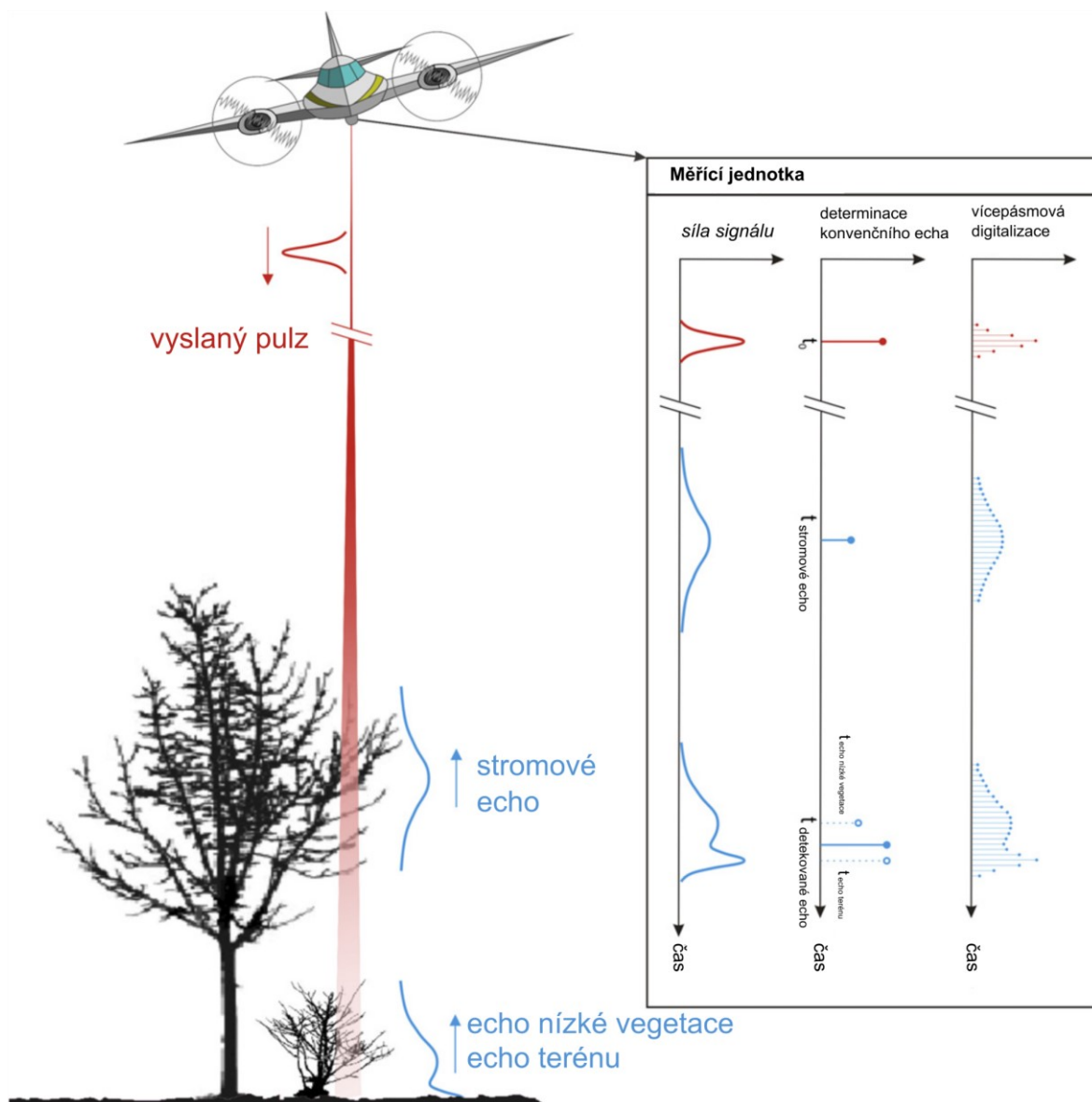
Od počátků využívání dálkového průzkumu Země v archeologii řada metod a přístrojů doznala různých inovací a zlepšení. LiDARové skenery nejsou výjimkou. Schindling a Gibbes (2014) uvádí, že LiDARové skenery umožňují detekci archeologických pozůstatků i v oblastech, ve kterých by jiné metody nebylo možné úspěšně použít. V hůře prostupných oblastech mohou dosahovat dokonce lepších výsledků než zkušení pozorovatelé při pozemním průzkumu (Doneus a kol. 2008). Tato skutečnost mění to, co se dříve zdálo být

velkou nevýhodou, ve výhodu. Zalesněné oblasti mají schopnost konzervovat archeologické nálezy nacházející se v půdě pod nimi, a to zejména díky snížené erozi a jen minimálním mechanickým zásahům do půdy, například orbou (Thorne 1990 v Schindling, Gibbes 2014).

Velikost této výhody záleží ovšem na použité technologii laserového skenování. V současnosti rozlišujeme mezi dvěma technologiemi, konvenčním laserovým skenováním a full waveform (celopásmovým) skenováním (Doneus a kol. 2008). Grafický princip fungování obou metod je naznačen na obrázku č. 1.

1.2.1. Konvenční laserové skenery

Konvenční laserové skenery jsou vybaveny analogovým snímačem, který je schopen zaznamenávat první a poslední echo, některé mohou rozlišovat až čtyři odrazy (Doneus, Briese 2006). Zbytek signálu je „ořezán“ snímačem. Výběrem pouze prvního pulsu můžeme získat poměrně přesný digitální model povrchu. Teoreticky by výběrem posledního pulsu měl vzniknout digitální model reliéfu, jak bylo uvedeno výše. Zda paprsek projde až na zem, záleží na hustotě vegetace a síle paprsku. Ve výběru posledního pulsu se tedy mohou vyskytovat body, které nepronikly až zcela k zemi a nerepresentují tedy reliéf (off-terrain points). Pro odstranění těchto bodů a zpřesnění DMR je zapotřebí použít pokročilých algoritmů. Jako další omezení konvenčního laserového skenování Kraus (2004 v Doneus a kol. 2008) uvádí velikost laserové stopy, která se pohybuje okolo 1,5 m. Stopa této velikosti je dostatečná pro odstranění stromů a vyššího typu vegetace, nicméně má nedostatečnou schopnost pro rozlišování nízké vegetace tak, aby ji bylo možné odlišit od země, což poté ztěžuje identifikaci mikro topografických archeologických znaků. Z těchto závěrů vyplývá, že konvenční laserové skenování nám dokáže poskytnout cenné informace o tvaru reliéfu i v zalesněných oblastech. Má ale jistá omezení týkající se bodů mimo terén a možnosti odfiltrování spodního patra vegetace, a tudíž i obtížnější identifikaci menších archeologických objektů.



obrázek č. 1

rozdíl mezi funkcí konvenčního laserového skenování a vícepásmového skenování

zdroj: Doneus a kol. 2008

1.2.2. Full waveform skenery

Full waveform, narušil od diskrétního skenování, zaznamenává celý proces měření a převádí ho na digitální tok se zaznamenáváním odražené energie v intervalu jedné nanosekundy, který umožňuje zaznamenávat každý jednotlivý odraz (Wagner a kol. 2004 v Doneus a kol. 2008). Tato vlastnost nám umožňuje jednotlivé paprsky modelovat jako sérii Gaussovských křivek a odlišit tak od sebe jednotlivé objekty odrážející záření (Hug a kol. 2004 v Doneus a kol. 2008). Schopnost odlišit od sebe tyto objekty výrazně vylepšuje přesnost následně tvořených digitálních modelů (Doneus a Briese 2006). Jak již bylo naznačeno výše, tato metoda je méně ztrátová než konvenční laserové skenování a

naměřená data musí nezbytně projít postprocessingem. Postprocessing u plnopásmových snímačů díky menší ztrátě dat nabízí oproti konvenčnímu skenování více možností, respektive je zde možnost využít více algoritmů, které lze přizpůsobit tak, aby odpovídaly přesně požadavkům práce či výzkumu (Doneus a kol. 2008). Můžeme tedy říci, že při použití dat z full waveform skenování lze získat přesnější DMR, a to zejména díky schopnosti rozlišovat odrazy od jednotlivých objektů. Přesnější DMR může být velice nápomocný při rozpoznávání menších archeologických tvarů v lesních porostech. Plnopásmové skenování nám rovněž poskytuje větší možnosti v oblasti postprocesingu a filtrace dat, a tudíž i lepší přizpůsobení požadavkům konkrétní práce.

1.3. Zpracování bodového mračka

Bodové mračno je základ k dalšímu výzkumu, tvorbě 3D modelů a vizualizaci. Moderní nástroje nám většinou umožňují získávat bodové mračno hustší, než je zapotřebí (Alby, Grussenmeyer 2012). Často obsahuje objekty které jsou mimo zájem výzkumu (např. vegetace). Proto prvním krokem po získání dat bývá redukce dat, kdy je snahou odstranit přebytečná data tak, aby se snížil zpracovávaný objem dat a tím pádem i nároky na hardwarové vybavení. Snižování objemu dat zahrnuje kroky jako, filtrování (filtrace šumu, oddělení bodů reliéfu), extrakci objektů a „zředování“. Tyto kroky byly dříve dělány ručně a zabíraly 60 až 80 % času procesu (Flood 2003 v Sithole, Vosselman 2003). Dnes je pro tyto účely vypracována celá řada algoritmů. Mnoho algoritmů pracuje na bázi „sousedství“ bodů při klasifikačních operacích. Na této bázi jsou možné tři způsoby klasifikace.

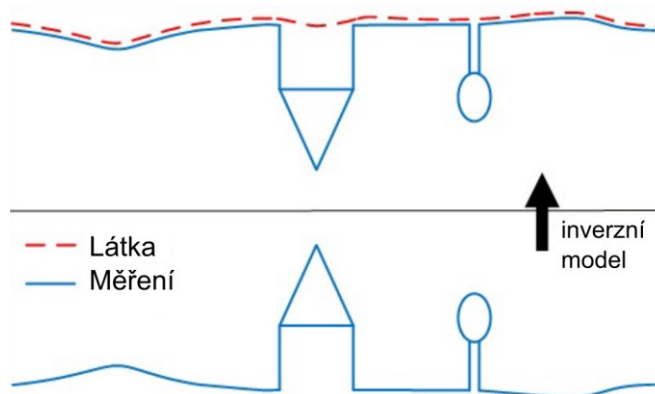
Bod k bodu klasifikace je metoda, při které se porovnávají vzájemně pouze dva body, na které je aplikovaná diskriminační funkce. V závislosti na tom, zda se bod nachází nad určitým prahem, je přiřazen k objektu (Sithole, Vosselman 2003).

Bod k bodům klasifikace je metoda, při které vstupuje do výpočtu diskriminační funkce více bodů sousedící se zájmovým bodem. Zájmový bod je klasifikován podle výsledku funkce (Sithole, Vosselman 2003).

Body k bodům klasifikace je metoda, při které vstupuje více bodů najednou stejně tak jako u předchozí. Rozdíl je v počtu zájmových bodů, kterých je u této metody více (Sithole, Vosselman 2003).

Existuje mnoho algoritmů pracujících na výše zmíněných principech. Většina filtrů pracuje na bázi měření určitých veličin v bodovém mračnu. Velmi často se používá například sklon, vzdálenost bodů od sebe a další. Filtry pracující na principu měření sklonu, kdy měří rozdíl výšky, případně sklon u určitých bodů. Pokud naměřená hodnota přesáhne určitou hranici, je bod klasifikován jako objekt (Sithole, Vosselman 2003). Zhang a kol. (2016) uvádí, že filtry založené na měření sklonu nejsou příliš přesné v komplexním terénu a dodávají, že čím je terén strmější, tím fungují hůře. Dalším příkladem principu na němž filtry pracují, může být buffer, vytvořený diskriminační funkcí kopírující povrch země v bodovém mračnu a definující tak oblast, kde se předpokládá výskyt bodů reliéfu (Sithole, Vosselman 2003).

Jednou z filtračních metod, která byla využita v této práci, je metoda “Cloth simulation filter” (dále CSF). Tato metoda slouží k oddělení bodů reliéfu od ostatních bodů. Zakládá se na výše popsaném principu sklonových filtrů. V případě CSF filtr funguje na základě inverzního modelu, kdy algoritmus simuluje pokrytí tohoto inverzního modelu tenkou „látkou”, která vyhlazuje větší nerovnosti, lépe toto ilustruje obrázek č. 2. Výsledkem pak je DMR (Zhang a kol. 2016). Jako většina filtrů založených na měření sklonu i tento má problém se strmými svahy, kde vykazuje velké chyby. Zhang a kol. (2016) ale uvádí, že tyto chyby mohou být odstraněny v postprocessingu.



obrázek č. 2

princip fungování “cloth simulation” algoritmu

zdroj: Zhang a kol. 2016

1.4. Vizualizace a interpretace bodového mračna

Vizualizace je často klíčovým prvkem v archeologické interpretaci. Je tedy zásadní porozumět používaným procesům, jejich výhodám a nevýhodám a na základě těchto znalostí se rozhodnout, kdy kterou techniku vizualizace použít (Kokalj, Zakšek, Oštir 2013). Existuje několik způsobů, jak vizualizovat bodové mračno. Jedná se v podstatě o převod

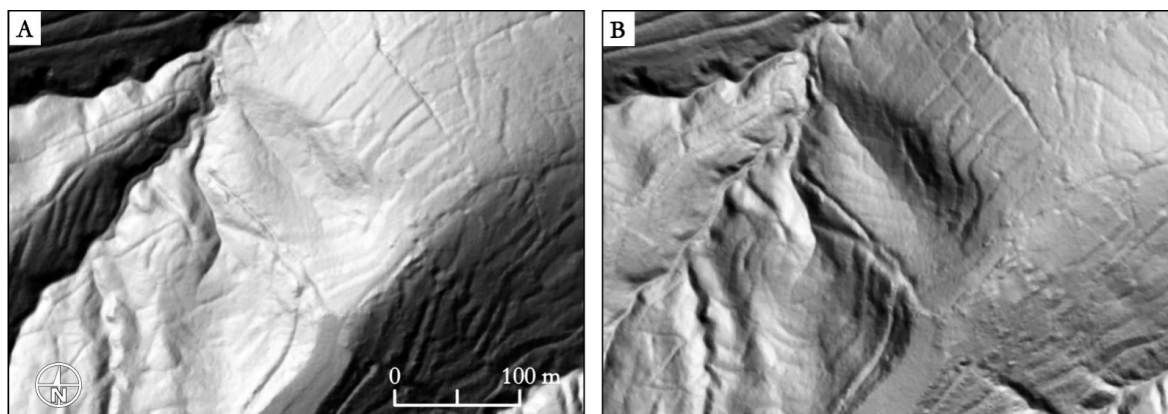
3D informace do 2D plochy. Jednou z běžných možností vizualizace bodového mračna je vytvoření tzv. „mesh“, tj. sítě, která propojuje jednotlivé body, čímž mezi nimi vytváří plochy a je možné z ní dále vytvořit prostorovou reprezentaci reliéfu ve 2D prostoru (Alby, Grussenmeyer 2012). Další možností je rastrová reprezentace reality. Ať již zvolíme jakoukoliv metodu vizualizace, Alby a Grussenmeyer (2012) uvádí, že je nutné mít na zřeteli účel vizualizace, tj., že vizualizace by měla sloužit jako nástroj pro snadnější orientaci v modelu, popřípadě jako komunikační nástroj ať už s veřejností při prezentování archeologických objevů nebo archeology mezi sebou. Tohoto účelu nebude možno dosáhnout, pokud nebude kladen důraz na přehledné a jednoduché zobrazení. V závislosti na účelu použití pro ne odbornou veřejnost se používá nejčastěji metod „sky view factor“ (SKF) nebo „slope gradient“, ve většině případů ztvárněný v odstínech šedi (Štular a kol. 2012). Popřípadě lze použít metodu analytického stínování reliéfu, která je díky své jednoduchosti interpretace a přehlednosti vhodná i pro netréované oko (Kokalj, Zakšek, Oštir 2013). Lidé rozlišují objekty na základě tvaru, barvy a zkušeností. Není proto divu, že vizualizace hojně využívá prostředku stínování pro vyniknutí tvarů v ploše.

1.4.1. Hill shading

Jednou z nejstarších metod stínování je metoda hill shading (stínovaný reliéf). Tato metoda od svého vzniku, kdy byl reliéf stínován ručně za pomoci tužky, urazila dlouhou cestu až ke své dnešní automatizované podobě tvořené počítačem (Horn 1981 v Zakšek, Oštir, Kokalj 2011). Existuje mnoho metod provedení vizualizace pomocí Hill shadingu, nicméně v jakýsi standard v GIS se ustálila Yoëliho metoda. Mluvíme-li dnes o analytickém hill shadingu (AHS) prováděným počítačem, máme na mysli právě Yoëliho metodu (Yoeli 1965 v Zakšek, Oštir, Kokalj 2011). Obecně „hill shading“ zobrazuje, jak odráží povrch reliéfu světlo na základě fyzikálních zákonů a empirických důkazů (Kokalj, Zakšek, Oštir 2013 s. 103). AHS počítá s předpokladem, že světlo se odráží od Lambertovského povrchu, tedy že odráží světlo z fiktivního zdroje v nekonečné vzdálenosti do všech směrů stejně. Světlo z tohoto zdroje na scénu dopadá pod stejným azimutem a stejnou výškou. Následný výstup je vypočten jako úměra kosinu úhlu dopadu na plochu reliéfu a úhlu dopadu slunečních paprsků na normálu povrchu. Výsledek je reprezentován v odstínech šedé, kdy nejnižších hodnot, respektive nejsvětlejších odstínů a tedy největšího osvětlení, dosahují plochy kolmé ke světelnému zdroji a naopak, nejnižších hodnot dosahují plochy orientované ke světelnému zdroji pod úhlem 90° nebo větším (Kokalj, Zakšek, Oštir 2013; Devereux 2008 v Zakšek, Oštir, Kokalj 2011).

Předpoklad toho, že scénu osvětluje pouze jeden zdroj a světlo přichází na celé území pod stejným azimutem může ovšem způsobit, že struktury ležící paralelně s azimutem osvětlení

u této vizualizace nemusí být viditelné, což konkrétně v archeologii může být problém (Devereux 2008 v Kokalj, Zakšek, Oštir 2013). Pod jakým azimutem je scéna osvětlena, neovlivňuje pouze to, zda některé struktury nebudou patrné, ale i celkové vnímání prostorového uspořádání scény, respektive to, zda objekty z plochy vystupují či jsou zahloubené, jak lze vidět na obrázku č. 4. Z tohoto důvodu volí nejčastěji umístění zdroje osvětlení na severozápadě, kde je vnímáno jako by přicházelo odněkud nad uživatelem a uživatel tak bude schopný správně interpretovat stínování. V případě umístění zdroje osvětlení z jižního směru, tedy zespoda, u většiny lidí dochází k opačnému vnímání reliéfu. To, co se jeví jako vysoké, je nízké a naopak. Proto je nutné volit azimut osvětlení s opatrností (Palmer 2013).



obrázek č. 3

ukázka vlivu azimutu na prostorové vnímání scény při metodě analytical hillshading s azimutem 315° (A) a 45° (B) v obou případech je použito osvětlení pod úhlem 45° zdroj: Kokalj, Zakšek, Oštir 2013

Z těchto důvodů se nejčastěji volí parametry azimutu 315° a úhel osvětlení nad obzorem 35° nebo 45° (Kokalj, Zakšek, Oštir 2013). Další problém u této metody je zapříčiněn přímým osvětlením plochy, při kterém vznikají velmi temné oblasti nebo naopak velmi nasvícené oblasti, které obsahují pouze málo detailů (Devereux 2008 v Kokalj, Zakšek, Oštir 2013). Pro řešení nedostatků vyplývajících z použití AHS bylo vyvinuto mnoho dalších metod, například vylepšený stínovaný reliéf s planimetrickým a profilovým zakřivením (Kennelly 2008 v Štular a kol. 2012), místní přizpůsobení polohy osvětlení aplikované v problematických oblastech (Brassel 1974 v Kokalj, Zakšek, Oštir 2013), vícesměrový šikmý vážený stínovaný reliéf (Mark 1992 v Štular a kol. 2012), ale patří sem i metoda sky view factor (SVF) (Zakšek, Oštir Kokalj 2011), která je podrobněji popsána níže.

