

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

**Analýzy viditelnosti: využitelnost detailních modelů vegetace
založených na ALS a UAV datech v aplikované ekologii**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Autor práce: Tomáš Kauca

Studijní program: Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.

2020/21



Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce:	Tomáš Kauca
Studijní program:	Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Klouček, Ph.D.
Garantující pracoviště:	Katedra prostorových věd
Jazyk práce:	Čeština
Název práce:	Analýzy viditelnosti: využitelnost detailních modelů vegetace založených na ALS a UAV datech v aplikované ekologii
Název anglicky:	Visibility analysis: usability of detailed vegetation models based on ALS and UAV data in applied ecology
Cíle práce:	<p>Cílem bakalářské práce je porovnat modely viditelnosti založené na datech pořízených senzory umístěnými na bezpilotních leteckých prostředcích (UAV) s modely založenými na datech pořízených leteckým laserovým skenováním (ALS), a prověřit tak jejich možnou využitelnost v aplikované ekologii.</p> <p>Dílčí cíle bakalářské práce souvisejí s následujícími výzkumnými otázkami:</p> <ul style="list-style-type: none">(a) Je možné data ALS v případě analýz viditelnosti nahradit daty UAV?(b) Bude v případě UAV docházet k nadhodnocování, nebo k podhodnocování viditelné plochy?(c) Jak přesné výsledky nabízí analýza viditelnosti z dat UAV ve srovnání s analýzou z dat ALS?(d) V jakých oblastech aplikované ekologie lze v případě analýz viditelnosti data ALS zaměnit za data pořízená pomocí UAV?

Metodika: Metodiku bakalářské práce lze rámcově rozdělit následovně:

- (a) Volba zájmového území
- (b) Zpracování UAV snímků ve specializován SfM softwaru
- (c) Klasifikace ALS a UAV bodového mračna
- (d) Tvorba digitálního modelu povrch (DSM) a terénu (DTM)
- (e) Tvorba precizních modelů vegetace (Canopy Height Model, CHM)
- (f) Výpočet modelů viditelnosti pomocí nástroje Viewshed a jejich porovnání
- (g) Zodpovězení výše uvedených výzkumných otázek

Zpracování bude probíhat v softwarech Dron2Map, ArcMap, případně ArcGIS Pro (ESRI).

Doporučený rozsah práce: 30 - 50 stran

Klíčová slova: analýzy viditelnosti; UAV; ALS; aplikovaná ekologie

Doporučené zdroje informací:

1. Guerra-Hernández, J., Cosenza, D.N., Cardil, A., Silva, C.A., Botequim, B., Soares, P., Silva, M., González-Ferreiro, E., Díaz-Varela, R.A., 2019. Predicting growing stock volume of eucalyptus plantations using 3-D point clouds derived from UAV imagery and ALS data. *Forests* 10, 1–18. <https://doi.org/10.3390/f10100905>
2. Cheonggil, J., Che-young, O., Sanghyun, S., Nkwain, W.N., Chuluong, C., 2020. A comparative study to evaluate accuracy on canopy height and density using UAV, ALS, and fieldwork. *Forests* 11, 1–17. <https://doi.org/10.3390/f11020241>
3. Klouček, T., Lagner, O., Šímová, P., 2015. How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines. *Appl. Geogr.* 64, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.09.005>
4. Lagner, O., Klouček, T., Šímová, P., 2018. Impact of input data (in)accuracy on overestimation of visible area in digital viewshed models. *PeerJ* 2018. <https://doi.org/10.7717/peerj.4835>
5. Maloy, M.A., Dean, D.J., 2001. An accuracy assessment of various GIS-based viewshed delineation techniques. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 67, 1293–1298.
6. Murgoitio, J.J., Shrestha, R., Glenn, N.F., Spaete, L.P., 2013. Improved visibility calculations with tree trunk obstruction modeling from aerial LiDAR. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* 27, 1865–1883. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.767460>
7. Murgoitio, J., Shrestha, R., Glenn, N., Spaete, L., 2014. Airborne LiDAR and terrestrial laser scanning derived vegetation obstruction factors for visibility models. *Trans. GIS* 18, 147–160. <https://doi.org/10.1111/tgis.12022>
8. Puliti, S., Dash, J.P., Watt, M.S., Breidenbach, J., Pearse, G.D., 2020. A comparison of UAV laser scanning, photogrammetry and airborne laser scanning for precision inventory of small-forest properties. *Forestry* 93, 150–162. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz057>

Předběžný termín obhajoby: 2021/22 LS - FZP

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Analýzy viditelnosti: využitelnost detailních modelů vegetace založených na ALS a UAV datech v aplikované ekologii“ vypracoval samostatně a citoval jsem veškeré informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že se na mou bakalářskou práci plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35, odst. 3 daného zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou, a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souladu s GDPR.

V Praze dne 31. 3. 2022

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Tomášovi Kloučkovi, Ph.D., za odborné vedení, rady, kritiku a připomínky při psaní mé práce.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá analýzou modelů viditelnosti vytvořených z dat z bezpilotních leteckých prostředků (unmanned aerial vehicles, UAV) a leteckého laserového skenování (airborne laser scanning, ALS) a jejich použitelnosti v aplikované ekologii. Analýzy viditelnosti jsou provedeny na několika lokalitách v Doupovských horách. Po úvodním zpracování dat UAV v programu umožňujícím Structure from Motion (SfM) byly na základě dostupných dat UAV a ALS pocházejících z různých leteckých misí v programu ArcMap vytvořeny digitální modely povrchu (DSM) a terénu (DTM) a modely vegetace (CHM). Na základě těchto modelů byly v tomtéž programu provedeny pomocí nástroje *Viewshed* analýzy viditelnosti, a to zejména za účelem srovnání, zda jsou výsledky analýzy vycházející z dat UAV srovnatelné s analýzou z dat ALS. Toto srovnání zahrnuje vyhodnocení možnosti případného nahrazení dat ALS v analýzách viditelnosti levnějšími daty UAV, vyhodnocení výsledné viditelné plochy v obou případech, porovnání přesnosti výsledků obou analýz a vyslovení závěru ohledně toho, zda je možné, či nemožné data ALS a UAV zaměnit, případně za jakých podmínek.

Klíčová slova: Doupovské hory; modely viditelnosti; letecké skenování; ArcMap; Viewshed

Abstract

The bachelor thesis deals with the analysis of visibility models created from UAV (unmanned aerial vehicles) and ALS (airborne laser scanning) data and their applicability in applied ecology. The visibility analyses were carried out at several sites at Doupov Mountains. After the initial processing of UAV data in a software enabling Structure from Motion (SfM), digital surface models (DSM), digital terrain models (DTM) and vegetation models (CHM) were created in ArcMap on the basis of available UAV and ALS data from various air missions. Based on these models and using the *Viewshed* tool in the same software, visibility analyses were carried out, in particular for the purpose of assessing whether the results of analysis based on UAV data and the analysis based on ALS data are comparable. This comparison involves assessing the possibility of eventual replacement of ALS data by cheaper UAV data in visibility analyses, assessing the resulting visible area in both cases, comparing the accuracy of the results of both analyses and drawing a conclusion on whether, or under which conditions, ALS and UAV data are interchangeable.

Key words: Doupov Mountains; visibility models; airborne scanning; ArcMap; Viewshed

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. CÍLE PRÁCE.....	9
3. REŠERŠE LITERATURY.....	10
3.1 Data UAV	10
3.2 Data ALS.....	11
3.3 Zpracování snímků UAV v softwaru Drone2Map	12
3.4 Další dostupný software pro zpracování snímků UAV	12
3.5 Klasifikace bodového mračna ALS a UAV	13
3.6 Tvorba a kvalita DTM, DSM a CHM	13
3.7 Výpočet modelů viditelnosti pomocí nástroje Viewshed.....	14
4. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ.....	15
4.1 Geografické vymezení	15
4.2 Geomorfologické a klimatické poměry.....	15
4.3 Geologické poměry.....	16
4.4 Hydrologické poměry	16
4.5 Fauna	16
4.6 Flóra.....	17
5. METODIKA	18
5.1 Data	18
5.2 Zpracování dat UAV	18
5.3 Tvorba modelů vegetace z dat UAV	22
5.5 Zpracování dat ALS	25
5.6 Tvorba precizních modelů vegetace z dat ALS	27
5.7 Výpočet a porovnání modelů viditelnosti	29
6. VÝSLEDKY	33
6. DISKUZE	35
7. ZÁVĚR	36
8. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	37

1. ÚVOD

Data pořízená leteckým laserovým skenováním (airborne laser scanning, ALS) představují hlavní zdroj trojrozměrných informací o vertikální struktuře lesa již od 90. let. Využitelnost těchto dat v oblasti určování biologických a fyzických vlastností lesů prokázala celá řada výzkumů (např. *Dalponte, M., Gianelle, D. et al., 2018; Stawik, Ł., Niedzielko, J. et al., 2019; Guerra-Hernández, J., Arellano-Pérez, S. et al., 2021*). Mezi jejich výhody patří možnost přímého měření výšky či vysoká míra penetrace skrz jednotlivé vrstvy vegetace (*Guerra-Hernández, J., Cosenza, Diogo N. et al., 2019*). Bodová mračna z dat ALS lze využít k identifikaci jednotlivých stromů a jejich vlastností i v náročných podmínkách tropických deštných lesů (*Cheonggil, J., Che-young, O. et al., 2020*). Využití dat ALS doporučuje celá řada autorů – vedle družicových dat – zejména v oblasti pozorování stanovišť s probíhající regenerací a modelování jejich biologických vlastností. S jejich využitím v této oblasti se v dřívější době pojila řada nejistot, zejména souvisejících s obvyklým rozlišením dat dostupných pro využití v lesnictví (zpravidla se jednalo pouze o 2-5 bodů na m²) (*Puliti, S., Solberg, S., Granhus, A., 2019*), v dnešní době však již jsou běžně k dispozici data s hustotou 20 bodů/m² i více.

Data pořízená různými senzory umístěnými na bezpilotních leteckých prostředcích (unmanned aerial vehicles, UAV), které jsou rovněž označovány jako drony či bezpilotní letouny (v angličtině jako *unmanned aerial systems*), představují ekonomicky výhodnou alternativu k tradičním metodám sběru dat ALS. Tyto prostředky jsou vysoce užitečné zejména z důvodu vysokého prostorového i časového rozlišení, kterého je dosaženo nízkou letovou hladinou, provozní flexibilitou a poměrně nízkými náklady na letové mise. Lehké UAV nesoucí cenově dostupné kamery jsou schůdnou variantou pro sledování trojrozměrné struktury lesa. Data z více časových úseků pak lze využít například pro hodnocení růstových dat, která jsou využívána v lesním hospodářství (*Guerra-Hernández, J., Cosenza, Diogo N. et al., 2019*). V této oblasti přináší využití dat UAV přesné výsledky, a to jak v malém, tak velkém měřítku. K jejich rostoucí oblíbenosti přispívá i jejich všestranné využití a dostupnost. Není však dosud jasné, za jakých podmínek je využití UAV ekonomicky výhodné, což do značné míry limituje jejich širší využívání v lesnictví (*Puliti, S., Solberg, S., Granhus, A., 2019*). Nové možnosti přinesly v posledních letech i systémy UAV s funkcí autopilota, levnými navigačními zařízeními a inerciálními senzory (*Cheonggil, J., Che-young, O. et al., 2020*).

V případě analýz viditelnosti, kterými se tato práce zabývá, je nesporné, že data ALS jsou velmi přesným a precizním zdrojem (*Klouček et al., 2015*). Je s nimi však spojena značná finanční náročnost. Proto by bylo zajímavé prokázat, zda a případně za jakých podmínek lze tento zdroj dat nahradit levnějšími daty UAV.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je porovnat modely viditelnosti založené na datech UAV s modely založenými na datech ALS a prověřit tak jejich možnou využitelnost v aplikované ekologii. Nejprve je nutné zvolit vhodné zájmové území, na kterém jsou dostupná data ALS i UAV. Následuje zpracování dostupných dat ALS i UAV do podoby digitálních modelů povrchu (digital surface model, DSM) a digitálních modelů terénu (digital terrain model, DTM). V případě dat UAV je k tomu nutné využít software umožňující zpracování přístupem Structure from Motion (SfM).

Na základě vzniklých DSM a DTM z dat ALS i UAV budou následně vytvořeny precizní modely vegetace. Tyto precizní modely vegetace budou využity k výpočtu a porovnání modelů viditelnosti, a to především s využitím nástroje *Viewshed*. Následně bude ověřena přesnost těchto modelů viditelnosti a na jejím základě potvrzena nebo vyvrácena možnost nahrazení dat ALS snímky z UAV. Vzhledem k vyšší ceně pořizování ALS dat v případě menšího rozsahu zkoumané lokality, což je i případ oblasti zkoumané v této práci, by toto nahrazení dávalo ekonomický smysl.

Hypoteticky lze předpokládat, že DSM s nižším rozlišením budou nadhodnocovat viditelnou plochu, zatímco u přesnějších DSM bude rozsah této plochy omezenější (*Lagner et al., 2018*). V našem případě lze tedy vyslovit hypotézu, že v případě výpočtu na základě přesnějších dat ALS bude viditelná plocha z totožného místa pozorování nižší než v případě dat UAV.

