

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

**Klasifikace dat leteckého laserového skenování a
odvození charakteristik vegetace a terénu pro
Hornojihetínskou výsypku**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vedoucí práce: doc. Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Bakalant: Jakub Voska

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jakub Voska

Geografické informační systémy a dálkový průzkum Země v životním prostředí

Název práce

Klasifikace dat leteckého laserového skenování a odvození charakteristik vegetace a terénu pro Hornojřetínskou výsypku

Název anglicky

Classification of airborne laser scanning data and derivation of vegetation and terrain characteristics for the Hornojřetínská spoil heap

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je klasifikace bodového mračka z leteckého laserového skenování pro Hornojřetínskou výsypku, odvození metrik popisující charakter vegetace a terénu, a zhodnocení jejich vhodnosti pro klasifikaci vybraného biotopu. Formulace dílčích cílů je úkolem autora.

Metodika

Terénní sběr dat o struktuře biotopů je časově náročný, a tudíž omezený svým prostorovým rozsahem. Současné metody dálkového průzkumu Země však umožňují monitoring rozsáhlých oblastí a tím překonání omezení, které má terénní sběr. Mezi v poslední době často využívaná data patří bodová mračka získaná z leteckého laserového skenování, která umožňují detailní popis struktury vegetace. Nicméně zpracování bodových mraček vyžaduje rozsáhlé znalosti zpracování dat a dálkového průzkumu Země, které přesahují rámec běžných znalostí uživatelů prostorových dat. Nedávné studie proto navrhují, aby společně s digitálními modely terénu, které jsou obvykle snadno dostupné z národních datových portálů, byly poskytovány i některé charakteristiky vegetace. Úkolem autora bude klasifikovat bodové mračko z Hornojřetínské výsypky, vypočítat základní charakteristiky vegetace a terénu, a posoudit možnosti využití těchto charakteristik pro klasifikaci biotopů. Náplní literární rešerše bude zejména letecké laserové skenování a jeho využití pro popis struktury vegetace a terénu.

Doporučený rozsah práce

30 – 40 stran

Klíčová slova

Formulace klíčových slov je úkolem autora.

Doporučené zdroje informací

- Assmann, J. J., Moeslund, J. E., Treier, U. A., & Normand, S. (2021). EcoDes-DK15: High-resolution ecological descriptors of vegetation and terrain derived from Denmark's national airborne laser scanning data set. *Earth System Science Data Discussions*, 1-32.
- Goodbody, T. R., Coops, N. C., Luther, J. E., Tompalski, P., Mulverhill, C., Frizzle, C., ... & Herniman, S. (2021). Airborne laser scanning for quantifying criteria and indicators of sustainable forest management in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(7), 972-985.
- Moudrý, V., Gdulová, K., Fogl, M., Klápště, P., Urban, R., Komárek, J., ... & Solský, M. (2019). Comparison of leaf-off and leaf-on combined UAV imagery and airborne LiDAR for assessment of a post-mining site terrain and vegetation structure: Prospects for monitoring hazards and restoration success. *Applied geography*, 104, 32-41.
- Roussel, J. R., Auty, D., Coops, N. C., Tompalski, P., Goodbody, T. R., Meador, A. S., ... & Achim, A. (2020). lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112061.
- Valbuena, R., O'Connor, B., Zellweger, F., Simonson, W., Vihervaara, P., Maltamo, M., ... & Coops, N. C. (2020). Standardizing ecosystem morphological traits from 3D information sources. *Trends in Ecology & Evolution*, 35(8), 656-667.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 4. 2. 2022

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 6. 2. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 09. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Klasifikace dat leteckého laserového skenování a odvození charakteristik vegetace a terénu pro Hornojřetínskou výsypku vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se 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 tohoto 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 souvislosti s GDPR.

V Praze dne 31.3.2022

Podpis:

Poděkování

Velké poděkování patří doc. Ing. Vítězslavu Moudrému, Ph.D. za jeho vstřícnost, ochotu a cenné rady a připomínky při vedení bakalářské práce. Děkuji také rodině za podporu při studiu.

Abstrakt

Data leteckého laserového skenování a z nich odvozené vegetační a terénní metriky se v poslední době staly novým způsobem, jak sledovat 3D strukturu prostředí. Získání vhodných metrik reprezentujících strukturu vegetace ale předchází celá řada kroků ve zpracování bodových mračen, jako je ground filtering a klasifikace bodů do základních tříd (vegetace, budovy). Cílem práce je zpracování bodového mračka a následné odvození vegetačních a terénních metrik. Studijní oblastí je Hornojiřetínská výsypka v severozápadních Čechách, na které se nachází jak část podrobená technické rekultivaci, tak část ponechána spontánní sukcesi, což umožňuje porovnat hodnoty získaných metrik mezi těmito plochami, a tak určit jejich zásadní odlišnosti. Data LiDAR byla získána v rámci leteckého průzkumu v roce 2017. Celkem bylo odvozeno 55 vegetačních a terénních metrik za využití programů LAStools, ArcMap a lidR package. Dalším cílem bylo porovnání hodnot metrik a výběr takových, jejichž hodnoty se napříč plochami lišily natolik, aby je bylo možné využít ke klasifikaci. Porovnání proběhlo kromě rekultivované a sukcesní části také mezi přírodními třídami krajinného pokryvu CORINE Land Cover. Rozdíly mezi těmito plochami nejlépe prezentovaly metriky maximální výšky vegetace, výšky korun stromů, hustoty vegetace a sklonu svahů. I přes zjištěné rozdíly by se tyto metriky využívaly ke klasifikaci do větších skupin obsahujících několik druhů vegetace velmi obtížně. Větší uplatnění by našly při klasifikaci konkrétních druhů stromů nebo podrobných tříd krajinného pokryvu.

Klíčová slova: LiDAR, krajinný pokryv, výsypky, porovnání, metriky

Abstract

Aerial laser scanning data and the vegetation and terrain metrics derived from them have recently become a new way to study 3D structure of the environment. However, obtaining suitable metrics representing vegetation structure is preceded by a number of steps in point cloud processing, such as ground filtering and classification of points into basic classes (vegetation, buildings). The objective of this thesis is to process the point cloud and then derive vegetation and terrain metrics. The study area is the Hornojiřetínská spoil heap in Northwest Bohemia, which contains both technically reclaimed part and a part left to spontaneous succession, which allows to compare the values of the obtained metrics between these areas and thus to identify their fundamental differences. The LiDAR data were acquired as part of an aerial survey in 2017. A total of 55 vegetation and terrain metrics were derived using LAStools, ArcMap and lidR package. Another objective was to compare metric values and select those that varied enough across plots to be used for classification. In addition to the reclaimed and successional portions, comparisons were also made between natural CORINE Land Cover classes. The differences between these plots were best represented by the metrics of maximum vegetation height, crown span, vegetation density, and hill slope. Despite the differences found, these metrics would be difficult to use to classify into larger groups containing multiple vegetation types. They would be more applicable to the classification of specific tree species or detailed land cover classes.

Key words: LiDAR, land cover, spoil heaps, comparison, metrics

Obsah

1	Úvod a cíle práce	1
2	Literární rešerše	2
2.1	Data LiDAR	2
2.1.1	Pořizování dat LiDAR	3
2.1.2	Zpracování dat LiDAR	6
2.2	Charakteristiky vegetace a terénu.....	8
2.2.1	Vegetační metriky.....	8
2.2.2	Terénní metriky	11
2.3	Výsypky.....	15
3	Metodika	17
3.1	Popis území	17
3.2	Použitá data	18
3.3	Zpracování dat	18
3.3.1	Ground filtering	18
3.3.2	Klasifikace	20
3.3.3	Normalizace výšek	20
3.4	Výpočet metrik	21
3.5	Porovnání metrik	24
4	Výsledky	25
4.1	Klasifikace bodového mračna	25
4.2	Vypočítané metriky	26
4.3	Porovnání metrik	27
5	Diskuze	31
6	Závěr	34
7	Přehled literatury a použitých zdrojů.....	35
8	Přílohy.....	43

1 Úvod a cíle práce

Letecké laserové skenování (LLS) je jednou z metod dálkového průzkumu Země, jehož data se během posledních let stala hlavním zdrojem informací o struktuře zemského povrchu a vegetace ve vysoké kvalitě. Nejrozšířenějším, a tedy i nejdostupnějším produktem laserového skenování je digitální model terénu (DMT), jenž je často využíván pro různé analýzy. Bodová mračna však poskytují mnohem více než jen informaci o charakteru terénu. Nicméně jejich zpracování vyžaduje specializované znalosti o práci s bodovými mračky a takových odborníků je velmi málo. Proto se nově navrhuje, aby podobně jako DMT byly poskytovány i vegetační metriky popisující strukturu vegetace, která je považována za dobrý ukazatel diverzity druhů (Assmann et al. 2021).

Existuje velké množství prací zabývajících se využitím dat LLS pro studování diverzity různých druhů organismů v různých typech ekosystémů (Bakx et al. 2019; Davies a Asner 2014). I prostředí výsypek je předmětem výzkumů zabývajících se strukturou terénu a vegetace (Moudrý et al. 2019) a bylo ukázáno, že díky znalosti struktury vegetace z odvozených metrik je možné zkoumat druhovou diverzitu (Moudrý et al. 2021). Na výsypkách je možné vytvořit v podstatě jakékoliv prostředí, při jehož plánování by odvozené metriky mohly být užitečným vstupem. Cílem této práce je klasifikovat bodové mračno a z něho vypočítat vegetační a terénní metriky pro oblast Hornojirětínské výsypky. K dílčím cílům patří porovnání vypočtených metrik mezi rekultivovanou a sukcesní částí výsypky a třídami krajinného pokryvu CORINE Land Cover.

2 Literární rešerše

2.1 Data LiDAR

Pro pořizování kvalitních a přesných topografických dat se považuje za standard laserové skenování, využívající technologie LiDAR (Light Detection and Ranging). Funguje na principu měření vzdálenosti snímaného povrchu od vysílače laserového paprsku podle výpočtu doby jeho přenosu mezi vysláním a zpětným příjmem po odražení. Od objevení této metody se díky pokroku v technologiích, které LiDAR využívá (např. GPS, IMU – Inertial Measuring Unit), dosáhlo větší přesnosti a rychlosti pořizování dat a následné expanzi do více vědních oborů (Lohani a Ghosh 2017).

Získaná data LiDAR jsou zobrazena jako trojrozměrné bodové mračno ve zvoleném souřadnicovém systému. Každý bod má vlastní souřadnice XYZ, které definují polohu jednotlivých bodů v referenčním systému (Lato et al. 2012). Kromě souřadnic má každý bod několik dalších údajů získaných z přijímače, jako například intenzita odraženého paprsku a počet jeho odrazů, úhel skenování nebo hodnoty barevného modelu RGB udávající barvu bodu (Lohani a Ghosh 2017). Pro ukládání dat LiDAR se nejčastěji používá formát LAS. Ten ukládá až miliony bodů spolu se jmenovanými údaji o nich do jednoho souboru (Lohani a Ghosh 2017; Isenburg 2013). Tyto soubory mohou být velmi velké, jsou tedy obtížněji uložitelné a zpracovávání těchto dat je časově náročnější. V důsledku toho se často přistupuje k rozdělování bodového mračna na tzv. dlaždice, nebo se data komprimují do formátu LASzip, díky čemuž mají jen asi 25% původní velikosti (Isenburg 2013).

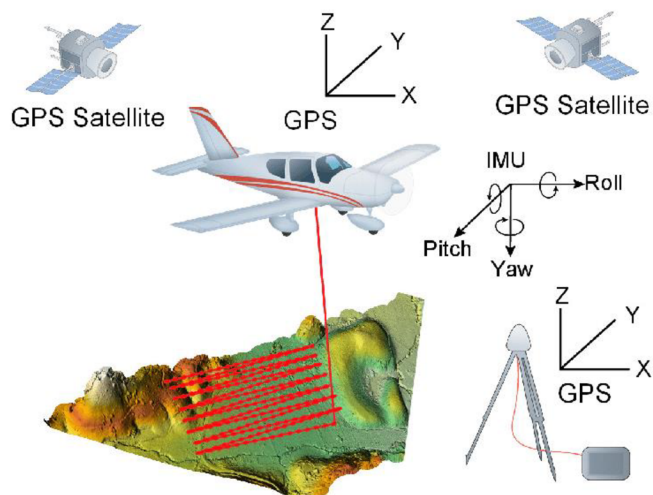
Existuje několik zdrojů, odkud zdarma získat data leteckého laserového skenování. Většinou se jedná o webové stránky vědeckých organizací Spojených států amerických, jako například United States Geological Survey (USGS) a jejich portálu Earth Explorer, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) nebo projekt United States Interagency Elevation Inventory (USIEI), který vznikl spoluprací USGS a NOAA. Většina jejich dat tedy pochází z oblasti Spojených států. K dalším portálům pro získání lidarových dat patří Open Topography nebo státní instituty některých zemí, jako například Španělsko, Finsko či Nizozemsko (Datta 2019). V České republice v současné době neexistuje národní portál pro volné pořizování dat leteckého laserového skenování.

2.1.1 Pořizování dat LiDAR

Systémy LiDAR se podle způsobu pořizování dat dají dělit na několik variant, asi tou nejčastější je dělení podle použité platformy, na které je připevněn laserový snímač. Takto se dělí na terestrické, letecké (Gatziolis a Andersen 2008; Haddad et al. 2012; Opitz a Cowley 2014; Lohani a Ghosh 2017) a také družicové (Winker et al. 2003). Data pořizená každou z těchto forem mají odlišné vlastnosti, jako hustota bodů nebo velikost zabíraného území, a tudíž i využití (Haddad et al. 2012).

Terestrické skenery jsou připevněny na trojnožce nebo jiném stabilizačním zařízení na povrchu v oblasti zájmu o velikosti několika čtverečních kilometrů (Opitz a Cowley 2014). Při skenování se do prostoru rozmístí reflektivní desky o známých souřadnicích, aby se výsledné bodové mračno dalo zalícovat a umístit do souřadnicového systému. Pokud je ve skeneru zabudován fotoaparát, mohou se pořídít barevné snímky snímané oblasti s vysokým rozlišením, pomocí kterých se body v mračnu obarví, což přispívá k lepší interpretaci scény (Haddad et al. 2012). Jestliže fotoaparát není součástí skenovacího systému, může se k němu připojit externí zařízení (Opitz a Cowley 2014). Terestrický LiDAR se využívá v různých odvětvích environmentálních a dalších věd, jimiž jsou například archeologie, paleontologie nebo lesnictví (Dassot et al. 2011; Haddad et al. 2012).

První součástí leteckého LiDARu (*Obrázek 1*) je nosič, kterým, jak název napovídá, je letecký prostředek jako letadlo, helikoptéra nebo bezpilotní systém (Wallace et al. 2012). Výběr letecké platformy závisí na tom, jaké vlastnosti jsou od získaných dat vyžadovány. Skenováním z letadla se dosáhne větší pokryté plochy, ale menší hustoty bodů. U skenování pomocí helikoptéry je tomu naopak (Opitz a Cowley 2014). Kromě některé z těchto platform se letecký LiDAR dále skládá z laserového skeneru, přijímače GNSS, inerciální měřicí jednotky (IMU) a palubního počítače. Skener vysílá k zemi krátké laserové pulzy, ty se od země odrazí zpět k přijímači, který zaznamená čas jejich přenosu, typ odrazu (první, poslední nebo vícenásobný), čas vyslání a příjmu a úhel vyslání pulzu. GNSS přijímač a IMU sledují polohu, respektive orientaci leteckého prostředku a palubní počítač slouží k měření GNSS času a ukládání dat. Existuje několik typů senzorů, ty se liší způsobem vysílání a příjmu laserových pulzů.



Obrázek 1: Schéma leteckého LiDARu (Shih et al. 2008)

Linear Mode LiDAR (LML)

Single pulse single wavelength Linear Mode LiDAR vždy vyšle pouze jeden pulz a po jeho příjmu vyšle pulz další. Pulzy jsou vždy vysílány v dostatečném časovém rozestupu, aby nedošlo k vyslání pulzu ještě před přijetím pulzu předchozího. Využívají se vlnové délky odpovídající infračervenému záření, jejichž odraz od většiny objektů na povrchu je dostatečný pro registraci přijímačem. I proto se musí letouny při skenování držet v nižších letových hladinách, protože s výškou klesá intenzita odraženého pulzu. S výškou dále klesá Pulse Repetition Frequency (PRF), který je u těchto systémů kolem 400 kHz. Vzory skenování LML senzorů jsou nejčastěji zig-zag, paralelní linie nebo eliptické vzory. Často se používají k mapování území do rozlohy 3000 km² (Lohani a Ghosh 2017).

Multiple Pulse in Air (MPiA)

Multiple Pulse in Air je podobný systému LML, liší se tím, že dokáže vysílat další pulz ještě předtím, než je přijat pulz předchozí a rozlišit je (Lohani a Ghosh 2017). Je tak oproti LML schopný získat dvakrát více bodů za stejný letový čas. Těmito systémy se mapují velká území (Opitz a Cowley 2014), ale pro tyto účely bývají nahrazovány Geiger Mode nebo Single Photon LiDARy (Lohani a Ghosh 2017).

Full Waveform Digitization (FWD)

U Full Waveform Digitization LiDARu je digitalizován celý průběh signálu v časovém intervalu (např. 1 ns), což umožňuje zachycení odrazů od povrchů v celé hloubce stopy laserového pulzu. Pomocí Gaussovo dekompozice je poté možné odhalit povrchy, u nichž dochází k významnému zpětnému rozptylu. Data z těchto sensorů se využívají k detekci objektů a země pod vegetačním pokryvem (Lohani a Ghosh 2017) a dále pro oblasti, kde je obtížné rozlišení nízké vegetace od terénu (Opitz a Cowley 2014).