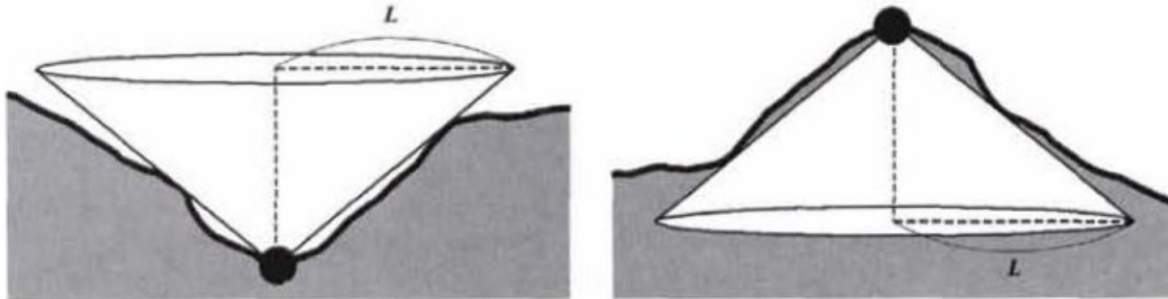
1.4.2. Slope gradient

Metoda slope gradient (gradient sklonu) má mnoho využití. Velmi často je používána v hydrologii pro zjišťování možné eroze, popřípadě výstavbě silnic nebo jiných staveb. Jedná se v podstatě o výpočet změny výšky terénu na určité vzdálenosti (Štych a kol. 2008). V archeologii se tato metoda ukázala jako vhodná pro vizualizaci pro neodbornou veřejnost a pro vizualizaci v členitém terénu (Štular a kol. 2012), dále slouží dobře při identifikaci cest a silnic, tedy sítě komunikací, jak dokládá práce Whiteho a kol. (2010). White a kol. (2010) se zabývá možností mapování komunikací pomocí modelu reliéfu z LiDARových dat a jeho přesností v hustě zalesněném terénu. Další zajímavé využití uvádí Doneus a Briese (2011), kteří využili metodu slope gradientu v kombinaci s metodou AHS za účelem odbourání nedostatku metody AHS, kdy objekty umístěné paralelně s azimutem osvětlení scény se nezobrazují. Výzkumníci uvádějí, že kombinace metod je nejen velice jednoduchá na zhotovení a velice účinná pro následnou interpretaci, ale dokáže i podpořit viditelnost objektů nezávisle na jejich orientaci k azimutu osvětlení scény. Předměty se tak stávají dobře identifikovatelnými a zároveň je zachována viditelnost mikroreliéfu. Mimo tyto klasické metody vzniká i mnoho dalších nových metod přinášejících nové možnosti. Mezi takovéto metody se podle Mayorala a kolektivu (2017) řadí například Sky view factor, Openness, Local relief model a další. Tyto techniky jsou specifitěji zaměřené než techniky zmíněné výše.

1.4.3. Openness

Openness (otevřenost) je metoda velice podobná metodě Sky view factor, nicméně jsou zde některé odlišnosti, které budou zmíněny níže (Doneus 2013). Openness funguje na principu měření zenitových úhlů a úhlů nadiru (Yokoyama, Shirasawa, Pike 2002). Uživatelem je zvolena vzdálenost od bodu zájmu, ve které bude výpočet probíhat. Je tedy možné definovat požadovanou velikost jakéhosi výpočtového okruhu či okna, které se bude při výpočtu pohybovat napříč celým územím a brát do úvahy pouze body ležící v této vzdálenosti od aktuálně počítaného bodu (Yokoyama, Shirasawa, Pike 2002; Doneus 2013). Podobně jako u SVF i zde platí, že čím menší velikosti tohoto okna, tím více jsou podpořeny mikroreliéfní znaky a naopak při velkých vzdálenostech je podpořen větší reliéf (Doneus 2013). Při této metodě se všem bodům v gridu přiřadí tři složky: číslo sloupce, číslo řádky a výška pro výpočet zenitových, popř. nadirových úhlů. Výpočet openness probíhá postupně minimálně v osmi azimutech (pro každou světovou stranu). Pro každý bod gridu od bodu zájmu je spočten zenitový úhel, popřípadě úhel nadiru. Takto zjištěné úhly jsou dále zprůměrovány. V závislosti na počítaném úhlu lze dosáhnout dvou výsledků (Yokoyama, Shirasawa, Pike 2002; Doneus 2013):

- **Positive openness** představující velikost úhlu viditelnosti nad konkrétním bodem zájmu získaným zprůměrováním výsledků pro azimuty všech úhlů zenitů (Yokoyama, Shirasawa, Pike 2002; Doneus 2013).
- **Negative openness**, která naopak udává velikost úhlu pod konkrétním bodem zájmu získaným zprůměrováním výsledku pro azimuty všech úhlů nadiru (Yokoyama, Shirasawa, Pike 2002; Doneus 2013).



obrázek č. 4

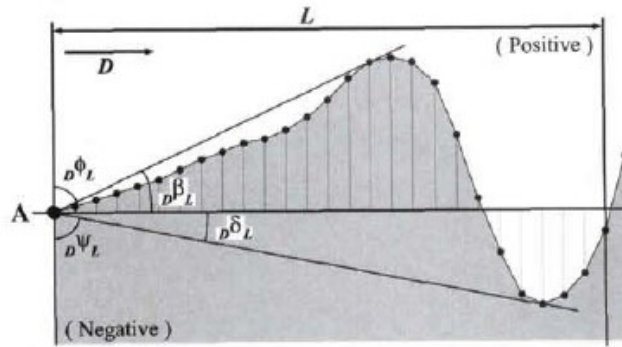
způsob měření pro metodu openness-positivní (vlevo) a openness-negativní (vpravo)

zdroj: Yokoyama, Shirasawa, Pike 2002

Výše zmíněné metody jsou ilustrovány na obrázku č. 4. Yokoyama, Shirasawa a Pike (2002) dále udává, že obvykle vysoké kladné hodnoty vychází pro konvexní tvary reliéfu, tedy tvary vystouplé nad povrch, například pro kopce. Vysoké záporné hodnoty naopak vycházejí pro konkávní tvary reliéfu, tedy tvary obklopené vyšším reliéfem, například údolí nebo koryta řek. Odlišnosti oproti SVF jsou podle Doneuseho (2013) tři:

- SVF počítá s viditelností oblohy, což indikuje reálný potenciál nasvícení, a jde tedy o fyzikální množství, které lze následně využít do dalších studií energetických toků.
- SVF pro svůj výpočet používá zenitových úhlů pouze nad povrchem to znamená že úhel azimutu zjištěný při měření jednoho ze směrů nemůže být větší než 90°. zatímco u metody openness se mohou vyskytnout i úhly větší, jak lze vidět na obrázku č. 5, což vede k tomu, že mohou být vypočteny stejné hodnoty pro oblast nezávisle na tom, jestli je nakloněná nebo vodorovná. U výsledku, kde bude použito metody SVF, bude tedy znázorněn i sklon, zatímco u openness nikoliv. Doneus (2013) uvádí, že vyhlazení sklonu může být někdy i přínosem, a to zejména pro možnost automatizovaného zpracování.
- Openness narozdíl od SVF počítá i negativní verzi reliéfu, za použití nadírových úhlů. zatímco tedy openness positivní zvýrazní hřebeny a vrcholy reliéfu, openness negativní zvýrazní nejhlubší části reliéfu jako údolí (Doneus 2013).

Nicméně Doneus (2013) dodává, že tato metoda není v archeologii příliš používána.



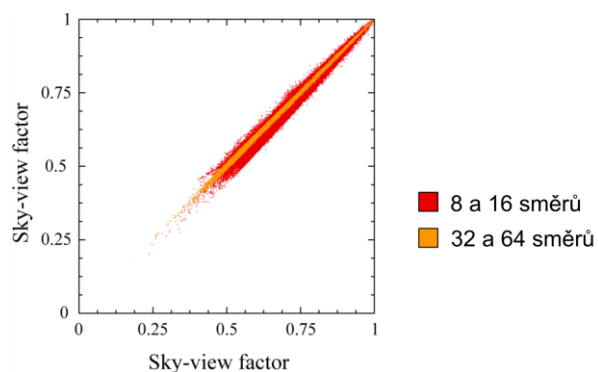
obrázek č. 5

princip metody openness-positive a negative

zdroj: Yokoyama, Shirasawa, Pike 2002

1.4.4. Sky view factor

Sky view factor (faktor viditelnosti nebe) (SVF) je navržen tak, aby předcházel problémům přímého osvětlení. Odbourání problému je dosaženo difuzním osvětlením scény. V praxi to znamená, že celá nebeská sféra vydává světlo o stejné intenzitě. Z toho vyplývá, že osvětlení, respektive světlost bodu, bude záležet pouze na velikosti nebeské sféry, kterou lze pozorovat z daného bodu. Samozřejmě platí, že čím více je viditelné plochy nebeské sféry z daného bodu, tím je bod světlejší (Zakšek, Oštir, Kokalj 2011). Výsledek SVF ovlivňují zejména dva nastavitelné parametry, a to počet směrů pro vyhledávání horizontů a maximální vyhledávací vzdálenost pro horizonty. Parametry je možné zadávat nebo měnit podle potřeb dané studie (Zakšek, Oštir, Kokalj 2011). Dalo by se očekávat, že čím bude parametr pro počet vyhledaných směrů pro horizonty větší, tím bude výsledek přesnější. Zakšek, Oštir a Kokalj (2011) ale ve své práci tento parametr testoval na počtu 6, 18, 32 a 64 směrů a došel k závěru, že zvýšením počtu horizontů se u výsledku pouze sníží rozpětí rozdílů v hodnotách SVF, jak ukazuje graf č. 1.

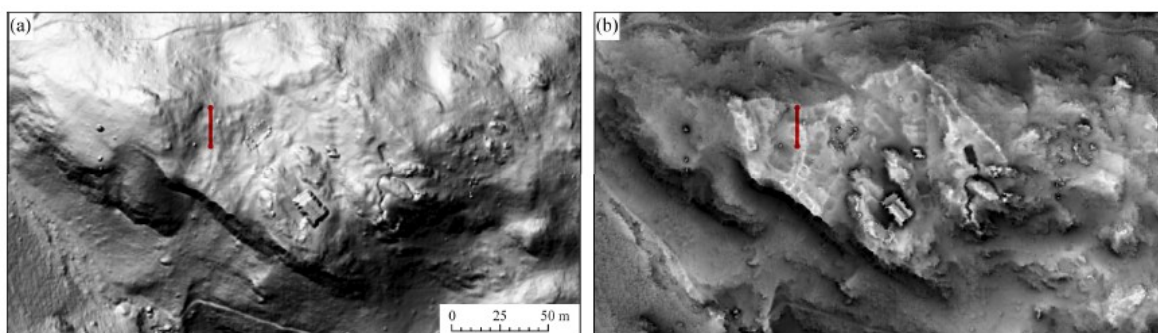


graf č. 1

graf porovnávající vliv na přesnost v závislosti na počtu použitých vyhledávacích směrů

zdroj: Zakšek, Oštir, Kokalj 2011

Zakšek, Oštir, Kokalj (2011) dále uvádí, že jako nejvhodnější počet se jeví 8 směrů a doporučuje tento počet využít téměř kdykoliv. Výpočet více směrů v podstatě neovlivní výsledek a je tedy zbytečný. Druhým parametrem je maximální vyhledávací poloměr pro horizonty. V závislosti na požadovaném výsledku lze tímto parametrem ovlivnit míru generalizace, respektive velikost tvarů, které se zobrazí. Větší vyhledávací poloměr znamená větší generalizaci a některé menší tvary nemusí být ve vizualizaci zachyceny (Zakšek, Oštir, Kokalj 2011; Kokalj, Zakšek, Oštir 2013). Pro archeologii jsou tedy vhodné spíše menší vyhledávací poloměry, jak uvádí Zakšek, Oštir, Kokalj (2011). Na základě svých zkušeností doporučuje poloměry v rozmezí 10-30 metrů pro obecnou vizualizaci. Zvětšování maximálního vyhledávacího poloměru značně prodlužuje čas výpočtu. Podle Zakšeka, Oštira a Kokalja (2011) poloměry nad 50 metrů nedávají smysl vzhledem ke značnému prodloužení času výpočtu a větší generalizaci výsledku. SVF metoda je dobře použitelná především v terénu, který se mění pozvolna a v kterém se nevyskytuje příliš ostrých hran. V porovnání s AHS je schopna zobrazit i menší detaily, které při použití AHS nejsou patrné, jak lze vidět na obrázku č. 6, porovnávajícím výsledky AHS a SVF na stejném území.



obrázek č. 6

porovnání výsledků metody Analytical hill-shading (a) a metody sky view factor (b)

zdroj: Zakšek, Oštir, Kokalj 2011

1.4.5. Local relief models

Local relief models (místní modely reliéfu) (LRM) je další hojně využívanou metodou v archeologii (Doneus 2013). Jedná se o metodu umožňující odstranění velkých reliéfních prvků pro vyniknutí malých reliéfních prvků většinou charakteristických právě pro archeologické pozůstatky (Hesse 2010; Doneus 2013). U této metody je nejdříve aplikován nízkofrekvenční filtr pro vyhlazení reliéfu. Zde je možné pomocí velikosti jádra pro daný filtr nastavit, jak velké prvky budou zachyceny. Ve druhém kroku dochází k odečtení výsledku low pass filtru od DEM, což způsobí ono zachování malých reliéfních prvků, jejichž velikost byla definována velikostí jádra filtru v předchozím kroku a odstranění velkých reliéfních prvků. V dalším kroku následuje extrakce nulové vrstevnice pro LRM. Jedná se v podstatě o vrstevnici, která určuje výšku nad povrchem nebo zahloubení do povrchu. Následuje

interpolace nového DEM, který je zbavený malých reliéfních prvků. V posledním kroku se odečte takto vyčištěný reliéf od originálního DEM (Hesse 2010). Hesse (2010) dále uvádí, že takto vzniklý výsledek je mimo mnoha dalších archeologických objektů, jako jsou například lineární a kruhové útvary nebo těžební sítě, popřípadě i brázdy vzniklé orbou, velice vhodný pro odhalování pohřebních mohyl, kterými se zabývá tato práce. Doneus (2013) u této metody jako hlavní pozitiva zmiňuje především to, že je na první pohled jasné, které objekty jsou vystouplé nad reliéfem a které jsou naopak zahloubené. Jako další výhodu poté zmiňuje, že u této metody je možné měřit výškové rozdíly mezi jednotlivými objekty nebo okolím. Doneus (2013) dále poukazuje na to, že LRM je již pokročilejší metoda, která ke svému správnému vytvoření a interpretaci vyžaduje znalost procesů, reliéfu a vstupujících parametrů, ale pokud se vyhotoví správně, může se stát velice dobrým nástrojem při odhalování archeologických útvarů.

1.5. Výzkumy prováděné v oblasti laserového skenování v zalesněných oblastech

Na poli využití laserového skenování v zalesněných oblastech byla již napsána celá řada prací. Jednou z nich je například práce Doneuseho a Brieseho (2011), kde podrobně popisují problém leteckého skenování v zalesněném terénu, rozdíly při použití konvenčního nebo plnopásmového skeneru, dále zde probírají problémy georeferencování způsobené překryvy jednotlivých skenovaných pásů a vznik falešných útvarů vlivem špatného georeferencování. Celou práci prezentují na modelovém území hradiště z doby železné ve Schwarzenbachu.

V práci používají bodové mračno o minimální hustotě 3-4 body na m². Bylo naskenováno území o velikosti zhruba 190 km² pokryté převážně listnatými stromy. Výzkumníci udávají že se jim osvědčila metoda kombinace sklonu s analytickým hillshade reliéfem. Na zkoumaném území se podařilo najít přes 10 000 útvarů, nicméně výzkumníci se zaměřili pouze na podrobnější identifikaci hlavních prvků. Výzkum neodhalil pouze všechny již dříve známé prvky, ale přinesl identifikaci některých nových.

Dalším výzkumem, který stojí za zmínku, je výzkum Schindlinga a Gibbese (2014), zaměřující se na to, jak vliv vegetace ovlivňuje efektivitu laserového skenování, konkrétně se snaží najít korelaci mezi intenzitou při prvním odrazu a očekávanou hustotou bodového mračna reprezentující reliéf pod vegetací, kroky potřebné k vytvoření použitelných podkladů pro vizuální interpretaci a jejich proveditelnost. Studie probíhala na modelovém území

Womble wood v jižním Yorkshiru v Anglii. Toto území je v současnosti hustě zalesněno převážně listnatým lesem. Schindling a Gibbes (2014) v této práci hodnotí vliv vegetace na účinnost LiDARu skenujícího diskrétní technologií tak, že porovnávají hustotu bodového mračna z prvních odrazů ze zalesněné oblasti a prvních odrazů z bezlesé oblasti. Tyto hodnoty pak vztahují k hustotě bodů reliéfu stejných testovaných oblastí. Po tomto porovnání dochází k závěru, že po prvním odrazu echa následuje silný pokles intenzity a s tím korelující úbytek bodů reliéfu,” a dodává, že pro stanovení přesné korelace mezi intenzitou prvního odrazu a očekávanou hustotou bodů reliéfu je nutné provést další výzkum. Jeho výsledky jsou shrnuty v tabulce č. 1.

Výzkum zaměřující se na využití dat z LLS při objevování nových archeologických lokalit, prováděl Bobál, Sipina a Škultéty (2017). Jejich výzkum probíhal na lokalitě hradiště Molpír na Slovinsku. V této členité krajině se zaměřují na problematiku letového plánu při leteckém skenování, následuje část věnovaná vizualizačním technikám. V závěru dochází k výsledkům, že pomocí LLS se podařilo odhalit i archeologické útvary, které nebylo možné odhalit pozemním průzkumem, a shodují se tak s ostatními autory (např. Doneus, Briese 2011; Schindling, Gibbes 2014), že použití LiDARu v archeologii je velice silný nástroj ať už při odhalování nových archeologických nalezišť v zalesněném terénu nebo objevování nových archeologických útvarů na nalezištích již známých.

Testovaná oblast	průměr intenzity prvního odrazu	průměr intenzity odrazu od země	počet prvních odrazů	hustota prvních odrazů	počet odrazů od země	hustota odrazů od země
zalesněná	14,19	57,81	60,462	3,90	2,021	0,13
bezlesá	67,58	91,15	28,031	4,00	24,464	3,49

tabulka č. 1

výsledky analýzy vlivu vegetace ukazují silný vliv mezi intenzitou prvního odrazu a hustoty bodů reliéfu

zdroj: Schindling, Gibbes 2014

2. MOHYLOVÉ KULTURY

2.1. Historie mohylových kultur na našem území

V této části bude krátce pojednáno o třech kulturách využívající mohylových pohřbů na našem území na přelomu letopočtů. Jedná se o kulturu Keltskou, která se z našeho území začala ztrácet a postupně byla nahrazována stále se zvětšujícími skupinami Germánů (Drda, Rybová 1998). Germány na našem území později vystřídali Slované, jejichž mohyly se hojně nalézají v jižních Čechách. Dle Menšíka, Křišťufa a Chvojky (2010) může výzkum a zmapování právě těchto mohyl být velice obohacujícím pro naši znalost prostorové distribuce mohylových pohřebišť a to zejména díky tomu, že se zde mohylová pohřebišť nacházejí v zalesněném terénu s nízkou intenzitou ať už amatérských nebo profesionálních výzkumů. Tyto dva faktory umožnily zachování velkých pohřebních ploch pouze s minimálním poškozením a je tedy možné udělat si dobrou představu o rozložení mohyl v prostoru (Menšík, Křišťuf, Chvojka 2010).

2.1.1. Keltská historie v Evropě

Nejstarší zprávy o existenci "velkého keltského národa" v západní Evropě známe již z 5. století př. Kr.. Tyto zprávy jsou dochovány zejména v dílech antických učenců (Kremer 2017). Bohužel většina těchto děl je dochována jen velice málo a zprávy jsou tak pouze kusé (Drda, Rybová 1998, Bouzek 2007; Kremer 2017). Podle dochovaných zápisků antických učenců je možné lokalizovat pravlast Keltů pouze velice neurčitě k pramenům Dunaje. Nicméně písemné prameny pro přesnou lokalizaci schází, a tak je zejména předmětem archeologie hledat a spojit nejstarší nalezené doklady osídlení Keltů s doposud zjištěnými informacemi o velikosti jimi osídlené plochy (Drda, Rybová 1998). Samozřejmě jako většina populací i Keltové v průběhu času rozšiřovali své území, převážně na jih a na západ. Baum (2017) si tyto migrační tendence vysvětluje standardními vzory přesunu národů starověku, mezi které řadí občanské války, zvyšující se hustotu populace a tím pádem nedostatek potravin a v neposlední řadě i dobrodružného ducha nebo přitažlivost jižních krajů z hlediska jejich bohatství ať už kulturního nebo hmotného. Pravděpodobnou oblast osídlenou Kelty ukazuje mapa č.1. V polovině druhého století př. Kr. se tvoří dvě větší keltské mohylové kultury, přičemž západní komplex zasahoval do západních a jižních Čech (budějovickou pánev a plzeňskou kotlinu) (Drda, Rybová 1998). Druhý rozsáhlý komplex zasahoval v rámci našeho území do středních a východních Čech (Drda, Rybová 1998). Nicméně Baum (2017) uvádí, že vysledovat tuto hranici je velmi obtížné, a jak ukazuje mapa č.2., posouvá tuto hranici spíše k západu na území Německa. Baum (2017)

dále uvádí, že periodizace doby železné byla pojmenována právě po velkých keltských nalezištích.



