

Univerzita Palackého v Olomouci

Přírodovědecká fakulta

Katedra geoinformatiky

**ZPRACOVÁNÍ A PREZENTACE LASEROVÝCH
DAT PRO POTŘEBY MONITORINGU
KOMÁŘÍCH LÍHNIŠŤ**

Bakalářská práce

Antonín SKÁCEL

Vedoucí práce RNDr. Jakub MIŘIJOVSKÝ, Ph.D.

Olomouc 2026

Geoinformatika a kartografie

ANOTACE

V rámci této bakalářské práce byly stanoveny dva hlavní směry výzkumu. První se zaměřuje na zpracování bodových mračen získaných technologií LiDAR v rámci leteckého skenování. Zpracování obnášelo vytvoření replikovatelného pracovního postupu pro čištění a filtraci bodových mračen s cílem selektivního výběru bodů reprezentujících terén. Tyto body byly následně rasterizovány pro vytvoření spojitého digitálního modelu terénu s velkým prostorovým rozlišením, a to za účelem identifikace potenciálních komářích lůhnišť. Tento postup byl ověřen srovnáním vytvořených modelů a identifikovaných lůhnišť s daty projektu MOSPREMA a následně aplikován v rámci případové studie identifikace potenciálních komářích lůhnišť v části CHKO Soutok – Kančí obora.

Druhý směr výzkumu byl zaměřen na nástin prezentace bodových dat v online prostředí, v rámci kterého byly definovány specifické požadavky publikovaných dat pro potřeby monitoringu komářích lůhnišť. Byly porovnány možnosti proprietárních i otevřených webových řešení ArcGIS Online, Three.js, Potree a Cesium. Po zvolení nejvhodnějšího z porovnávaných řešení byla provedena vzorová 3D interaktivní publikace zpracovaných dat s vyznačenými potenciálními komářími lůhništi, dostupná na adrese <https://tinyurl.com/3Dlůhnište>.

KLÍČOVÁ SLOVA

Filtrace laserových dat, 3D online publikace, monitoring komářích lůhnišť

Počet stran práce: 56

Počet příloh: 10 (z toho 4 vázané a 6 volných)

ANNOTATION

This bachelor's thesis focuses on two main areas of research. The first focuses on the processing of point clouds acquired using LiDAR technology during aerial scanning. The processing involved creating a reproducible workflow for cleaning and filtering point clouds with the aim of selectively choosing points representing the terrain. These points were subsequently rasterized to create a continuous digital terrain model with high spatial resolution, for the purpose of identifying potential mosquito breeding sites. The workflow was validated by comparing the generated models and identified breeding sites with data from the MOSPREMA project and was subsequently applied in a case study to identify potential mosquito breeding sites in the Soutok – Kančí obora section of the Protected Landscape Area.

The second research direction focused on outlining the presentation of point data in an online environment, within which specific requirements for published data were defined for the needs of monitoring mosquito breeding sites. The capabilities of both proprietary and open-source web solutions, such as ArcGIS Online, Three.js, Potree, and Cesium, were compared. After selecting the most suitable solution from those compared, an interactive 3D visualization of the processed data was created, highlighting potential mosquito breeding sites, available at: <https://tinyurl.com/3Dlihniste>.

KEYWORDS

LiDAR data filtration, 3D models online publication, mosquito breeding sites monitoring

Number of pages: 56

Number of appendices: 10 (4 bound and 6 loose)

Prohlašuji, že

- bakalářskou/diplomovou práci včetně příloh, jsem vypracoval(a) samostatně a uvedl(a) jsem všechny použité podklady a literaturu.

- jsem si vědom, že na moji bakalářskou/diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 – využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití díla školního a § 60 – školní dílo,

- beru na vědomí, že Univerzita Palackého v Olomouci (dále UP Olomouc) má právo nevýdělečně, ke své vnitřní potřebě, bakalářskou/diplomovou práci užívat (§ 35 odst. 3),

- souhlasím, že údaje o mé bakalářské/diplomové práci budou zveřejněny ve Studijním informačním systému UP,

- v případě zájmu UP Olomouc uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít výsledky a výstupy mé bakalářské/diplomové práce v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,

- použít výsledky a výstupy mé bakalářské/diplomové práce nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem UP Olomouc, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly UP Olomouc na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce RNDr. Jakubovi Miřijovskému, Ph.D. za podněty a připomínky při vypracování práce. Dále děkuji RNDr. Janu Brusovi, Ph.D. za věcné rady týkající se celého tvůrčího procesu. Poděkování patří také mé rodině a přítelkyni za neutuchající podporu v dobrých i špatných chvílích při psaní této bakalářské práce.

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI

Přírodovědecká fakulta

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Antonín SKÁCEL**
Osobní číslo: **R23635**
Studijní program: **B0532A330011 Geoinformatika a kartografie**
Téma práce: **Zpracování a prezentace laserových dat pro potřeby monitoringu komářích láníšť**
Zadávací katedra: **Katedra geoinformatiky**

Zásady pro vypracování

Cílem práce je provést zpracování a návrh prezentace laserových dat pro potřeby monitoringu komářích láníšť. Student zpracuje několik datových sad s cílem získat digitální model reliéfu s vyznačenými komářími láníšťi. Jedním z hlavních cílů bude publikace bodových dat v online internetovém prostředí.

Mezi hlavní kroky, kterými se bude autor zabývat patří:

- filtrce a čištění laserových dat,
- tvorba DMR,
- identifikace komářích láníšť,
- nástin možností online prezentace 3D modelů,
- online publikace 3D modelů.

Případové studie budou probíhat v lokalitě nově vznikajícího CHKO Soutok a CHKO Litovelské Pomoraví

Text práce student zpracuje v souladu se závaznou šablonou pro kvalifikační práce KGI. O bakalářské práci student vytvoří webovou stránku a poster.

Celou práci (text, přílohy, výstupy, zdrojová a vytvořená data, poster a web) odevzdá student v digitální podobě na datové úložiště katedry. Do evidence STAG student odevzdá úplný text práce s přílohami, které určí vedoucí práce. Fyzicky student odevzdá pouze přílohy určené vedoucím práce.

Rozsah pracovní zprávy: **max. 50 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

LILLESAND, T., KIEFER, R., CHIPMAN, J. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc., New York, 756 s., 2008.

CAMPBELL, J., B., WYNNE, R. H. Introduction to Remote Sensing. 5th ed. Guilford Press, New York, 667 s., 2011.

Pavelka, K. (2002). Fotogrammetrie 10, 2.přepac. vyd. Praha: FSv ČVUT, 198 s.

Manuály programů Trimble Inpho a Agisoft

Voženílek, V. (2002): Diplomové práce z geoinformatiky. Vydavatelství Univerzity Palackého, Olomouc, UP, 31 s.

Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.**
Katedra geoinformatiky

Datum zadání bakalářské práce: 5. května 2025
Termín odevzdání bakalářské práce: 4. května 2026

L.S.

prof. RNDr. Martin Kubala, Ph.D.
děkan



prof. RNDr. Vilém Pechanec, Ph.D.
vedoucí katedry

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 CÍLE PRÁCE	12
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	13
2.1 Čištění a filtrace laserových dat	13
2.2 Monitoring komářích lůhnišť	14
2.3 Online prezentace 3D modelů	15
2.4 Zájmové lokality	16
3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ	18
3.1 Metody filtrace a čištění laserových dat	18
3.2 Metody tvorby a testování DMR	19
3.3 Metody webové prezentace 3D modelů	21
3.4 Použitá data	22
3.5 Použité technologie a hardware	23
3.6 Postup zpracování	23
3.7 Použití AI	23
4 FILTRACE A ČIŠTĚNÍ LASEROVÝCH DAT	24
4.1 Filtrace bodového mračna	24
4.1.1 Filtrace pomocí nástroje CSF	24
4.1.2 Filtrace pomocí poloautomatické klasifikace	27
4.2 Čištění bodového mračna	28
4.2.1 SOR filtr	29
4.2.2 Noise Filtr	30
4.3 Manuální editace dat	30
4.3.1 CEA Virtual Broom	30
4.3.2 Nástroje manuální segmentace	31
4.4 Návrh zpracování laserových dat	33
5 TVORBA A TESTOVÁNÍ DMR	35
5.1 Tvorba DMR	35
5.2 Srovnání vlastních DMR s MOSPREMA DEM	36
5.3 Identifikace potenciálních komářích lůhnišť	37
6 PŘÍPADOVÁ STUDIE V CHKO SOUTOK	40
7 ONLINE PREZENTACE MODELŮ	42
7.1 Cíle a specifikace projektu	42
7.2 Přehled porovnávaných technologií	42
7.3 Modelové publikace vizualizací	43
7.3.1 Interaktivní vizualizace potenciálních komářích lůhnišť	44
7.3.2 Vizualizace masivního bodového mračna	47
8 VÝSLEDKY	49
8.1 Výsledky zpracování laserových dat	49
8.2 Výsledky tvorby a testování DMR	50

8.3	Výsledky publikace 3D modelů v online prostředí	52
9	DISKUZE	53
10	ZÁVĚR	55
	POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE	57
	PŘÍLOHY	

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Seznam zkratek použitých v textu práce. Zkratky jsou také vysvětleny při jejich prvním uvedení v textu. Zkratky jsou seřazeny abecedně.

Zkratka	Význam
AI	Artificial Intelligence
ALS	Airborne Laser Scanning
AOPK ČR	Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
Bpv	Balt po vyrovnání (výškový systém)
CSF	Cloth Simulation Filter
ČÚZK	Český úřad zeměměřičský a katastrální
DMR	digitální model reliéfu
EBK	Empirical Bayesian Kriging
FOSS	Free and Open Source Software
GeoTIFF	Geographical Tagged Image File Format
GIS	geografický informační systém
HW	hardware
CHKO	chráněná krajinná oblast
IDW	Inverse Distance Weighting
KGI PrF UPOL	Katedra geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci
LAS	LASer (formát)
LAZ	LASzip (formát)
LiDAR	Light Detection and Ranging
MHF	Multiresolution Hierarchical Filter
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
NaN	Not a Number
NDWI	Normalized difference water index
NIR	Near-Infrared
OGC	Open Geospatial Consortium
PLY	Polygon File Format
PTIN	Progressive Triangular Irregular Network
RGB	Red Green Blue
SaaS	Software as a Service
SHP	Shapefile
S-JTSK	souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální
SOR	Statistical Outlier Filter
SW	software
WebGL	Web Graphics Library
WGS 84 ECEF	World Geodetic System 1984 Earth-Centered Earth-Fixed

ÚVOD

Oblasti lužních lesů a jejich okolí představují jeden z nejunikátnějších biotopů České republiky. Život v těchto oblastech ovšem přináší i své specifické komplikace. Jednou z nich je každoroční obava z přemnožení komáří populace zejména v období jarních a letních záplav, kdy dochází v krajině meandrujících řek, vlnitého terénu a slepých ramen k zadržení vody v bezodtokých terénních depresích. Vlivem vnějších klimatických podmínek se tyto bezodtoké oblasti stávají komářími líhništi, jejichž identifikace je tedy klíčovým krokem k předcházení komářích kalamit. Přesná identifikace potenciálních komářích líhnišť je o to důležitější v chráněných krajinných oblastech, kde není možné provést plošnou aplikaci larvicidů. Proto je zde prováděn cílený monitoring, který umožňuje precizní zásahy omezující negativní vliv na širší biodiverzitu oblasti.

V současnosti je proces plošné identifikace potenciálních komářích líhnišť výrazně usnadněn využitím leteckého laserového skenování. Tato technologie umožňuje sběr polohopisných a výškopisných dat i v rozsáhlých, a často i těžko přístupných oblastech. Výstupní data skenovacích kampaní ve formě bodových mračen ovšem vyžadují komplexní proces zpracování, zahrnující předpřípravu dat, filtraci, rasterizaci a morfometrickou analýzu. Výstupem tohoto procesu je digitální model reliéfu s identifikovanými oblastmi terénních depresí. Tato bakalářská práce se zabývá všemi dílčími kroky tohoto postupu.

Práce s bodovými mračenými přináší unikátní příležitost, a to vizualizaci zpracovaných dat a zjištěných poznatků formou 3D modelů. Trojdimenzionální pohled na danou problematiku může obohatit rozhodovací proces monitoringu komářích líhnišť představením daných lokalit blíže jejich skutečné podobě. Proto bylo dalším cílem této bakalářské práce vytvoření interaktivní modelové publikace 3D vizualizace komářích líhnišť, která může sloužit jako základ pro další rozvoj, či případnou budoucí implementaci do komplexního monitorovacího systému.

V rámci práce bylo navázáno na výsledky projektu MOSPREMA, zaměřeného na predikci a management kalamitních stavů komárů, který byl realizován na KGI PřF UPOL (Katedra geoinformatiky Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého v Olomouci) mezi lety 2022–2024.

1 CÍLE PRÁCE

Cílem bakalářské práce je provést zpracování a návrh prezentace laserových dat pro potřeby monitoringu komářích lůhnišť. Student zpracuje několik datových sad s cílem získat digitální model reliéfu s vyznačenými komářimi lůhništi. Jedním z hlavních cílů bude publikace bodových dat v online internetovém prostředí. Dílčími cíli, které jsou pro dosažení cíle práce nutné provést, jsou:

Filtrace a čištění laserových dat

V rámci tohoto dílčího cíle je nutné vytvořit replikovatelný postup zpracování bodových mračen tak, aby výstupem byly pouze body reprezentující povrch. Je nutné zvolit a odůvodnit výběr metod a nástrojů dostupných v proprietárních SW (software) 3Dsurvey, ArcGIS Pro a otevřeném SW CloudCompare.

Tvorba DMR

V rámci tohoto dílčího cíle je třeba z klasifikovaných laserových dat vytvořit digitální model reliéfu (DMR) s vysokým prostorovým rozlišením. Použitá metoda tvorby DMR musí být popsána a odůvodněna, její výsledek bude porovnán s poskytnutým MOSPREMA DEM.

Identifikace komářích lůhnišť

V rámci tohoto dílčího cíle budou identifikovány potenciální komářimi lůhniště, tedy jasně definované terénní útvary. Výsledek identifikace bude sloužit pro další srovnání s MOSPREMA DEM.

Nástin možností online prezentace 3D modelů

V rámci tohoto dílčího cíle budou stanoveny požadavky na publikování 3D prostorových dat pro potřeby monitoringu komářích lůhnišť v online internetovém prostředí. Porovnání budou nejvhodnější proprietární a otevřená řešení zvolená v rámci řešerše.

Online publikace 3D modelů

V rámci tohoto dílčího cíle bude provedena samotná publikace 3D prostorových dat, a to na vybraném řešení a v souladu s požadavky stanovenými v předchozím kroku.

Výsledky práce umožní využít vytvořený pracovní postup pro replikovatelnou tvorbu digitálních modelů o velkém prostorovém rozlišení, a to pro potřeby identifikace potenciálních komářích lůhnišť. Dále také práce slouží jako podklad k výběru řešení pro publikování 3D dat v online internetovém prostředí.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tato kapitola popisuje poznatky relevantní k dílčím cílům bakalářské práce, které autor v rámci rešeršní činnosti zkompiloval z bakalářských a diplomových prací, odborných publikací, vědeckých článků a tiskových zpráv. Čerpáno bylo jak z českých, tak i zahraničních zdrojů. Zvláštní důraz byl kladen na seznámení se s výsledky prací zabývajících se monitoringem komářích lůhovišť vypracovaných na KGI.

2.1 Čištění a filtrace laserových dat

Výstupem ALS (airborne laser scanning) pomocí technologie LiDAR (Light Detection And Ranging) jsou bodová mračka, tedy trojrozměrné bodové souřadnice polohy odrazu paprsků od objektů pod nosičem (Zhang a Whitman, 2005). Z těchto záznamů lze odvozovat a rozlišovat tvary a polohy skenovaných objektů.

Chen et al. (2021) rozlišuje tři složky ovlivňující bodová měření: zemský povrch (ground), ostatní objekty (off-ground) a šum (noise). Šum definuje jako jakékoliv nežádoucí měření, např. senzory, ptáky či letadla. Pro tvorbu DMR (digitálních modelů reliéfu) je nutné tyto chyby identifikovat a odstranit, např. pomocí SOR (statistical outlier removal) a Noise filtrů.

Szafarczyk a Toś (2022) popsali limitaci běžného topografického skenování, které využívá paprsků v NIR (Near-Infrared) části vlnového spektra (přesněji vlnovou délkou 1 064 nm). Limitací této vlnové délky je pohlcování paprsků vodní hladinou, a tedy nemožnost zjištění batymetrických hodnot reliéfu. Autoři uvádějí, že tento nedostatek může být vyřešen doplněním topografického skeneru o batymetrický, emitující paprsky ve vlnové délce zeleného viditelného světla (532 nm).

Po vyčištění mračka od šumu je třeba rozlišit body reprezentující zemský povrch od bodových měření ostatních objektů (zástavba, vegetace či vozidla). Tento proces se nazývá „ground filtering“ a je klíčovým krokem pro zajištění vysoké kvality DMR (Zhang a Whitman, 2005). Významným podkladem pro terénní filtraci je klasifikace bodů dle ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing) dostupná pro data uložená ve standardním formátu LAS (LASer) (Open Geospatial Consortium, 2018).

Existuje velké množství filtračních algoritmů, jejichž výstupem je klasifikace *ground* bodů z bodového mračka. Chen et al. (2021) rozděluje tyto filtry do pěti kategorií dle jejich principu:

- filtry na principu sklonitosti terénu,
- filtry na principu morfologie území,
- filtry na principu interpolace,
- filtry na principu segmentace,
- filtry na principu strojového učení.

Výběr vhodného filtračního algoritmu závisí na typu skenovaného území. Z provedených porovnání těchto filtrů je pro zalesněné oblasti doporučen MHF (Multiresolution Hierarchical Filter) (Chen et al., 2021), obecně je poté doporučováno použití CSF (Cloth Simulation Filter) (Bailey et al., 2022) a PTIN (Progressive Triangular Irregular Network) filtru (Zámek, 2023).

Jak popisuje Sithole a Vosselman (2003), veškeré filtrační algoritmy jsou náchylné na dva typy chyb. Typem I se označuje chyba klasifikace *ground* bodů jako *non-ground*, typem II poté nesprávná klasifikace *non-ground* bodů jako *ground*. Vzhledem k velkému množství bodů v bodovém mračku je primárně žádoucí eliminovat chybu II typu.

Filtrační algoritmy bývají často dostupné jako komponenty specializovaných programů pro manipulaci s bodovými mračky. Mezi nejpoužívanější se řadí FOSS software CloudCompare a software s hybridní licencí LASTools, mezi čistě proprietární software poté ArcGIS Pro a 3DSurvey.

2.2 Monitoring komářích láníšť

Komáři kalamity každoročně sužují lužní lesy České republiky, které se zvláště na jaře stávají vhodným místem pro lánutí záplavových druhů komárů (Ministerstvo životního prostředí, 2025). Přemnožení komářích larev vede ke kalamitám, které negativně ovlivňují kvalitu nejen života osob žijících či rekreujících se v dané oblasti, ale i život zvíře. Kromě obtěžování mohou být samice komárů i přenašeči nákazy, např. valtické horečky (Dovrtěl, 2014). Klimatická změna také vede k rozšiřování habitatů druhů schopných přenášet exotické nemoci, jako například malárie (Klepac et al., 2024) nebo západonilský virus (Rudolf et al., 2019). Je proto nutné zavádět systematická opatření pro předcházení těchto kalamit.

V roce 2025 vydal resort životního prostředí dotační výzvu na podporu vzniku integrovaného systému prevence komářích kalamit v chráněných krajinných oblastech s hlavním předmětem ochrany lužního lesa, kterými jsou CHKO (chráněná krajinná oblast) Poodří, CHKO Litovelské Pomoraví a CHKO Soutok. Cílem je podpora projektů umožňujících monitoring početních stavů komárů v tůních, predikce kalamitních stavů a včasné provádění adekvátních zásahů redukujících populaci komárů (Ministerstvo životního prostředí, 2025). Svojí specifikací výzva navazuje na výsledky pilotního projektu MOSPREMA realizovaného Přírodovědeckou fakultou Univerzity Palackého v Olomouci.

Anotace projektu MOSPREMA uvádí, že „podstatou projektu bylo pomocí moderních geoinformačních metod a nejnovějších vědeckých poznatků vytvořit a ověřit nové postupy pro integrovaný management území s cílem minimalizovat každoročně se opakující kalamitní stavy komárů se zvláštním zřetelem na zachování biodiverzity v zájmovém území CHKO Litovelské Pomoraví a jeho bezprostředním okolí“ (MOSPREMA, 2024). Tento projekt vznikl z dlouhodobé spolupráce obcí v oblasti Litovelského Pomoraví. Výchozí datové sady jsou DMR a DMP (digitální model povrchu), získané z leteckého a dronového laserového skenování s prostorovým rozlišením 50 cm na pixel (Brus, 2023). Tato data byla použita pro pokročilé hydrologické analýzy a detekci tůní (Šulc, 2018; Zapletal, 2023; Vlasák, 2024). V terénu byl proveden monitoring aktuálního stavu lánutí a početnosti komárů, a to pomocí manuálního šetření a sběru dat z autonomních senzorových setů ve vybraných tůních. Takto získaná data umožňují predikci kalamitních stavů a také slouží jako prostorový podklad pro regulaci za použití larvicidu Vectobac (Brus, 2023). Projekt byl úspěšně ukončen 23. dubna 2024 (MOSPREMA, 2024).

Komářím láníšťem může být za správných klimatických podmínek jakákoliv vodní plocha se stojatou vodou. V městském prostředí se jedná nejčastěji o menší, člověkem vytvořené nádoby, například pneumatiky, lahve a igelitové sáčky. Tyto objekty se nejčastěji identifikují terénním šetřením za pomoci GPS a UAV snímkováním (Schenkel et al., 2020). V extravilánu se častěji jedná o větší plochy, například periodické tůně či bezodtoké terénní deprese. Periodické tůně rozděluje Sukop (2014) na jarní periodické (vzniklé táním sněhů a jarními záplavami) a letní periodické (vzniklé vydatnými dešti a letními záplavami). Terénní bezodtoké deprese (anglicky sinks) nemají jednoznačnou definici. Obecně jsou popisovány jako oblasti v DMR, které jsou obklopeny ze všech stran buňkami s vyšší nadmořskou výškou. Může se jednat o přirozené krajinné útvary či artefakty objektů jako například mostů (Lidberg et al., 2017).

Pro identifikaci komářích lůhnišť existuje množství metod. Schenkel et al. (2020) ve výše zmíněné studii uvádí, že pro identifikaci malých, člověkem vytvořených vodních ploch v městském prostředí je oproti dronům vhodnější využít fyzické terénní šetření, neboť velikost kontejnerů byla na pořízených snímcích příliš malá pro identifikaci. Sběr dat pomocí GNSS aplikace popisuje také Šulc (2018), který ve své práci kromě vytvoření sběrné aplikace provedl obrazovou identifikaci tůní pomocí poloautomatické klasifikace v SW QGIS a vytvořil predikční model komářích lůhnišť v terénních depresích. Hraniční hodnotu pro hloubku potenciálního komářeho lůhniště v práci uvádí jako 50 cm. Zapletal (2023) v rámci projektu MOSPREMA porovnal tři metody pro identifikaci terénních depresí nad daty DMR a na základě nejvhodnější metody, kterou byl Priority-Flood algoritmus, vytvořil parametrický Python skript.

Vlasák (2024) ve své bakalářské práci, také vzniklé v rámci projektu MOSPREMA, popsal postup identifikace komářích lůhnišť kombinováním laserových a optických dat. V části věnované laserovým datům navrhl doplnění výše zmíněného Python skriptu o nástroj Wu2, umožňující identifikovat i vnořené terénní deprese. V části věnované testování limitů laserových dat uvádí, že minimální hustota pro identifikaci terénních depresí z bodového mračna je 5–10 bodů na 1 m². Stěžejním výstupem práce byla metodika kombinující použití laserových a optických dat pro identifikaci potenciálních komářích lůhnišť. Práce sloužila pouze jako teoretický podklad, vyžadovala totiž zásadní korekci zjištěných logických rozporů v textu.