Geiger Mode LiDAR (GML) a Single Photon LiDAR (SPL)

Posledním příkladem sensorů jsou Geiger Mode (GML) a Single Photon (SPL) LiDARy, jejichž princip fungování je stejný a liší se výrobcem. Tyto systémy jsou schopny zachytit pouze několik fotonů zpětného záření a měřit vzdálenost. Skenují v kruhovém vzoru tak, že laserový pulz rozdělí do několika menších pulzů (pulselets), například 100 v případě SPL a vysílá jich až 60 000 každou sekundu. Tímto způsobem dokážou provést až 6 000 000 jednotlivých měření za sekundu. Výhodou kruhového vzoru skenování je minimalizace datových stínů v okolí vysokých budov. Sensory GML a SPL pořizují hustá bodová mračka i z vyšších letových hladin a jsou vhodné pro pořizování dat velkých oblastí. Nevýhodou je, že na rozdíl od LML neprodukují několikanásobné odrazy a jejich přesnost je velice nízká u vysoce odrazivých povrchů (Lohani a Ghosh 2017).

V praxi se data leteckého LiDARu využívají nejčastěji k tvorbě velmi přesných digitálních modelů terénu. Ty se dříve vytvářely metodami jako fotogrammetrie a terénní měření, které jsou však časově a pracovně náročné (Liu 2008). K dalším produktům dat leteckého laserového skenování patří například digitální modely povrchu nebo modely výšky vegetace (Opitz a Cowley 2014).

Družicové laserové systémy (laserové altimetry) jsou na oběžnou dráhu Země vynášeny na nosných raketách a snímají povrch planety z výšky několika stovek kilometrů. Jednou z aplikací této metody je sledování atmosféry, jako například mise CALIPSO, jež využívá LiDAR na stejnojmenné družici ke oblaků a aerosolů v atmosféře (Winker et al. 2003). Dalšími vesmírnými systémy jsou družice ICESat a její současný nástupce ICESat-2. Laserový altimetr na družici ICESat-2 vysílá k povrchu pulzy a měřením doby jejich letu od vyslání po příjem zjišťuje vzdálenost

družice od povrchu a tím i jeho výšku (Abshire et al. 2005). Úkolem této mise je měřit změny pokrytí ledem a biomasou na Zemi (Abdalati et al. 2010).

2.1.2 Zpracování dat LiDAR

Data se po skenování dále zpracují, aby bylo možné získat požadované produkty a správně je interpretovat. To, co je cílovým produktem se odráží ve vybraných postupech a algoritmech, kterými chceme dosáhnout výsledku. Při tvorbě digitálních modelů terénu (DMT) se zpracování zpravidla dělí do dvou kroků: filtrace ground a non-ground bodů a generování DMT (Liu 2008).

Prvním krokem před samotnou tvorbou DMT by měla být příprava dat – rozdělení bodového mračka na tzv. dlaždice. To probíhá především kvůli velikosti souborů, které jsou obtížněji uložitelné v podobě jednoho velkého souboru než několika menších souborů. Dále také pro snazší zpracování algoritmy, které jsou často neefektivní kvůli struktuře bodového mračka (dlouhé pruhy bodů skenovaných podél letové linie) (Chen 2007).

Stěžejní částí postupu zpracování dat je filtrace bodů na ty, jejichž pulz se odrazil až od povrchu země a na ostatní body (ground filtering) (Liu 2008). Takto je možné vybrat pouze body zemského povrchu a z nich vytvořit model. Bylo vyvinuto několik algoritmů pro přesné filtrování bodů, přesto však musí být výsledky zpravidla manuálně upraveny (Lohani a Ghosh 2017). Výběr algoritmu také závisí na struktuře skenovaného povrchu. Například interpolation-based filtr je vhodný pro použití v lesních oblastech a městských zástavbách, ale horší výsledky přináší v terénu s prudkými svahy a velkou variabilitou (Liu 2008). K dalším algoritmům patří spline-based, active contouring nebo progressive densification (Lohani a Ghosh 2017). Obecně se algoritmy dělí na segmentační (shlukové), morfologické, interpolační, TIN, contour a directional scanning, přičemž každá z těchto tříd využívá pro filtraci bodů jinou metodu (Meng et al. 2010). Ground filtering a jeho výsledná kvalita jsou při tvorbě DMT nejdůležitějšími aspekty. V případě, že je požadovaným produktem digitální model povrchu, celý proces filtrování se může vynechat a do tvorby modelu vstupují většinou první odrazy (Ma 2005). Nicméně například při mapování lesů se častěji volí druhé nebo poslední odrazy. Pozdější odrazy mají větší šanci na průnik vegetačním pokryvem až na zemský povrch (Meng et al. 2010).

Existují typy objektů, u nichž pravidelně dochází k chybám ve filtraci bodů. Patří sem například nízké keře, mosty, krátké zdi, ploty, či budovy s různou velikostí. Body tvořící nízké keře jsou velice blízko bodům povrchu a výškový rozdíl mezi nimi je malý, algoritmus tak může chybně označit keř jako terén. Mosty se většinou hladce napojují na terén, což také může některým algoritmům způsobovat potíže. Pro moving window algoritmy je složité filtrovat budovy. Tyto algoritmy porovnávají hodnoty bodů s jejich okolím a pokud tato oblast pokryje celou budovu, bude mezi hodnotami bodů minimální rozdíl a ty tak nemusejí být označeny jako její součást. Tyto body pak mohou být chybně označeny jako země. Kromě objektů na povrchu někdy přináší obtíže i povrch sám, a to zejména prudké zlomy a hrany. Útesy, skály a břehy jsou tak dalším možným zdrojem chybné klasifikace (Meng et al. 2010).

Chyba může být dvojího typu a označuje se jako chyba I. nebo II. druhu. U chyby I. druhu dochází k označení bodu, jenž má být ve skutečnosti ground jako non-ground. Při chybě II. druhu je tomu naopak, body, které jsou ve skutečnosti non-ground jsou vybrány jako ground (Meng et al. 2010).

Při konečné tvorbě DMT se vybírá jeho typ a metoda určování hodnot, případně interpolace. Jako typ modelu se volí mezi rastrovým DMT, nepravidelnou trojúhelníkovou sítí (TIN) a vrstevnicemi, přičemž rastrový model je asi tím nejčastějším (Liu 2008). Pro určení hodnot buněk rastru se nejvíce používá metoda zvaná Binning. Ta určí hodnotu buňky z výšek bodů, které do ní náleží. Zvolit se může hodnota nejvyšší, nejnižší nebo jejich průměr. Pokud se v buňce nenachází žádné body, hodnota bude získána průměrem až 8 sousedních buněk, případně se přistupuje k interpolačním metodám, jako jsou lineární interpolace, Natural Neighbor, metoda inverzních vzdáleností (IDW), Spline nebo Kriging (ESRI 2021).

2.2 Charakteristiky vegetace a terénu

2.2.1 Vegetační metriky

Studia biodiverzity se při zkoumání struktury biotopů většinou spoléhají na jejich terénní hodnocení, které je nákladné a pro velké oblasti náročné. Mohla by přitom profitovat z čím dál populárnějšího leteckého laserového skenování a jejich trojrozměrných dat. Data LiDAR jsou v regionálním měřítku často poměrně dostupná, avšak pro některé ekology nepoužitelná. Je to zejména kvůli nedostatečným znalostem o zpracovávání takových dat. Poskytování vegetačních metrik společně s lidarovými daty zatím není běžnou praxí. Vegetační metriky lze z bodových mračen získat díky schopnosti rozlišovat ground body od vegetačních bodů. Dříve se bodová mračna využívala hlavně k tvorbě výškových modelů, ale později se přidaly komplexnější odvozené charakteristiky jak terénu, tak právě vegetace. Metrikami popisujícími strukturu vegetace jsou například hustota vegetace, drsnost nebo rozličnost výšek vegetačního pokryvu, otevřenost pokryvu a další (Assmann et al. 2021).

Přehled vegetačních metrik

Používané vegetační metriky podle Assmann et al. (2021), Bakx et al. (2019) a Moeslund et al. (2019).

Metrika	Význam, vlastnosti	Jednotka	Reference
number of echoes	komplexnost vegetace, počet vrstev pokryvu	počet	Assmann et al. (2021), Junttila et al. (2018), Zlinszky et al. (2014)
amplitude	klasifikace vegetace, biodiverzita	nedefinovaná	
normalized height (mean)	průměrná výška struktur (obsahuje vegetaci a budovy)	m	Assmann et al. (2021), Moeslund et al. (2019)
normalized height (standard deviation)	variabilita ve výškách struktur	m	

	(obsahuje vegetaci a budovy)		
canopy height	výška vegetace	m	Cao et al. (2016), Lindberg et al. (2015), Melin et al. (2016)
vegetation density	poměr bodů vegetace ke všem bodům	poměr	Assmann et al. (2021), Zellweger et al. (2014)
canopy openness	poměr bodů země a vody ke všem bodům, světelné podmínky	poměr	Bae et al. (2014), Doneus (2013)
relative biomass	koreluje s výškou, vrstvením a hustotou vegetace	m	Moeslund et al.(2019)
crown base height	výška základny koruny, určení stáří lesa	m	Mao et al. (2018)
crown span	vertikální rozpětí koruny, určení stáří lesa	m	Moeslund et al. (2019), Swatantran et al. (2012)
shrub layer height	výška keřového patra	m	Moeslund et al. (2019)

Tabulka 1: Přehled vegetačních metrik

Number of echoes

Tato metrika udává komplexnost vegetace a počet vrstev vegetačního pokryvu. Odpovídá počtu odrazů každého laserového pulzu. Vícenásobné odrazy jsou způsobeny objekty s různou vzdáleností od senzoru, tedy například stromy v mírně

hustém lese s keři. Jednotlivé odrazy naopak vznikají při kontaktu se spojitými, plochými povrchy.

Amplitude

Amplituda bodu v mračnu je atribut popisující amplitudu zpětného signálu, který udává jeho sílu, s níž byl detekován senzorem. Navzdory horší interpretaci jejího významu v ekologii se používá pro klasifikace vegetace nebo analýzy biodiverzity. Amplituda roste s plochostí a velkou odrazivostí povrchu. Pro složité a matné povrchy jako například listí je naopak nízká. Metriky odvoditelné z amplitudy signálu mohou popisovat obsah vody v listech nebo vlhkost půdy.

Canopy height

Dalším klíčovým parametrem ve zkoumání biomasy a fungování ekosystémů je výška vegetačního pokryvu. Ta se odvozuje jako 95. percentil všech vegetačních bodů s normalizovanými výškami nad povrchem.

Normalized height (mean, standard deviation)

Podobnou metrikou jako výška pokryvu je normalizovaná výška bodů. Ta ale na rozdíl od výšky pokryvu obsahuje i body klasifikované jinak než jako vegetace. Počítá se jak jejich průměr, tak směrodatná odchylka pro vyjádření variability ve výškách struktur.

Vegetation density

Hustota vegetace může být jednoduše udávána počtem bodů v mračnu. To se rozdělí do několika výškových úrovní a počítá se hustota pro každou z nich (Moeslund et al. 2019). Podle jiného přístupu je hustota vegetace definována jako poměr mezi počtem bodů klasifikovaných jako vegetace a počtem všech bodů celkově.

Canopy openness

Otevřenost pokryvu může popisovat propustnost světla vegetací. Zjednodušeně může být zobrazena podle hustoty vegetace s obrácenými hodnotami. Jinak se ale pro ni používá výpočet, kde figuruje poměr: počet bodů klasifikovaných jako země a voda ku počtu všech bodů celkově.

Relative biomass

Pro výpočet se používá vážený součet normalizovaných výšek, poměr odrazů a počet odrazů laserových pulzů. Oblast s hustější vegetací nebo více vrstvami bude tedy mít vyšší hodnoty relativní biomasy.

Crown base height

Výška základny koruny stromů odpovídá 5. percentilu výškového rozdělení všech bodů mezi 3 a 50 metry. Může sloužit při odhadu stáří vegetace.

Crown span

Metrika udávající výšky korun stromů je rozdílem mezi výškou vegetace a výškou základny koruny stromů. Stejně jako předchozí může sloužit pro odhad stáří vegetace.

Shrub layer height

Výška keřového patra je 90. percentilem rozložení normalizovaných výšek nad 0,3 m a pod 3 m.

2.2.2 Terénní metriky

Mimo vegetační metriky mají v ekologii význam i charakteristiky terénu. Ty se dají z lidarových dat získat díky správně klasifikovaným ground points, ze kterých se vytvářejí digitální modely terénu. DMT slouží jako základ pro výpočet základních terénních metrik, jako jsou výška, sklon a orientace. Z těchto metrik nebo přímo z bodového mračka je možné odvodit další charakteristiky, kam patří například heat load index, topographic wetness index (TWI), drsnost a otevřenost terénu (Moeslund et al. 2019).

Přehled terénních metrik

Terénní metriky popsané v pracích Assmann et al. (2021) a Moeslund et al. (2019).

Metrika	Význam, vlastnosti	Jednotka	Reference
slope	sklon terénu, odhad vlhkosti a eroze, určení expozice	stupně, radiány	(Assmann et al. 2021; Moeslund et al. 2013; 2019)
aspect	orientace ke světovým stranám, odhad vlhkosti, světelné podmínky	stupně	(Assmann et al. 2021; Moeslund et al. 2019)
DTM	výška terénu,	m	Assmann et al. (2021)
topographic wetness index	vlhkost a zamokření	nedefinovaná	(Assmann et al. 2021; Kopecký et al. 2021)
heat load index	tepelná rovnováha, odhad vlhkosti	nedefinovaná	(McCune a Keon 2002; Moeslund et al. 2019)
roughness	drsnost terénu	m	(Moeslund et al. 2019; Zlinszky et al. 2012)
openness	otevřenost krajiny, umístění v depresi nebo vyvýšenině	stupně, radiány	(Assmann et al. 2021; Doneus 2013; Moeslund et al. 2019)
linearity	linearita terénu, rozdíl mezi minimální a maximální otevřeností	radiány	(Moeslund et al. 2019; Zlinszky et al. 2015)
solar radiation	intenzita záření, udává podmínky mikroklimatu	ln(MJ · cm ² · rok)	(Assmann et al. 2021; McCune a Keon 2002)

Tabulka 2: Přehled terénních metrik

Slope

Sklon terénu popisuje příkrost svahů, podle kterého se dají popsat jiné vlastnosti s ekologickým významem, jako je pravděpodobná vlhkost půdy, expozice a stupeň eroze. Hodnota sklonu se vztahuje k výškovému rozdílu mezi body a vzdáleností mezi nimi.

Aspect

Orientace svahů ke světovým stranám může také sloužit k odhadu vlhkosti půdy a popisovat světelné podmínky v místě. Hodnoty jsou udávány ve stupních a pohybují se v rozpětí 0° - 360° ($0^{\circ} = 360^{\circ} =$ sever).

DTM

Podle hodnot nadmořské výšky terénu v DTM lze odhadnout biodiverzita ve studované oblasti. Vzniká metodou Binning, při které se hodnota výšky buňky rastru vypočítá jako průměr výšek bodů, které do buňky náleží.

Topographic wetness index

Metrika TWI určuje vlhkost nebo zamokření oblasti. Do výpočtu TWI vstupují rastry označující celkovou akumulaci vody v oblasti (total catchment area), šířku toku (flow width) a sklon terénu (slope).

Heat load index

Pomocí Heat load indexu se popisuje tepelná rovnováha místa. Díky korelaci s vlhkostí půdy je možné jej použít i pro odhad vlhkosti dostupné pro rostliny. Výpočet je založený na rastru orientace svahů.

Roughness

Drsnost povrchu je metrikou, která dokáže zobrazit heterogenitu povrchu v řádech centimetrů. Vypočítává se přímo z bodového mračna.

Openness

Otevřenost terénu popisuje, zda se dané místo nachází v depresi či na vyvýšeném povrchu. Je definována jako úhel převráceného kužele se špičkou „přípevněnou“ k zemi a dotýkající se bodů nejbližší normálovému vektoru povrchu. Je nejvyšší na plochem terénu a nejnižší v heterogenních oblastech.

Linearity

Linearita terénu je rozdílem mezi minimální a maximální otevřeností terénu. Minimální otevřenost je vysoká, když je terén otevřený ve všech směrech, ale u maximální otevřenosti jsou hodnoty vysoké i když je otevřená jen některá část terénu od bodu zájmu.

Solar radiation

Tato metrika udává intenzitu záření v oblasti. Pro výpočet se využívá zeměpisná šířka ve stupních a rastry sklonu a orientace svahů. Výsledná hodnota je v MJ na cm² za rok.

2.3 Výsypky

Při těžbě vzniká velké množství odpadního materiálu a jeho shromáždováním se zakládají tzv. výsypky. Ty mohou být podle způsobu nakládání s tímto materiálem rozlišovány na vnější a vnitřní. Vnější výsypka vzniká na jiném místě, než probíhá těžba dovážením vytěžené hmoty na nákladních automobilech nebo dopravníkových pásech. Pokud se materiál používá k zasypávání místa po těžbě, jedná se o výsypku vnitřní. Po ukončení těžby je zajištěna dlouhodobá stabilita odpadní hmoty tak, aby nedocházelo k potenciálně nebezpečným sesuvům svahů a výsypky mohly po obnově sloužit jinému účelu (Masoudian et al. 2019). Třemi používanými způsoby obnovy výsypek jsou rekultivace, spontánní sukcese a tzv. řízená sukcese, u které se přirozené procesy ovlivňují tak, aby nastal vývoj ekologicky cenné lokality. Při technické rekultivaci nejprve dochází k úpravě a formování nového terénu těžkou technikou, navezení organického materiálu (dřevěná štěpka, kůra) na povrch a následně se vysází různé druhy dřevin (Hodačová a Prach 2003). Kromě tohoto přístupu existuje ještě rekultivace zemědělská, kde se místo dřevin vysejí traviny s dobrou schopností fixovat vzdušný dusík a rekultivace hydriická. Zde dojde k zaplavení těžební jámy (Řehounek et al. 2010). Rekultivace ale všeobecně přispívá k menší biodiverzitě, než by se dosáhlo ponecháním stanoviště spontánní sukcesi. Přesto tento způsob obnovy stále převažuje (Doležalová et al. 2012).

