



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra geomatiky**

Využití leteckých dat pro aktualizaci budov v ZABAGED®

Use of aerial data for update of buildings in ZABAGED®

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Vojtěch Hron

Doktorský studijní program: Geodézie a kartografie

Studijní obor: Geodézie a kartografie

Školitel: prof. Ing. Lena Halounová, CSc.

Praha, 2019



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Vojtěch Hron

Název disertační práce: Využití leteckých dat pro aktualizaci budov v ZABAGED®

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele : prof. Ing. Lena Halounová, CSc.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne 30.8.2019

.....
podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat své školitelce prof. Ing. Leně Halounové, CSc. za vstřícnost, pomoc a rady při zpracování této práce a v průběhu celého doktorského studia. Děkuji také Mgr. Petrovi Dušánkovi, Mgr. Pavlovi Šárovi a Ing. Martině Hůlkové, Ph.D. za cenné poznámky a odborné konzultace k této práci. Hlavní poděkování však patří mé přítelkyni, rodině a kamarádům za jejich vytrvalou podporu, bez které bych tuto práci nedokončil.

Obsah

Abstrakt.....	8
Abstract.....	8
Seznam zkratk.....	9
1 Úvod.....	10
1.1 Cíle.....	11
2 Letecká data.....	12
2.1 Obecné rozdělení a vymezení.....	12
2.2 Letecká data Zeměměřického úřadu.....	13
2.2.1 Nové výškopisné mapování.....	13
2.2.2 Periodické letecké měřické snímkování.....	15
2.2.3 Letecký dálkový průzkum senzory Zeměměřického úřadu.....	17
2.2.4 Tvorba digitálního modelu povrchu.....	19
2.2.5 Porovnání digitálních modelů povrchu z různých typů dat.....	21
2.3 Vhodnost použití pro aktualizaci budov.....	23
2.3.1 Nevýhody leteckého laserového skenování.....	23
2.3.2 Nevýhody obrazové korelace.....	24
2.3.3 Problematika periodicity sběru leteckých dat.....	26
3 Současné evidence budov.....	27
3.1 Katastr nemovitostí.....	27
3.2 Základní báze geografických dat České republiky.....	28
3.3 Porovnání evidencí budov.....	29
4 Nová evidence budov v ZABAGED®.....	31
4.1 Zpřesnění budov a dalších stavebních objektů v ZABAGED®.....	31
4.1.1 Tvorba.....	32
4.1.2 Integrace.....	37
4.1.3 Aktualizace.....	39
4.2 Vyhodnocení přesnosti.....	39
4.2.1 Vyhodnocení přesnosti z roku 2013.....	39
4.2.2 Vyhodnocení přesnosti z roku 2018.....	40
5 Detekce změn.....	42
5.1 Hybridní detekce změn.....	43
5.1.1 Hybridní detekce změn využívající družicová obrazová data.....	43
5.1.2 Hybridní detekce změn využívající letecká data.....	44
5.2 Současné problémy a navrhovaná řešení.....	46
6 Využití leteckých obrazových dat pro aktualizaci budov.....	48
6.1 Princip aktualizace budov.....	48
6.2 Popis metody.....	49
6.2.1 Rastrové zpracování.....	50

6.2.2	Objektové zpracování.....	59
6.3	Testování a vyhodnocení.....	64
6.4	Zkušební provoz v roce 2016.....	66
6.4.1	Popis.....	66
6.4.2	Vyhodnocení	68
6.5	Reálný provoz od roku 2017.....	75
6.5.1	Výběrová aktualizace	75
6.5.2	Vyhodnocení	78
6.5.3	Provoz od roku 2018	78
7	Tvorba 3D modelů budov.....	79
7.1	Směrnice INSPIRE	79
8	Existující softwarová řešení pro tvorbu 3D modelů budov.....	87
8.1	Rešerše	87
8.2	Popis softwaru ENVI LiDAR.....	89
8.3	Popis softwaru Inpho Building Generator.....	90
8.4	Popis vstupních dat	92
8.5	Srovnání.....	92
8.5.1	ENVI LiDAR	92
8.5.2	Inpho Building Generator.....	93
9	Automatická rekonstrukce modelů střech z obrysů budov a leteckých obrazových dat..	96
9.1	Úvod	96
9.1.1	Data	96
9.1.2	Obrysy budov	97
9.1.3	3D modely budov	98
9.2	Popis konstrukce modelu střechy	99
9.2.1	Příprava dat.....	99
9.2.2	Detekce hran	100
9.2.3	Následné zpracování hran.....	101
9.2.4	Kategorizace hran	102
9.2.5	Definice typů střech	103
9.2.6	Tvorba modelů střech	103
9.3	Výsledky a diskuze	106
10	Závěr.....	109
11	Seznam použité literatury	111
12	Přílohy.....	121

Abstrakt

Cílem této práce je představit metodu pro aktualizaci budov a techniku pro automatickou rekonstrukci modelů střech s využitím leteckých dat. Metoda pro aktualizaci budov se řadí do kategorie hybridních detekcí změn, které kombinují pixelový a objektový přístup. Hlavním zdrojem informací pro detekci změn jsou bitemporální svíslé digitální letecké měřické snímky, které obsahují multispektrální, polohové a také výškové informace. Pixelové vyhodnocení umožňuje rychlou lokalizaci a klasifikaci míst s potenciálními změnami budov. Tyto hrubé výsledky jsou následně analyzovány prostřednictvím objektové analýzy obrazu při využití spektrálních, texturálních a kontextuálních příznaků a GIS nástrojů. Technika pro automatizaci rekonstrukci topologicky korektních modelů střech využívá obrysy budov, ortofoto a digitální model povrchu. Vytvořená technika umožňuje detekci střešních hran z ortofota a jejich kategorizaci analýzou prostorových vztahů a výškových informací odvozených z digitálního modelu povrchu. Metoda umožňuje budovy s komplikovaným tvarem dekomponovat na jednoduché části, které jsou zpracovány odděleně. Použití multitemporálních snímků pro velmi komplexní střechy může zvýšit počet detekovaných hran a zlepšit výsledky. Obě metody byly testovány na několika datasetech s různými typy budov a vedly k velmi dobrým výsledkům s korektností 94 % a kompletností 89 % pro aktualizaci budov a průměrné polohové RMSE 0,92 m pro rekonstruované kostry střech.

KLÍČOVÁ SLOVA: budovy, detekce změn, pixelový přístup, objektový přístup, rekonstrukce modelu střechy, detekce hran, letecká data, ortofoto, digitální model povrchu

Abstract

The aim of this work is to present a method for update of buildings and a technique for automatic reconstruction of roof models using aerial data. The method for update of buildings belongs to the category of hybrid change detection techniques which combine pixel-based and object-based approach. The main source of information for change detection are bi-temporal vertical digital aerial photographs which contain multispectral, position and also elevation information. Pixel-based evaluation enables fast localization and classification of places with potential building changes. These coarse results are subsequently analyzed through the object-based image analysis using spectral, textural and contextual features and GIS tools. The technique for automatic reconstruction of topologically correct roof models uses building outlines, orthophoto and digital surface model. The developed technique makes it possible to detect roof edges from the orthophoto and to categorize the edges using spatial relationships and height information derived from the digital surface model. This method allows buildings with complicated shapes to be decomposed into simple parts that are processed separately. Using multitemporal images for very complex roofs can increase the number of detected edges and improve results. Both methods were tested on several datasets with various types of buildings and led to very good results with a correctness of 94 % and completeness of 89 % for update of buildings and a planimetric mean RMSE of 0.92 m for reconstructed roof skeletons.

KEY WORDS: Buildings, Change Detection, Pixel-based approach, Object-based approach, Roof Model Reconstruction, Edge Detection, Aerial Data, Orthophoto, Digital Surface Model

Seznam zkratk

Bpv	Baltský po vyrovnání
ČR	Česká republika
ČSÚ	Český statistický úřad
ČÚZK	Český úřad zeměměřický a katastrální
DAP	anglicky: digital aerial photographs
DKM	digitální katastrální mapa
DMP	digitální model povrchu
DMP 1G	Digitální model povrchu České republiky 1. generace
DMR	digitální model reliéfu
DMR 4G	Digitální model reliéfu České republiky 4. generace
DMR 5G	Digitální model reliéfu České republiky 5. generace
EU	Evropská unie
GDB	geodatabáze (anglicky: geodatabase)
Geonames	databáze geografických jmen České republiky
GIS	geografický informační systém
GNSS	globální navigační družicový systém, (anglicky: Global Navigation Satellite System)
HCD	anglicky: hybrid change detection
HDZ	hybridní detekce změn
IMU	inerciální měřicí jednotka (anglicky: Inertial Measurement Unit)
INSPIRE	infrastruktura pro prostorové informace v Evropě (anglicky: Infrastructure for Spatial Information in Europe)
KMD/KM-D	katastrální mapa digitalizovaná
KN	katastr nemovitostí
LF	letecká fotogrammetrie
LIDAR	anglicky: Light Detection And Ranging
LLS	letecké laserové skenování
LMB	laserové mračno bodů
LMS	letecký měřický snímek/snímky
MB	mračno bodů
MO	Ministerstvo obrany
MZ	Ministerstvo zemědělství
NDMP	normalizovaný digitální model povrchu
NIR	anglicky: Near-Infrared
OLMS	ortogonalizovaný letecký měřický snímek, ortofotosnímek
OMB	obrazové mračno bodů
RADAR	anglicky: Radio Detection And Ranging
RDMP	rozdílový digitální model povrchu
SÚ	stavební úřad
TIN	nepravidelná trojúhelníková síť (anglicky: Triangulated Irregular Network)
UTM	Mercatorovo příčné univerzální zobrazení (anglicky: Universal Transverse Mercator)
ÚHÚL	Ústav pro hospodářskou úpravu lesů
WGS84	Světový geodetický systém 1984 (anglicky: World Geodetic System 1984)
ZABAGED®	Základní báze geografických dat České republiky
ZÚ	Zeměměřický úřad

1 Úvod

Zeměměřický úřad (dále jen ZÚ) je státní instituce, která ve spolupráci s dalšími orgány státní správy každoročně pořizuje digitální letecké měřické snímky (LMS) z jedné poloviny území České republiky (ČR). Ve dvouleté periodě je tak provedeno letecké měřické snímkování celého území ČR. Od roku 2015 pak provádí ZÚ také speciální snímkování a letecké laserové skenování (LLS) vybraných lokalit ČR prostřednictvím vlastních senzorů. Data LSS jsou využívána především pro aktualizaci výškopisných databází ČR. LMS a z nich vytvořená bezešvá ortofoto mozaika (ortofoto) jsou využívány pro pravidelnou aktualizaci Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED®). ZABAGED® je digitální geografický model území ČR. Polohopisná část ZABAGED® je vedena ve dvourozměrném prostoru (2D) a výškopisná část obsahuje trojrozměrnou reprezentaci (3D) terénního reliéfu v podobě vrstevnic a digitálních modelů reliéfu a digitálního modelu povrchu ve formě výšek diskrétních bodů.

Požadavky dnešních uživatelů prostorových dat jsou vysoké, a proto se aktualizací periody u vybraných typů objektů (zejména budov) zkracují. Aktualizace ZABAGED® probíhá různými způsoby s převahou využití leteckých obrazových dat jako podkladu pro tvorbu geometrie. LMS umožňují stereoskopické vyhodnocení s prostorovým vjemem, zatímco ortofoto se využívá především jako podkladová vrstva v geografických informačních systémech (GIS) bez prostorového vjemu. Soudobá manuální fotointerpretace leteckých dat je však značně časově, a tedy i finančně náročná. Další zkracování aktualizací period již není možné provádět bez použití alespoň částečné automatizace. Řešení nabízejí moderní metody a algoritmy, které umožňují automatickou interpretaci vybraného obsahu leteckých dat a automatickou identifikaci rozdílů odborně označovanou jako detekce změn.

Dlouhodobým cílem ZÚ je pravidelně aktualizovat všechny objekty vedené v ZABAGED®. Aktuálním cílem ZÚ je polohově zpřesnit vybrané objekty ZABAGED® (především budovy) a zlepšit tak využitelnost databáze i pro aplikace vyžadující vysokou přesnost prostorových dat (např. územní plánování nebo zákres sítí technické infrastruktury). Záměrem ZÚ však není pouze zpřesnit stávající objekty, ale také doplnit a obohatit ZABAGED®, aby mohla být využita pro tvorbu zcela nových produktů a řešení specializovaných úkolů (např. tvorbu hlukových map nebo modelování znečištění ovzduší), které vyžadují rozšíření obsahu ZABAGED® do trojrozměrné podoby. Součástí trojrozměrné podoby ZABAGED® budou i 3D modely budov, které mohou mít různou podobu danou detailností modelu. Velmi žádané jsou 3D modely budov se zjednodušeným reálným tvarem střešního pláště. Jejich tvorba převážně manuálními postupy je velmi běžná, avšak extrémně časově náročná. Tvorba 3D modelů budov pro celé území ČR bude vyžadovat použití automatizovaných technik, které dosud nebyly detailně analyzovány.

Práce je rozdělena do tří hlavních částí. První část práce (kapitoly 2 a 3) představuje teoretický úvod s popisem, porovnáním a zhodnocením geodat v rámci ČR. Kapitola 2 se věnuje popisu leteckých dat se zaměřením na data, která ZÚ, respektive Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK), pořídil či pravidelně pořizuje. Kapitola 3 obsahuje popis a porovnání současných evidencí budov v rezortu ČÚZK. Druhá část práce (kapitoly 4 až 6) se věnuje polohovému zpřesnění a aktualizaci budov v ZABAGED®. Kapitola 4 se věnuje nové evidenci budov v ZABAGED®. Kapitola 5. je rešerší odborné literatury na téma detekce změn budov. Kapitola 6 je vědeckou prací autora a obsahuje podrobný popis a testování navržené metody pro aktualizaci budov v ZABAGED® pomocí leteckých obrazových dat. Třetí část

práce (kapitoly 7 až 9) je zaměřena na tvorbu 3D modelů budov, čímž logicky navazuje na část předchozí a poukazuje na budoucí rozšíření obsahu ZABAGED® do trojrozměrné podoby. Kapitola 7 představuje teoretický úvod a věnuje se klíčovými informacím směrnice INSPIRE, které souvisí s prostorovými daty budov. Kapitola 8 je zaměřena na ověření možnosti tvorby 3D modelů budov pomocí existujících komerčních softwarů. Kapitola 9 obsahuje popis metody pro automatickou tvorbu modelů střech z obrysů budov a leteckých obrazových dat. Tato kapitola je další významnou částí práce s předběžnými výsledky autorova výzkumu. Závěr práce se nachází v kapitole 10.