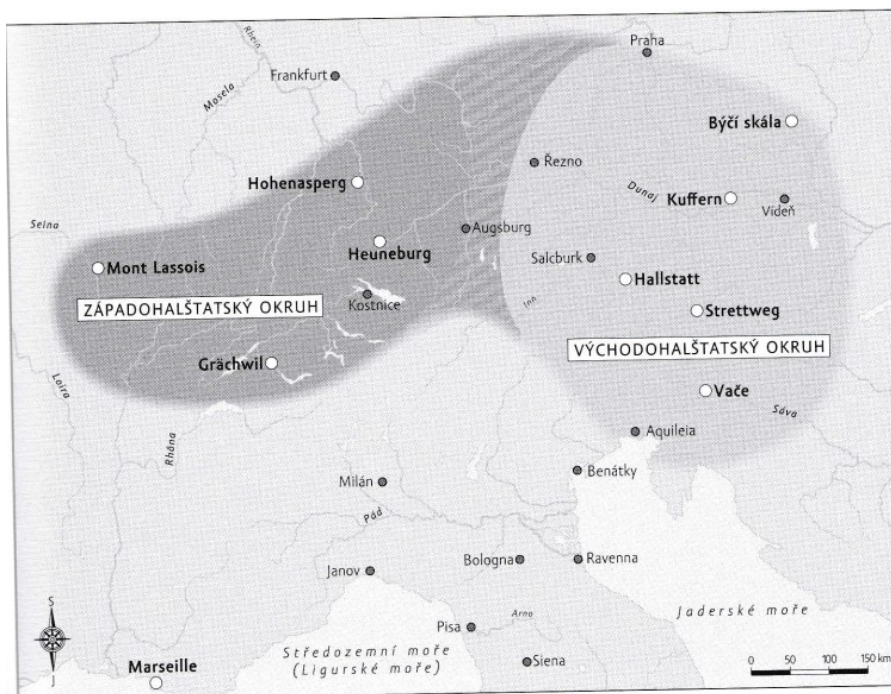
mapa č. 1

mapa zobrazuje rozmístění indoevropských kmenů v pozdní době bronzové na začátku prvního tisíciletí před Kristem (podle Pleinera)

zdroj: Drda, Rybová 1998

Mladší doba železná, neboli doba Laténská, byla pojmenována podle Švýcarského naleziště u břehů jezera Neuchâtel, kde bylo nalezeno velké množství keltských zbraní a zbrojí. Starší doba železná, neboli doba Halštatská, získala svůj název podle naleziště v Rakouské solné komoře, kde probíhá dlouhodobý výzkum pohřebiště s více než pěti tisíci hroby obsahujícími bohatý inventář od šperků po zbraně.

Za tyto bohaté nálezy v keltských hrobech vypovídajících o keltském životě a kultuře vdčíme především keltské víře a jejich představám o posmrtném životě. Dochovalo se pouze nepatrné množství písemných záznamů popisující pohřební ritus a k celkovému obrazu tedy moc nepřispívají. Caesar se o keltských pohřebních rituálech ve svém díle Zápisky o válce Galské zmiňuje takto *“Pohřby jsou na způsob galského života nádherné a nákladné. Všecko, o čem si myslí, že bylo nebožtíku milé zaživa, vhazují do ohně hranice, i živá zvířata. A ještě donedávna byli po skončení řádných pohřebních obřadů společně s pánem spalováni také otroci a chráněnci, o nichž bylo známo, že je nebožtík míval v oblibě.”* (Maier 2017 str. 62). I když víme o samotných pohřebních úkonech pouze velice málo, lze z tohoto písemného pramene usuzovat na důležitost, kterou keltská kultura přisuzovala pohřebnímu rituálu.



mapa č. 2

*předpokládaný rozsah východo a západohalštatského okruhu v 7. až 5. stol. př. Kristem
zdroj: Maier 2017*

Keltové s největší pravděpodobností věřili na život po životě, respektive pokračování pozemského života. Této teorii odpovídá i výbava jednotlivých hrobů, jež měla být odrazem společenského postavení na tomto světě (Maier 2017; Waldhauser a kol. 1999). Waldhauser a kol. (1999) dále udává, že tyto představy u „Českých“ keltů postupem času vedli k jakémusi ustálenému řádu a pravidlům ukládání ostatků do země a dle keltských představ nedodržení těchto pravidel by vedlo k ohrožení celé komunity. Příklady takových zvyklostí může být samotná organizace hřbitova, kdy se první pohřby na daném místě konaly na nejvýše položených místech a pokračovalo se směrem dolů, přičemž se dbalo na to, aby hroby byly uspořádány v protáhlém pruhu směřujícím převážně od severu k jihu (Drda, Rybová 1998). Dalším zajímavým příkladem pojmím se keltským důrazem na světové strany při pohřbu, je způsob uložení těla, kdy se ve většině případů ukládalo na záda s hlavou směřující k severu (Drda, Rybová 1998; Waldhauser a kol. 1999). Tento poznatek může být užitečný při určování mohylových pohřebišť z digitálního modelu reliéfu, a to zejména při použití vizualizačních metod využívajících azimutu, jako je například metoda analytical hillshading.

Jak již bylo popsáno výše, o pohřebních úkonech a rituálech prováděných před samotným pohřbem toho moc známo není. Co se ale týče samotných hrobů jejich rozměrů a výbavy, je na tom archeologie o poznání lépe. V závislosti na období, ve kterém se pohřby konaly,

se odrážel způsob uložení ostatků a samotná výbava hrobu (Waldhauser a kol. 1999; Maier 2017). Pohřebiště byla ve většině případů umístěna na návrších nebo svazích mimo dosah vodních toků. Samotný hřbitov býval většinou organizován tak, že nejstarší hroby byly nejdříve a mladší hroby se zakládaly směrem ze svahu (Waldhauser a kol. 1999).

Do mladší doby Laténské se setkáváme především s pohřbíváním do mohyl. Nejvíce se vyznačuje pozdní doba Halštatská, kdy vzniká fenomén knížecích hrobů vyskytujících se spíše na území jižního Německa (Drda, Rybová 1998; (Maier 2017). Jedná se o hroby s bohatými nálezy zlatých předmětů, dřevěnými pohřebními komorami a s navršenými mohylami velkých rozměrů (Drda, Rybová 1998; Maier 2017). U nás se vyskytují pouze mohyly menších rozměrů do zhruba 10 m (Drda, Rybová 1998). Uvnitř mohyl pak nacházíme buďto malou jamku k uložení pozůstatků, kamenné skříňky nebo hrobovou komoru konstruovanou ze dřeva (Drda, Rybová 1998), které velice dobře slouží k přesné dataci takovéto komory a tím pádem i k přesnému určení období pohřbu (Baum 2017). Mezi dobou raně Laténskou až střední dobou Laténskou dochází k pozvolné změně uměleckého stylu a s ním i ke změně pohřebního ritu, jež se projevoval zánikem zvyku vršit pohřební mohyly (Baum 2017).

2.1.2. Germánská historie v Evropě

Germáni na naše území začínají pronikat ve větších skupinách okolo 30. let př. Kr. Pravděpodobně okolo roku 6. př. Kr. se na naše území dostaly družiny, které pak byly základem Marobudovy říše. Marobudova říše trvala pouze krátce. Nicméně hrála v té době velice významnou úlohu. Caesar zanechal zprávu v souvislosti s válkou v Galii, kde lokalizuje germánské kmeny do oblasti „na západě ohraničené Rýnem, na východě Vislou, na severu Baltským a Severním mořem a na jihu Alpami.“ (Schlette 1977 str. 21). Otázka etnicity nebyla pro Kelty nebo Germány příliš významná. Je tedy těžké určit, kudy probíhala hranice mezi Keltským a Germánským obyvatelstvem (Schlette 1977; Bouzek 2007). Dějiny Germánů známe pouze z per římských spisovatelů, jedná se tedy spíše o záznamy vojenských střetů s Římem. Můžeme se dočíst, že Germáni se u Římských hranic objevili koncem druhého století. Zdá se, že příčinou stěhování germánských kmenů na jih byl zejména nedostatek orné půdy a zhoršené klima, které nutilo kmeny k migraci a zabrání nových území. Germánská cesta Evropou přes Poodří, Moravu, Slovensko a další území však způsobila pohyb i okolního obyvatelstva, například Keltů, kteří přesídlili z území dnešního Švýcarska do Galie. To mělo za následek počátek rozpadu společenství keltských kmenů (Schlette 1977). Při bojích s Římem docházelo ke změnám území jednotlivých kmenů. To zapříčinilo odchod některých kmenů na území Čech i Moravy, kde byla zabrána keltská oppida. Tímto činem Germánský vévoda Marobud získal respekt u svých kmenů a byl schopný založit Marobudovu říši. Založení Marobudovy říše vedlo k vedoucímu

postavení Moravy a Čech v hospodářství a kultuře, což dokazují archeologické nálezy jako například ražba vlastních mincí (Schlette 1977). Germánské období na našem území končí počátkem 5. století, kdy vlivem vpádu Hunů odcházejí Markomani patrně do oblasti dnešního Bavorska (Bílek 2002).

Pohřební ritus nabýval důležitou roli i v germánském světě. Předřímské období patřilo spíše spalování nebožtíků spolu s jejich milodary, jež v tomto období nebývali příliš početné. Následovalo uložení popela do hliněné nádoby, která byla následně uložena do hrobové jámy, I zde ale platí, že to není pravidlem. Můžeme se setkat s mnohými obměnami, jako například nahrazení hliněné nádoby koženým váčkem. Příznačné pro toto období jsou praktiky znehodnocování milodarů, jako například ohýbání mečů. K tomu nejspíše vedla víra, že předměty musí následovat osudu svého majitele (Schlette 1977).

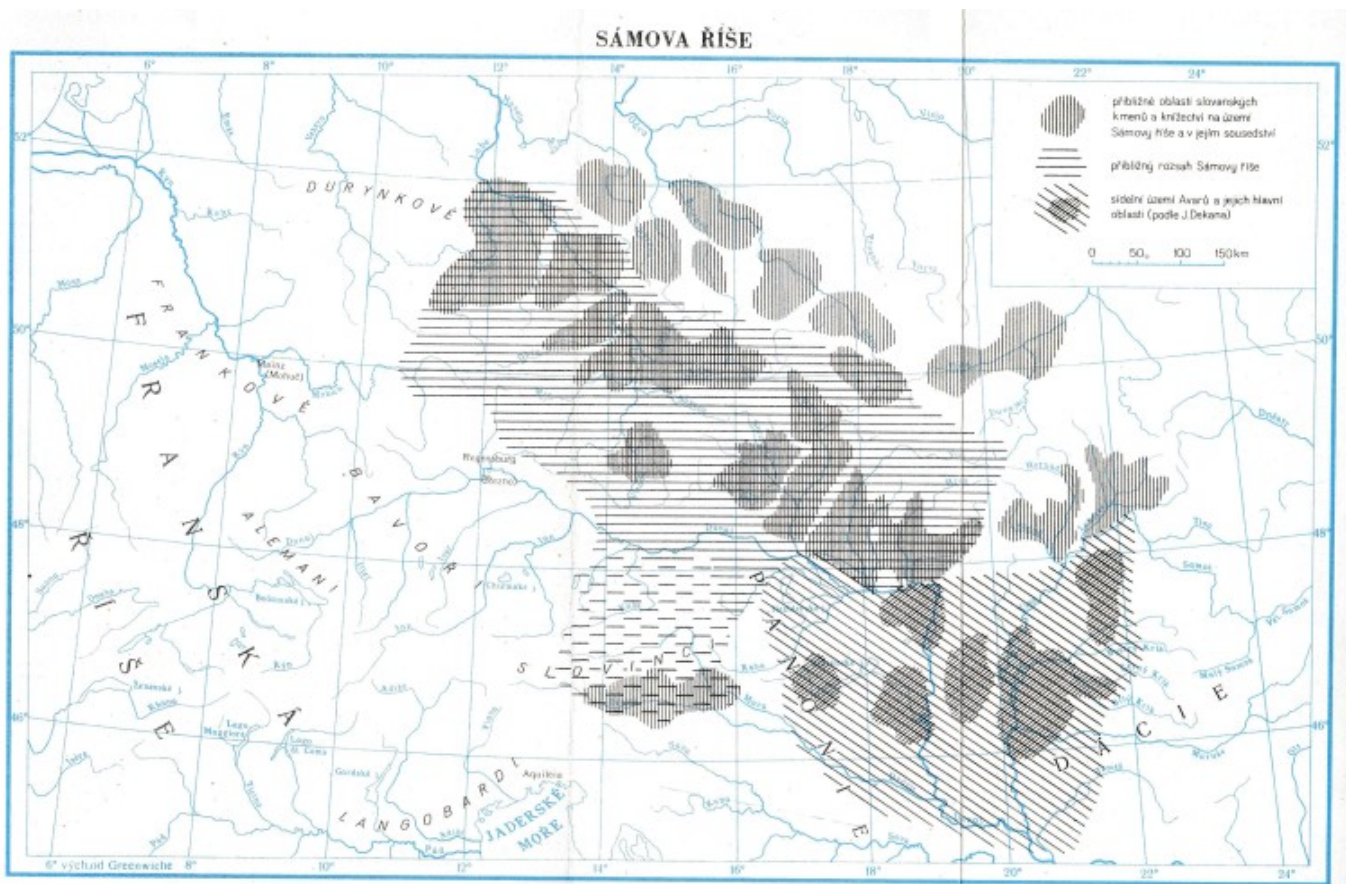
Germánská pohřebiště jsou význačná tím, že hroby se nevyskytují ojedinele. Schlette (1977) uvádí, že důvodem je zřejmě víra Germánů v jistou pospolitost i v posmrtném životě. Dalším zajímavým faktem je, že na jedno pohřebiště mohou být ukládány pozůstatky i z několika sídlišť a vytváří tak velké plochy. Oproti ostatním zde uváděným kulturám germánská pohřebiště se nevyznačují žádnou uspořádaností. Zdá se, že jediným pravidlem v tomto období je pouze to, aby se hroby vzájemně nenarušovaly (Schlette 1977).

Nespálená těla a mohylové hroby se začínají vyskytovat koncem předřímského období a okolo 3. stol. se tento způsob stává dominantním, nicméně pohřeb žehem se vyskytuje i nadále. Hroby na začátku období disponují povětšinou bohatou výbavou vzhledem k tomu, že tento obyčej byl převzat vysokou germánskou šlechtou patrně od Keltů. Pro zemřelého je vybudována pohřební komora ze dřeva nebo z kamene. Nad touto komorou byla navršena mohyla velkých rozměrů. Zemřelý pak často ležel v rakvi vydlabané z kmene stromu. Později výstavba mohyl přechází i mezi prosté obyvatelstvo. Od poloviny 5. stol. začínají převládat řadová pohřebiště a tělo zemřelého se ukládá do hrobových jam. U těchto hrobů už můžeme pozorovat jistou orientaci, a to vždy ve směru východ západ. Mohylová pohřebiště v této době již ustupují do pozadí (Schlette 1977).

2.1.3. Slovanská historie v Evropě

Slované se v písemných pramenech, které popisují jejich sídelní prostor ve čtvrtém století n. l. objevují od šestého století n. l. Předpokládá se, že slovanské kmeny tu byly daleko dříve známí jako kmen Venetů, ale vzhledem k tomu, že nijak neohrožovali „velké“ kultury té doby, tak se do písemných pramenů dostali jen omezeně (Beranová 1988). Písemné prameny udávají jejich sídelní prostor v šestém stol. n. l. někam mezi prameny Visly a dále na východ. Na jihu jejich sídla zasahovala až k ústí Sávy. Na konci šestého století se postupně rozšířili až do středního Podunají a ovládli celý Balkánský poloostrov. Západní hranice v polovině šestého století sahala až ke střednímu Labi (Havlík 1964). V polovině

šestého století se zde také začínají objevovat Avari, kterým později Slované museli platit tribut, což zapříčiní vzpouru proti avarským požadavkům a vymanění Slovanů z avarského vlivu. (Havlík 1964). V této době se objevuje i historicky významná osobnost Franckého kupce Sáma, jenž byl zvolen kolem roku 623 slovanským králem, což se pojí se vznikem Sámovy říše, která vznikla nejen na obranu proti Avarům. Pravděpodobné území Sámovy říše ukazuje mapa č. 3 (Havlík 1964).



mapa č. 3

mapa zobrazující rozlohu Sámovy říše v 7. století

zdroj: Havlík 1964

Smrt měla v životech Slovanů nemalý význam. U nejstarších Slovanů z 5.-6. století je typické, že své mrtvé spalovali a popel ukládali do mělkých jamek v nádobách nebo pouze v plátěném obalu. Hroby nebyly označeny nijak významně. Jak je patrné, takovýchto hrobů se zachovalo pouze velice málo. Bohužel i výbava hrobů je velice chudá na milodary (Beranová 1988). Se slovanskými mohylami se setkáváme až okolo 7. století. Mladší mohyly byly zejména žárové a sloužili pro uložení popela spáleného těla nebožtíka. Později se od tohoto zvyku upouštělo a přecházelo se ke zvyku ukládat nespálené tělo v mohyle na znak. Dále se v mohylách začínají objevovat bohaté milodary. Po značnou část období lze

nalézt tzv. birituální mohyly v nichž se nacházejí jak těla spálená, tak i nespálená. Tyto birituální hroby pocházejí nejčastěji z období konce 8. a počátku 9. století. Od 7. století se začínají objevovat také ploché kostrové hroby, jejichž výskyt je omezen pouze na specifické lokality. Avšak už na přelomu 9. a 10. století začínají být ploché kostrové hroby jediným používaným způsobem pohřbu v celém slovanském světě. Je nutné dodat, že ojediněle se v některých lokalitách, například v západních Čechách, zvyk pohřbívat do mohyl udržel až do počátku 11. století. Příčinu tohoto velkého přechodu k plochým kostrovým hrobům můžeme hledat pravděpodobně v šířící se křesťanské víře (Beranová 1988). Na území České republiky se nacházejí dvě velké oblasti slovanských mohylových pohřebišť, a to na jihu území a na severovýchodě území. Ve středních a západních Čechách se nacházejí mohylová pohřebišť jen ojediněle, což může být způsobeno pohřbíváním do plochých kostrových hrobů nebo pohřbu žehem (Beranová 1988). Tyto hroby mohly být odkryty a zničeny orbou a vzhledem k chudé hrobové výbavě následně lehce přehlédnuty. Slovanské mohyly nabývaly různých rozměrů. Nejčastěji se setkáváme s mohylami kruhového půdorysu, ale v případě větších mohyl se může vyskytovat i půdorys protáhlý, a to v případě, kdy se pohřby prováděly za sebou a násep se dovršoval. Rozměry průměru mohyl se většinou pohybují od 3 do 18 metrů. Výška mohyl se potom pohybuje okolo 2 - 6 metrů a vyšší (Beranová 1988).

2.2. Mohylová pohřebišť na Táborsku

Region Táborska je velice bohatý co se týče archeologických nálezů pravěkých a raně středověkých pohřebišť. Hlavní lokalitu tvoří zejména plošina s obloukem Lužnice. Může za to patrně hojné osídlení této oblasti v minulosti v kombinaci s rozsáhlými zalesněnými plochami, které, jak již bylo zmíněno výše, dobře konzervují archeologické památky (Menšík 2008). Od poloviny 19. století na tomto území probíhalo již několik archeologických výzkumů. V tomto ohledu je nutné zmínit jméno Jana Karla Hrašeho jenž prováděl rozsáhlé výzkumy v letech 1861-1898. Hraše se významnou měrou zasloužil o zhotovení mapových podkladů archeologických nalezišť a to zejména v povodí říčky Smutná, publikovanou v letech 1871-1873 (Menšík 2008).

Dalším významným jménem v oblasti nejen Táborské archeologie je Josef Ladislav Píč, spolu s kolegy tvořící Píčovu skupinu. Mezi významné výzkumy této skupiny patří zejména odkryv některých mohylových oblastí na dolním toku Lužnice jako jsou například mohyly v Hvoždanech, Dobronicích či v Opařanech. Výsledky svých výzkumů sepsal do několikasvazkového díla Starožitnosti země České (Menšík 2008).

Zde je nutné se zmínit o práci Antonína Beneše, Jiřího Fröhliche a Jana Michálka, kteří se zabývali povrchovou prospekci mohylníků a nemalou měrou přispěli k poznání mohylových pohřebišť v tomto regionu.

Přímo v zájmovém území, tedy na lokalitách Klobásná I a Klobásná II, potom působil Jan Nepomuk Woldřich a Jindřich Rychlý, který se oblasti Táborska ovšem věnoval pouze okrajově (Menšík 2008).

2.3. Lokality mohylových pohřebišť okres Tábor

Kromě zkoumané oblasti, o které bude podrobněji pojednáno níže, se na Táborsku nacházejí i další významné lokality převážně Slovanských mohylových pohřebišť. Jednou z relativně dobře prozkoumaných lokalit jsou Dobronice u Bechyně o rozloze 2 hektary. Dříve se na lokalitě nacházelo okolo 45 mohyl, část těchto mohyl byla prokopána či jinak zničena a dnes je patrně okolo 30-40 mohyl. O tuto lokalitu jeví archeologové zájem již od 60-70. let 19. století, kdy J. K. Hraše nechal prokopat několik mohyl, a o pár let později v jeho práci pokračoval J. L. Píč. Výzkumy provedené archeology na této lokalitě významnou měrou přispěly k pochopení duchovních představ kultury střední doby halštatské a bronzové a konstrukci mohylových hrobů zejména kamenných věnců (Památkový katalog 2021).