Dedič (2025) ve své diplomové práci porovnal modelování terénu zatopených komářích lůhnišť pomocí různých interpolačních metod v závislosti na jejich morfologii. Bylo zjištěno, že věrná interpolace batymetrických hodnot vyžaduje individuální přístup k jednotlivým lokalitám, obecně vhodné je ale použití EBK (Empirical Bayesian Kriging) či RBF (Radial Basis Function) interpolačních metod. Vhodné je také doplnit data leteckého laserového skenování o cílená pozemní měření dna tůní v kritických místech.

2.3 Online prezentace 3D modelů

V rámci rešeršní činnosti bylo zjištěno, že běžnou praxí vizualizace komářích lůhnišť je jejich publikace formou dvourozměrných map a datových náhledů. Přitom samotný charakter vstupních dat vybízí k využití trojrozměrných vizualizačních technik.

Bodová mračna mohou sloužit nejen jako podklad pro generování spojitých trojrozměrných objektů (terén, budova), ale sama mohou být prezentována jako výsledné vizualizace. Je ovšem nutné pochopit rozdíly mezi využitím bodových mračen a běžněji používaných trojúhelníkových modelů. Větší bodová mračna přesahují svoji velikostí kapacitu RAM (Random-Access Memory). Jedním z řešení je rozdělení dat do dlaždic (tiles), které jsou zpracovávány postupně (Schuetz, 2016). Standardním formátem pro toto řešení jsou 3D Tiles, které podporují v rámci jednoho tilesetu ukládání dlaždic do prostorové struktury oktalového stromu (octree). Kromě stromové struktury formát ukládá i metadata tilesetu. 3D Tiles umožňuje streamování nejen bodových mračen, ale i spojitě trojúhelníkové sítě (mesh) a textury (Cozzi a Lilley, 2023).

Publikace dat ve webovém prostředí umožňuje přístup klienta k výsledným produktům bez nutnosti instalace softwaru třetích stran (Schuetz, 2016). Pokročilá funkcionalita některých webových řešení (např. Potree, Cesium a ArcGIS Online) navíc umožňuje klientovi provádět základní analýzy a obecně přináší větší imersivní dojem.

Porovnáním webových technologií pro 3D prezentaci architektonického dědictví se zabývala Dominiková (2025), která definovala hlavní požadavky pro volbu technologie. Těmi jsou možnost tvorby interaktivní webové vizualizace, jednoduchost použití a snadná

integrace do webového prostředí. Tyto požadavky jsou aplikovatelné i pro autorův záměr. Z kvalitativního uživatelského testování vyplynula jako nejlepší 3D technologie Babylon.js, studie ovšem nezahrnovala publikaci laserových bodových mračen, pouze ručně modelovaných a fotogrammetrických 3D modelů.

Kulawiak a Kulawiak (2016) ve své práci popisují využití proprietární webové GIS (geografický informační systém) technologie Cesium pro prezentaci velkých bodových mračen, a to na příkladu vizualizace polského trojměstí Gdaňsk-Gdyně-Sopoty. Toto řešení autoři hodnotili velmi kladně, navíc od doby vydání článku prošla platforma Cesium mnoha vylepšeními. SaaS (Software as a Service) nadstavba Cesium ion umožňuje hostovat, optimalizovat a streamovat velké množství prostorových dat v cloudu. Optimalizace probíhá procesem dlaždicování (anglicky Tiling), který podporuje bodová mračna, fotogrammetrické výstupy, 3D modely a budovy, ortofotografie i DMR/DMP.

Dalším z proprietárních webových řešení pro publikaci 3D modelů je ArcGIS Online. Jeho využití pro 3D vizualizaci popisuje Huang (2020) na příkladu prezentace architektonického vývoje Virginské univerzity, a to za použití 3D modelů terénu a budov. LiDAR data zde byla využita jako podklad pro modelování budov a terénu.

Bittner et al. (2025) v prostředí ArcGIS Online představili a zhodnotili využití sedmi 3D geovizualizačních metod v kontextu hodnocení využití území pro rezidenční rozvoj v Jihlavě. Ze strukturovaného dotazníku, který vyplnilo 19 odborníků, vyplynula jako nejsnadněji interpretovatelná metoda horizontálních rovin a metoda hranolů.

2.4 Zájmové lokality

Pro řešení dílčích cílů této bakalářské práce byly stanoveny dvě lokality, ve kterých byly provedeny veškeré výzkumné postupy a činnosti. Těmito lokalitami jsou CHKO Litovelské Pomoraví a CHKO Soutok. Obě tyto oblasti jsou říčními krajinami lužních lesů, které jsou každoročně sužovány komáři kalamitami (Ministerstvo životního prostředí, 2025).

CHKO Litovelské Pomoraví

Chráněná krajinná oblast o rozloze 96 km², vyhlášena 29. října 1990, zahrnuje lužní lesy a louky v okolí přirozeně se vyskytující vnitrozemské říční delty Moravy mezi městy Olomouc a Mohelnice. Území CHKO je v rámci soustavy NATURA 2000 vyhlášeno jako ptačí oblast a evropsky významná lokalita. Celkem se v ní nachází 25 maloplošně zvláště chráněných území. Nejdominantnějším půdním typem oblasti jsou fluvizemě, vzniklé na kvartérních štěrkopiscích (AOPK ČR, 2026a) (Agentura ochrany přírody a krajiny ČR).

Podle aktualizované Quittovi klasifikace (Květoň a Voženilek, 2011) spadá převážná část území do teplé klimatické oblasti T2, která se vyznačuje se suchými zimami, krátkými teplými jary a dlouhými léty. AOPK ČR (2026a) dále uvádí, že průměrný srážkový úhrn ve vegetačním období je 350–400 mm, v zimním pouze 200–300 mm. Lužní lesy a louky v okolí meandrující řeky Moravy jsou závislé na pravidelných jarních záplavách, při kterých dochází jednak ke zvýšení hladiny bočních stálých ramen, jednak k zaplavení ramen periodických. Právě tyto jarní záplavy vytvářejí tůně se stojatou vodou, v níž může za splnění dalších podmínek dojít k přemnožení komárů populace (Ministerstvo životního prostředí, 2025).

CHKO Soutok

Chráněná krajinná oblast Soutok byla vyhlášena 1. července 2025, tedy v průběhu vzniku této bakalářské práce. Celková rozloha území činí 125 km². CHKO se rozkládá se na území soutoku řek Moravy a Dyje. V rámci této krajinné oblasti se vyskytují tři evropsky významné lokality, dvě ptačí oblasti a 11 maloplošných zvláště chráněných území.

Převažujícími půdními typy jsou zde stejné jako v CHKO Litovelské Pomoraví fluvizemě (AOPK ČR, 2026b). Celé území CHKO se nachází v oblasti teplé T4 (Květoň a Voženilek, 2011), která je oproti T2 teplejší a sušší.

Řeky Morava a Dyje se v oblasti soutoku přirozeně vícenásobně dělí do paralelně protékajících říčních ramen. V okolí těchto toků se vyskytují lužní louky a lesy. Oproti Litovelskému Pomoraví zde ale došlo k významné antropogenní regulaci toků, které vedlo k zamezení přirozených záplav a poškození okolního ekosystému. Od 90. let 20. stol. byla zahájena snaha o záchranu nivních biotopů umělým povodňováním lužních lesů pomocí odlehčovacího jezu Pohansko (AOPK ČR, 2026b). Společně s navrácením povodňového režimu je ale nutné realizovat opatření proti přemnožení komárů. Vytvoření integrovaného systému prevence komářích kalamit je jedním ze stěžejních cílů nově vzniklého CHKO Soutok (AOPK ČR, 2023).



Obr. 1 Vizualizace zájmových lokalit (Zdroj: Autor).

3 METODY A POSTUP ZPRACOVÁNÍ

Tato kapitola je výčtem metod, zařízení, programů a dat použitých pro dosažení dílčích cílů bakalářské práce. Dále je zde ilustrován postup zpracování a použití AI (Artificial Intelligence). Pro přehlednost byla kapitola rozdělena do podkapitol.

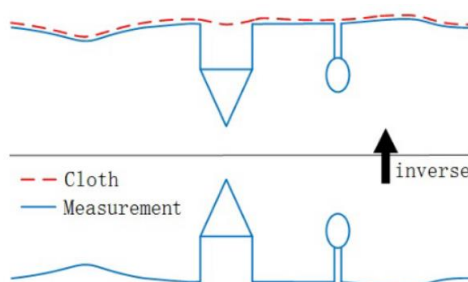
V rámci seznámení se s problematikou bylo provedeno důkladné **studium literatury** a kritické zhodnocení relevantnosti zdrojů. Z empirických metod byl využit **experiment**, a to při aplikování filtračních a interpolačních nástrojů na části bodového mračka, a **měření** pro určení metrik testovaných nástrojů. Z obecně teoretických metod bylo využito **analýzy** při zkoumání parametrů poskytnutých i vytvořených dat, **komparace** pro porovnání vhodnosti testovaných nástrojů a webových řešení a **syntézy** při formulování závěrů na základě výsledných zjištění.

3.1 Metody filtrace a čištění laserových dat

Zde je uveden výčet a popis nástrojů, testovaných pro klasifikaci *ground* bodů bodového mračka. Jedná se o CSF, poloautomatickou klasifikaci, SOR a Noise filtry, CEA Virtual Broom a editační a výběrové nástroje dostupné v programech CloudCompare, 3DSurvey a ArcGIS Pro.

CSF

CSF (Cloth Simulation Filter) vyvinuli Zhang et al. (2016) pro filtraci bodů reprezentujících terén z LiDAR bodového mračka za pomoci simulace látky. Principem je převrácení bodového mračka, na které je spuštěna fyzikálně simulovaná látka, která se přilne na vrchní vrstvu bodů (Obr. 2). Porovnáním interakce látky se skenovanými body je provedena klasifikace vstupního bodového mračka na kategorie *ground points* a *off-ground points*. Parametry filtru se dělí na obecné, které uživatel musí nastavit při každém spuštění nástroje, a pokročilé s již optimalizovanými hodnotami pro většinu případů použití. V rámci této bakalářské práce byla použita implementace nástroje ve formě plugin pro SW CloudCompare.



Obr. 2 Princip fungování CSF (Zdroj: Zhang et al., 2016, s. 3).

Poloautomatická klasifikace bodových mračen

Software 3DSurvey umožňuje provést poloautomatickou klasifikaci bodového mračka, primárně vytvořenou pro filtraci pozemních bodů od zbytku bodového mračka. Samotný proces probíhá pomocí řady interaktivních dialogových oken. První zobrazí vybrané bodové mračno a umožní uživateli upravit klasifikační parametry. Na základě těchto parametrů je vygenerována pravidelná mřížka (regular grid mesh), dle které je bodové mračno zarovnáno pro efektivnější zpracování. V druhém kroku uživatel zvolí kliknutím na bodové mračno velké části terénu, a to nejlépe co nejrovnoměrněji po celé oblasti. Pomocí těchto vybraných oblastí a hraničních hodnot parametrů nástroj interpoluje zbytek terénu a porovná jej s nevybranými body. Výsledkem je klasifikace bodového mračka na hodnoty *ground*,

unclassified (neklasifikované body) a *never classified* (nikdy neklasifikované body). Jelikož se jedná o proprietární nástroj, rovnice výpočtu nejsou veřejně dostupné.

SOR filtr

SOR (Statistical Outlier) filtr je jedním z nástrojů dostupných v SW CloudCompare, který slouží k odstranění šumu (nežádoucích měření) z bodového mračka. Filtr funguje na principu statistické analýzy vzdáleností každého bodu k jeho sousedům. V rámci použití filtru může uživatel upravit parametry počtu bodů pro výpočet průměrné vzdálenosti a hodnotu násobitele směrodatné odchylky (nSigma). Dle těchto parametrů je spočtena hraniční povolená vzdálenost bodů (vzorec 1) a následně je provedeno odstranění veškerých bodů vyšších, než je spočtená hodnota. Výstupem filtru je bodové mračno bez odlehlých bodů.

$$\text{hraniční hodnota} = \mu + n \cdot \sigma \quad (1)$$

kde μ = globální průměrná vzdálenost bodů,

n = násobitel směrodatné odchylky,

σ = směrodatná odchylka vzdáleností.

Noise filtr

Noise filtr je dalším nástrojem dostupným v SW CloudCompare. Proces identifikace šumu zde probíhá pomocí hodnocení vzdálenosti bodů od lokální roviny. Uživatel nastavuje způsob určení sousedících bodů a hodnotu maximální povolené odchylky. Na základě zadáných parametrů jsou sousedící body proloženy rovinou a poté jsou odfiltrovány body s vyšší než povolenou odchylkou od této roviny. Nástroj umožňuje identifikaci či přímé odstranění bodů identifikovaných jako šum.

$$\text{hraniční hodnota} = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (2)$$

CEA Virtual Broom

Tento nástroj vyvinul Grimes (2017) pro poloautomatickou filtraci šumu nad rovnou plochou (např. artefaktů vozidel či osob stojících při skenování na vozovce). Nástroj je dostupný jako plugin v SW CloudCompare. Uživatel vybere dva body z bodového mračka, které definují dimenzi čistícího okna. Šířka, délka a výška okna může být upravena parametry. S definovaným oknem může uživatel pohybovat manuálně, nebo automaticky ve vytyčené oblasti. Po ukončení filtrace může být proveden export bodového mračka bez nežádoucích bodů, nebo další iterace nástroje s jiným nastavením okna.

Editační a výběrové nástroje

Využity byly nástroje dostupné v SW CloudCompare a 3DSurvey. V SW CloudCompare se jednalo o nástroje **Cross Section** a **Segment**, v 3DSurvey byly použity nástroje **Bounding Box**, **Select from CAD** a **Select by color**. Pro hromadné předzpracování více překryvných LAZ (LASzip) souborů bylo použito nástrojů **Create LAS Dataset**, **Extract LAS** a **Tile LAS** v SW ArcGIS Pro.

3.2 Metody tvorby a testování DMR

Digitální model reliéfu z klasifikovaných laserových dat byl vytvořen v SW ArcGIS Pro s použitím nástroje **LAS Dataset To Raster**, umožňujícím rasterizaci bodového mračka pomocí metody *Binning* (definující hodnotu buňky na základě minima, maxima, průměru, IDW interpolace či metody Nearest Neighbour) nebo *Triangulation* (odvozující hodnoty buněk od v RAM paměti generované nepravidelné trojúhelníkové sítě). Buňky neobsahující žádné body lze ponechat prázdné, či jejich hodnoty určit zprůměrováním okolních buněk

(metoda *Simple*), lineární interpolací z TINu (metoda *Linear*) nebo interpolací přirozeného sousedství (metoda *Natural Neighbour*).

Lineární interpolace

Jednoduchá deterministická interpolační metoda sloužící k odhadu neznámé hodnoty mezi dvěma body se známými hodnotami. Předpokládá konstantní změnu hodnot mezi těmito body (lineární klesání, stoupání nebo rovinu). Výhodou metody je výpočetní nenáročnost a eliminace vzniku umělých extrémů.

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (3)$$

kde $[x_0, y_0], [x_1, y_1]$ = známé body.

IDW interpolace

Metoda IDW (Inverse Distance Weighted) je deterministickou interpolační metodou, odhadující hodnoty neznámých bodů jako vážený průměr známých bodů v okolí. Tato váha klesá s rostoucí vzdáleností, aplikující první geografický zákon, tedy že „vše souvisí se vším, ale bližší věci spolu souvisí více než věci vzdálené“ (Tobler, 1970, s. 236). Výsledné interpolované hodnoty nevytvářejí umělé extrémy, v okolí osamocených bodů s extrémní hodnotou ovšem vznikají soustředné kružnice (tzv. efekt volského oka).

$$Z_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_{ij}^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^p}} \quad (4)$$

kde Z_j = interpolovaná hodnota,

Z_i = známá hodnota v bodě i ,

d_{ij} = vzdálenost mezi bodem j a známým bodem i ,

p = váhový exponent,

n = celkový počet zahrnutých známých bodů.

Natural Neighbour interpolace

Metoda přirozeného sousedství provádí odhad hodnot na základě Thiessen polygonů vytvořených kolem známých bodů. Při odhadu nového bodu je vytvořen nový Thiessen polygon, váha okolních bodů je poté určena procentuální hodnotou překryvu jejich ploch. Výhodou metody je absence definovaných parametrů a nevytváření umělých extrémů. Omezením je odhad bodů pouze v oblasti již existujících hodnot, tedy nemožnost interpolovat či extrapolovat za nejkrajnější vnější bod.

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (5)$$

kde $Z(x, y)$ = interpolovaná hodnota,

Z_i = známá hodnota v bodě i ,

n = počet přirozených sousedů,

W_i = váha konkrétního bodu i .

Samotné testování DMR proběhlo metodou **vizuální komparace** výškové odchylky s již existujícím modelem MOSPREMA DEM. Pro zajištění podmínek srovnání a jeho následné realizace bylo využito geoprocessingových nástrojů v SW ArcGIS Pro, konkrétně **Define projection, Clip Raster a Raster Calculator**. Druhou metodou testování bylo porovnání identifikovaných bezodtokých depresí ve zkoumané oblasti, opět s MOSPREMA DEM.

Identifikace potenciálních komářích láníšť

První zamýšlenou metodou bylo využití skriptu vytvořeného v rámci bakalářské práce Zapletalem (2023). Tuto metodu však nešlo použít, bylo proto využito Geoprocessing nástroje **Locate Depressions** v SW ArcGIS Pro. Ten umožňuje nejen detekci terénních depresí, ale i automatické spočtení jejich lokálních charakteristik (např. plochy hladiny, objemu deprese, výšky hladiny či výšky nejnižší buňky).

Samotný analytický proces nástroje funguje na základě identifikace buněk v rastru, které mají nižší nadmořskou výšku oproti okolním buňkám. Tyto buňky jsou zaplněny až do úrovně nejnižšího okrajového pixelu (tzv. přelivového bodu). Následně je zaplněný rastr odečten od původního a zbylé útvary jsou vektorizovány do formy polygonů s atributy lokálních charakteristik.

Pro srovnání použitelnosti vzniklých DMR byly porovnány identifikované deprese s depresemi identifikovanými při stejném nastavení nástroje **Locate Depressions** nad MOSPREMA DEM rastrem. Zhodnocení úspěšnosti detekce bylo provedeno pomocí metriky **F1-skóre** (Powers, 2011), tedy harmonického průměru **přesnosti** (hodnoty podílu počtu vlastních překryvných depresí se všemi identifikovanými depresemi z vlastního DMR) a **úplnosti** (hodnoty podílu MOSPREMA překryvných depresí s všemi depresemi identifikovanými z MOSPREMA DEM). Sekundární metrikou byla **střední absolutní chyba** maximální hloubky vlastní identifikované deprese s MOSPREMA DEM depresí.

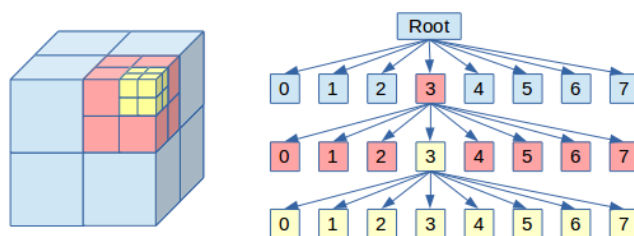
$$F_1 = 2 \times \frac{\text{přesnost} \times \text{úplnost}}{\text{přesnost} + \text{úplnost}} \quad (6)$$

3.3 Metody webové prezentace 3D modelů

Pro publikaci modelů a datových sad ve webovém prostředí bylo nutné provést prostorovou a výškovou transformaci dat do globálního geocentrického kartézského systému WGS 84 (ECEF). Stejně tak byla provedena konverze formátů do webové nativních struktur, jako je OGC standard **3DTiles**, **Potree Octree** a **GeoJSON**.

Octree a prostorové indexování

Proces úpravy struktury bodového mračna je nezbytný pro plynulý přenos dat po síti a vykreslování obrazu na straně klienta. Principem je dělení souboru na 8 menších částí rozdělením v osách X, Y, Z. Toto štěpení probíhá rekurzivně, dokud je v každé části více než povolené množství bodů (Meagher, 1982). Na takto optimalizovaná a prostorově indexovaná data se lze asynchronně dotazovat bez nutnosti přenášet po síti celý objem dat (Schuetz, 2016).



Obr. 3 Princip struktury oktalového stromu (zdroj: Geiger, 2014).

LoD (Level of Detail)

Koncept úrovně detailů umožňuje upravování složitosti reprezentace 3D modelu v závislosti na poloze a pohledu kamery. Místo vykreslování plného detailu modelu při pohledu z dálky (nízká úroveň detailu) jsou zobrazeny pouze prořídle vzorky bodů (u bodového mračna) či generalizovaná geometrie (u spojitých 3D a 2D objektů) (Constantinescu, 2000).

3.4 Použitá data

Tato podkapitola obsahuje výčet všech laserových, vektorových a rastrových dat využitých při tvorbě bakalářské práce. Popis byl pro lepší přehlednost rozčleněn dle typů datových modelů.

Bodová mračna

První LiDAR sada, obsahující 305 LAZ souborů o celkové velikosti 133 GB, zachycovala oblast Litovelského Pomoraví. Pořízena byla 9. března 2023 skenerem Riegl VQ-480II v rámci projektu MOSPREMA. Z těchto dat byla použita mračna LITOVEL 3-5_1 a LITOVEL 1-4_3, ve kterých byly vybrány testovací oblasti, sloužící ke cvičné manipulaci a testování různých nástrojů. U obou souborů se jednalo o RGB (Red Green Blue) snímky obarvená, předem klasifikovaná bodová mračna v souřadnicovém systému S-JTSK East North. Garantem dat je vedoucí bakalářské práce RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.

Druhou datovou sadou je výstup leteckého LiDAR skenování části CHKO Soutok. Skenování proběhlo 8. dubna 2024 laserovým skenerem RIEGL VQ-1560II-S ve čtyřech podélných a dvou příčných letových řadách. Celkem je bodové mračno rozděleno do dvanácti LAZ souborů o celkové velikosti 34,2 GB. Bodová mračna jsou obarvena RGB snímky pořízenými leteckou kamerou umístěnou na tomtéž nosiči. Data byla poskytnuta v souřadnicovém systému S-JTSK East North s výškovým systémem Bpv. Garantem dat je vedoucí bakalářské práce RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D. V rámci práce byla využita pro případovou studii identifikace potenciálních komářích lůhnišť v Kančí oboře.

Rastrová data

MOSPREMA DEM – digitální model reliéfu vytvořený v rámci projektu MOSPREMA z leteckého laserového skenování CHKO Litovelské Pomoraví (první poskytnutá LiDAR sada). Prostorové rozlišení DMR je 0,5 m na pixel. Data jsou uložena v rastrovém formátu TIFF se souřadnicovým systémem S-JTSK East North a výškovým systémem Bpv. DMR je rozdělen dle kladu listů SM5 (Státní mapa 1:5 000). Garantem dat je vedoucí bakalářské práce RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.

V rámci platformy Cesium ion bylo pro tvorbu modelové webové aplikace využito ortofotomapy Bing Maps Aerial od společnosti Bing a globální digitální model reliéfu Cesium World Terrain, jehož garantem je společnost Cesium. Data jsou poskytována v souřadnicovém systému WGS 84.

Vektorová data

VZCHU – polygonová vrstva velkoplošných zvláště chráněných území České republiky, veřejně dostupná z otevřeného datového úložiště AOPK ČR. Tato vrstva byla stažena ve formátu SHP (Shapefile) a souřadnicovém systému S-JTSK East North. Z vrstvy byly vyjmuty a využity pouze oblasti CHKO Litovelské Pomoraví a CHKO Soutok, a to za účelem ořezu zpracovaných dat. Data byla stažena 3. 2. 2025. Garantem dat je AOPK ČR.

HY_P – datová sada INSPIRE tématu Vodstvo – Fyzické vody, dostupná z Geoportálu ČÚZK (Český úřad zeměměřičský a katastrální) ve formátu Geopackage a souřadnicovém systému ETRS89 s kartografickým zobrazením UTM 33N. Data vychází ze Základní báze geografických dat ČR (ZABAGED®), jsou tedy generalizována v měřítku 1 : 10 000. Využita byla pro filtraci terénních depresí identifikovaných v oblastech vodních ploch a toků, dále také pro tvorbu vizualizací. Data byla stažena 21. 1. 2026. Garantem dat je ČÚZK.