1.1 Cíle

Tato práce má dva hlavní cíle. Prvním cílem je navrhnout a otestovat metodu pro aktualizaci budov v ZABAGED®, která bude založena na automatickém vyhodnocení leteckých dat ZÚ. Návrh metody by měl být univerzální a škálovatelný, aby ji bylo možné využít jako celek nebo samostatné části. Metoda bude otestována na produkčních datech ZÚ a měla by umožňovat identifikaci nových a zbořených budov.

Druhým cílem je analyzovat možnosti automatické tvorby 3D modelů budov založených na kresbě budov ZABAGED® a dostupných leteckých datech ZÚ. Cílem je zkušební tvorba modelů budov s reálným tvarem střešního pláště (LoD2) pomocí existujících komerčních řešení a vlastního přístupu. Vytvořené modely musí být topologicky korektní, věrné realitě a jejich tvorba by neměla vyžadovat použití (sběr) nových leteckých dat vysokého rozlišení.

2 Letecká data

2.1 Obecné rozdělení a vymezení

Letecká data jsou data leteckého dálkového průzkumu Země. V obecné rovině je lze chápat jako měření elektromagnetického záření odraženého od zemském povrchu pomocí senzorů umístěných na leteckých nosičích. Letecká data lze dělit podle různých přístupů, mezi obvyklé způsoby patří dělení dle typu senzoru, vlnové délky měřených dat či typu nosiče.

Rozdělení podle typu senzoru:

- pasivní senzory – využívají přírodní zdroje záření (např. Slunce)
- aktivní senzory – využívají umělé zdroje záření (např. LIDAR nebo RADAR)

Rozdělení podle vlnové délky měřených dat:

- viditelné světlo – elektromagnetické záření o vlnové délce cca 390 až 760 nm
- infračervené záření – elektromagnetické záření o vlnové délce cca 760 nm až 1 mm
- mikrovlny – elektromagnetické záření o vlnové délce cca 1 mm až 1 m

Rozdělení podle typu nosiče:

- pilotované prostředky (s pilotem na palubě) – letadlo nebo helikoptéra
- bezpilotní prostředky (bez pilota na palubě) – tzv. drony v podobě letadla, křídla, vzducholoď, helikoptéry, multikoptéry atd.

V této práci se budeme věnovat leteckým datům získaným pomocí typických senzorů určených pro konvenční (civilní) mapování rozsáhlých území a celých států. Pro tyto účely jsou využívány převážně pilotované prostředky v podobě letadel nesoucí pasivní či aktivní senzory. Mezi typické pasivní senzory pro sběr leteckých dat z rozsáhlých území patří digitální měřické kamery s převážně plošným snímačem pořizující svislé multispektrální snímky ve viditelném a blízkém infračerveném spektru (760 nm až 1,4 μm). Zpracováním leteckých dat z měřických kamer se věnuje fotogrammetrie. Typickým aktivním senzorem pro sběr leteckých dat je pak laserový skener (LIDAR), což je zařízení emitující zpravidla monochromatické infračervené laserové záření k měření vzdálenosti zemského povrchu a objektů na něm umístěných. Zpracování leteckých dat z laserových skenerů se věnuje dálkový průzkum Země. Letecká data získaná pomocí aktivních senzorů vysílajících mikrovlny (RADAR) umístěných na letadle zpravidla s boční orientací (anglicky: Side-Looking Airborne RADAR, zkráceně: SLAR) se syntetickou aperturou (anglicky: Synthetic Aperture Radar, zkráceně: SAR) nejsou v této práci uvažována. Historicky se jedná o známá letecká data, která jsou však v současné době využívána převážně pro speciální výzkumné nebo vojenské účely.

2.2 Letecká data Zeměměřického úřadu

V této kapitole jsou popsána letecká data, která ZÚ pořídil či pravidelně pořizuje. Jedná se o data leteckého laserového skenování a letecké měřické snímky. Součástí této kapitoly je také stručný popis senzorů pro jejich sběr a výčet odvozených produktů. V závěru kapitoly se nachází porovnání leteckých laserových a obrazových dat z hlediska jejich vhodnosti pro aktualizaci budov v ZABAGED®.

2.2.1 Nové výškopisné mapování

Data leteckého laserového skenování (LLS) byla pořízena v rámci projektu nového výškopisného mapování území ČR. Tento projekt byl realizován v součinnosti s Ministerstvem obrany (MO) a Ministerstvem zemědělství (MZ) a jeho cílem bylo výrazně zvýšit přesnost a podrobnost výškopisných podkladů pro území ČR, a tím rozšířit jejich využitelnost. [1]

LLS bylo realizováno pomocí skeneru RIEGL LMS–Q680 (obr. 1), který byl součástí pronajatého leteckého laserového skenovacího systému LiteMapper 6800 od společnosti IGI mbH (obr. 2). Nedílnou součástí systému bylo také zařízení pro autonomní určování polohy skládající se z aparatury globálního navigačního družicového systému (GNSS) a inerciální měřící jednotky (IMU). [2]



Obr. 1. Laserový skener RIEGL LMS–Q680 [3]

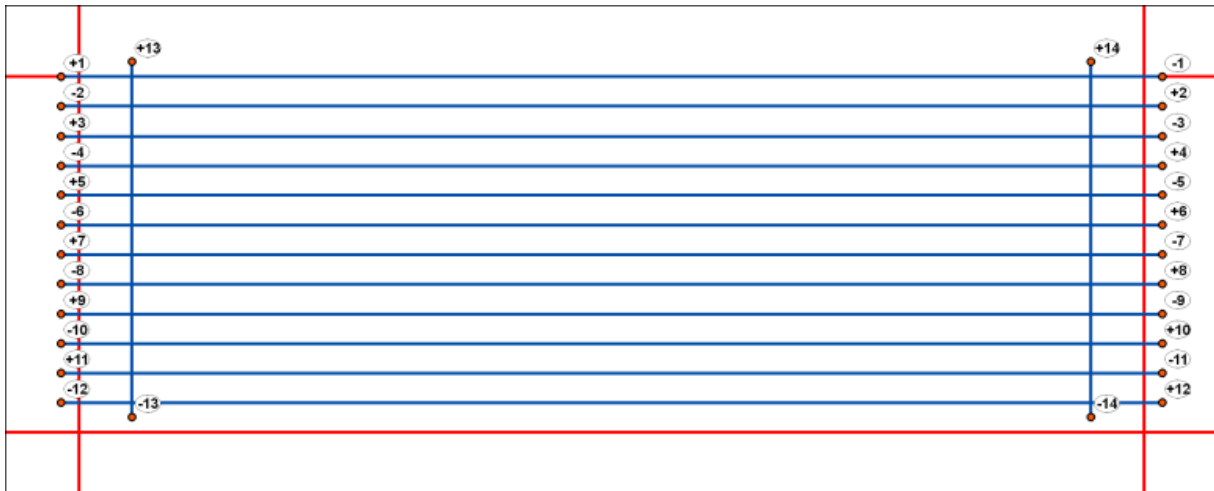


Obr. 2. Letecký laserový skenovací systém IGI LiteMapper 6800 [4]

Území ČR bylo rozděleno na tři pásma, přičemž 1. třetina území (pásmo střed) byla naskenována v roce 2010, 2. třetina území (pásmo západ) v roce 2011 a poslední třetina (pásmo východ) v roce 2013. Jednotlivá pásma jsou dále rozdělena na menší části, tzv. bloky (obr. 3). Pro sběr dat byl využit letoun MO Let L-410 FG. Základní parametry LLS (pro území s maximální nadmořskou výškou do 800 metrů) jsou uvedeny níže v tabulce 1. [2]

Tab. 1. Základní parametry leteckého laserového skenování [5]

Parametr	Hodnota
střední výška letu nad terénem	1.4 km (jaro/podzim), 1.2 km (léto)
frekvence skenování	120 kHz (jaro/podzim), 80 kHz (léto)
maximální vychýlení paprsku od svislé osy	30°
příčný překryt skenování	45-59 %
vzdálenost letových os	830 m (jaro/podzim), 715 m (léto)
obvyklý počet podélných letových řad v bloku	12 (jaro/podzim), 14 (léto)
obvyklý počet příčných letových řad v bloku	2
velikost bloku	20-60 km (délka), 10 km (šířka)
minimální požadovaná hustota sběru dat	1 bod/m ²



Obr. 3. Ukázka naplánovaného jarního letového bloku [5]

Měřená data byla georeferencována v programu RiPROCESS od společnosti RIEGL s využitím dat permanentních referenčních GNSS stanic CZEPOS, VESOG a POLOM a následně transformována do souřadnicového systému zobrazení UTM (zóna 33) na elipsoidu WGS84 a výškového systému Balt po vyrovnání (Bpv). Výsledné rozsáhlé sady 3D bodů (tzv. mračna bodů) byly automaticky klasifikovány v softwaru SCOP++ verze 5.4 od firmy Inpho GmbH do 5 tříd, reprezentujících terén, budovy, vegetaci, výškové překážky leteckého provozu a chybná měření. Klasifikovaná mračna bodů byla rozdělena do samostatných textových souborů podle jednotlivých tříd, přičemž formát zápisu odpovídal schématu X, Y, H pro každý bod. [2]

Úspěšnost automatického zatřídění pomocí softwaru SCOP++ byla kolem 90 %. Mezi jednotlivými třídami docházelo k vzájemnému prolínání, což znemožňovalo použití této klasifikace jako vstupu pro další zpracování. Manuálně zkontrolována a opravena byla pouze třída reprezentující terén a zcela nově klasifikována byla třída reprezentující mosty. Tyto dvě třídy představují nezbytný podklad pro ortorektifikaci LMS a tedy pro tvorbu bezešvé ortofoto mozaiky, která představuje jedno ze stěžejních děl ZÚ potažmo ČÚZK. Zbývající třídy: budovy, vegetace, výškové překážky leteckého provozu a chybná měření zůstala bez manuální kontroly a z tohoto důvodu nelze na jejich správnost spoléhat. [2]

Výškopisná data LLS zařazená do třídy terén (po manuální kontrole) byla použita jako podklad pro vypracování nových produktů ČÚZK, mezi které patří Digitální model reliéfu České republiky 4. generace (DMR 4G) a Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G). [1]

DMR 4G představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v pravidelné síti (5x5 m) bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku ve výškovém referenčním systému Bpv s úplnou střední chybou výšky 0,3 m v odkrytém terénu a 1 m v zalesněném terénu. [6]

DMR 5G představuje zobrazení přirozeného nebo lidskou činností upraveného zemského povrchu v digitálním tvaru ve formě výšek diskrétních bodů v nepravidelné trojúhelníkové síti (TIN) bodů o souřadnicích X, Y, H, kde H reprezentuje nadmořskou výšku

ve výškovém referenčním systému Bpv s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. [6]

Dalším produktem ČÚZK je Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G). DMP 1G představuje zobrazení území včetně staveb a rostlinného pokryvu ve formě TIN bodů s úplnou střední chybou výšky 0,4 m pro přesně vymezené objekty (budovy) a 0,7 m pro objekty přesně neohrazené (lesy a další prvky rostlinného pokryvu). DMP 1G je v otevřeném terénu tvořen DMR 5G, který je v místech detekované zástavby nahrazen body reprezentujícími střešní pláště a v místech souvislé vysoké vegetace nahrazen body reprezentujícími horní části korun stromů. [6]

2.2.2 Periodické letecké měřické snímkování

Letecké měřické snímkování (dále již jen snímkování) patří na našem území k tradičním metodám sběru dat DPZ. Aktuální snímkování ČR je prováděno ve spolupráci ČÚZK, MO a MZ ve dvouleté periodě. Sběr dat je (od roku 2010) prováděn digitálními měřickými kamerami. Mezi roky 2010 - 2015 byly pro snímkování použity kamery od společnosti Vexcel (od roku 2006 součást společnosti Microsoft) UltraCam X/Xp (obr. 4) a UltraCam Eagle, které pořizují obrazová data centrální projekcí. Kompletní sestava pro snímkování je velice podobná sestavě pro LLS, rovněž obsahuje aparaturu GNSS a IMU. Sestava se tak liší v zásadě pouze jiným typem senzoru (obr. 5) a použitím speciální montáže pro kompenzaci náklonů. [7]



Obr. 4. Velkoformátová digitální kamera Microsoft UltraCam Xp [8]



Obr. 5. Letecký snímkový systém (kamera, ovládací konzole a tzv. kontroler) [9]

Snímkování kamerami Vexcel probíhá současně v panchromatickém pásmu, červeném (anglicky: red, zkráceně: R), zeleném (anglicky: green, zkráceně: G), modrém (anglicky: blue, zkráceně: B) a blízkém infračerveném pásmu (anglicky: Near-Infrared, zkráceně: NIR). Díky vysokému rozlišení panchromatického pásma a následnému pan-sharpeningu zbývajících barevných pásem, dosahují výsledné letecké snímky velmi dobré obrazové kvality. Následující obrázky znázorňují výřez leteckého měřického snímku (LMS) ve viditelném spektru (obr. 6) a blízkém infračerveném pásmu (obr. 7). [8]

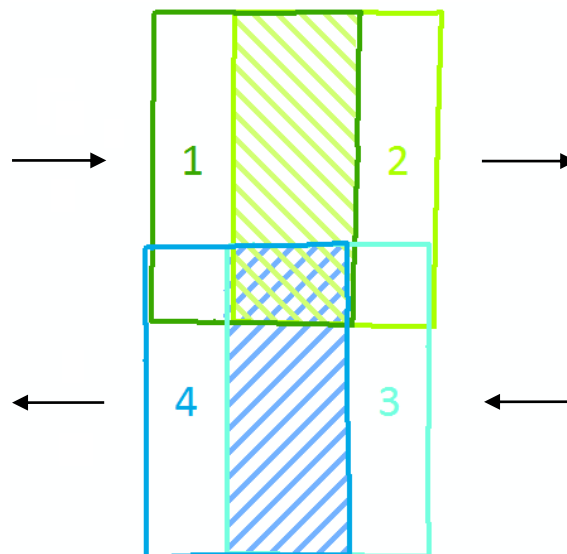


Obr. 6. Výřez LMS (viditelná část spektra) [10]



Obr. 7. Výřez LMS (blízké infračervené pásmo) [10]