U obnovy spontánní sukcesí nedochází ve výsypce k zásahům člověka, ale vývoji vegetace je ponechán volný průběh. Je tedy levnějším a méně náročným způsobem než rekultivace (Řehounek et al. 2010). Jak již bylo řečeno, diverzita rostlin a živočichů je zde vyšší, což potvrzuje několik studií. V práci Doležalové et al. (2012) porovnávali vlastnosti vodních habitatů na 14 rekultivovaných a 6 výsypkách ponechaných sukcesi v oblasti Severočeské hnědouhelné pánve se zaměřením na výskyt obojživelníků. Zjistili, že nejdůležitějšími vlastnostmi vodních ploch pro výskyt obojživelníků byla jejich variabilita a počet, což odpovídá těm vodním plochám, které se nachází na výsypkách obnovených spontánní sukcesí. V další studii od Hendrychové et al. (2008) zkoumali, jaké vlastnosti prostředí mají vliv na výskyt bezobratlých živočichů a provedli porovnání pro oba typy výsypek. V závěru uvedli, že vyšší druhová diverzita se vyskytuje na výsypkách se spontánní sukcesí a nejvíce ovlivňujícími charakteristikami prostředí byly orientace svahů, vlhkost, složení bylinného a stromového patra. Například bříza bělokora negativně ovlivňovala výskyt

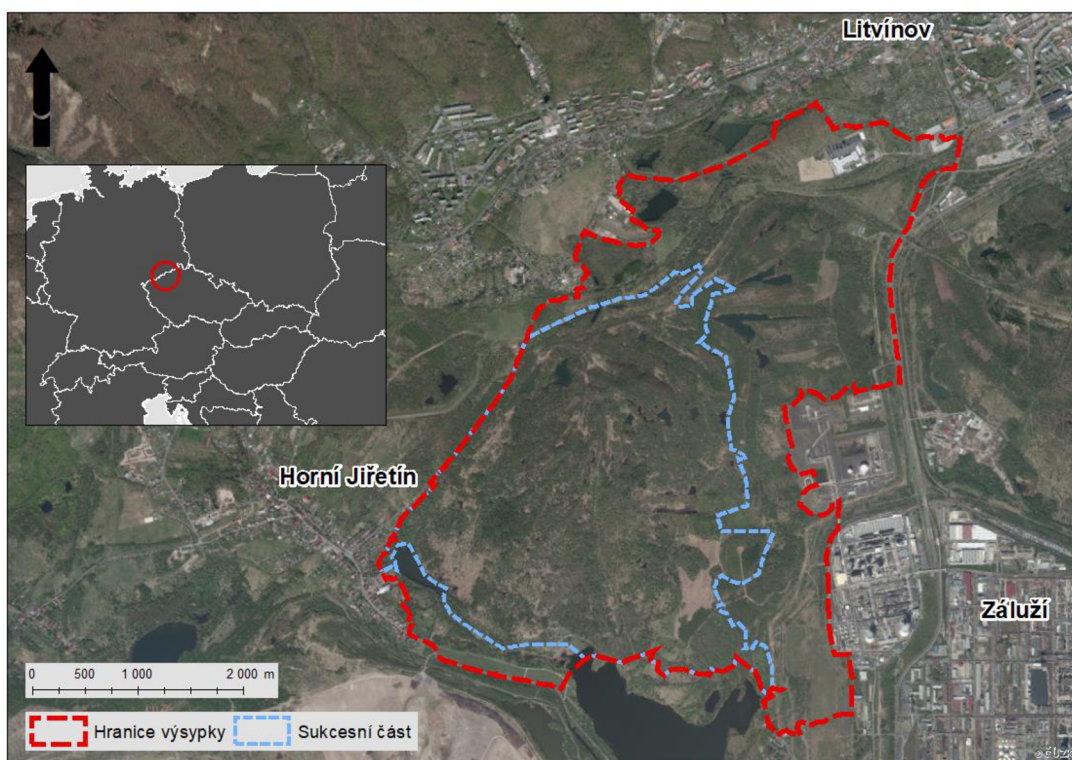
některých druhů plžů kvůli nevhodnému chemickému složení substrátu. Břízy však spolu s vrbami jívami a bezy černými rostou na výsypkách ponechaných sukcesí nejčastěji (Hodačová a Prach 2003).

Oblasti, kde těžba v minulosti probíhala nebo stále probíhá, se nachází hlavně na Mostecku, Sokolovsku, Kladensku, Ostravsku, Příbramsku a Jáchymovsku. Mostecko a Sokolovsko leží na Severočeské hnědouhelné pánvi a probíhá zde povrchová těžba, po které vznikají výsypky největší rozlohy. Menší výsypky vznikají po hlubinné těžbě černého uhlí (Kladensko, Ostravsko) nebo uranu (Příbramsko, Jáchymovsko). Výsypek pouze po těžbě uhlí bylo v Česku k roku 2010 asi 70 a jejich rozloha byla odhadována na 270 km² (Řehounek et al. 2010).

3 Metodika

3.1 Popis území

Zájmovým územím této práce byla Hornojiřetínská výsypka. Tato oblast o rozloze 704 ha se nachází mezi obcemi Litvínov, Horní Jiřetín a areálem chemického závodu Záluží na severozápadě České republiky (50°34'N, 13°34'E) (Obrázek 2). Nadmořská výška výsypky je v rozmezí 230 m až 305 m. Rekultivace výsypky začala v roce 1969, avšak pouze na její části, protože se pod výsypkou nacházelo ložisko hnědého uhlí, které mělo být vytěženo. Ale kvůli těžebním limitům se k tomuto kroku nikdy nepřistoupilo a na tomto místě je dodnes rozsáhlá (353 ha) sukcesní plocha (viz Obrázek 2). Struktura terénu je v důsledku formování výsypky velmi členitá, a to zejména na části ponechané sukcesi, kde nebyl terén upravován v rámci technické rekultivace. Díky tomu se na této části výsypky nachází velké množství malých vodních ploch a tůní, které vznikají zaplavením terénních depresí srážkovou vodou a stávají se tak stanovišti vhodnými pro výskyt obojživelníků (Doležalová et al. 2012).



Obrázek 2: Poloha a hranice Hornojiřetínské výsypky s vyznačením části výsypky ponechané sukcesi.

3.2 Použitá data

Letecká data LiDAR byla pořízena v květnu 2017 laserovým skenerem Riegl LMS Q-780, připevněným na letadle Cessna 208B Grand Caravan a společně s hyperspektrálním senzorem tyto 3 části tvoří systém FLIS (Flying Laboratory of Imaging System). Kromě těchto senzorů bylo letadlo vybaveno ještě jednotkou IMU a přijímačem GNSS (Hanuš et al. 2016). Skener vysílá laserové pulzy na vlnové délce 1064 nm s frekvencí až 400 kHz a zorným úhlem 60°. Prostorové rozlišení výsledného bodového mračka dosahuje hustoty 7-8 bodů/m². Jednotlivé letové linie jsou široké 1190 m a mají minimálně 100% překryv ze sousedních letových linií. Byly také rozděleny na 1km dlaždice s malým překryvem stran kvůli eliminaci tzv. „edge artifacts“ na jejich hranách, jako jsou například prázdné pixely při tvorbě rastru. Použitým souřadnicovým systémem je ETRS 1989. Aby bylo možné s bodovým mračnem pracovat v softwaru ArcGIS Desktop, data byla převedena z původního formátu LAZ, který nelze v jeho prostředí otevřít, do formátu LAS.

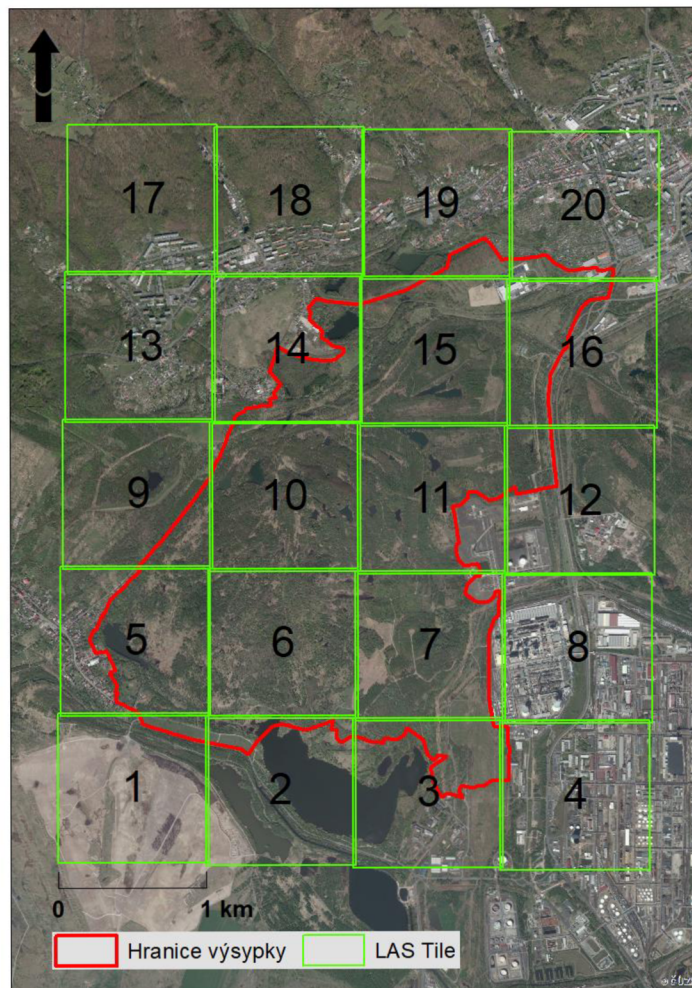
Dalšími poskytnutými daty byly polygony rekultivovaných a sukcesních výsypek na Mostecku a Bílinsku ve formátu ESRI Shapefile. Z těch byl vytvořen jeden polygon pro Hornojiřetínskou výsypku zahrnující rekultivaci i sukcesi, a tím byly ořezávány výsledné rastry vegetačních metrik.

3.3 Zpracování dat

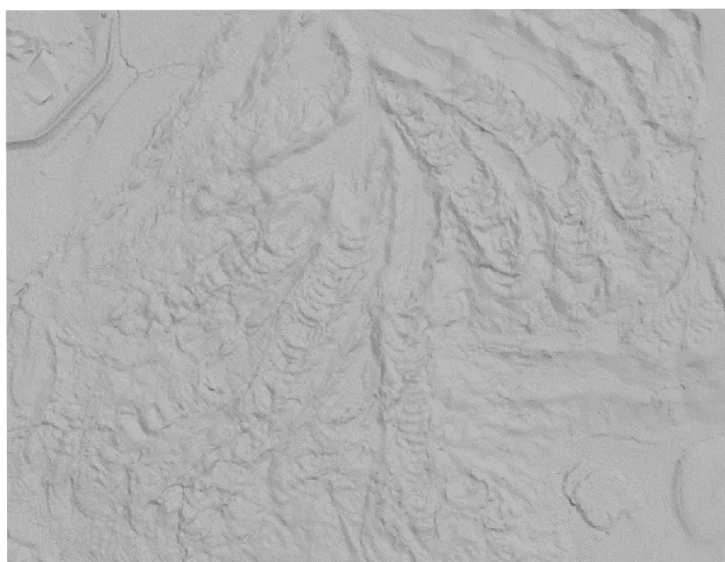
3.3.1 Ground filtering

Filtrace ground points v bodovém mračnu byla provedena v programu LAStools (rapidlasso 2022), konkrétně v nástroji lasground. Vstupními daty bylo 20 souborů LAS ve formě sousedících dlaždic o délce strany 1 km (*Obrázek 3*). Dlaždice nebyly zpracovávány najednou, ale každá zvlášť s různým nastavením parametrů pro dosažení nejlepšího výsledku filtrace (viz *Příloha 1*). Měněnými parametry byly *step*, *bulge*, *spike* a *down spike*. Hodnota *offset* (body do této hranice mohou být zem) byla pro všechny nastavena na 0,1. Parametr *step* udává rozlišení mřížky pro filtraci (nejvíce ovlivňující parametr), *bulge* omezuje výšku či hloubku trojúhelníků při triangulaci a *spike* odstraňuje ostré výstupy způsobené špatnou filtrací. Výsledná klasifikace ground points musela být ještě manuálně opravena kvůli bodům chybně označených jako ground (chyba II. druhu). Ty byly odhalovány vizuálně pomocí zobrazení výsledného DMT jako stínovaný reliéf (*Obrázek 4*). Chyby se vyskytovaly

zejména na hranách zlomů terénu a v místech, kde se nacházela velmi hustá vegetace. Těmto bodům byla změněna třída z ground na unclassified. Manuální úprava filtrace proběhla v programu ArcMap 10.8. produktu ArcGIS Desktop (ESRI 2020), konkrétně nástroji *LAS Dataset*.



Obrázek 3: Přehled dlaždic souborů LAS

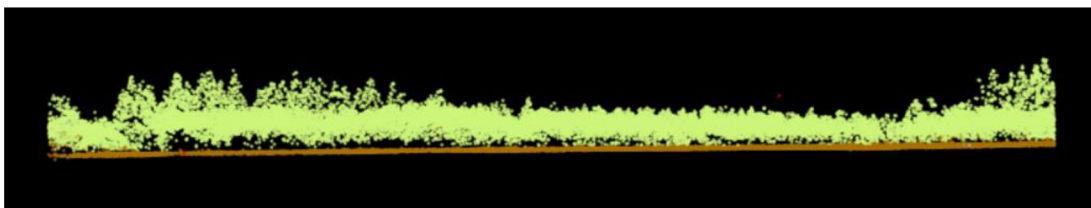


Obrázek 4: Stínovaný model terénu části Hornojiřetínské výsypky

3.3.2 Klasifikace

Účelem klasifikace bylo rozpoznat vegetaci a budovy v bodovém mračnu. K tomu byly opět využity nástroje LAStools, jmenovitě *lasnoise*, *lasheight* a *lasclassify*. Ty byly definovány ve vytvořeném dávkovém souboru, kde se v příkazovém řádku postupně spouští a jejich vstupními daty jsou výstupy z předchozího nástroje. *Lasnoise*, kam vstupuje mračno s filtrovanými ground points označí nebo odstraní body způsobené šumem, které by mohly do dalšího zpracování vnášet chyby. Jediným nastaveným parametrem byl *step* (udává velikost buňky pro hledání izolovaných bodů) s hodnotou 2. Parametr *isolated* definuje izolované body a byl ponechán s přednastavenou hodnotou 5 (izolovaný je bod, pokud se v okolních buňkách nachází méně než 5 bodů). Nástroj *lasheight* vypočítá výšku každého bodu nad terénem. Tento údaj může být uložený zvlášť, nebo může nahradit původní výšku v souřadnicovém systému (využití při tzv. normalizaci). Nebylo potřeba nastavovat žádné parametry.

Mračno s označenými rušivými body a vypočítanou výškou nad terénem bylo nakonec klasifikováno v nástroji *lasclassify*. Nejlepší výsledek poskytlo toto nastavení: *small_trees* (nevynechávat malé stromy), *wide_gutters* (dokončovat střechy podél hran), *step 1,5* (velikost buňky pro analýzy), *planar 0,09* (body do této hodnoty směrodatné odchylky jsou potenciální střechy), *rugged 0,4* (body nad tuto hodnotu směrodatné odchylky jsou potenciální vegetace), *ground_offset 0,5* (pouze body nad hranicí 0,5 m nad zemí). Z klasifikace byly také vynechány body označeny jako šum. Ve výsledném mračnu se vyskytovalo několik chybných klasifikací. Týkalo se to bodů, které měly být označeny jako vegetace, ale algoritmus jim přiřadil třídu budov. Tyto chyby byly opět ručně opraveny v programu ArcMap.



Obrázek 5: Průřez klasifikovaným bodovým mračnem

3.3.3 Normalizace výšek

Výpočtu vegetačních metrik předcházela normalizace výšek bodového mračna. Při tomto procesu se nahradí výšky v souřadnicovém systému výškami vůči zemskému povrchu. Všechny ground points budou tedy mít výšku 0 m a výška ostatních bodů se

bude rovnat jejich výšce nad povrchem. Opět byl použit nástroj *lasheight* s nastaveným parametrem *replace_z*, který nahradí staré výšky za nové. Tento krok se před tvorbou metrik provádí, aby bylo možné následně určit výšku každého objektu nezávisle na výšce terénu.

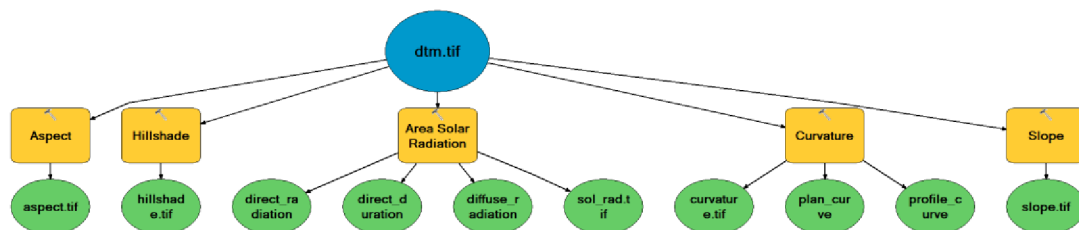
3.4 Výpočet metrik

Vegetační metriky byly získány pomocí balíčku *lidR* (Roussel et al. 2020) pro jazyk R (R Core Team 2021). Dlaždice bodového mračna s normalizovanými výškami byly seskupeny do datasetu *LAScatalog*, který umožňuje pracovat s více LAS soubory najednou. Jelikož se při základním nastavení výsledky nezapisují na disk, ale uchovávají se v operační paměti počítače, bylo toto nastavení změněno příkazem s definovaným místem ukládání a způsobem pojmenovávání souborů. Funkcí *grid_metrics* byly vypočítány metriky pro buňky v pravidelné mřížce. Argumenty funkce byla vstupní data ve formě *LAScatalogu*, požadované metriky a rozlišení výsledného rastru. Argumentem pro metriky byla funkce *stdmetrics* (standard metrics), která obsahuje 56 předdefinovaných, nejčastěji používaných metrik. Rozlišení rastru bylo nastaveno na 10 m. Výsledkem bylo 20 dílčích rastrů (1 pro každou dlaždici) ve formátu TIF a zjištěné metriky byly v rastrech uloženy jako jednotlivá barevná pásma (celkem 56 pásem). V prostředí ArcMap byly rastry následně spojeny do jednoho a ten byl ještě oříznut hranicí výsypky. Z výsledků byly vyřazeny metriky týkající se intenzity, rozlohy buněk a počtu bodů v buňkách, a to kvůli zanedbatelnému nebo žádnému významu v rámci charakteristik vegetace.