Rovněž budou zodpovězeny následující výzkumné otázky: Bude při použití UAV v modelu viditelnosti docházet k nadhodnocování, nebo k podhodnocování viditelné plochy? Jak přesné výsledky nabízí analýza viditelnosti z dat UAV ve srovnání s analýzou z dat ALS? Bylo by tedy možné uvažovat o záměně dat ALS za levnější data pořízená pomocí UAV a v jakých oblastech, případně za jakých podmínek?

3. REŠERŠE LITERATURY

3.1 Data UAV

UAV senzory umožňují dálkový průzkum Země založený na hyperspektrálním pozorování. Tyto senzory je možné využít jak k výzkumným, tak ke komerčním účelům, zejména pak v oblasti zemědělství a lesnictví (*Adão et al., 2017*). Vztahuje se na ně legislativa, která ve většině zemí umožňuje provádět neregistrované lety UAV do hmotnosti 30 kg při vzletu (*Aasen et al., 2018*).

Před nástupem a rozšířením UAV byla většina spektrálních dat získávána externími dodavateli dat (společnostmi nebo institucemi) stanoveným standardizovaným způsobem na pouze malém typu senzorů nesených satelity a pilotovanými letadly (*Aasen et al., 2018*). V dnešní době, kdy se technologie rychle vyvíjejí a jsou k dispozici stále nové a nové typy senzorů, platí, že výzkumné týmy vlastní nebo si dokonce staví vlastní systémy a zpracovávají data vlastními prostředky, aniž by služeb těchto externích poskytovatelů museli ve větší míře využívat (*Aasen et al., 2018*). S ohledem na jejich rozsáhlou diverzifikaci se však zvyšují i požadavky na nutnost zajištění kvality dat, která souvisí zejména s komplexností geometrických a radiometrických korekcí nezbytných k získávání přesných výsledků (*Aasen et al., 2018*).

Příkladem využití v oblasti zemědělství může být zkoumání obsahu barviva v listech vinné révy pomocí hyperspektrálních snímačů s vysokým rozlišením (*Zarco-Tejada, P.J. et al., 2013*). UAV byly úspěšně použity také k odhadu obsahu biomasy a fixace dusíku na plantážích pšenice a ječmene (*Pölonen, I. et al., 2013*). Dalším příkladem jejich využití může být klasifikace půdních typů a určování směru jejich vývoje za účelem přijímání rozhodnutí ohledně jejich managementu (*Corbane, C. et al., 2012*). UAV vybavené termálními a hyperspektrálními senzory bylo rovněž použito ke shromažďování dat za účelem odhadu fluorescence chlorofylu a strukturálních indexů, což umožnilo odhalení nedostatečného obsahu vody v zelených částech rostlin (*Zarco-Tejada, P.J. et al., 2012*).

V oblasti lesnictví můžeme jako příklad využití UAV uvést originální analýzu spektrálních vlastností fotogrammetrických a hyperspektrálních obrazových dat s vysokým rozlišením, které sloužily k odhalení smrkových porostů napadených kůrovcem v Norsku (*Näsi, R. et al., 2015*). V tomto případě bylo dosaženo při rozdělení stromů do tří tříd (zdravý, napadený, mrtvý) úspěšnosti klasifikace 76 %, zatímco při rozdělení do dvou tříd (zdravý, mrtvý) činila úspěšnost 90 %. Při použití v lesnictví je často konstatováno, že nedostatkem je přesnost altimetrie, která vyžaduje pozemní kontrolu. U studie týkající se menších tropických lesů (*Berveglieri, A. & Tommaselli, A.M.G., 2016*) se vyskytovala odchylka souřadnice Z okolo 40 cm, což je pro použití v lesnictví přijatelné.

UAV nesoucí kamery snímající ve viditelném a infračerveném (IR) spektru pak mohou sloužit ke snadné detekci požárů v lesních oblastech. Snímání v infračerveném spektru je však ekonomicky náročnější a zpravidla také

odhalí až požáry většího rozsahu, tudíž se pro účely prevence například v národních parcích využívají spíše kamery snímající pouze ve viditelném spektru (*Matelenok, V. et al., 2021*).

Nezbytným předpokladem využitelnosti hyperspektrálních dat k dalšímu zpracování a získání vypovídajících výsledků je odpovídající předletová příprava a předběžné zpracování dat po uskutečnění letové mise (*Adão et al., 2017*). To je usnadněno díky izolaci běžného uživatele od matematicky komplexních procesů formou sad nástrojů umožňujících přístup k již částečně zpracovaným datům (*Adão et al., 2017*).

Nesmírně důležitým úkolem při zpracování dat získaných z UAV je přesné geometrické zpracování. Mezi jeho nutné kroky patří stanovení vnitřních parametrů orientace snímacího systému, vnější orientace datové sekvence (pozice a rotace snímače během snímání dat) a geometrický model objektu sloužící k nalezení geometrického vztahu mezi předmětem a zaznamenanou hodnotou jeho radiance (*Aasen et al., 2018*).

Při zpracování dat mohou činit problémy nepříznivé meteorologické podmínky, například proměnlivá intenzita osvětlení (*Honkevaara, E. et al., 2013*), což vyžaduje provedení radiometrických korekcí.

V posledních 10-15 letech došlo k rychlému nárůstu počtu (nejen) komerčních snímačů určených pro systémy UAV. Dnes je možné data zachycovat rychleji a s výrazně vyšším prostorovým rozlišením, což umožňuje létat výše a rychleji, díky čemuž lze pokrýt mnohem větší území (*Aasen et al., 2018*).

Rovněž je důležité poznamenat, že asi neexistuje žádný snímač, který by vyhověl potřebám všech různých oblastí použití. Při výběru si tak uživatelé obvykle musí vybrat, zda upřednostní prostorové rozlišení, spektrální rozlišení nebo největší rozsah pokrytí. Vzhledem k fyzickým omezením konstrukce vede vyšší prostorové rozlišení většinou k nižšímu rozlišení spektrálnímu (*Aasen et al., 2018*). Nutnost pokrytí větší plochy také zpravidla vede k vyšší letové hladině.

3.2 Data ALS

Technologie ALS se využívají nejčastěji při managementu přírodních zdrojů. Laserové technologie umožňují kvantifikaci trojrozměrné struktury vegetace a terénu, který se nachází pod ní, což umožňuje jejich rozsáhlé využití v lesnictví a ekologii (*Roussel, J.R. et al., 2020*). Strukturální popis vegetace poskytuje možnost odhadování řady ekologicky významných ukazatelů, jako je její výška, objem a nadzemní část biomasy. K účinnému zpracování rozsáhlých a často i technicky složitých souborů dat slouží specializované algoritmy a software (*Roussel, J.R. et al., 2020*).

ALS představuje v lesnickém prostředí velmi významný nástroj, který měří vzdálenost pomocí přesně načasovaného laserového impulsu vyslaného snímačem a odraženého od cíle, což umožní stanovení přesných trojrozměrných souřadnic jednotlivých objektů (*Deng, S. et al., 2016*). Díky tomu, že takto lze přímo měřit strukturu lesa (včetně výšky koruny a jejich rozměrů), se nyní data ALS běžně využívají v lesnictví. Řada studií

prokázala, že data ALS lze využít k přesným odhadům vlastností lesa, jako je výška stromů, bazální plocha lesa, objem a biomasa (např. *Popescu, S.C. et al., 2004; Næsset, E. & Gobakken, T., 2008; Shendryk, I. et al., 2016*).

Příkladem efektivního využití dat ALS může být také zkoumání struktury korun stromů rozdílných tvarů a velikostí, jako je tomu v tropických lesích, které je zpravidla nemožné provést pozemním měřením. K charakterizaci těchto individuálních korun lze použít data ALS, jejichž analytické nástroje ovšem v případě, že byly vyvinuty pro použití v lesích mírného pásu, mohou vyžadovat před použitím v tropickém prostředí výrazné úpravy (*Aubry-Kientz, M. et al., 2019*).

Další využívání technologií ALS jako významného nástroje ekologického výzkumu je podmíněno nástroji, metodami a přístupy vyvinutými samotnými jejich uživateli. Vzhledem k rychlému rozšiřování ALS v akademické, státní i soukromé sféře spolu s rostoucím požadavkem na otevřená a přístupná data rostou význam bezplatného a open-source softwaru a důležitost pracovních postupů definovaných uživateli (*Roussel, J.R. et al., 2020*).

3.3 Zpracování snímků UAV v softwaru Drone2Map

Software *Drone2Map*, který vytvořila švýcarská společnost Pix4D, usnadňuje automatickou tvorbu profesionálních obrazových produktů ze snímků pořízených drony pomocí jedinečného systému využívajícího přístupů fotogrammetrie, zejména pak metody Structure from Motion (SfM). Na základě těchto snímků lze rychle získat produkty pro účely vizualizace a další analýzy. Software podporuje celou řadu dronů a kamer a umožňuje zpracování získaných snímků již v místě jejich sběru. Příslušný pracovní projekt je také možné propojit s nástrojem *ArcGIS Collector*, který se používá k zachycení bodů s vysokou přesností přímo v terénu (*Esri, 2020*).

Výsledné produkty, které *Drone2Map* nabízí, jsou dvojího typu. V první řadě se jedná o dvourozměrné (2D) produkty, mezi které patří ortomozaika (tedy kombinace georeferencovaných leteckých snímků) a digitální modely povrchu a terénu. Vedle těchto produktů jsou k dispozici i trojrozměrné (3D) produkty, konkrétně 3D textury pro účely modelování, plánování či dalších syntéz a 3D bodová mračna umožňující analýzu přírodních i umělých prvků z hlediska měření jejich objemu, detekce změn, viditelnosti a překážek. V rámci práce byly využity pouze 2D produkty (*Esri, 2020*).

3.4 Další dostupný software pro zpracování snímků UAV

Pro určování bodů pomocí postupů fotogrammetrie je možné rovněž využít programy Agisoft Photoscan či Pix4D. Oba tyto programy používají k vytváření bodových mračen, trojrozměrných modelů a ortofotomap statické snímky nehybných objektů (*Barbasiewicz, A. et al., 2018*). Jejich hlavní využití tkví v oblasti letectví, strojírenské fotogrammetrie, počítačové animace a dálkového průzkumu Země. Díky možnosti exportovat zpracovaná data v řadě různých formátů jsou kompatibilní s grafickými programy, jako je Autocad, nebo

softwaru pro analýzu GIS, jako je ArcGIS. Jejich hardwarové a funkční požadavky jsou navzájem srovnatelné (Barbasiewicz, A. et al., 2018).

Mezi tzv. open-source řešení řadíme vedle mnoha dalších (Bundler, openMVG, OpenCV, VisualSfM nebo PMVS) program MicMac. Tento program vyvíjí National Institute of Geographic and Forestry Information (IGN) a National School of Geographic Sciences již od roku 2003 (Rupnik, E. et al., 2017). Původním cílem jeho vývoje byla výhradně kartografická výroba IGN. V roce 2005 byla do jeho rozhraní přidána prostřednictvím aplikačního rámce XML řada samostatných nástrojů umožňujících uživatelům volně nastavovat parametry výpočtu ve všech fázích zpracování. V roce 2007 začala bezplatná distribuce tohoto programu pod licencí CECILL-B (Rupnik, E. et al., 2017).

3.5 Klasifikace bodového mračka ALS a UAV

Na základě klasifikace bodových mraček ALS i UAV, která tvoří strukturu CHM, je možné identifikovat jednotlivé stromy: větší přesnost zpravidla umožňují data ALS. Tato 3D data je možné získat zejména z nástrojů umožňujících SfM, tedy například *Drone2Map* (viz předcházející kapitola). Bodová mračka CHM umožňují rovněž poměrně přesný odhad množství biomasy (Guerra-Hernández, J., Cosenza, Diogo N. et al., 2019). Nespornou výhodou dat ALS je skutečnost, že dokáží penetrovat skrz vegetaci; naproti tomu data UAV zachycují pouze povrch objektů (např. Aubry-Kientz, M. et al., 2019).

Samotný postup klasifikace bodového mračka se v našem případě skládá z následujících kroků: vytvoření 3D modelu a předzpracování bodového mračka, odvození příslušných parametrů SfM a ALS a následný výpočet požadovaných ukazatelů (např. objem jednotlivých stromů nebo objem biomasy). Kromě uvedených nástrojů SfM k tomu lze využít také nástroje LAStools (Guerra-Hernández, J., Cosenza, Diogo N. et al., 2019).

3.6 Tvorba a kvalita DTM, DSM a CHM

V pracích zabývajících se modely viditelnosti bude spolehlivost těchto modelů kromě výpočetního algoritmu vždy záviset také na kvalitě vstupního DSM (Lagner et al., 2018). Ne vždy lze totiž automaticky předpokládat, že vstupní DSM je zcela přesný. Tento DSM je zpravidla vytvářen na základě pouhého sečtení DTM a vrstvy odpovídající objektům na zemském povrchu, v našem případě tedy CHM (dále jen CHM); to samozřejmě platí v případě, že zpracování provádíme na základě dat z již dostupných databází (např. ArcCR500, ZABAGED). V některých případech je jeho kvalita sporná z důvodu potenciálních nepřesností vyplývajících zejména z nepřesných vstupních dat, což je zpravidla dáno jejich prostorovou neurčitostí (Lagner et al., 2018).