Parametry snímkování jsou voleny s ohledem na zamýšlené použití LMS. LMS jsou používány především pro tvorbu Ortofoto ČR (bezešvé ortofoto mozaiky) s velikostí pixelu 0,20 m od roku 2016 (0,25 m pro roky 2009 až 2015) a pro stereofotogrammetrické vyhodnocení libovolného místa v ČR (pro libovolné místo v ČR je dostupná alespoň jedna stereodvojice). LMS jsou pořizovány s přibližně 60% podélným překrytem (v letové řadě) a 30% příčným překrytem (mezi letovými řadami). Situace je znázorněna na obrázku 8. [7]



Obr. 8. Podélné (1-2, 3-4) a příčné (1-4, 2-3) překryty při leteckém snímkování [11]

Ortofoto ČR je díky širokému interdisciplinárnímu uplatnění (podkladová vrstva v GIS) stěžejní a zároveň také nejžádanější produkt ZÚ, o čemž svědčí zkrácení snímkovacích period území ČR (od roku 2012) ze tříletých na dvouleté. Ortofoto představuje fotografický obraz zemského povrchu, na kterém jsou odstraněny posuny obrazu způsobené výškovou nejednotností reliéfu. Z obrazu však nejsou odstraněny radiální posuny objektů vyvýšených nad zemský povrch, jde především o budovy a vegetaci. Nejedná se tedy o tzv. věrné ortofoto (anglicky: true orthophoto). Okrajové části snímků, na kterých je nejpatrnější „padání“ budov a vysoké vegetace ve směru od středu snímku, mohou být díky velkému

vzájemnému překrytu LMS oříznuty. Středové části ortogonalizovaných LMS (OLMS) jsou poté komponovány do barevně vyrovnané bezešvé mozaiky a děleny v kladu mapových listů Státní mapy 1:5 000 (dále jen SM 5). Každý list Ortofota ČR je tak složen hned z několika ortorektifikovaných snímků. ČÚZK poskytuje data nativně ve výdejním formátu JPEG (anglicky: Joint Photographic Experts Group), který však, vzhledem k použité ztrátové metodě komprese, obsahuje značné množství „čtvercových artefaktů“ a není tak pro některé obrazové analýzy vhodný. Jedná se zejména o analýzy texturálních vlastností. Z tohoto důvodu jsou data ukládána a na vyžádání poskytována i v bezztrátovém formátu TIFF (anglicky: Tagged Image File Format) se standardní 24bitovou barevnou hloubkou pro každý pixel. ČÚZK poskytuje též tzv. Archivní ortofoto České republiky jako černobílé ortofoto od roku 1998 a barevné ortofoto od roku 2003. Původní LMS nejsou standardně nabízeny, ale je možné o jejich prodej zažádat. [12]

2.2.3 Letecký dálkový průzkum senzory Zeměměřického úřadu

Pro zajištění aktualizace datových sad ZÚ byl v roce 2015 realizován projekt „Pořízení leteckých senzorů pro informační systém zeměměřictví a Geoportál ČÚZK“. V rámci projektu byl zakoupen letecký laserový skener Leica ALS80-CM a letecká digitální fotogrammetrická kamera Leica ADS100 včetně příslušenství a nezbytného programového vybavení pro jejich provoz. V rámci kooperace s MO byl jako nosič senzorů určen speciální vojenský fotogrammetrický letoun Let L-410 FG, který musel být pro instalaci senzorů upraven, přičemž je schopen nést vždy pouze jeden senzor, a certifikován ve výrobním závodě v Kunovicích. Letecký laserový skener je využíván pro aktualizaci výškopisných databází ČR a digitální letecká fotogrammetrická kamera je využívána pro speciální snímkování ve vysokém rozlišení pro potřeby aktualizace ZABAGED®, především pro zpřesnění polohového vymezení staveb. Oba senzory je možné použít též pro potřeby integrovaného záchranného systému v případě krizových situací (povodně, ekologické havárie atd.). [13]

Letecký laserový skenovací systém Leica ALS80

Letecký laserový skenovací systém Leica ALS80 se skládá ze skeneru, kontroleru, rozhraní pro operátora a pilota (obr. 9), montáže pro skener a kontroler a propojovacích kabelů. Na obrázku 10 je vidět instalace systému do letadla MO Let L-410 FG. [13]

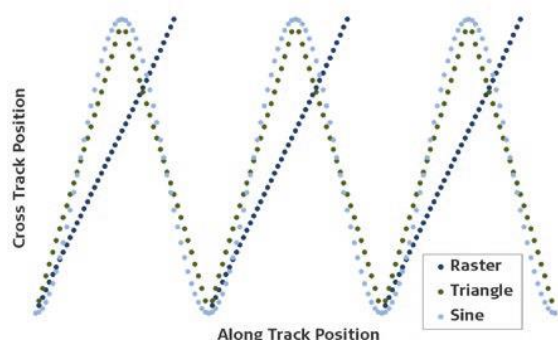


Obr. 9. Letecký laserový skenovací systém Leica ALS80 [14]

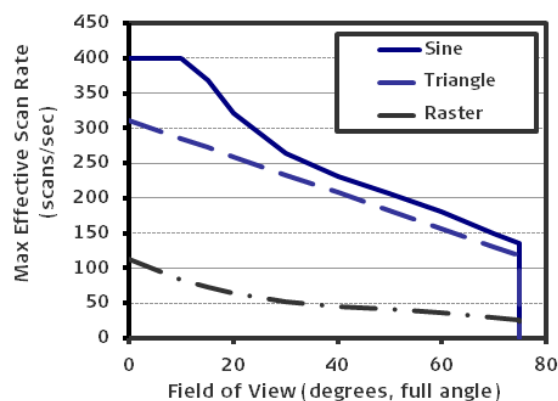


Obr. 10. Instalace leteckého laserového skenovacího systému Leica ALS80 [13]

Skenovací systém umožňuje sběr dat v konvenčním módu jednoho laserového pulzu ve vzduchu (anglicky: Single Pulse in Air, zkráceně: SPiA) nebo v módu více pulzů (maximálně 5) ve vzduchu (anglicky: Multiple Pulses in Air, zkráceně MPiA). Laserový skener tedy může vyslat nový pulz, aniž by čekal na odraz od předchozího vyslaného pulzu, díky čemuž je umožněna vyšší frekvence měření pro větší vzdálenosti [15]. Systém je schopen detekovat teoreticky neomezené množství odrazů pro každý vyslaný laserový pulz, přičemž vertikální rozlišovací vzdálenost je přibližně 2,8 m. Systém poskytuje 3 různé skenovací vzory: sinusoidu, trojúhelník a rastr (obr. 11). Maximální rychlost skenování závisí na skenovacím vzoru a šířce zorného pole (obr. 12). Přehled základních parametrů leteckého laserového skenovacího systému Leica ALS80-CM lze nalézt v tabulce 2. [14]



Obr. 11. Skenovací vzory LLS Leica ALS80 [14]



Obr. 12. Graf závislosti rychlosti skenování na skenovacím vzoru a šířce zorného pole [14]

Tab. 2. Parametry leteckého laserového skeneru Leica ALS80-CM [16]

Parametr	Hodnota
Maximální letová výška nad terénem	1600 m
Minimální letová výška nad terénem	100 m
Maximální frekvence měření	1000 kHz
Zorné pole	0 – 72°
Skenovací vzor	sinusoida, trojúhelník, rastr
Max. frekvence opakování sk. vzoru	2*200 Hz (sinusoida), 2*158 Hz (trojúhelník), 120 Hz (rastr)
Počet odrazů	neomezený
Počet měření intenzity	3 (první až třetí odraz)

Letecká fotogrammetrická kamera Leica ADS100

Letecká digitální fotogrammetrická kamera Leica ADS100 se skládá z podobných komponent jako letecký laserový skenovací systém Leica ALS80. Jedná se o kameru, kontroler, rozhraní pro operátora a pilota a montáž (obr. 13.). Instalace v leteckém nosiči je velice podobná (obr. 14). Specifickým vybavením leteckých fotogrammetrických přístrojů je závěs kamery (montáž), který pomocí gyroskopů eliminuje mírné náklony leteckého nosiče (u montáže Leica PAV100 do 8°). Letecká kamera Leica ADS100 obsahuje pushbroom senzor Leica SH100 (řádková kamera), který je vybaven 13 liniovými CCD snímači ve 3 skupinách, přičemž každý má 20 tis. pixelů o velikosti 5 μm/pixel. Obrazový záznam je pořizován ve 14bitovém rozlišení současně v nadírovém směru (5 snímačů v barevném spektru: R, G, G, B, NIR), vpřed a vzad (4 a 4 snímače v barevném spektru: R, G, B, NIR) ve směru letu nosiče. ZÚ aktuálně využívá pouze jeden zelený kanál v nadírovém směru, tedy celkem 12 liniových snímačů. Přehled základních parametrů leteckého senzoru Leica SH100 lze nalézt v tabulce 3.

Ohnisková vzdálenost optické soustavy je 62,5 mm. Při střední výšce letu 1250 m nad terénem je dosaženo rozlišovací schopnosti na zemském povrchu 10 cm. [17]



Obr. 13. Letecký snímkovací systém Leica ADS100 [17]



Obr. 14. Instalace leteckého snímkovacího systému Leica ADS100 [13]

Tab. 3. Parametry leteckého senzoru Leica SH100 [17]

Parametr		Hodnota
Úhel záběru (zorné pole)	vřed	25,6° (65,2°)
	nadir	0° (77,3°)
	vzad	-17,7° (72,5°)
Rozsah spektrálního pásma	modrá (B)	435 – 495 nm
	zelená (G)	525 – 585 nm
	červená (R)	619 – 651 nm
	blízka infračervená (NIR)	808 – 882 nm

2.2.4 Tvorba digitálního modelu povrchu

LMS obsahují spektrální, polohovou a výškovou informaci o nasnímaném území, čímž představují zcela jedinečný zdroj dat. Bohužel, fotointerpretace zájmového obsahu probíhá stále převážně manuálně. Především stereoskopické vyhodnocení s prostorovým vjemem je činností extrémně časově, a tedy i finančně náročnou. Automatická extrakce výškové informace z LMS prostřednictvím obrazové korelace představuje zajímavou a dosud nepříliš využívanou techniku. Výsledkem obrazové korelace jsou, rovněž jako u LLS, mračna bodů. Tato technika představuje alternativní metodu získávání výškopisných informací pro rozsáhlá území. Následující část textu se věnuje popisu tvorby DMP z LMS pomocí komerčního softwaru. [11]

Pro tvorbu mračna bodů metodou automatické obrazové korelace byl použit software MATCH-T DSM (dále jen MATCH-T), který je součástí softwarového balíku ApplicationsMaster od německé společnosti Inpho. Společnost Inpho se zaměřuje na produkci programového vybavení pro fotogrammetrii a od roku 2007 je dceřinou společností Trimble. Zpracování dat bylo provedeno na Zeměměřickém odboru Pardubice (ZO Pardubice), který disponuje licencí softwaru. [1]

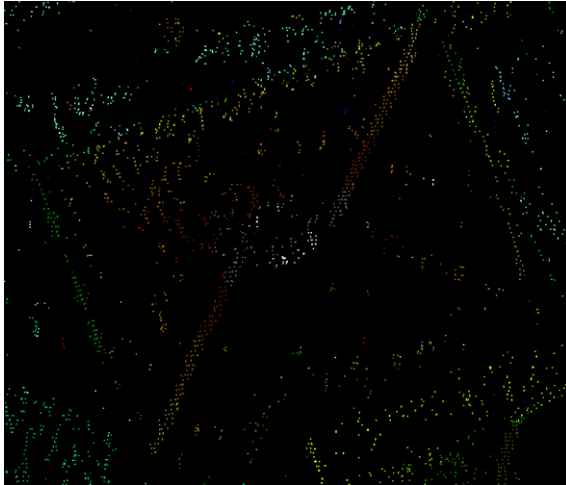
Zpracování

Při zpracování dat v softwaru MATCH-T jsou použity LMS se známými prvky vnitřní a vnější orientace (po výpočtu automatické aerotriangulace), čímž je značně ulehčeno inicializační nastavení programu. Před zahájením obrazové korelace je nutno vygenerovat ke všem LMS doprovodné obrazové pyramidy v 10 úrovních. Software MATCH-T umí nativně pracovat s neomezeným počtem snímků ve formátu TIFF nebo JPEG. Jiné formáty je možno používat pomocí speciálních pluginů. Je podporována jakákoliv rotace snímků a velikost pixelu, přičemž maximální rozdíl měřítko (velikosti pixelu) v překrytových plochách je 30 %. Obrazovou korelací je možno spustit na předem vymezeném území, které je definováno DXF souborem (obsahujícím jednu či více zájmových ploch), nebo nechat software vytvořit mračno bodů na maximální možné ploše. Po spuštění procesu zpracování již není nutný jakýkoliv dohled ze strany uživatele, tvorba mračna bodů probíhá zcela automaticky. [1]

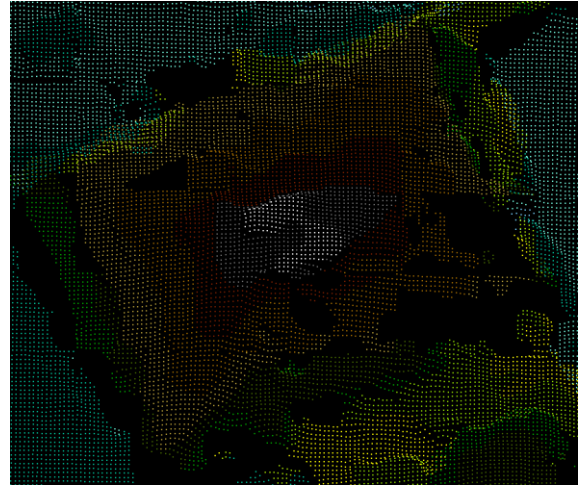
Software MATCH-T umožňuje jednoduché a pokročilé nastavení parametrů obrazové korelace. Jednoduché nastavení je možné skrze grafické uživatelské rozhraní, pokročilé nastavení prostřednictvím editace speciálního konfiguračního textového souboru „MATCHT.status“. Největší vliv na výslednou podobu bodového mračna má typ zvoleného korelačního algoritmu. Implementovány jsou dva odlišné algoritmy. Feature Based Matching (FBM) je oblastně založená párovací strategie, která je velice rychlá a robustní. Je vhodná na začátek procesu (pro obrazové pyramidy malého rozlišení), protože vede k rychlému nalezení dobré báze. Cost Based Matching (CBM) je naproti tomu pixelově založená technika (pixel-by-pixel), kde pro každý pixel z jednoho snímku je hledán odpovídající pixel ve snímku druhém. Tento algoritmus produkuje velice husté mračno bodů, odpovídající originálnímu rozlišení zdrojových snímků. V případě LMS s rozlišením cca. 20 cm/pixel (od roku 2016) je možno dosáhnout hustoty mračna až 25 bodů/m². [1]