Další větší lokalitou významnějšího mohylového pohřebiště jsou Dražičky. Na pohřebišti je patrně okolo 91 mohyl, některé i velkých rozměrů, velké až 14 metrů. Větší část mohyl, které se nacházejí hlavně ve střední a jižní části pohřebiště, je uspořádána do pravidelných řad v typickém západo východním směru. Jedná se o polykulturní pohřebiště využívané od doby Laténské po raný středověk a je tak velmi cennou ukázkou chronologického vývoje uspořádání pohřebiště. Mohyly uspořádané do řad jsou spíše menších rozměrů a jsou řazeny do období raného středověku, zatímco větší mohyly na severu pohřebiště se řadí spíše do halštatsko-laténského období. První archeologické vykopávky probíhaly už koncem 19. století. Celkově bylo odkryto 8 mohyl. Na odkrývání mohyl se podílela jména jako J. Vacek, který prováděl odkryvy v letech 1938-1941, dále zde byl proveden záchranný výzkum tří narušených mohyl, který vedl dr. A. Beneš v letech 1976-1977. Nálezy z těchto mohyl jsou cenným hmotným pramenem pro poznání kultury dříve osidlující tento kraj (Památkový katalog 2021).

Nepříliš velké slovanské pohřebiště u Malšic se nachází na rozhraní obcí Dobřejice a Dobronice u Bechyně na levém břehu Lužnice asi 2 kilometry od řeky. Dodnes je zde patrných zhruba 13 mohyl a několik dalších je nejistých (v roce 1976 evidováno 30 mohyl).

Hroby na tomto pohřebišti jsou uspořádány do dvou podélných řad ve směru z východu na západ. Pohřebišť se vyznačuje jednoduchou konstrukcí mohyl, tvořených pouze hlinitým náspem (Památkový katalog 2021).

Za zmínku stojí i pohřebišť v lese „Borečný“ poblíž obce Rataje, které je vzdáleno zhruba 1,7 kilometru jihozápadním směrem od obce. Dnes je zde patrně 6 mohyl a několik útvarů, u kterých se předpokládá, že se jedná o pozůstatky mohyl. Mohyly tvoří jeden zhruba dvě stě metrů dlouhý pás v severovýchodním – jihozápadním směru. Dříve se zde patrně nacházelo více mohyl. J. K. Hraše v roce 1870 napočítal okolo 42 mohyl. Pohřebišť v lese „Borečný“ se vyznačuje velikostí mohyl. Na jižním konci se nacházejí dvě mohyly o výšce necelé dva metry a průměru patnáct metrů. Zbytek mohyl dosahuje výšky pouze okolo půl metru, avšak jejich průměr se pohybuje taktéž okolo patnácti metrů. Poblíž pohřebišť se nachází středověké tvrzíště obklopené příkopem, které v minulosti bylo považováno za mohylu. Archeologické vykopávky zde učinil J. K. Hraše. Při vykopávkách se podařilo objevit železný meč, hrot kopí a některé další cenné hmotné nálezy dokládající hmotnou kulturu v době železné a raném středověku (Památkový katalog 2021).

Pravděpodobně jednou z nejvýznamnějších lokalit, která přispěla v poznání mohylové kultury střední doby bronzové, její hmotné i duchovní kultury, je polykulturní areál nacházející se východně od obce Kášovice. Toto pohřebišť je situováno na pravý břeh Lužnice, od které je vzdáleno asi dva kilometry. V současnosti je dochováno 42 mohyl ale v minulosti byl jejich počet pravděpodobně vyšší (předpokládá se zánik některých mohyl vlivem orby na přilehlém poli). Některé mohyly na této lokalitě se vyznačují svými rozměry. Zejména ve střední a severní části se vyskytují mohyly, jejichž výška dosahuje až dva a půl metru a průměr se pohybuje okolo dvaceti metrů. Mohyly zde netvoří řady jako na většině jiných pohřebišť, ale tvoří zde jakýsi nepravidelný ovál. Nejvýznamnější je však pohřebišť svými archeologickými nálezy. Jedná se o pohřebišť, ze kterého pochází nejucelenější nálezový celek mohylové kultury střední doby bronzové v jižních Čechách. První výkopy na lokalitě prováděl J. Máchal roku 1873, kdy prokopal dvě mohyly a našel bohatý inventář. Později vykopávky převzal J. N. Píč, který postupně prozkoumal 24 mohyl a rozšířil tak už dřívější inventář. Za nejvýznamnější nález považují archeologové železný laténský meč s pochvou, spirálu z dvojitého zlatého drátu a dvouramenný bronzový mlat s analogiemi až v Karpatské kotlině. Tyto výzkumy mimo hmotné nálezy přinesly zásadní informace o konstrukčním provedení mohyl a pohřebním ritu ve střední době bronzové. Všechny nálezy jsou uloženy v Husitském muzeu v Táboře (Památkový katalog 2021).

Poslední lokalitou, která by měla být zmíněna, je slovanské pohřebišť poblíž obce Radětice. Toto pohřebišť o velikosti 14 mohyl ve třech řadách je dokladem nejstaršího

osídlení povodí střední Lužnice. Tato lokalita se rozkládá na návrší pět set metrů od říčky Smutné a jejího pravostranného bezejmenného přítoku. Je velice pravděpodobné, že dřívější počet mohyl byl o hodně vyšší, ale nedochovaly se kvůli písčitému, která se nachází v těsné blízkosti pohřebiště. Opět je zde patrné typické uspořádání mohyl do řad ve směru západ – východ. Na lokalitě neprobíhali žádné větší archeologické práce, byla prokopána pouze jedna mohyla a později vybrány nálezy z jedné porušené mohyly. Ačkoliv zde žádné větší práce neprobíhaly, asi třetina mohyl nese známky starých výkopů, o kterých ale není nic známo (Památkový katalog 2021).

3. PRAKTICKÁ ČÁST

3.1. Zkoumané území

Jako modelové území byly zvoleny dvě oblasti těsně přiléhající k městu Veselí nad Lužnicí. Jmenovitě se jedná o oblasti vedené v Památkovém katalogu jako mohylové pohřebiště Klobásná I (dále pouze Klobásná I nebo lokalita 1) a mohylové pohřebiště Klobásná II (dále pouze Klobásná II nebo lokalita 2). Poloha těchto dvou lokalit je zachycena na mapě č. 4. Pohřebiště Klobásná I je lokalizováno na mírném jižním svahu v nadmořské výšce 420 metrů nad mořem, klesajícím pozvolna k břehům řeky Lužnice, která je vzdálena necelých 800 metrů. Pohřebiště se rozkládá na ploše okolo 5 hektarů a je rozděleno silnicí na dvě části. Ve východní části je situováno přibližně 60 mohyl, v západní části pohřebiště se pak nalézá dalších 7 mohyl. Tato lokalita je jednou z nejzachovalejších lokalit mohylových pohřebišť na Táborsku. Většina mohyl je zachována s výjimkou čtyř mohyl, které zanikly při archeologickém výzkumu AÚ Praha. Mohyly tvoří rovnoběžné řady, které sledují východozápadní směr. Tyto řady jsou od sebe vzdáleny 3 až 40 metrů a jejich délka dosahuje až 240 metrů. Velká část území mohylového pohřebiště se nachází v pouze mírně či řídko zalesněné oblasti, nicméně některé mohyly byly lokalizovány i do oblasti s vysokou hustotou vegetace. Ukázkou terénu z lokality 1 lze vidět na obrázku č. 7 (Památkový katalog 2021).

LOKALITY MOHYLOVÝCH POHŘEBIŠŤ u Veselí nad Lužnicí



zdroj podkladové mapy: ČÚZK (2021): WMS služba ortofoto. Dostupné z https://geoportal.cuzk.cz/WMS_ORTOFOTO_PUB/WMSservice.aspx. (cit. 28.7.2021)
zdroj vektorových dat: autor

0 1 2 km

Matthess M.
Benešov u Prahy
2021

mapa č. 4

Na mapě jsou označeny zájmové lokality Klobásná I (červená) a Klobásná II (žlutá)

zdroj: autor

Lokalita Klobásná II se nalézá na temeni širokého návrší v nadmořské výšce 465 metrů, jehož svahy klesají na západě k řece Lužnici a na východě k obci Zlukov. Velikost lokality se pohybuje okolo 0,6 hektaru, do kterých je situováno 14 mohyl. Zvláštností této lokality je velká oválná mohyla nacházející se uprostřed pohřebiště o rozměrech 15 x 8 metrů. Lokalita je neporušena s výjimkou jedné mohyly. Pohřebiště je tvořeno jednou řadou mohyl směřující ve směru severovýchod – jihozápad, tvořenou čtyřmi mohylami včetně výše zmíněné oválné mohyly. Ostatní mohyly jsou roztroušeny bez zjevného uspořádání. Většina mohyl se nachází ve středně až silně zalesněné oblasti (Památkový katalog 2021).



obrázek č. 7

ukázka terénu na lokalitách Klobásná I (A) a Klobásná II (B)

zdroj: autor

3.2. Popis vstupních dat

Vlastní data bodového mračna byly pořízeny 24. 3. 2021. Ke skenování byl použit kompaktní LiDARový senzor RIEGL miniVUX -1 UAV připevněný na nosič DJI matrice 600 pro. Tento snímač má možnost snímání až pěti odrazů na jeden laserový paprsek. Skenovací rychlost se pohybuje okolo 100 scanů/sec (webové stránky Riegl 2021). Pro zaznamenání polohové informace bodového mračna byl použit čip APX - 15 UAV, který poskytuje přímé georeferencování bodového mračna (webové stránky Applanix 2021). Oblast Klobásná I byla naskenována z výšky zhruba 60 metrů v jedenácti pásech, které byly následně spojeny do jednoho souboru. Vzniklo tak bodové mračno o hustotě 419,2 bodu na čtvereční metr. Toto bodové mračno celkově čítá 30 208 660 bodů, z čehož je 5 390 530 klasifikováno jako body reliéfu, s kterými je dále pracováno. Lokalita Klobásná II byla naskenována v šesti pásech z výšky zhruba 60 metrů, které byly stejně jako v předchozím případě spojeny do jednoho souboru, s kterým bylo dále pracováno. Bodové mračno této lokality, oproti předchozí lokalitě, dosahuje nepatrně nižší hustoty bodového mračna, a to 349,97 bodů na metr čtvereční. Celkově toto mračno čítá 13 251 321 bodů, z čehož jako body reliéfu bylo klasifikováno 3 513 540 bodů. Bodové mračno poskytnuté ČÚZK bylo pořízeno dne 23. 3. 2020 ve střední letové výšce nad terénem 1350 metrů. Při tomto skenování byl použit model skeneru Leica ALS80. Byly pořízeny data ze dvou přeletů, které byly pro následné zpracování sjednoceny do jednoho bodového mračna. Soubor bodového mračna zahrnoval obě oblasti, které pro další zpracování byly odděleny. Oblast Klobásné I pro bodové mračno poskytnuté ČÚZK po sjednocení obou pásů přeletu dosahovala průměrné hustoty bodového mračna 7.62 bodů a pro poslední echo pak pouze 3,25 bodu na metr čtvereční. Celkově bodové mračno čítalo 421 930 bodů z čehož bylo

jako body reliéfu klasifikováno 88 067. Oblast Klobásné II dosahovala průměrné hustoty bodového mračna 6,57 bodu a pro poslední echo pak pouze 3,01 bodu na metr čtvereční. Celkově oblast Klobásná II po sjednocení pásů přeletu obsahovala 154 185 bodů z čehož jako body reliéfu bylo klasifikováno 39 151 bodů. Podrobně tyto charakteristiky ukazuje tabulka číslo 2.

lokality a data	hustota bod. mračna (bod./ m ²)	hustota bodů reliéfu (bod./ m ²)	počet bodů	počet bodů reliéfu	% bodů reliéfu z celku
vlastní data - lokalita Klobásná I	419,2	419,2	30 208 660	5 390 530	17,8 %
vlastní data - lokalita Klobásná II	349,7	349,7	13 251 321	3 513 540	26,5 %
ČÚZK data - lokalita Klobásná I	7,62	3,25	421 930	88 067	20,9 %
ČÚZK data - lokalita Klobásná II	6,57	3,01	154 185	39 151	25,4 %

tabulka č. 2

tabulka ukazující přehledně parametry bodových mračen

zdroj: autor

3.3. Software použitý pro zpracování vstupních dat

Vstupní data a analýza byly prováděny v softwaru Lastools. Konkrétně byly použity jeho funkce lasnoise, lasground_new, lasclassify, o kterých bude podrobněji pojednáno dále. Data předpřipravená v programu Lastools byla dále nahrána do programu Cloud Compare, kde proběhla vizualizace a získání souřadnic pro následné terénní zaměření jednotlivých mohyl. Veškeré výstupy z programu Lastools byly ve formátu .laz.

Jak již bylo zmíněno výše, pro zpracování dat byl použit program Lastools a jeho funkce. Konkrétně se jedná o funkce:

3.3.1 funkce lasnoise

tato funkce má za úkol odstranit, případně klasifikovat, šum v bodovém mračnu v podobě izolovaných bodů, které se zde mohou vyskytovat a narušovat tak výsledek. Funkce tyto izolované body vyhledává na základě parametrů definovaných před samotným spuštěním. V této funkci je možno definovat velikost vyhledávací oblasti a zpřesnit tak očištění výstupu. Velikost vyhledávací buňky je možné definovat pomocí parametru „step_xy” a parametru „step_z”. „Step_xy” definuje velikost strany čtvercové buňky. Samostatně definovatelný je pak parametr „step_z”, který určuje výšku vyhledávací buňky. Maximální počet bodů pro označení bodu jako šumu je definován parametrem „isolated”. Je li tedy parametr „isolated” nastaven například na hodnotu 5 a ve vyhledávací oblasti definované výše, okolo vyhodnocovaného bodu, je nalezeno méně než 5 dalších bodů, je tento bod vyhodnocen jako šum a v závislosti na dalším nastavení smazán nebo klasifikován jako šum, defaultně tedy jako kategorie 7. Nicméně číslo kategorie je možné změnit dle potřeby. Vzhledem k tomu, že bodové mračno poskytnuté Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním prošlo předzpracováním při němž již byl šum odstraněn a vlastní bodové mračno z ULS obsahuje pouze minimum šumu, byla tato funkce ponechána v defaultních hodnotách jak lze vidět na obrázku č.8, ukazujícím hodnoty nastavení pro jednotlivé funkce (Lastools 2021).

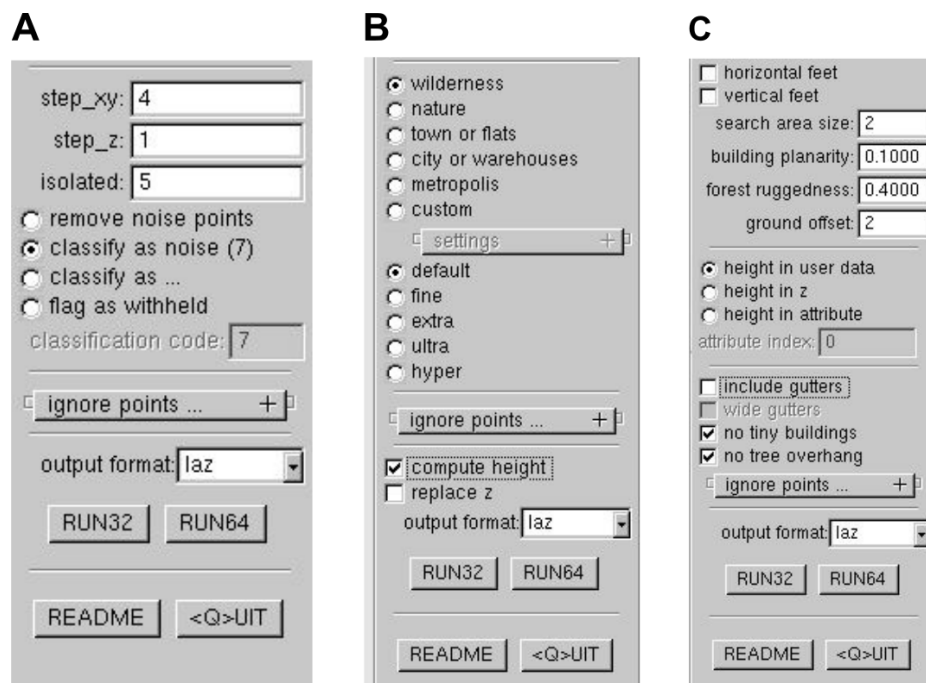
3.3.2. funkce lasground_new

Jedná se o přepracovanou verzi funkce “lasground”. Pomocí této funkce je možné klasifikovat body reprezentující reliéf jako třídu 2 a ostatní body jako třídu 1. Jako třída 2 jsou klasifikovány poslední odrazy, všechny ostatní odrazy jsou klasifikovány jako třída 1, tedy „off terrain pointy”. Opět je zde několik možností nastavení, s kterými je možno dosáhnout optimálního výsledku. Nachází se zde možnost nastavení velikosti kroku klasifikace, přičemž je na výběr pět přednastavených možností a šestá možnost, kde může uživatel definovat libovolnou hodnotu. Přednastavené hodnoty pokrývají široké spektrum terénu a prostředí. Přednastavená možnost „wilderness” má definovaný krok po třech metrech a hodí se tak pro práci s malými terénními nerovnostmi u LiDARových dat s vysokým rozlišením. Jak lze vidět na obrázku č. 8, tato funkce byla použita pro klasifikaci bodových mračen použitých v této práci. Další možností je pak nastavení „nature”, které používá pro klasifikaci kroku po pěti metrech a je vhodná zejména pro terén bez budov. Možnost „town or flats”, jak již název napovídá, je vhodná se svým

krokem po deseti metrech, který je schopný odstranit většinu budov pro použití na plochem reliéfu nebo v menších městech bez velkých budov. Pokud se ve městech vyskytují velké budovy jako například skladiště, je výhodnější využití možnosti „city or warehouses“, která používá kroku po padesáti metrech, aby bylo dosaženo odstranění těchto větších staveb. Další krok nastavení funkce se týká strmosti reliéfu, kdy je možno zintenzivnit, v závislosti na strmosti reliéfu vyhledávání bodů pro velmi strmé svahy, zaškrtnutím políčka „fine“, „extra“, „ultra“ nebo naopak zvolit méně intenzivní vyhledávání pro ploché nebo pouze mírně svažité reliéfy. Nicméně je doporučováno ponechat defaultní nastavení. V dalším kroku je nezbytné zaškrtnout políčko „compute heigh“, aby bylo možné spustit funkci „lasclassify“ a klasifikace proběhla úspěšně (Lastools 2021).

3.3.3. funkce lasclassify

Je funkcí, díky které je možné klasifikovat další třídy v bodovém mračnu kromě šumu a holého povrchu. K tomu, aby bylo možné klasifikovat další třídy, je nutné nejprve klasifikovat právě holý povrch a je nutné znát výšku bodů nad povrchem. Posledním kritériem je hustota bodového mračna, jehož minimální hodnota musí být alespoň dva pulzy na čtvereční metr. Pomocí hodnot „building planarity“ a „forest ruggedness“ lze zařadit do odlišných tříd budovy a vegetaci. Platí, že čím menší hodnota, tím rovinatější povrch objektu. Toto nastavení bylo ponecháno defaultně vzhledem k tomu, že ve zkoumaném území se žádné budovy nevyskytují. V dalším kroku, pro tuto konkrétní práci, bylo odškrtnutí políčka include gutters. V případě silně zašuměných dat je možné, že tato funkce bude mít problém s vyhledáváním rovin pro správné vyhodnocení, zda se jedná o budovu či vegetaci a je nutné vyzkoušet různé hodnoty pro možnosti „building planarity“ a „forest ruggedness“. Dalším problémem, který se může vyskytnout, je pak špatné napojení letových linií. V tomto případě se doporučuje každou linii klasifikovat zvlášť. Nastavení použité pro tuto práci lze vidět na obrázku č. 8 (Lastools 2021).



obrázek č. 8

*nastavení nástrojů lasnoise (A) lasground_new (B) a lasclassify (C) v programu lastools
zdroj: autor*

3.4. Lokalizace mohyl v bodovém mračnu

Bodová mračna lokalit zpracovaná v programu Lastools byla nahrána do programu Cloud Compare, kde bylo nutné pro vizualizaci jednotlivé dříve klasifikované třídy od sebe oddělit, aby bylo možno je prohlížet nezávisle na sobě, respektive aby bylo možno zobrazit holý povrch a lokalizovat tak útvary nacházející se pod vegetací. Tohoto bylo dosaženo následujícím postupem: Po nahrání bodového mračna do programu Cloud compare, bylo pomocí properties dané vrstvy zjištěno rozložení tříd. V bodových mračcích jsou klasifikovány třídy vysoká vegetace, nízká vegetace a reliéf. Je nutné pro další postup tyto třídy od sebe oddělit tak, aby s nimi bylo možné pracovat jako s jednotlivými vrstvami. K tomuto účelu byla použita funkce "Filter by value", kdy byly postupně odfiltrovány jednotlivé třídy a exportovány do samostatných kategorií. Dále je nezbytné pro účely vizualizace a prvotní lokalizace mohyl přidat do zobrazovacích možností pro vrstvu reliéfu možnost vykreslovat pomocí souřadnice „z“. Toho bylo dosaženo pomocí funkce „export coordinates to SF“. Nyní je možné pomocí histogramu vizualizovat mohylové útvary na povrchu a určit tak jejich souřadnice. Pro vytvoření seznamu souřadnic jednotlivých hrobů byla použita funkce „point list picking“, která umožňuje export souřadnic v podobě textu. Takto získané souřadnice byly postupně zadávány do webového portálu „Mapy.cz“, pomocí kterého byla zjištěna jejich poloha v terénu a zaznamenané body nahrány do zařízení použitého pro terénní průzkum. Mimo souřadnic mohyl byly dále zjišťovány souřadnice významnějších

„děř“ v bodovém mračnu, aby bylo možné jednak ujistit se, že se zde nenachází žádná mohyla a jednak pořídít snímek vegetace, která je příčinou těchto „děř“ v bodovém mračnu. Tento postup byl pro obě lokality stejný. Zjištěné souřadnice použité pro terénní průzkum lze vidět v přiložené tabulce v příloze 4.