Z výše uvedeného vyplývá, že k vytvoření DTM, DSM a CHM jakékoli oblasti je nutné z dostupných dat získat alespoň dvě z těchto vrstev; třetí lze následně dopočítat. Přitom obecně platí, že produktem filtrace či

klasifikace bodového mračna je vždy DSM a DTM, na základě kterých je třeba vytvořit normalizovaný digitální model povrchu (nDSM). Tento nDSM se v případě, že se týká vegetace, nazývá CHM.

V současnosti se má za to, že nejpřesnější výsledky tvorby kvalitních DSM nabízí nástroje laserového měření vzdálenosti (light detection and ranging; LiDAR), které je nejučinněji možné zpracovávat například v sadě nástrojů LAStools (LAStools, 2021). Modely povrchu vytvořené těmito nástroji již totiž obsahují objekty nacházející se na zemském povrchu. V případě modelů viditelnosti vytvořených na základě dat LiDAR bylo prokázáno, že odpovídají skutečnosti přibližně v 90 % případů, zatímco u modelů založených na jiných vstupních datech je to zpravidla méně než 80 % (Lagner et al., 2018). V případě dat LiDAR je však problémem jejich vysoká cena, náročné zpracování bodového mračna do rastrového DSM a v neposlední řadě i skutečnost, že tato data nejsou v mnoha oblastech vůbec k dispozici (Lagner et al., 2018).

3.7 Výpočet modelů viditelnosti pomocí nástroje Viewshed

Analýza pomocí nástroje *Viewshed* se využívá k řešení mnoha vědeckých úloh již řadu let (např. Jones, E.E., 2006; Sander, H.A. & Manson, S.M., 2007; Pompa-Garcia, M. et al., 2010). Kromě uvedeného nástroje, na který padla konečná volba, je v rámci ArcGIS možné použít například algoritmy *Line of Sight* či *Observer Points*, které se rovněž zabývají viditelností, byť na základě mírně odlišných parametrů. Mimo ArcGIS pak připadají v úvahu programy jako QGIS, MapInfo Pro, Mapbox nebo Maptitude a poměrně zajímavé možnosti analýzy viditelnosti nabízí i Google Maps.

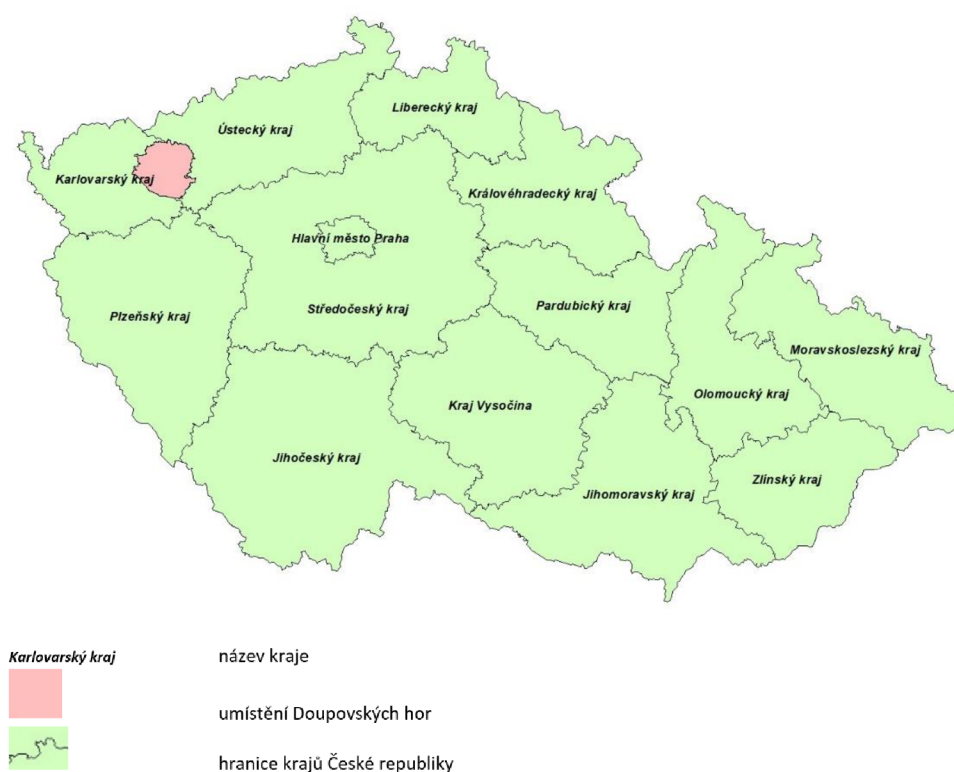
Spolehlivost výsledného modelu vytvořeného na základě nástroje *Viewshed* závisí na výpočetním algoritmu a zejména na kvalitě vstupního DSM (viz výše). Model viditelnosti jednak určuje oblast, odkud je vidět příslušný objekt, jednak oblast, kterou může pozorovat pozorovatel nacházející se v daném bodě. Smyslem vytváření těchto modelů a provádění souvisejících analýz může být například nalezení vhodných míst pro umístění objektů potenciálně narušujících přírodní scenérii (Lagner et al., 2018), jako jsou větrné elektrárny (Sklenička & Zouhar, 2018), pobřežní akvakultura (Falconer et al., 2013) či lyžařské oblasti (Geneletti, 2008), umístění vojenských objektů (Smith & Cochrane, 2011), analýza dopadu zavádění nových živočišných a rostlinných druhů (Kizuka et al., 2014) nebo modelování rizika predace v ekologii živočichů (Olsoy et al., 2015).

Nástroj *Viewshed* v programu ArcMap vytváří jednoduché binární rastrové vrstvy rozlišující viditelné a neviditelné oblasti. Jeho parametr *OFFSETA* udává výšku pozorovatele: jedná se o vertikální vzdálenost připočtenou k vertikální hodnotě buňky (Lagner et al., 2018). Umístění pozorovatele lze určit vytvořením náhodného bodu, v ideálním případě mimo oblast pokrytou vegetací, nebo arbitrárně (tj. libovolně). Hlavním vstupem do analýzy pomocí nástroje *Viewshed* je DSM, jehož přesnost může značně ovlivnit kvalitu celého modelu.

4. ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ

4.1 Geografické vymezení

Doupovské hory se nacházejí na západě České republiky, na rozhraní Karlovarského a Ústeckého kraje, jen několik kilometrů východně od Karlových Varů (viz obr. 1). Název získaly podle města Doupov, které zaniklo v roce 1953 v důsledku založení vojenského výcvikového prostoru Hradiště, který je dnes jedním ze čtyř vojenských újezdů, které využívá armáda České republiky. Velká většina rozlohy Doupovských hor se nachází na pravém břehu řeky Ohře, jen malá oblast poblíž města Ostrov je na břehu levém. K jejich severní části přiléhají Krušné hory, na jihu pak Plzeňská hornatina a Karlovarská vrchovina (MOČR, 2006).



Obr. 1: Doupovské hory na mapě ČR s vyznačením krajů – vlastní dílo (zdroj dat: ArcČR 500).

4.2 Geomorfologické a klimatické poměry

Z geomorfologického hlediska můžeme Doupovské hory rozdělit do následujících tří celků: Hradištská hornatina s nejvyšším vrcholem celého pohoří Hradiště (934 m n. m.), Jehličenská hornatina a Rohozecká hornatina. Průměrná nadmořská výška se pohybuje kolem 600 m n. m a průměrná roční teplota oblasti činí necelých 6 °C (MOČR, 2006).

4.3 Geologické poměry

Odborníci se dříve domnívali, že Doupovské hory tvoří jediný rozsáhlý stratovulkán. Tuto původně německou hypotézu, která je mezi širší veřejností poměrně silně zažitá, převzali v 50. letech i čeští geologové, po roce 2000 se však v českém prostředí názor na geologický vývoj oblasti změnil. Polohy sopečných uloženin na jihovýchodním okraji hor dokládají, že sopečné erupce zde začaly asi před 34 miliony let. Menší sopky typu struskových a tufových kuželů přispěly k explozivní fázi sopečné aktivity k produkci hrubších sopečných materiálů, které se v uloženinách střídají s jemnějším popelem, jehož zdrojem byla centrální sopka. Tato centrální sopka se nedochovala, což bylo patrně způsobeno pozdější sopečnou činností. Následně přešla aktivita vulkánů z explozivní fáze do fáze výlevné s převahou čedičové lávy, která tvořila velké lávové proudy. Právě toto značné zastoupení láv (byť jejich mocnost je ve srovnání např. s Českým středohořím nižší) svědčí o tom, že Doupovské hory jsou spíše pozůstatkem štítového vulkánu nebo skupiny vulkánů než jediným stratovulkánem. Sopečná činnost v oblasti pokračovala až do počátku miocénu, tedy do období přibližně před 20 miliony let (*Rapprich, 2012*).

4.4 Hydrologické poměry

Doupovské hory jsou významnou pramennou oblastí. Největší tok je potok Liboc, do kterého se vlévá Žďárský a Luční potok. Povrchové vody oblasti jsou chráněné několika čistírnami, které zbudovala místní vojenská správa. Vzhledem k sopečnému původu oblasti se zde vyskytuje celá řada minerálních pramenů (*MOČR 2006*). Protože je přístup veřejnosti do oblasti značně omezen, jsou zdejší vodní zdroje i ostatní části přírody chráněny o poznání lépe než v jiných částech České republiky.

4.5 Fauna

Doupovské hory jsou domovem přibližně 60 druhů savců a více než 250 druhů ptáků. Vyskytují se zde i některé velmi vzácné druhy; například pstruh potoční (*Salmo trutta fario*) je zde přítomen takřka ve všech tekoucích vodách, skokan ostronosý (*Rana arvalis*) zase hojně obývá vody stojaté. Z obojživelníků je dále hojně přítomen mlok skvrnitý (*Salamandra salamandra*) a celá řada druhů čolků a žab. Doupovské hory jsou patrně posledním útočištěm užovky stromové (*Zamenis longissimus*) a největší hnízdní oblastí čápa černého (*Ciconia nigra*) na území České republiky. Hnízdí zde i celá řada dravých ptáků, kteří jsou na jiných místech České republiky velmi vzácní, například včelojed lesní (*Pernis apivorus*) nebo luňák červený (*Milvus milvus*). Právě kvůli výskytu vzácných ptáků byla v oblasti na ploše více než 63 000 hektarů vyhlášena ptačí oblast Doupovské hory (*Sborník České geografické společnosti, 1991-1995*).

4.6 Flóra

Z hlediska flóry jsou velmi cenné zbytky přirozených listnatých lesů a plochy bývalých luk a polí. Jedná se zejména o původní květnaté bučiny, jejichž přirozený vývoj byl v této tradičně zemědělské krajině značně ovlivněn lidskou činností. V současnosti se zde typicky vyskytují travinná a bylinná společenstva, menší listnaté lesy a keře. Zatímco v listnatých lesích se vyskytuje například vraní oko čtyřlisté (*Paris quadrifolia*) či samorostlík klasnatý (*Actaea spicata*), v oblastech s dominujícími travními společenstvy to je koniklec otevřený (*Pulsatilla patens*) nebo kosatec sibiřský (*Iris sibirica*). V oblastech zaniklých vesnic můžeme narazit i na již neudržované sady se starými ovocnými stromy (*Sborník České geografické společnosti, 1991-1995*).

5. METODIKA

5.1 Data

Pro porovnání a dokládání rozdílů mezi jednotlivými typy prostorových dat (tj. daty UAV a ALS) je v první řadě nutné zvolit vhodnou lokalitu, na které budou zastoupeny různé typy vzrůstu lesa a proměnlivosti terénu. Tyto lokality byly doporučeny vedoucím práce.

Použitá data UAV poskytla Česká zemědělská univerzita (ČZU). Tato data byla získána v červnu 2016 během šesti letů na šesti různých zájmových územích, které probíhaly v průměrné výšce 120 metrů nad zemským povrchem. K těm byl využit bezpilotní letecký prostředek typu křídlo modelu *eBee Classic*. V rámci těchto letů bylo pořízeno téměř 1700 snímků. Celková plocha pokrytá těmito lety byla 351 hektarů.

Data ALS pochází z mise ALS prováděné ČZU v září 2016 (ALS) v letové hladině mezi 576 a 1141 metry nad zemským povrchem; výsledné mračno s vysokou hustotou bodů (průměrná hustota byla přibližně 20 bodů na m²) pokrývalo plochu více než 200 km² a obsahovalo téměř 486 milionů bodů. Pro potřeby reference v rámci řešení této práce byla poskytnuta jeho potřebná část. Data ALS pak byla získána pomocí skeneru *ALS70 (Leica Geosystems, Germany)* neseném letadlem *Cessna 402* (viz Tab. 1).