Oba algoritmy mají svá pozitiva i negativa. Technika FBM produkuje plošně nehomogenní mračno bodů (obr. 15), protože body jsou identifikovány pouze na texturně výrazných plochách nebo na přechodech homogenních ploch (např. lomové hrany střešního pláště na obr. 17). Vytvořené mračno bodů však obsahuje velké množství chybně detekovaných bodů. Algoritmus CBM vytváří plošně homogenní bodové mračno (obr. 16), které obsahuje mnohem méně odlehlých bodů. Oproti technice FBM je však vytvořené mračno bodů zdánlivě vyhlazené, polohově spojitě, bez výskytu ostrých hran (např. na rozhraní jednotlivých rovin střešního pláště na obr. 17). [1]

Obrázky 15 a 16 dokumentují nefiltrovanou podobu mračna bodů pro originální rozlišení LMS v závislosti na použitém typu algoritmu. Pro následující porovnání digitálních modelů povrchu bylo použito mračno bodů, které je vytvořeno algoritmem CBM (obr. 16), protože je svou homogenitou více podobné datům LLS. [1]



Obr. 15. Mračno bodů pro algoritmus FBM [1]



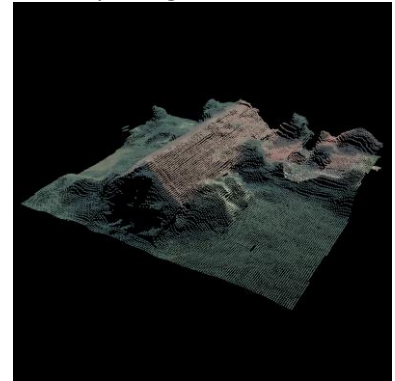
Obr. 16. Mračno bodů pro algoritmus CBM [1]



Obr. 17. LMS budovy s valbovou střechou [1]



Obr. 18. LMS budovy se sedlovou střechou [18]

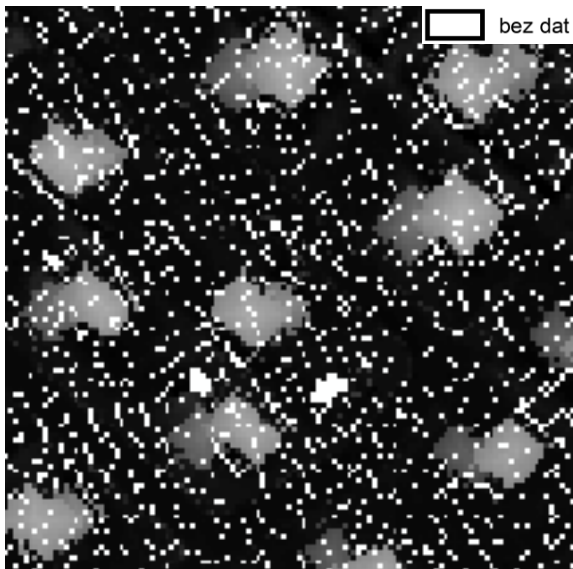


Obr. 19. 3D pohled na obarvené mračno bodů [18]

Software MATCH-T umožňuje automaticky obarvovat mračno bodů (od verze softwaru 5.4 a vyšší) již při jeho generování. Obarvení je založeno na vstupních barevných LMS (obr. 18). Díky obarvení je dosaženo souladu mezi spektrální a výškovou informací pro každý bod mračna. Obarvené mračno bodů (obr. 19) je tak vhodné pro vizualizaci a prezentační účely. [18]

2.2.5 Porovnání digitálních modelů povrchu z různých typů dat

Mračno bodů z obrazové korelace bylo srovnáno s referenčními daty LLS s cílem zjistit vzájemné výškové rozdíly. Samotná mračna bodů je obtížné navzájem porovnat (nejen kvůli rozdílné hustotě), proto byla převedena do rastrové podoby DMP s rozlišením 1 m/pixel. Z důvodu lepší vizualizace byla data dále normalizována pomocí DMR 4G, čímž vznikly NDMP. Testovacím územím byla část města Černošice s novou zástavbou. Obrázky 20 a 21 představují NDMP z dat LLS a obrazové korelace LMS. Obrázek 23 dokládá, že výškové rozdíly mezi daty LLS a daty obrazové korelace jsou u stabilních povrchů (domy, silnice, terén bez vegetace na obr. 22) v rozsahu -0.5 až 0.5 m. Oba NDMP (DMP) lze označit za rovnocenné zdroje výškových dat, jejichž kvalita je obdobná. [19]



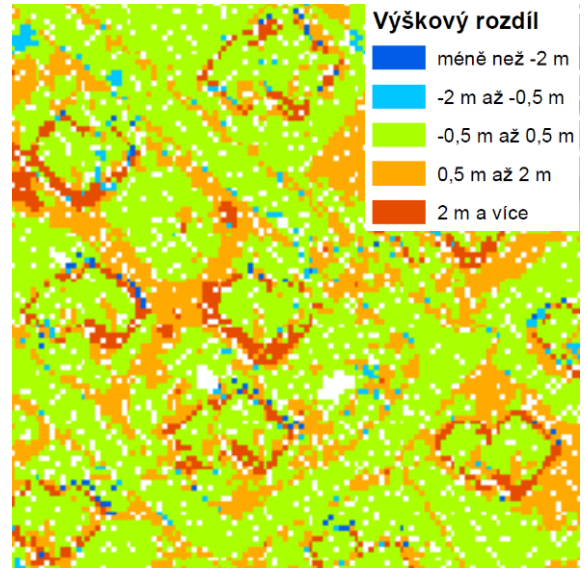
Obr. 20. NDMP z LLS (rozlišení rastru 1 m) [20]



Obr. 21. NDMP z LMS (rozlišení rastru 1 m) [20]



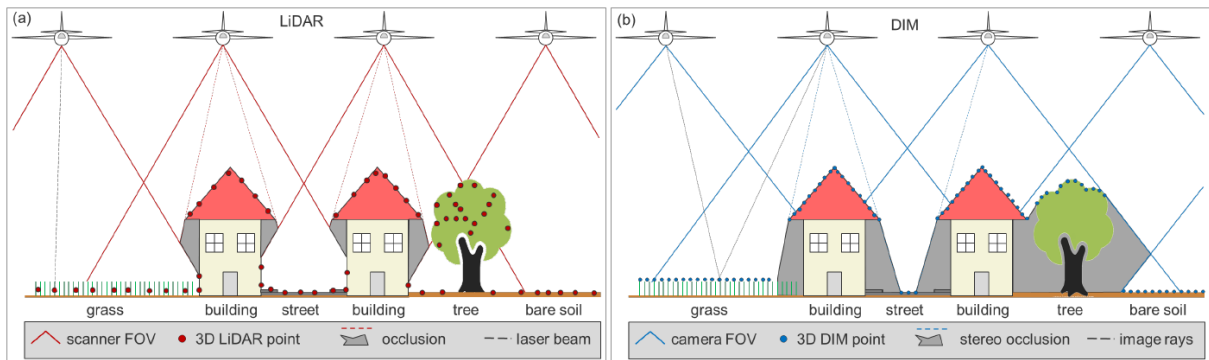
Obr. 22. Ortofoto [20]



Obr. 23. Rozdíl NDMP (LMS - LLS) [20]

Výraznější výškové rozdíly lze nalézt především u vegetace a v místě skokových změn výšky (např. okraje budov). Rozloha budov v datech LLS se zdá menší než v datech obrazové korelace LMS. Tento jev lze vysvětlit několika způsoby. Pravidelné LMS snímkování probíhá z výšky cca 3100 m (3500 m pro roky 2012-2015). LLS bylo provedeno z výšky cca 1200-1400 m nad terénem. Nižší výška letu v případě sběru dat LLS, montáž laserového skeneru v mírně nakloněné pozici (asi 15°) v podélném směru letu a maximální vychýlení paprsku až 30° napříč směru letu umožnily omezeně snímat i prostory zakryté střešním pláštěm budov. Rozdíl mezi obrazovou korelací a LLS je také v samotném principu tvorby mračna bodů. LLS (obecně LIDAR) je aktivní polární metoda měření vzdálenosti, zatímco obrazová korelace je metoda založená na principu protínání paprsků stereoskopických dvojic. Na obrázku 24 je možné porovnat podobu mračen bodů z LLS a obrazové korelace LMS. Náznorně vyjádřeny jsou také zakryté/zastíněné (anglicky: occlusion) oblasti pro jednotlivé metody. Tvary budov v datech LLS jsou blíže zákresu budov v KN, kde jsou budovy vyobrazeny v místě průniku obvodového pláště s terénem. Tvary budov v mračnu bodů z obrazové korelace LMS odpovídají průmětu střešního pláště na terén nebo mohou být

dokonce větší. Střešní plášť budov přitom může mít nezanedbatelné přesahy přes obvodové zdivo. [11]



Obr. 24. Porovnání podoby mračen bodů z LLS (vlevo) [červené body] a obrazové korelace LMS (vpravo) [modré body] a zakryté oblasti (šedě) [21]

Oba typy leteckých dat ČÚZK lze použít k tvorbě DMP, které si kvalitou téměř odpovídají. Vhodnost použití pro aktualizaci budov je popsána v následující podkapitole.

2.3 Vhodnost použití pro aktualizaci budov

Na základě předchozího srovnání DMP lze usuzovat, že oba druhy dat jsou vhodné pro aktualizaci budov v ZABAGED®. DMP vytvořené z leteckých dat však mají jistá specifika, která vyplývají z použitých technologií sběru dat. Následující část textu se věnuje negativním aspektům obou typů dat, a především pak problematice periodicity jejich sběru, která je klíčovým parametrem pro pravidelnou a dlouhodobě udržitelnou aktualizaci budov v ZABAGED®.

2.3.1 Nevýhody leteckého laserového skenování

LLS představuje neselektivní metodu sběru prostorových dat. Ačkoliv se jedná o neselektivní metodu sběru dat, může docházet ve výstupních datech k lokálním zředěním bodového mračka. Lokální zředění mají podobu velmi malých oblastí (např. některé budovy či jejich části), kde se nenacházejí téměř žádné body (tzv. řídké mračko bodů). Tento jev může být způsoben několika faktory, kterým nelze zcela zabránit (vlhkost na povrchu střechy v době skenování, odrazivost materiálu střešní krytiny, orientace střechy vůči skeneru atd.). Tato lokální zředění mají výrazný vliv na možnost identifikace budov z mračka bodů, pro kterou je rovnoměrná hustota bodového mračka jedním z nejdůležitějších předpokladů. Následující obrázek 25 obsahuje ukázkou ortofota a mračka bodů z dat LLS s nerovnoměrnou hustotou. Obrázek 26 zachycuje ortofoto a detekované obrysy budov z dat LLS (mezikrok tvorby DMP 1G). [1]



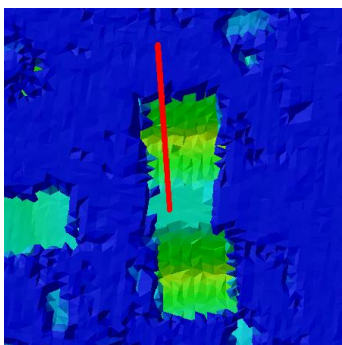
Obr. 25. Ortofoto, mračno bodů LLS (žluté body) a oblasti s řídkým výskytem bodů (červené kruhy) [1]



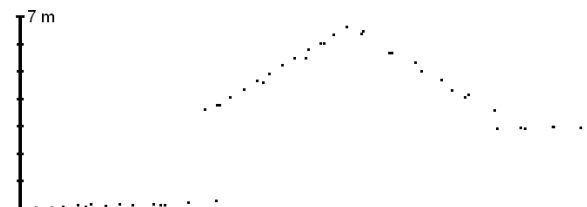
Obr. 26. Ortofoto a detekované obrysy budov z mračna bodů LLS (modré linie) [1]

2.3.2 Nevýhody obrazové korelace

Následující obrázky dokumentují senzitivitu obrazové korelace na ostrost vstupních LMS. Pro lepší ilustraci jsou data vyobrazena i včetně dat LLS (obr. 27 a 28). Profil byl veden severní polovinou dvojdomku s klasickou sedlovou střechou a přílehlou garáží/přístavbou. Zbývající obrázky zachycují LMS a z nich vygenerované mračno bodů (MB) na podélném překrytovém území, přičemž dvojdomek se nacházel na okrajích LMS (překrytu letových řad). Snímková dvojice č. 1 (obr. 29) odpovídá snímkům č. 1 a 2 a snímková dvojice č. 2 (obr. 30) zase snímkům č. 3 a 4 z obrázku 8. Mračna bodů (MB) vytvořené z těchto snímků mají rozdílnou kvalitu. MB vytvořené ze stereodvojice č. 1 (tzv. stereomodel č. 1 na obr. 31), má oproti MB ze stereodvojice č. 2 (stereomodelu č. 2 na obr. 32) výrazně nižší kvalitu. Důvod je patrný při pohledu na snímkovou dvojici č. 1 (obr. 29), jejíž obraz je méně ostrý a má také větší množství šumu. I takto drobné rozostření obrazu, které pro člověka a vizuální interpretaci nepředstavuje zásadní problém, může negativně ovlivnit výslednou kvalitu generovaného DMP. Pro dosažení kvality srovnatelné s daty LLS je tedy nutné použít LMS s ostrou kresbou a minimem šumu. [11]



Obr. 27. Stínovaný TIN z dat LLS (barevná hypsometrie) a profil severní polovinou dvojdomku (červeně) [11]



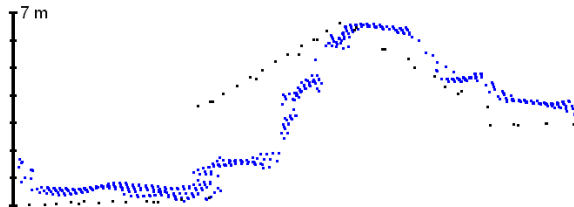
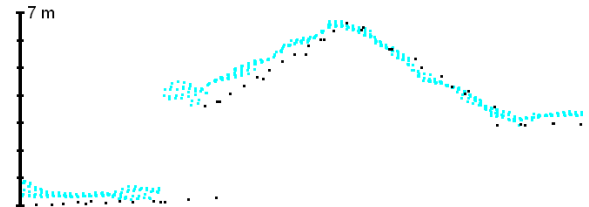
Obr. 28. Profil daty LLS [11]



Obr. 29. Snímková dvojice č. 1 (rok 2013) [11]