V dalším kroku byl pomocí programu Cloud Compare generován DEM pro vlastní bodové mračno a pro mračno poskytnuté Českým úřadem zeměměřičským a katastrálním (dále ČÚZK), za pomoci metody CSF filter, která byla popsána výše. Bodové mračno poskytnuté ČÚZK zahrnovalo obě oblasti ve stejném mračnu. Pro účely práce byly tyto oblasti separovány od sebe, do samostatných mračen, pro snadnější zpracování. Celkem byly vygenerovány 2x2 DEM, které byly následně vizuálně porovnávány. Vzhledem k nižší hustotě bodového mračna ČÚZK byla sjednocena mračna z obou přeletů, pro zahuštění tohoto mračna a dále bylo pracováno s takto zahuštěným bodovým mračnem.

Dále byly generovány rastrové soubory ve formátu .geotiff jednotlivých lokalit za použití příslušných bodových mračen. S těmito soubory bylo dále pracováno v softwaru pro vizualizaci reliéfu (Relief visualization toolbox), který umožňuje jednoduše aplikovat výše popsané vizualizační techniky používané v archeologii, ale i v jiných oborech, na rastrové soubory a umožňuje tak identifikovat malé reliéfní prvky (Kokalj a kol. 2019). Konkrétně byly použity vizualizační techniky **analytical hillshading** s nastavením azimutu 315° a 360° s výškou osvětlení nad obzorem 15° a 35°. Soubor s výškou nad obzorem 15° se jevil po vizuálním porovnání jako vhodnější a proto byl soubor s výškou osvětlení nad obzorem 35° vyřazen. Soubor s azimutem 315° byl použit jako základ pro srovnání výsledků souboru s azimutem 360° a dále s ním nebylo pracováno. Soubor s azimutem 360° se snaží využít severozápadní orientaci mohylových řad a vylepšit tak možnost vizuální interpretace. Dále byla použita vizualizační metoda **slope gradient**, u které program nenabízí žádné nastavení parametrů. Metoda **openness** byla generována separátně s jinými parametry pro varianty positive a negative tak, aby byl výsledek co nejlépe interpretovatelný. Varianta **openness-positive** byla generována s parametry pro vyhledávací radius 100 a počet vyhledávaných směrů 8, který zůstává pro obě varianty shodný. Varianta **openness-negative** byla oproti tomu generována pouze s menší hodnotou vyhledávacího radiusu, který byl nastaven na 50. Jednou z dalších technik byla technika **sky view factor**, jejíž parametr, počet vyhledávaných směrů, byl nastaven na 8 směrů. Jak bylo zmíněno výše v teoretické části, Zakšek, Oštir, Kokalj (2011) a Kokalj, Zakšek, Oštir (2013) doporučují spíše nižší hodnoty okolo 10 m pro zachování mikroreliéfních prvků. S těmito hodnotami bylo pracováno. SVF byl vygenerován dvakrát, jednou bez odstranění šumu, podruhé s odstraněním šumu. Poslední použitou metodou je metoda **simple local relief model**.

Jedná se o zjednodušenou verzi výše popsané metody využívající pouze jednoduchý průměr pro výpočet trendu. Model vytvořený z trendu je pak vytvořen přímo odečtením filtrovaného počátečního modelu (Kokalj a kol. 2019). U této metody se jako nejvíce vyhovující, pro parametr poloměru pro hodnocení trendu, jevila hodnota 50.

3.5. Lokalizace mohyl v terénu

Měření na lokalitách proběhlo 27. května 2021. Teplota se pohybovala kolem 19°C, zataženo. Naměřená data byla zaznamenávána pomocí dvou přístrojů. Prvním byl chytrý telefon Lenovo A6 note (podpora systémů GPS, GLONASS, Galileo). Jako druhý přístroj, pro zaznamenávání souřadnic nalezených mohyl v terénu, byla zvolena turistická GPS, model DAKOTA 10 od výrobce Garmin.

3.6. Výsledky

Výsledkem zpracování a analýzy bodového mračka bylo klasifikované bodové mračno na třídy vysoké vegetace, nízké vegetace a povrchu. Dalším výstupem byly rastrové soubory vygenerované z těchto bodových mraček. Konkrétně byla použita třída povrchu. Celkem bylo generováno 28 rastrových souborů. Jeden soubor pro každou vizualizační metodu a lokalitu. Nad těmito soubory dále probíhala vizuální analýza mohylových hrobů. V terénu bylo celkem zaznamenáno a zaměřeno 72 útvarů, z čehož u 4 útvarů, které se při prvotní analýze bodového mračka jeví jako mohylníky, bylo při terénním měření zjištěno, že se jedná o navršené větve po lesnické těžbě, případně vývraty stromů. Není vyloučeno, že kvůli nepřehlednosti a částečné neprůchodnosti terénu, nebyly při terénním měření objeveny všechny mohylové útvary, které je možné objevit pomocí provedené analýzy z LiDARových dat a vizualizovaných rastrových souborů. Při terénním měření bylo nalezeno 54 mohyl na lokalitě Klobásná I a 14 mohyl na lokalitě Klobásná II. Vizuální analýza probíhala nad každou vizualizační metodou zvlášť, nad vlastními daty a daty poskytnutými ČÚZK. Každá metoda dosahovala různé úspěšnosti v detekci mohyl, v závislosti na tom, zda byla provedena nad vlastními daty, nebo nad daty poskytnutými ČÚZK, která jsou výrazně méně hustá. Úspěšnost detekce mohyl byla vztahována k počtu mohyl uvedenému v Památkovém katalogu (2021), kde je zaznamenáno 65 mohyl na lokalitě Klobásná I a 14 mohyl na lokalitě Klobásná II. Na mohylovém pohřebišti Klobásná I bylo detekováno 11 řad mohylových hrobů, jak lze vidět v příloze 1, sledující s mírnými odchylkami východozápadní směr typický pro slovanská mohylová pohřebiště. Nejdelší řada pak čítala 7 mohyl. Na lokalitě Klobásná II byly identifikovány tři řady. Dvě delší řady čítající 5 mohyl a jedna kratší

řada čítající 2 mohyly. Řady opět sledují východozápadní směr. Na obou lokalitách byly identifikovány i mohyly, které nespádají do žádné z řad, tyto lze vidět v příloze 1, (jsou znázorněny modrými elipsami). Na lokalitách byly dále detekovány pomocí vizualizačních metod i poškozené nebo prokopené mohyly a útvary, které se jako mohyly jeví, ale při terénním měření se zjistilo, že ve skutečnosti se jedná o vývraty nebo odpad po lesnické těžbě (navršené větve). Tyto útvary jsou zaznamenány v příloze 2.

Jako nejuspěšnější metody se ukázaly **openness - negative** a **sky view factor** prováděné nad vlastními daty. Za pomoci těchto metod bylo možné vizuálně odhalit až 74 mohyl z obou lokalit. Metoda **openness - negative** navíc vykazovala velice dobré výsledky i v případě, že probíhala nad daty ČÚZK, kdy bylo možné detekovat 71 mohyl. Nad daty ČÚZK vykazovala dobré výsledky i metoda **Sky view factor (s redukcí šumu)** a **local relief model**. U metody local relief model a sky view factor (s redukcí šumu) se podařilo vizuálně detekovat shodně počet 60ti mohyl. Naopak nejméně úspěšnou metodou se ukázala metoda **Sky view factor (bez redukce šumu)**, u které bylo možné vizuálně identifikovat pouze 35 mohyl z obou lokalit. Nepříliš dobrých výsledků bylo dosaženo i metodou **openness - positive**, po jejímž interpretování bylo odhaleno pouze 34 mohyl při použití na vlastních datech a 29 mohyl při použití nad daty ČÚZK. Přehledné výsledky z jednotlivých lokalit jsou zobrazeny na grafech v příloze 3, celkový přehled je zobrazen taktéž na grafu v příloze 3.

4. DISKUZE

Jak lze vidět z grafů v příloze 3, úspěšnost vizuální interpretace není závislá pouze na hustotě bodového mračka, ale i na použité technice vizualizace. Výsledky jednotlivých vizualizací lze vidět v přílohách 4 až 10.

Pokud budeme porovnávat data získaná metodou ULS a metodou LLS, je na první pohled zřejmé, že data pořízená metodou ULS jsou neporovnatelně hustší a budou poskytovat lepší výsledek. Nicméně Wieser a kol. (2017 v Bruggisser a kol. 2019) ve své práci zmiňují, že je nutné při výběru metody skenování (ULS nebo LLS) brát v potaz velikost oblasti, protože ULS data lze většinou pořídit pouze v lokálním měřítku. Zajímavý je pak fakt, že ačkoliv jsou data z ULS hustší, data LLS se jim podílem bodů reliéfu z celkového množství bodů vyrovnají, jak ukazuje tabulka č. 2.

Metoda **analytical hillshading** se ukázala jako dobře čitelná a velice přehledná. Nicméně jeví horší výsledky při použití na datech menší hustoty bodového mračka. I za použití

hustšího bodového mračna není schopna odhalit všechny mohyly, zejména nižší mohyly zanikají. Tato metoda se ukázala jako pracnější a to zejména z důvodu nutnosti experimentovat s nastavením úhlů pro co nejlepší výsledek. Dalším problémem, ale i výhodou této techniky při použití v archeologii, může být, jak již bylo popsáno výše, orientace liniových objektů, jak uvádějí například autoři Doneus a Briese (2011); Kokalj, Zakšek, Oštir (2013). V této práci bylo využito poznatku severozápadní orientace slovanských mohylových pohřebišť a byl zvolen azimut 360° , který je kolmý na delší stranu mohylníků a tím pádem je zvýrazňuje a je tak možné dosáhnout lepší interpretace. Zároveň bylo použito osvětlení pod velmi malým úhlem vzhledem k nízkému profilu některých mohyl. Osvětlením pod úhlem 15° bylo dosaženo většího počtu identifikovaných mohyl než při osvětlení pod úhlem 35° . Pokud osvětlíme scénu pod takto malým úhlem, dojde i ke zvýraznění drobných nerovností reliéfu, což může zapříčinit vznik rušivého šumu. Kokalj, Zakšek, Oštir (2013) ve své práci tuto metodu rozšiřuje o další dva výstupy s krokem azimutu o 90° , jejich spojením a zohledněním pouze průměru nebo rozsahu hodnot. Nicméně dodává, že takové rozšíření je nepraktické a pracné.

Oproti metodě Analytical hillshadingu, metoda **slope gradient** nedosahuje tak dobrých výsledků. Tato metoda se navíc jeví jako metoda, u které můžeme pozorovat při srovnání s ostatními zde sledovanými metodami, největší rozdíl mezi úspěšnou detekcí nad vlastními daty (úspěšnost 70,9%) a daty ČÚZK (úspěšnost 26,6%). Z toho lze vyvozovat závěr, že úspěšnost této metody je nejvíce závislá na kvalitě vstupních dat a hustotě bodového mračna. Jak lze vidět v příloze číslo 5, při interpretaci nad hustším bodovým mračnem jsou mohyly dobře viditelné, zatímco nad řidším mračnem ČÚZK jsou jen těžko rozpoznatelné. Slabina této metody spočívá v tvaru některých mohyl, které pozvolna přecházejí do terénu. Ukázka takovéto mohyly je zobrazena v příloze 5, kde je znázorněna modrou elipsou. Naopak se tato metoda jeví jako užitečná při detekci útvarů, které by bylo možné při jiných vizualizačních technikách zaměnit za mohyly (viz. local relief model). To může být způsobeno hlavně tím, že tyto útvary ve většině případů nemají tak plynulý přechod jako právě mohyly a jeví se proto výrazně tmavší, jak je ukázáno na příloze číslo 5, kde jsou tyto útvary znázorněny červenou elipsou.

Zajímavých výsledků bylo dosaženo zejména u metody **openness - negative**, která vykazovala velice dobré výsledky, jak nad daty poskytnutými ČÚZK, tak nad vlastními daty. Detekce mohyl pomocí této techniky může být náročnější pro laickou veřejnost a to zejména pokud jsou výstupy generovány z řidšího bodového mračna, nicméně i zde jsou viditelné ve velké míře a může být velice úspěšně použita v kombinaci s dalšími metodami. Yokoyama, Shirasawa a Pike (2002) ve své práci uvádí, že pro zvýraznění malých reliéfních

prvků při této metodě se používají spíše malé hodnoty výpočtového okruhu, naopak pro zvýraznění velkých reliéfních prvků jako kopce a údolí se používají velké hodnoty v řádech až stovek metrů. Pro výpočet použitý v práci byla použita nejvyšší možná hodnota, což odporuje tomuto tvrzení, ale v případě, kdy byly použity hodnoty menší než 50 nebo 100 jednotek, mohly ve výsledné vizualizaci nebyly viditelné. Tento jev vysvětluje Doneus (2013), který se ve své práci zmiňuje, že velikost hodnot potřebných pro znázornění mikroreliefu se může měnit v závislosti na prostorovém rozlišení zkoumaného území, z čehož vyplývá, že nutnost použití takto vysokých hodnot byla způsobena právě prostorovým rozlišením zkoumané oblasti, které bylo vysoké. Úspěch metody openness - negative nebo naopak neúspěch metody openness - positive je pravděpodobně způsoben konvexním tvarem mohyl. Při variantě positive jsou měřeny azimuty na vnějších stěnách mohyl, jak lze vidět na obrázku č. 4 vlevo. Ztmavené oblasti, diagnostikující polohu mohly, které by se měli ukázat na vizualizaci, jsou tak rozprostřeny na větší ploše a proto nejsou tak dobře zřetelné, zejména pokud je přechod velice pozvolný. Naopak při variantě negative jsou měřeny azimuty vnitřních stěn mohyl, jak lze vidět na obrázku č. 4 vpravo. Ztmavené oblasti diagnostikující mohly jsou tak koncentrovány na menší ploše a výsledek je čitelnější. Respektive pokud by se jednalo o diagnostiku konkávních tvarů, pravděpodobně by dosahovala lepších výsledků varianta openness - positive. Pokud srovnáme úspěšnost terénního měření s úspěšností této metody viditelné v příloze č. 3, můžeme pozorovat, že tato metoda dosáhla o něco lepších výsledků, jak při detekci z dat poskytnutých ČÚZK, tak z vlastních dat. Lozano a Alonso (2016) ve své práci, kde mimo jiné porovnává různé vizualizační techniky za použití různého rozlišení DEM, dodává, že použití openness pomáhá identifikovat archeologické útvary i na modelech s menším rozlišením.

Metoda **Sky view factor** byla provedena ve dvou variantách. První varianta byla provedena bez redukce šumu, u druhé varianty byl šum odstraněn. Při porovnání těchto dvou výstupů jedné metody, podobně jako u metody openness, dospějeme k velice rozdílným výsledkům. Jak můžeme vidět na přílohách 8 a 9, v případě, že z výsledku nebude šum odstraněn, se výsledné mohylové útvary jeví nevýrazné a je problém určit jejich obrysy a to i nad výstupem z hustého bodového mračna. Zároveň je zde problém, jak si lze všimnout na přílohách 8 a 9, určit, které útvary jsou skutečně mohly a které útvary se tak pouze jeví. Při odfiltrování šumu u této metody lze dosáhnout velice dobře čitelného výsledku. Oproti případu, kdy šum nebyl odstraněn, bylo možné identifikovat na datech poskytnutých ČÚZK o 37 mohyl více. Na vlastních datech to bylo pak o 38 mohyl více, což je zlepšení o zhruba 47 %. Míra zlepšení u obou typů použitých dat byla srovnatelná. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při nastavení vyhledávacího rádiusu na hodnotu 50. To bylo způsobeno pravděpodobně jednak velikostí zkoumaných objektů a jednak rozlišením rastrového souboru. Při porovnání

výsledků s výsledky terénního měření můžeme v příloze č. 3 vidět, že dosahuje dokonce lepších výsledků. V práci Bennetové a kol. (2012), zabývající se srovnáváním různých vizualizačních technik používaných v archeologii, byla zahrnuta i metoda Sky view factoru, kde nezávisle na sobě, spolu s metodou local relief modelu, dosahuje úspěšnosti okolo 77 %. V této práci metoda sky view factoru dosahuje o něco vyšší úspěšnosti, až 91 %, což může být zapříčiněno tím, že na rozdíl od práce Bennetové a kol. (2012) je v této práci pracováno pouze s jedním typem útvarů. Bennetová a kol. (2012) dále pracuje s kombinacemi metod pro dosažení lepšího výsledku. Udává, že kombinací metod Principal component analysis of shaded relief model (dále PCA¹) se úspěšnost detekce zlepšila na 93 % a kombinací sky view factoru, PCA a metody aspect, používané pro analýzu azimutu natočení svahu, bylo možné detekovat až 97 % útvarů.

Metoda **simple local relief** dosahuje velmi podobných výsledků jako metoda sky view factoru, pouze nad vlastními daty bylo identifikováno o dvě mohyly méně na lokalitě 1. Její hlavní výhodou je odbourání velkých reliéfních prvků a zvýraznění pouze mikroreliéfních prvků. Nicméně tato výhoda přináší i svá úskalí a tím je problém rozlišení mohylníků od vývrátů či jiných podobných útvarů. Toho si lze povšimnout srovnáním přílohy 10 s přílohou č. 2, kde jsou tyto útvary znázorněny. V případě méně hustých dat je problém s interpretací vlivem mezer v datech. Nicméně metoda si zachovává velkou část své čitelnosti. V porovnání úspěšnosti (91,1 %) se může rovnat s měřením v terénu (86,1%). Bennetová a kol. (2012), ve své práci zabývající se porovnáváním různých vizualizačních technik a jejich úspěšnosti, pracovala mimo jiné i s metodou local relief model. V její práci tato technika měla zhruba 77% úspěšnost. Je nutné dodat, že práce Bennetové a kol. (2012) probíhala na složitějším a větším území než tato práce, to může být důvodem takto velkého rozdílu v úspěšnosti detekce archeologických útvarů. Bennetová a kol.(2012) ve své práci dále uvádí, že metodu local relief modelu je vhodné kombinovat s metodou SVF a tím značně zvýšit úspěšnost identifikace archeologických prvků. Udává, že pomocí této kombinace bylo dosaženo detekce až 93 % útvarů.

5. ZÁVĚR

Práce se zabývala možností detekce mohylových pohřebišť v zalesněném terénu z dat laserového skenování pořízených z UAV nosiče (ULS) a z letadla (ALS), které poskytl Český úřad zeměměřický a katastrální. Použitá data se lišila nejen nosičem, ale i typem

¹ PCA - jedná se o metodu využívající multivariační statistickou analýzu pro redukci nadbytečné informace z více rastrových souborů. Výstup pak představuje série obrázků reprezentující statistickou odchylku v množství dopadajícího světla na původní hillshade metodu (Bennet 2012).

skeneru, hustotou bodového mračna a parametry skenování. Pro ověření výsledků bylo provedeno terénní měření. Obě bodová mračna byla vizualizovaná pomocí vizualizačních metod analytical hillshading, slope gradient, openness - positive, openness - negative, sky view factor s filtrací šumu a bez filtrace šumu a metody local relief model. Pro obě mračna a obě oblasti byl vytvořen samostatný rastrový soubor, nad kterým poté byla provedena vizuální analýza. Při této analýze byl určován počet identifikovatelných mohyl, popřípadě možnost záměny mohylových útvarů s nemohylovými útvary. Nejlepších výsledků dosahovala vizualizační technika openness - negative, sky view factor a simple local relief. Nejslabších výsledků pak bylo dosaženo technikami sky view factor bez odstranění šumu a openness - positive. U metody slope gradient se ukázala největší závislost výsledku na kvalitě dat, při použití nad vlastními daty dosahovala tato metoda průměrných výsledků, při použití nad daty ČÚZK se tato metoda ukázala jako nejslabší. Nicméně s kvalitními daty se tato technika jevila jako užitečná při detekci nemohylových útvarů. Na základě výsledků můžeme říci, že se podařilo ověřit využití dat z LLS a ULS. Tyto data se dají využít k detekci archeologických útvarů v zalesněném terénu. Data z LLS se jeví jako vhodná, za použití vhodných vizualizačních technik, pro počáteční průzkum a lokalizaci archeologických útvarů v zájmové lokalitě, popřípadě lokalizaci nové archeologické lokality. Pro detailnější průzkum dříve vytipované lokality se vzhledem k vyšší hustotě bodového mračna jeví data z ULS jako vhodnější.