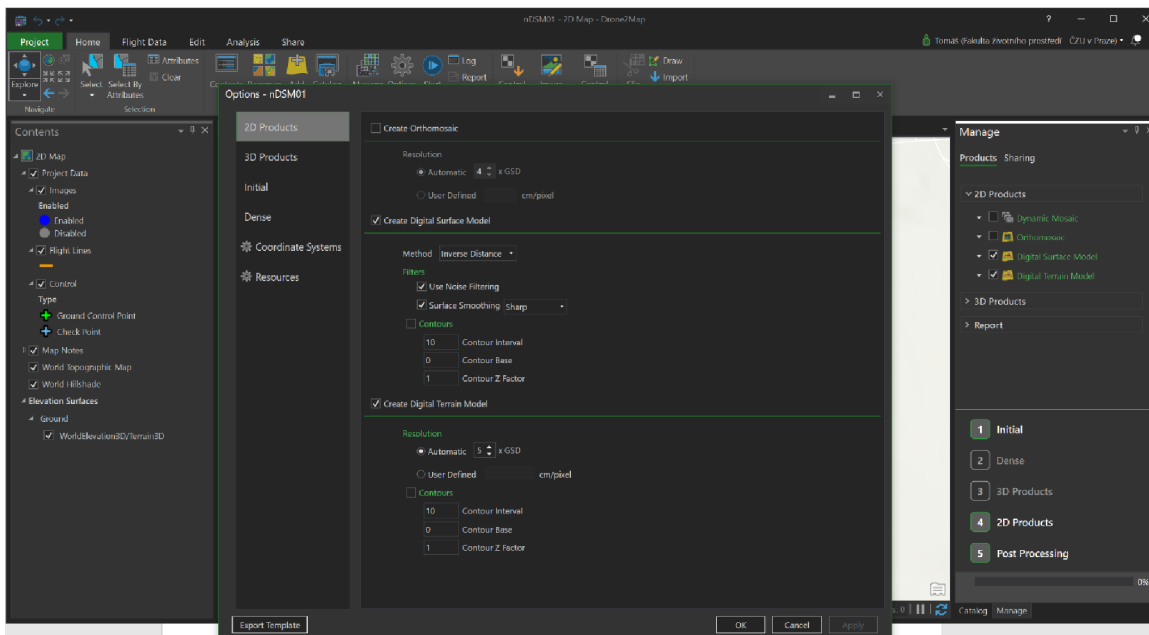
Data ALS byla již obdržena ve zpracované formě. Poskytnutý archiv obsahoval mj. 6 souborů CHM ve formátu TIF a 3 soubory DTM v témže formátu. Data UAV bylo naproti tomu nutné v rámci řešení práce zpracovat.

Tabulka 1: Přehled poskytnutých dat použitých pro účely řešení práce.

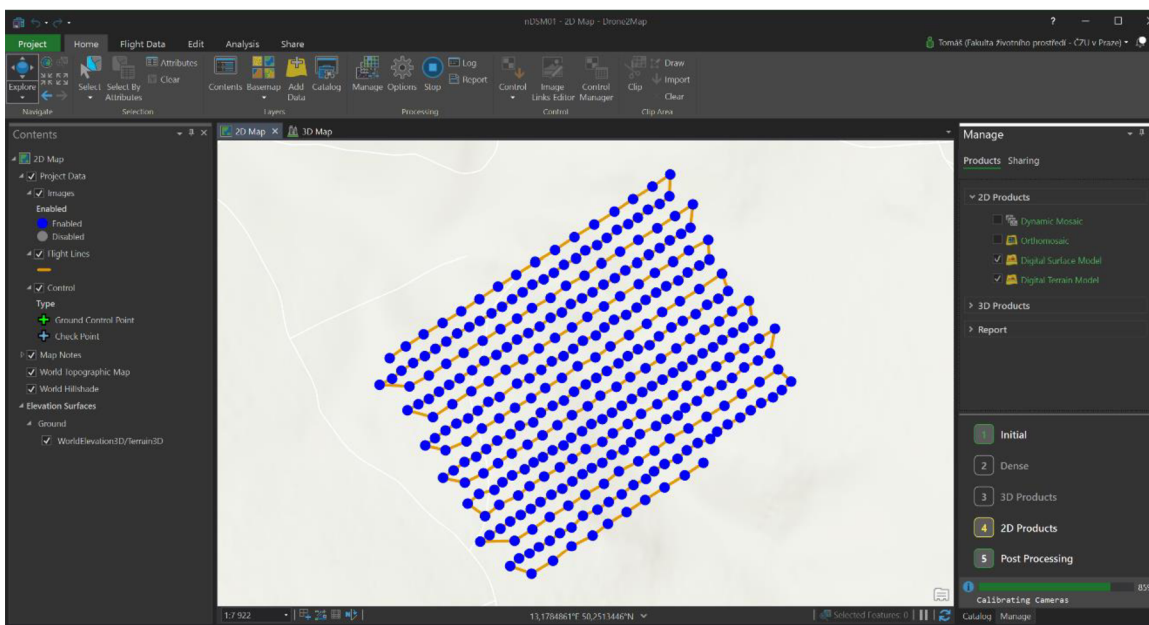
typ dat	poskytovatel	doba pořízení	model letounu	skener	rozlišení
UAV	ČZU	červen 2016	eBee Classic	Sony DSC-WX220	
ALS	ČZU	září 2016	Cessna 402	ALS70	20 bodů/m ²

5.2 Zpracování dat UAV

Následně bylo tedy třeba zpracovat do podoby DSM a DTM i poskytnutá data UAV. K tomu byl využit software Drone2Map, který dokáže vytvořit SfM, a který poskytuje ČZU studentům zejména pro potřeby řešení závěrečných prací. Na obr. 2 a 3 je zachyceno použité nastavení při zpracování snímků a dokumentace průběhu zpracování (v tomto případě se jedná o lokalitu č. 1).



Obr. 2: Nastavení programu Drone2Map při zpracování snímků z lokality č. 1.



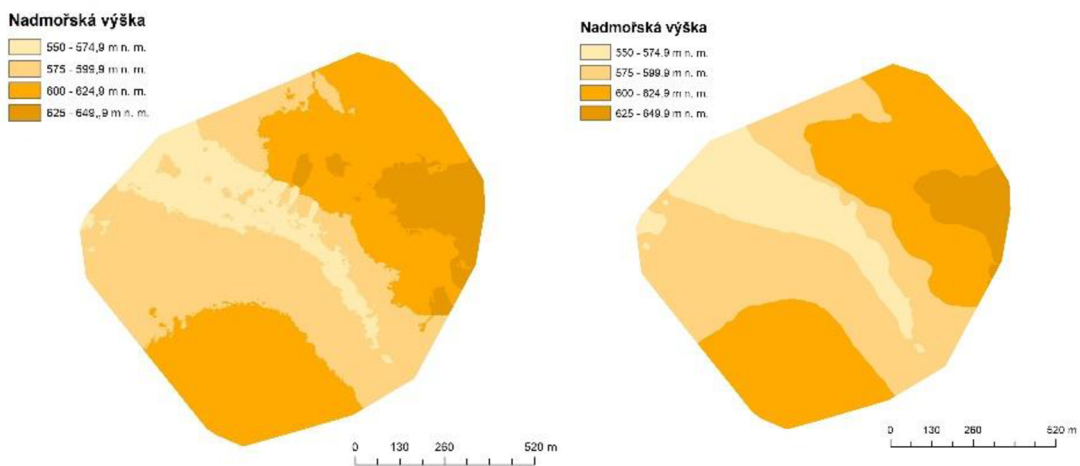
Obr. 3: Průběh zpracování snímků z lokality č. 1 se zobrazením letových linií v programu Drone2Map.

Pomocí některých nástrojů v programu ArcMap (zejm. *Slope*, *Aspect*) byly následně vypočteny ilustrační statistiky dokumentující rozdílnost jednotlivých lokalit. Tabulka 2 uvádí některé základní charakteristiky těchto lokalit, konkrétně jejich minimální, průměrnou a maximální nadmořskou výšku (NV) v metrech nad mořem, procentuální pokryv vegetací přesahující výšku 2 m a průměrnou výšku této vegetace, průměrný sklon svahu ve stupních a procentech a průměrnou orientaci svahu podle azimutu s uvedením příslušné světové strany.

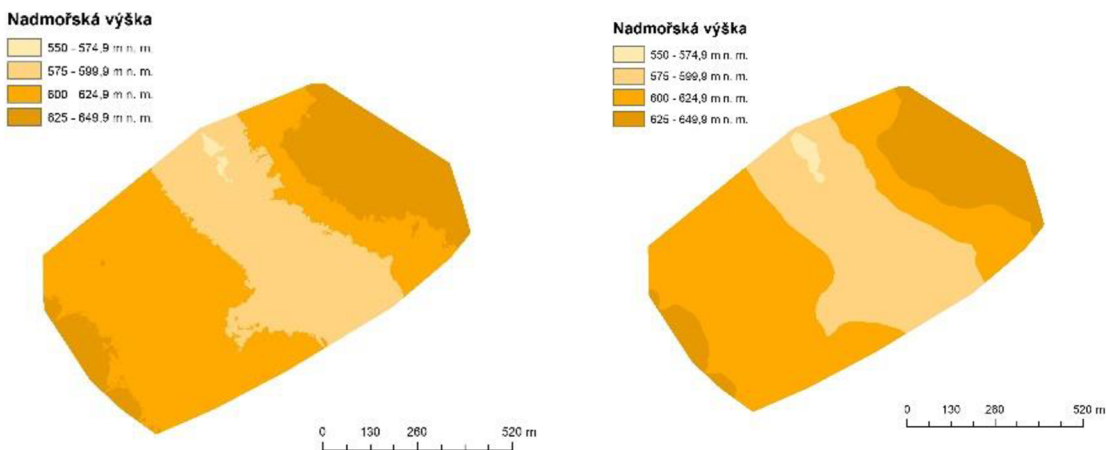
Tabulka 2: Vybrané základní charakteristiky šesti zkoumaných lokalit v Doupovských horách dle dat UAV.

lokality	min. NV	prům. NV	max. NV	vegetace přes 2 m	sklon	orientace
lokality č. 1	558	597	632	34,5 % (2,1 m)	7,6° (13,3 %)	186,5° (J)
lokality č. 2	572	609	648	33,1 % (1,9 m)	7,1° (12,5 %)	153,5° (JV)
lokality č. 3	512	543	578	40,8 % (2,1 m)	7,6° (13,3 %)	150,0° (JV)
lokality č. 4	426	463	500	25,7 % (1,8 m)	6,6° (11,6 %)	122,8° (JV)
lokality č. 5	672	707	741	30,3 % (1,8 m)	6,0° (10,5 %)	227,0° (JZ)
lokality č. 6	656	699	737	32,8 % (2,2 m)	7,1° (12,5 %)	135,6° (JV)

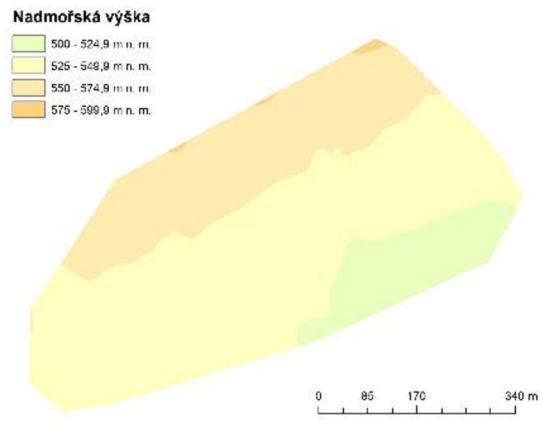
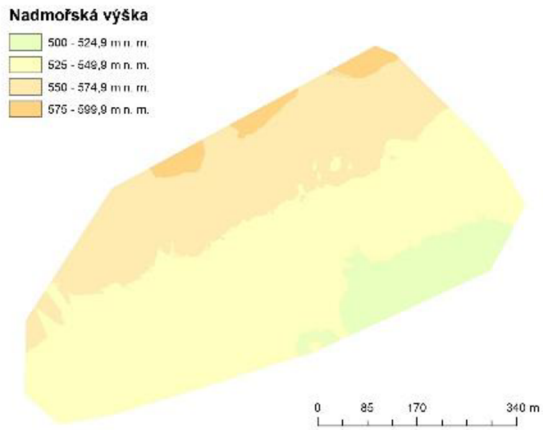
Níže uvedené obrázky pak zachycují výsledné DSM a DTM všech zkoumaných lokalit.



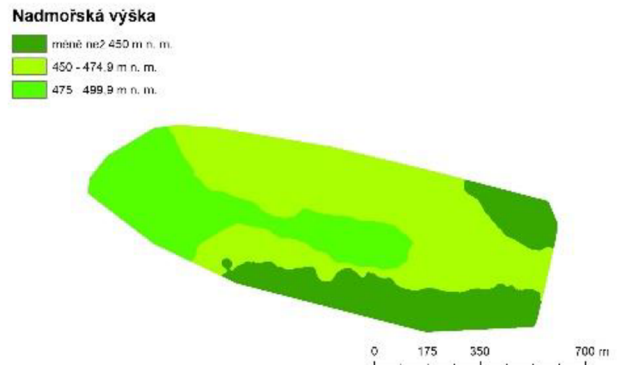
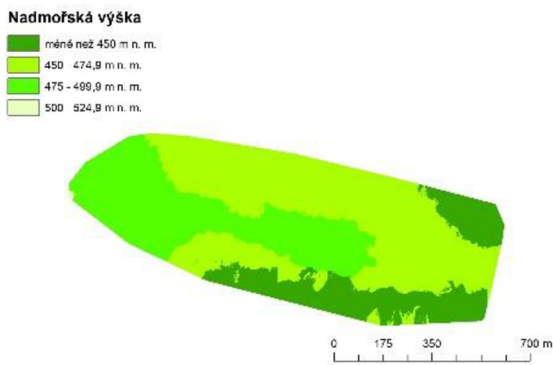
Obr. 4: Zleva: DSM a DTM lokality č. 1.