Mimo tyto základní metriky z *lidR* byly vypočítány také některé ostatní, které nejsou součástí funkce *stdmetrics*. Konkrétně jsou jimi *density* (hustota vegetace), *crown base height* (výška základny korun) a *shrub layer height* (výška keřového patra). Ty byly získány za použití nástroje *lascanopy*. Tento program umožňuje filtrovat body v mračnu podle jejich výšky nebo klasifikační třídy. Pro všechny z těchto jmenovaných metrik byly z výpočtu vynechány body klasifikovány jako budovy, aby výsledné hodnoty představovaly pouze vegetaci. Hustota vegetace byla vypočítána jako počet bodů nad nastavenou výškovou hranicí (*cover cutoff*) vydělený počtem všech bodů. Hodnota výškové hranice byla ponechána na přednastavených 1,37 m a s příkazem *-dns* byl vypočítán rastr hodnot. Výška základny korun byla definována jako 5. percentil rozdělení bodů mezi 3 a 50 m. Hranice *cover cutoff* byla tedy nastavena na 3 m, a protože se v mračnu nenacházely žádné body s výškou nad

50 m, nebylo nutné se horní hranicí zabývat. Obdobně byla získána metrika výšky keřového patra, která byla 90. percentilem rozložení výšek mezi 0,3 a 3 m. *Cover cutoff* byl nastaven na 0,3 a příkazem *drop_z_above 3* se z procesu vyřadily body s výškou větší, než 3 m. Obě metriky výšky základny korun a výšky keřového patra byly získány spuštěním nástroje s nastaveným parametrem *p 5*, respektive *p 90*. Z těchto získaných metrik byla ještě odvozena výška korun stromů (*crown span*). Ta byla rozdílem mezi výškou vegetace a výškou základny korun. Výška vegetace byla součástí metrik vypočítaných v lidR. Došlo k odečtení obou rastrů, a to v programu ArcMap nástrojem *Raster calculator*. Následně byly všechny výsledné rastry oříznuty hranicí výsypky. Metriky *crown base height*, *shrub layer height* a *crown span* byly vypočítány podle práce Moeslund et al. (2019).

Výpočtu terénních metrik předcházelo vytvoření DMT nástrojem *blast2dem* z balíčku *LAStools*. Filtrem byly vybrány pouze *ground points* a parametr *step* (rozlišení rastru) nastaven na 10 m. DMT následně sloužil jako vstupní data nástrojů z programu ArcMap, které vytvářely charakteristiky terénu. Pro tento účel byl v prostředí *Model builder* vytvořen model (Obrázek 6) z důvodu automatizace procesu. Po dokončení byly rastry metrik opět oříznuty na oblast výsypky.



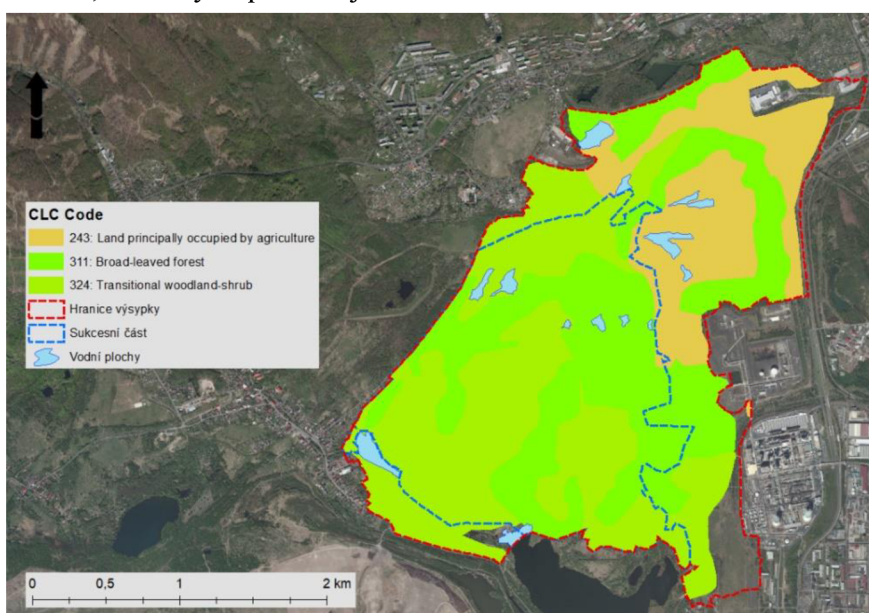
Obrázek 6: Model pro výpočet terénních metrik

Název	Popis	Jednotky
z_max	Maximální výška	m
z_mean	Průměrná výška	m
z_sd	Směrodatná odchylka výškového rozdělení	m
z_skew	Koeficient šikmosti výškového rozdělení	-
z_kurt	Koeficient špičatosti výškového rozdělení	-
z_entropy	Normalizovaný Shannon index vertikální komplexity	-
pz_above_z_mean	Procento odrazů nad průměrnou výškou	%
pz_above_2	Procento odrazů nad 2 m	%
zq_x	x-tý percentil výškového rozdělení	m
z_pcum_x	Kumulativní procento odrazů v x-té vrstvě	%
i_pground	Procento intenzity ground points	%
i_pcum_zq_x	Procento intenzity bodů pod x-tým percentilem výškového rozdělení	%
p_xth	Procento x-tých odrazů	%
p_ground	Procento ground points	%
crown_base_height	Výška základny korun stromů	m
crown_span	Výška korun stromů	m
shrub_layer_height	Výška keřového patra	m
density	Hustota vegetace	%
aspect	Orientace svahů	°
slope	Sklon svahů	°
DEM	Výška terénu	m
curvature	Zakřivení povrchu	cm
solar_radiation	Insolace na povrchu	Wh/m ²

Tabulka 3: Přehled vypočtených metrik

3.5 Porovnání metrik

Porovnávání jednotlivých vegetačních a terénních charakteristik probíhalo na 2 úrovních: pro část výsypky (rekultivovaná a sukcesní) a pro třídy krajinného pokryvu CORINE Land Cover (CLC) (Copernicus 2022). Data CLC byla stažena z portálu Copernicus Land Monitoring Service ve formě vektorové vrstvy pro rok 2018. Ta byla zmenšena na hranici Horňojiřetínské výsypky. Také byly z vrstvy odstraněny polygony nepřirodních tříd CLC, příliš malé oblasti a vodní plochy. Touto vrstvou (*Obrázek 7*) se následně ořízly všechny rastry metrik, aby se ve výsledcích neobjevovaly hodnoty z nežádoucích oblastí. Hodnoty metrik byly získány funkcí *Sample*, jejímž výstupem je tabulka s hodnotami buněk rastru a souřadnicemi jejich středu. Díky tomu bylo možné vytvořit bodovou vrstvu, která byla propojena funkcí *Intersect* s polygony tříd CLC a částí výsypky, čímž hodnoty získaly identifikátory oblastí, ze kterých pocházejí.



Obrázek 7: Vybrané třídy krajinného pokryvu CLC a hranice oblastí výsypky

Výsledné hodnoty metrik byly převedeny do tabulek ve formátu CSV a následovalo vyhodnocení získaných dat v programu RStudio. Předmětem vyhodnocení bylo, zda se metriky mezi sebou na částech výsypky a vybraných třídách krajinného pokryvu (*Obrázek 7*) liší a je-li tak možné je využít ke klasifikaci.

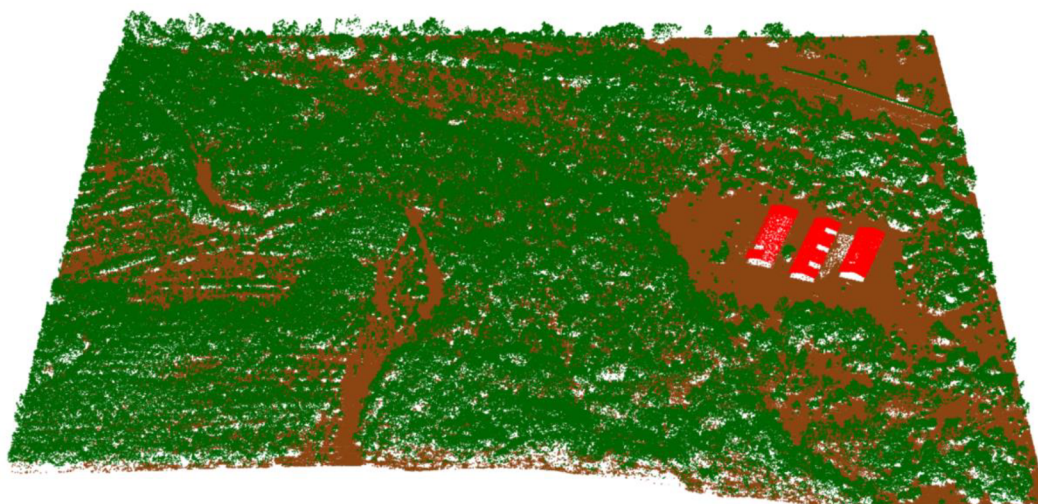
4 Výsledky

4.1 Klasifikace bodového mračna

Výsledkem klasifikace jsou body přiřazené do tříd *ground*, *vegetation*, *building* a *noise*. V mračnu se však nacházejí i body, které klasifikační algoritmy nepřiradily do žádné třídy a zůstal jim tak atribut *unclassified*. Počty bodů jednotlivých tříd jsou vyčísleny v tabulce 4.

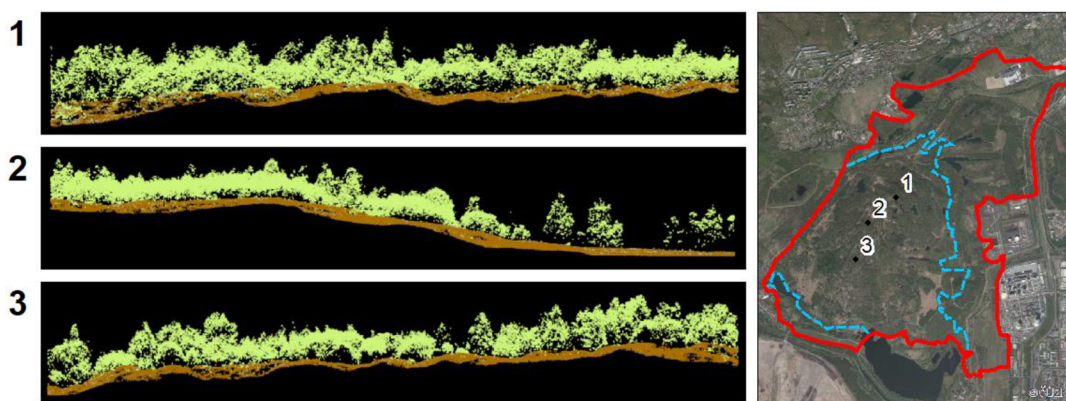
Třída	Ground	Vegetation	Building	Noise	Unclassified
Počet	24 278 544	29 091 906	135 601	33 082	2 633 429
Celkem	56 172 562				

Tabulka 4: Počty klasifikovaných bodů



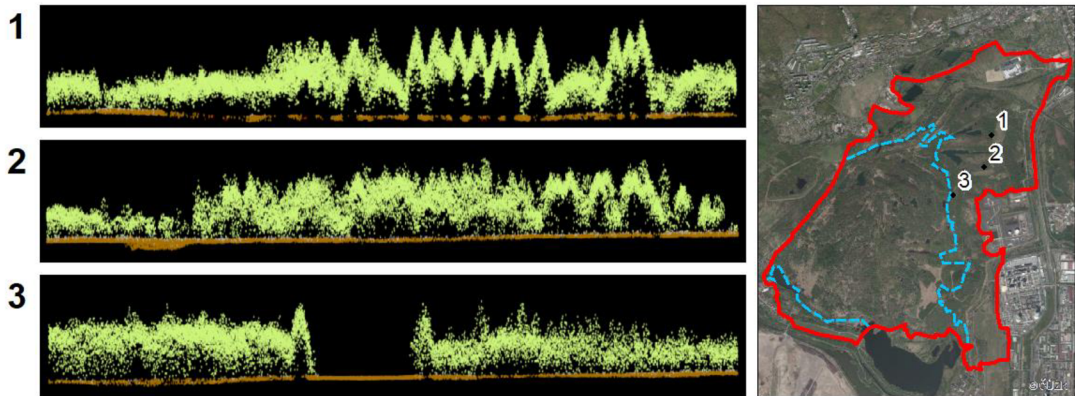
Obrázek 8: Vizualizace bodového mračna (hnědá – ground, zelená – vegetation, červená – building)

Klasifikace umožňuje pozorovat rozdíly mezi rekultivovanými plochami a místy ponechanými sukcesi. Na profilovém průřezu bodovým mračnem ze sukcesní části (Obrázek 9) je patrný zvlněný terén, který nebyl upraven v rámci rekultivačních prací. Také struktura vegetace je zde spíše nahodilá.



Obrázek 9: Průřezy sukcesní částí výsypky

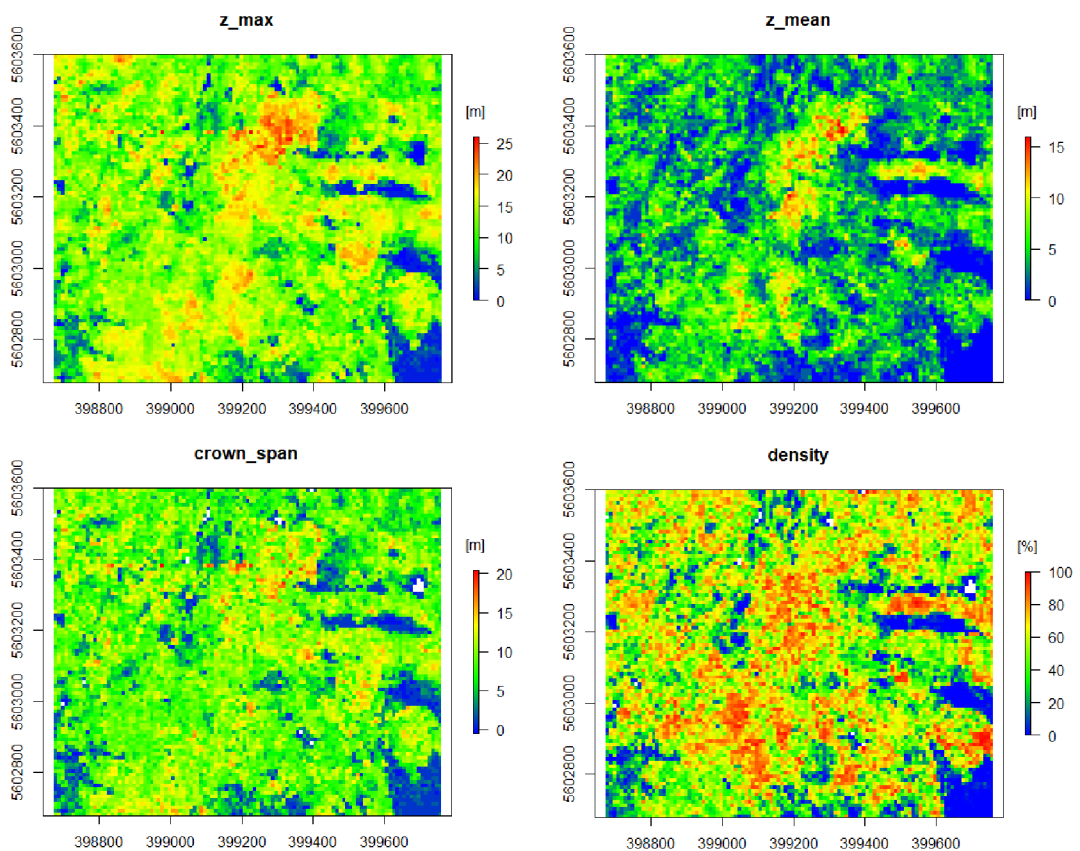
Naopak na rekultivované části (*Obrázek 10*) je povrch většinou rovný, což je následkem technických úprav terénu těžkou technikou. U vegetace jsou patrné určité pravidelné vzory v rozmístění jednotlivých stromů.

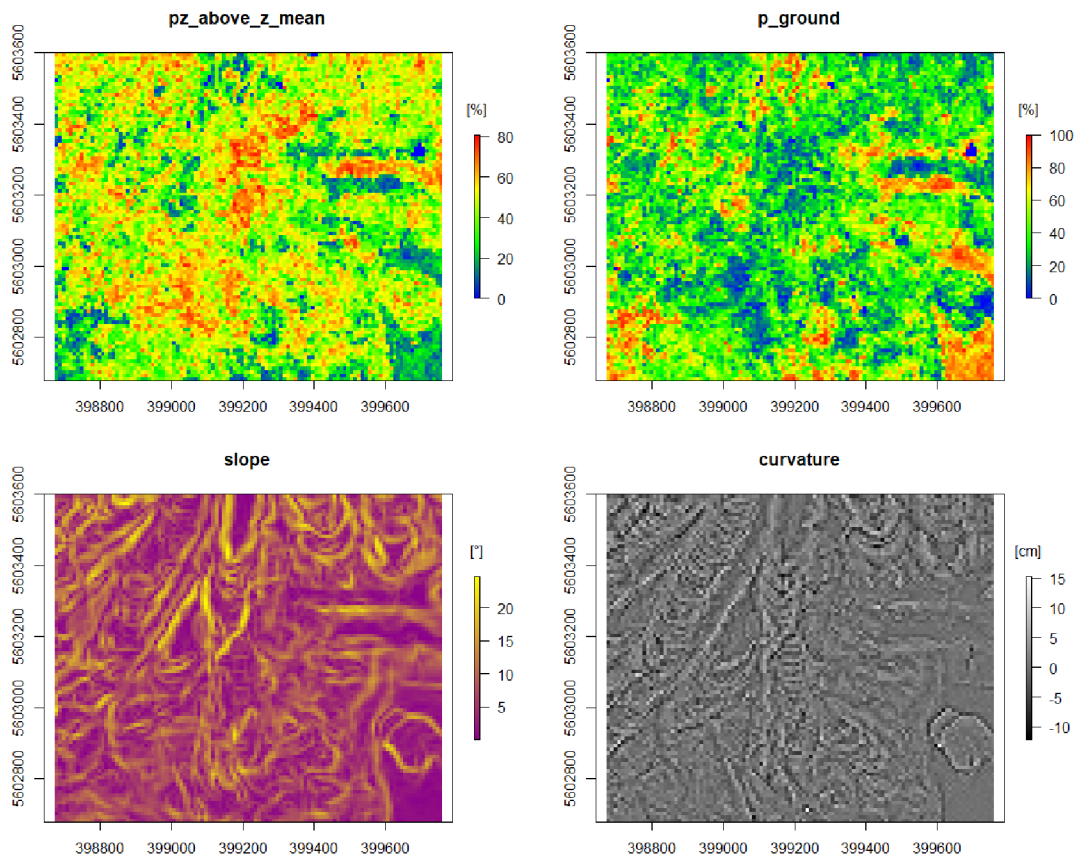


Obrázek 10: Průřezy rekultivovanou částí výsypky

4.2 Vypočítané metriky

Celkem bylo získáno 55 metrik za použití programů ArcMap, LAStools a lidR package. Vizualizace všech metrik se nachází v přílohách (*Příloha 2*).