Zajímavé rozšíření této práce by představovala možnost automatické nebo poloautomatické analýzy archeologických útvarů z dat ČÚZK pomocí strojového učení. V současnosti na téma automatické detekce vznikají zajímavé práce v zahraničí, jako například práce Ch. Sevara a kol. (2015) zabývající se poloautomatickou detekcí archeologických objektů za pomoci vizualizace metodou openness, založené na porovnání pixelů a orientace objektů. Automatickou detekci s využitím hlubokého učení za pomoci neurální konvoluční sítě zkoumal Guyot, Lennon a Moy (2021). Ve své práci využívá nejnovějších algoritmů počítačového vidění pro detekci archeologických útvarů z třinácti vizualizačních technik. Další možností by pak bylo rozšířit tuto práci o porovnání výsledků kombinací jednotlivých technik tak, jako využívají ve svých pracích například Kokalj, Zakšek, Oštir (2013) - vizualizace vzniklé složením obrazu celkového zakřivení reliéfu a stínovaného reliéfu nebo složením z normalizovaného digitálního modelu povrchu a stínovaného reliéfu, popřípadě metodu uváděnou Doneusem a Briesem (2011), kdy kombinují sklon s metodou analytical hillshading.

Použitá literatura

ALBY, E., GRUSSENMEYER, P. (2012): From point cloud to 3D model, modelling methods based on architectural knowledge applied to fortress of Chatel sur Moselle (France). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 39-B5, Melbourne, Australie, 75 -80.

APPLANIX (2021): APX-15 UAV.

https://www.applanix.com/downloads/products/specs/APX15_DS_NEW_0408_YW.pdf

(cit. 26. 7. 2021).

BAUM, N. (2017): Keltové očima archeologie. In: Zimmer, S. (ed.): Keltové-mýtus a realita. Vyšehrad, Praha, 31-56.

BENNET, R., WELHAM, K., HILL, R. A., FORD, A. (2012): A Comparison of Visualization Techniques for Models Created from Airborne Laser Scanned Data. Archaeological Prospection, 19, 41-48.

BERANOVÁ, M. (1988): Slované. Panorama, Praha.

BÍLEK, J. (2002): Hádanky naší minulosti 1: Kam odešli Keltové?. Euromedia Group k. s. - Knižní klub, Praha.

BOBÁL, P., SIPINA, S., ŠKULTÉTY, F. (2017): Aspect of Aerial Laser Scanning when exploring unknown archaeological sites (Case study). Transportation Research Procedia, 28, 37-44.

BOUZEK, J. (2007): Keltové našich zemí v evropském kontextu. Triton, Praha / Kroměříž.

BRASSEL, K. (1974): A Model for Automatic Hill-Shading. Cartography and Geographic Information Science 1, 15–27.

BRUGGISSER, M., HOLLAUS, M., KÜKENBRING, D., PFEIFER, N. (2019): Comparison of forest structure metrics derived from UAV LiDAR and ALS data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-2/W5, 325-332.

DEVEREUX, B. J., ASAMBLE, G. S., CROW, P., CLIFF, A. D. (2005): The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity* 79, 648-660.

DEVEREUX, B. J., AMABLE, G.S., CROW, P. (2008): Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity*, 82, (316), 470–479.

DONEUS, M., BRIESE, CH. (2006): Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. Publikace k 7. mezinárodnímu Sympotiu Virtuální Reality, Archeologie a Kulturního Dědictví, The Eurographics Association, 155-162.

DONEUS, M., BRIESE, CH., FERA, M., JANNER, M. (2008): Archaeological prospection of forested areas using full-waveform airborne laser scanning. *Journal of Archaeological science*, 35, 882-893.

DONEUS, M., BRIESE, CH. (2011): Airborne Laser Scanning in forested areas - potential and limitations of an archeological prospection technique. In Cowley, D. C. (ed.), příležitostná publikace 3. výzkumné skupiny Letecké archeologie a archeologického výzkumu k příležitosti 11. EAC symposia pro správu historického dědictví v Reykjavíku, European Archeologia Consilium, 59-76.

DONEUS, M. (2013): Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models. *Remote Sensing*, 5, 6427-6442.

DRDA, P., RYBOVÁ, A. (1998): Keltové a Čechy. Academia, Praha.

FLOOD, M. (2001): LIDAR activities and research priorities in the commercial sector. IAPRS. WG IV/3., Vol XXXIV. Annapolis, MD, 22-24., 678-684.

GUYOT, A., LENNON, M., MOY, L. H. (2021): Objective comparison of relief visualization techniques with deep CNN for archaeology. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 38, 103027.

HAVLÍK, L. E. (1964): Velká Morava a středoevropští Slované. Státní pedagogické nakladatelství, Praha.

HESSE, R. (2010): LiDAR-derived Local Relief Models - a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 17, 67-72.

HORN, B. (1981): Hill shading and the reflectance map. *Proc. IEEE*, 69, 14-47.

HUG, C., ULLRICH, A., GRIMM, A. (2004): Litemapper-5600 ea waveform-digitizing LIDAR terrain and vegetation mapping system. In: Thies, M., Koch, B., Spiecker, H., Weinacker, H. (Eds.), *Proceedings of Natscan, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment Instruments. Processing Methods and Applications. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXVI, 24-29. část 8/W2.*

KENNELLY, P. J. (2008): Terrain maps displaying hill-shading with curvature. *Geomorphology* 102, 567-577.

KOKALJ, Ž., ZAKŠEK, K., OŠTIR, K. (2013): Visualizations of LiDAR Derived Relief Models. In Opitz, R. S, Cowley, D. C. (ed.): *Interpreting archeological topography.* Oxbow books, Oxford, 100-114.

KOKALJ, Ž., ZAKŠEK, K., OŠTIR, K., PEHANI, P., ČOTAR, K., SOMRAK, M. (2019): *Relief Visualization Toolbox, ver. 2.2.1, manuál.*

https://iaps.zrc-sazu.si/sites/default/files/rvt_2.2.1_0.pdf (cit. 26. 7. 2021).

KRAUS, K. (2004): *Photogrammetrie. Band1. Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. 7., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage.* Walter de Gruyter, Berlin, New York.

KREMER, B. (2017): Keltové ve světě antiky. In: Zimmer, S. (ed.): *Keltové-mýtus a realita.* Vyšehrad, Praha, 15-30.

LASTOOLS (2021): *Manuál softwaru Lastools.* <https://rapidlasso.com/> (cit. 26. 7. 2021).

LOZANO, J. F., ALONSO, G. G. (2016): Improving archaeological prospection using localized UAVs assisted photogrammetry: An example from the Roman Gold District of the Eria River Valley (NW Spain). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 5, 509-520.

MAIER, B. (2017): Náboženství Keltů. In: Zimmer, S. (ed.): *Keltové-mýtus a realita.* Vyšehrad, Praha, 57-67.

MARK, R. (1992): Multidirectional, Oblique-weighted, Shaded-relief Image of the Island of Hawaii. U.S. Geologický Průzkum.

MAYORAL, A., TOUMAZET, J., P., SIMON, F., X., VAUTIER, F., PEIRY, J., L. (2017): The Highest Gradient Model: A New Method for Analytical Assessment of the Efficiency of Lidar-Derived Visualization Techniques for Landform Detection and Mapping. Remote Sensing 9, 120.

MENŠÍK, P. (2008): Mohylová pohřebiště na Táborsku. Archeologické výzkumy v jižních Čechách 21, 33-58, České budějovice.

MENŠÍK, P., KRIŠTUF, P., CHVOJKA, O. (2010): Mohylová pohřebiště na okrese Tábor. Katedra archeologie Fakulta filozofická západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.

NÁRODNÍ PAMÁTKOVÝ ÚSTAV (2021): Památkový katalog. Ústřední seznam kulturních památek, <https://pamatkovykatalog.cz/uskp> (cit. 26. 7. 2021).

PALMER, R. (2013): Reading aerial images. In Opitz, R. S, Cowley, D. C. (ed.): Interpreting archeological topography. Oxbow books, Oxford, 76-87.

RIEGL (2021): RIEGL miniVUX-1UAV.

<http://www.riegl.com/products/unmanned-scanning/riegl-minivux-1uav/> (cit 26. 7. 2021).

SEVARA, CH., PREGESBAUER, M., DONEUS, M., VERHOEVEN, G., TRINKS, I. (2015): Pixel versus object - A comparison of strategies for the semi-automated mapping of archaeological features using airborne laser scanning data. Journal of Archaeological Science: Reports, 5 485-498.

SCHINDLING, J., GIBBES, C. (2014): LiDAR as a tool for archeological research: a case study. Archeol Anthropol Sci, 6, 411-423.

SCHLETTE, F. (1977): Germáni. Orbis, Praha.

SITHOLE, G., VOSSSELMAN, G. (2003): Comparison of filtering algorithms. výzkumná zpráva, Department of Geodesy, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Nizozemsko.

ŠTULAR, B., KOKALJ, Ž., OŠTIR, K., NUNINGER, L. (2012): Validation of lidar-derived relief models for detection of archeological features. *Journal of Archaeological Science*, 39, 3354-3360.

ŠTYCH, P., BLÁHA, J. D., BRAVENÝ L., GRILL, S., SCHNEIDER, M. (2008): Vybrané funkce geoinformačních systémů. CITT Praha Akademie kosmyckých technologií oblast Galileo, GMES, Praha.

THORNE, R.M. (1990): Revegetation: the soft approach to archaeological site stabilization. DOI Departmental Consulting Archaeologist/NPS Archarology Program, Washington, DC.

WAGNER, W., ULLRICH, A., MELZER, T., BRIESE, C., KRAUS, K. (2004): From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges. In: Altan, O. (Ed.), *Geo-Imagery Bridging Continents. XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXV, 201-206. část B/3.*

WALDHAUSER, J., BUDINSKÝ, P., STRÁNSKÁ, P., VELEMÍNSKÁ, J., TUREK, J., HOLODŇÁK, P. (1999): Jak se kopou keltské hroby. Nakladatelství Lidové noviny, Praha.

WHITE, R. A., DIETTERICK, B. C., MASTIN, T., STROHMAN, R. (2010): Forest Roads Mapped Using LiDAR in Steep Forested Terrain. *Remote Sensing*, 2, 1120-1141.

WIESER, M., MANDLBURGER, G., HOLLAUS, M., OTEPKA, J., GLIRA, P., PFEIFER, N. (2017): A case study of UAS borne laser scanning for measurement of tree stem diameter. *Remote Sensing*, 9 (11), 1154.

YOËLI, P. (1965): Analytische Schattierung. Ein kartographischer Entwurf. *Kartographische Nachrichten*, 15, 141-148.

YOKOYAMA, R., SHIRASAWA, M., PIKE, J. (2002): Visualizing Topography by Openness: A New Application of Image Processing to Digital Elevation Models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 3, 257-265.

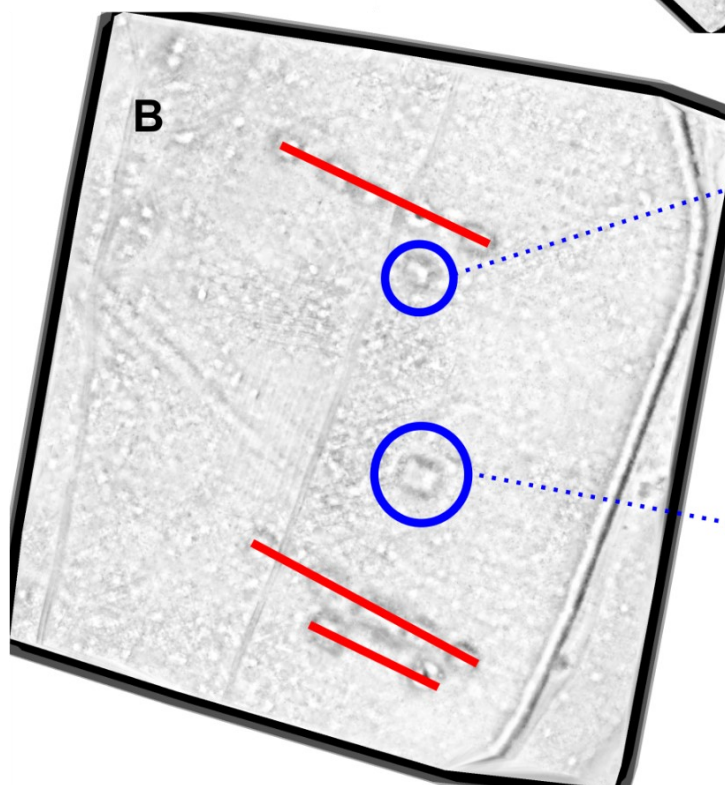
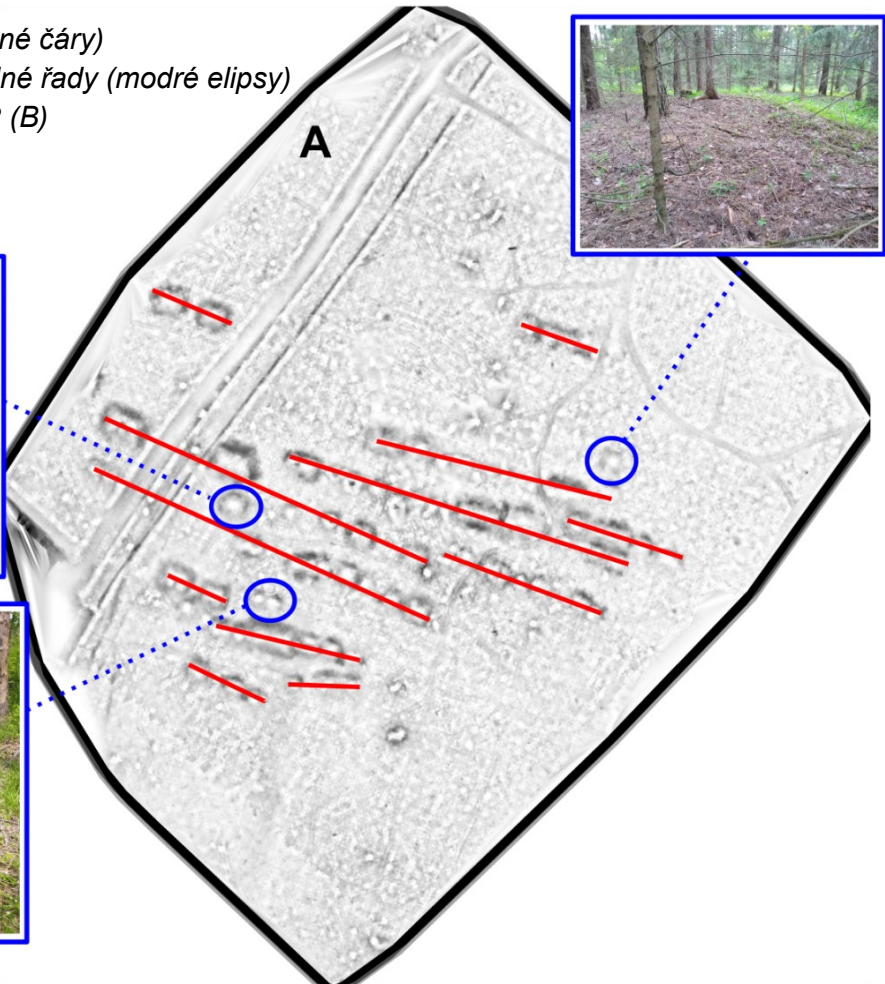
ZAKŠEK, K., OŠTIR, K., KOKALJ, Ž. (2011): Sky - View Factor as Relief Visualization Technique. *Remote Sensing*, 3, 398-415.

ZHANG, W., QI, J., WAN, P., WANG, H., XIE, D., WANG, X., YAN, G. (2016): An Easy-to-use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote sensing 8, 501.

PŘÍLOHY

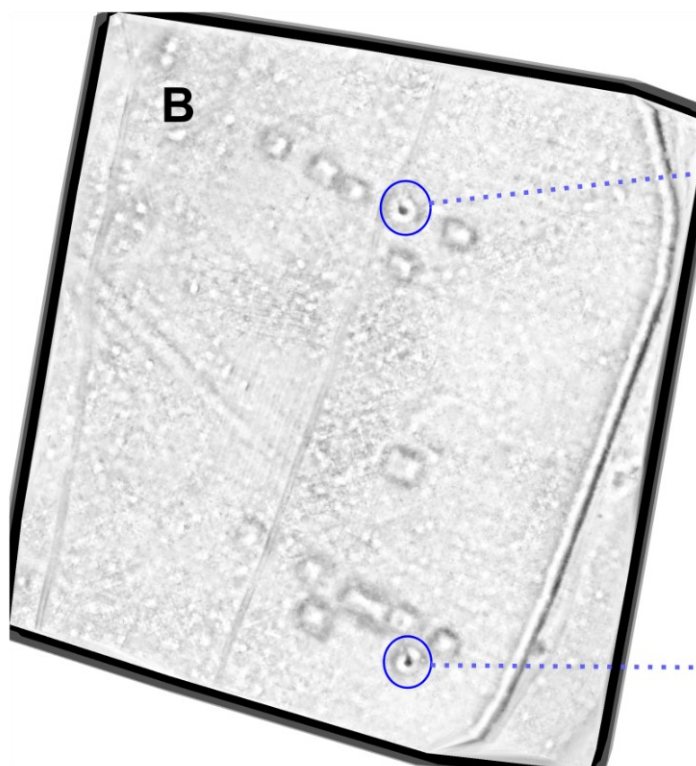
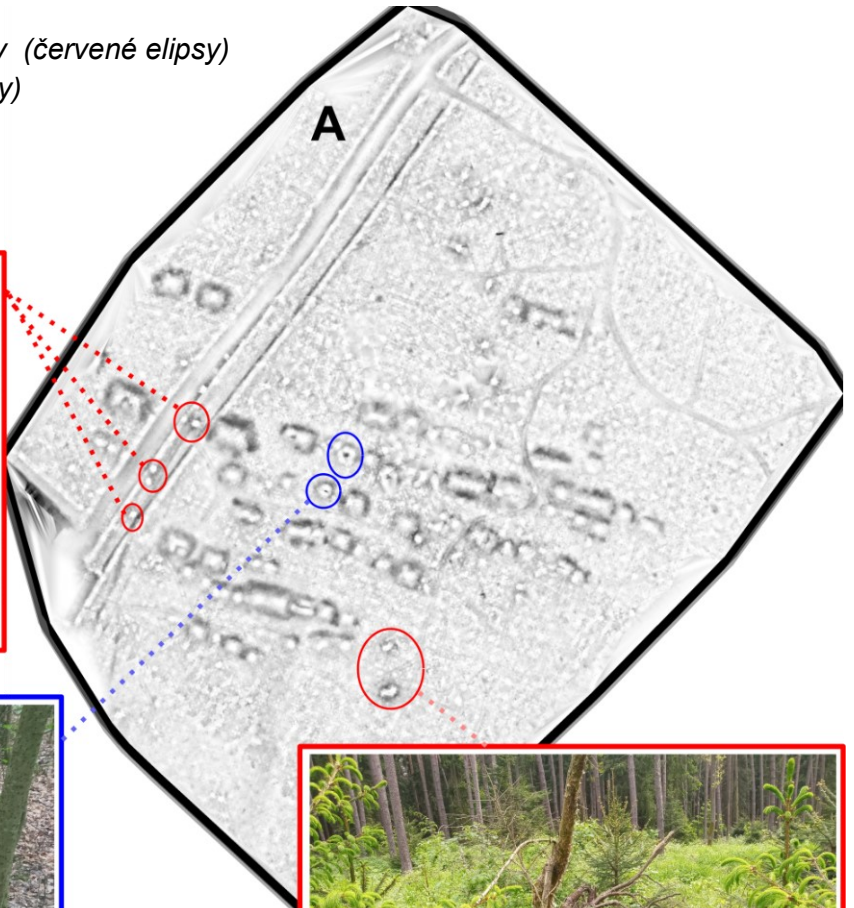
Příloha 1

ukázka nalezených řad (červené čáry)
a útvarů nespádajících do žádné řady (modré elipsy)
na lokalitě 1 (A) a na lokalitě 2 (B)
zdroj: autor