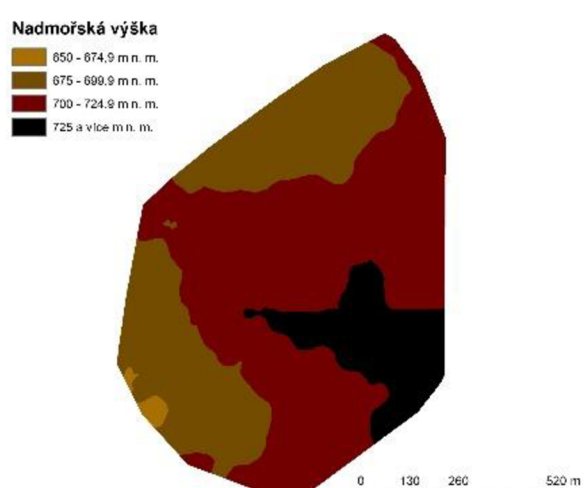
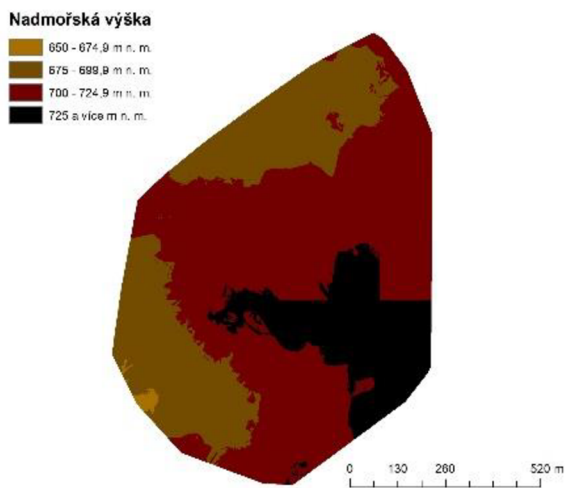
Obr. 5: Zleva: DSM a DTM lokality č. 2.



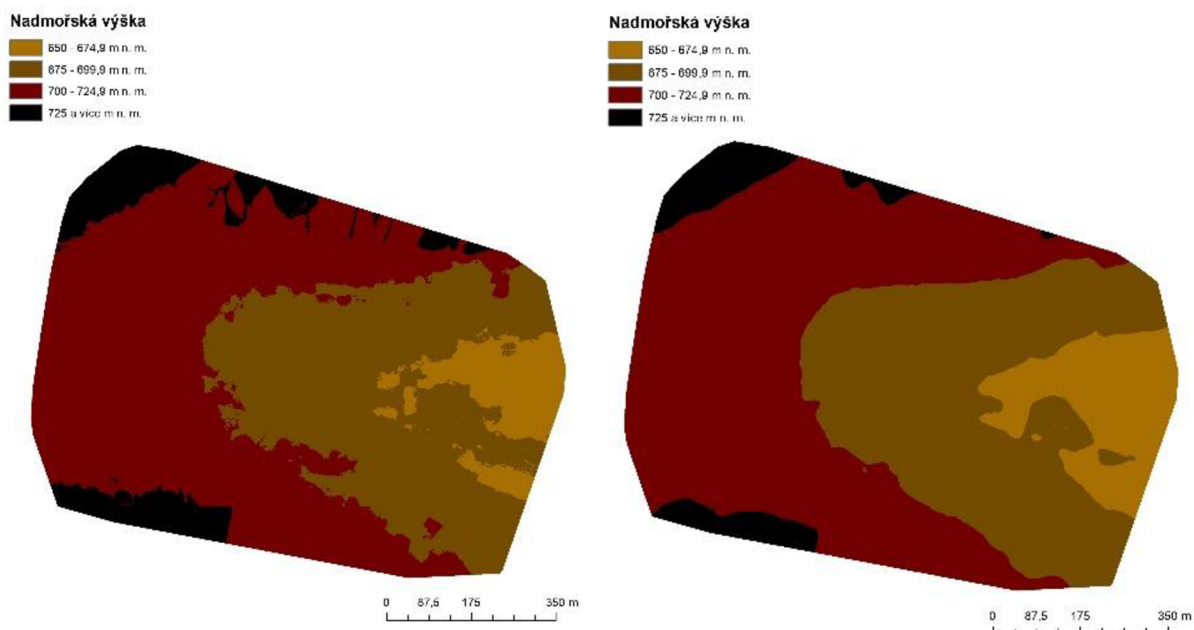
Obr. 6: Zleva: DSM a DTM lokality č. 3.



Obr. 7: Zleva: DSM a DTM lokality č. 4.



Obr. 8: Zleva: DSM a DTM lokality č. 5.



Obr. 9: Zleva: DSM a DTM lokality č. 6.

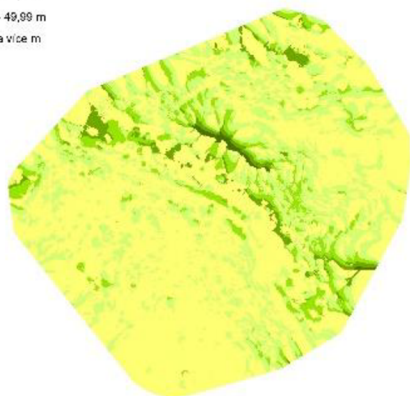
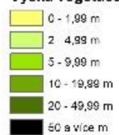
K vytvoření CHM, který zvýrazní objekty nacházející se nad úrovní terénu (zde tedy vegetaci), je dále zapotřebí odečíst vytvořené DTM od DSM.

5.3 Tvorba modelů vegetace z dat UAV

V tomto kroku byly vytvořeny z dostupných dat modely vegetace, a to na základě DSM a DTM. K vytvoření tohoto modelu vegetace stačilo odečíst DTM od DSM, které byly získány v předchozím kroku. Tento postup je možný vzhledem ke skutečnosti, že DTM, tedy model terénu, se liší od DSM, tedy modelu zemského povrchu, právě o výšku struktur nacházejících se na jeho povrchu, což je v tomto případě bez výjimky vegetační pokrýv.

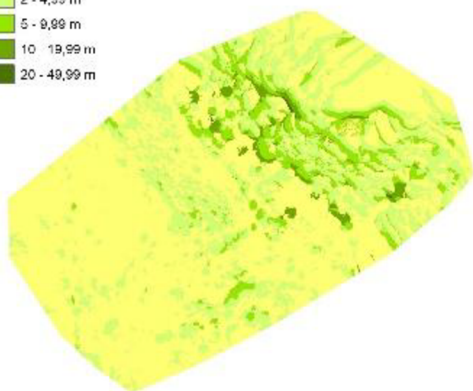
Samotný odečet byl realizován v programu ArcMap pomocí funkce *Raster Calculator*, která umožňuje mj. odečíst od sebe hodnoty dvou rastrových vrstev. Po samotném výpočtu bylo rovněž nutné zařadit reklasifikaci záporných hodnot, které by ve výsledném modelu nedávaly smysl. Pomocí nástroje *Reclassify* byla příslušná vrstva kategorizována do kategorií s výškou vegetace do 2 metrů, do 5 metrů, do 10 metrů, do 20 metrů, do 50 metrů a nad 50 metrů. Výsledné produkty jsou uvedeny na obrázcích 11 – 16.

Výška vegetace



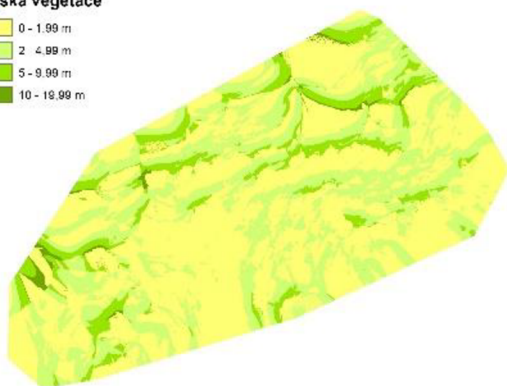
Obr. 10: CHM lokality č. 1.

Výška vegetace



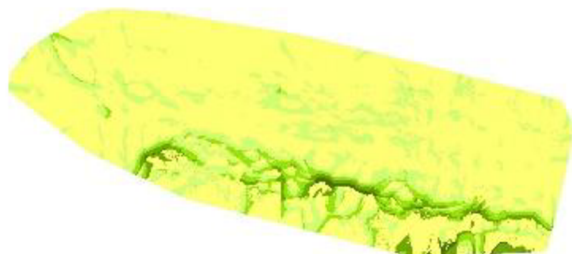
Obr. 11: CHM lokality č. 2.

Výška vegetace



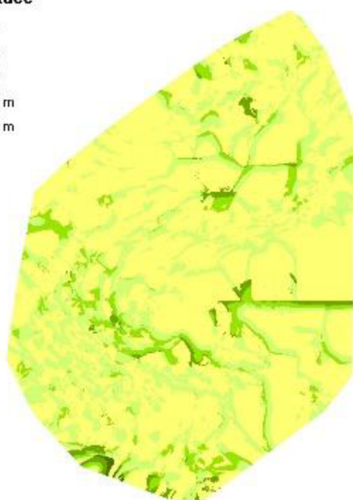
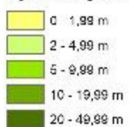
Obr. 12: CHM lokality č. 3.

Výška vegetace



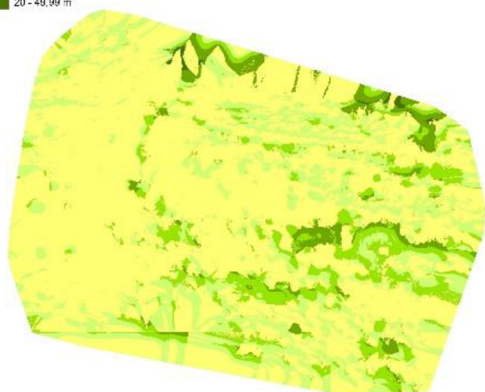
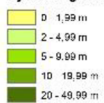
Obr. 13: CHM lokality č. 4.

Výška vegetace



Obr. 14: CHM lokality č. 5.

Výška vegetace

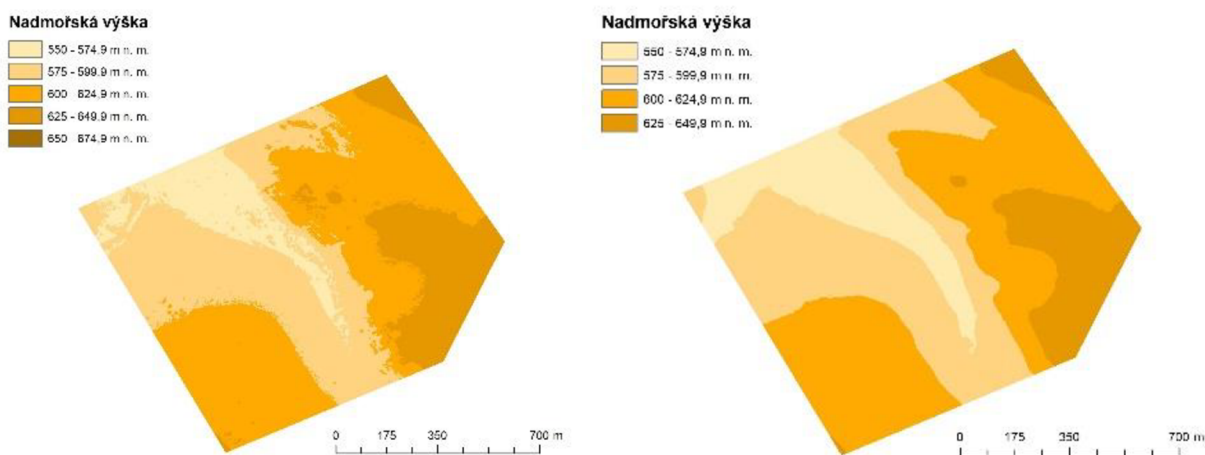


Obr. 15: CHM lokality č. 6.

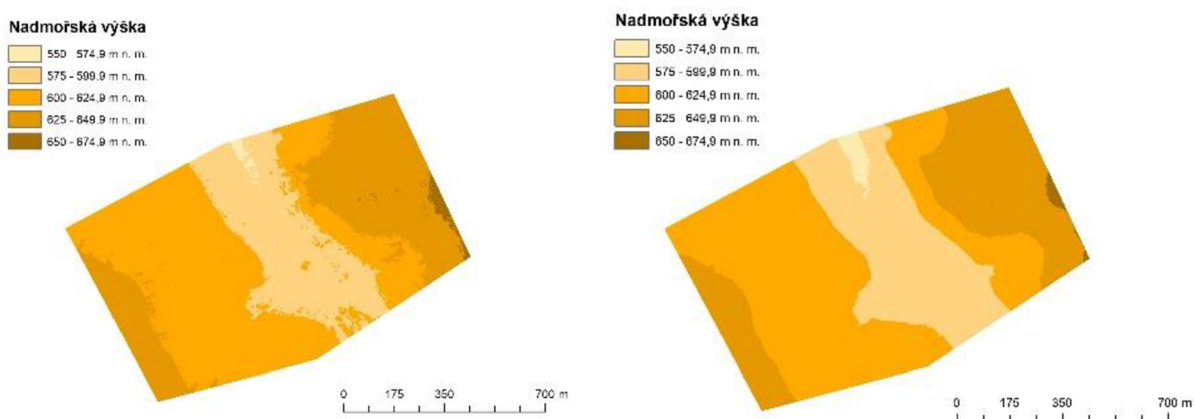
5.5 Zpracování dat ALS

Data ALS byla obdržena ve formě tří souborů DTM, které vždy zahrnovaly dvě ze zájmových lokalit, a šesti souborů CHM, které byly rozděleny podle těchto lokalit. Prvním krokem tedy bylo získat z větších souborů DTM plochy odpovídající příslušným CHM. K tomu byl v programu ArcMap využit nástroj *Extract by Mask*, který umožňuje oříznutí rastrové vrstvy podle tzv. masky jiného rastru.