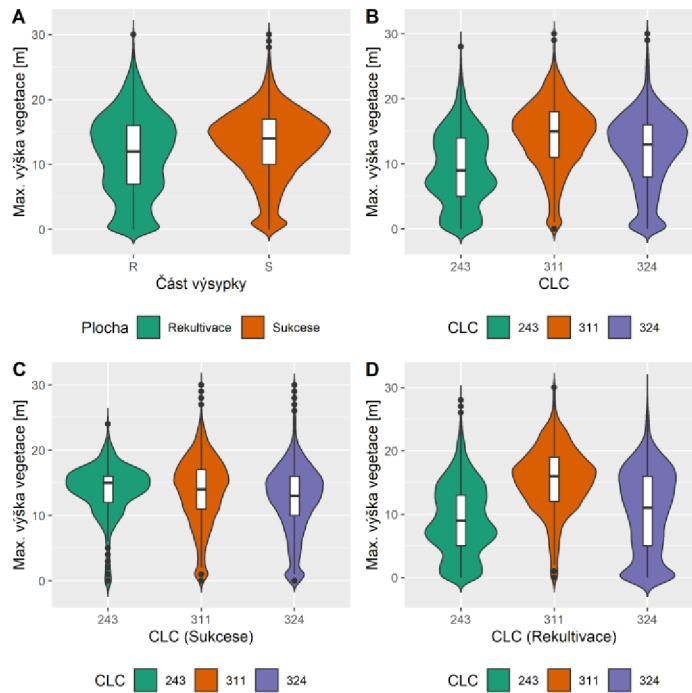




Obrázek 11: Vizualizace vybraných metrik (z_{max} – maximální výška vegetace, z_{mean} – průměrná výška vegetace, $crown_span$ – výška korun stromů, $density$ – hustota vegetace, $pz_above_z_mean$ – procento odrazů nad průměrnou výškou, p_ground – procento ground points, $slope$ – sklon svahů, $curvature$ – zakřivení povrchu)

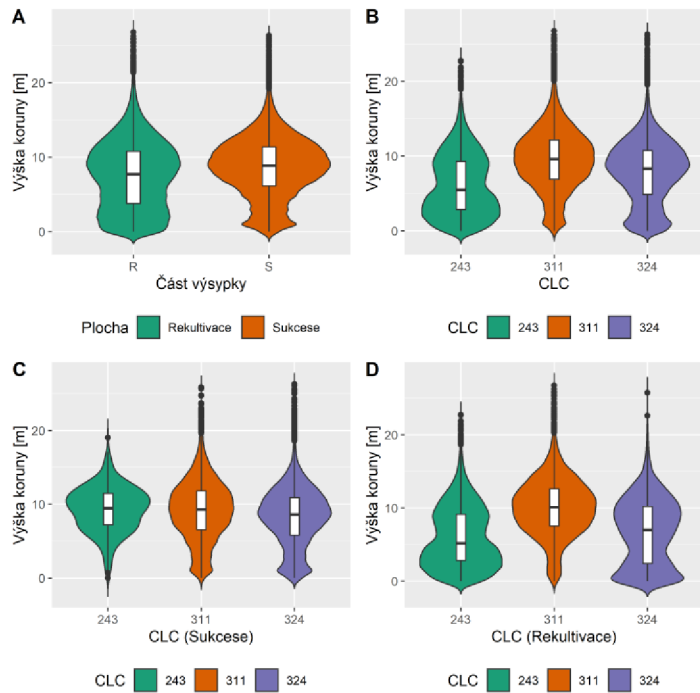
4.3 Porovnání metrik

Podle vytvořených grafů bylo odhaleno několik metrik, které se liší na sukcesních a rekultivovaných plochách a třídách krajinného pokryvu CLC. Rozdíly mezi těmito plochami lze dobře pozorovat na grafu maximální výšky vegetace (Obrázek 12). Zatímco distribuce výšek na rekultivované části je vesměs rovnoměrná, na sukcesní ploše se výšky vegetace pohybují hlavně v rozpětí 10–20 m (obr. 12A). Také jsou patrné rozdíly mezi přechody lesů a křovin na sukcesní (obr. 12C) a rekultivované (obr. 12D) části. Na sukcesní ploše je opět nejvíce hodnot mezi 10–20 m a oproti tomu na ploše rekultivované je větší podíl nižší vegetace nebo ploch zcela bez vegetace.



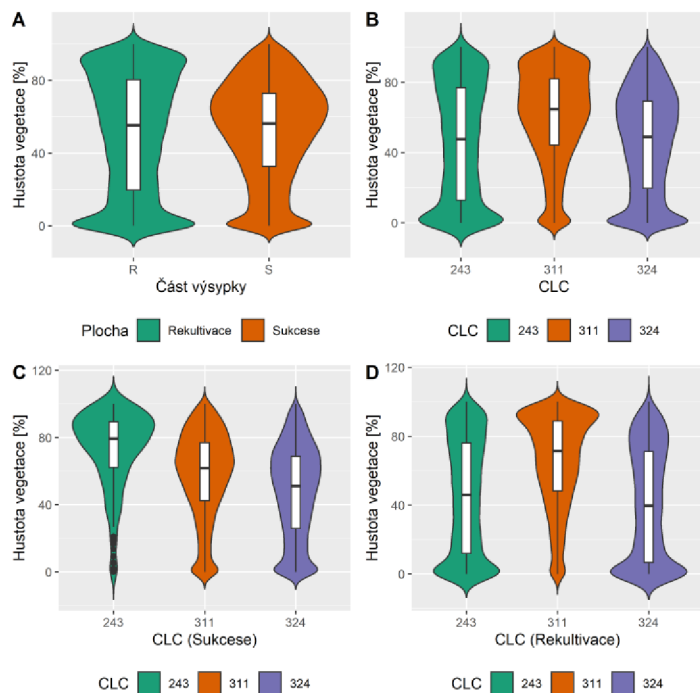
Obrázek 12: Maximální výška vegetace, číselný kód CLC: 243 – zemědělské plochy se značnou příměsí přírodní vegetace, 311 – listnaté lesy, 324 – přechody lesů a křovin

Další metrikou s pozorovatelnými rozdíly je výška korun stromů (*Obrázek 13*). Na plochách ponechaných sukcesi je méně nižších korun než na rekultivovaných (*obr. 13A*). Ale maximální hodnoty jsou na obou plochách víceméně stejné. Mezi kategoriemi CLC 311 a 324 (*obr. 13B*) je nepatrný rozdíl, nicméně obecně lze říci, že v kategorii 311 jsou koruny vyšší. Na stejném grafu lze také spatřit rozdíl třídy 243 od zbylých dvou tříd. Přechody lesů a křovin mají na rekultivované (*obr. 13D*) ploše větší zastoupení nižších korun než na ploše sukcesní (*obr. 13C*). Díky tomu se dá předpokládat, že na rekultivované části výsypky se nachází mladší vegetace. K potvrzení tohoto předpokladu by bylo nutné znát druhovou strukturu vegetace na výsypce. Značné odlišnosti mezi třídami 243 na rekultivaci a sukcesi jsou pravděpodobně způsobeny přesahem vegetace, která by měla spadat do jiné třídy CLC.



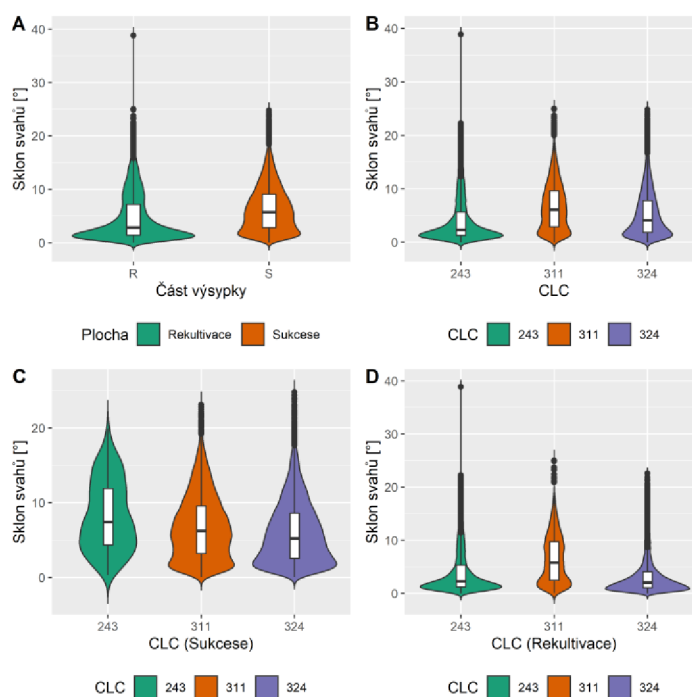
Obrázek 13: Výška korun stromů, číselný kód CLC: 243 – zemědělské plochy se značnou příměsí přírodní vegetace, 311 – listnaté lesy, 324 – přechody lesů a křovin

Graf hustoty vegetace (*Obrázek 14*) ukazuje, že na sukcesní ploše se většina jejích hodnot nachází v blízkosti mediánu a křivka má plynulejší průběh, kdežto na rekultivované části jsou vyšší hodnoty od mediánu odlehlé. Nachází se tam tak pravděpodobně malá oblast s velmi hustou vegetací. Toto lze pozorovat na grafu kategorie 311 na sukcesi (*obr. 14C*) a rekultivaci (*obr. 14D*).



Obrázek 14: Hustota vegetace, číselný kód CLC: 243 – zemědělské plochy se značnou příměsí přírodní vegetace, 311 – listnaté lesy, 324 – přechody lesů a křovin

Z terénních metrik nejlépe zobrazuje rozdíly mezi rekultivovanou a sukcesní částí sklon terénu (Obrázek 15). Sklon svahů je obecně vyšší na sukcesní ploše, což potvrzují profilové průřezy bodovým mračnem (Obrázek 9) v předchozí podkapitole, které ukazují značnou zvlněnost terénu. Ta je konstantní v podstatě na celém území této části výsypky, jak lze vidět na kategoriích CLC (obr. 15C). Na rekultivované ploše (obr. 15D) se od zbylých 2 tříd CLC odlišují listnaté lesy, kde graf vykazuje vyšší hodnoty sklonu.



Obrázek 15: Sklon svahů, číselný kód CLC: 243 – zemědělské plochy se značnou příměsí přírodní vegetace, 311 – listnaté lesy, 324 – přechody lesů a křovin

5 Diskuze

Z porovnání metrik napříč částmi výsypky a třídami krajinného pokryvu jich vyšlo několik, u kterých byly rozdíly nejvíce patrné. U maximální výšky vegetace byl zcela zásadní rozdíl mezi celkovými plochami rekultivace a sukcese, konkrétně pak u přechodů lesů a křovin. Výška korun stromů je považována za dobrý ukazatel stáří vegetace (Moeslund et al. 2019). Zatímco maximální hodnoty byly u obou ploch velmi podobné, přibližně 10 m, na rekultivované části se nacházelo více stromů s nižšími korunami, indikující mladší vegetaci. Tato charakteristika je však pravděpodobně velmi závislá na druhovém složení vegetace, jejíž výška korun se mezi druhy určitě liší. U hustoty vegetace byly nejvíce patrné rozdíly mezi listnatými lesy na rekultivovaných a sukcesních plochách. Sklon terénu byl vyšší na sukcesní ploše, což je důsledek toho, že terén nebyl na této části upravován, jako na ploše rekultivované.

Samostatné metriky by se ke klasifikaci biotopů využívaly velmi obtížně. Hodnoty metrik se i v rámci kategorií krajinného pokryvu značně rozcházejí a najít mezi nimi hranici, která by jednoznačně tyto kategorie oddělovala, je takřka nemožné. Tento problém by mohla vyřešit kombinace několika metrik, které dané biotopy charakterizují nejlépe. Toho využili Antonarakis et al. (2008) v jejich studii, kdy kombinací výškových metrik s daty o intenzitě odrazů klasifikovali krajinný pokryv okolí meandrů několika řek ve Francii. Třídy krajinného pokryvu určili terénním průzkumem, čímž mohli přesně definovat jejich charakteristiky. Podařilo se jim rozlišit vysazené topolové lesy od přirozených, přičemž zásadními metrikami k jejich odlišení byly metriky popisující vertikální distribuci bodů, a to skewness a kurtosis. Naproti tomu v této práci se tyto metriky mezi rekultivací a sukcesí příliš nelišily. Zejména na sukcesní části jsou tyto metriky problematické, protože lesy zde volně přecházejí v křoviny nebo s nimi tvoří směs. To je asi hlavní rozdíl mezi studovanou výsypkou v této práci a vegetací zkoumanou v práci Antonarakis et al. (2008), kde jsou jasněji patrné hranice mezi lesy a dalšími biotopy.

Úspěšnost klasifikace může být také závislá na úrovni generalizace. Paradoxně se zdá, že čím podrobnější kategorie biotopů, tím by mohla být klasifikace přesnější. Třídy definované podle druhu vegetace by měly jasně dané charakteristiky a hodnoty metrik by nebyly ovlivňovány vegetací s odlišnými strukturními vlastnostmi. K tomuto přístupu by ovšem bylo nutné přesné mapování druhů vegetace, které by sloužilo jako trénovací data pro jednotlivé metriky, podobně jako v práci Koma et al.

(2021). Ti klasifikovali krajinný pokryv mokřadů pomocí metrik získaných z dat LLS. Nejdůležitější metriky k odlišení vybraných habitatů vybrali pomocí algoritmu Recursive Feature Elimination. Jako zdroj informací o habitatech jim sloužila právě velmi podrobná vegetační mapa, na níž vytvořili stovky bodů pro každou třídu jako trénovací data. Klasifikaci poté provedli za využití algoritmu Random Forest a její přesnost závisela na typu habitatu, například u lesů neklesla uživatelská ani zpracovatelská přesnost pod 80 %. Opět je to potvrzení, že se pomocí vegetačních metrik dají klasifikovat některé biotopy s relativně vysokou přesností. Otázkou zůstává míra využitelnosti tohoto přístupu, a to hlavně kvůli absenci podrobných vegetačních map, což potvrzují i Koma et al. (2021). To omezuje i jeho aplikaci ke klasifikaci biotopů na výsypce studované v této práci. Zde proběhl pokus nahradit vegetační mapy vrstvou krajinného pokryvu CORINE Land Cover, což nepřineslo kýžený výsledek, neboť jeho třídy nebyly dostatečně podrobné. Vegetační mapy by mohl také nahradit terénní průzkum.

Tématu odvození vegetačních a terénních metrik z dat leteckého laserového skenování a jejich využití při odhadu diverzity se již věnovala řada studií. Většina jich také popisuje způsob výpočtu jednotlivých metrik, který se u některých z nich napříč pracemi lišil. Jako příklad uvedu hustotu vegetace. Podle Assmann et al. (2021) se vypočítá jako podíl bodů klasifikovaných jako vegetace a všech bodů celkově. Tento přístup byl aplikován i v mé práci. Ale podle Moeslund et al. (2019) je definována jako počet bodů v určených výškových intervalech. Zatímco první způsob se zdá být jednodušší pro interpretaci (poměr zastoupení vegetace vyjádřený v procentech), pomocí druhého získáme informaci o hustotě v různých vertikálních úrovních vegetace. Do budoucna by možná bylo dobré definice metrik sjednotit, aby u každé bylo zřejmé, jak vznikla, a to i bez čtení metodiky.

V práci Zlinszky et al. (2012) využili data LLS k mapování druhů a zdravotního stavu rákosů v mokřadech. Oba tyto údaje klasifikovali celkem do 9 tříd algoritmem založeným na rozhodovacích stromech, s celkovou přesností dosahující 82 %. Na tuto práci navázali další studií (Zlinszky et al. 2015), kde vyvinuli novou automatizovanou metodu pro mapování biotopů soustavy Natura 2000, a to konkrétně Panonských solných stepí a bažin. Z dat LLS odvodili 12 z 13 metrik potřebných pro kontrolování stavu životního prostředí, které byly definovány v dokumentu o stanovení lokálních soustav Natura 2000. Jako první provedli hodnocení stavu biotopů

s daty z jednoho senzoru a jejich výsledky ukázaly, že údaje z dat dálkového průzkumu Země mohou být srovnatelné s těmi, získanými terénním průzkumem.

Object-based klasifikaci ve svém výzkumu využili Prošek et al. (2020), a to k mapování malých vodních ploch na výsypkách v severozápadních Čechách. Jednou z nich byla i Hornojiřetínská výsypka, která je studijní oblastí této práce. U ní konkrétně uvedli, že je doslova poseta malými tůnkami, zejména na části ponechané spontánní sukcesí. Jejich postup spočíval ve spojení dat LiDAR a snímků pořízených hyperspektrálním senzorem, což poskytlo lepší výsledky, než klasifikace lidarových a hyperspektrálních dat odděleně. Díky použití dat LiDAR dokázali eliminovat problémy způsobené stíny, které byly zdrojem chyb v hyperspektrálních datech. Touto metodou je tedy možné daleko lépe mapovat malé vodní plochy a poskytovat tak údaje nezbytné k jejich udržování.