Příloha 2

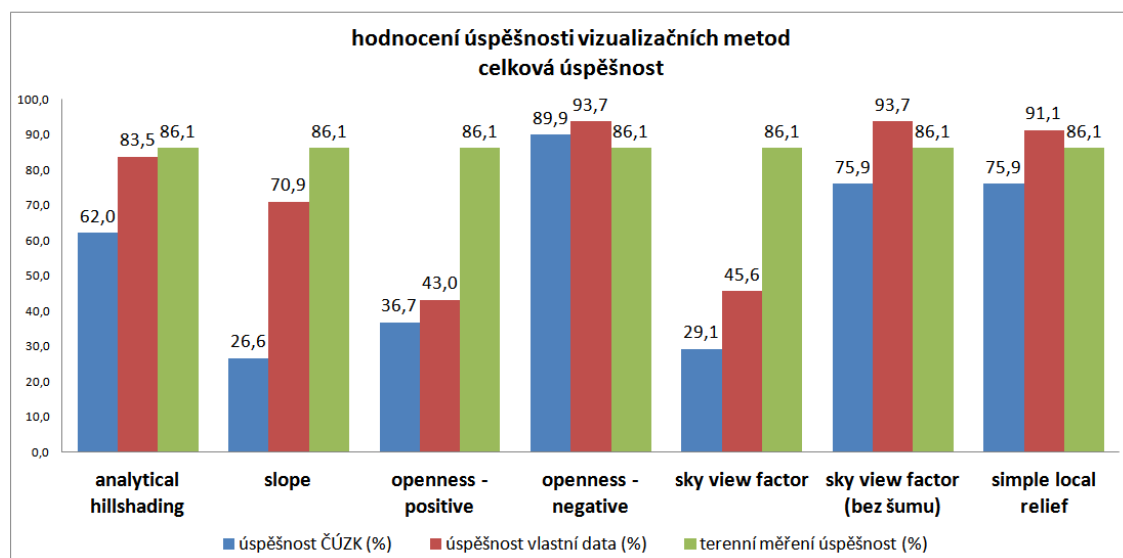
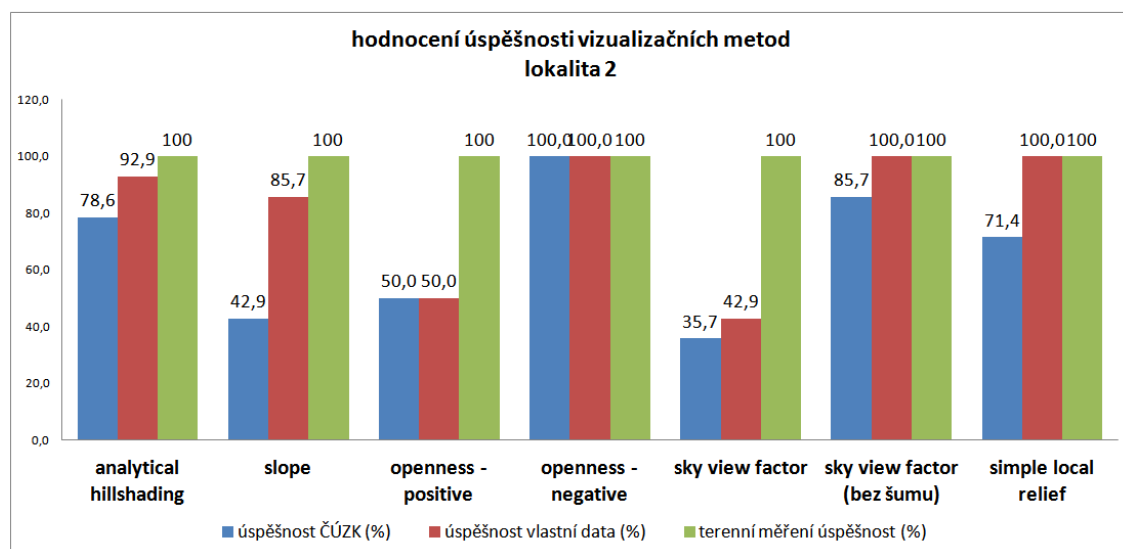
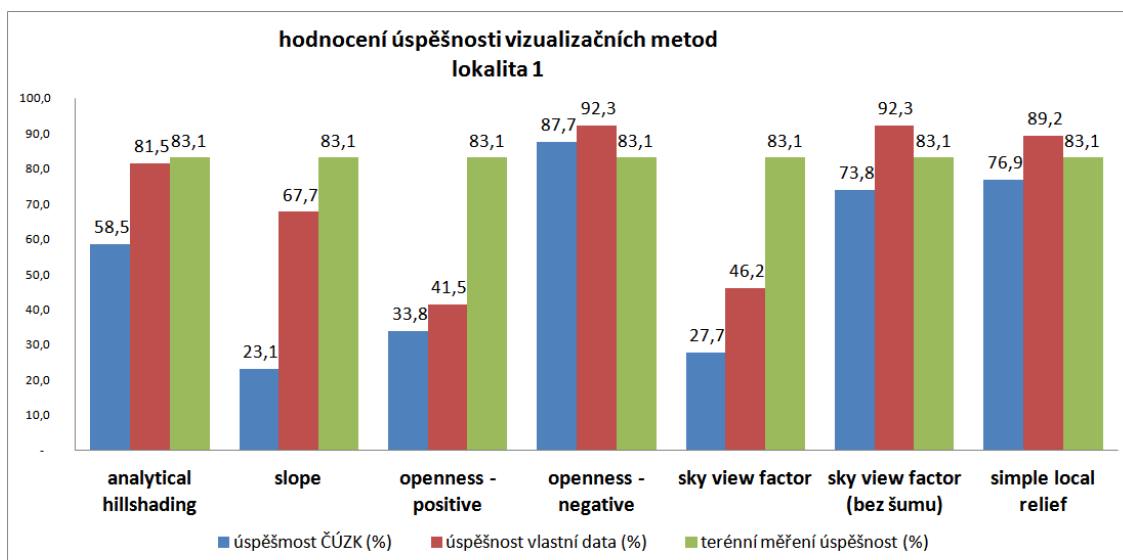
ukázka útvarů jevcí se jako mohyly (červené elipsy)
a poškozených mohyl (modré elipsy)
na lokalitě 1 (A) a na lokalitě 2 (B)
zdroj: autor



Příloha 3

grafy porovnávající úspěšnost vizualizačních technik na datech ČÚZK a datech z vlastního skenování a srovnání s úspěšností terénního měření. Úspěšnost je vztahena k počtu mohyl uvedenému v Památkovém katalogu (2021).

zdroj: autor



Příloha 4

Souřadnice útvarů, použité pro nalezení vytipovaných útvarů v terénu

zdroj: autor

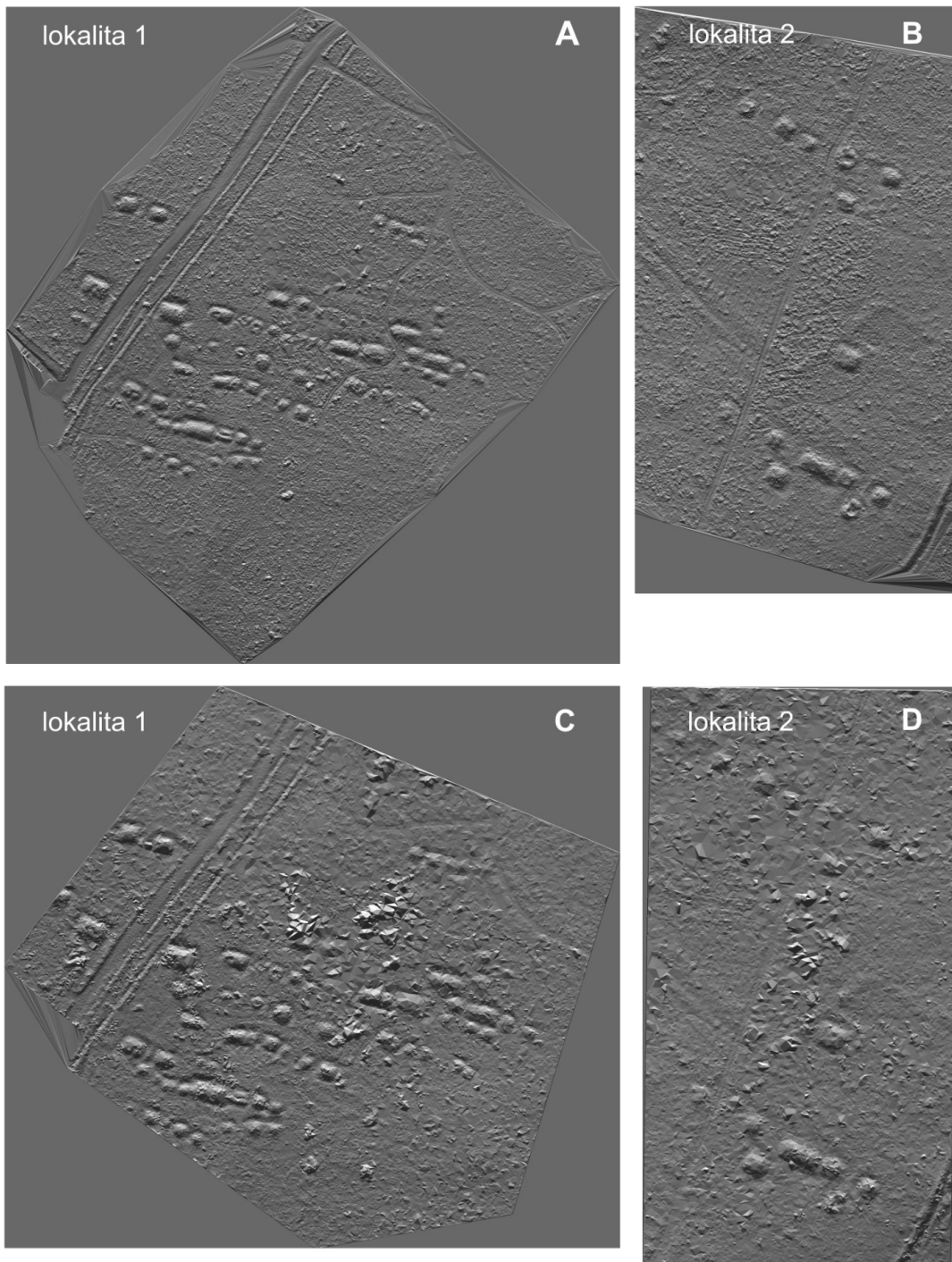
číslo útvaru	poloha	číslo útvaru	poloha
1	49°12'3.962"N, 14°43'24.652"E	38	49°12'3.948"N, 14°43'26.810"E
2	49°12'1.790"N, 14°43'25.979"E	39	49°12'3.858"N, 14°43'25.460"E
3	49°12'1.813"N, 14°43'25.654"E	40	49°12'2.335"N, 14°43'29.416"E
4	49°12'1.813"N, 14°43'25.502"E	41	49°12'2.446"N, 14°43'28.856"E
5	49°12'1.913"N, 14°43'25.231"E	42	49°12'2.601"N, 14°43'28.322"E
6	49°12'2.004"N, 14°43'24.850"E	43	49°12'2.688"N, 14°43'27.931"E
7	49°12'1.038"N, 14°43'26.444"E	44	49°12'2.728"N, 14°43'27.461"E
8	49°12'1.128"N, 14°43'25.970"E	45	49°12'2.727"N, 14°43'27.081"E
9	49°12'1.253"N, 14°43'25.217"E	46	49°12'2.846"N, 14°43'25.984"E
10	49°12'3.433"N, 14°43'34.174"E	47	49°12'3.345"N, 14°43'25.555"E
11	49°12'4.138"N, 14°43'23.259"E	48	49°12'2.362"N, 14°43'24.503"E
12	49°12'5.733"N, 14°43'23.792"E	49	49°12'2.213"N, 14°43'25.340"E
13	49°12'5.613"N, 14°43'24.631"E	50	49°12'1.779"N, 14°43'26.371"E
14	49°12'6.001"N, 14°43'30.909"E	51	49°12'1.773"N, 14°43'26.789"E
15	49°12'5.960"N, 14°43'31.313"E	52	49°12'1.705"N, 14°43'27.400"E
16	49°12'5.922"N, 14°43'31.721"E	53	49°12'1.729"N, 14°43'27.831"E
17	49°12'4.371"N, 14°43'29.080"E	54	49°12'1.695"N, 14°43'28.231"E
18	49°12'4.359"N, 14°43'28.402"E	55	49°12'1.398"N, 14°43'29.212"E
19	49°12'4.533"N, 14°43'32.838"E	56	49°12'1.340"N, 14°43'28.279"E
20	49°12'3.522"N, 14°43'33.627"E	57	49°12'0.797"N, 14°43'29.308"E
21	49°12'3.616"N, 14°43'33.019"E	58	49°12'1.307"N, 14°43'27.844"E
22	49°12'4.068"N, 14°43'31.916"E	59	49°12'3.688"N, 14°43'32.301"E
23	49°12'3.639"N, 14°43'30.360"E	60	49°11'49.788"N, 14°44'13.766"E

24	49°12'3.583"N, 14°43'31.228"E	61	49°11'49.529"N, 14°44'13.255"E
25	49°12'3.454"N, 14°43'32.123"E	62	49°11'49.984"N, 14°44'13.134"E
26	49°12'3.376"N, 14°43'32.722"E	63	49°11'49.931"N, 14°44'13.214"E
27	49°12'3.303"N, 14°43'33.156"E	64	49°11'50.082"N, 14°44'12.516"E
28	49°12'2.710"N, 14°43'32.622"E	65	49°11'51.482"N, 14°44'12.799"E
29	49°12'2.871"N, 14°43'31.783"E	66	49°11'49.875"N, 14°44'11.789"E
30	49°12'2.895"N, 14°43'31.380"E	67	49°11'50.308"N, 14°44'11.616"E
31	49°12'3.004"N, 14°43'30.750"E	68	49°11'53.798"N, 14°44'13.221"E
32	49°12'3.022"N, 14°43'29.147"E	69	49°11'53.405"N, 14°44'12.380"E
33	49°12'3.187"N, 14°43'28.117"E	70	49°11'54.004"N, 14°44'12.219"E
34	49°12'3.351"N, 14°43'26.685"E	71	49°11'50.580"N, 14°44'10.576"E
35	49°12'3.287"N, 14°43'27.444"E	72	49°11'54.104"N, 14°44'11.521"E
36	49°12'3.768"N, 14°43'28.285"E	73	49°11'54.245"N, 14°44'11.009"E
37	49°12'3.776"N, 14°43'27.839"E	74	49°11'54.483"N, 14°44'10.250"E

Příloha 4

ukázka vizualizace metodou analytical hillshade z vlastních dat (A-B) a z dat poskytnutých ČÚZK (C-D)

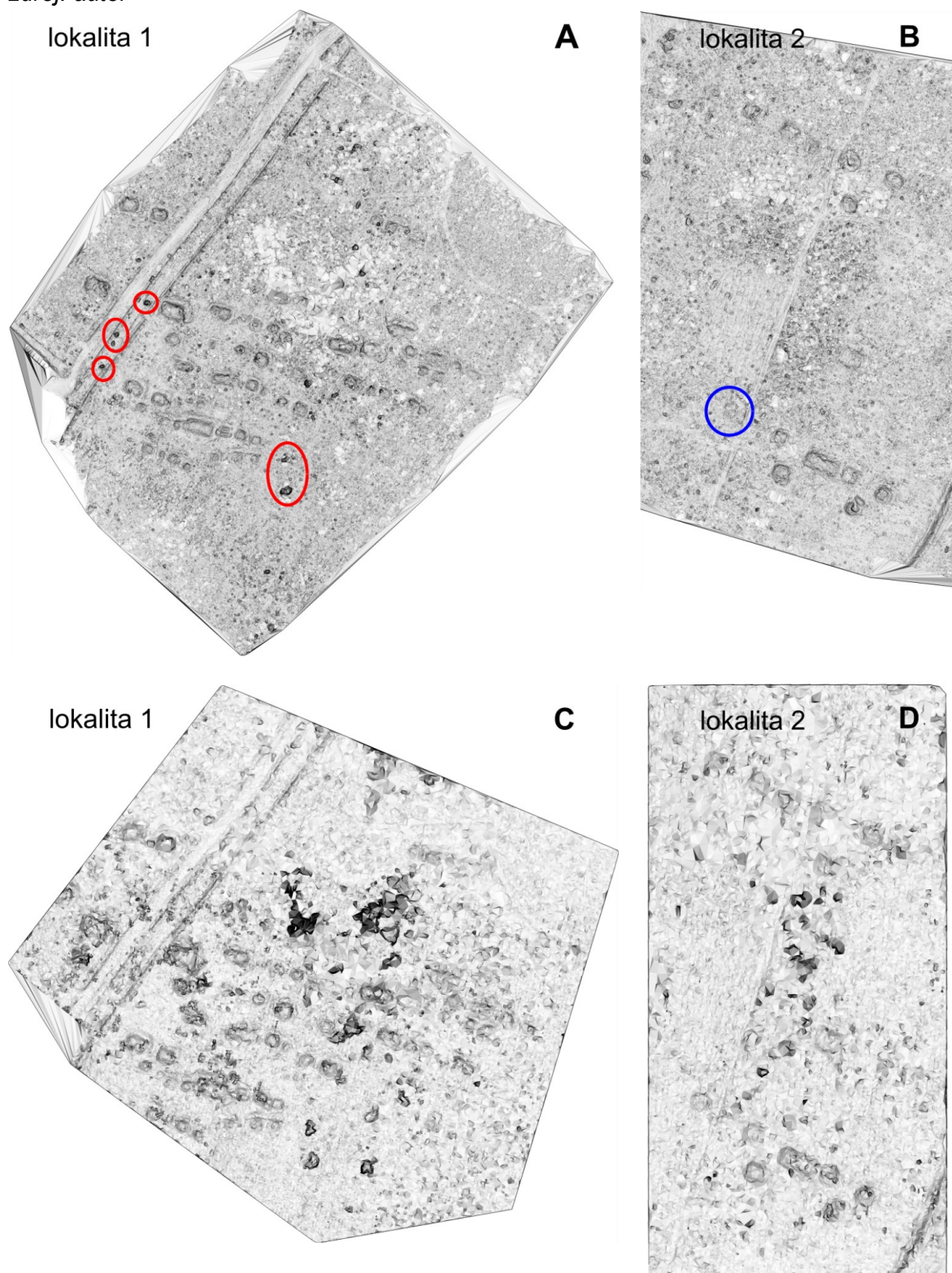
zdroj: autor



Příloha 5

ukázka vizualizace metodou slope z vlastních dat (A-B) a z dat poskytnutých ČÚZK (C-D). V části B, je modrou elipsou znázorněna mohyla s velice pozvolným přechodem do terénu což jí dělá na vizualizace téměř neviditelnou. V části A, jsou červenou elipsou znázorněny nemohylové útvary.