Po aplikaci nástroje *Extract by Mask* jsme tedy měli k dispozici šest souborů CHM a šest jim odpovídajících souborů DTM. Stejně jako v případě dat UAV jsme následně vytvořili DSM, a to formou sečtení příslušných DTM a CHM v nástroji *Raster Calculator*. Výsledné produkty tohoto postupu jsou uvedeny na obrázcích 17 – 22.



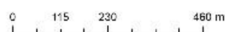
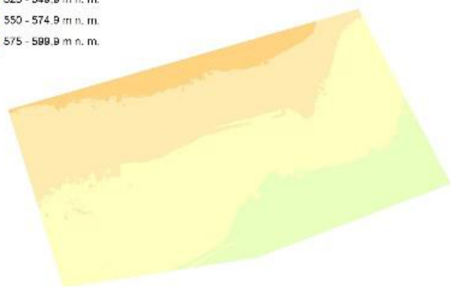
Obr. 17: Zleva: DSM a DTM lokality č. 1.



Obr. 18: Zleva: DSM a DTM lokality č. 2.

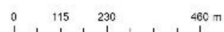
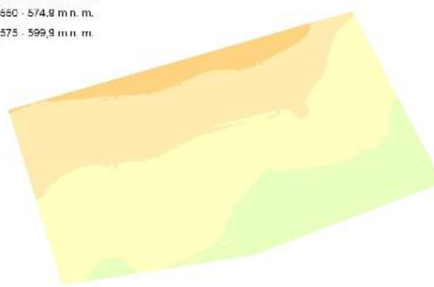
Nadmořská výška

- 500 - 524,9 m n. m.
- 525 - 549,9 m n. m.
- 550 - 574,9 m n. m.
- 575 - 599,9 m n. m.



Nadmořská výška

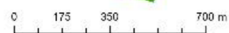
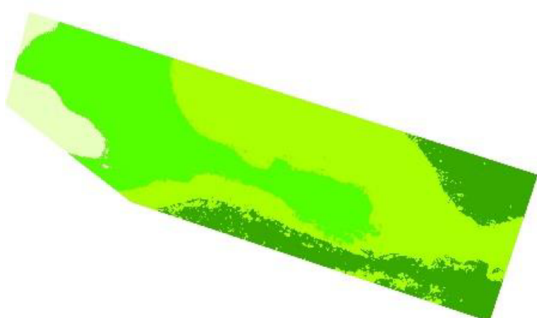
- 500 - 524,9 m n. m.
- 525 - 549,9 m n. m.
- 550 - 574,9 m n. m.
- 575 - 599,9 m n. m.



Obr. 19: Zleva: DSM a DTM lokality č. 3.

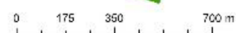
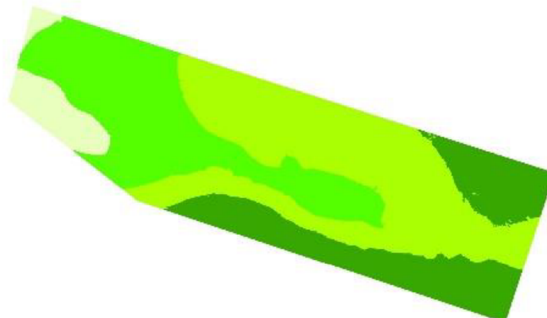
Nadmořská výška

- méně než 450 m n. m.
- 450 - 474,9 m n. m.
- 475 - 499,9 m n. m.
- 500 - 524,9 m n. m.



Nadmořská výška

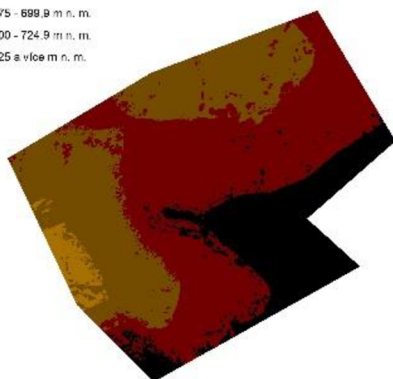
- méně než 450 m n. m.
- 450 - 474,9 m n. m.
- 475 - 499,9 m n. m.
- 500 - 524,9 m n. m.



Obr. 20: Zleva: DSM a DTM lokality č. 4.

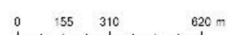
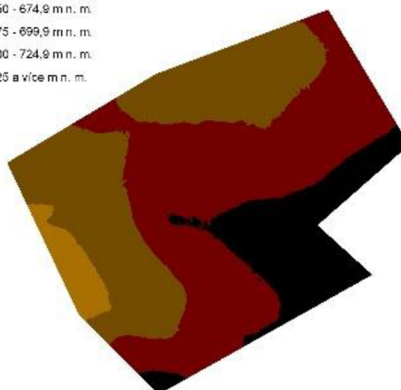
Nadmořská výška

- 650 - 674,9 m n. m.
- 675 - 699,9 m n. m.
- 700 - 724,9 m n. m.
- 725 a více m n. m.

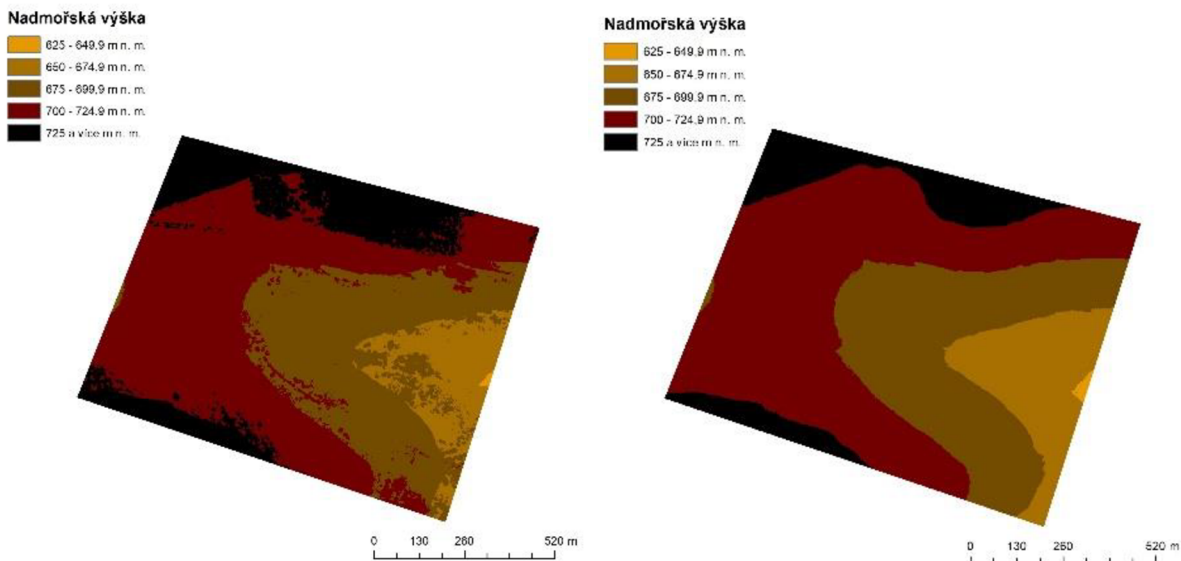


Nadmořská výška

- 650 - 674,9 m n. m.
- 675 - 699,9 m n. m.
- 700 - 724,9 m n. m.
- 725 a více m n. m.



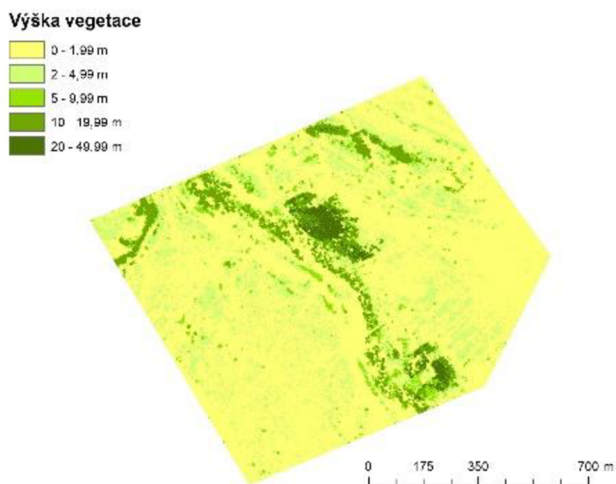
Obr. 21: Zleva: DSM a DTM lokality č. 5.



Obr. 22: Zleva: DSM a DTM lokality č. 6.

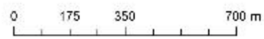
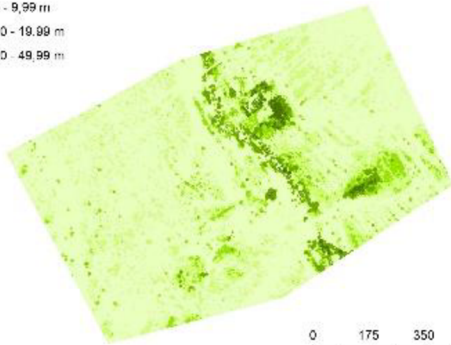
5.6 Tvorba precizních modelů vegetace z dat ALS

Soubory CHM zde byly k dispozici již v poskytnutých datech, takže jejich zpracování do přehlednější podoby nepředstavovalo větší problém. Pomocí nástroje *Reclassify* byla stejně jako v předchozím případě příslušná vrstva kategorizována do kategorií do 2 metrů, do 5 metrů, do 10 metrů, do 20 metrů, do 50 metrů a nad 50 metrů výšky vegetace. Výsledné klasifikované snímky jsou uvedeny na obrázcích č. 23 – 28.



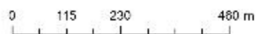
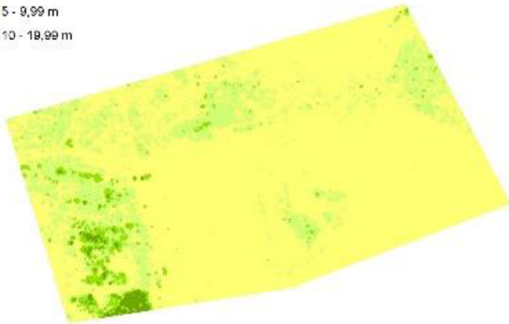
Obr. 23: CHM lokality č. 1.

Výška vegetace



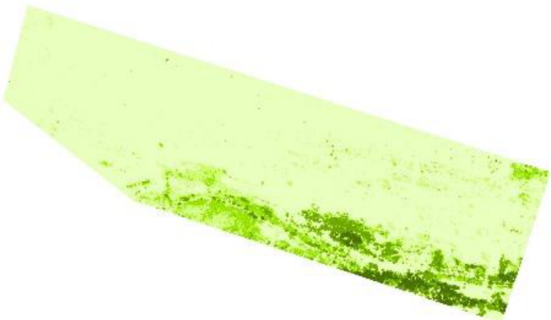
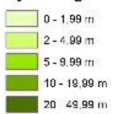
Obr. 24: CHM lokality č. 2.

Výška vegetace

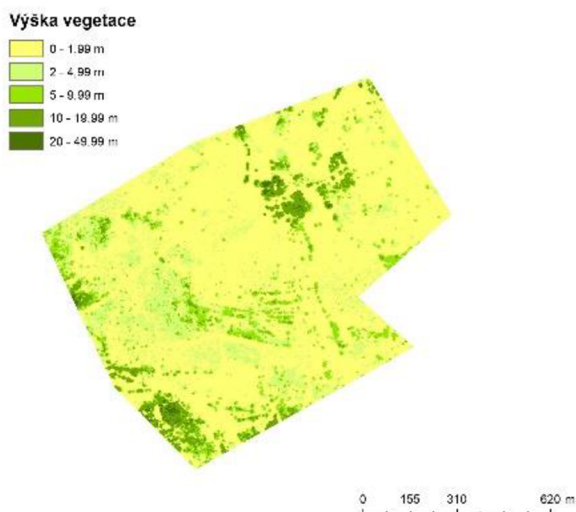


Obr. 25: CHM lokality č. 3.

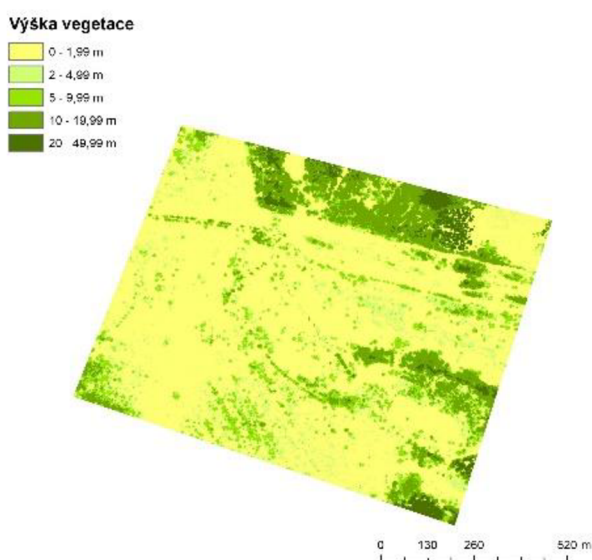
Výška vegetace



Obr. 26: CHM lokality č. 4.