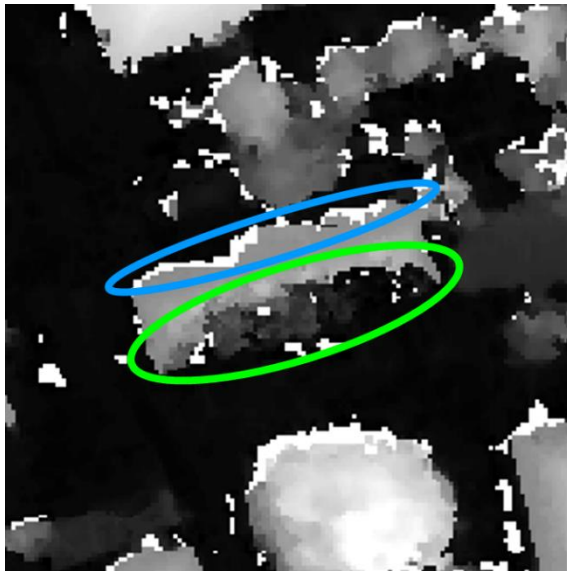


Obr. 30. Snímková dvojice č. 2 (rok 2013) [11]

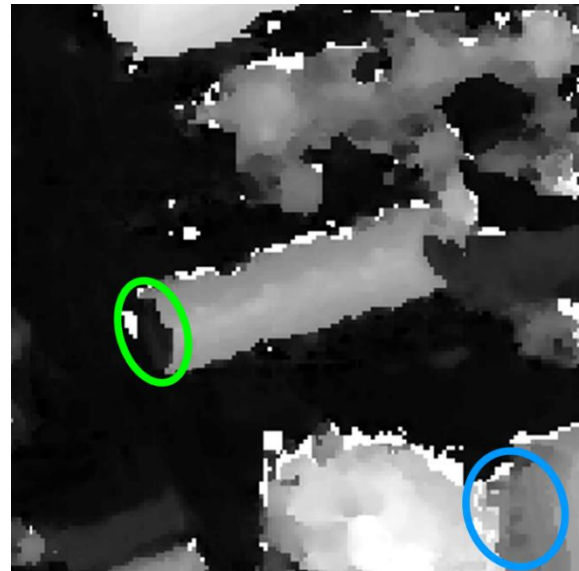
Obr. 31. Profil daty LLS (černě)
a stereomodelem č. 1 (modře) [11]Obr. 32. Profil daty LLS (černě)
a stereomodelem č. 2 (azurově) [11]

Kvalitu generovaného DMP ovlivňuje, krom celkové ostroty a množství šumu, také množství obrazové textury. Lokální ztráta textury daná přexponováním nebo podexponováním částí scény může vést k nepřesnému DMP. K přexponování může docházet u objektů, které mají velice světlý nebo reflexivní povrch, který byl v době expozice LMS přivrácen ke Slunci. Typickým příkladem jsou střechy s velice světlou krytinou (např. šedý plech). K podexponování pak může docházet u zastíněných částí scény. Bylo zjištěno, že u softwaru MATCH-T často dochází pro přexponované plochy k podhodnocení DMP (budovy jsou „menší“ o přexponovanou část obrazu střešního pláště) a pro podexponované plochy (typicky stíny) k nadhodnocení DMP (budovy jsou „větší“ o jimi vržený stín). S přexponovanými a podexponovanými částmi snímku je proto nutno pracovat velice obezřetně. Ukázka chyb DMP způsobených ztrátou textury vlivem přexponování a podexponování částí snímku je na následujících obrázcích 33 až 36. [11]

Obr. 33. Barevné infračervené mračno bodů
z roku 2012 [11]
podexponovaná místa (modře) a přexponovaná místa (zeleně)Obr. 34. Barevné infračervené mračno bodů
z roku 2014 [11]
podexponovaná místa (modře) a přexponovaná místa (zeleně)



Obr. 35. NDMP z roku 2012 [11]



Obr. 36. NDMP z roku 2014 [11]

nadhodnocený DMP (modře) a podhodnocený DMP (zeleně)

2.3.3 Problematika periodicity sběru leteckých dat

Projekt nového výškopisného mapování ČR, který ZÚ uskutečnil mezi roky 2009 až 2013, byl zcela unikátní akcí, jejíž cílem bylo zpřesnit výškopisné podklady pro ČR. Tento úkol byl splněn. Ukázalo se však, že sběr dat LLS a především jejich zpracování je mnohem náročnější než soudobé snímkování. Manuální editace („doklasifikace“) MB trvala v průměru 3 hod/km², což pro celé území ČR znamenalo 236 tis. pracovních hodin [5]. V nejbližších letech tak není počítáno s novým plošným skenováním celého území ČR, ale pouze s lokálním sběrem dat v místech, kde došlo ke změně výškopisných (terénních) poměrů. Vzhledem k tomuto faktu nelze data LLS označit za vhodná pro pravidelnou aktualizaci budov v ZABAGED®. [11]

Z předchozího textu jasně vyplývá, že aktuálně jediným vhodným typem leteckých dat pro aktualizaci budov v ZABAGED® jsou LMS. Tato data jsou pořizována pravidelně z celého území ČR a s jejich sběrem je uvažováno i do budoucna. Díky technologickému vývoji se zvyšuje rozlišení obrazových senzorů a je tak možno produkovat ortofoto s menší velikostí pixelu. LMS mají také tu výhodu, že v sobě spojují spektrální a výškopisné informace o nasnímaném území, díky čemuž mají velký potenciál a širší možnosti využití než data LLS. Následující část práce je tak založena pouze na využití LMS. [11]

3 Současné evidence budov

ČÚZK je státní instituce, která spravuje celorepublikové databáze obsahující polohopisné údaje o budovách. Těmito databázemi je katastr nemovitostí (KN) a ZABAGED®. Obě tyto databáze jsou v současnosti vedeny odděleně, protože každá z nich eviduje budovy jiným způsobem a pro jiný účel. KN eviduje právní stav, zatímco ZABAGED® vede fyzicko-geografický stav. Následující podkapitoly podrobně popisují specifika a rozdíly evidence budov v KN a ZABAGED®. [11, 23]

3.1 Katastr nemovitostí

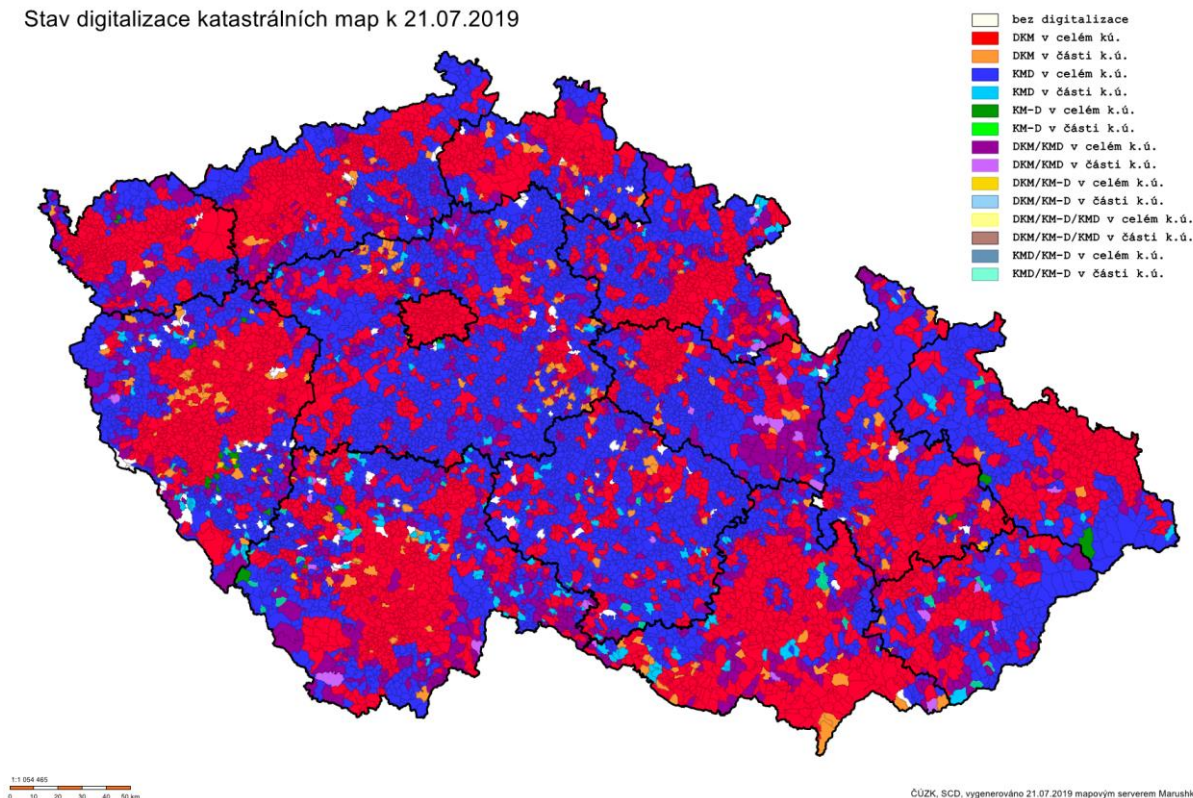
Katastr nemovitostí (KN) obsahuje údaje o nemovitostech v ČR. Součástí evidence je jejich soupis, popis, geometrické a polohové určení, vedení vlastnických a jiných věcných práv. Polohopisnou část KN tvoří soubor geodetických informací, který zahrnuje katastrální mapu. [11, 24]

Katastrální mapa může mít řadu podob. Může mít formu digitální katastrální mapy (DKM), katastrální mapy digitalizované (KMD, KM-D) nebo analogové mapy. Převod katastrální mapy do digitální podoby byl prioritním úkolem ČÚZK. Dne 31. 12. 2017 byl proces digitalizace oficiálně dokončen a katastrální mapa v digitální podobě (DKM, KMD) byla dostupná pro 99,0 % (12 954 z 13 084) všech katastrálních území. V současnosti (k 30. 6. 2019) je pak digitální katastrální mapa dostupná již pro 99,2 % (12 979 z 13 078) všech katastrálních území. Přesnost katastrální mapy odpovídá měřítku, ve kterém je zobrazena, respektive ze kterého zdroje byla mapa digitalizována. U DKM je přesnost kresby stanovena základní střední souřadnicovou chybou 14 cm. V digitalizované mapě z původního měřítka 1:1000 (KMD) mají lomové body přesnost 0,21 m, u měřítka 1:2000 (KMD) mají přesnost 0,50 m a u měřítka 1:2880 (KM-D) mají lomové body přesnost 1,00 m. Mezní chyba, která je v rámci přesnosti mapy možná a tolerovatelná, je pro mapu v měřítku 1:2880 až 2,83 m. [11, 25, 26, 27]

KN slouží zejména k ochraně práv k nemovitostem. Tento fakt se odráží v řadě věcí, především v obsahu katastrální mapy, která není věrným fyzicko-geografickým zákresem skutečného stavu. Evidovaný právní stav často neobsahuje všechny fyzicky existující budovy, a naopak někdy obsahuje i budovy v terénu fyzicky neexistující. Podkladem pro aktualizaci KN jsou geometrické plány a geodetická dokumentace dokončené výstavby, pokud majitelé nemovitostí nezanedbají svou povinnost je poskytnout. [11, 23, 28]

Základním dlouhodobým cílem ČÚZK je zpřesňování katastrálních map s výrazným zastoupením obnov katastrálního operátu novým mapováním. Obnovu novým mapováním bude doplňovat obnova na podkladě výsledků pozemkových úprav a kromě toho se přistoupí k novému mapování i v lokalitách, kde digitalizovaná katastrální mapa nemá dostatečnou přesnost. Stav digitalizace katastrálních map k 21.7.2019 je na obrázku 37. [26]

Stav digitalizace katastrálních map k 21.07.2019



Obr. 37. Stav digitalizace katastrálních map [26]

3.2 Základní báze geografických dat České republiky

Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED[®]) je digitální geografický model území ČR. V současnosti (dle Katalogu objektů ZABAGED[®], verze 3.0 ve znění dodatku č. 1 a č. 2, z roku 2018) obsahuje 123 základních typů geografických objektů členěných do osmi tematických kategorií. Polohopisná část ZABAGED[®] je vedena ve dvourozměrném prostoru (2D) a výškopisná část obsahuje trojrozměrnou reprezentaci (3D) terénního reliéfu v podobě vrstevnic, DMR 4G, DMR 5G a DMP 1G. [11, 29]

Budovy jsou zařazeny v kategorii objektů č. 1, která se jmenuje „Sídelní, hospodářské a kulturní objekty“. Tato kategorie obsahuje celkem 38 typů objektů, přičemž některé z nich je možno dále třídit podle specifického kódu. Podrobný popis je k nalezení na internetových stránkách ČÚZK v Katalogu objektů ZABAGED[®] [30]. [11]

Polohopisná část ZABAGED[®] vznikla vektorizací naskenovaných tiskových podkladů Základní mapy České republiky v měřítku 1:10 000 (ZM 10) v období let 1994–2000. Polohopis intravilánu obcí, s výraznou generalizací kresby budov a bloků budov, byl však uskutečněn až v letech 2000-2003 prostřednictvím analytického stereofotogrammetrického vyhodnocení LMS v měřítkách 1:23 000 – 1:26 000 pokrývajících celé území ČR. Aktualizace ZABAGED[®] probíhá kontinuálně od jejího naplnění v roce 2004. Aktualizace budov a ostatních objektů jsou prováděny formou plošné aktualizace s využitím ortofot, stereofotogrammetrického vyhodnocení LMS a případného terénního šetření. Od roku 2011 se přebírají informace o nově postavených budovách z KN. Tímto způsobem je zajištěna tzv. průběžná aktualizace, která má díky polo-automatizaci celého procesu výrazně kratší interval než aktualizace plošná. Průběžná aktualizace probíhá 2 až 4krát do roka, zatímco plošná aktualizace probíhá jednou za 3 až 5 let. Při plošné aktualizaci jsou v maximální možné míře využívána aktuální letecká obrazová data, zejména pak Ortofoto ČR, volně přístupné

podklady (např. Letecká mapa a Panorama na Mapy.cz) a pro vybrané objekty i LMS. Samotná plošná aktualizace probíhá vizuálním porovnáním (konfrontací) evidovaného stavu v databázi ZABAGED® s nejaktuálnějším obrazovým podkladem. Změny, které nelze vyhodnotit z obrazových dat jsou určeny k terénnímu šetření. Toto zpracování je značně náročné a není v silách topografů postihnout vždy úplně všechny změny. Při průběžné aktualizaci jsou také v maximální možné míře využívána aktuální letecká obrazová data. Cílem průběžné aktualizace však není plošná kontrola celých mapových listů, ale pouze vyhodnocení a zapracování zákresu nových budov v KN. [11, 23, 29, 31, 32]