Klad listů SM5 – Polygonová vrstva pocházející z databáze ČÚZK, poskytnuta vedoucím práce společně s MOSPREMA DEM. Prostorové rozlišení listu je 2 x 2,5 km. Využita byla pro rozčlenění oblasti případové studie v CHKO Soutok. Garantem dat je ČÚZK.

3.5 Použité technologie a hardware

Pro plnění dílčích cílů práce bylo využito následujících desktopových aplikací, softwarových balíčků a webových knihoven a služeb:

Tabulka 1 Přehled použitých technologií

Technologie	Verze	Účel
3DSurvey	4.0.2	zpracování bodových mračen
ArcGIS Pro	3.6.1	zpracování dat, tvorba DMR, identifikace terénních depresí a tvorba vizualizací
Blender	5.0	tvorba uzavřeného modelu terénu z DMR
Cesium ion	1.139	optimalizace, uložení a prezentace dat
CesiumJS	1.140	webová vizualizace terénních depresí
CloudCompare	2.13.2	zpracování bodových mračen
Potree	1.8	vizualizace masivního bodového mračna
PotreeConverter	2.1.1	optimalizace bodového mračna
XAMPP	8.2.12	zobrazení masivního bodového mračna

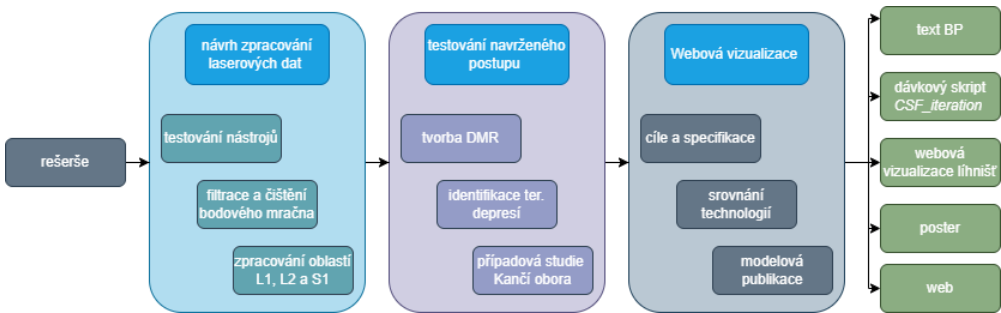
Hardwarové specifikace

Veškeré editace, analýzy, testy a vizualizace byly provedeny na stolním počítači s následující specifikací:

Tabulka 2 Hardwarová specifikace použitého stolního počítače

Komponenta	Modelová specifikace
Procesor (CPU)	AMD Ryzen 5 3600 (6 jader, 12 vláken)
Operační paměť (RAM)	DDR4 32 GB
Grafická karta (GPU)	NVIDIA GeForce RTX 3060 Ti (8 GB VRAM)
Uložiště (SSD)	KINGSTON SFYRD2000G (NVMe PCIe 4.0, 2 TB)

3.6 Postup zpracování



Obr. 4 Postup zpracování bakalářské práce

3.7 Použití AI

Při psaní bakalářské práce byl použit generativní AI (Artificial Intelligence) model Gemini 3.1 Pro v souladu s platným doporučením Univerzity Palackého. V rámci rešeršní činnosti byl použit pro vyhledávání relevantních vědeckých článků a publikací. Při vlastním řešení byl využit k hlubšímu pochopení zkoumané problematiky a při tvorbě a ladění webové aplikace postavené na knihovně CesiumJS a dávkového souboru pro hierarchickou filtraci bodových mračen. Žádné výstupy modelu nebyly přejaty bez externí validace jejich pravdivosti, platnosti či funkčnosti.

4 FILTRACE A ČIŠTĚNÍ LASEROVÝCH DAT

V této kapitole je popsán proces plnění prvního dílčího cíle této práce, kterým je vytvoření replikovatelného postupu zpracování bodových mračen tak, aby výstupem byly pouze body reprezentující povrch. Pro splnění cíle byla provedena řada experimentů nad vybranými částmi bodového mračka CHKO Litovelské Pomoraví pořízeného v rámci projektu MOSPREMA (detailní popis v podkapitole 3.4).

Zvolená testovací oblast L1 se nachází v intravilánu a okolí obce Lhota nad Moravou, jejíž sken je uložen v souboru LITOVEL 1-5_3.laz. Velkou část bodového mračka pokrývá pískovna Náklo, pomocí bounding-box nástroje v CloudCompare byl proto proveden výřez o rozloze zhruba 900 x 550 m (Obr. 5). Takto vytyčená testovací oblast obsahuje velkou různorodost krajinných a antropogenních jevů. Lze v ní nalézt vodní plochy a toky, hustou i řídkou vegetaci, zástavbu, pole i náspy a mosty. Celkově toto bodové mračno obsahuje 32 913 913 bodů a velikost dat na disku v komprimovaném LAZ formátu činí 218 407 kB.



Obr. 5 Bodové mračno v rozsahu testovací oblasti L1 (zdroj: autor).

4.1 Filtrace bodového mračka

Pro filtraci bodového mračka byl zvolen nástroj CSF, který byl v rámci rešeršní činnosti shledán vhodným pro použití i v oblastech s hustší vegetací. Vyzkoušen byl také poloautomatický klasifikační nástroj, dostupný v proprietárním SW 3DSurvey.

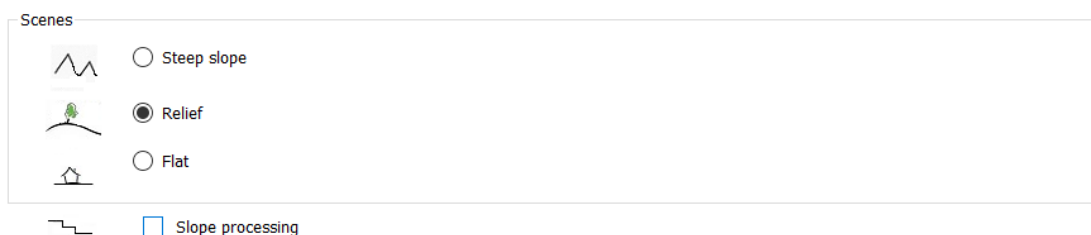
4.1.1 Filtrace pomocí nástroje CSF

Prvním krokem filtračního procesu v CloudCompare bylo testování parametrů pluginu nástroje CSF. Ten je dostupný z lišty *Plugins* → *CSF Filter*. Zaznamenané metriky použitých parametrů, délky doby zpracování filtru a procentuální míry bodů klasifikovaných do kategorie *ground* v jednotlivých konfiguracích jsou uvedeny v příloze 2.

Testování bylo zahájeno spuštěním filtru ve výchozím nastavení obecných i pokročilých parametrů (konfigurace #1). Výsledné bodové mračno dobře a rychle odfiltrovalo většinu nežádoucích bodů, a to jak v zalesněných, tak i zastavěných oblastech. Filtr ovšem

nesprávně klasifikoval paty budov a části vegetace blízko země, došlo tedy k výrazné chybě II. typu. Dalším nedostatkem bylo chybné klasifikování části silnice a náspu jako *non-ground* objektů, tedy nastala i chyba I. typu. Na základě těchto poznatků bylo výchozí nastavení filtru zhodnoceno jako nevyhovující.

Konfigurací #2 byl porovnán vliv obecných parametrů (Obr. 6) s ponecháním výchozích hodnot pokročilých parametrů. Základním parametrem je výběr typu terénu s možnostmi plochý (*Flat*), členitý (*Relief*) a strmý (*Steep slope*). Při zvolení možnosti strmého terénu je v dokumentaci nástroje doporučeno zakliknout checkbox *Slope processing*, který může vést k odstranění chybné klasifikace u ostrých terénních hran (CloudCompare, 2016).



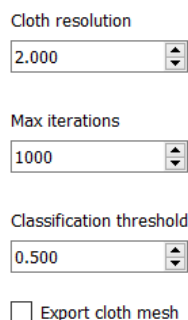
Obr. 6 Obecné parametry CSF (zdroj: CloudCompare).

Jako výchozí je zvolena možnost členitého terénu, byla proto opět použita konfigurace #1. Strmý terén s aktivovaným *slope processing* nastavením byl zapsán jako konfigurace #2. Varianta plochého terénu byl testována jako konfigurace #3. Ze sledovaných metrik je patrné, že konfigurace #1 a #3 mají srovnatelné výsledky s totožnou délkou zpracování a odchylkou v míře klasifikovaných bodů menší než 0,2 %. Vizuální porovnání výsledných bodových mračen také neodhalila zásadní změnu v klasifikaci u žádného z pozorovaných objektů. Rozdílné výsledky přinesla konfigurace #2, která měla oproti zbylým konfiguracím delší trvání zpracování i o více než jedno procento bodů klasifikovaných jako *ground*. Vizuálně byla mezi konfigurací #2 a zbylými konfiguracemi nejvýraznější změna v lepší klasifikaci bodů reprezentujících násep, vyvýšenou část silnice a most (Obr. 7). Žádná z testovaných konfigurací nedovedla odfiltrovat artefakty bodů reprezentujících přízemní vegetaci ani paty budov, lze ale konstatovat, že použití strmého (*steep slope*) terénu přineslo nejlepší výsledky.



Obr. 7 Porovnání členitého (vlevo), plochého (střed), a strmého (vpravo) nastavení CSF (zdroj: autor).

Dalším krokem bylo testování pokročilých parametrů filtru. Těmito parametry jsou rozlišení simulované látky (*Cloth resolution*), maximální počet iterací filtru (*Max iterations*) a mezní hodnota klasifikace (*Classification threshold*) (Obr. 8). V pokročilých parametrech je také možnost exportovat látku jako mesh, která nebyla pro potřeby filtrace relevantní.



Cloth resolution

2.000

Max iterations

1000

Classification threshold

0.500

☐ Export cloth mesh

Obr. 8 Pokročilé parametry CSF s výchozími hodnotami (zdroj: CloudCompare).

Zvýšení počtu maximálních možných iterací nad výchozí hodnotu 500 nepřinesl žádnou změnu ve výsledcích klasifikace, pro všechny následující konfigurace byla tedy tato hodnota ponechána. Přednastavená hodnota rozlišení simulované látky je 2 (jednotka závisí na metrickém systému vstupního bodového mračka, v popisovaném případě se jedná o metry). Změna této hodnoty vede k upravení hrubosti simulované látky. Nižší hodnota lépe zachycuje ráz bodového mračka za cenu delší zpracovací doby. Mezní hodnota klasifikace má předem nastavenou hodnotu 0.5 (jednotky opět závisí na metrickém systému bodového mračka). Úprava této hodnoty mění tolerovanou vzdálenost bodu od simulované látky pro klasifikaci jako *ground*.

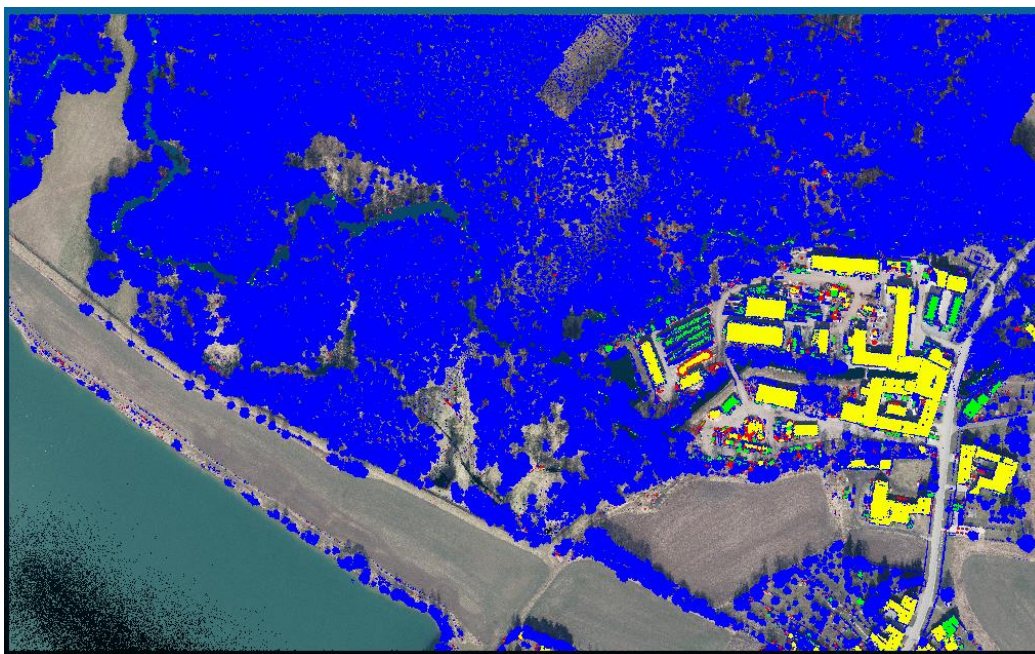
Dále bylo provedeno testování hierarchického přístupu k filtrování, inspirovaného metodikou pro zpracování dat v SW CloudCompare (The 3rd Dimension, 2023). Postupováno bylo násobným zvyšováním hodnot parametrů rozlišení simulované látky a mezní hodnoty klasifikace pro filtraci výstupu bodů klasifikovaných do kategorie *ground* v předchozí iteraci. V konfiguraci #4 byly ponechány výchozí obecné parametry (členitý reliéf bez *slope processing* nastavení), sníženy byly ale parametry rozlišení simulované látky na 0.2 m a mezní hodnota klasifikace byla stanovena na 0.4 m. Tyto parametry byly vybrány jako hraniční pro časovou náročnost procesu, neboť snížení parametrů pod tyto hodnoty vedlo ke zpracování delším než půl hodiny. Bodové mračno klasifikované konfigurací #4 odfiltrovalo oproti konfiguraci #1 menší množství nežádoucích bodů (vyšší chyba II. typu), nedošlo však k chybnému zařazení *ground* bodů do kategorie *off-ground* (nenastala chyba I. typu). Takto zpracované bodové mračno může být použito pro iteraci filtru s agresivnějšími parametry.

S konfigurací #4 bylo porovnáno identické nastavení pokročilých parametrů, ale s aktivním *slope processing* nastavením (konfigurace #5) a jeho kombinací s variantou strmého terénu (konfigurace #6). Doba zpracování mezi konfiguracemi nepatrně narostla, ale stejně tak i procentuální míra bodů klasifikovaných jako *ground*. Vizuální kontrolou výstupu bylo zjištěno, že konfigurace #5 a #6 také nevyústily v chybu I. typu, ale jinak vedly mezi sebou ke srovnatelným výsledkům. Oproti tomu konfigurace #4 přesněji odfiltrovala shluky bodů v husté vegetaci a na okrajích střech, více ale chybovala v klasifikaci dolních částí budov. Jelikož správné odstranění bodů blízko terénu je pro úspěšnou filtraci bodového mračka zásadnější, byly pro následné iterace použity body klasifikované jako *ground* v konfiguraci #6.

Tyto body byly filtrovány v konfiguraci #7 dvojnásobnými hodnotami parametrů rozlišení látky (0.4 m) a mezní hodnoty klasifikace (0.8 m) oproti konfiguraci #6. Obecné parametry byly ponechány identické s konfigurací #6. Tímto bylo dosaženo požadovaného odfiltrování další části bodového mračka se stále nulovou chybou I. typu. Úprava parametrů i snížení počtu bodů vstupního mračka vedlo ke značnému zrychlení procesu filtrace.

V konfiguraci #8 byly opět zdvojnásobeny hodnoty parametrů rozlišení látky (0.8 m) a mezní hodnoty klasifikace (1.6 m) s ponecháním obecných parametrů. Vstupními daty byly body klasifikované hodnotou *ground* v konfiguraci #7, šlo tedy o třetí iteraci CSF filtru. Z výsledného *ground* bodového mračka byly odstraněny střechy budov a největší shluky bodů v husté vegetaci, stále však nedošlo k odfiltrování žádných bodů skutečně reprezentujících terén.

Další zdvojnásobení hodnot parametrů ve čtvrté iteraci filtru (konfigurace #9) již nevedlo ke změně výstupu filtru. Byla proto otestována konfigurace #8 se snížením hodnoty parametru mezní hodnoty klasifikace zpět na výchozí hodnotu 0.5 m se zachováním parametru rozlišení látky na hodnotě 0.8 m (konfigurace #10). Ve výstupním bodovém mračku byly správně odfiltrovány další nežádoucí body, došlo ovšem k výskytu chyby I. typu, a to u hromad sypkých materiálů, vyskytujících se v zastavěné oblasti. Odstranění těchto hromad je pro tvorbu DMR žádoucí, další zpřísnění parametrů vedlo ovšem k odfiltrování náspu a mostní komunikace. Vzhledem k těmto výsledkům byl postup hierarchického použití filtru na bodové mračno zhodnocen jako použitelný a vhodný.



Obr. 9 Výsledek hierarchické iterace CSF filtru (pořadí: modrá, zelená, žlutá, červená) (zdroj: autor).

4.1.2 Filtrace pomocí poloautomatické klasifikace

Software 3DSurvey umožňuje provést poloautomatickou klasifikaci pro odlišení bodů reprezentujících terén od zbytku bodového mračka. Tento nástroj je dostupný z lišty *Point cloud* → *Tools* → *Classification*. V prvním dialogovém okně po spuštění klasifikace je zobrazen náhled vybraného bodového mračka a sada parametrů, které může uživatel upravit (Obr. 10). V druhém dialogovém okně může uživatel vybrat kliknutím na bodové mračno části, které jednoznačně reprezentují terén. Na základě těchto manuálně vybraných ploch a předem stanovených parametrů je provedena filtrace bodového mračka.

Select point cloud:

testovací_plocha_cc

Terrain elevation: 0,05m

Terrain slope: 18,00°

Minimal height: 0,50m

Regular grid mesh cell size: 0,50m

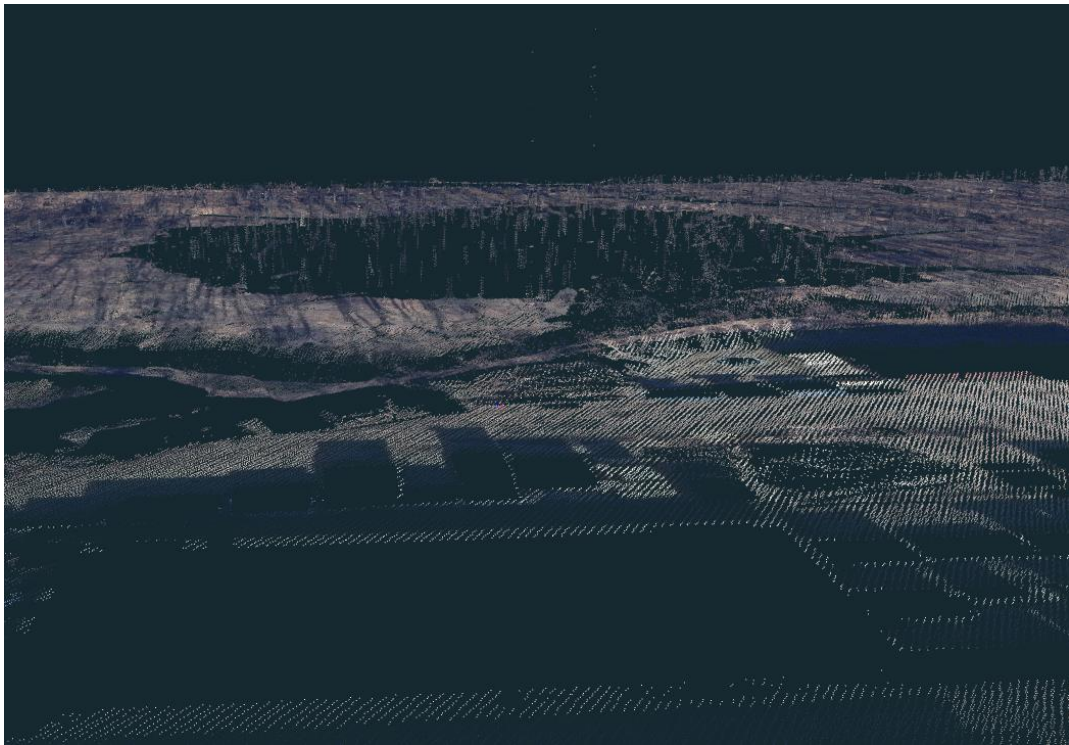
Smoothing factor: ☒ 1

Smoothing max distance: 0,05m

☐ Point cloud from laser scanning (LIDAR)

Obr. 10 Parametry poloautomatické klasifikace (zdroj: 3DSurvey).

Použití výchozích hodnot parametrů na testovací oblast vedlo ke klasifikaci 58,63 % bodů do kategorie *ground*. Klasifikace byla velmi kvalitní v intravilánu, kde zanechala minimální artefakty bodů reprezentujících budovy. Významná chybovost klasifikace byla ovšem patrná v hustě zalesněných oblastech, ve kterých vznikly velké oblasti bez klasifikovaných bodů *ground*, ale s neodfiltrovanými *non-ground* body (Obr. 11).



Obr. 11 Rozdíl kvality filtrace v intravilánu a zalesněné oblasti (zdroj: autor).

Následně bylo testováno použití výchozího nastavení filtru se zvolením možnosti *Point cloud from laser scanning (LIDAR)*. Tato funkcionalita byla v testované verzi SW zhodnocena jako nepoužitelná, neboť ve fázi manuálního výběru terénu vedla při zvolení jakéhokoliv terénního bodu k označení většiny bodového mračka, nikoliv pouze požadovaných bodů.

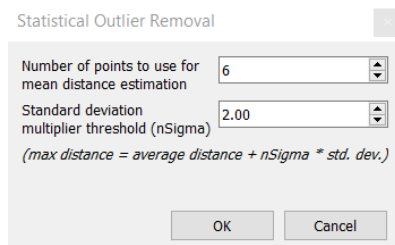
Testováno bylo několik konfigurací nástroje, žádné z nastavení však nevedlo k výraznému zlepšení filtrace v zalesněných oblastech. Poloautomatická klasifikace v SW 3DSurvey byla tedy vyhodnocena jako nevyhovující pro použití v těchto oblastech.

4.2 Čištění bodového mračka

Čištění bodového mračka znamená odstranění nežádoucích bodů. Ty mohou být chybně klasifikované, nebo vzniklé chybou ve snímání. V rámci této podkapitoly byly testovány filtry SOR a Noise, dostupné v SW CloudCompare.

4.2.1 SOR filtr

SOR filtr umožňuje uživateli odstranit odlehlé body v bodovém mračnu. Dostupný je z lišty *Tools* → *Clean* → *SOR filter*. Po otevření nástroje může uživatel upravit parametry, na základě kterých je spočtena maximální povolená vzdálenost mezi body (Obr. 12). Výstupem filtru je nový soubor s koncovkou *.clean* bez bodů určených jako šum.



Obr. 12 Parametry SOR filtru (zdroj: CloudCompare).

Při použití filtru s výchozími hodnotami na bodové mračno klasifikované hierarchickou iterací nástroje CSF (viz oddíl 4.1.1) bylo jako šum identifikováno 7,63 % bodů. V Intravilánu byly správně odfiltrovány téměř všechny body reprezentující paty budov, stejně tak byla odstraněna část bodů v tocích a vodních plochách. V zalesněných oblastech, ve kterých se kvůli vegetačnímu krytu nacházelo méně bodů reprezentujících terén, se stalo bodové mračno po použití filtru výrazně řidší. Aplikování výchozího nastavení filtru na neklasifikované bodové mračno testovacího území vedlo k odfiltrování 12,27 % bodů. Primárně došlo k prořidnutí vegetace a odstranění některých bodů reprezentujících stěny budov (oproti CSF filtru se jednalo o body po celé délce stěny, ne pouze paty budov). Jelikož pro fungování CSF filtru není hustota vegetace výše nad povrchem zásadní, bylo pro finální postup doporučeno použití SOR filtru po klasifikaci. Nevýhodou tohoto nástroje je fakt, že body určené jako odlehlé nelze vyčlenit do samostatného bodového mračna (jako je tomu u CSF), ale jsou nenávratně odstraněny.