6 Závěr

Pro oblast Hornojřetínské výsypky bylo klasifikováno bodové mračno do tříd *ground*, *vegetation*, *building* a *noise*. Následně bylo z mračna odvozeno 55 vegetačních a terénních metrik, pomocí kterých lze zkoumat strukturu biotopů a jsou potenciálním ukazatelem druhové diverzity. Mezi těmito metrikami se hledaly ty, u kterých byly pozorovatelné rozdíly hodnot na rekultivované a sukcesní části výsypky a na plochách tříd krajinného pokryvu CORINE Land Cover. Metriky maximální výšky vegetace, výšky korun stromů, hustoty vegetace a sklonu svahů se na jednotlivých plochách lišily nejvíce. I přes zjištěné rozdíly by se vybrané metriky ke klasifikaci takto velkých oblastí využívaly velmi obtížně, protože se v nich nachází množství druhů vegetace s odlišnou strukturou. Mnohem přesnější výsledek by tedy přineslo využití těchto metrik ke klasifikaci konkrétních druhů vegetace nebo podrobných tříd krajinného pokryvu.

7 Přehled literatury a použitých zdrojů

ABDALATI, Waleed, H. Jay ZWALLY, Robert BINDSCHADLER, Bea CSATHO, Sinead Louise FARRELL, Helen Amanda FRICKER, David HARDING, Ronald KWOK, Michael LEFSKY, Thorsten MARKUS, Alexander MARSHAK, Thomas NEUMANN, Stephen PALM, Bob SCHUTZ, Ben SMITH, James SPINHIRNE a Charles WEBB, 2010. The ICESat-2 laser altimetry mission. *Proceedings of the IEEE* [online]. **98**(5), 735–751. ISSN 00189219. Dostupné z: doi:10.1109/JPROC.2009.2034765

ABSHIRE, James B., Xiaoli SUN, Haris RIRIS, J. Marcos SIROTA, Jan F. MCGARRY, Steve PALM, Donghui YI a Peter LIIVA, 2005. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat mission: On-orbit measurement performance. *Geophysical Research Letters* [online]. **32**(21), 1–4. ISSN 00948276. Dostupné z: doi:10.1029/2005GL024028

ANTONARAKIS, A. S., K. S. RICHARDS a J. BRASINGTON, 2008. Object-based land cover classification using airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* [online]. **112**(6), 2988–2998. ISSN 00344257. Dostupné z: doi:10.1016/j.rse.2008.02.004

ASSMANN, Jakob J., Jesper E. MOESLUND, Urs A. TREIER a Signe NORMAND, 2021. EcoDes-DK15: High-resolution ecological descriptors of vegetation and terrain derived from Denmark’s national airborne laser scanning data set. *Earth System Science Data* [online]. (July), 367–367. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-58292-0_40063

BAE, Soyeon, Bjoern REINEKING, Michael EWALD a Joerg MUELLER, 2014. Comparison of airborne lidar, aerial photography, and field surveys to model the habitat suitability of a cryptic forest species – the hazel grouse. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2014.955145> [online]. **35**(17), 6469–6489 [vid. 2022-01-21]. ISSN 13665901. Dostupné z: doi:10.1080/01431161.2014.955145

BAKX, Tristan R.M., Zsófia KOMA, Arie C. SEIJMONSBERGEN a W. Daniel KISSLING, 2019. Use and categorization of light detection and ranging vegetation metrics in avian diversity and species distribution research. *Diversity and Distributions* [online]. **25**(7), 1045–1059. ISSN 14724642. Dostupné

z: doi:10.1111/ddi.12915

CAO, Lin, Nicholas C. COOPS, John L. INNES, Stephen R.J. SHEPPARD, Liyong FU, Honghua RUAN a Guanghui SHE, 2016. Estimation of forest biomass dynamics in subtropical forests using multi-temporal airborne LiDAR data. *Remote Sensing of Environment* [online]. **178**, 158–171. ISSN 0034-4257. Dostupné z: doi:10.1016/J.RSE.2016.03.012

CHEN, Qi, 2007. Airborne LiDAR data processing and feature extraction. *Journal of Geomatics*. **36**(1), 109–112. ISSN 10073817.

COPERNICUS, 2022. *Copernicus Land Monitoring Service - CORINE Land Cover* [online] [vid. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>

DASSOT, Mathieu, Thiéry CONSTANT a Meriem FOURNIER, 2011. The use of terrestrial LiDAR technology in forest science: Application fields, benefits and challenges. *Annals of Forest Science* [online]. **68**(5), 959–974. ISSN 12864560. Dostupné z: doi:10.1007/s13595-011-0102-2

DATTA, Anusuya, 2019. *Did you know which are the sources for free LiDAR data?* – *Geospatial World* [online] [vid. 2021-10-29]. Dostupné z: <https://www.geospatialworld.net/blogs/did-you-know-the-sources-for-free-lidar-data/>

DAVIES, Andrew B. a Gregory P. ASNER, 2014. Advances in animal ecology from 3D-LiDAR ecosystem mapping. *Trends in Ecology and Evolution* [online]. **29**(12), 681–691. ISSN 01695347. Dostupné z: doi:10.1016/j.tree.2014.10.005

DOLEŽALOVÁ, Jana, Jiří VOJAR, Daniela SMOLOVÁ, Milič SOLSKÝ a Oldřich KOPECKÝ, 2012. Technical reclamation and spontaneous succession produce different water habitats: A case study from Czech post-mining sites. *Ecological Engineering* [online]. **43**, 5–12. ISSN 09258574. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoleng.2011.11.017

DONEUS, Michael, 2013. Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models. *Remote Sensing 2013, Vol. 5, Pages 6427-6442* [online]. **5**(12), 6427–6442 [vid. 2022-01-21]. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/RS5126427

ESRI, 2020. *ArcGIS Desktop*. 2020. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

ESRI, 2021. *LAS Dataset To Raster—Help | ArcGIS for Desktop* [online] [vid. 2022-01-21]. Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/las-dataset-to-raster-function.htm>

GATZIOLIS, Demetrios a Hans Erik ANDERSEN, 2008. A guide to LIDAR data acquisition and processing for the forests of the pacific northwest. *USDA Forest Service - General Technical Report PNW-GTR* [online]. (768), 1–32. ISSN 08874840. Dostupné z: doi:10.2737/PNW-GTR-768

HADDAD, David E., Sinan O. AKÇIZ, J. Ramón ARROWSMITH, Dallas D. RHODES, John S. OLDOW, Olaf ZIELKE, Nathan A. TOKÉ, Amanda G. HADDAD, Juergen MAUER a Prabin SHILPAKAR, 2012. Applications of airborne and terrestrial laser scanning to paleoseismology. *Geosphere* [online]. **8**(4), 771–786. ISSN 1553040X. Dostupné z: doi:10.1130/GES00701.1

HANUŠ, J., T. FABIÁNEK a L. FAJMON, 2016. Potential of airborne imaging spectroscopy at CzechGlobe. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives* [online]. **2016-Janua**(July), 15–17. ISSN 16821750. Dostupné z: doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B1-15-2016

HENDRYCHOVÁ, Markéta, Miroslav ŠÁLEK a Andrea ČERVENKOVÁ, 2008. Invertebrate communities in man-made and spontaneously developed forests on spoil heaps after coal mining. *Journal of Landscape Studies*. **1**(November), 169–187.

HODAČOVÁ, Darina a Karel PRACH, 2003. Spoil heaps from brown coal mining: Technical reclamation versus spontaneous revegetation. *Restoration Ecology* [online]. **11**(3), 385–391. ISSN 10612971. Dostupné z: doi:10.1046/j.1526-100X.2003.00202.x

ISENBURG, Martin, 2013. LASzip: Lossless compression of lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* [online]. **79**(2), 209–217. ISSN 00991112. Dostupné z: doi:10.14358/PERS.79.2.209

JUNTILA, Samuli, Junko SUGANO, Mikko VASTARANTA, Riikka LINNAKOSKI, Harri KAARTINEN, Antero KUKKO, Markus HOLOPAINEN,

Hannu HYYPPÄ a Juha HYYPPÄ, 2018. Can leaf water content be estimated using multispectral terrestrial laser scanning? A case study with Norway spruce seedlings. *Frontiers in Plant Science* [online]. **9**, 299. ISSN 1664462X. Dostupné z: doi:10.3389/FPLS.2018.00299/BIBTEX

KOMA, Zsófia, Arie C. SEIJMONSBERGEN a W. Daniel KISSLING, 2021. Classifying wetland-related land cover types and habitats using fine-scale lidar metrics derived from country-wide Airborne Laser Scanning. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* [online]. **7**(1), 80–96. ISSN 20563485. Dostupné z: doi:10.1002/rse2.170

KOPECKÝ, Martin, Martin MACEK a Jan WILD, 2021. Topographic Wetness Index calculation guidelines based on measured soil moisture and plant species composition. *Science of the Total Environment* [online]. **757**, 143785. ISSN 18791026. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143785

LATO, Matthew J., Mark S. DIEDERICHS, D. Jean HUTCHINSON a Rob HARRAP, 2012. Evaluating roadside rockmasses for rockfall hazards using LiDAR data: Optimizing data collection and processing protocols. *Natural Hazards* [online]. **60**(3), 831–864. ISSN 0921030X. Dostupné z: doi:10.1007/s11069-011-9872-y

LINDBERG, Eva, Jean-Michel ROBERGE, Therese JOHANSSON, Joakim HJÄLTÉN, Heiko BALZTER, Norbert PFEIFER, András ZLINSZKY, Hermann HEILMEIER, Bernhard HÖFLE, Bálint CZÚCZ a Prasad S THENKABAIL, 2015. Can Airborne Laser Scanning (ALS) and Forest Estimates Derived from Satellite Images Be Used to Predict Abundance and Species Richness of Birds and Beetles in Boreal Forest? *Remote Sensing 2015, Vol. 7, Pages 4233-4252* [online]. **7**(4), 4233–4252 [vid. 2022-01-21]. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/RS70404233

LIU, Xiaoye, 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues. *Progress in Physical Geography* [online]. **32**(1), 31–49. ISSN 03091333. Dostupné z: doi:10.1177/0309133308089496

LOHANI, Bharat a Suddhasheel GHOSH, 2017. Airborne LiDAR Technology: A Review of Data Collection and Processing Systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section A - Physical Sciences* [online]. **87**(4), 567–579. ISSN 22501762. Dostupné z: doi:10.1007/s40010-017-0435-9

MA, Ruijin, 2005. DEM generation and building detection from lidar data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* [online]. **71**(7), 847–854. ISSN 00991112. Dostupné z: doi:10.14358/PERS.71.7.847

MAO, Lingfeng, Jacqueline DENNETT, Christopher W. BATER, Piotr TOMPALSKI, Nicholas C. COOPS, Dan FARR, Monica KOHLER, Barry WHITE, John J. STADT a Scott E. NIELSEN, 2018. Using airborne laser scanning to predict plant species richness and assess conservation threats in the oil sands region of Alberta's boreal forest. *Forest Ecology and Management* [online]. **409**, 29–37. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/J.FORECO.2017.11.017

MASOUDIAN, Mohsen S, Ioannis E ZEYGOLIS, · ALEXANDROS, V DELIVERIS, Alec M MARSHALL, · CHARLES, M HERON, · NIKOLAOS a C KOUKOUZAS, 2019. Stability and characterisation of spoil heaps in European surface lignite mines: a state-of-the-art review in light of new data. *Environmental Earth Sciences* [online]. **78**, 505. Dostupné z: doi:10.1007/s12665-019-8506-7

MCCUNE, Bruce a Dylan KEON, 2002. Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. *Journal of Vegetation Science* [online]. **13**(4), 603–606. ISSN 11009233. Dostupné z: doi:10.1111/j.1654-1103.2002.tb02087.x

MELIN, M., L. MEHTÄTALO, J. MIETTINEN, S. TOSSAVAINEN a P. PACKALEN, 2016. Forest structure as a determinant of grouse brood occurrence – An analysis linking LiDAR data with presence/absence field data. *Forest Ecology and Management* [online]. **380**, 202–211. ISSN 0378-1127. Dostupné z: doi:10.1016/J.FORECO.2016.09.007

MENG, Xuelian, Nate CURRIT a Kaiguang ZHAO, 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing* [online]. **2**(3), 833–860. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/rs2030833

MOESLUND, Jesper E., Lars ARGE, Peder K. BØCHER, Tommy DALGAARD, Mette V. ODGAARD, Bettina NYGAARD a Jens Christian SVENNING, 2013. Topographically controlled soil moisture is the primary driver of local vegetation patterns across a lowland region. *Ecosphere* [online]. **4**(7), 1–26. ISSN 21508925. Dostupné z: doi:10.1890/ES13-00134.1

MOESLUND, Jesper Erenskjold, András ZLINSZKY, Rasmus EJRNÆS, Ane

Kirstine BRUNBJERG, Peder Klith BØCHER, Jens Christian SVENNING a Signe NORMAND, 2019. Light detection and ranging explains diversity of plants, fungi, lichens, and bryophytes across multiple habitats and large geographic extent. *Ecological Applications* [online]. **29**(5), 1–17. ISSN 19395582. Dostupné z: doi:10.1002/eap.1907

MOUDRÝ, Vítězslav, Kateřina GDULOVÁ, Michal FOGL, Petr KLÁPŠTĚ, Rudolf URBAN, Jan KOMÁREK, Lucie MOUDRÁ, Martin ŠTRONER, Vojtěch BARTÁK a Milič SOLSKÝ, 2019. Comparison of leaf-off and leaf-on combined UAV imagery and airborne LiDAR for assessment of a post-mining site terrain and vegetation structure: Prospects for monitoring hazards and restoration success. *Applied Geography* [online]. **104**(December 2018), 32–41. ISSN 01436228. Dostupné z: doi:10.1016/j.apgeog.2019.02.002

MOUDRÝ, Vítězslav, Lucie MOUDRÁ, Vojtěch BARTÁK, Vladimír BEJČEK, Kateřina GDULOVÁ, Markéta HENDRYCHOVÁ, David MORAVEC, Petr MUSIL, Duccio ROCCHINI, Karel ŠŤASTNÝ, Ondřej VOLF a Miroslav ŠÁLEK, 2021. The role of the vegetation structure, primary productivity and senescence derived from airborne LiDAR and hyperspectral data for birds diversity and rarity on a restored site. *Landscape and Urban Planning* [online]. **210**(January). ISSN 01692046. Dostupné z: doi:10.1016/j.landurbplan.2021.104064

OPITZ, Rachel a David COWLEY, 2014. *Interpreting archaeological topography: 3D data, visualization and observation* [online]. ISBN 9781842175163. Dostupné z: doi:10.1080/15230406.2014.951525

PROŠEK, Jiří, Kateřina GDULOVÁ, Vojtěch BARTÁK, Jiří VOJAR, Milič SOLSKÝ, Duccio ROCCHINI a Vítězslav MOUDRÝ, 2020. Integration of hyperspectral and LiDAR data for mapping small water bodies. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online]. **92**(June). ISSN 1872826X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jag.2020.102181

R CORE TEAM, 2021. *R: A language and environment for statistical computing*. [online]. 2021. B.m.: R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Dostupné z: <https://www.r-project.org/>.

RAPIDLASSO, 2022. *LAStools - efficient LiDAR processing software*

[online]. 2022. Dostupné z: <http://rapidlasso.com/LAStools>

ŘEHOUNEK, Jiří, Klára ŘEHOUNKOVÁ a Karel PRACH, 2010. *Ekologická obnova území narušených těžbou nerostných surovin a průmyslovými deponiemi* [online]. České Budějovice: Calla. ISBN 6007665801. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/47138725_Ekologicka_obnova_uzemi_narusenych_tezbou_nerostnych_surovin_a_prumyslovymi_deponiemi

ROUSSEL, Jean Romain, David AUTY, Nicholas C. COOPS, Piotr TOMPALSKI, Tristan R.H. GOODBODY, Andrew Sánchez MEADOR, Jean François BOURDON, Florian DE BOISSIEU a Alexis ACHIM, 2020. lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. *Remote Sensing of Environment* [online]. **251**, 112061. ISSN 0034-4257. Dostupné z: [doi:10.1016/J.RSE.2020.112061](https://doi.org/10.1016/J.RSE.2020.112061)

SHIH, K., A. BALACHANDRAN, K. NAGARAJAN, B. HOLLAND, C. SLATTON a A. GEORGE, 2008. Fast real-time LIDAR processing on FPGAs. *Proceedings of the 2008 International Conference on Engineering of Reconfigurable Systems and Algorithms, ERSA 2008*. (January 2008), 231–237.