Mnohé nepřesnosti, které se v ZABAGED® vyskytují, jsou způsobeny samotným způsobem vzniku databáze, resp. způsobem jejího naplnění a nepodařilo se je odstranit ani následnými aktualizacemi. Vektorizovaný kartografický podklad, který byl určen pro tiskové měřítko 1:10 000, může stále místy obsahovat generalizované informace (např. zjednodušené tvary budov, odsuny budov od komunikací atd.) a nelze ho vždy zcela srovnávat s Ortofotem ČR, které vyjadřuje zobrazení zemského povrchu přesně a věrně. [11, 23]

Samotná přesnost a rozlišení Ortofota ČR se v průběhu posledního desetiletí také výrazně zlepšila. Do roku 2009 bylo používáno Ortofoto ČR s rozlišením 0,5 m/pixel, kdy reálná přesnost digitalizace nad tímto ortofotem byla cca 1–1,5 m. Od roku 2010 je používáno Ortofoto ČR s rozlišením 0,25 m/pixel, kdy reálná přesnost digitalizace dobře viditelných hran budov je 0,3–0,7 m. Výsledkem je, že zobrazení staveb, zejména budov, je v současné době v ZABAGED® realizováno s různou kvalitou přesnosti se střední souřadnicovou chybou cca 3 m, při vyskytujících se chybách i více než 5 m. [11, 33]

3.3 Porovnání evidencí budov

Následující obrázky 38 až 43 dokumentují nedostatky (nepřesné či skutečnosti neodpovídající) zobrazení staveb v ZABAGED® a v KN, resp. v katastrální mapě. V následujících příkladech jsou budovy ZABAGED® zobrazeny oranžovou linií, kresba katastrální mapy zelenou linií (hranice parcel), žlutou linií (vnitřní kresba) a oranžovým bodem (značka budovy). [11]



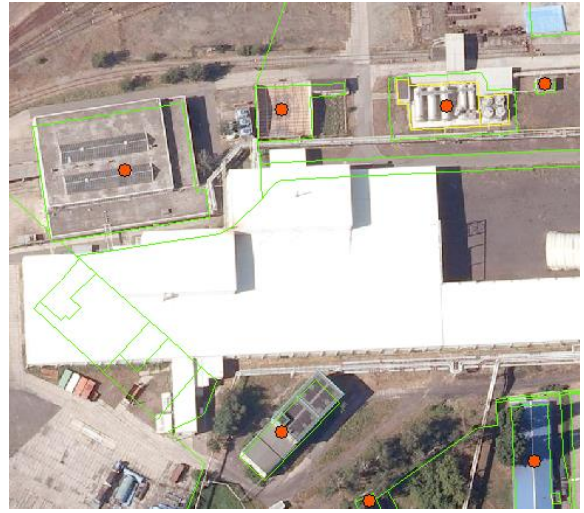
Obr. 38. Schematické vyjádření budov v ZABAGED® generalizovaných do měřítka 1:10 000 v porovnání s kresbou katastrální mapy nad ortofotem [34]



Obr. 39. Zákres budov v ZABAGED® v prostorech některých zahrádkářských kolonií vyjadřuje charakter území, přičemž katastrální mapa v tomto prostoru budovy vůbec neeviduje [34]



Obr. 40. Nové (pravděpodobně ještě nezkolaudované) budovy v ZABAGED®, které nejsou evidované v katastrální mapě [34]



Obr. 41. Neúplná či skutečnosti zcela neodpovídající kresba budov katastrální mapy v některých účelových areálech [34]



Obr. 42. Neúplná vnitřní kresba vymežující skutečné stavby v katastrální mapě [34]



Obr. 43. Nepřesná a místy neúplná kresba katastrální mapy [34]

4 Nová evidence budov v ZABAGED®

Dlouhodobou snahou ZÚ je odstranit chyby a nepřesnosti v zákresu objektů v ZABAGED® a zlepšit tak využitelnost databáze i pro aplikace, pro které byla její dosavadní polohová přesnost zobrazených objektů nevyhovující. Jedná se např. o územní plánování, stavební projektování (pozemní, dopravní i vodohospodářské), zakres sítí technické infrastruktury atd. Zpřesnění objektů v ZABAGED® by mělo vést k minimalizaci topologických kolizí s tematickými prostorovými daty jiných správců. Záměr však není pouze zpřesnit stávající objekty, ale také je doplnit a obohatit tak ZABAGED®, aby mohla být využita pro tvorbu nové Základní topografické mapy ČR v měřítku 1:5 000. Pro zpřesnění prvků evidovaných v ZABAGED® (např. vodních toků, komunikací, železničních tratí a v neposlední řadě také stavebních objektů) se využívají nejmodernější rezortní prostorová data. Jsou to především data leteckého laserového skenování (LLS) a digitální letecké měřické snímky (LMS). Významným projektem v tomto směru je zpřesnění budov a dalších stavebních objektů v ZABAGED®, které bude podrobně představeno v následující podkapitole 4.1. [11, 18, 33]

4.1 Zpřesnění budov a dalších stavebních objektů v ZABAGED®

Prvotní testy zpřesňování budov a dalších stavebních objektů v ZABAGED® na podkladě rezortních dat ČÚZK (vektorové katastrální mapy, LMS, Ortofota ČR a dat LLS) proběhly na přelomu let 2012 a 2013 [33, 34]. Jejich cílem bylo ověřit technické a technologické možnosti řešení, definovat podkladová data a navrhnout postup budoucích prací. Hlavním zjištěním bylo, že automatizované převzetí budov z ISKN není možné, protože právní stav ISKN neodpovídá často realitě. Kresbu ISKN však lze převzít a doplnit o zjištěné rozdíly se skutečností. Další výhodou přebírání či úpravy stávající katastrální kresby je možnost její průběžné aktualizace analýzou změn jednoznačných identifikátorů stavebních objektů ISKN. Dále bylo zjištěno, že stereofotogrammetrické vyhodnocení LMS (vyhodnocení ve 3D) nemělo významnou přidanou hodnotu oproti vizuální interpretaci Ortofota ČR (vyhodnocení ve 2D). Výhodou však byla možnost fotointerpretace území kombinací různých stereodvojic. Přejít na jinou stereodvojici ve fotogrammetrickém softwaru PhoTopoL byl však časově velmi náročný. Z tohoto důvodu bylo doporučeno provádět zpřesňování 2D zákresu staveb s využitím celých ortogonalizovaných LMS (OLMS) jako podkladů pro kresbu. OLMS totiž na rozdíl od bežešvé ortofoto mozaiky (Ortofota ČR) umožňují pohled na zájmové území z více projekčních center. Mezi další zjištění také patřilo, že data LLS jsou přínosným podkladem pro fotointerpretaci komplikovaných území a verifikaci existence budov v době skenování. Na základě učiněných zjištění byl v roce 2014 definován projekt „Tvorba zpřesněné vrstvy budov ZABAGED® a její aktualizace z dat ISKN“, který stanovil finální cíle projektu [35].

Projekt tvorby zpřesněných budov a dalších stavebních objektů v ZABAGED® (dále jako zpřesněných SO) se skládá ze 3 etap: tvorba, integrace a aktualizace, které budou podrobně popsány v následujícím textu. Všechny etapy zpřesňování SO probíhají v softwaru MicroStation se specifickou GIS nadstavbou na územní jednotce vymezené konkrétním katastrálním územím (na rozdíl od běžné práce nad územím vymezeným mapovým listem ZM10 nebo ZM50). Tvorba zpřesněných SO a jejich následná průběžná aktualizace probíhají v odděleném grafickém prostředí bez návaznosti na většinu objektů ZABAGED® s využitím specifických nástrojů a funkcí označených jako Aplikační programové vybavení (zkráceně APV) ZABARAK. Integrace zpřesněných i aktualizovaných SO do ZABAGED® pak probíhá

ve standardním grafickém prostředí pro správu všech objektů ZABAGED®, které je označeno jako APV ZABAGED. [35]

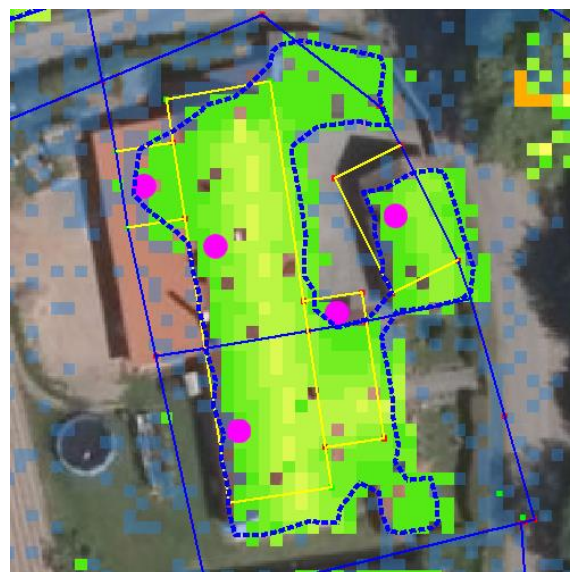
4.1.1 Tvorba

Tvorba zpřesněných SO v maximální možné míře využívá existující rezortní a volně dostupné podklady, mezi které patří [35]:

- data ISKN (obr. 44 a 56)
 - katastrální mapa DKM/KMD ve vektorové podobě:
 - hranice parcel (modrá plná linie)
 - linie vnitřní kresby (žlutá plná linie)
 - značky stavebních objektů/budov (růžová plná tečka)
 - lomové body s atributem přesnosti:
 - body s kódem kvality ≤ 5 , střední souřadnicová chyba ≤ 0.5 m (zeleně)
 - body s kódem kvality > 5 (červeně)
 - hranice KÚ
- ortofoto (obr. 44)
- ortogonalizované LMS (obr. 46 až 50)
- ortorektifikovaný obrazový záznam z třířádkové kamery ZÚ (od roku 2019, pouze pro vybraná města)
- data LLS (obr. 45)
 - kategorizovaný NDMP v rastrové formě
 - nezměřeno: průhledně
 - 0-2 m (průhledná modrá)
 - 2-10 m (zelená až žlutá)
 - 10-50 m (oranžová až červená)
 - 50 m a více (fialová)
 - obrysy střešních rovin více než 2 m nad terémem (modrá čárkovaná linie)
- volně přístupné podklady (zejména pak Panorama na Mapy.cz a Google Street View)



Obr. 44. Ortofoto a katastrální kresba s kombinací hranic parcel, linií vnitřní kresby, značek stavebních objektů a lomových bodů



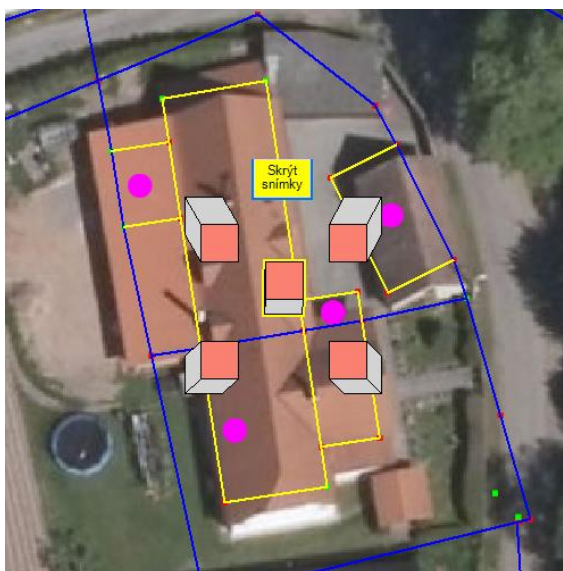
Obr. 45. Ortofoto, katastrální kresba, kategorizovaný NDMP a obrysy střešních rovin



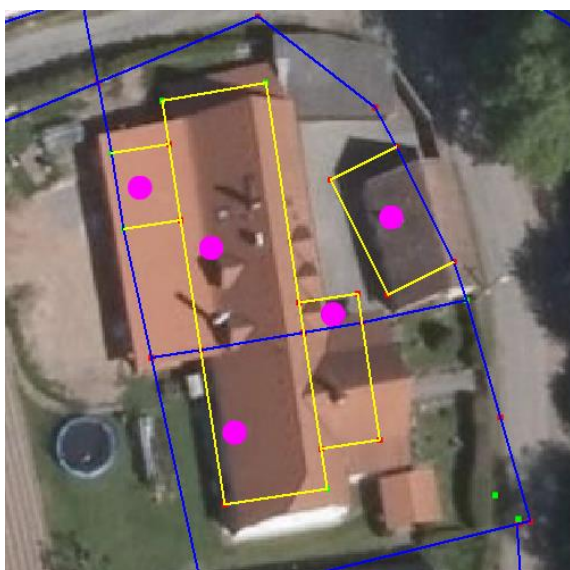
Obr. 46. SZ OLMS a katastrální kresba



Obr. 47. SV OLMS a katastrální kresba



Obr. 48. Středový OLMS (ortofoto), katastrální kresba a symboly budov v perspektivě (s naznačeným posunem střešy) odpovídající směru a vzdálenosti dalších dostupných OLMS



Obr.49. JZ OLMS a katastrální kresba



Obr. 50. JV OLMS a katastrální kresba

Princip tvorby zpřesněných SO v ZABAGED® je založen na vizuální kontrole vektorové kresby budov ISKN a jejím převzetí (potvrzení právního stavu), zneplatnění či doplnění (obr. 51 až 55). Zákres budov ISKN je tvořen ze značky SO a nejbližších hranic parcel a linií vnitřní kresby, které značku obklopují. Vektorová kresba budov ISKN je konfrontována s aktuálním ortofotem, překreslenými LMS a daty LLS. U každé přebírané budovy je nejdříve vyhodnocena její fyzická existence. Bohužel, nelze automatizovaně převzít budovy evidované v KN bez kontroly. Každou budovu je nutno vyhodnotit z hlediska tvaru a fyzické existence. V případě souladu katastrální kresby budovy s ortofotem je budova převzata. Převzetí budov se neřídí žádným velikostním omezením. Minimální velikost převzatého SO tedy není stanovena. Existující budovy, které nejsou evidovány v katastrální mapě (a tedy nejsou v ISKN, RÚIAN a SM5), jsou doplněny. Naopak právně evidované, ale fyzicky neexistující budovy (značka stavebního objektu ISKN neleží v ploše budovy), jsou tzv. zneplatněny a nejsou převzaty. Veškeré nepřesnosti či nesoulad je řešen dokreslením nových, v katastrální mapě neexistujících, hran a značek SO. Dokreslení probíhá pouze v místech, kde je zjištěn rozpor (výrazný posun nebo stočení, chybějící přístavby, garáže atd.) katastrální kresby budov se skutečností zachycenou na ortofotu. Rozhodujícím kritériem pro kresbu hran se považuje překročení mezních parametrů, které jsou stanoveny takto: 2 m při ztotožnění paty budovy a 3 m při ztotožnění hrany střechy (pata budovy není vidět). Minimální výměra nově zakreslené plochy budovy je 16 m². Toto pravidlo platí především v případě samostatně stojících SO bez existující kresby katastru. V případě SO vedených v katastru je možno při splnění kritérií pro kresbu hran dokreslit i části staveb s menší výměrou. Cílem nové kresby je zachytit styk obvodového zdiva s terénem (patu SO), přičemž při fotointerpretaci jsou zohledňovány radiální posuny obrazu objektů vyvýšených nad okolní terén (princip středového promítání). Pro tyto účely jsou využívány LMS, které jsou ortogonalizovány (překresleny) v celé svojí ploše. To vede k plnému využití potenciálu leteckých měřických snímků, které mají přibližně 60% podélný a 25% příčný překryt. [35]