Hodnota parametru počtu bodů pro výpočet průměrné vzdálenosti byla nepřímo úměrná délce zpracování nástroje. Navýšení počtu bodů vedlo k nepatrně menšímu počtu bodů identifikovaných jako šum. Snížení hodnoty parametru vedlo k většímu prořidnutí bodového mračna v nežádoucích místech.

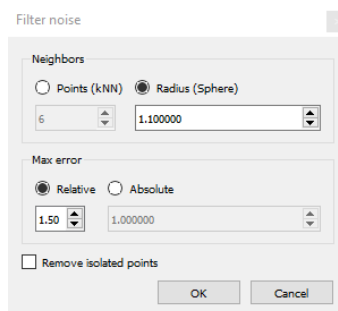
Změna hodnoty parametru *nSigma* na 0,5 při ponechání výchozího počtu bodů vedla k určení 16,87 % bodů v mračnu jako šum. Tím došlo k výrazné decimaci bodového mračna v místech s nižší hustotou bodů. Zvýšení hodnoty parametru na 2 (Obr. 13) vedlo k odstranění 3,19 % bodů. Při tomto nastavení byla provedena srovnatelná míra eliminace nežádoucích bodů s vyšší mírou zachování bodů žádoucích. Z provedených testů byl vyvozen závěr, že pro zadaný cíl je SOR filtr dobře použitelný ve výchozím nastavení, případně s navýšením hodnoty *nSigma*.



Obr. 13 Detail testovacího území před (vlevo) a po (vpravo) použití SOR filtru (zdroj: autor).

4.2.2 Noise Filtr

Noise Filtr je také dostupný v SW CloudCompare v liště *Tools* → *Clean* → *Noise filter*. Oproti SOR filtru je zde podmínkou pro určení odlehlosti bodu vzdálenost od lokální roviny, vytvořené metodou nejmenších čtverců ze sousedních bodů. Nástroj umožňuje definování sousedících bodů pomocí číselné hodnoty počtu bodů, v dokumentaci nástroje je tento postup nedoporučován pro bodová mračna s výrazně kolísající hustotou (CloudCompare, 2015). Druhou možností je definování sousedství poloměrem koule. Plugin také umožňuje odstranění bodů, které ve svém sousedství měly méně než tři další body. Maximální povolená vzdálenost může být definována relativně (jako faktor chyby reprojekce sousedních bodů na rovinu), nebo absolutně (Obr. 14).



Obr. 14 Parametry Noise Filtru (zdroj: CloudCompare).

Použití filtru s doporučenou hodnotou poloměru (závislou na průměrné hustotě bodového mračna) a výchozí hodnotou relativní maximální odchylky na bodové mračno klasifikované hierarchickou iterací CSF filtru vedlo k odfiltrování méně než jednoho procenta bodů. Možnost *Remove isolated points* s identickými parametry naopak vedla k odfiltrování 29,65 % bodů napříč celým bodovým mračnem. Stejně jako je tomu u SOR filtru, veškeré body, které jsou identifikované jako odlehlé, nejsou vyexportovány do separátního bodového mračna, ale jsou smazány.

Testováním různých konfigurací parametrů bylo zjištěno, že optimální hodnotu parametru *Neighbours* je vhodné nastavit tak, aby se v sousedství každého bodu vyskytovalo průměrně okolo osmi bodů (pro testovací oblast L1 byla tato hodnota 1.1). Míra decimace bodového mračna je primárně ovlivněna úpravou hodnoty maximální povolené chyby. Neoptimálnější výsledky (zhodnocené vizuální komparací výstupů) přinesla hodnota 1,5. Výše zjištěné optimální hodnoty parametrů byly použity na bodové mračno klasifikované hierarchickou iterací nástroje CSF a čištěné SOR filtrem. Proces zpracování algoritmu trval 61,7 s a celkově odfiltroval 12,4 % bodového mračna.

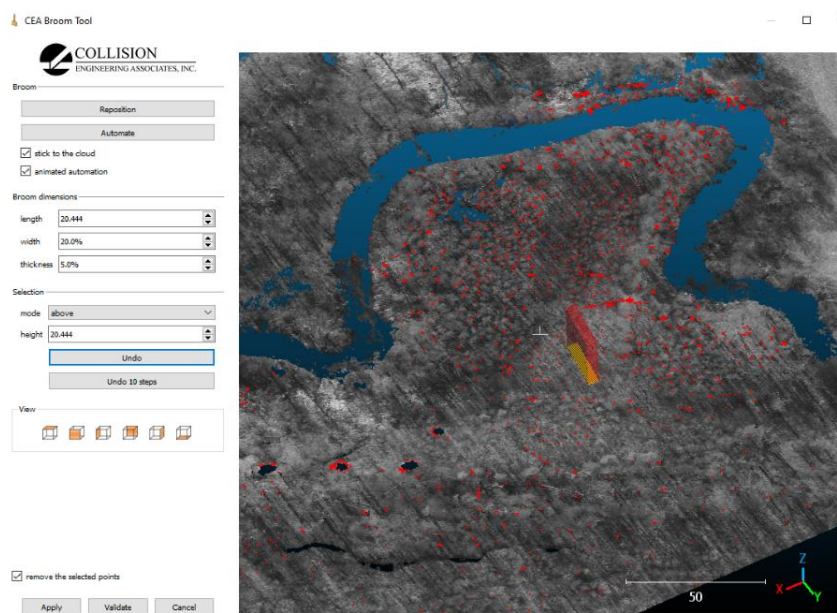
4.3 Manuální editace dat

I po vyčištění bodového mračna od odlehlých hodnot s pomocí filtrů zpracovávaná data stále obsahovala body kategorie *off-ground*. Bylo proto přistoupeno k manuální segmentaci a čištění bodového mračna. V rámci této podkapitoly byly hodnoceny nástroje dostupné pro tento účel v SW CloudCompare a 3DSurvey.

4.3.1 CEA Virtual Broom

Tento nástroj, dostupný jako plugin v SW CloudComapre, byl vyvinut primárně pro jednoduché odstranění nežádoucích bodů nad rovným povrchem. Vzhledem k převážně rovinatému rázu terénu ve sledované oblasti bylo testováno využití nástroje na odstranění zbylých nežádoucích bodů po klasifikaci CSF filtrem. Plugin lze spustit z lišty *Plugins* → *CEA Broom Tool*. Po jeho spuštění je otevřeno okno s vybraným bodovým

mračnem, ve kterém lze po kliknutí na tlačítko *Reposition* vybrat dva body v bodovém mračně. Mezi těmito body je vytvořen pomyslný „smeták“, tedy žlutý box o zvolené délce, 20% šířce a 5% výšce. Nad tímto boxem je druhý, červený box o uživatelsky definované výšce (měněné parametrem *height*). Všechny body, které spadají do červeného boxu, jsou při pohybu nad mračnem označeny jako potenciálně nežádoucí. Pohyb boxu je možné provést buď manuálně, nebo pomocí tlačítka *Automate* a vybráním oblasti, která má být vyčištěna. Použití tohoto nástroje na CSF klasifikované bodové mračno v zalesněné oblasti přineslo velmi pozitivní výsledky, neboť nástroj správně zachytil zbývající nežádoucí body (Obr. 15).



Obr. 15 Ukázka uživatelského rozhraní nástroje CEA Virtual Broom (zdroj: CloudCompare).

Efektivní využití nástroje vyžaduje seznámení uživatele s filtrovaným terénem, neboť nástroj samotný je velmi náchylný na odstranění svahů a dalších míst s proměnlivým terénem (např. břehy toků a vodních ploch).

Vzhledem ke specifickému využití nástroje nejde doporučit jednotně vhodné nastavení rozměrů boxu, v rámci testování různých konfigurací systému se osvědčilo použití většího boxu (50–100 m) se snížením hodnoty *thickness* na 2.0 % pro zachycení nejvýznamnějších odlehlých bodů v oblasti a následně použití menšího boxu s výchozí výškou pro jemnou editaci kritických míst, ve kterých jsou patrné či očekávané odlehlé hodnoty (například se jedná o místa s hustou vegetací, břehy či nežádoucí kupy materiálu v intravilánu).

4.3.2 Nástroje manuální segmentace

SW CloudCompare i 3DSurvey umožňují provést manuální editace bodového mračna. V CloudCompare jsou pro tento účel vhodné nástroje Cross Section a Segment. Obdoba těchto nástrojů existuje i v sw 3DSurvey, který navíc nabízí funkcionalitu výběru bodů na základě jejich RGB hodnoty. Pro přehlednost popisu těchto nástrojů je tato kapitola dále rozčleněna.

Cross Section/Bounding-box

Cross Section je nástroj, který umožňuje extrakci bodů uvnitř či vně definovaného boxu, jehož rozměry lze upravit zadáním číselných hodnot či posuvem rukojeti jedné z os. Nástroj je dostupný v SW CloudCompare, v liště *Tools* → *Segmentation* → *Cross Section*. Ekvivalentem tohoto nástroje v SW 3DSurvey je nástroj Bounding-box (dostupný

v plovoucí nabídce v levém horním rohu obrazovky). Přínos použití nástroje spočívá v možnosti rychlé editace bodového mračna, např. pro potřeby hrubého ořezu zájmového území.

Testováno bylo použití nástroje pro odstranění *non-ground* bodů posunutím horního madla osy-z těsně nad polohu nejvyššího *ground* bodu. Na takto oříznuté bodové mračno bylo použito nástroje CSF v konfiguraci #6. Oproti neupravenému bodovému mračnu bylo zpracování výrazně rychlejší (rozdíl 253 s), ale odstranění střech vedlo k větší chybě II. typu u přízemních bodů budovy. V zalesněných oblastech je tato chyba méně patrná, nejvíce se projevuje u bodů vegetace nad břehovou linií. Ani následnou hierarchickou iterací CSF filtru konfiguracemi #7, #8 a #10 nebyly tyto body odstraněny. Teprve po použití SOR a Noise filtru bylo dosaženo výsledků srovnatelných s neoříznutým bodovým mračnem. Použití Bounding-box nástroje bylo zhodnoceno jako možné pro zrychlení výpočetního procesu klasifikace, avšak za cenu mírně snížené přesnosti filtračního procesu.

Segment/Select/Select from CAD

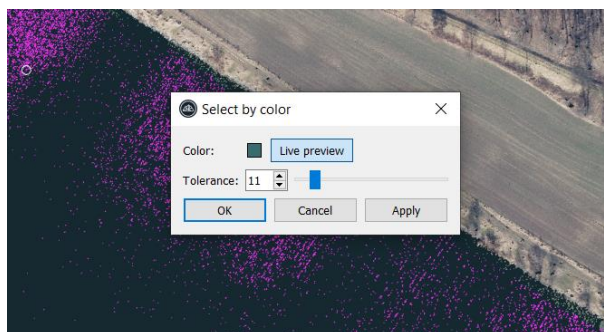
Použití těchto nástrojů umožňuje výběr bodů vyskytujících se v prostoru definovaném vektorovou geometrií. V SW CloudCompare je nástroj dostupný v horní liště *Edit* → *Segment*, v SW 3DSurvey v pravé boční nabídce, sekce *Polygon selection* → *Select* → *From CAD*. Při zakliknutí tlačítka *Select* bez zvolení další možnosti může uživatel jednoduše označit oblasti, které chce z bodového mračna vyjmout definováním vrcholů polygonu.

Nástroj Segment umožňuje přímou tvorbu polygonů a polylinií, případně použití již existujících vektorových vrstev v databázi výběrem tlačítka *Use existing polyline*. Vektorová data mohou být vložena ve formátu .shp či .dxf. Do SW 3DSurvey je možné vložit pouze CAD nativní formáty.

Využití segmentačních nástrojů v procesu zpracování bodového mračna je velmi významné. Jedním z příkladů užití je oříznutí bodového mračna na rozsah CHKO. Další využití může vést k odstranění nežádoucích bodů, vzniklých odražením LiDAR paprsku od vodní hladiny. Stejně tak je vhodné odstranit listí, spadlé stromy a jiný nános zachycený na vodní hladině. V intravilánu může být využito manuální segmentace pro odstranění zbývajících bodů odražených od zdí budov a také nežádoucích kup materiálu. V rámci subjektivního hodnocení efektivity práce se segmentačními nástroji je preferováno řešení poskytované SW 3DSurvey.

Select by color

Tento nástroj, dostupný pouze v SW 3DSurvey, umožňuje uživateli výběr bodů s totožnou či podobnou RGB hodnotou. Spuštění dialogového okna výběru bodů je možné z pravého panelu *Polygon selection* → *Select* → *By color*. Přejíždění myši po bodovém mračnu zobrazuje barvu vybraného bodu. Růžovým zbarvením částí bodového mračna je poté signalizována podobnost hodnoty těchto bodů (Obr. 16). Míru tolerance podobnosti bodů lze upravit pomocí parametru *Tolerance*.



Obr. 16 Dialogové okno nástroje Select by color (zdroj: 3DSurvey).

Využití nástroje v procesu zpracování bodového mračna může být přínosné při výběru bodů velkých vodních ploch, neboť body ve vodních tocích byly zastíněné vegetačním krytem, a proto jejich RGB hodnota splývala se zbytkem bodového mračna.

4.4 Návrh zpracování laserových dat

Vzhledem k proměnlivému charakteru skenovaného území i samotných parametrů skenování nelze představit jednoznačný postup pro dosažení dokonalých výsledků, lze ale nastínit obecný postup a uvést doporučení pro zpracování. Veškeré poznatky zde popsané vychází z testování provedených v kapitole 4.

Nultým krokem postupu je seznámení se s daty, a to jak vizuálně (prohlédnutím bodového mračna za účelem odhalení kritických oblastí, jako jsou výrazné terénní hrany či místa s chybnými měřeními vzniklými při sběru dat), tak i datově (zjištění počtu bodů v mračnu, celkové velikosti objemu dat na disku, určení souřadnicového a výškového systému apod.). Také je v tomto kroku vhodné provést předpřípravu dat, tedy spojení překryvných bodových mračen do jednoho, oříznutí mračna pouze do rozsahu požadované oblasti či rozdělení do podružných mračen dle unifikovaného systému (např. dle kladu listů státní mapy).

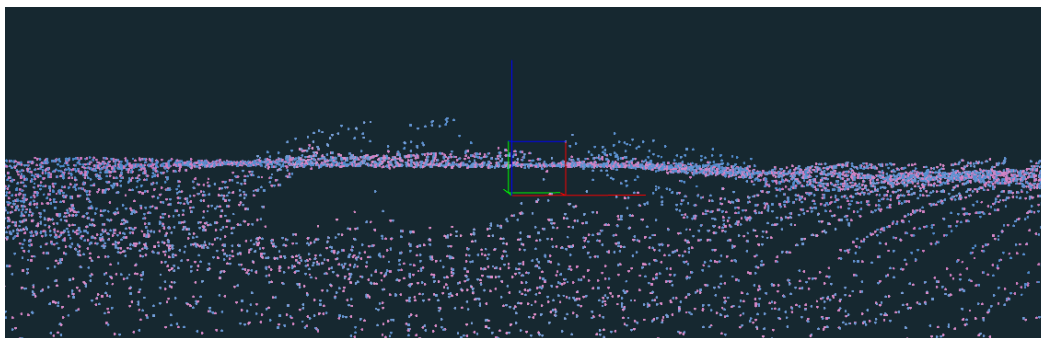
Po seznámení se s daty může být zahájen proces filtrace. Z testovaných metod vyšla jako nejvhodnější hierarchická iterační klasifikace pomocí nástroje CSF. Pro terén s prudkými změnami (např. protipovodňový val, násep nebo most) je vhodné v obecných nastaveních filtru vždy použít hodnotu *Steep Slope* s aktivní možností *Slope Processing*. U pokročilých parametrů nástroje je v závislosti na výkonnosti použitého HW (hardware) vhodné začít s co nejnižšími parametry *Cloth resolution* a *Classification threshold* při ponechání výchozí hodnoty parametru *Max iterations*. Na testované sestavě byly zvoleny hodnoty *Cloth resolution* 0.2 a *Classification threshold* 0.4. Výstupní bodové mračno s *ground* body je poté iterováno geometrickou posloupností s kvocientem 2, dokud filtr nezačne odstraňovat velké části terénu, nebo bude klasifikovat bodové mračno jako 100 % *ground*. Po poslední použitelné iteraci je možné dosáhnout zpřesnění klasifikace použitím výchozí hodnoty *Classification threshold*. Výstupem hierarchické iterační klasifikace pomocí CSF v SW CloudCompare je jedno bodové mračno s *ground* body a několik bodových mračen *off-ground* bodů. Spojení těchto *off-ground* bodů do jednoho mračna je možné s pomocí nástroje Merge, dostupného z lišty *Edit* → *Merge*.

Pokud je vizuální kontrolou bodového mračna zjištěno, že postup klasifikační filtrace byl nedostatečný, je možné přejít k filtračnímu čištění bodového mračna. Použití SOR filtru na bodové mračno s *ground* body může vést k odfiltrování dalších nežádoucích bodů za cenu snížení hustoty bodového mračna v místech s nižší než průměrnou hustotou (např. vlivem chyby skenování či částečným překrytím místa jiným objektem). Pro omezení tohoto negativa je vhodné zvýšení hodnoty parametru *nSigma* na hodnotu 1.5 či 2. Dalším použitelným nástrojem pro čištění mračna je Noise filtr. Při nastavování parametrů nástroje je vhodné v parametru *Neighbors* vždy použít metodu *Radius (Sphere)* s takovou hodnotou poloměru, aby do něj průměrně spadalo 8 bodů. Výsledné bodové mračno je nezanedbatelně zdecimováno napříč celým územím, vede však k dalšímu snížení chyby II. typu.

Jestliže výstupní bodové mračno stále vykazuje vyšší než přijatelnou chybu I. typu (zjistitelnou vizuální kontrolou), je nutno přejít k manuální segmentaci bodového mračna. V rámci testování možností v SW CloudCompare bylo zjištěno, že použití nástroje CEA Virtual Broom může výrazně usnadnit odstraňování zbylých nežádoucích bodů nad rovným terénem. Vhodné je také odstranit body vzniklé odrazem od vodní hladiny, neboť

tyto nelze považovat za terén. Stejně tak je žádoucí manuální segmentace mostních konstrukcí z bodového mračna. Míru času a úsilí věnovanou ruční segmentaci musí ovšem zvážit uživatel v závislosti na požadované kvalitě výsledného produktu.

Aplikací navržené metody zpracování na testovací oblast L1 bylo ve výsledku klasifikováno 57,17 % bodového mračna do kategorie *ground*. Klasifikace provedená v rámci projektu MOSPREMA na totožném bodovém mračnu kategorizovala 57,74 % bodů do kategorie *ground*. Vizuální komparaci těchto klasifikací bylo zjištěno, že vlastní postup zpracování zanechal více nežádoucích bodů v oblastech s pařezy, bázemi kmenů, dřevními zbytky a místy s vysokou hustotou vegetace (Obr. 17).



Obr. 17 Detail srovnání MOSPREMA (růžová) a vlastní (modrá) klasifikací bodů (zdroj: autor).

Do kategorie *off-ground* bylo navrženým postupem zpracování klasifikováno 33,6 % bodů, zbylých 9,3 % bylo odstraněno bez možnosti uložení SOR a Noise filtry.

Vzhledem k požadovanému záměru práce, kterým je identifikace terénních depresí ve zpracovávané oblasti, byly výsledky navrženého postupu zpracování zhodnoceny jako přijatelné. Stejný postup byl tedy použit i pro zpracování dat zájmové oblasti L2 (hustě zalesněná oblast v Litovelském Pomoraví o rozloze 125 ha) a S1 (část CHKO Soutok o rozloze 500 ha).



Obr. 18 Pohled na výsledné body klasifikované jako *ground* oblasti L1 (zdroj: autor).

5 TVORBA A TESTOVÁNÍ DMR

Tato kapitola popisuje proces plnění druhého a třetího dílčího cíle této práce, kterými byly tvorba DMR z vyčištěných a profiltrovaných bodových mračen a testování jeho vhodnosti pro identifikaci potenciálních komářích láníšť. Vytvořené DMR byly porovnány s MOSPREMA digitálním modelem reliéfu, vzniklým právě pro účely monitoringu láníšť.

5.1 Tvorba DMR

Vzhledem k limitaci analytických nástrojů pro potřeby identifikace terénních depresí z bodových mračen je nutné provést abstrakci terénu převedením do rastru, tedy pravidelné pravoúhlé mřížky. Pro tento účel bylo použito nástroje **LAS Dataset To Raster** v SW ArcGIS Pro.

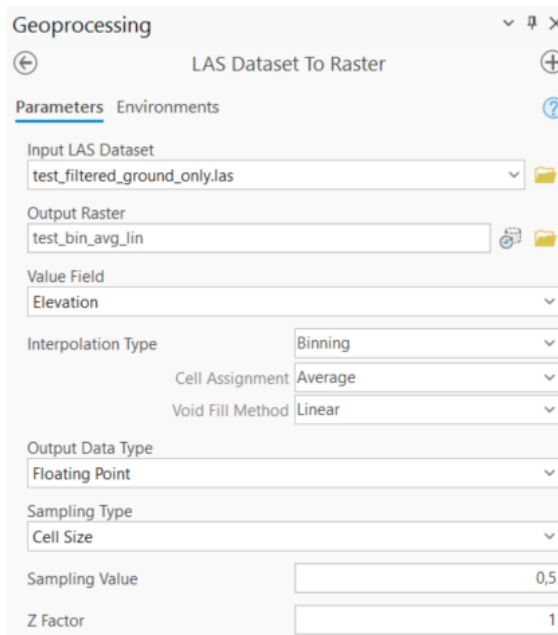
LAS Dataset To Raster

Tento nástroj umožňuje konverzi vstupního bodového mračna do formátu GeoTIFF. Pro určení hodnoty jednotlivých buněk umožňuje použití dvou typů interpolace, a to *Binning* (přiřazující hodnotu na základě stanovené metriky bodů v prostoru buňky) nebo *Triangulation* (určující hodnotu bodů z vygenerovaného TIN povrchu).

Při použití metody *Binning* lze nastavit *Cell Assignment*, tedy způsob určení hodnot buněk s hodnotami Average, Minimum, Maximum, IDW a Nearest. Také je možné upravit metodu interpolace prázdných buněk hodnotami None, Simple, Linear a Natural Neighbour. Z důvodu předpokladu dokonalé spojitosti rastru pro další analýzy byly porovnány pouze metody Linear a Natural Neighbour, jelikož pouze tyto metody předpoklad splňovaly.

Při *Triangulation* metodě lze k vytvoření TINu použít Linear nebo Natural Neighbour interpolační metody. Lze také nastavit decimaci bodového mračna pro tvorbu TINu (toto možnosti nebylo využito z důvodu zachování maximální věrnosti filtrovaného terénu).

U všech generovaných rastrů byl stanoven datový typ Integer a prostorové rozlišení 0,5 m. Pro srovnání byly použity všechny varianty *Cell Assignment* u metody *Binning* a oba způsoby triangulace bez decimace mračna.

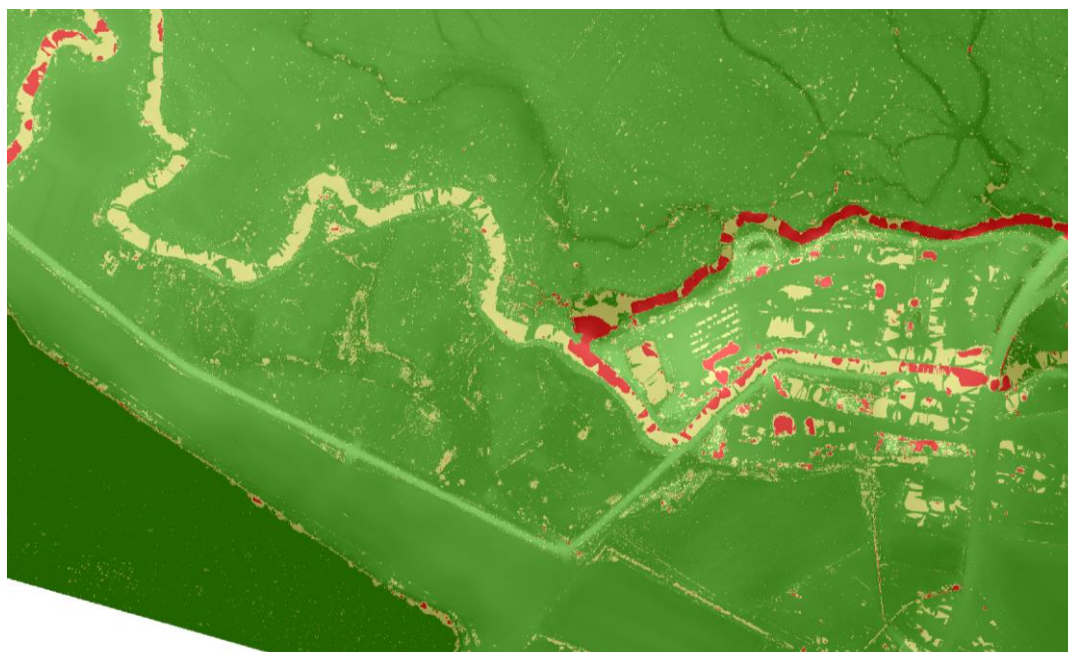


Obr. 19 Dialogové okno nástroje LAS Dataset To Raster (zdroj: ArcGIS Pro).