Obr. 27: CHM lokality č. 5.



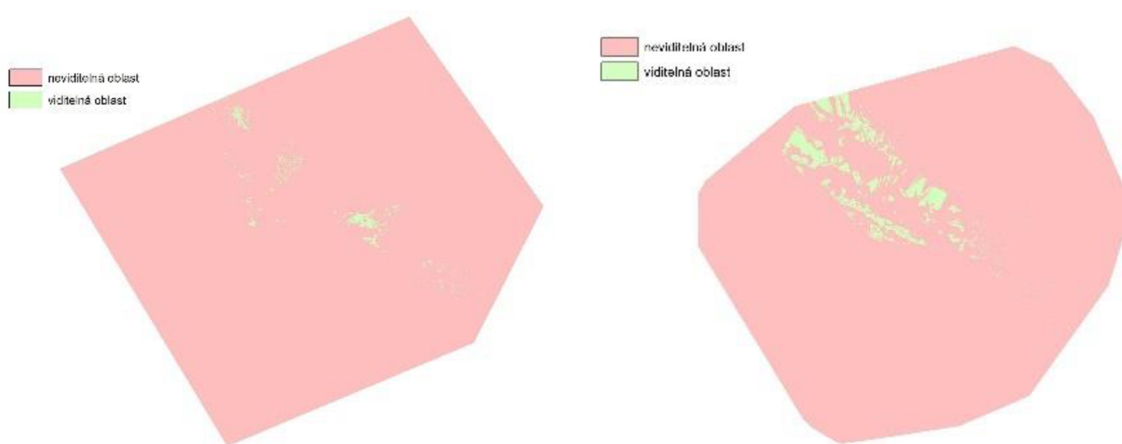
Obr. 28: CHM lokality č. 6.

5.7 Výpočet a porovnání modelů viditelnosti

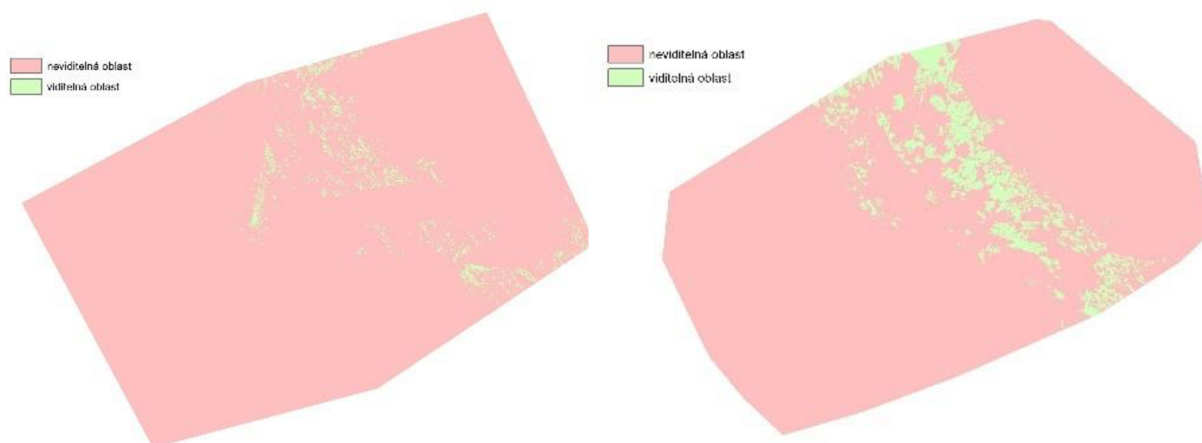
K analýze viditelnosti byl použit nástroj *Viewshed* v programu ArcMap. Prvním vstupem do tohoto nástroje byl vždy DSM příslušné lokality, a dále vrstva obsahující náhodný bod vytvořený mimo vrstvu vegetace. Oblasti pokryté vegetací byly určeny odečtením DTM od DSM a následnou kategorizací (nástroj *Reclassify*) vzniklé vrstvy (CHM) na 0 (plochy mimo vegetaci) a 1 (plochy s vegetací, tj. místa, kde je rozdíl mezi DTM a DSM vyšší než 0). Viditelnost totožného bodu, nacházejícího se 1 m nad zemským povrchem, byla pomocí nástroje *Viewshed* vypočtena jak na snímku lokality z dat UAV, tak na snímku z dat ALS. Porovnáním poměrné rozlohy obou oblastí pak bylo vyhodnoceno, zda jsou oba výsledky srovnatelné, případně zda dochází u některé z variant k nadhodnocení viditelné plochy a naopak. Následně byl celý postup opakován i s druhým náhodně

vytvořeným bodem, aby byla zajištěna určitá reprezentativnost výsledků, a závěry tak pravděpodobně nemohly být pouhým dílem náhody.

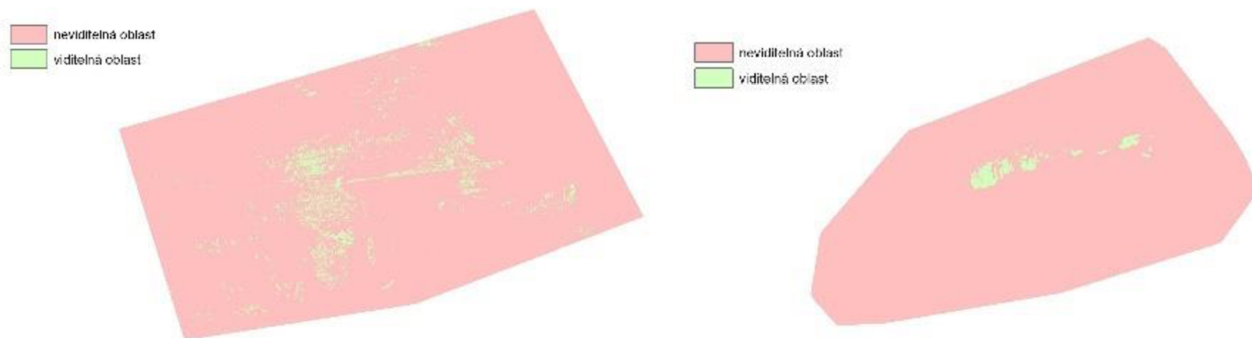
Vzhledem k výše uvedené hypotéze (kap. Rešerše literatury) se obecně předpokládalo, že data UAV, která nejsou tak přesná, budou mít tendenci viditelnou plochu nadhodnocovat, zatímco v případě ALS dat bude viditelná plocha menší. Na obr. 29 – 34 jsou zobrazeny výsledky analýzy Viewshed na všech šesti lokalitách u dat z ALS a z UAV. První pohled na obě analýzy naznačuje, že vyslovená hypotéza, že analýza z dat UAV bude viditelnou plochu nadhodnocovat, by mohla být – alespoň ve většině případů – pravdivá.



Obr. 29: Analýza Viewshed lokality č. 1 (zleva z dat ALS a z dat UAV).



Obr. 30: Analýza Viewshed lokality č. 2 (zleva z dat ALS a z dat UAV).



Obr. 31: Analýza Viewshed lokality č. 3 (zleva z dat ALS a z dat UAV).



Obr. 32: Analýza Viewshed lokality č. 4 (zleva z dat ALS a z dat UAV).



Obr. 33: Analýza Viewshed lokality č. 5 (zleva z dat ALS a z dat UAV).



Obr. 34: Analýza Viewshed lokality č. 6 (zleva z dat ALS a z dat UAV).

6. VÝSLEDKY

Dvojice souborů s analýzami z dat UAV a z dat ALS pro stejnou lokalitu byly zpracovány tak, aby skutečně zachycovaly tutéž plochu. Poté byla provedena klasifikace viditelných a neviditelných ploch a výpočet rozlohy těchto ploch. Výsledky byly následně vyjádřeny v procentech plochy lokality, která je z náhodných bodů umístěných mimo zalesněné plochy viditelná. Výsledky srovnávací analýzy s přesností na tři desetinná místa jsou uvedeny v tabulce 3 a v tabulce 4.

Tabulka 3: Porovnání procentuální rozlohy viditelné (V) a neviditelné (N) části území z prvního náhodně stanoveného bodu mimo zalesněné plochy. Sloupec „výsledek (V)“ udává rozdíl v procentech viditelné plochy. Řádek „PRŮMĚR“ pak udává průměrné hodnoty za celou lokalitu.

lokalita	UAV: V	UAV: N	ALS: V	ALS: N	výsledek (V)
lokalita č. 1	1,175 %	98,825 %	0,811 %	99,189 %	UAV +0,364
lokalita č. 2	2,528 %	97,472 %	2,349 %	97,651 %	UAV +0,179
lokalita č. 3	4,321 %	95,679 %	2,481 %	97,519 %	UAV +1,840
lokalita č. 4	5,569 %	94,431 %	3,815 %	96,185 %	UAV +1,754
lokalita č. 5	1,547 %	98,453 %	0,600 %	99,400 %	UAV +0,947
lokalita č. 6	2,163 %	97,837 %	0,782 %	99,218 %	UAV +1,381
PRŮMĚR	2,881 %	97,119 %	1,808 %	98,192 %	UAV +1,073

Tabulka 4: Porovnání procentuální rozlohy viditelné (V) a neviditelné (N) části území z druhého náhodně stanoveného bodu mimo zalesněné plochy. Sloupec „výsledek“ udává rozdíl v procentech viditelné plochy. Řádek „PRŮMĚR“ pak udává průměrné hodnoty za celou lokalitu.

lokalita	UAV: V	UAV: N	ALS: V	ALS: N	výsledek (V)
lokalita č. 1	2,244 %	97,756 %	1,821 %	98,179 %	UAV +0,423
lokalita č. 2	1,774 %	98,226 %	1,322 %	98,678 %	UAV +0,452
lokalita č. 3	8,104 %	91,896 %	6,651 %	93,349 %	UAV +1,453
lokalita č. 4	3,331 %	96,669 %	2,114 %	97,886 %	UAV +1,217
lokalita č. 5	1,842 %	98,158 %	1,602 %	98,398 %	UAV +0,240
lokalita č. 6	2,565 %	97,435 %	1,884 %	98,116 %	UAV +0,681
PRŮMĚR	3,312 %	96,688 %	2,571 %	97,429 %	UAV +0,741

Z tabulky 3 je zřejmé, že data UAV nadhodnocují viditelnou plochu na všech šesti zkoumaných lokalitách. Nejnižší rozdíl, pouhých 0,179 %, byl naměřen na lokalitě č. 2 v rámci zkoumání viditelných ploch z prvního

bodů, zatímco na ostatních lokalitách byl rozdíl ještě vyšší, až k 1,840 % v případě lokality číslo 3. Tyto rozdíly se jeví na první pohled jako malé, ovšem například u lokality č. 6 v tabulce 3 představuje viditelná plocha dle dat UAV bezmála trojnásobek výsledku naměřeného na základě dat ALS. Platnost výsledků (ač v tomto omezeném rozsahu) byla ověřena v softwaru R provedením jednoduchého testu ANOVA. Z hlediska topografie byly nejmenší rozdíly v nadmořské výšce na lokalitách č. 3 a 4, a právě na těchto lokalitách byla viditelná plocha na základě dat UAV nadhodnocena nejvíce. Dá se tedy hovořit o tom, že výsledky obou analýz nejsou naprosto srovnatelné a o nahraditelnosti dat ALS daty UAV v tomto případě nemůže být řeč.

7. DISKUZE

Je třeba připustit, že design pokusu s jen dvojicí náhodně vytvořených bodů je jednoduchý a pro vědeckou práci by byl jistě považován za zcela nedostatečný. Účelem této práce však bylo zejména prozkoumání možností práce s daty, srovnání výsledků s jinými studiemi zabývajícími se obdobnými tématy a obecně získání lepšího rozhledu a orientace v dané problematice. Výsledky byly konzistentní a v souladu s hypotézou vyslovenou v cílech práce, totiž že v případě výpočtu na základě přesnějších dat ALS bude viditelná plocha z totožného místa pozorování nižší než v případě dat UAV.

Na základě provedených měření bylo stanoveno, že data získaná z UAV v našem případě ve srovnání s daty ALS konstantně nadhodnocují viditelnou plochu. Toto zjištění je v souladu se závěry studie o dopadu přesnosti vstupních dat na nadhodnocování viditelné plochy (*Lagner et al., 2018*), kde bylo konstatováno, že veškeré další metody mimo ALS viditelnou plochu výrazným způsobem nadhodnocovaly.

Jiné studie (např. *Guerra-Hernández et al., 2019*) naproti tomu soudí, že metody založené na UAV jsou pro lesnické potřeby a management udržitelného rozvoje lesa naprosto plnohodnotným nahrazením dat ALS. Předmětná studie se nicméně zabývá uměle vysazovanými lesy, které mají výrazně odlišné charakteristiky než lesy rostoucí bez lidského zásahu (druhová variabilita, výškové rozdíly). I v této studii se však připouští, že například modely objektivě orientované analýzy obrazu (OBIA) mají přesnější výsledky, jestliže jsou založeny na bodových mračcích získaných z dat ALS (*Guerra-Hernández et al., 2019*).