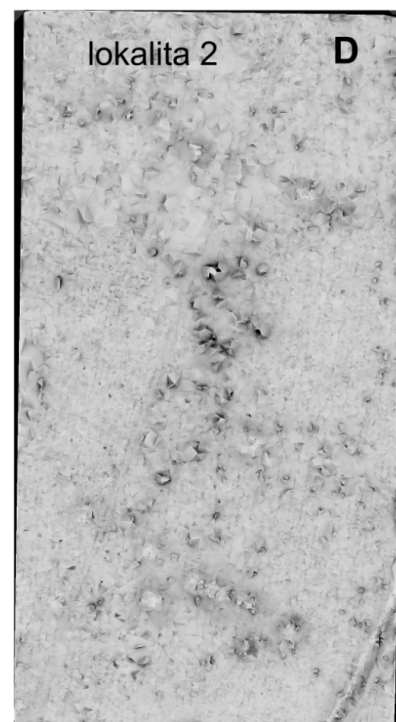
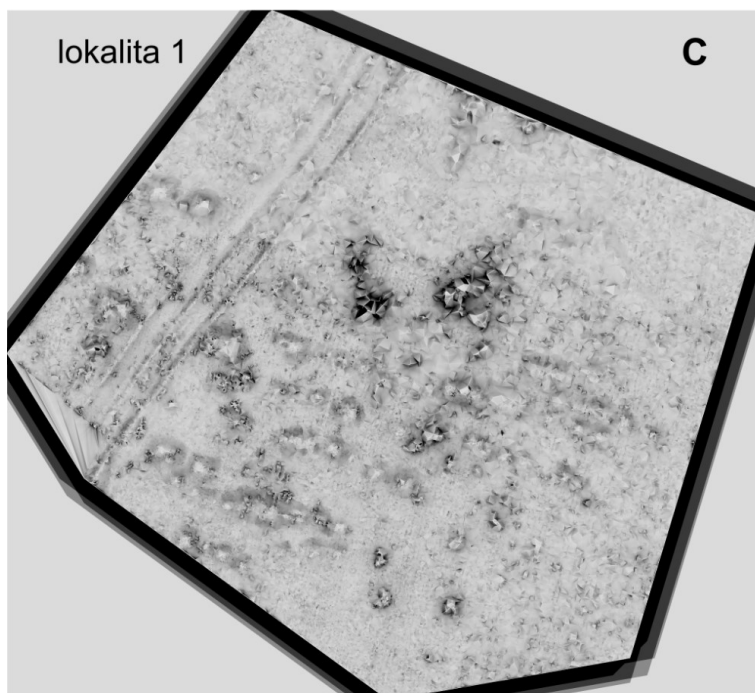
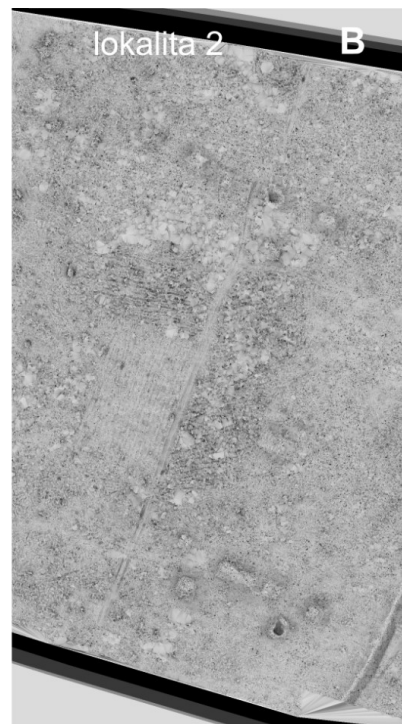
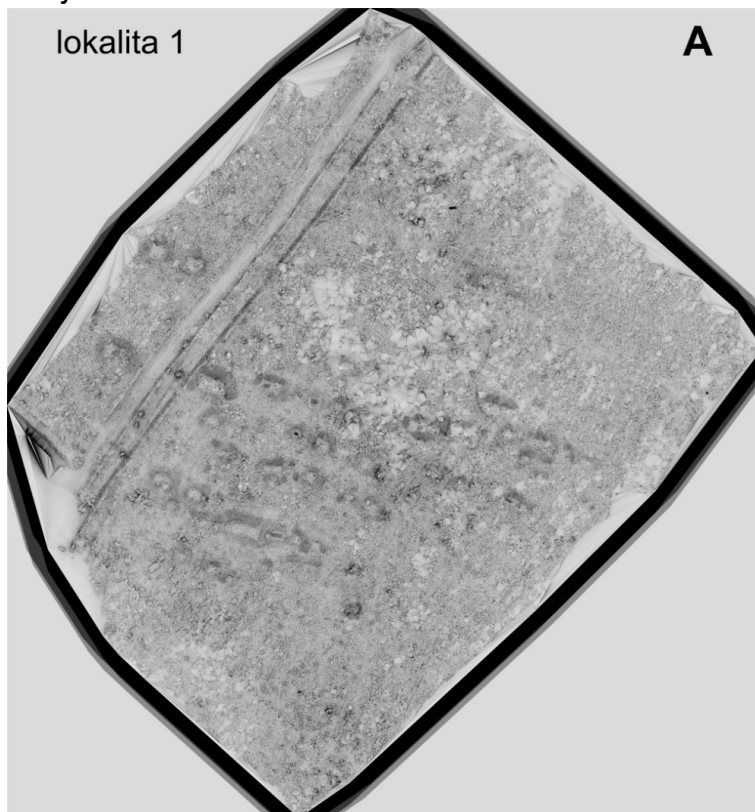
zdroj: autor



Příloha 6

ukázka vizualizace metodou openness-positive z vlastních dat (A-B) a z dat poskytnutých ČÚZK (C-D)

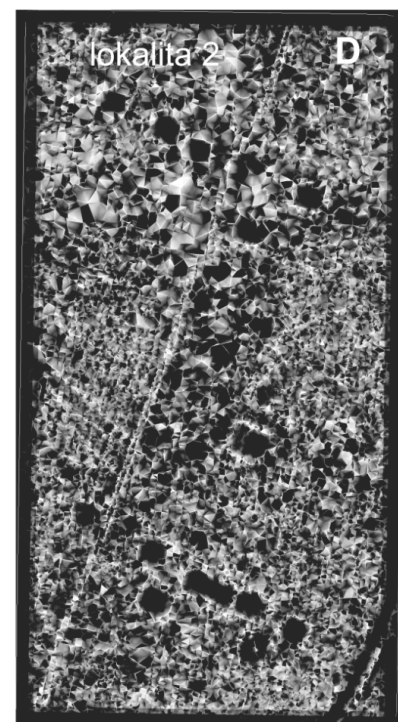
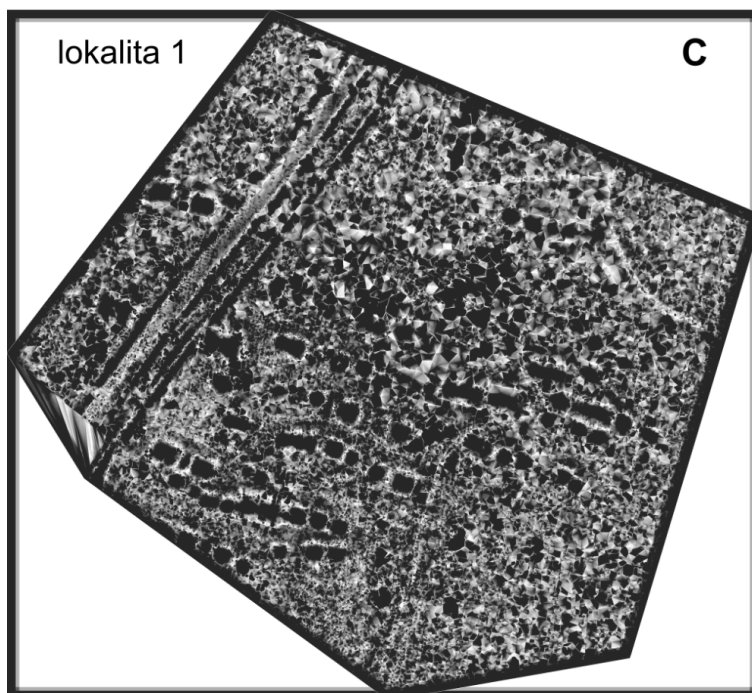
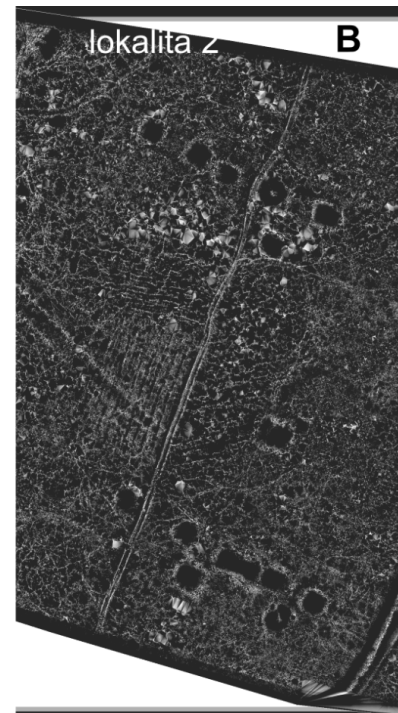
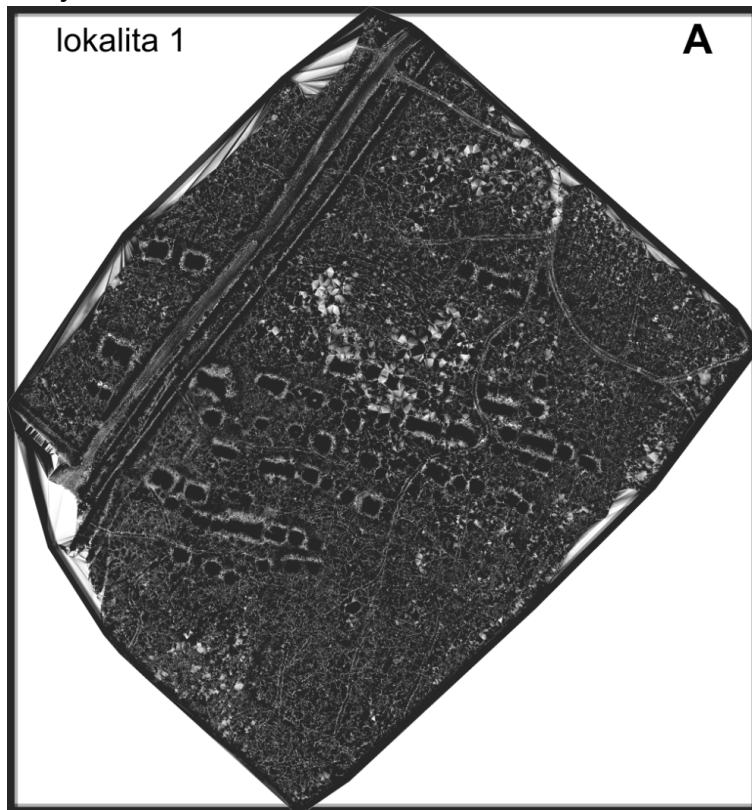
zdroj: autor



Příloha 7

ukázka vizualizace metodou openness-negative z vlastních dat (A-B) a z dat poskytnutých ČÚZK (C-D)

zdroj: autor

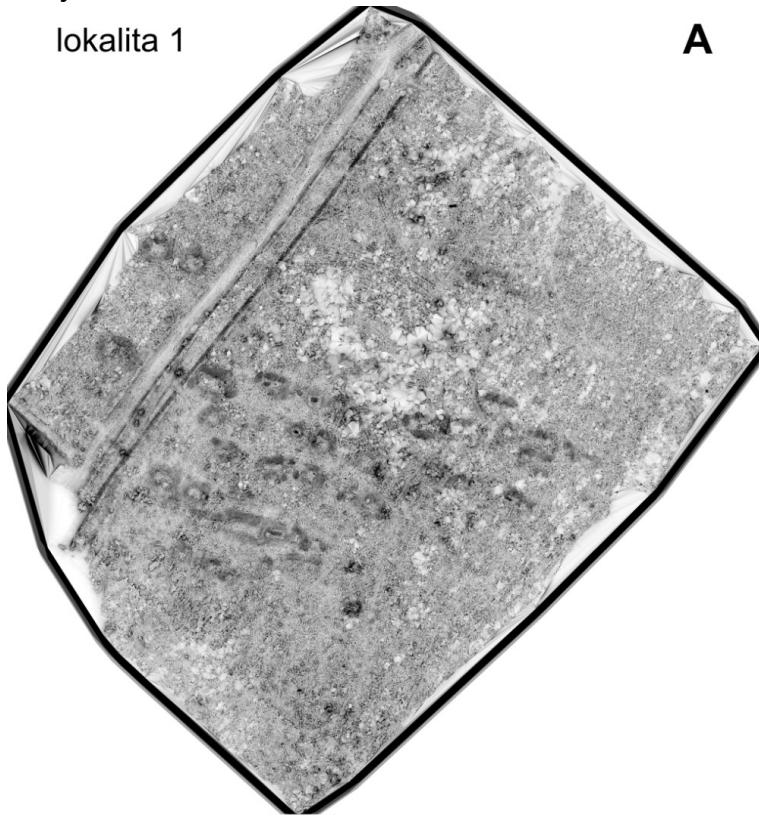


Příloha 8

ukázka vizualizace metodou sky view factor z vlastních dat (A-B) a z dat poskytnutých ČÚZK (C-D)

zdroj: autor

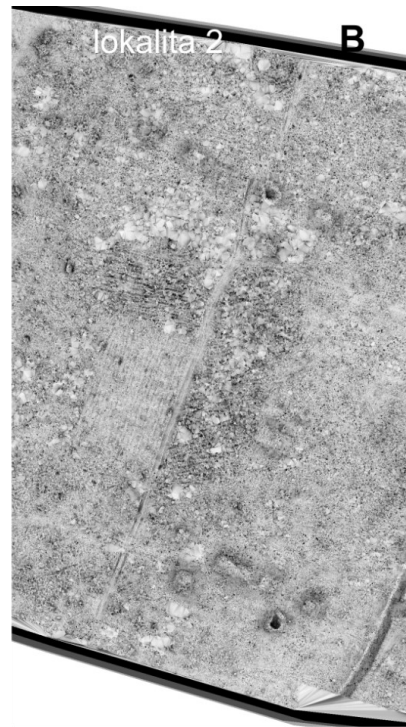
lokality 1



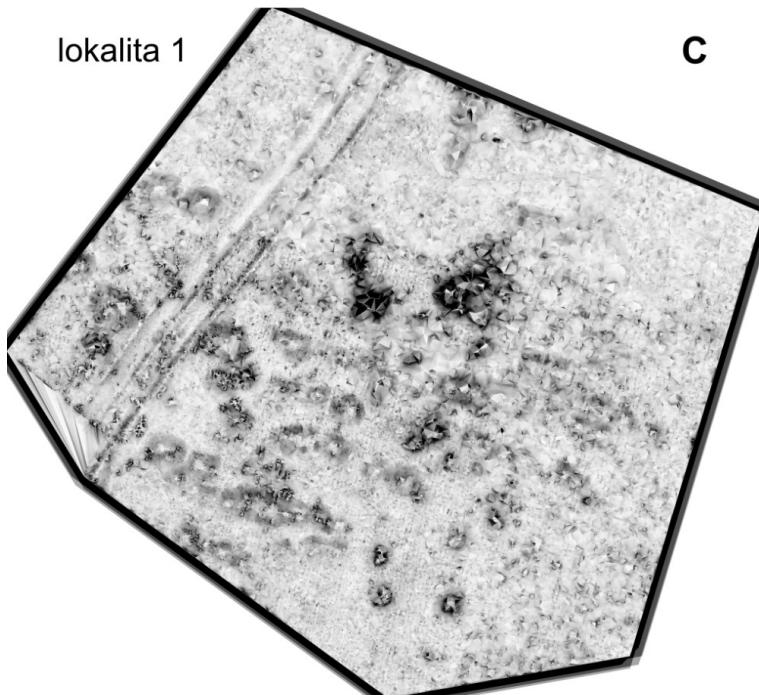
A

lokality 2

B



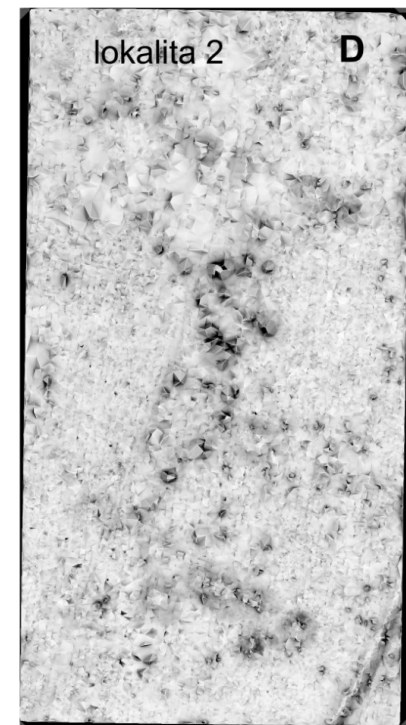
lokality 1



C

lokality 2

D

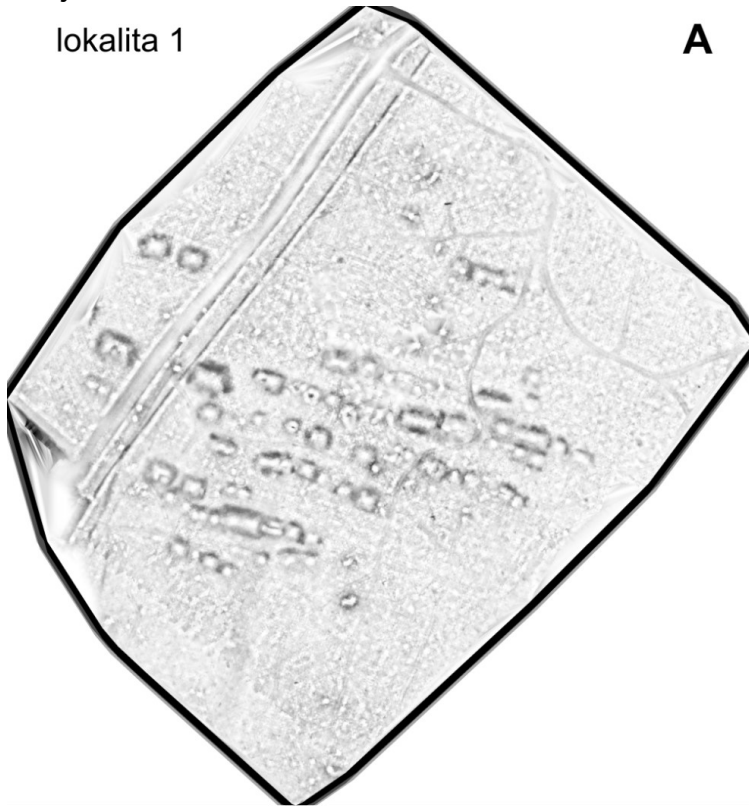


Příloha 9

ukázka vizualizace metodou sky view factor varianta bez šumu z vlastních dat (A-B) a z dat poskytnutých ČÚZK (C-D)

zdroj: autor

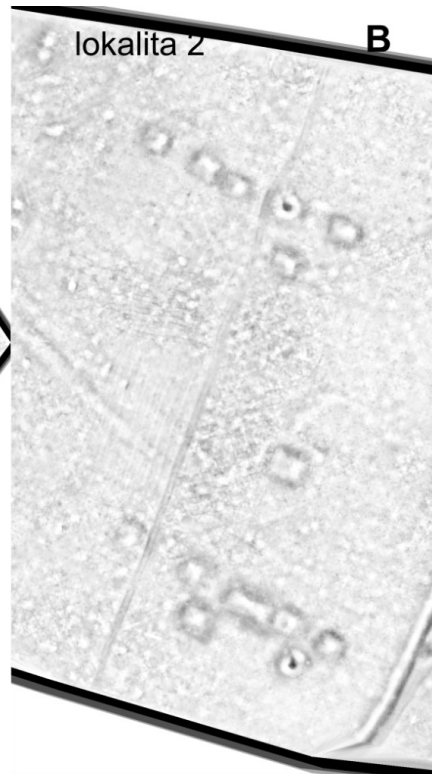
lokality 1



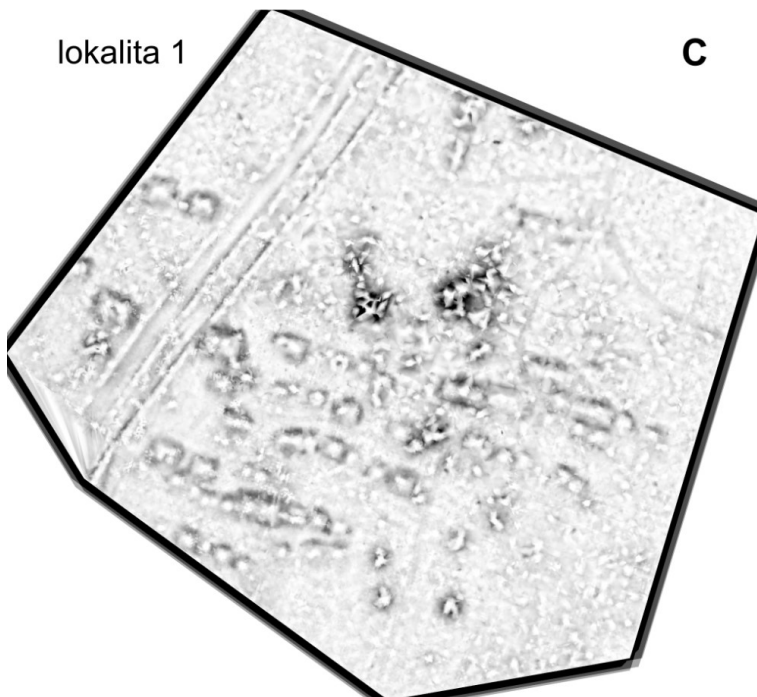
A

lokality 2

B



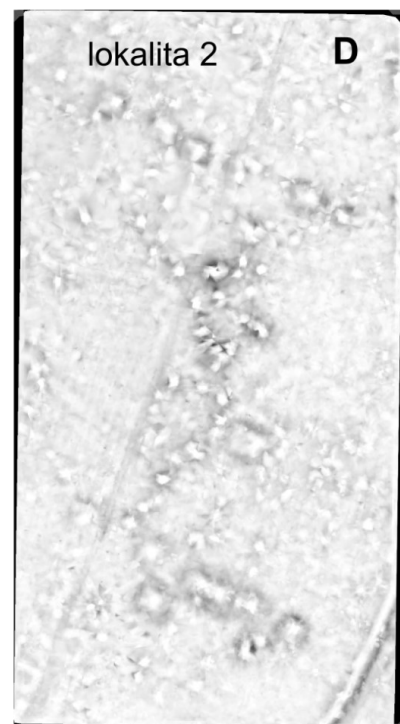
lokality 1



C

lokality 2

D



Příloha 10

ukázka vizualizace metodou simple relief modelu z vlastních dat (A-B) a z dat poskytnutých ČÚZK (C-D)

zdroj: autor