5.2 Srovnání vlastních DMR s MOSPREMA DEM

Prekryv vybraného území s daty vytvořenými v rámci projektu MOSPREMA umožnil srovnání vygenerovaných rastrů s profesionálně vytvořeným DMR. MOSPREMA DEM byl pomocí nástroje **Clip Raster** ořezán do rozsahu testovací oblasti (přesné zarovnání bylo zajištěno definováním parametru *Snap Raster*). Všechny rastry splňují i další podmínky pro srovnání, a to totožné prostorové rozlišení i souřadnicový systém.

První metodou srovnání bylo zjištění rozdílu hodnot jednotlivých buněk mezi rastry. Výsledné rozdílové rastry byly rozčleněny a obarveny do tří kategorií dle absolutní odchylky výšky (Obr. 20).



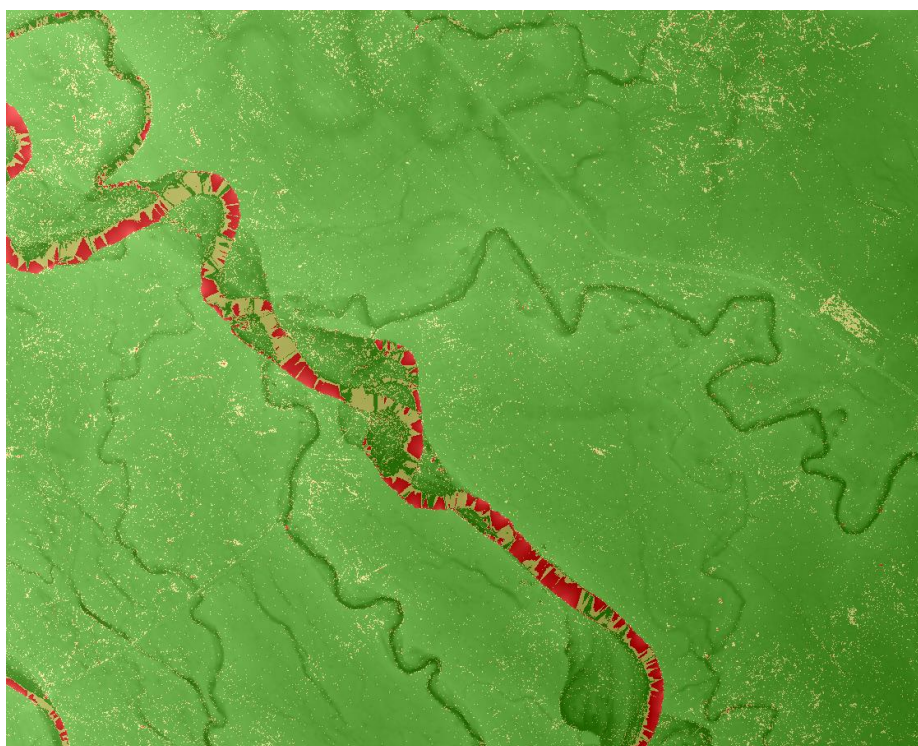
ABSOLUTNÍ ODCHYLKA VÝŠKY

■ menší než 5 cm ■ 5–25 cm ■ více než 25 cm

Obr. 20 Odchylka výškových hodnot rastrů v oblasti L1 (zdroj: autor).

Ze všech testovaných metod určení hodnoty buňky v rastru nastala nejmenší míra odchylky výšek při použití metody *Binning* s *Cell Assignment* hodnotou Average. U této klasifikace je patrné, že nejvýraznější odchylka se vyskytuje v místech manuální editace vodních toků a intravilánu, kde vznikla použitím odlišných metod manuálního čištění bodového mračna a následné interpolace. Výjimkou jsou části vegetace břehové linie a velmi hustého nízkého lesního porostu, které nebyly odfiltrovány CSF filtrem. Střední odchylka se opět nejvíce vyskytuje v interpolovaných oblastech, patrná je ale také u přízemní části vegetace, která nebyla odstraněna ani žádným filtračním algoritmem, ani manuálním čištěním mračna. Zanedbatelná, až nulová, odchylka se poté vyskytovala na všech rovných plochách a v místech nízké hustoty vegetačního krytu.

Pro vyšší objektivitu srovnání byl navržený postup filtrace a tvorby DMR aplikován i na mračno LITOVEL 1-4_3, označovaného dále jako testovací oblast L2, které většinou zachycovalo hustě zalesněnou oblast. Při použití metody *Binning* s hodnotou Average u parametru *Cell Assignment* vyšlo následné porovnání rastrů srovnatelně s předchozí oblastí (Obr. 21). Opět vysoké odchylky mezi rastry nastaly primárně v oblastech vodních toků, střední poté u přízemních částí vegetace a spadlých stromů.



ABSOLUTNÍ ODCHYLKA VÝŠKY

■ menší než 5 cm
 ■ 5–25 cm
 ■ více než 25 cm

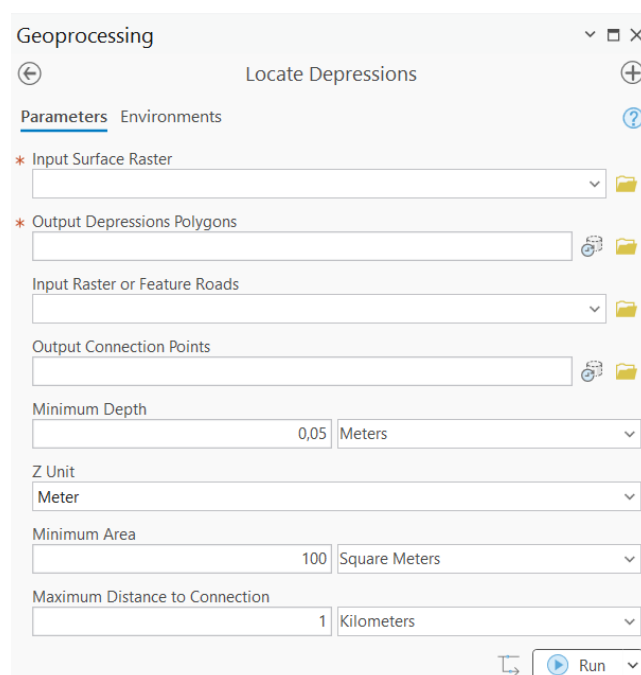
Obr. 21 Odchylky výškových hodnot rastrů v oblasti L2 (zdroj: autor).

Ze srovnání výškového rozdílu rastrů je patrné, že navržený postup zpracování laserových dat nedosahuje přesnosti MOSPREMA filtrace v odstranění přízemních *off-ground* bodů, a to obzvláště v místech husté vegetace a břehů. Tím, že se ale výrazné odchylky nacházely převážně v místech, ve kterých nemá smysl identifikovat terénní deprese (vodní toky či parcely budov), bylo v rámci tohoto srovnání vlastní DMR vyhodnoceno jako použitelné pro další testování.

5.3 Identifikace potenciálních komářích láníšť

Dalším krokem srovnání DMR bylo porovnání oblastí identifikovatelných jako potenciální komáří láníšť. V rámci rešerše byl pro tento účel zvolen skript využívající Priority-flood algoritmu, který vytvořil Zapletal (2023). Stěžejní částí skriptu jsou nástroje Python knihovny *lidar*, umožňující detekci terénních depresí. Zatopením těchto krajinných útvarů vzniká prostředí, které se při splnění dalších klimatických podmínek může stát komářím láníšťem. Použití skriptu v bakalářské práci ovšem nebylo možno provést, a to kvůli nekompatibilitě zastaralé knihovny *richDEM*, na které je knihovna *lidar* závislá, s ostatními požadovanými Python knihovnami.

Jako alternativní řešení pro identifikaci terénních depresí bylo využito geoprocessingového nástroje v ArcGIS Pro. Tímto nástrojem byl **Locate Depressions** z balíčku *Spatial Analyst Tools* (Obr. 22), který umožňuje identifikaci bezodtokých oblastí v rastru. Identifikační proces probíhá na základě vyplnění buněk s nižší hodnotou než jejich okolí a následné odečtení hodnot vyplněného a původního DMR. Výstupem nástroje je polygonová vrstva jednotlivých bezodtokých oblastí se zonálními statistikami.



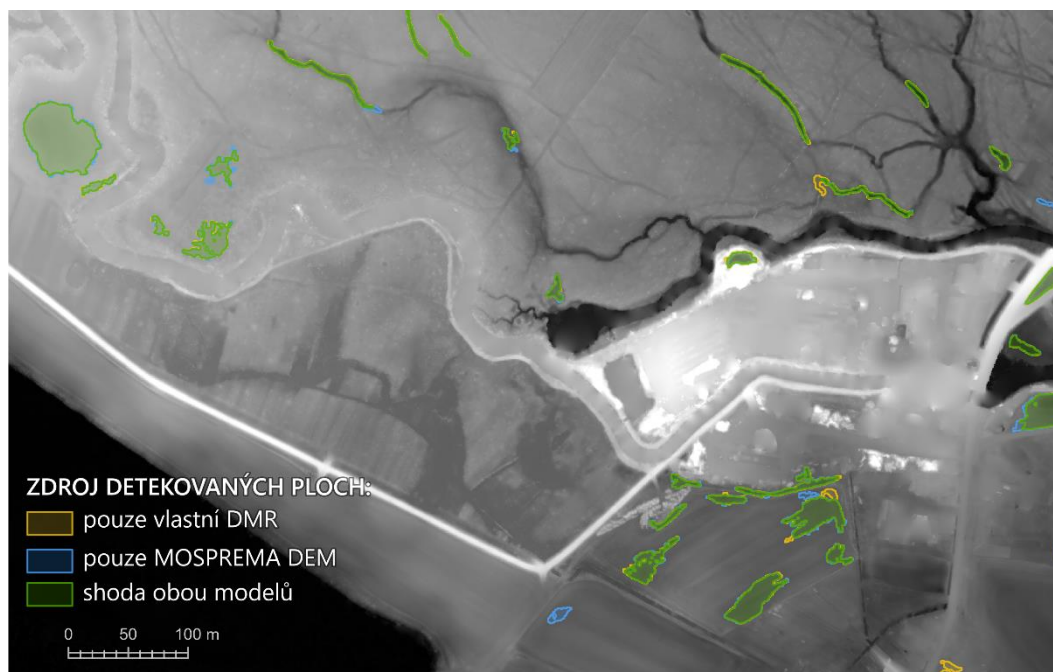
Obr. 22 Dialogové okno nástroje Locate Depressions (zdroj: ArcGIS Pro).

Hraniční parametry identifikovaných depresí byly limitovány minimální hloubkou 5 cm a minimální plochou 100 m². Hraniční hodnota velikosti plochy byla převzata z vrstvy významných terénních depresí identifikovaných v CHKO Litovelské Pomoraví Zapletalem (2023). Parametr *Maximum Distance to Connection* je pro požadovaný účel irelevantní, nebylo ovšem možné jej deaktivovat. Pro odstranění jeho vlivu na filtraci detekovaných tůní byla jeho prahová hodnota nastavena na 1 km.

Tato konfigurace byla použita na testovací oblast L1 z MOSPREMA DEM a všechny varianty vlastních DMR. Z identifikovaných terénních depresí byly následně pomocí nástroje **Select by Location** odstraněny sníženiny překrývající liniovou vrstvou vodních toků a polygonovou vrstvou vodních ploch, získaných z databáze ZABAGED® (v rámci INSPIRE tématu Vodstvo – Fyzické vody / HY_P). V rámci manuální editace byly odstraněny zbylé deprese ležící na jednoznačně určitelném vodním toku, na vodních plochách a v místech intravilánu (pro zamezení vlivu odlišné manuální segmentace kup materiálu).

Sledovanými metrikami byl počet identifikovaných depresí, přesnost modelu (dána poměrem počtu identifikovaných depresí alespoň částečně překrývajících MOSPREMA DEM sníženiny k počtu všech identifikovaných depresí), úplnost modelu (dána poměrem počtu alespoň částečně překrytých MOSPREMA DEM depresí ze všech MOSPREMA DEM depresí v oblasti) a průměrná absolutní odchylka hloubky mezi vlastními a MOSPREMA DEM deprese. Harmonický průměr přesnosti a úplnosti modelu je poté vyjádřen pomocí metriky F1 skóre. Výsledky všech metrik jsou zaznamenány v příloze 3.

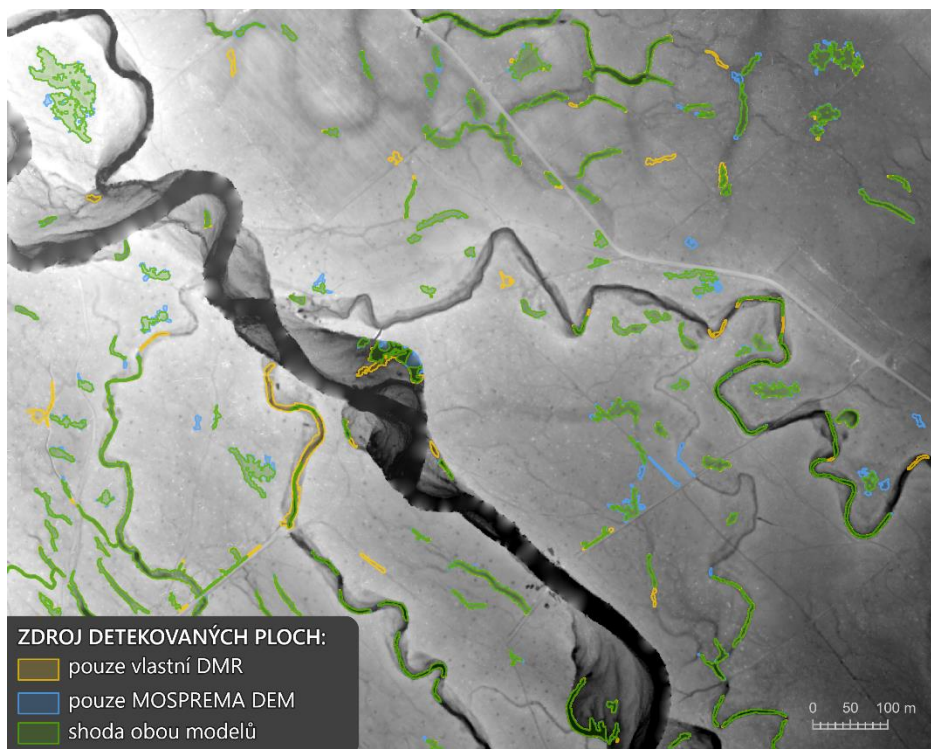
V testovací oblasti L1 bylo dosaženo nejvyšší míry podobnosti identifikovaných terénních depresí za použití DMR vzniklého metodou *Binning Minimum* a *Average*, s metodou lineární interpolace pro prázdné buňky (Obr. 23). F1 skóre obou metod dosáhlo 94,8% úspěšnosti, se dvěma neidentifikovanými MOSPREMA terénními deprese a jednou nově identifikovanou terénní depresí. Střední absolutní odchylka hloubky poté u modelu *Binning Minimum* činila 7,3 cm a 5,5 cm u modelu *Binning Average*. Při použití interpolační metody *Natural Neighbour* došlo ke snížení F1 skóre na 92,9% shodu.



Obr. 23 Srovnání identifikovaných depresí v oblasti L1 (zdroj: autor).

Nevýhodou nástroje **Locate Depressions** je neschopnost identifikace vnořených depresí, tedy menších terénních sníženin uvnitř větších terénních depresí. Tato limitace je obzvláště patrná u větších terénních sníženin, které části své plochy protínaly vodní tok, nikoliv však v jejich nejnižším místě.

Srovnání identifikovaných terénních depresí pomocí metod *Binning Minimum* a *Binning Average* při obou metodách interpolace prázdných buněk bylo provedeno také pro zájmovou oblast L2 (Obr. 24). Největší míra podobnosti zde nastala při použití rastru vzniklého metodou *Binning Minimum* a *Natural Neighbour* interpolací. F1 skóre zde činilo 93,2 %, střední absolutní odchylka hloubky poté 5,1 cm.



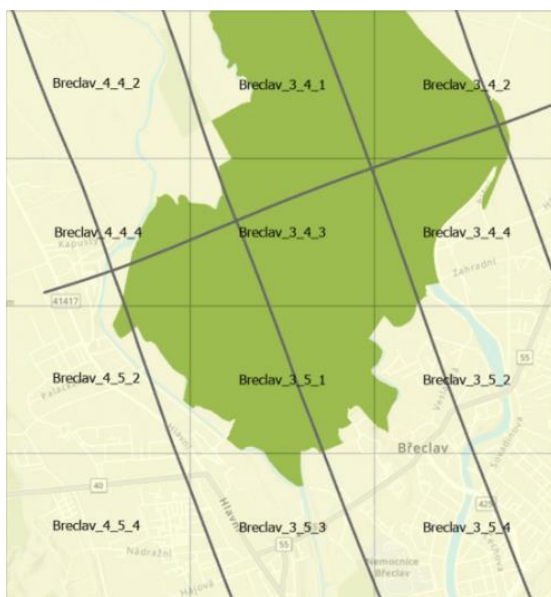
Obr. 24 Srovnání identifikovaných depresí v oblasti L2 (zdroj: autor).

6 PŘÍPADOVÁ STUDIE V CHKO SOUTOK

Navržený postup zpracování laserových dat a identifikace terénních depresí byl hromadně aplikován v rámci případové studie s cílem identifikace potenciálních komářích luhů v části CHKO Soutok. Primárními daty byla bodová mračka pořízená při letecké skenovací kampani, uskutečněné 8. dubna 2024. Předmětem skenování byly části Kančí obory, města Břeclavi a Pohanska. Skenování proběhlo ve čtyřech podélných a dvou příčných letových řadách s použitím skeneru RIEGL VQ-1560II-S, který simultánně skenuje dvěma lasery pod rozdílným úhlem, čímž je zajištěna vyšší hustota a vertikální věrnost mračka. Výsledným produktem skenování bylo 12 LAZ souborů o celkové velikosti 34,2 GB.

Z důvodu časové a technologické náročnosti zpracování byla případová studie omezena na zájmovou oblast S1, tedy plochu Kančí obory, nacházející se severně od města Břeclavi. Prvním krokem ke snížení objemu dat bylo ořezání jednotlivých bodových mraček na rozlohu vytyčené zájmové oblasti. K tomuto účelu bylo použito datové sady velkoplošných zvláště chráněných území poskytovaných AOPK ČR. Samotný proces ořezu byl proveden v SW CloudCompare za pomoci nástroje **Cross Section** a **Segment**.

Pro optimalizaci zpracování byla mračka spojena do jednoho datasetu pomocí nástroje **Create LAS Dataset** z balíčku Data Management v SW ArcGIS Pro. Takto připravený dataset byl následně rozdělen na čtvrtinové buňky mapového kladu SM5 (Obr. 25), a to za použití nástroje **Tile LAS** z balíčku 3D Analyst (toto rozdělení bylo zvoleno na základě shodnosti s formátem výstupů MOSPREMA dat pro Litovelské Pomoraví). Výsledkem předzpracování bylo devět bodových mraček o celkové velikosti 6,67 GB.



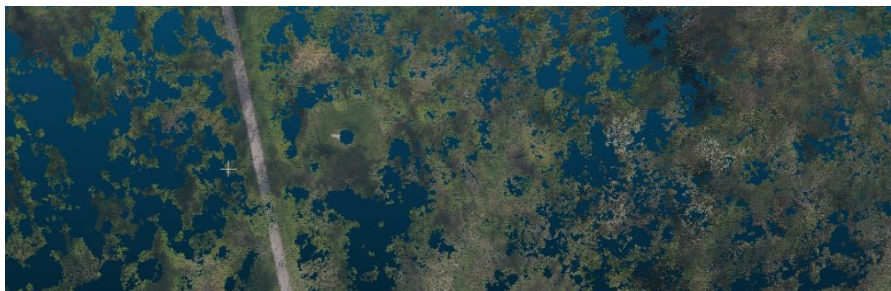
Obr. 25 Rozdělení zájmové oblasti S1 a letové osy (zdroj: autor).

Takto připravená data byla zpracována dle navrženého postupu uvedeného v podkapitole 4.4. Hierarchické použití CSF filtru bylo možné provést hromadně bez specifických úprav nastavení, jediným nutným zásahem do procesu byla vizuální kontrola poslední iterace a případná zpětná editace částí terénu, která nastala u tří z devíti zpracovaných souborů.

Pro automatizaci tohoto kroku byl s použitím modelu Gemini 3.1 Pro vytvořen dávkový skript *CSF_iteration*, který po nastavení parametrů absolutní cesty k SW CloudCompare a adresáři s bodovými mračkami pomocí cyklu FOR provádí čtyřkrokovou hierarchickou iterativní filtraci. Výstupem skriptu je složka obsahující tři bodová mračka, a to *ground*

bodů, *off-ground* bodů prvních tří iterací a *off-ground* bodů poslední iterace k manuální kontrole.

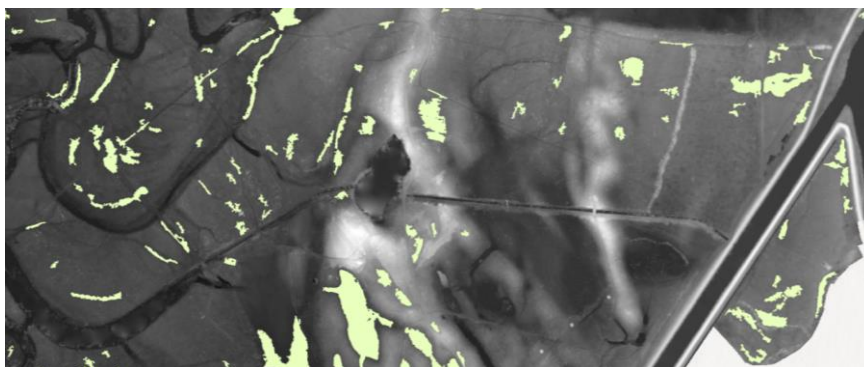
Následné čištění mračen s použitím SOR a Noise filtrů nebylo možno automatizovat, neboť každé vyžadovalo jiné nastavení parametrů pro minimalizování chyby I. typu. Jelikož skenovací kampaň proběhla v období částečně nastoupeného vegetačního období, došlo ke snížené penetraci paprsků na úroveň terénu. V oblastech pod hustým korunovým patrem stromů tedy vznikaly lokality s výrazně sníženou hustotou pozemních bodů, které byly použitím čistících filtrů ještě více redukovány (Obr. 26). Zbylé nežádoucí body zachované volnějším nastavením parametrů čistících filtrů byly alespoň částečně hromadně odstraněny použitím nástroje CEA Virtual Broom.



Obr. 26 Snížená hustota bodů pod hustým porostem (zdroj: autor).

Celková doba zpracování dat pomocí hierarchického CSF skriptu, SOR a Noise filtrů a CEA Virtual Broom zabrala více než pět hodin (z toho 128 minut probíhalo automatické zpracování CSF skriptem). Závěrem zpracování v SW CloudCompare byla vrstvě terénních bodů přiřazena klasifikační hodnota 2 (odpovídající ASPRS hodnotě *ground*) a vrstvě nadzemních bodů hodnota 1 (odpovídající hodnotě neklasifikováno). V SW 3DSurvey byla poté provedena manuální editace za účelem překlasifikování mostních konstrukcí a výrazných reliktů *off-ground* bodů (například skládky kmenů u cest či přízemní vegetace v oblastech nízké hustoty bodů). Tento proces zpracování všech mračen vyžadoval další čtyři hodiny práce.