Při kresbě nových hran dochází k jejich kategorizaci dle toho, co vektorizovaná hrana reprezentuje [35]:

- pata – viditelná pata SO (růžová plná linie)
- pata odhadnutá – pata SO není viditelná na rezortních datech, na volně přístupných podkladech je však viditelná stěna budovy (růžová linie s dlouhými čárkami)
- ostatní – obrys střechy (růžová linie s krátkými čárkami)
- nejistá – SO pod vegetací (růžová čerchovaná linie se dvěma tečkami)

Při doplňování značek SO také dochází k jejich kategorizaci, a to dle potvrzení existence pevných obvodových stěn SO a typu stavby [35]:

- budova – budova s pevnými obvodovými stěnami ($\geq 16 \text{ m}^2$)
- střecha ZABAGED – nejistá budova, dřívější existence budovy ZABAGED® ($\geq 16 \text{ m}^2$)
- střecha – budova/přístřešek ($\geq 36 \text{ m}^2$)
- střecha (bod) – volně stojící budova/přístřešek, kresleno bez obvod. hran (16-36 m²)
- přístřešek – stavba bez alespoň jedné obvodové stěny ($\geq 16 \text{ m}^2$)
- přístřešek (bod) – volně stojící přístřešek, kresleno bez obvodových hran (16-36 m²)
- kůlna – dřívější existence kůlny ZABAGED ($\geq 70 \text{ m}^2$)
- skleník, fóliovník – dřívější existence skleníku, fóliovníku ZABAGED® ($\geq 70 \text{ m}^2$)



Obr. 51. SZ OLMS a kresba zpřesněných SO



Obr. 52. SV OLMS a kresba zpřesněných SO



Obr. 53. Středový OLMS (ortofoto) a zaplochovaná kresba zpřesněných SO

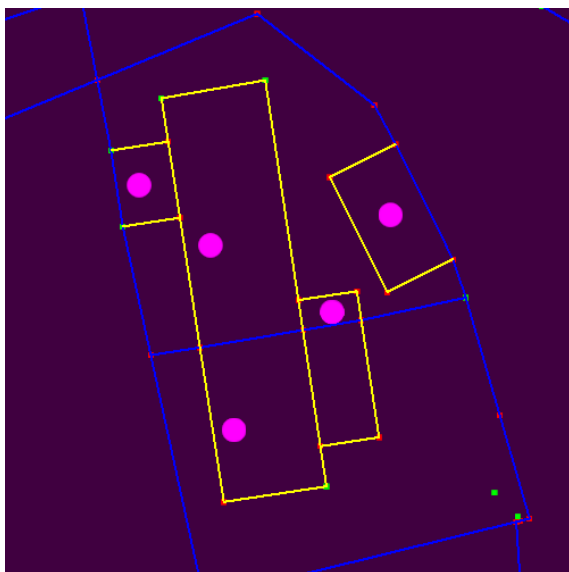


Obr. 54. JZ OLMS a kresba zpřesněných SO

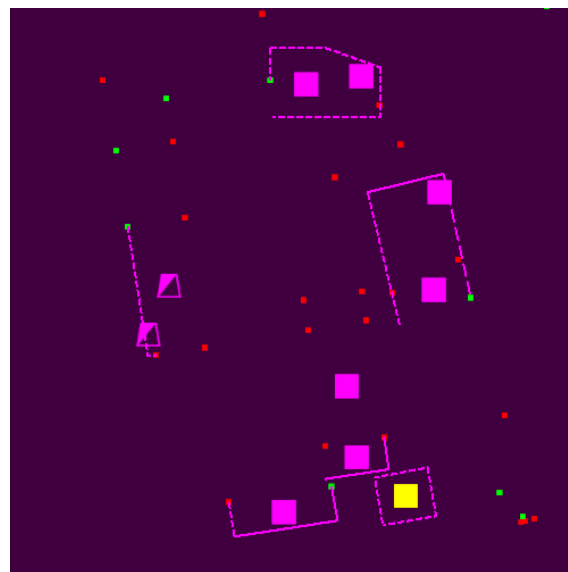


Obr. 55. JV OLMS a kresba zpřesněných SO

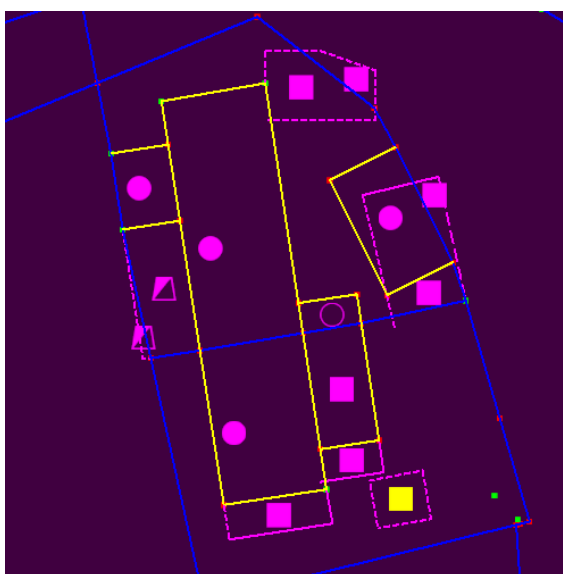
Předchozí obrázky 51 až 55 představují ukázkou tvorby zpřesněných SO. Obrázek 53 pak znázorňuje tzv. plochování, které slouží pro kontrolu topologie kresby a kompletnosti doplněných značek SO. Porovnání samotné katastrální kresby, nové (doplněné) kresby a výsledné vrstvy zpřesněných stavebních objektů je na následujících obrázcích 56 až 58.



Obr. 56. Katastrální kresba s kombinací hranic parcel (modrá linie), linií vnitřní kresby (žlutá linie), značek stavebních objektů (růžová kolečka) a lomových bodů



Obr. 57. Kresba nových hran (růžové linie) a značek zpřesněných SO (růžové a žluté čtverce a růžové lichoběžníky) a lomové body (červené a zelené body)



Obr. 58. Výsledná vrstva zpřesněných SO složená z kombinace katastrální kresby, nových hran a původních/nových značek SO

Z porovnání je zřejmé značné množství nových hran a nárůst počtu značek SO. Jižní a východní strana větší budovy byla na OLMS dobře viditelná (a navíc osvětlená) a tak bylo možno dokreslit nové hrany typu „pata“ a doplnit značky SO typu „budova“. Západní část budovy pak byla zřejmě v nedávné době rozšířena. Lze tak odvozovat z chybějících obrysů střešních rovin na obrázku 45. Bohužel, z dostupných podkladů nebylo možno odvodit, zda se jedná o přístavbu nebo přístřešek (pravděpodobně o přístřešek). Z tohoto důvodu byly doplněny hrany typu „ostatní“ a značka SO typu „střecha“. Severní přístavba je starší a dle dostupných podkladů (Panorama) bylo potvrzeno, že se jedná o trvalou stavbu s obvodovými

stěnami. Bohužel, ani na jednom z dostupných OLMS není vidět pata stavby. Vektorizace tedy probíhala podle obrysu střešního pláště na OLMS se snahou eliminovat vliv radiálních posunů obrazu. Pro severní přístavbu tedy byly doplněny hrany typu „ostatní“ a značky SO typu „budova“. Dle dostupných podkladů (Panorama) byl potvrzen typ „budova“ pro samostatnou stavbu na východní straně a určen typ „přístřešek“ pro samostatnou stavbu na jižní straně. U samostatné stavby na východní straně byla její strana přivrácená ke komunikaci dokreslena hranou typu „pata odhadnutá“, protože navazuje na lomový bod s kódem kvality ≤ 5 . Severní strana stavby byla viditelná na severních OLMS a proto dokreslena hranou typu „pata“. Západní strana stavby pak byla vyhotovena obdobným způsobem jako u severní přístavby, tedy hranou typu „ostatní“. Hrana typu „ostatní“ byla použita i u samostatného přístřešku na jižní straně.

Zpřesněný SO může být složen z mnoha linií a značek různých typů definujících jak samotnou stavbu, tak také přístavby, přístřešky či plochy více parcel pod stavbou (obr. 58). Systém linií a značek SO je vytvářen tak, aby z nich bylo možné odvodit polygony staveb tzv. plochováním a ty následně blokovat podle požadovaných vlastností do výsledné podoby vnějších obrysů pro ZABAGED®. V rámci zpřesnění SO dochází k tvorbě nové jednotné fyzicko-geografické vrstvy budov ZABAGED® na celém území ČR, která vychází z katastrální mapy. Tato vrstva si zachovává pro převzaté hranice a linie přesnost KN a navíc je doplňuje o hrany SO potvrzených z ortofot. V porovnání se stávajícím řešením v ZABAGED® se jedná o výrazné zpřesnění evidence budov. Vazba na KN umožňuje jednodušší aktualizaci zpřesněných SO a přebírání dalších atributů z ISKN, RÚIAN nebo ČSÚ. Zpřesněné SO mohou být využity nejen pro ZABAGED®, ale také jako podklad pro tvorbu nové generace DMP nebo pro zpětnou kontrolu KN a identifikaci lokalit s výrazným nesouladem katastrální kresby budov s realitou, která často nastává v oblastech s původní sáhovou katastrální mapou přepracovanou do podoby katastrální mapy digitalizované (podkapitola 3.1). [11, 23, 31, 34, 36]

4.1.2 Integrace

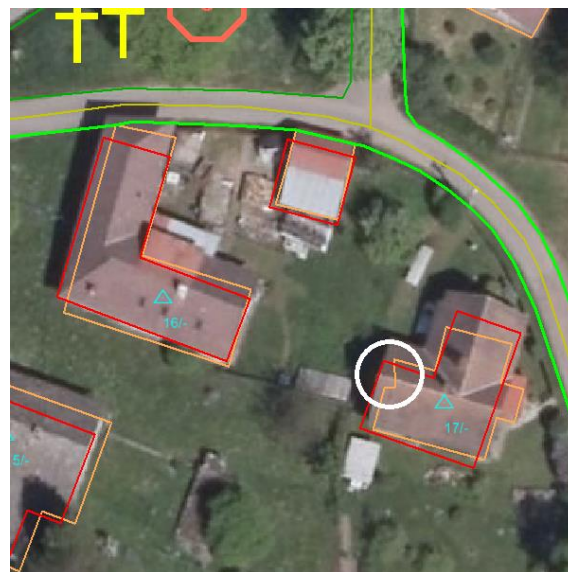
Integrace spočívá v zapracování zpřesněných SO do ZABAGED®. Zpřesněné SO ve formě liniové kresby a značek SO jsou nejdříve plochovány, čímž vznikají polygony SO. Sousední polygony SO jsou následně blokovány na základě shodného typu a účelu stavby. Zapracování blokováných polygonů SO probíhá po územních jednotkách odpovídajících katastrálním územím. Blokované polygony SO jsou nahrány z prostředí ZABARAK do prostředí ZABAGED. Mezi tvorbou a integrací zpřesněných SO můžou proběhnout změny v ISKN, protože se jedná o dva na sobě nezávislé kroky, které mohou mít časový odstup i mnoha měsíců. Mezi prostředími pro tvorbu a aktualizaci (ZABARAK) a integraci (ZABAGED) lze plynule přepínat a zpracovatel má práva nejen pro úpravu zapracovávaných zpřesněných SO (z důvodu aktualizace či zjištěných chyb) ale také k modifikaci geometrie libovolných objektů ZABAGED®. Při zapracování dochází k současnému nahrazení (smazání) původních nezpřesněných SO ZABAGED®. Při začlenění musí být zachovány topologické vazby na navazující objekty ZABAGED® a zároveň vyřešeny všechny topologické konflikty. V průběhu zapracování je také kontrolováno správné umístění bodových objektů vztahených ke zpřesňovaným SO. Z těchto důvodů byly vytvořeny kontroly v podobě maker, které slouží pro vyhledání topologických konfliktů křížení (např. s hranicí užívání, doplňková linií, břehovou čarou, zdí, ulicí, cestou, vodním tokem atd.) a umístění bodových objektů mimo zpřesněný SO (definičních bodů účelu, definičních bodů adresních míst, věžovité stavby na budově atd.). Komplikované situace, které není zpracovatel schopen vyřešit dle dostupných podkladů, jsou označeny pro následující terénní šetření. Po provedení všech výše

popsaných kroků a kontrol bez chyb je ukončen proces integrace a je umožněna publikace nových zpřesněných SO v blokové podobě uživatelům. [37]

Ukázka integrace zpřesněných SO je na následujících obrázcích 59 a 60.



Obr. 59. Zpřesněné SO ZABARAK



Obr. 60. Blokované polygony zpřesněných SO (oranžově), původní nezpřesněné SO (červeně) a navazující kresba ZABAGED®, ve východní stavbě chybí značka SO (bílý kroužek)

Přehled všech zpřesňovaných SO ZABARAK (podle typu stavby), které jsou plochovány, blokovány a následně integrovány do ZABAGED je v následující tabulce 4. Z tabulky je dále možné zjistit návaznosti mezi zpřesňovanými SO ZABARAK a publikovanými typy objektů ZABAGED.