8. ZÁVĚR

Vzhledem k provedeným analýzám si můžeme dovolit tvrdit, že za předpokladu, že nedošlo k žádné závažné chybě v měření či v provedených výpočtech, nejsou data ALS nahraditelná daty UAV. Rozdíl mezi viditelnou plochou z téhož bodu umístěného na povrchu obou příslušných DSM mimo vrstvu vegetace byl ve většině případů natolik markantní, že by to muselo nevyhnutelně ovlivnit veškeré další operace či analýzy, do kterých by tyto vrstvy vstupovaly. Z toho důvodu nelze doporučit nahrazování dat ALS daty UAV; výsledky jsou značně ovlivněné vstupním DSM, které k výpočtu používáme.

V úvodu práce byla vyslovena hypotéza (kap. Rešerše literatury), že v případě dat UAV bude docházet k nadhodnocování viditelné plochy. Na základě provedené analýzy viditelnosti a jejích výsledků, které jsou shrnuté v tabulce 3 v předcházející kapitole, můžeme konstatovat, že se tato hypotéza potvrdila. Překvapující může být rozptyl odchylek, který se pohyboval od jednotek procent (7,6 v případě lokality č. 2) až po nízké stovky (176,6 v případě lokality č. 6). Pokud bychom měli k dispozici větší počet zkoumaných lokalit, bylo by zajímavé pozorovat, zda v některém případě vůbec může dojít k tomu, že analýza z dat UAV ukáže menší viditelnou plochu než v případě dat z ALS (samozřejmě se shodnou kvalitou, která byla použita v rámci této práce).

K prokázání toho, která z obou analýz je přesnější a více odpovídá skutečné viditelnosti na zkoumané lokalitě, by bylo zapotřebí osobně lokalitu navštívit a provést tam měření. Podle výsledků analýz se lze o přesnosti pouze dohadovat; je ovšem patrné, že analýza z dat ALS měla tendenci k většímu „štěpení“ viditelných ploch, zatímco analýza z dat UAV zobrazovala spíše souvislejší území. Do našeho modelu vstupuje i vrstva vegetace, která má na většině lokalit značný rozsah, takže je jisté na místě podotknout, že skutečná viditelnost v místě bude ovlivněna i vegetačním obdobím.

Protože výsledky analýz ukázaly, že rozdíly mezi daty ALS a daty UAV jsou poměrně velké (byť nikoli řádově), nelze zaměňování dat ALS za data UAV pro odborné účely doporučit. Omezujeme se zde na jediný modelový případ a je možné, že v případě ještě kvalitnějších snímků z UAV, případně méně kvalitních dat ALS by jiná analýza prokázala opak nebo by přinejmenším připustila nahrazení pro některé případy. Kdyby se například jednalo o případovou studii pro umístění vyhlídkové věže, ze které by podle požadavků mělo být vidět na jezero, a rozdíly v analýze viditelnosti by byly pouze v jednotkách procent, přičemž značná část jezera by byla viditelná v obou případech, dalo by se o záměně jednoznačně uvažovat. V našem případě jsou ale rozdíly příliš velké, než abychom mohli zaměňování dat i u naznačené studie doporučit.

9. PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

1. Guerra-Hernández, J., Cosenza, Diogo N. et al., 2019. Predicting Growing Stock Volume of Eucalyptus Plantations Using 3-D Point Clouds Derived from UAV Imagery and ALS Data. *Forests* 2019. <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/10/905>
2. Cheonggil, J., Che-young, O. et al., 2020. A Comparative Study to Evaluate Accuracy on Canopy Height and Density Using UAV, ALS, and Fieldwork. *Forests* 2020. <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/2/241>
3. Puliti, S., Solberg, S., Granhus, A., 2019. Use of UAV Photogrammetric Data for Estimation of Biophysical Properties in Forest Stands Under Regeneration. *Remote Sens.* 2020. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/233>
4. RAPPRIČH, V.: Za sopkami po Čechách. Vyd. 1. Praha: Grada, 2012, 240 s. ISBN 978-802-4737-966
5. Vojenské újezdy Armády České republiky. Praha: Ministerstvo obrany České republiky - AVIS, 2006, 285 s. ISBN 80-727-8345-9
6. Sborník České geografické společnosti. Praha: Academia, 1991-1995, 5 v. ISSN 1210-115X.
7. Guerra-Hernández, J., Arellano-Pérez, S. et al., 2021. Developing a site index model for *P. Pinaster* stands in NW Spain by combining bi-temporal ALS data and Environmental data. *Forest Ecology and Management* 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118690>
8. Dalponte, M., Gianelle, D. et al., 2018. Predicting Selected Forest Stand Characteristics with Multispectral ALS Data. *Remote Sens.* 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10040586>
9. Sławik, Ł., Niedzielko, J. et al., 2019. Multiple Flights or Single Flight Instrument Fusion of Hyperspectral and ALS Data? A Comparison of their Performance for Vegetation Mapping. *Remote Sens.* 2019. <https://doi.org/10.3390/rs10040586>
10. ArcGIS Drone2Map, 2020 [online]. Esri. [Cit. 18. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-drone2map/overview>
11. Lagner, O., Klouček, T., Šímová, P., 2018. Impact of input data (in)accuracy on overestimation of visible area in digital viewshed models. *PeerJ* 2018. <https://doi.org/10.7717/peerj.4835>
12. Sklenička, P., Zouhar, J. 2018. Predicting the visual impact of onshore wind farms via landscape indices: a method for objectivizing planning and decision processes. *Applied Energy* 209:445-454 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917315854>
13. Falconer, L., Hunter, D.C., Telfer, T.C., Ross, L.G. 2013. Visual, seascape and landscape analysis to support coastal aquaculture site selection. *Land Use Policy* 34:1-10 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837713000318>
14. Geneletti, D. 2008. Impact assessment of proposed ski areas: a GIS approach integrating biological, physical and landscape indicators. *Environmental Impact Assessment Review* 28(2–3):116-130 <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925507000777>
15. Smith, C., Cochrane, E.E. 2011. How is visibility important for defence? A GIS analysis of sites in the western Fijian Islands. *Archaeology in Oceania* 46(2):76-84 <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/j.1834-4453.2011.tb00101.x>

16. Kizuka, T., Akasaka, M., Kadoya, T., Takamura, N. 2014. Visibility from roads predict the distribution of invasive fishes in agricultural ponds. PLOS ONE 9(6):e99709
<https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0099709>
17. Olsoy, P.J., Forbey, J.S., Rachlow, J.L., Nobler, J.D., Glenn, N.F., Shipley, L.A. 2015. Fearscales: mapping functional properties of cover for prey with terrestrial LiDAR. BioScience 65(1):74-80
<https://academic.oup.com/bioscience/article/65/1/74/2754258>
18. Klouček, T., Lagner, O., Šímová, P., 2015. How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines. Appl. Geogr. 64, 46–54.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.09.005>
19. Adão, T.; Hruška, J.; Pádua, L.; Bessa, J.; Peres, E.; Morais, R.; Sousa, J.J., 2017. Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry. Remote Sens., 9, 1110. <https://doi.org/10.3390/rs9111110>
20. Aasen, H.; Honkavaara, E.; Lucieer, A.; Zarco-Tejada, P.J., 2018. Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows. Remote Sens., 10, 1091. <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
21. Roussel, J.R.; Auty, D.; Coops, N.C.; Tompalski, P.; Goodbody Tristan R.H.; Meador, A.S.; Bourdon, J.F.; de Boissieu, F.; Achim, A., 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. Remote Sensing of Environment, 251, 15 December 2020, 112061.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720304314>
22. Aubry-Kientz, M.; Dutrieux, R.; Ferraz, A.; Saatchi, S.; Hamraz, H.; Williams, J.; Coomes, D.; Piboule, A.; Vincent, G., 2019. A Comparative Assessment of the Performance of Individual Tree Crowns Delineation Algorithms from ALS Data in Tropical Forests. Remote Sens., 11(9), 1086. <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/9/1086/htm>
23. Deng, S.; Katoh, M.; Yu, X.; Hyypä, J.; Gao, T., 2016. Comparison of Tree Species Classifications at the Individual Tree Level by Combining ALS Data and RGB Images Using Different Algorithms. Remote Sens., 8(12), 1034. <https://doi.org/10.3390/rs8121034>
24. Matelenok, V.; Alekseev, F.A.; Evdokimova, E.A., 2021. Influence of the canopy structure of a birch forest on the visibility of the fires below. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 677 052122
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/677/5/052122/pdf>
25. Pölönen, I.; Saari, H.; Kaivosoja, J.; Honkavaara, E.; Pesonen, L., 2013. Hyperspectral imaging-based biomass and nitrogen content estimations from light-weight UAV. In Proceedings of the SPIE Remote Sensing, Dresden, Germany. <https://doi.org/10.1117/12.2028624>
26. Zarco-Tejada, P.J.; Guillén-Climent, M.L.; Hernández-Clemente, R.; Catalina, A.; González, M.R.; Martín, P., 2013. Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). Agric. For. Meteorol., 171–172, 281–294.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.12.013>
27. Corbane, C.; Jacob, F.; Raclot, D.; Albergel, J.; Andrieux, P., 2012. Multitemporal analysis of hydrological soil surface characteristics using aerial photos: A case study on a Mediterranean vineyard. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 18, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.03.009>

28. Honkavaara, E.; Saari, H.; Kaivosoja, J.; Pölönen, I.; Hakala, T.; Litkey, P.; Mäkyinen, J.; Pesonen, L., 2013. Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture. *Remote Sens.*, 5, 5006–5039. <https://doi.org/10.3390/rs5105006>
29. Zarco-Tejada, P.J.; González-Dugo, V.; Berni, J.A. J., 2012. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sens. Environ.*, 117, 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>
30. Näsi, R.; Honkavaara, E.; Lyytikäinen-Saarenmaa, P.; Blomqvist, M.; Litkey, P.; Hakala, T.; Viljanen, N.; Kantola, T.; Tanhuanpää, T.; Holopainen, M., 2015. Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sens.*, 7, 15467–15493. <https://doi.org/10.3390/rs71115467>
31. Berveglieri, A.; Tommaselli, A.M.G., 2016. Exterior Orientation of Hyperspectral Frame Images Collected with UAV for Forest Applications. *ISPRS Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, XL-3/W4, 45–50. <http://dx.doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W4-45-2016>
32. Popescu, S.C.; Wynne, R.H.; Scrivani, J.A., 2004. Fusion of small-footprint LiDAR and multi-spectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous and pine forests in Virginia, USA. *For. Sci.*, 50, 551–565. <https://doi.org/10.1093/forestscience/50.4.551>
33. Næsset, E.; Gobakken, T., 2008. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sens. Environ.*, 112, 3079–3090. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.004>
34. Shendryk, I.; Broich, M.; Tulbure, M.G.; Alexandrov, S.V., 2016. Bottom-up delineation of individual trees from full-waveform airborne laser scans in a structurally complex eucalypt forest. *Remote Sens. Environ.*, 173, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.11.008>
35. Sander, H.A.; Manson, S.M., 2007. Heights and locations of artificial structures in viewshed calculation: How close is close enough? *Landscape and Urban Planning* 82(4), 257-270. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.002>
36. Pompa-Garcia, M.; Solis-Moreno, R.; Rodriguez-Tellez, E.; Pinedo-Alvarez, A.; Avila-Flores, D.; Hernandez-Diaz, C.; Velasco-Bautista, E., 2010. Viewshed Analysis for Improving the Effectiveness of Watchtowers, in the North of Mexico. *The Open Forest Science Journal*, 3: 17-22. <https://benthamopen.com/contents/pdf/TOFSCIJ/TOFSCIJ-3-17.pdf>
37. Jones, E.E., 2006. Using Viewshed Analysis to Explore Settlement Choice: A Case Study of the Onondaga Iroquois. *American Antiquity* 71(3), 523-528. <https://doi.org/10.1017/S0002731600039792>
38. Barbasiewicz, A.; Widerski, T.; Daliga, K., 2018. The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. *E3S Web Conf.*, Volume 26. https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/pdf/2018/01/e3sconf_bgc2018_00012.pdf
39. Rupnik, E.; Daakir, M.; Pierrot Deseilligny, M., 2017. MicMac – a free, open-source solution for photogrammetry. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2. Article number: 14. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0027-2>
40. Wieser, M.; Hollaus, M.; Mandlbürger, G.; Glira, P.; Pfeifer, N., 2016. ULS LiDAR supported analyses of laser beam penetration from different ALS systems into vegetation. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume III-3. <https://www.researchgate.net/publication/303793925>

41. Kye-Lim Kim; Bum-Jun Kim; Yoon-Kyung Lee; Joo-Hyung Ryu, 2019. Generation of a Large-Scale Surface Sediment Classification Map Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Data: A Case Study at the Hwang-do Tidal Flat, Korea. *Remote Sens.* 11(3). <https://doi.org/10.3390/rs11030229>
42. Mikaela Angelina Uy; Quang-Hieu Pham; Binh-Son Hua; Thanh Nguyen; Sai-Kit Yeung, 2019. Revisiting Point Cloud Classification: A New Benchmark Dataset and Classification Model on Real-World Data. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, pp. 1588-1597. https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2019/html/Uy_Revisiting_Point_Cloud_Classification_A_New_Benchmark_Dataset_and_Classification_ICCV_2019_paper.html
43. LAStools, 2021 [online]. rapidlasso GmbH. [Cit. 28. 3. 2022]. Dostupné z: <https://rapidlasso.com/lastools/>