Po opětovném spojení všech mračen do jednoho LAS datasetu v SW ArcGIS Pro bylo použito nástroje **LAS Dataset To Raster** s agregací hodnot bodů do buněk metodou *Binning Minimum*. Pro interpolaci buněk bez vstupních bodů bylo použito metody *Natural Neighbour*. Prostorové rozlišení vzniklého rastru je 0,5 m. Celý proces rasterizace trval 245 s, velikost výsledného rastru činí 132,55 MB. Následná identifikace významných terénních depresí pomocí nástroje **Locate Depression** s minimálními parametry hloubky 5 cm a rozlohou 100 m² odhalila 520 sníženin. Po odstranění polygonů protínajících liniovou vrstvu vodních toků nebo ploch a manuálním odstraněním polygonů ve vedlejších vodních tocích se počet snížil na 410. Takto identifikované oblasti lze označit za potenciální komáři lihníště.



Obr. 27 Náhled na významné terénní deprese v Kančí oboře (zdroj: autor).

7 ONLINE PREZENTACE MODELŮ

V této kapitole je popsána činnost plnění čtvrtého a pátého dílčího cíle práce, kterými jsou nástin možností prezentace výsledných modelů vytvořených v rámci předchozích kapitol práce a samotná realizace modelové publikace ve zvoleném řešení. Rozdělena je do podkapitol zaměřených na stanovení cílů a specifikací kartografického projektu, porovnání vhodných technologií a vzorové publikace ve zvolených řešeních.

7.1 Cíle a specifikace projektu

Vzhledem ke geografickému aspektu vizualizace identifikovaných komářích líní s pomocí produktů vzniklých z laserových dat bylo pro stanovení cíle a specifikace využito definice kartografického projektu z knihy *„Metody tematické kartografie – Vizualizace prostorových jevů“* (Voženílek a Kaňok, 2011, s. 20–21).

Cílovou skupinou kartografického projektu jsou představitelé samospráv, rozhodující o postupu řešení komářích líní, tedy osoby s obecnou znalostí zákonitostí mapování a GIS technologií. Primární sdělovanou informací vizualizace jsou vyznačené oblasti terénních depresí, které se po zaplavení mohou stát komářích líní. Doplnění širšího geografického kontextu (zobrazení vizualizace nad mapovým podkladem) je žádoucí, neboť umožňuje lépe se orientovat v zobrazovaném modelu. Alternativně lze vizualizaci využít k zobrazení výsledného produktu leteckého skenování v určené oblasti zadavatelů. Pro zajištění jednoduché dostupnosti bez nutnosti instalace specifického SW je žádoucí vizualizaci publikovat v internetovém prostředí.

Ze specifikací projektu je pro řešení vizualizace v digitálním prostředí nejdůležitější návrh obsahu, znakového klíče, technologie a organizačního a ekonomického zabezpečení tvorby. Datovými zdroji obsahu jsou vektorová i rastrová data, meshy a bodová mračna. Je proto žádoucí, aby zvolené webové řešení umožňovalo vykreslit v rámci jedné scény několik typů dat. Tyto specifické požadavky byly doplněny o obecné požadavky na tvorbu interaktivní webové vizualizace, které vydefinovala Dominiková (2025).

7.2 Přehled porovnávaných technologií

Na základě stanovených požadavků byly porovnány možnosti vybraných dostupných webových řešení. Zvažovanými řešeními byly Potree, Babylon.js a platformy Cesium a ArcGIS Online. Pro přehlednost bylo hodnocení jednotlivých kritérií uvedeno v příloze 4. Níže následuje bližší popis jednotlivých řešení.

Potree

Potree je open-source WebGL (web graphics library) prohlížečka optimalizovaná pro vykreslování masivních bodových mračen, kterou v rámci diplomové práce vyvinul Schuetz (2016). Vyvinuta je nad JavaScript 3D grafickou knihovnou Three.js. Primárním zaměřením knihovny je publikace a základní interakce s bodovými mračny ve webovém prostředí, umožňuje ovšem kombinaci s dalšími datovými formáty (objekty, geoinformatické formáty geoJSON a Shapefile). Veškerá Potree data musí být hostovaná na vlastním serverovém řešení, tvorbu webové aplikace z LAS/LAZ souborů lze ale automatizovat použitím aplikace PotreeConverter. Pro svoje kvality a jednoduchost použití je Potree dobrým řešením pro publikaci masivních bodových mračen ve webovém prostředí.

Babylon.JS

Babylon.js je herní engine, vyvíjený společností Microsoft, umožňující tvorbu interaktivních webových aplikací. Práce s enginem je postavena na bázi scén a kamer s primárním

zaměřením na vysokou vizuální věrnost modelů. Engine využívá pokročilých grafických efektů, umožňuje také vykreslovat stíny či odrazy. Nativně nepodporuje použití LAS/LAZ ani GeoJSON formátů, jejich implementace je možná skrze doplňkové knihovny. Také nativně neumožňuje zobrazit modely nad mapovým podkladem, umožňuje ale propojení s mapovými servery pomocí pluginů, alternativně také integraci do platformy Mapbox. Babylon.js funguje pouze jako open-source knihovna, hostování dat je proto opět nutné provádět na vlastním serverovém řešení. V bakalářské práci „3D PREZENTACE ARCHITEKTONICKÉHO DĚDICTVÍ“ (Dominiková, 2025) byla na základě dotazníkového šetření vybrána technologie Babylon.js za nejvhodnější pro prezentaci spojitých vektorových 3D modelů a výstupů fotogrammetrických skenování. Z důvodu složitosti implementace s geoprostorovou složkou požadované vizualizace je knihovna Babylon.js méně vhodným, ale stále použitelným řešením.

Platforma Cesium

Cesium je otevřená platforma pro tvorbu a publikaci 3D geoprostorových aplikací, vyvíjená v souladu se standardy OGS (Open Geospatial Consortium). Rychlé streamování velkých datových souborů zajišťuje implementace standardu 3D Tiles, který konvertuje data do optimalizovaného formátu a provádí rozdělení dat do dlaždic s prostorovou hierarchickou strukturou (Cozzi a Lilley, 2023). Knihovna Cesium.js umožňuje vývoj mapových aplikací, kombinujících georeferencované datové vrstvy bodových mračen, vektorová data, rastry i meshe.

V rámci platformy je také dostupný SaaS Cesium ion, umožňující optimalizaci a hostování dat. Cesium ion je dostupný v bezplatné Community licenci, umožňující nekomerční použití s 5 GB uložištěm a měsíčním limitem 15 GB pro streamování dat. Dále Cesium ion nabízí uživatelsky přívětivou vizuální kompozici 3D scény pomocí nástroje Cesium Stories. Vzhledem ke stanoveným požadavkům je využití platformy Cesium pro potřeby vizualizace komárů líhnišť zhodnoceno jako vhodné.

Platforma ArcGIS Online

ArcGIS Online je proprietární platforma vyvinutá společností Esri. Umožňuje uložení, správu, analýzu i publikaci prostorových dat kompletně ve webovém prostředí. Publikaci 3D dat v geografickém kontextu lze nejsnadněji realizovat pomocí aplikace Scene Viewer. Pro potřeby větší míry kontroly nad webovou aplikací je možné použití ArcGIS Experience Builder, případně ArcGIS API pro JavaScript.

Limitací technologie je kredity zpoplatněné hostování dat na platformě ArcGIS Online, s tarifem 2.4 kreditů za 10 MB dat pro každou datovou vrstvu měsíčně. Stejně tak je zpoplatněno hostování webových map, a to v hodnotě 1.2 kreditů na 1 GB dat měsíčně (Esri, 2026).

7.3 Modelové publikace vizualizací

Na základě uvedených parametrů byla jako nejvhodnější z porovnávaných řešení pro vizualizaci identifikovaných komárů líhnišť zvolena platforma Cesium, umožňující nejen tvorbu jednoduchých prezentací i pokročilých webových mapových vizualizací, ale i hostování datových vrstev v omezeném množství bez finančních nákladů.

Pokud je hlavním cílem vizualizace prezentace velkých bodových mračen (například pro představení finálního produktu ALS zadavateli), nejvhodnější je použití knihovny Potree, optimalizované pro vykreslování masivních bodových mračen.

7.3.1 Interaktivní vizualizace potenciálních komářích láníšť

Plánovaná vizualizace komářích láníšť je konceptuálně složena z podkladu využívajícího DMR pro zobrazení terénu a použití bodového mračna pro vykreslení *off-ground* objektů. Tematický obsah (identifikovaná láníšť) je zobrazen vektorovým „zatopeným“ modelem pro naznačení hloubky (batymetrický poloprůhledný model).

Prvním krokem publikace prostorových dat ve webovém prostředí je nutnost zajištění kompatibility souřadnicových systémů. Veškerá data byla zpracovávána v S-JTSK East North (systém jednotné trigonometrické sítě katastrální) s výškovým referenčním systémem Bpv (Balt po Vyrovnání). Cesium využívá souřadnicového systému WGS 84 ECEF (World Geodetic System 1984 Earth-Centered Earth-Fixed). Při nahrávání dat do cloudové služby Cesium ion dochází k automatické detekci a reprojekci souřadnicového systému, nikoliv ovšem výškového referenčního systému. Tuto komplikaci je nutné vyřešit pro vizuálně věrné zobrazení jednotlivých datových vrstev.

Předvizualizační úprava bodového mračna

U bodového mračna obsahujícího *off-ground* body byla při nahrání LAZ souboru do Cesium ion použita ztrátová Draco komprese, vhodná pro optimalizování 3D geometrických sítí a bodových mračen a rychlé vykreslování na straně klienta. Následně byla u bodového mračna provedena reprojekce a dlaždicování dle standardu 3D Tiles 1.0. Odchylka výškového referenčního systému byla řešena manuální úpravou pozice vzniklého tilesetu přes tlačítko *Adjust Tileset Location*, dostupné v preview pohledu při výběru datové vrstvy v okně *My Assets*.

Pro bodová mračna uložená ve formátu PLY (Polygon File Format) je možné provést dlaždicování dle standardu 3D Tiles 1.1 s možností použití technologie Gaussian Splatting, nahrazující body elipsoidy s definovanými parametry, jako je velikost, barva a průhlednost. ArcGIS Pro nativně nepodporuje export bodových mračen v tomto formátu, byla proto provedena konverze v SW 3DSurvey. I přes tuto konverzi nebylo možné technologii Gaussian splatting použít, neboť bodové mračno neobsahovalo požadované atributy.



Obr. 28 Tileset vytvořený z bodů kategorie *off-ground* (zdroj: autor).

Předvizualizační úprava DMR

Pro vizualizaci terénu byly provedeny a porovnány dva odlišné postupy. Prvním bylo nastavení rastru jako vlastního terénního podkladu, druhým poté vytvoření plnohodnotného uzavřeného modelu, stojícího nad mapovým podkladem.

Pro vytvoření vlastního terénního podkladu bylo nutné provést reprojekci souřadnicového i výškového referenčního systému před uložením na platformu Cesium ion. Změna souřadnicového systému do WGS 84 byla provedena pomocí nástroje **Project**

Raster z geoprocessing balíčku *Data Management Tools*. Převzorkování bylo provedeno metodou bilineární interpolace z důvodu nevhodnosti použití metody *nearest neighbour* pro nekategorická data.

Z důvodu čistě vizualizačního účelu a malé zájmové oblasti byla provedena plošná úprava výškových hodnot na základě průměrné odchylky Bpv od elipsoidické výšky určené ze čtyř rovnoměrně rozmístěných bodů odečtených v prostoru zájmové oblasti. Pro zjištění odchylky výšek těchto bodů bylo použito geodetické aplikace Transformace souřadnic, dostupné na Geoportálu ČÚZK. Hodnota průměrné odchylky v oblasti činila 43,7 m. Takto připravený DMR byl exportován ve formátu GeoTIFF pomocí nástroje **Export Raster** (jediným upraveným parametrem bylo nastavení *NoData value* na hodnotu 0). Tento GeoTIFF byl následně nahrán na Cesium ion (Obr. 29) jako rastrový terén, přecházející na hranicích zájmové oblasti do službou poskytnutého Cesium World Terrain DMR.

Name	Type	Date Added
Mean Sea Level	Terrain	-
DMR_ETRS_2	Terrain	8. 3. 2026 21:20
Cesium World Terrain	Terrain	18. 10. 2016 0:04

Obr. 29 Nastavení vlastního terénu ve službě Cesium ion (zdroj: autor).

Druhý přístup vyžadoval tvorbu uzavřeného spojitého modelu. Toho bylo dosaženo exportem DMR ve formátu GeoTIFF z SW ArcGIS Pro do modelovacího SW Blender za použití open-source doplňku **BlenderGIS**. Pro použití rastru jako terénního podkladu byl parametr *Mode* nastaven na hodnotu *DEM as displacement texture*. Po aplikaci *Subdivison* a *Displace* modifikátorů byl rastr plnohodnotně převeden na mesh. Vybráním a vytažením okrajových hran meshe byly vytvořeny stěny modelu. Vytažené hrany byly poté spojeny do rovné plochy tvořící dno modelu. Takto vytvořený model je po upravení měřítka možné použít i pro 3D tisk.

Výhodou tohoto postupu znázornění terénu je možnost texturování modelu, např. pomocí mapového podkladu z ArcGIS Pro. Podmínkou pro zajištění polohové přesnosti je export rastru totožné oblasti ve shodném souřadnicovém systému a s totožným počtem sloupců a řádků v rastru. Nevýhodou této metody vyjádření terénu je ztráta souřadnicového systému při exportu modelu ve formátu glTF (Graphics Library Transmission format).

Při nahrání modelu do Cesium ion byla opět zvolena možnost dlaždicování dle standardu 3D Tiles 1.0 a Draco komprimace dat. Opětovnou přesnou geografickou lokalizaci modelu je náročné udělat manuálně, možnou metodou je zjištění definičního bodu modelu, odečtení jeho souřadnic v GIS a následné zadání těchto souřadnic v nastavení *Adjust Tileset Location*. Oproti integraci vlastního terénu s globálním, dostupným v rámci platformy Cesium, působí model posazený nad terénem rušivě, proto bylo toto řešení zhodnoceno jako méně vhodné.

Předvizualizační úprava polygonů

Polygonové reprezentace terénních depresí byly převedeny do souřadnicového systému WGS 84 pomocí nástroje **Project** z balíčku *Data Management*. Pro úpravu atributové tabulky byly odstraněny irelevantní sloupce a k atributům obsahujícím výškovou informaci byla s pomocí nástroje **Calculate Field** přičtena konstantní hodnota 43,7 m. Pro zajištění

správného vykreslení polygonů ve webovém prostředí bylo použito nástroje **Multipart To Singlepart** z balíčku *Data Management*. Nakonec byla třída prvků převedena do GeoJSON formátu pomocí nástroje **Features to JSON** z balíčku *Conversion*. Takto připravenou datovou vrstvu bylo možné bez komplikací nahrát do uložiště Cesium ion.

Vizualizace použitím Cesium Stories

Webový klient Cesium ion umožňuje využití editoru Cesium Stories pro bezplatnou tvorbu jednoduchých vizualizací, složených ze sady scén kombinujících vlastní datové vrstvy s vrstvami třetích stran. Celý proces tvorby probíhá ve vizuálním editoru scén, nevyžaduje tedy znalost skriptovacího jazyka. Nevýhodou tohoto řešení je značně limitovaná možnost úpravy znakového klíče a funkcionalit. Není proto například možné, aby polygony znázorňující terénní deprese neobarvovaly všechny *off-ground* body, stojící nad nimi. Stejně tak nelze ani jakkoliv upravit znakový klíč polygonových vrstev (Obr. 30).



Obr. 30 Limitace ve stylování vrstev v Cesium Stories (zdroj: autor).

Výsledná modelová vizualizace je sestavena z pěti snímků. Úvodní snímek představuje téma vizualizace, druhý pak obsahuje náhled na zájmovou oblast vizualizace s vyznačenými komáři lihništi. Třetí snímek zobrazuje plnohodnotnou vizualizaci oblasti kombinací bodového mračka, polygonů a vlastního terénu propojeného s globálním terénem a texturovaného ortofotomapou poskytovanou v Cesium ion třetí stranou. Z důvodu nemožnosti přepínání aktivních vrstev je čtvrtý snímek identickou kopií, ovšem bez aktivního zobrazení bodového mračka. Pátý snímek poté nahrazuje vlastní terén modelem postaveným nad elipsoidem. Tento model má texturu ortofotomapy s vyznačenými terénními depresemi a je doplněn o bodové a plošné anotace.

Celkově je použití Cesium Stories pro prezentaci potenciálních komářích lihnišť použitelné, ale z hlediska vizualizační kvality a informační náplně velmi limitující řešení.

Vizualizace za použití CesiumJS

Pro vyřešení nedostatků plynoucích z limitace Cesium Stories byla vytvořena jednoduchá webová aplikace využívající JavaScript knihovny CesiumJS. Výsledný web obsahuje scénu s vlastním terénem vytvořeným z vygenerovaného DMR, na okrajích přecházející do Cesium World Terrain poskytovaným službou Cesium ion. Terén je texturován Ortofotomapou Bing Maps Aerial, poskytovanou také skrze platformu Cesium ion společností Microsoft Bing. Pro zájmovou oblast je možné alternativně zobrazit texturu

stínovaného reliéfu, vytvořenou pomocí nástroje **Hillshade function** z balíčku *Raster Functions* v SW ArcGIS Pro. Dále scéna zobrazuje vrstvy bodového mračka nadzemních bodů a GeoJSON vrstvu identifikovaných terénních depresí. Tyto deprese jsou vykresleny trojrozměrně, a to v rozsahu maximální výšky hladiny a nejnižšího bodu dna. Výběr terénní deprese zobrazuje atributovou tabulku s relevantními údaji o sníženině. Aplikace také umožňuje uživateli přepínat mapové podklady a aktivní vrstvy bodového mračka, terénních depresí a stínovaného reliéfu.

Základem aplikace je dokument *cesiumlihniste.html*, ve kterém je definovaná struktura uživatelského rozhraní včetně ovládacího panelu vrstev. 3D scéna je zde vykreslena v kontejneru vytvořeném elementem `<div>` s identifikátorem `cesiumContainer`. V dokumentu *index.js* je tento kontejner provázán s instancí třídy `Cesium.Viewer`, do které jsou asynchronně načítány jednotlivé datové vrstvy z cloudové služby Cesium ion, kde dochází k jejich následné vizuální úpravě a vykreslení. Autentizace požadavků vůči Cesium ion probíhá pomocí přístupového tokenu (Access Token), který je z bezpečnostních důvodů omezen pouze pro určenou webovou doménu. Vzhled samotné aplikace a jejich ovládacích prvků je definován pomocí kaskádových stylů v dokumentu *style.css*.



Obr. 31 Náhled na webovou aplikaci (zdroj: Autor).

7.3.2 Vizualizace masivního bodového mračka

Vizualizace masivního bodového mračka ve webovém prostředí s použitím knihovny Potree je při použití programu PotreeConverter (verze 2.1.1) velmi jednoduchým a přímočarým procesem. Společně se strukturou jednoduché webové aplikace nástroj automaticky generuje LoD hierarchii pro bodová mračka. Jedinou limitací je nemožnost zobrazit výsledný HTML (HyperText Markup Language) soubor na lokálním disku, je proto nutné všechny výsledné soubory umístit na webový server. Pro tyto potřeby bylo využito lokálního XAMPP serveru (verze 8.2.12).

Po stažení programu PotreeConverter z GitHub uložistě lze inicializovat konverzi vstupních dat v prostředí příkazového řádku počítače příkazem:

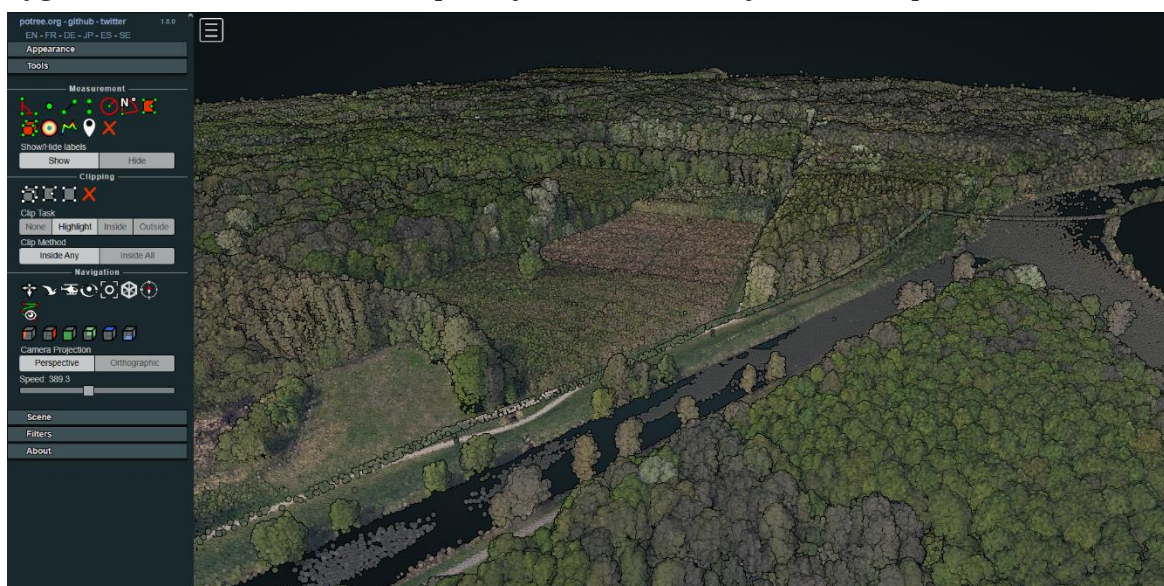
```
./PotreeConverter.exe C:/pointcloud.las -o C:/xampp/htdocs/potree --generate-page pageName.
```

Výsledkem je HTML soubor, adresář dodatkových JS knihoven *libs* a adresář *pointclouds* obsahující strukturovaná bodová mračka. Přesněji se jedná o dva binární soubory, *hierarchy.bin* a *octree.bin* a metadatový soubor *metadata.json*. Soubor *octree.bin* obsahuje body seřazené do oktalové stromové struktury, *hierarchy.bin* poté obsahuje prostorový

index a topologii jednotlivých uzlů. Tato struktura zajišťuje optimalizovaný síťový přenos, umožňující plynulé vykreslování masivních bodových mračen.

Nevýhodou použité verze nástroje PotreeConverter je nezabudovaná podpora uložení dat v LAZ souboru, výsledný binární soubor s oktálovou stromovou strukturou tedy zabírá velké množství dat na disku. Při použití nástroje na testovací oblast S1 došlo k 220% nárůstu objemu dat. Výhodou je ovšem rychlý čas zpracování, který pro stejnou testovací oblast zabral 18 minut, a uložení všech bodových mračen do jednoho binárního souboru.

Samotná webová aplikace umožňuje uživateli upravit vzhled bodového mračna (například úpravou tvaru a maximálního počtu vykreslených bodů), provádět měření, vytvářet liniové řezy či filtrovat mračno dle předem provedené klasifikace. Vzhledem k jednoduchosti použití tohoto řešení lze technologii Potree považovat za vhodnou pro definovaný cíl zobrazení masivního bodového mračna ve webovém prostředí. Vygenerovaná webová struktura pro zájmovou oblast S1 je uložena v příloze 10.



Obr. 32 Náhled na webovou stránku vygenerovanou pomocí PotreeConverter (zdroj: autor).

8 VÝSLEDKY

Následující kapitola obsahuje výčet výsledků dosažených v rámci této bakalářské práce. Pro přehlednost jsou výsledky rozděleny do podkapitol, zaměřených na zpracování laserových dat, tvorbu a testování DMR a publikaci 3D modelů v online prostředí.