SWATANTRAN, Anu, Ralph DUBAYAH, Scott GOETZ, Michelle HOFTON, Matthew G. BETTS, Mindy SUN, Marc SIMARD a Richard HOLMES, 2012. Mapping Migratory Bird Prevalence Using Remote Sensing Data Fusion. *PLOS ONE* [online]. **7**(1), e28922 [vid. 2022-01-21]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: [doi:10.1371/JOURNAL.PONE.0028922](https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0028922)

WALLACE, Luke, Arko LUCIEER, Christopher WATSON a Darren TURNER, 2012. Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing* [online]. **4**(6), 1519–1543. ISSN 20724292. Dostupné z: [doi:10.3390/rs4061519](https://doi.org/10.3390/rs4061519)

WINKER, David M., Jacques R. PELON a M. Patrick MCCORMICK, 2003. The CALIPSO mission: spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds. *Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring III* [online]. **4893**, 1. ISSN 0277786X. Dostupné z: [doi:10.1117/12.466539](https://doi.org/10.1117/12.466539)

ZELLWEGER, Florian, Felix MORSDORF, Ross S. PURVES, Veronika BRAUNISCH a Kurt BOLLMANN, 2014. Improved methods for measuring forest

landscape structure: LiDAR complements field-based habitat assessment. *Biodiversity and Conservation* [online]. **23**(2), 289–307 [vid. 2022-01-21]. ISSN 15729710. Dostupné z: doi:10.1007/S10531-013-0600-7/FIGURES/5

ZLINSZKY, András, Balázs DEÁK, Adam KANIA, Anke SCHROIFF a Norbert PFEIFER, 2015. Mapping natura 2000 habitat conservation status in a pannonic salt steppe with airborne laser scanning. *Remote Sensing* [online]. **7**(3), 2991–3019. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/rs70302991

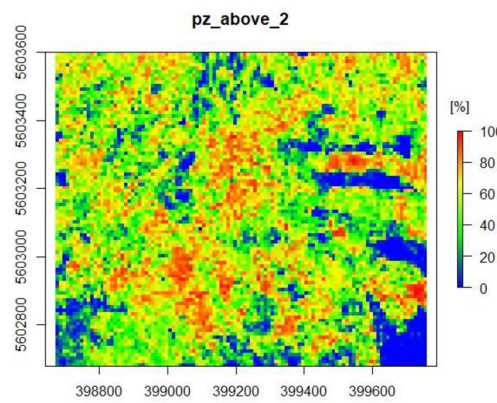
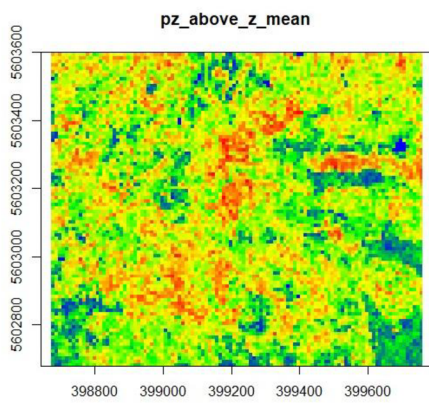
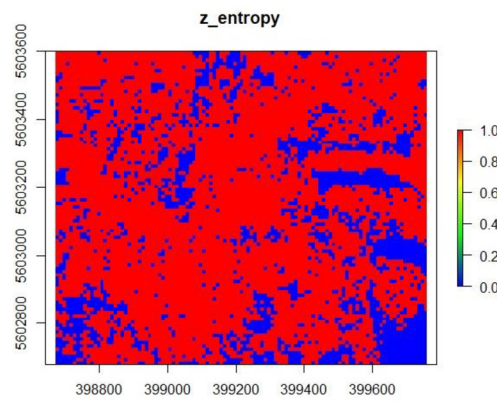
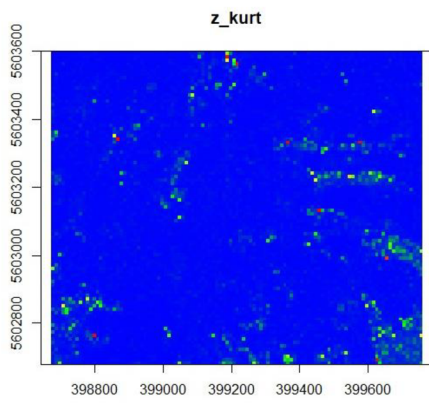
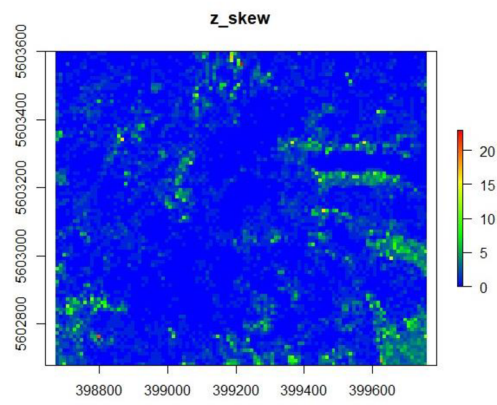
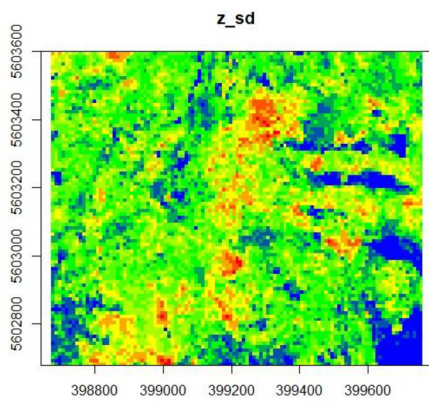
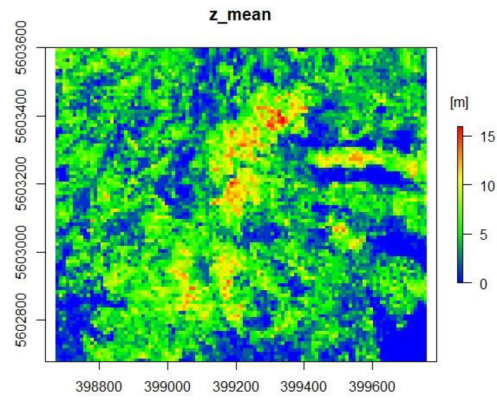
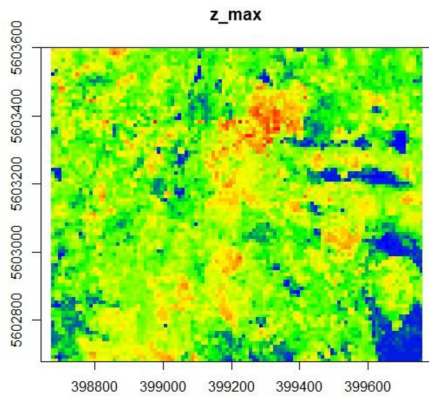
ZLINSZKY, András, Werner MÜCKE, Hubert LEHNER, Christian BRIESE a Norbert PFEIFER, 2012. Categorizing wetland vegetation by airborne laser scanning on Lake Balaton and Kis-Balaton, Hungary. *Remote Sensing* [online]. **4**(6), 1617–1650. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/rs4061617

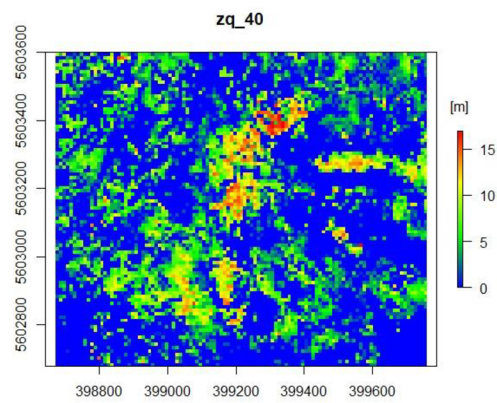
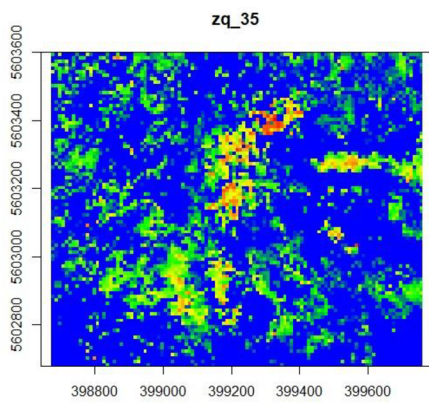
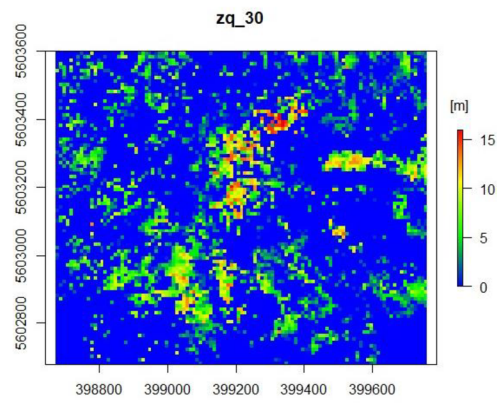
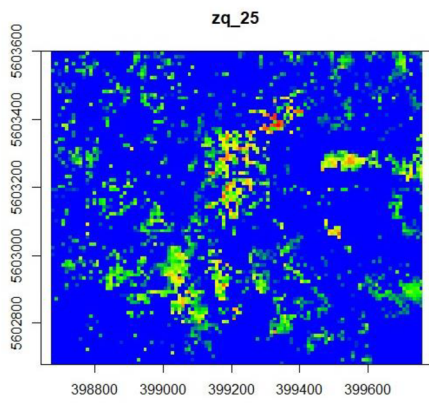
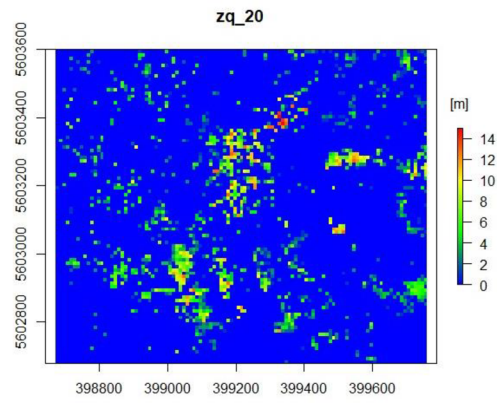
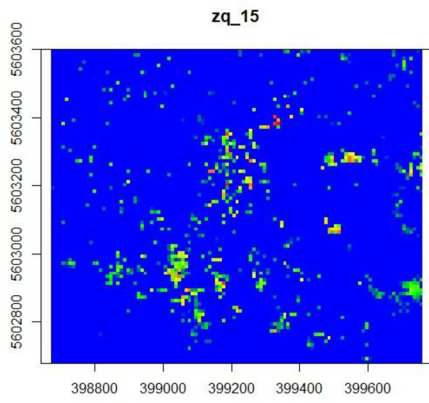
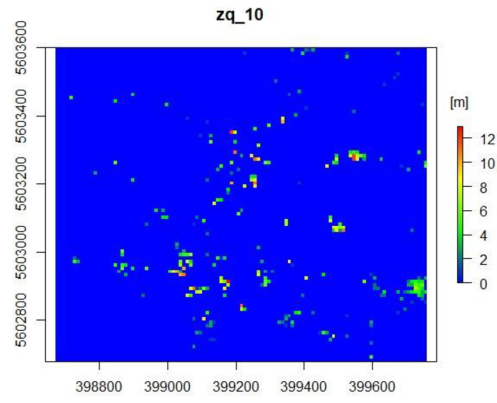
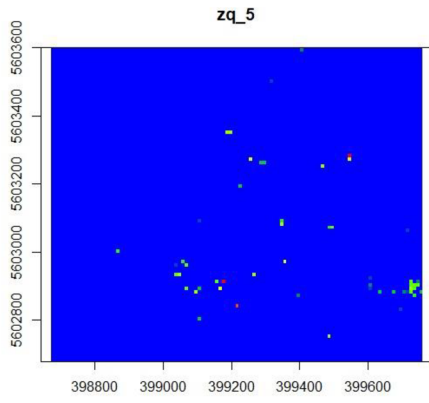
ZLINSZKY, András, Anke SCHROIFF, Adam KANIA, Balázs DEÁK, Werner MÜCKE, Ágnes VÁRI, Balázs SZÉKELY a Norbert PFEIFER, 2014. Categorizing Grassland Vegetation with Full-Waveform Airborne Laser Scanning: A Feasibility Study for Detecting Natura 2000 Habitat Types. *Remote Sensing 2014, Vol. 6, Pages 8056-8087* [online]. **6**(9), 8056–8087 [vid. 2022-01-21]. ISSN 20724292. Dostupné z: doi:10.3390/RS6098056

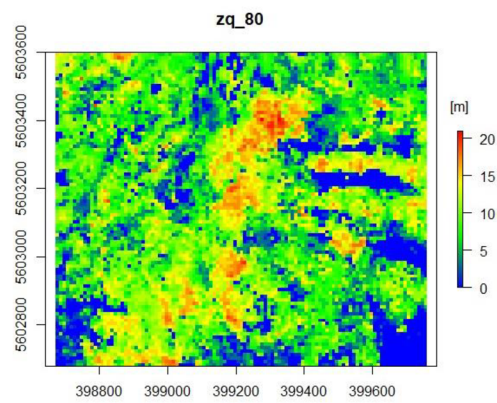
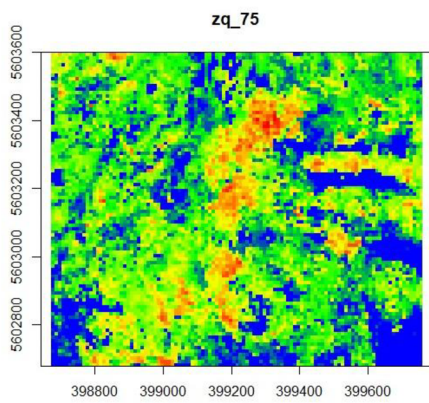
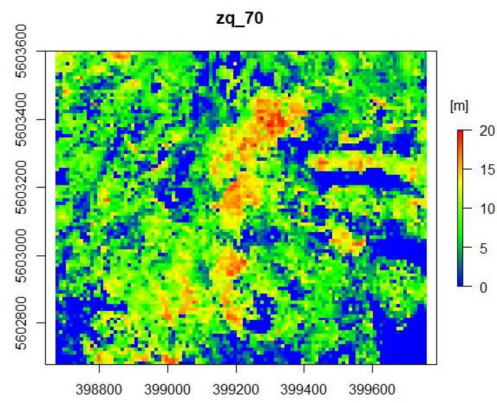
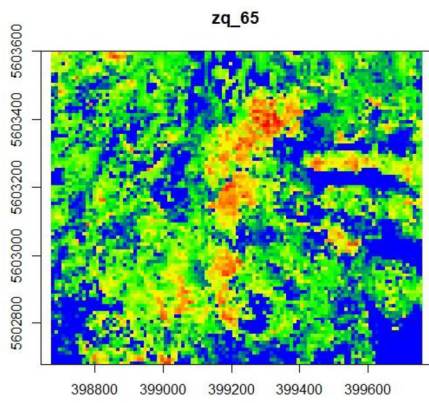
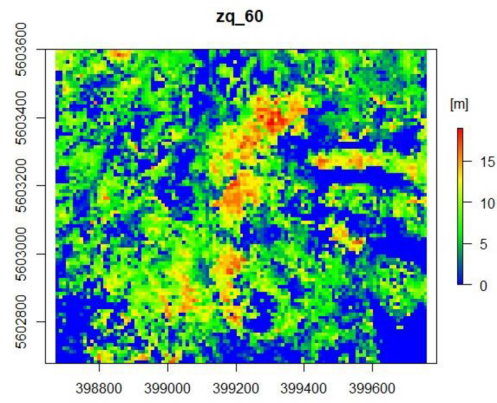
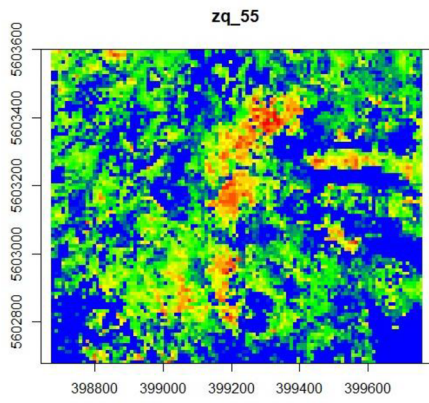
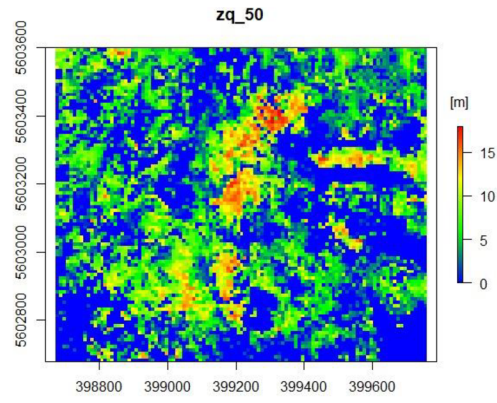
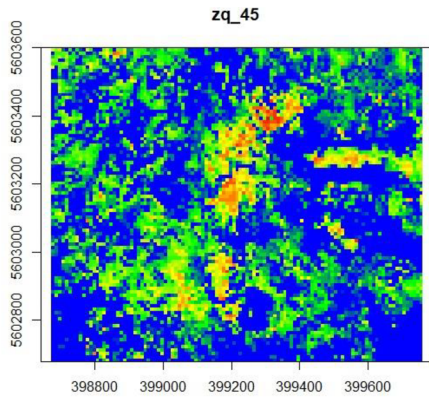
8 Přílohy