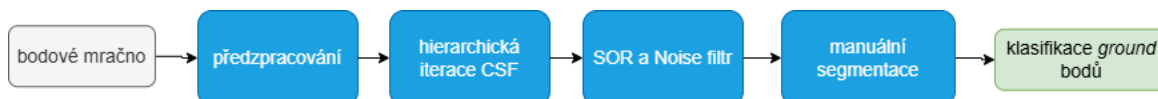
8.1 Výsledky zpracování laserových dat

Výsledný návrh postupu zpracování bodových mračen, který je detailně popsán v kapitole 4.4, lze rozdělit do tří částí. První část zahrnuje proces seznámení se s daty, při hromadném zpracování poté předzpracování ve formě spojení překryvných datových sad, oříznutí mračen do rozsahu zájmové oblasti či rozdělení do podružných mračen dle unifikovaného systému. Pro tento krok se osvědčilo použití geoprocessingových nástrojů v SW ArcGIS Pro, jmenovitě nástrojů **Create LAS Dataset**, **Extract LAS** a **Tile LAS**.

Druhou částí postupu je provedení filtrace mračen za účelem klasifikace bodů reprezentujících terén. Testovanými filtračními nástroji byly **CSF** (Cloth Simulation Filter), dostupný jako plugin v SW CloudCompare a **poloautomatická klasifikace bodových mračen** v SW 3DSurvey. Testováním různých konfigurací nástroje **CSF** bylo zjištěno, že v oblastech s prudkými změnami terénu je vhodné vždy použít nastavení *Steep slope* a *Slope processing* parametrů, pokročilé parametry je poté pro dosažení nejpřesnějších výsledků vhodné hierarchicky upravovat v jednotlivých iteracích **CSF** filtru. Tato konfigurace vychází z komunitní dokumentace a návodu k pluginu (CloudCompare, 2016; The 3rd Dimension, 2023). Použití **poloautomatické klasifikace bodových mračen** v SW 3DSurvey přineslo ve srovnání s nástrojem **CSF** preciznější filtraci v oblastech intravilánu, v zalesněných plochách ovšem došlo k významné chybovosti, kterou se nepodařilo odstranit ani úpravou parametrů nástroje.

Použití **CSF** filtrace v rámci hromadného zpracování dat zájmové oblasti S1 odhalilo použitelnost jednotného čtyřkrokového hierarchického nastavení pokročilých parametrů filtrů, bylo tedy možno vytvořit dávkový skript *CSF_iteration*, který pomocí cyklu FOR hromadně zpracovává všechny dlaždice mračen v definovaném adresáři. Výstupem je sada adresářů obsahující tři LAZ soubory, a to *_Ground*, s body reprezentujícími terén, *_Offground*, obsahující nadzemní body prvních tří iterací filtru a *_O4_kontrola*, s *off-ground* body z poslední iterace filtru k manuální kontrole a případnému zpětnému segmentování nesprávně klasifikovaných terénních bodů. Skript je dostupný na webu bakalářské práce.

Poslední částí navrženého postupu je odstranění zbylých nadzemních bodů, nezachycených filtračním nástrojem. Pro tento účel bylo použito čistících **SOR** a **Noise** filtrů a manuální segmentace asistované nástrojem **CEA virtual broom**. Použití čistících filtrů v rámci procesu zpracování bylo také přejato z komunitního návodu (The 3rd Dimension, 2023). Výsledkem testování nástrojů bylo zjištění, že **SOR** i **Noise** filtry umožňují odstranění dalších nadzemních bodů, příliš agresivní parametry ovšem vedou k odstranění pozemních bodů v oblastech s nízkou hustotou jejich výskytu. Je proto nezbytné zvážit použití těchto filtrů a vhodně nastavit jejich parametry. Také bylo zjištěno, že použití nástroje **CEA Virtual Broom** v rámci manuální segmentace mračen výrazně usnadňuje odstranění nadzemních bodů nad rovinným terénem. V rámci srovnání použitelnosti segmentačních nástrojů bylo zhodnoceno, že SW 3DSurvey umožňuje plynulejší a efektivnější manuální segmentaci oproti SW CloudCompare.



Obr. 33 Schéma navrženého postupu zpracování laserových dat (zdroj: autor).

8.2 Výsledky tvorby a testování DMR

Aplikací navrženého postupu filtrace bodového mračna na tři zájmové oblasti (L1 o rozloze 49 ha, L2 o rozloze 125 ha a S1 o rozloze 500 ha) bylo dosaženo klasifikace bodů reprezentujících terén. Proces rasterizace poté umožnil převést hodnoty těchto bodů do spojitého DMR o prostorovém rozlišení 0,5 m, na kterém byla provedena morfometrická analýza bezodtokých terénních depresí. Pro zájmové oblasti L1 a L2 bylo možné provést verifikaci přesnosti vzniklého DMR i identifikovaných oblastí srovnáním s již existujícím MOSPREMA DEM, vzniklém právě k tomuto účelu.

K provedení rasterizace bylo použito nástroje **LAS Dataset To Raster** v SW ArcGIS Pro. Na základě porovnání absolutní odchylky výškových hodnot s MOSPREMA DEM (viz podkapitola 5.2) bylo zjištěno, že navržený postup filtrace nebyl schopen v oblastech L1 a L2 odfiltrovat báze kmenů a ležící mrtvé dřevo, tyto odchylky byly ovšem většinou menší než 25 cm. Vyšší odchylka se poté primárně vyskytovala v interpolovaných oblastech (jako jsou vodní toky a plochy) či v místech rozdílné manuální segmentace objektů v intravilánu. V těchto místech je ovšem již z principu nelogické hledat bezodtoké oblasti, vzniklé DMR tedy byly zhodnoceny jako použitelné pro testování shody identifikace terénních depresí s MOSPREMA DEM. Také bylo zjištěno, že nejmenší plošnou míru odchylky výškových hodnot od MOSPREMA DEM vykazoval DMR vytvořený metodou *Binning Average* a interpolací prázdných buněk metodou *Nearest Neighbour*.

Pro porovnání oblastí identifikovaných jako terénní deprese z vytvořených DMR s oblastmi identifikovanými z MOSPREMA DEM bylo použito nástroje **Locate Depressions**, také v SW ArcGIS Pro. Hraniční parametry pro identifikované bezodtoké terénní sníženiny byly stanoveny na minimální hloubku 5 cm a minimální rozlohu 100 m². Takto nastavený nástroj byl použit na DMR vytvořené různými konfiguracemi nástroje **LAS Dataset To Raster**. Před provedením srovnání byly z identifikovaných oblastí odstraněny polygony překrývající liniovou vrstvu vodních toků získanou z INSPIRE tématu Vodstvo – fyzické vody a manuálně odstraněny polygony ležící na jednoznačně určitelném vodním toku, vodní ploše nebo v místech intravilánu. Úspěšnost použitého DMR byla hodnocena na základě překryvu identifikovaných oblastí s oblastmi identifikovanými z MOSPREMA DEM pomocí metriky F1 skóre. Sekundárně byla také hodnocena průměrná absolutní odchylka hodnot hloubky. Přehled výsledků jednotlivých metrik je uveden v příloze 3.

Na základě tohoto srovnání (viz podkapitola 5.3) bylo zjištěno, že největší míra shody identifikovaných ploch v testovací oblasti L1 nastala při použití DMR vzniklých metodou *Binning Minimum* a *Binning Average* s interpolací prázdných buněk metodou *Linear*. Identifikováno zde bylo 29 terénních depresí, F1 skóre pro tuto oblast činilo 94,8 %, průměrná absolutní odchylka hloubky poté 7,3 cm pro *Binning Minimum* a 5,7 cm pro *Binning Average*. V testovací oblasti L2 bylo dosaženo nejvyšší shody při použití DMR vzniklého metodou *Binning Minimum* a interpolační metody *Natural Neighbour* pro odhad hodnot prázdných buněk. Identifikováno bylo 144 depresí, F1 skóre činilo 93,2 % a střední absolutní odchylka hloubky 5,1 cm. Tato konfigurace nástroje **LAS Dataset To Raster** byla použita pro tvorbu DMR z dat testovací oblasti S1.

Pro oblast S1 dosud neexistují referenční data terénních depresí, lze tedy pouze konstatovat, že na stanovené ploše bylo identifikováno **410 významných terénních depresí**. Pro tuto oblast je ovšem nutné předpokládat snížení přesnosti, dané větší mírou výskytu olistěné vegetace vyskytující se v době letecké skenovací kampaně, vedoucí k většímu výskytu oblastí s žádnou či nízkou hustotou bodů reprezentujících terén. Tento fakt měl vliv i na snížení přesnosti navrženého postupu filtrace bodových mračen.

POTENCIÁLNÍ KOMÁŘÍ LÍHNIŠTĚ

v **Kančí oboře** k 8. dubnu 2024

Identifikovány pomocí DMR vzniklého z klasifikovaných dat leteckého laserového skenování. Lokalizovány byly bezodtoké terénní deprese s minimální plochou **100 m²** a hloubkou **5 cm**.

Potenciální líhniště

 terénní deprese

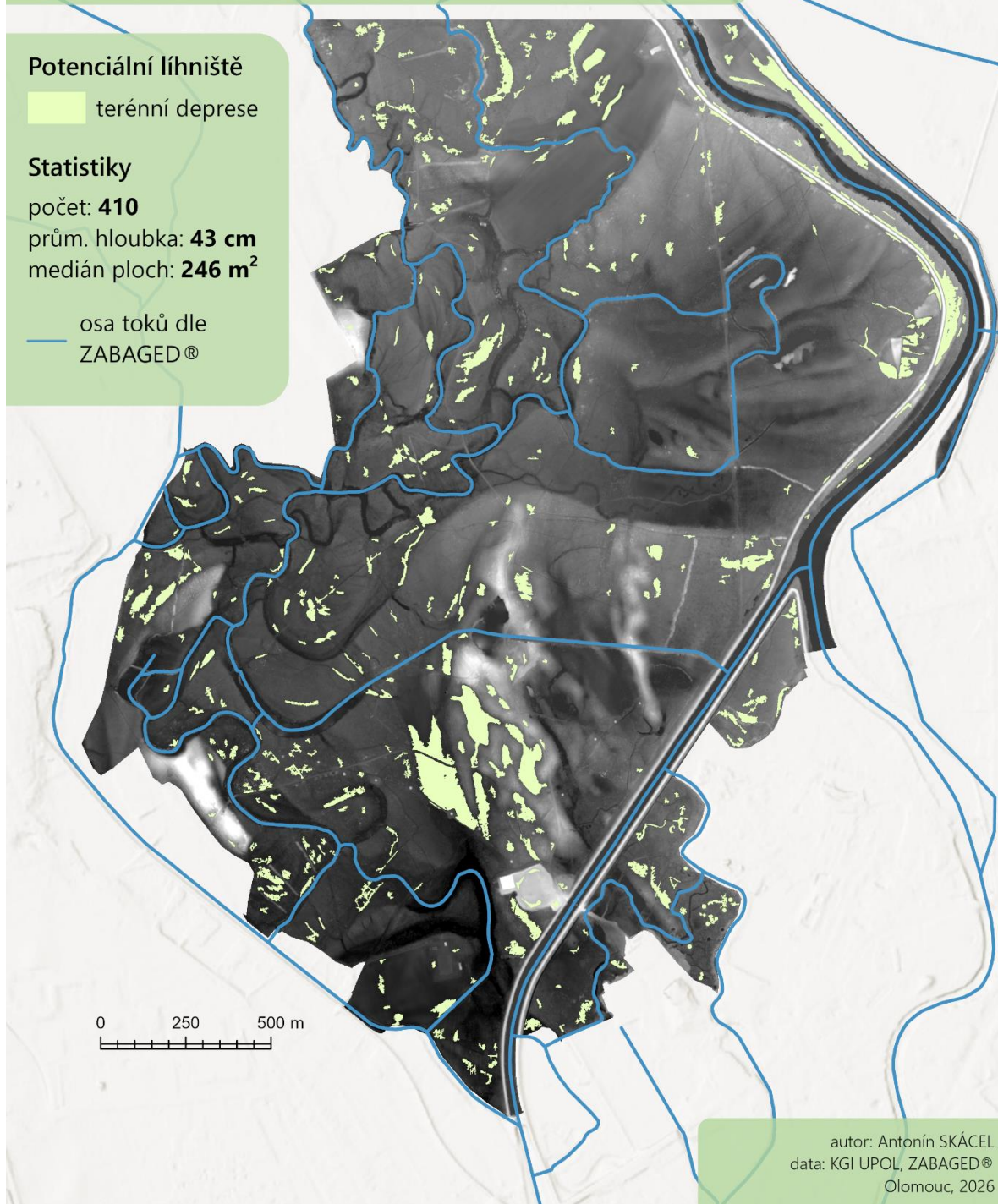
Statistiky

počet: **410**

prům. hloubka: **43 cm**

medián ploch: **246 m²**

 osa toků dle
ZABAGED®



autor: Antonín SKÁCEL
data: KGI UPOL, ZABAGED®
Olomouc, 2026

Obr. 34 Identifikovaná potenciální komářší líhniště v zájmové oblasti S1 (zdroj: autor).

8.3 Výsledky publikace 3D modelů v online prostředí

Pro webovou publikaci zpracovaných dat a poznatků byly stanoveny obecné a specifické požadavky (viz podkapitola 7.2), na základě kterých byly porovnány dostupné použitelné technologie. Srovnávanými technologiemi byly WebGL Potree, herní engine Babylon.js a platformy Cesium a ArcGIS Online. Pro přehlednost jsou jednotlivá kritéria zobrazena v příloze 4.

Pro interaktivní webovou vizualizaci potenciálních komářích líhnišť byla zvolena platforma Cesium, v rámci které byly otestovány možnosti tvorby jednoduchých aplikací pomocí vizuálního editoru Cesium Stories a grafické knihovny CesiumJS. Před samotnou tvorbou webových vizualizací byla provedena příprava jednotlivých datových sad pro jejich použití ve webovém prostředí. Tato příprava obnášela primárně transformaci souřadnicových a výškových systémů a optimalizaci datových formátů pro webovou distribuci (viz oddíl 7.3.1). Pro použití datových sad v rámci platformy Cesium byly nahrány na SaaS uložiště Cesium ion.

Tvorbou zkušební prezentace v prostředí Cesium Stories bylo zjištěno, že tento editor neumožňuje ani úpravu znakového klíče, ani přidání funkcionalit. Na základě těchto limitů byl zhodnocen jako použitelný, ale velmi limitující a vizuálně nedostatečné řešení.

Tyto nedostatky byly vyřešeny vytvořením jednoduché CesiumJS aplikace, sloužící jako modelová vizualizace potenciálních komářích líhnišť v zájmové oblasti L1 (viz oddíl 7.3.1). Uživatel zde vidí 3D model terénu texturovaný ortofotomapou a stínovaným reliéfem, na kterém jsou identifikované terénní deprese zobrazeny jako „zatopené“ 3D modely a nadzemní objekty reprezentované off-ground body bodového mračka. Uživatel může upravovat zobrazení vrstev a také si zobrazit relevantní atributy jednotlivých terénních depresí. Modelová webová aplikace je výstupem této bakalářské práce a je dostupná z: <https://tinyurl.com/3Dlihniste>.

V rámci testování možností publikace masivního bodového mračka ve webovém prostředí bylo vyzkoušeno použití aplikace PotreeConverter, umožňující prostorové indexování bodového mračka a tvorbu přidružené HTML struktury (viz oddíl 7.3.2). Použití této aplikace bylo velmi jednoduché, stejně tak byla přívětivá i rychlost zpracování (na testované sestavě došlo ke zpracování devíti LAZ souborů o celkové velikosti 7,2 GB za méně než 18 minut). Samotná vytvořená webová aplikace umožňuje uživateli pokročilé úpravy scény, základní měření na bodovém mračku i filtraci klasifikovaných bodů dle ASPRS klasifikace. Použití knihovny Potree a nástroje PotreeConverter tedy bylo zhodnoceno jako vhodné pro prezentaci masivního bodového mračka ve webovém prostředí, například za účelem prezentace výsledných dat letecké skenovací kampaně zadavateli.

9 DISKUZE

Výsledky dosažené v rámci plnění dílčích úkonů práce splňují stanovené cíle, je ovšem nutné poukázat na zjištěné limitace zvolených postupů a provést jejich zhodnocení v širším kontextu. Tyto limitace jsou popsány v následující kapitole.

Limitace zpracování laserových dat

Při použití **CSF** pro filtraci bodového mračna byla zjištěna omezená schopnost odstranění přízemních bodů bez nesprávného odfiltrování velkých částí terénu či přílišné výpočetní náročnosti. Zvolený hierarchický přístup filtrace je tedy kompromisem mezi touto chybovostí II. typu a výpočetní náročností. Potenciální zlepšení tohoto nedostatku může přinést použití jiných filtračních metod či více směrová modifikace **CSF** filtru (Cai a Yu, 2023). Tyto nástroje i jejich modifikace ovšem nebyly dostupné ve zvolených SW, jejich testování tedy bylo nad rámec cílů této práce.

Použití **SOR** a **Noise** filtrů umožňuje zpřesnění filtrace odstraněním dalších nadzemních bodů, ale také decimuje správně klasifikované terénní body, pokud se nacházejí v oblastech s velmi nízkou hustotou jejich rozmístění. Obzvláště patrná byla tato limitace u hromadného zpracování zájmové oblasti S1, kde kvůli olistění vegetace v období letecké skenovací kampaně došlo k častějšímu výskytu právě takových oblastí. Navržený postup zpracování bodových mračen je tedy vhodné používat primárně na data skenovaná v období vegetačního klidu. Další limitací **SOR** a **Noise** filtru je automatické odstranění všech nežádoucích bodů, a tedy jejich nemožnost klasifikace do kategorie *non-ground*. Vzhledem k požadovanému účelu použití zpracovaného bodového mračna tento fakt není problém, je ovšem vhodné být si této limitace vědom.

Zpracování bodového mračna je časově náročný proces. I automaticky zpracované bodové mračno vyžaduje určitou míru manuální kontroly a segmentace, což je i při asistenci použitím nástroje **CEA Virtual Broom** v rovinných oblastech významně časově náročná činnost. Celkově navržený proces filtrace bodového mračna při hromadném zpracování testovací oblasti S1 trval více než 9 hodin, alespoň částečné automatizace bylo dosaženo vytvořením dávkového skriptu pro hierarchickou iteraci **CSF**, jehož doba zpracování všech dlaždic na použité HW sestavě činila 128 minut. Je tedy nutné zvážit, zda je navržený postup aplikovatelný na plánovaný rozsah dat.

Limitace tvorby DMR

Použitý nástroj **Las Dataset To Raster** umožňuje použití pouze základních interpolačních technik. V případě potřeby použití pokročilých geostatistických metod je vhodné použít jiné interpolační nástroje, vzhledem k počtu dat může být ovšem jejich použití časově a výpočetně náročné. Srovnáním odchylek výškových hodnot a shody identifikovaných terénních depresí pro testovací oblasti L1 a L2 s MOSPREMA DEM bylo použití nástroje **Las Dataset To Raster** zhodnoceno za dostačující.

Limitace identifikace terénních depresí

V rámci rešerše byl pro identifikaci terénních depresí zvolen Python skript, který vytvořil v rámci bakalářské práce Zapletal (2023). Jeho využití nebylo možné z důvodu závislosti na zastaralé knihovně *richDEM*, která byla nekompatibilní s ostatními Python knihovnami.

Použitý nástroj **Las Dataset To Raster** neumožňuje identifikaci vnořených depresí, tedy menších terénních sníženin v rámci větší terénní sníženiny. Tím není umožněna přesnější predikce postupu zatopení sníženiny a také vede k odstranění skutečných terénních sníženin, které se vyskytují v ploše, jenž je sama identifikována jako sníženina, části ovšem překrývající vodní tok. Při odstranění této nepravé sníženiny na základě

protnutí s liniovou vrstvou toku zůstane takto vnořená skutečná sníženina neidentifikována. Navazující výzkum by v tomto směru bylo vhodné zaměřit právě na detekci těchto vnořených depresí, např. pomocí level-set algoritmu (Wu et al., 2018).

Limitace zvoleného postupu vizualizace

Zvolení vizualizační technologie bylo postaveno na subjektivních znalostech, možnostech a dovednostech autora, nelze tedy jednoznačně označit jedno řešení za lepší než jiné. Cloudové uložště Cesium ion bylo použito pod komunitní licenci, limitovanou nekomerčním využitím, omezeným datovým uložštěm (5 GB) a měsíčním limitem na počet streamovaných dat (15GB) a zobrazení podkladových map (1000/měsíc). Modelová vizualizace terénních depresí byla optimalizována tak, aby s dostatečným limitem nepřekračovala žádnou hranici, ale použití této technologie na velké oblasti (např. celá plocha CHKO) může vyžadovat dodatečný nákup licence.

Při testování výsledné aplikace byla odhalena dvě specifická varování, která se zobrazují ve vývojářské konzoli ve webovém prohlížeči. Tato varování nevycházejí z chyby zdrojového kódu, ale jsou běžným projevem zvoleného technologického řešení. První varování se týká blokování skriptů v informačním panelu, což je ovšem žádoucí bezpečnostní mechanismus knihovny CesiumJS, zabráňující spuštění skriptu při zobrazení atributové tabulky jednotlivých depresí. Druhým varováním je síťová chyba HTTP 404, vznikající při dotazování na okrajové dlaždice stínovaného reliéfu. Tento jev vyplývá z nepravidelného tvaru zájmového území, pro jehož okraje v rámci pravoúhlého bounding-boxu server Cesium ion negeneruje dlaždice s hodnotou NoData. Veškerá funkcionálna aplikace ovšem těmito limity není nijak omezena.

Modelová vizualizace potenciálních komářích líhnišť není vyvinuta jako definitivní podoba webové vizualizace pro monitoring komářích líhnišť, ale může sloužit jako základ pro další vývoj, optimalizaci a implementaci nových a pokročilých funkcionalit. Těmito funkcionalitami mohou být například zobrazení dat senzorů sledujících mikroklimatické podmínky ve vybraných tůních či depresích, databázová nadstavba umožňující dlouhodobý monitoring vývoje komářích populace a evidence zásahů či zjednodušená, populárně naučná varianta aplikace sloužící k informování široké veřejnosti.

10 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provedení komplexního procesu zpracování a prezentace laserových dat pro potřeby identifikace a monitoringu potenciálních komářích lůhnišť. Prvním dílčím cílem práce bylo navrzení replikovatelného postupu zpracování dat leteckého laserového skenování za účelem klasifikace bodů reprezentujících terén. Pro jeho splnění byly otestovány klasifikační a čistící nástroje dostupné v SW CloudCompare a 3DSurvey na datech leteckého laserového skenování části CHKO Litovelské Pomoraví. Navržený postup, využívající hierarchické iterace **CSF** filtru, zpřesněný pomocí **SOR** a **Noise** filtrů, a manuální segmentace asistované nástrojem **CEA Virtual Broom**, byl navržen na zájmové oblasti L1 o rozloze 49 ha. Použití postupu byly verifikováno jeho aplikací na zájmovou oblast L2 o rozloze 125 ha, také se vyskytující v CHKO Litovelské Pomoraví. Otestována byla také použitelnost postupu v rámci hromadného zpracování laserových dat zájmové oblasti S1 o rozloze 500 ha, kterou byla Kančí obora, nacházející se v CHKO Soutok.

Vhodnost navrženého postupu zpracování laserových dat byla dále ověřena v rámci druhého a třetího dílčího cíle, kterými byla tvorba DMR a identifikace potenciálních komářích lůhnišť. Body klasifikované jako terén byly rasterizovány pomocí nástroje **LAS Dataset To Raster** v SW ArcGIS Pro, čímž byl vytvořen spojitý DMR o prostorovém rozlišení 0,5 m. Takto vytvořený DMR mohl být porovnán s již existujícím MOSPREMA DEM pro oblast Litovelského Pomoraví. Porovnáním absolutních odchylek výškových hodnot bylo zjištěno, že navržený proces filtrace není schopen odstranění báze kmenů a ležícího mrtvého dřeva. Pro dosažení nejmenší plošné absolutní odchylky je nejvhodnější použití nástroje **Las Dataset To Raster** s metodou *Binning Average* a interpolací prázdných buněk metodou *Natural Neighbour*.

Pro identifikaci potenciálních komářích lůhnišť bylo použito nástroje **Locate Depressions**, umožňujícího identifikaci bezodtokých terénních depresí. Tyto deprese se mohou po zaplavení stát potenciálními lůhništi komárů. Hraniční hodnoty pro identifikaci významných terénních depresí byly stanoveny na minimální hloubku 5 cm a minimální plochu 100 m². Testováním shodnosti identifikovaných oblastí z vlastního DMR a MOSPREMA DEM bylo zjištěno, že nejvyšší míry přesnosti a úplnosti (hodnocené alespoň částečným překryvem plochy identifikované terénní deprese s MOSPREMA DEM depresí) bylo dosaženo použitím metody *Binning Minimum* a lineární interpolací prázdných buněk. Pro testovací oblast L1 bylo dosaženo 94,8% F1 skóre (metriky harmonického průměru přesnosti a úplnosti identifikace), střední absolutní odchylka hloubek poté činila 7,3 cm. V oblasti L2 s větší rozlohou se nejvíce osvědčilo použití DMR vzniklého metodou *Binning Minimum* s odhadem hodnot prázdných buněk použitím *Natural Neighbour* interpolace. F1 skóre pro tuto oblast činilo 93,2 %, střední absolutní odchylka výšky byla 5 cm.

Poznatky předchozích dílčích cílů byly prakticky aplikovány při realizaci případové studie identifikace potenciálních komářích lůhnišť v CHKO Soutok. Pro částečnou automatizaci procesu zpracování laserových dat byl vytvořen dávkový skript *CSF_iteration*, který umožňuje hromadnou čtyřprůchodovou hierarchickou **CSF** filtraci LAZ souborů s možností manuální kontroly posledního kroku filtrace. Vzhledem k výraznému olistění vegetace v období letecké skenovací kampaně se v klasifikovaném bodovém mračnu vyskytují lokality s výrazně redukovanou hustotou pozemních bodů, přesto však bylo možné provést navržený postup zpracování laserových dat, vytvořit DMR o prostorovém rozlišení 0,5 m a provést identifikaci významných terénních depresí. Celkem bylo v oblasti nalezeno **410 unikátních ploch**, které lze prohlásit za potenciální komářích lůhnišť.

Druhý směr výzkumu práce byl zaměřen na prezentaci zpracovaných dat v online prostředí. Obecné požadavky pro 3D webovou vizualizaci, které byly stanoveny Dominikovou (2025), byly doplněny o požadavky specifické pro vizualizaci potenciálních komářích lůhnišť. Těmito požadavky jsou zobrazení dat nad mapovým podkladem a možnost kombinace různých datových modelů v jedné scéně. Na základě těchto stanovených požadavků a specifikací projektu byly porovnány čtyři dostupné technologie. Na základě tohoto srovnání byla zvolena platforma Cesium, v rámci které byly otestovány dvě možnosti tvorby 3D webových vizualizací. Před samotnou tvorbou vizualizací bylo nutné připravit jednotlivé datové sady pro jejich použití ve webovém prostředí, což obnášelo transformaci souřadnicových a výškových systémů a optimalizaci formátů pro síťový přenos a vykreslení v prohlížeči. Použití grafického editoru Cesium Stories bylo zhodnoceno jako použitelné, ale velmi omezující řešení, výsledná modelová vizualizace tedy byla vytvořena s pomocí WebGL CesiumJS. Tato jednoduchá aplikace, dostupná z: <https://tinyurl.com/3Dlůhniste>, umožňuje uživateli zobrazení terénu texturovaného ortofotomapou či stínovaným reliéfem, nad kterým jsou nadzemní objekty zobrazeny formou bodového mračna a terénní deprese jsou vyjádřeny 3D polygony v jejich „zatopeném“ stavu. Výběr kteréhokoli polygonu zobrazuje atributovou tabulku s relevantními informacemi o dané terénní sníženině.

V rámci výzkumu bylo také otestováno použití WebGL Potree a aplikace PotreeConverter, provádějící automatickou optimalizaci masivního bodového mračna a tvorbu přidružené webové struktury pro jednoduchou implementaci do síťového prostředí. Použití aplikace na bodová mračna zájmové oblasti S1 bylo zhodnoceno jako velmi vhodné a jednoduché. Výsledná webová prohlížečka umožňuje základní manipulaci, měření a filtraci bodového mračna. Toto řešení bylo zhodnoceno jako vhodné pro použití prezentace výsledků laserového skenování bez nutnosti instalace specifického SW.

Hlavním přínosem bakalářské práce je replikovatelný návrh zpracování laserových dat za účelem klasifikace bodů reprezentujících terén a vytvořená modelová interaktivní 3D vizualizace potenciálních komářích lůhnišť. Také je přínosný popis procesu rasterizace a identifikace terénních depresí s využitím nástrojů v SW ArcGIS Pro. Dalším přínosem je identifikace potenciálních komářích lůhnišť v části nově vzniklé CHKO Soutok. Poznatky a výstupy této práce mohou sloužit jako základ pro další rozvoj postupu identifikace terénních depresí a tvorby webových vizualizací v rámci problematiky monitoringu komářích lůhnišť. V neposlední řadě je tato práce také velice přínosná pro autora, který bude poznatky a zkušenosti získané při její tvorbě aplikovat v dalším akademickém i osobním rozvoji.

POUŽITÁ LITERATURA A INFORMAČNÍ ZDROJE

AOPK ČR, 2023. *Chráněná krajinná oblast Soutok je příležitostí k ukončení komářích kalamit*. Online. Aktualizace 2023-09-19. Dostupné z: <https://soutok.aopk.gov.cz/-/chko-soutok-je-prilezitost-k-ukoncení-komarich-kalamit>. [cit. 2026-04-30].

AOPK ČR, 2026a. *Charakteristika oblasti Litovelského Pomoraví*. Online. Dostupné z: <https://litovelskepomoravi.aopk.gov.cz/charakteristika-oblasti>. [cit. 2026-04-30].

AOPK ČR, 2026b. *Charakteristika oblasti CHKO Soutok*. Online. Dostupné z: <https://soutok.aopk.gov.cz/charakteristika-oblasti>. [cit. 2026-04-30].

BAILEY, Gene; LI, Yingkui; MCKINNEY, Nathan; YODER, Daniel C.; WRIGHT, Wesley C. et al., 2022. Comparison of Ground Point Filtering Algorithms for High-Density Point Clouds Collected by Terrestrial LiDAR. Online. *Remote Sensing*. 2022-09-24, vol. 14, no. 19, s. 4776-4776. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs14194776>. [cit. 2026-04-26].

BITTNER, Oldřich; ZEJDLIK, Jakub; BURIAN, Jaroslav a VOŽENÍLEK, Vit, 2025. Exploring Unconventional 3D Geovisualization Methods for Land Suitability Assessment: A Case Study of Jihlava City. Online. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2025-07-08, vol. 14, no. 7, s. 269-269. ISSN 2220-9964. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/ijgi14070269>. [cit. 2026-04-26].

BRUS, Jan, 2023. Péče o přírodu a krajinu. Online. *Ochrana přírody*. Roč. 4, č. 4/2023, s. 12-15. ISBN 9788025457535. Dostupné z: <https://www.casopis.ochranaprirody.cz/pece-o-prirodu-a-krajinu/management-komaru-v-chko-litovelske-pomoravi/>. [cit. 2026-04-30].

CAI, Shangshu a YU, Sisi, 2023. Filtering Airborne LiDAR Data in Forested Environments Based on Multi-Directional Narrow Window and Cloth Simulation. Online. *Remote Sensing*. 2023-03-02, vol. 15, no. 5, s. 1400-1400. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs15051400>. [cit. 2026-04-26].

CLOUDCOMPARE, 2015. *Noise filter*. Online. 2015-08-16. Dostupné z: https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Noise_filter. [cit. 2026-04-26].

CLOUDCOMPARE, 2016. *CSF (Plugin)*. Online. 2016-07-16. Dostupné z: [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/CSF_\(plugin\)](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/CSF_(plugin)). [cit. 2026-04-30].

CONSTANTINESCU, Zoran, 2000. Levels of Detail: An Overview. Online. *Nonlinear Analysis Modelling and Control*. 2000-12-05, vol. 5, no. 1, s. 39-52. ISSN 1392-5113. Dostupné z: <https://doi.org/10.15388/na.2000.5.0.15239>. [cit. 2026-04-26].

COZZI, Patrick a LILLEY, Sean (ed.), 2023. OGC 22-025r4, *3D Tiles Specification*. Online. Dostupné z: <http://www.opengis.net/doc/cs/3D-Tiles/1.1>. [cit. 2026-02-25].

DEDIČ, Jan, 2025. *MODELOVÁNÍ MORFOLOGIE KOMÁŘÍCH LÍHNIŠŤ POMOCÍ GEOSTATISTICKÝCH NÁSTROJŮ*. Online, Diplomová práce, vedoucí Mgr. Karel Macků, Ph.D. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Dostupné z: <https://theses.cz/id/spipbb/>. [cit. 2026-04-30].

DOMINIKOVÁ, Patricie, 2025. *3D PREZENTACE ARCHITEKTONICKÉHO DĚDICTVÍ*. Bakalářská práce, vedoucí RNDr. Stanislav POPELKA, Ph.D. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky.

DOVRTĚL, Jan, 2014. *Komáři – fenomén lužních lesů*. Online. Brno, 12.2.2014. Dostupné z: <https://lesycr.cz/casopis-clanek/komari-fenomen-luznich-lesu/>. [cit. 2026-04-30].

ESRI, 2026. *Understand credits*. Online. Dostupné z: <https://doc.arcgis.com/en/arcgis-online/administer/credits.htm>. [cit. 2026-04-26].

GRIMES, Wesley, 2017. *Virtual broom (plugin)*. Online. Aktualizováno 22.11.2017. Dostupné z: [https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Virtual_broom_\(plugin\)](https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Virtual_broom_(plugin)). [cit. 2026-04-26].

HUANG, Guoping, 2020. Digital visualization in web 3.0: A case study of virtual central grounds project. *Journal of Digital Landscape Architecture*. Vol. 2020, no. 5, s. 395-403. ISSN 2511-624X. Dostupné z: <https://doi.org/10.14627/537690040>.

CHEN, Chuanfa; GUO, Jiaojiao; WU, Huiming; LI, Yanyan a SHI, Bo, 2021. Performance Comparison of Filtering Algorithms for High-Density Airborne LiDAR Point Clouds over Complex LandScapes. Online. *Remote Sensing*. 2021-07-06, vol. 13, no. 14, s. 2663-2663. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs13142663>. [cit. 2026-04-26].

KLEPAC, Petra; HSIEH, Jennifer L; DUCKER, Camilla; ASSOUM, Mohamad; BOOTH, Mark et al., 2024. Climate change, malaria and neglected tropical diseases: a scoping review. Online. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. 2024-05-10, vol. 118, no. 9, s. 561-579. ISSN 0035-9203. Dostupné z: <https://doi.org/10.1093/trstmh/trae026>. [cit. 2026-04-26].

KULAWIAK, Marcin a KULAWIAK, Marek, 2016. Application of Web-GIS for Dissemination and 3D Visualization of Large-Volume LiDAR Data. Online. In: IVAN, Igor; HORÁK, Jiří; SIGNLETON, Alex a INSPEKTOR, Tomáš (ed.). *The Rise of Big Spatial Data: Lecture notes in geoinformation and cartography*. Německo: Springer International Publishing, 2016-10-14, s. 1-12. ISBN 9783319451237. ISSN 1863-2246. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45123-7_1. [cit. 2026-04-26].

KVĚTOŇ, Vít a VOŽENÍLEK, Vít, 2011. *Klimatické oblasti Česka: klasifikace podle Quitta a za období 1961-2000 = Climatic regions of Czechia : Quitt's classification during years 1961-2000*. M.A.P.S. (Map and Atlas Product Series). 1:500 000. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci v koedici s Českým hydrometeorologickým ústavem. ISBN 978-80-244-2813-0.

LIDBERG, William; NILSSON, Mats; LUNDMARK, Tomas a ÅGREN, Anneli, 2017. Evaluating preprocessing methods of digital elevation models for hydrological modelling. Online. *Hydrological Processes*. 2017-10-21, vol. 31, no. 26, s. 4660-4668. ISSN 0885-6087. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.11385>. [cit. 2026-04-26].

MEAGHER, Donald J., 1982. Geometric modeling using octree encoding. Online. *Computer Graphics and Image Processing*. 1982-06-01, vol. 19, no. 2, s. 129-147. ISSN 0146-664X. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/0146-664x\(82\)90104-6](https://doi.org/10.1016/0146-664x(82)90104-6). [cit. 2026-04-26].

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ, 2025. *Stop komářím kalamitám. Na boj s přemnoženými komáři vyčlenilo MŽP 20 milionů*. Online. Praha, 14.3.2025. Dostupné z:

<https://mzp.gov.cz/cz/pro-media-a-verejnost/aktuality/archiv-tiskovych-zprav/stop-komarim-kalamitam-na-boj-s-premnozenymi>. [cit. 2026-04-30].

MOSPREMA, 2024. *MOSPREMA: Predikce a management kalamitních stavů komárů pro zachování biodiverzity v lužních lesích*. Online. Olomouc. Dostupné z: <https://mosprema.upol.cz>. [cit. 2026-04-30].

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM, 2018. OGC 17-030r1, *LAS Specification 1.4 OGC Community Standard*. S. -31. Dostupné také z: <http://www.opengis.net/doc/CS/las/1.4>.

POWERS, David M. W., 2011. Evaluation: From Precision, Recall and F-Measure to ROC, Informedness, Markedness & Correlation. Online. 2229-399X. *Journal of Machine Learning Technologies*. Vol. 2, no. 1, s. 37–63. Dostupné z: <https://doi.org/10.9735/2229-3981>. [cit. 2026-04-30].

RUDOLF, Ivo; RETTICH, F; BETÁŠOVÁ, L; IMRICHOVÁ, K; MENDEL, J et al., 2019. *West Nile virus (linie 2) poprvé detekován v komárech v jižních Čechách: nová endemická oblast?: EPIDEMIOLOGIE, MIKROBIOLOGIE, IMUNOLOGIE*. Online. Roč. 68, č. 3, s. 150-153. Brno, s. -153. ISSN 1210-7913. Dostupné z: <https://www.prolekare.cz/casopisy/epidemiologie/2019-3-23/west-nile-virus-linie-2-poprve-detekovan-v-komarech-v-jiznich-cechach-nova-endemicka-oblast-119853/download?hl=cs>. [cit. 2026-04-30].

SCHENKEL, Jared; TAELE, Paul; GOLDBERG, Daniel; HORNEY, Jennifer a HAMMOND, Tracy, 2020. Identifying Potential Mosquito Breeding Grounds: Assessing the Efficiency of UAV Technology in Public Health. Online. *Robotics*. 2020-11-11, vol. 9, no. 4, s. 91. ISSN 2218-6581. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/robotics9040091>. [cit. 2026-04-26].

SCHUETZ, Markus, 2016. *Potree: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers: Rendering Large Point Clouds in Web Browsers Diplom-Ingenieur in Visual Computing*. Online, TU Wien, Institute of Computer Graphics and Algorithms, vedoucí Michael Wimmer. Vídeň: Diplomová práce. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/309358171_Potree_Rendering_Large_Point_Clouds_in_Web_Browsers. [cit. 2026-04-26].

SITHOLE, George a VOSSELMAN, George, 2003. Comparison of filtering algorithms. Online. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Roč. 34, č. 3-W13, s. 71–78. ISSN 2194-9034. Dostupné z: https://www.isprs.org/proceedings/xxxiv/3-w13/papers/Sithole_ALSDD2003.pdf. [cit. 2026-04-30].

SUKOP, Ivo, 2014. Temporary periodical pools of the lower reaches of the Dyje (Thaya) River. Online. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. 2014-11-14, roč. 56, č. 2, s. 181-188. ISSN 1211-8516. Dostupné z: <https://doi.org/10.11118/actaun200856020181>. [cit. 2026-04-26].

SZAFARCZYK, Anna a TOŚ, Cezary, 2022. The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements. Online. *Sensors*. 2022-12-27, vol. 23, no. 1, s. 292. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s23010292>. [cit. 2026-04-26].

ŠULC, David, 2018. *IDENTIFIKACE A PROSTOROVÉ ANALÝZY ROZMÍSTĚNÍ KOMÁŘÍCH LÍHNIŠŤ V CHKO LITOVELSKÉ POMORAVÍ*. Online, Diplomová práce, vedoucí RNDr. Jakub Miřijovský, Ph.D.

Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky.
Dostupné z: https://theses.cz/id/1xxfcg/sulc_diplomova_prace.pdf. [cit. 2026-04-30].

THE 3RD DIMENSION, 2023. *Cleaning a Point Cloud & Creating a Ground Surface*. Online. 2023-01-31. Dostupné z: Youtube, <https://youtu.be/QIwZhloTKes?si=weYdvleKenNBeAvn>. [cit. 2026-04-30].

TOBLER, Waldo, 1970. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. Online. *Economic Geography*. 1970-06-01, vol. 46, s. 234-240. ISSN 0013-0095. Dostupné z: <https://doi.org/10.2307/143141>. [cit. 2026-04-26].

VLASÁK, Dominik, 2024. *IDENTIFIKACE KOMÁŘÍCH TŮNÍ S VYUŽITÍM OPTICKÝCH A LASEROVÝCH DAT*. Online, Bakalářská práce, vedoucí RNDr. Jakub Miřijovský, Ph. D. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Dostupné z: <https://theses.cz/id/tlvrrpf/>. [cit. 2026-04-30].

VOŽENÍLEK, Vít a KAŇOK, Jaromír, 2011. *Metody tematické kartografie: vizualizace prostorových jevů*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci. ISBN 978-80-244-2790-4.

WU, Qiusheng; CHARLES R. LANE; WANG, Lei; MELANIE K. VANDERHOOF; JAY R. CHRISTENSEN et al., 2018. Efficient Delineation of Nested Depression Hierarchy in Digital Elevation Models for Hydrological Analysis Using Level-Set Method. Online. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 2018-09-28, vol. 55, no. 2, s. 354-368. ISSN 1093-474X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12689>. [cit. 2026-04-26].

ZÁMEK, Tomáš, 2023. *Validace filtračních algoritmů dat leteckého laserového skenování*. Online, Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Vítězslav Moudrý, Ph.D. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí. Dostupné z: <https://theses.cz/id/riui7w/>. [cit. 2026-04-30].

ZAPLETAL, Jakub, 2023. *MODELOVÁNÍ DYNAMIKY VODNÍHO REŽIMU VYBRANÝCH TŮNÍ V CHKO LITOVELSKÉ POMORAVÍ*. Online, Bakalářská práce, vedoucí RNDr. Jan Brus, Ph.D. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra geoinformatiky. Dostupné z: <https://theses.cz/id/6gdb72/>. [cit. 2026-04-26].

ZHANG, Keqi a WHITMAN, Dean, 2005. Comparison of Three Algorithms for Filtering Airborne Lidar Data. Online. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2005-03-01, vol. 71, no. 3, s. 313-324. ISSN 0099-1112. Dostupné z: <https://doi.org/10.14358/pers.71.3.313>. [cit. 2026-04-26].

ZHANG, Wuming; QI, Jianbo; WAN, Peng; WANG, Hongtao; XIE, Donghui et al., 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Online. *Remote Sensing*. 2016-06-15, vol. 8, no. 6, s. 501-501. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs8060501>. [cit. 2026-04-26].

PŘÍLOHY

SEZNAM PŘÍLOH

Vázané přílohy:

- Příloha 1 Odkazy na web práce a webové vizualizace
- Příloha 2 Konfigurace a hodnoty metrik CSF
- Příloha 3 Srovnání shody identifikovaných depresí oblastí L1 a L2
- Příloha 4 Srovnání webových publikačních technologií

Volné přílohy:

- Příloha 5 Poster
- Příloha 6 Zálaha webu bakalářské práce a CesiumJS aplikace
- Příloha 7 Dávkový skript *CSF_iteration* a README
- Příloha 8 Vstupní data (mračna, MOSPREMA DEM) – na vyžádání u vedoucího práce
- Příloha 9 Vstupní data (HY_P, KladSM5, VZCHU)
- Příloha 10 Pracovní a výstupní data

Příloha 1 Odkazy na web práce a webové vizualizace



Web bakalářské práce

<https://tinyurl.com/bpskacel>



CesiumJS vizualizace

<https://tinyurl.com/3Dlihniste>



Cesium Stories vizualizace

(pro účely oponentury)

<https://tinyurl.com/storieslihniste>

Příloha 2 Konfigurace a hodnoty metrik CSF

Konfigurace	Obecné parametry	Pokročilé parametry	Délka doby zpracování	Procentuální míra klasifikovaných bodů
#1	Relief/off	2.0/500/0.5	1,8 s	64,89 % classified as ground
#2	Steep/on	2.0/500/0.5	2,0 s	66,02 % classified as ground
#3	Flat/off	2.0/500/0.5	1,8 s	64,74 % classified as ground
#4	Relief/off	0.2/500/0.4	354.8 s	68.51 % classified as ground
#5	Relief/on	0.2/500/0.4	356.7 s	69.30 % classified as ground
#6	Steep/on	0.2/500/0.4	403 s	69.38 % classified as ground
#7	Steep/on	0.4/500/0.8	53,2 s	99.27 % classified as ground
#8	Steep/on	0.8/500/1.6	8.8 s	97.51 % classified as ground
#9	Steep/on	1.6/500/3.2	1.6 s	100.00% classified as ground
#10	Steep/on	0.8/500/0.5	5.5 s	99.32 % classified as ground

Příloha 3 Srovnání shody identifikovaných terénních depresí v oblastech L1 a L2

ZÁJMOVÁ OBLAST L1							
DMR	Identifikované deprese	Překryvné vlastní deprese	překryvné MOSPREMA deprese	Přesnost	Úplnost	F1 skóre	MAE hloubky
Lineární interpolace							
tri_lin	26	26	26	100%	89,7%	94,5%	4,8 cm
bin_IDW_lin	29	27	26	93,1%	89,7%	91,3%	5,5 cm
bin_min_lin	29	28	27	96,6%	93,1%	94,8%	7,3 cm
bin_avg_lin	29	28	27	96,6%	93,1%	94,8%	5,7 cm
bin_near_lin	29	26	26	89,7%	89,7%	89,7%	6,4 cm
bin_max_lin	29	24	25	82,8%	86,2%	84,4%	6,1 cm
Natural Neighbour interpolace							
tri_nat	27	25	25	92,6%	86,2%	89,3%	5,3 cm
bin_IDW_nat	29	27	25	89,7%	86,2%	87,9%	5,7 cm
bin_min_nat	28	27	26	96,4%	89,7%	92,9%	7,4 cm
bin_avg_nat	28	27	26	96,4%	89,7%	92,9%	5,9 cm
bin_near_nat	28	25	25	89,3%	86,2%	87,7%	6,5 cm
bin_max_nat	26	22	23	84,6%	79,3%	81,9%	5,7 cm
MOSPREMA DEM	29	–	–	–	–	–	–
ZÁJMOVÁ OBLAST L2							
DMR	Počet identifikovaných depresí	Překryvné vlastní deprese	překryvné MOSPREMA deprese	Přesnost	Úplnost	F1 skóre	MAE hloubky
Lineární interpolace							
bin_min_lin	140	128	128	91,4%	94,1%	92,8%	5 cm
bin_avg_lin	138	127	125	92,0%	91,9%	92,0%	5,2 cm
Natural Neighbour interpolace							
bin_min_nat	143	131	130	91,0%	95,6%	93,2%	5,1 cm
bin_avg_nat	139	128	125	92,1%	91,9%	92,0%	8,1 cm
MOSPREMA DEM	136	–	–	–	–	–	–

Příloha 4 Srovnání webových publikačních technologií

Publikační technologie	Technologické a ekonomické aspekty			Subjektivní hodnocení náročnosti			
	Otevřenost	Cena	Uložení datových sad	Zpracování	Publikace	Dodání mapového podkladu	Kombinace datových modelů
Potree	open-source	zdarma	vlastní server	střední	střední	střední	vysoká
BabylonJS	open-source	zdarma	vlastní server	vysoká	střední	vysoká	vysoká
Platforma Cesium	open-source	5 GB uložení 15 GB/měsíc streaming	cloud / vlastní server	nízká	nízká	nízká	nízká
ArcGIS Online	proprietární	placená	cloud	nízká	nízká	nízká	nízká