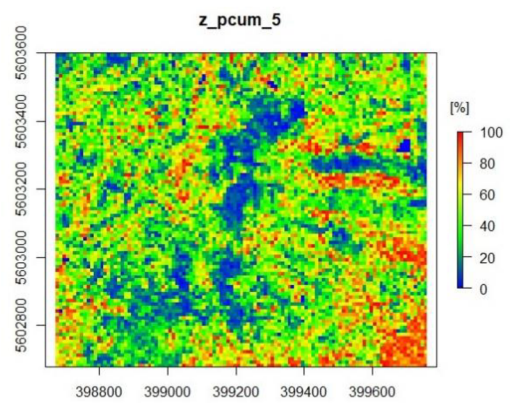
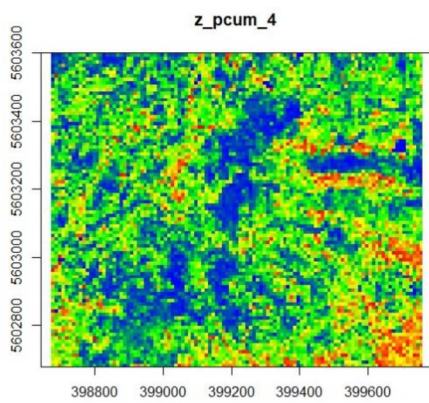
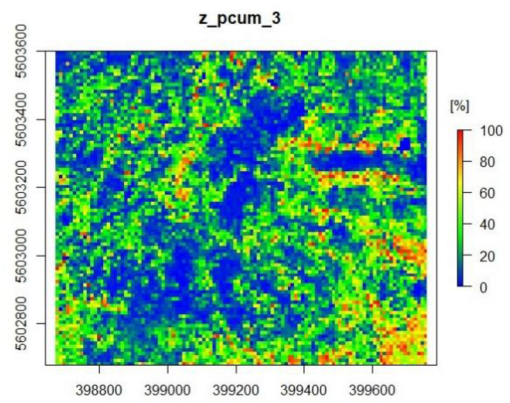
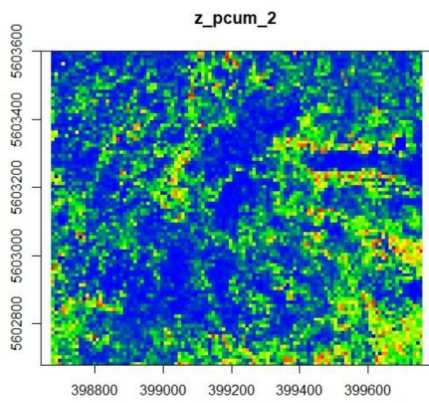
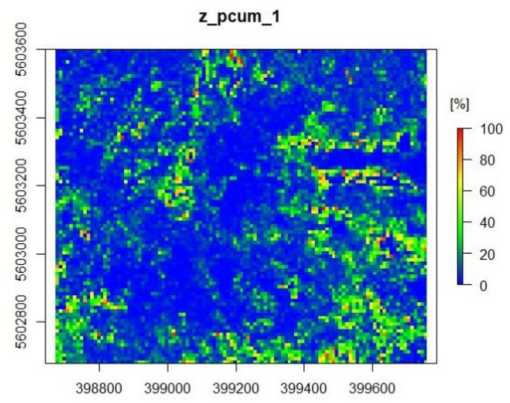
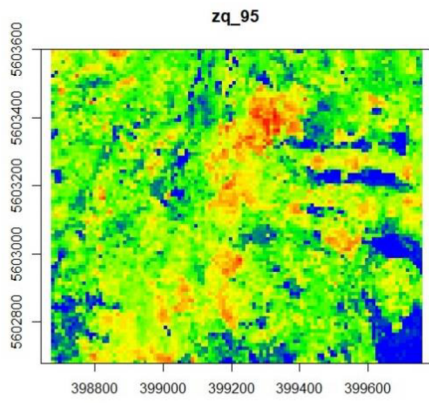
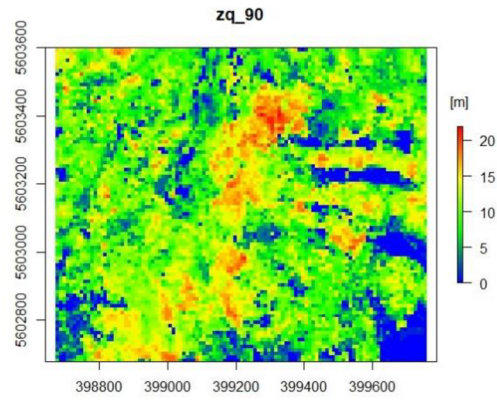
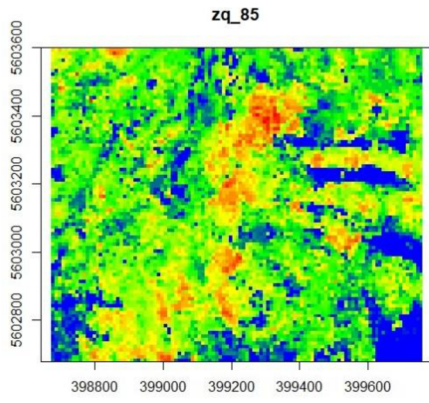
Tile	Step	Bulge	Spike	Down spike	Offset	Initial ground points search intensity
1	6	1	1	1	0.1	default
2	6	2	2	2	0.1	default
3	10	1	2	2	0.1	fine
4	20	2	2	2	0.1	fine
5	15	2	2	2	0.1	default
6	4	1	2	2	0.1	coarse
7	6	2	1	1	0.1	coarse
8	25	2	2	2	0.1	fine
9	8	2	2	2	0.1	fine
10	8	2	2	2	0.1	fine
11	6	1	1	1	0.1	default
12	12	2	1	1	0.1	fine
13	12	1	2	2	0.1	fine
14	12	1	2	2	0.1	fine
15	8	2	2	2	0.1	coarse
16	8	2	2	2	0.1	coarse
17	15	3	2	2	0.1	extra
18	15	3	2	2	0.1	extra
19	12	3	2	2	0.1	fine
20	12	2	1	1	0.1	fine

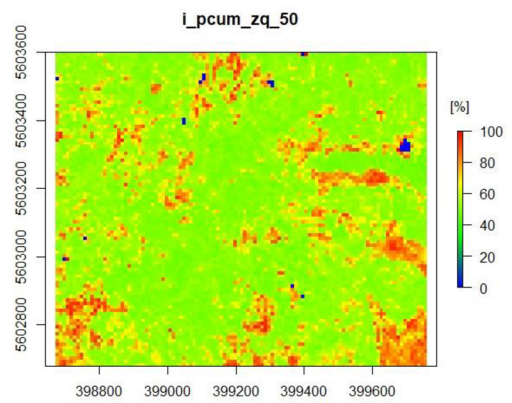
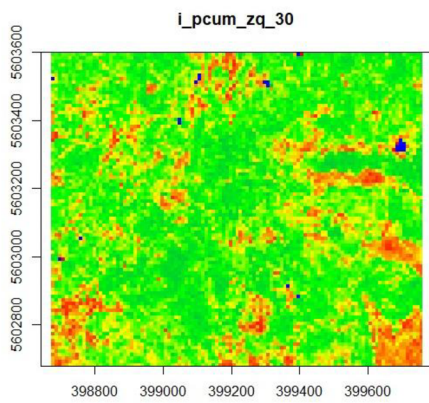
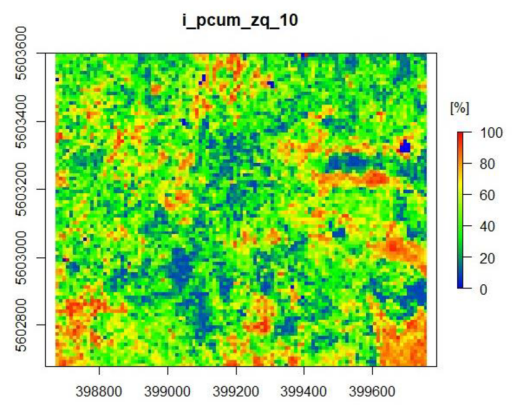
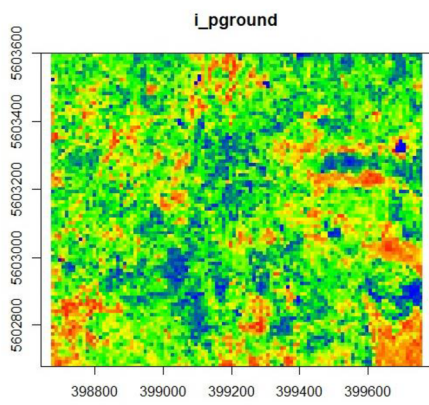
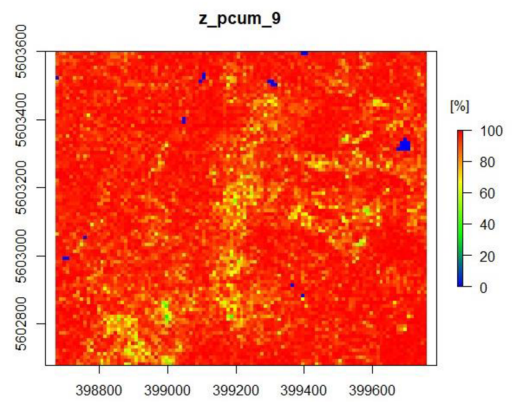
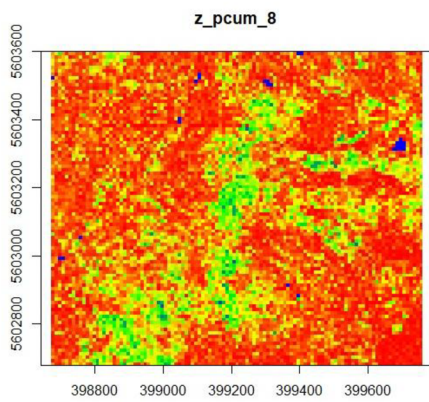
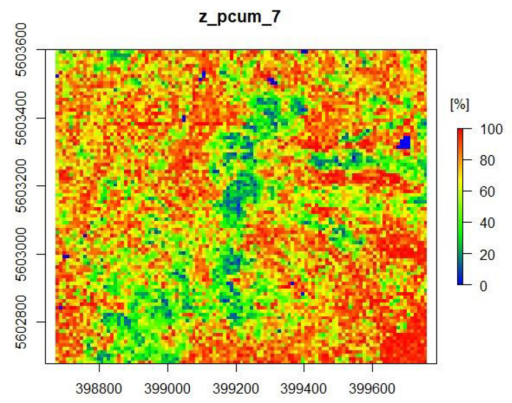
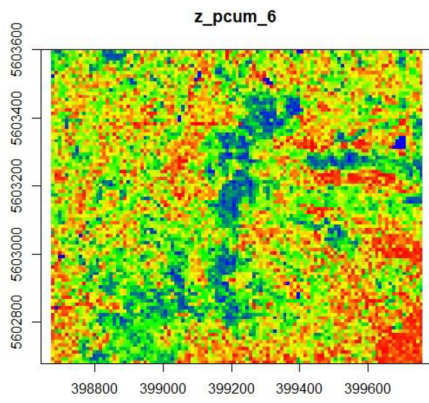
Příloha 1: Nastavení ground filtering v lasground

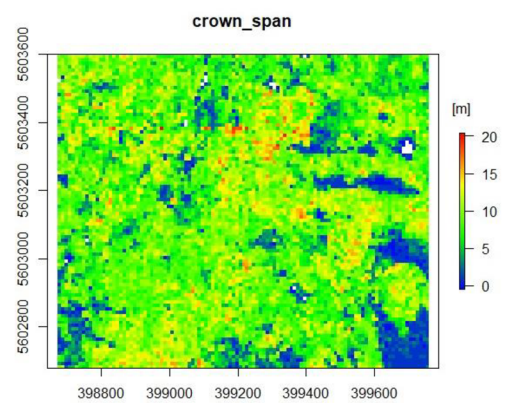
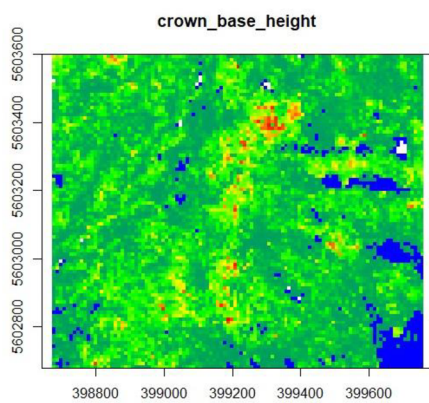
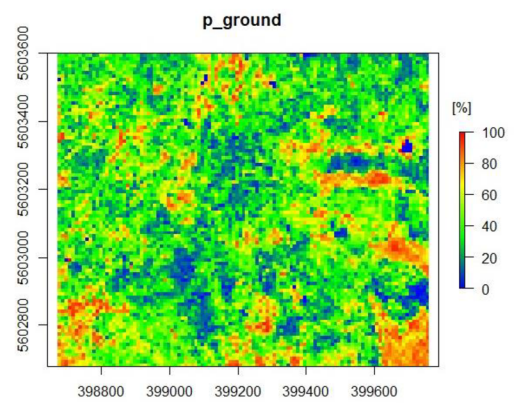
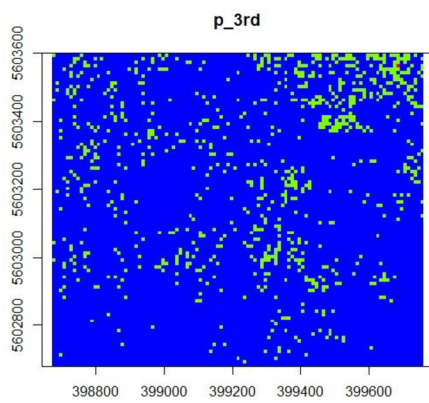
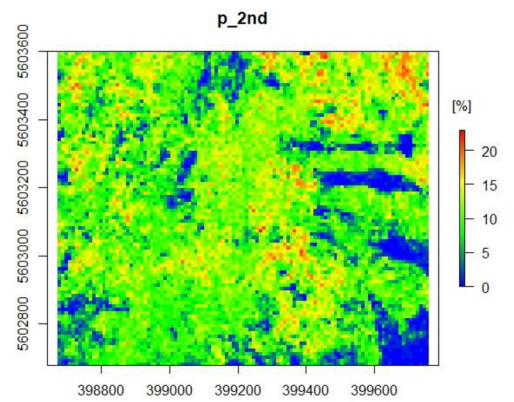
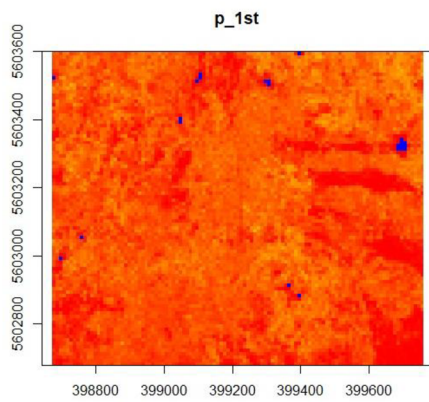
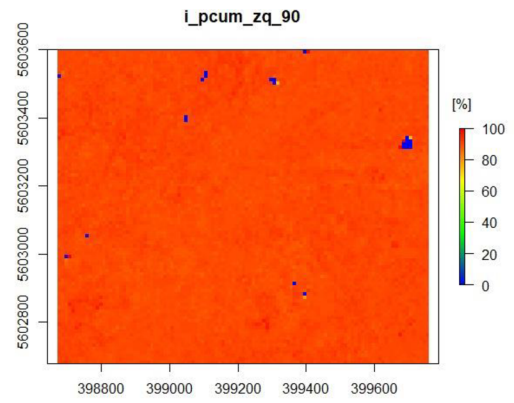
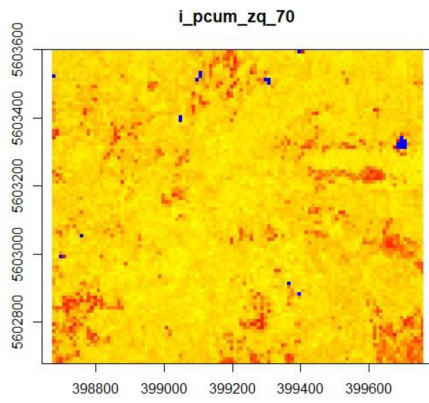


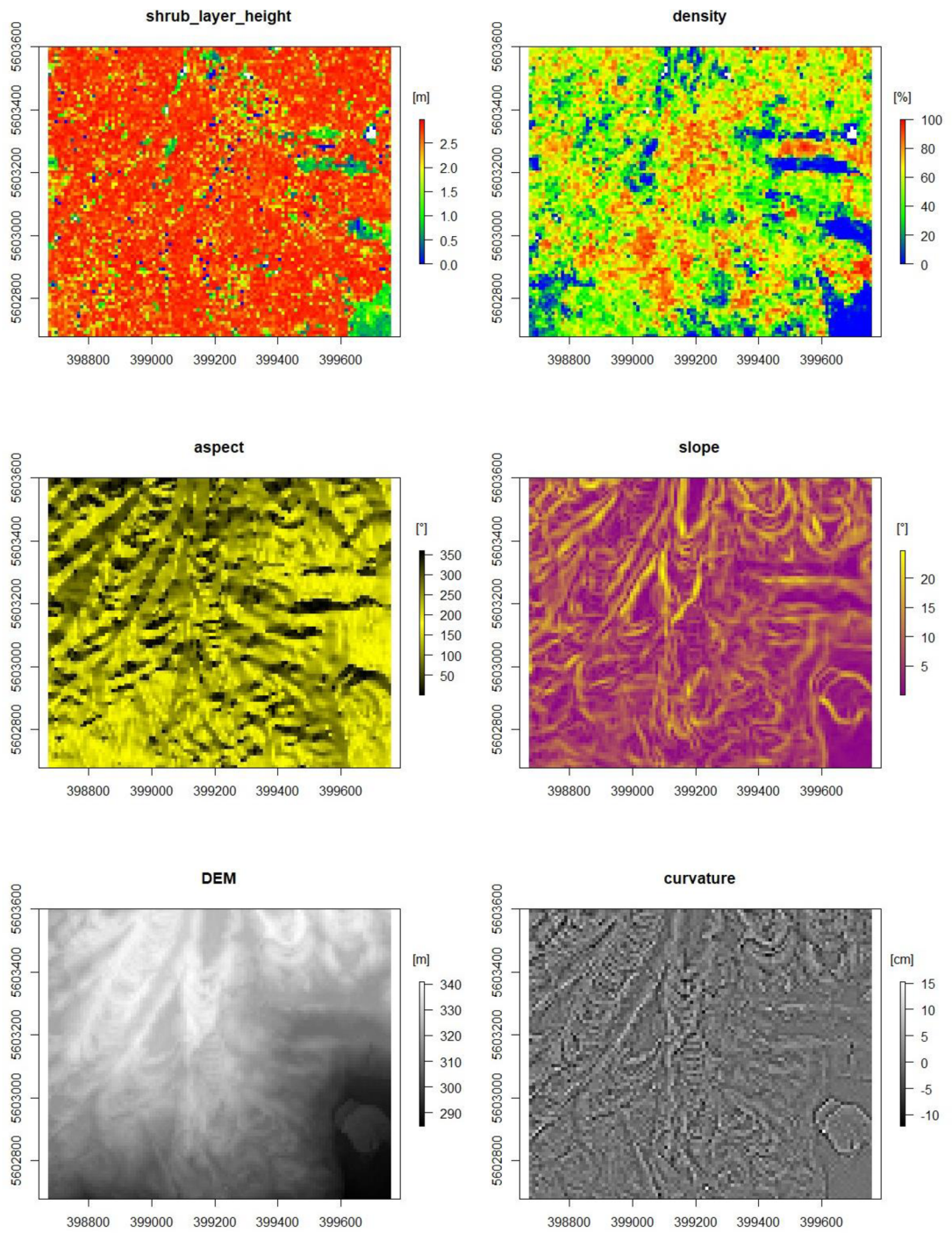












Příloha 2: Odvozené metriky