Tab. 4. Stavební objekty ZABARAK a jejich návaznost na typy objektů ZABAGED [37]

ZABARAK		ZABAGED		
Kód typu stavby	Typ stavby	Kód typu objektu	Typ objektu	Podtyp
AL015	budova - centroid	AL015	Budova jednotlivá nebo blok budov	
AL019Z	střecha ZBG - centroid	AL015	Budova jednotlivá nebo blok budov	
AL019U	zakrytý stavební objekt	AL015	Budova jednotlivá nebo blok budov	
AL019C	střecha - centroid		bez publikace	
AL019P	přístřešek - centroid		bez publikace	
AL019B	střecha - bod		bez publikace	
AL019K	kůlna	AL019	Kůlna, skleník, fóliovník	kůlna
AL019S	skleník, fóliovník	AL019	Kůlna, skleník, fóliovník	skleník, fóliovník
AL200R	rozvalina	AL200	Rozvalina, zřícenina	
AL200Z	zřícenina	AL200	Rozvalina, zřícenina	
AB030B	hrad - budova	AL015	Budova jednotlivá nebo blok budov	
AB030Z	hrad - zřícenina	AL200	Rozvalina, zřícenina	
AB040B	zámek - budova	AL015	Budova jednotlivá nebo blok budov	
AB040Z	zámek - zřícenina	AL200	Rozvalina, zřícenina	
AM020	Silo	AM020	Silo	
AM070	válcová nádrž, zásobník	AM070	Válcová nádrž, zásobník	
AM080V	vodojem věžový	AM080	Vodojem věžový	

AM080Z	vodojem zemní	AL015	Budova jednotlivá nebo blok budov	vodojem zemní
AF010	tovární komín	AF010	Tovární komín	
AF030	chladicí věž	AF030	Chladicí věž	
AJ050	větrný mlýn	AJ050	Větrný mlýn	
AC030	usazovací nádrž	AC030	Usazovací nádrž	

4.1.3 Aktualizace

Průběžná aktualizace zpřesněných SO je periodická činnost (prováděna 1x ročně), při které dochází ke kontrole použitého a aktuálního stavu ISKN. K určitému datu se provede výměna původní použité katastrální kresby za aktuální (na základě atributu ID ISKN), vytvoření 2 sad polygonů SO (1. sada – **původní** použitá katastrální kresba budov a původní dokreslené hrany a značky SO a 2. sada – **nová** katastrální kresba budov a původní dokreslené hrany a značky SO) a z nich vytvořená vrstva rozdílových polygonů. [37]

Zjištěné změny je nutno systematicky projít a vyhodnotit, zda mají dopad na plochované a blokové zpřesněné SO. V mnoha případech není nutné do situace v prostředí APV ZABARAK zasahovat. Mohou však nastat případy, kdy je nová kresba ISKN od původní odlišná takovým způsobem, že je nutné opravit doplněné hrany a značky SO, aby mohly být SO znovu plochovány a použity v blokové podobě pro ZABAGED®. Opravy hran a značek SO v prostředí APV ZABARAK jsou prováděny při dodržení stejných pravidel jako při tvorbě zpřesněných SO. Následně je provedena integrace, při které jsou vyřešeny topologické konflikty aktualizovaných zpřesněných SO s ostatními objekty ZABAGED®. [37]

Tento způsob aktualizace (průběžná aktualizace) vychází z předpokladu, že změny SO jsou a budou evidované v ISKN. Vytvořená kresba hran a značek SO, která nemá žádnou vazbu na ISKN však může být aktualizována pouze v rámci klasické plošné aktualizace ZABAGED® v delší časové periodě (2-6 let), fotointerpretací nových OLMS nebo pomocí navržené metody pro detekci změn budov, která je popsána dále (podkapitola 6.2).

4.2 Vyhodnocení přesnosti

Vyhodnocení přesnosti technologie zpřesňování SO v ZABAGED® bylo provedeno v roce 2013 [28] a v roce 2018 [32]. Obě vyhodnocení provedl doc. Šíma ve spolupráci se zaměstnanci ZÚ.

4.2.1 Vyhodnocení přesnosti z roku 2013

Vyhodnocení z roku 2013 se věnovalo určení přesnosti nové kresby SO dle typu použitého podkladu: DKM, Ortofoto ČR, ortogonalizované LMS (OLMS) a mračna bodů LLS v porovnání s kontrolními body získanými geodetickým zaměřením v kvalitě blízké kódu kvality (KK) 2, což je přesnost o jednu třídu vyšší než použitá KN. Kontrolní body v podobě rohů budov a střech byly určeny geodetickým zaměřením při využití polární metody (délka záměr převážně do 60 m) totální stanicí Leica TRC 407 a odrazného hranolu na výtyčce s krabicovou libelou ze stanovisek určených technologií GNSS-RTK pomocí přijímače Leica Geosystems RX 1250X s anténou Leica Geosystems ATX1230 GG s parametry bodů PPBP. Dosažená přesnost nové kresby SO je shrnuta v následující tabulce 5. [28]

Tab. 5. Shrnutí výsledků kontrolních měření [28]

Typ dat	Rok měření či sběru dat	Vnitřní polohová přesnost			Absolutní polohová přesnost					
		m_p (m)	m_{xy} (m)	KK	terén			střecha		
					m_p (m)	m_{xy} (m)	KK	m_p (m)	m_{xy} (m)	KK
Geodetické měření	2013	0,097	0,069	2						
DKM	1999,2001			3/4	0,293	0,207	4			
Ortofota ČR	2010,2012	0,438	0,310	5	0,825	0,584	5	0,825	0,583	5
OLMS	2010			5	0,770	0,544	5	0,803	0,568	5
Mračno bodů LLS	2010	0,284	0,200	4	0,679	0,480	5	0,902	0,638	5

Z předchozí tabulky vyplývá, že převzetím bodů DKM (KK 3/4) lze dosáhnout přesnosti na úrovni KK 4. Použitím Ortofota ČR nebo OLMS lze dosáhnout téměř stejné přesnosti nové kresby SO na úrovni KK 5. Interpretace Ortofota ČR pro kresbu SO je však výrazně náročnější (např. z důvodu eliminace radiálních posunů střech) než při použití OLMS, které umožňují vždy 2 až 6 různých pohledů na danou stavbu. Mračno bodů LLS představuje velmi přesný podklad pro vektorizaci SO v případě, že byly dobře naskenovány vnější obvodové stěny objektu. Tato situace však nastává pouze u staveb s větším počtem podlaží, malým či žádným přesahem střešního pláště přes obvodové zdivo či u staveb na překrytu sousedních letových pásů. Bohužel, průměrná hustota 1-1,6 bodu/m² neumožňuje vždy využít data LLS pro zpřesňování SO, protože hrany a rohy budov nebo střech nejsou vždy dostatečně věrohodně reprezentovány. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto mračna bodů LLS využívat pouze v rastrové podobě jako doplňkový podklad pro zpřesňování SO. [28]

Uvažíme-li proces zpřesňování SO, ve kterém je kresba ze 30 % převzata z DKM s KK 3 a 4 a vektorizována ze 30 % dle ortofotosnímků, 30 % dle Ortofota ČR a 10 % dle dat LLS, pak po dosazení středních polohových chyb (m_p) do váženého aritmetického průměru obdržíme výslednou střední polohovou chybu 0,66 m (odchylku 2 m lze považovat za hrubou chybu). V oblastech, kde je k dispozici pouze původní sáhová katastrální mapa přepracovaná do formy KMD v S-JTSK a s převahou bodů s KK 8 je vhodné uvažovat větší využití leteckých dat. V případě zpřesnění SO, kde je kresba z 10 % převzata a nově vytvářena z 50 % dle ortofotosnímků, ze 30 % dle Ortofota ČR a 10 % z dat LLS pak vychází střední polohová chyba 0,75 m (odchylku 2,25 m lze považovat za hrubou chybu). Z uvedených výsledků a závěrů je zřejmé, že využitím leteckých dat ZÚ lze dosáhnout přesnosti kresby SO na úrovni kódu kvality 5 se střední souřadnicovou chybou (m_{xy}) 0,50 m. [28]

4.2.2 Vyhodnocení přesnosti z roku 2018

Vyhodnocení přesnosti z roku 2018 navazovalo na předchozí vyhodnocení z roku 2013 [28]. Jeho hlavním cílem bylo ověřit polohovou přesnost zákresu budov v katastrální mapě digitalizované (KMD) a na jejím podkladě zpřesněných SO. Využití katastrálních map typu KMD totiž nebylo v předchozí práci ověřeno. KMD vznikla digitalizací a převodem sáhových katastrálních map v měřítku 1:2880 na plastových foliích do systému S-JTSK [38]. Polohová přesnost zákresu budov v KMD tak může být poplatná době vzniku stabilního katastru a použité metody měřického stolu, přičemž touto metodou byly zpravidla zaměřeny pouze čelní strany domů do ulice a odvrácené strany domů a vnitrobloky byly určeny pouze oměrnými. Tyto mapy mohou dále vykazovat chyby v podobě systematického posunu nebo stočení zákresu budov (obr. 43), přičemž tvar a velikost budov většinou odpovídá realitě. Tyto chyby vznikly zpravidla z důvodu nutnosti vlícnout nové a přesněji zaměřené stavby z geometrických plánů do méně přesného výchozího podkladu. [32]

Ověření bylo provedeno pomocí kontrolního geodetického měření při využití polární metody totální stanicí Leica TCR 1201+ a odrazného hranolu na výtyčce ze stanovisek určených technologií GNSS-RTK pomocí aparatury Trimble R 7 v požadované přesnosti kódu kvality (KK) 3. Nezávislým dvojím zaměřením vybraných kontrolních bodů byla zjištěna střední souřadnicová chyba $m_{xy} = 0,078$ m, která se blíží KK 2 ($m_{xy} = 0,06$ m). [32]

Ve vybraných lokalitách byly zjištěny následující střední hodnoty vzdálenosti mezi body KMD a jejich kontrolním geodetickým zaměřením [32]:

- $m_d=0,4$ m (maximální hodnota 1,69 m) pro rohy budov tvořících vlastnické hranice
- $m_d=0,71$ m (maximální hodnota 2,76 m) pro rohy budov tvořících vnitřní kresbu

Vyhodnocením bylo zjištěno, že maximální přípustný posun bodu SO na KMD vůči jeho obrazu na Ortofotu ČR je 2,0 m (přibližně $3 * m_d = 0,71$ m). Vyhodnocením tak bylo potvrzeno, že pro zpřesňování SO na podkladě KMD je opodstatněna nová kresba hran budov při překročení limitu 2 m pro ztotožnění obrazu paty stavby na ortofotu a v katastrální mapě. Limit 3 m pro ztotožnění obrazu hrany střechy stavby na ortofotu a v katastrální mapě pak zohledňuje kromě přesnosti KMD (2 m) i radiální posuny obrazu střech, které v krajních oblastech standardních LMS mohou dosáhnout hodnoty až 0,36 výšky budovy, což pro jednopodlažní stavby (výška cca 3 m) odpovídá posunu obrazu přibližně 1 m ($0,36 * 3$ m). Hlavním zjištěním vyhodnocení pak bylo, že střední hodnota vzdálenosti mezi kontrolním bodem určeným na OLMS a geodetickým měřením je $m_d = 0,82$ m (maximální hodnota 2,30 m), což odpovídá předpokladům $m_p = 0,75$ m (maximální hodnota 2,25 m) pro zpřesňování SO na podkladě KMD z práce [28]. [32]

5 Detekce změn

Tato kapitola je rešerší odborné literatury na téma detekce změn (DZ), která byla uvedena v autorových předchozích publikacích [19, 76]. DZ může být definována jako „proces identifikace rozdílů ve stavu objektů nebo fenoménů jejich pozorováním v různých časech“ (anglicky: the process of identifying differences in the state of an object or phenomenon by observing it at different times) [39]. V dostupných zdrojích může být nalezeno obrovské množství strategií a technik pro DZ. První přehled v tomto směru pravděpodobně vytvořil Singh již v roce 1989 [39]. Mezi pozdější, a tedy i aktuálnější přehledy pak lze zařadit práce Bouzianiho a kol. z roku 2010 [40] a Hussaina a kol. z roku 2013 [41]. [19, 76]

Rozdělení dle Bouzianiho a kol.

Podle autorů Bouziani a kol. [40] existují dvě hlavní strategie pro DZ, které vycházejí ze způsobu porovnání dat. Autoři označili tyto strategie jako porovnání obrazů (image-image) a porovnání obrazu a mapy (image-map). Obě strategie mohou být dále asistované nebo automatické s pixelově založeným přístupem (dále pouze jako pixelový/rastrový přístup) nebo objektivě založeným přístupem (objektový/vektorový přístup). [19]

Strategie založené na porovnání obrazů jsou poměrně staré. První publikace z osmdesátých a devadesátých let [39, 42] používaly pixelový přístup k produkci změnového obrazu mezi dvěma epochami. Velmi sofistikovaný přístup použitý v práci [43] byl založen na analýze leteckých stereodvojic v odstínech šedi nízké kvality, přičemž využíval z nich odvozený DMP a hranový detektor. Strategie založené na porovnání obrazů mohou k detekci změn využívat data laserového skenování místo obrazových dat. Tato řešení jsou založena na rastrovém [44, 45, 46, 47] nebo vektorovém [48, 49] přístupu. Některé práce [50, 51] pak využívají současně letecké snímky i data LLS. [19]

Strategie porovnání obrazu a mapy používají obrazová data (např. letecký snímek) a existující mapu (geodatabázi) k nalezení změn. Tato strategie může být dále dle Bouzianiho a kol. [40] rozdělena na dvě dílčí strategie: post-extrakční metodu a mapově řízenou metodu. Post-extrakční metoda je založena na extrakci obrazových primitiv, které jsou porovnány s mapovými objekty [52, 53]. Tato podstrategie má mnoho nevýhod. Hlavní nevýhodou může být rozdíl v geometrii a tvaru objektů v mapě (např. z důvodu generalizace) a ve skutečnosti. Výrazná generalizace budov (zjednodušení tvaru, spojení/blokování, posun) může zcela znemožnit použití této strategie. Druhá podstrategie využívá informace z mapy ke zlepšení klasifikace obrazu. Do této podstrategie mohou být také zahrnuty techniky používající během klasifikačního procesu geodatabáze. Geodatabáze mají obrovský informační potenciál. Geometrie, typ objektů a kontextuální vztahy mezi nimi jsou důležité pro DZ ve velmi komplexních prostředích [54, 55]. Novější práce jsou založeny na kombinaci různých zdrojů dat (např. mračen bodů z LLS, leteckých snímků a geodatabází) a předchozích znalostech [40, 56]. [19]

Rozdělení dle Hussaina a kol.

Aktuálnější přehled k tématu DZ podali autoři Hussain a kol. [41], kteří citovali 224 publikací. Podle tohoto obsáhlého přehledu dostupných prací a studií existují tři hlavní přístupy při DZ: pixelový, objektový a tzv. dolování prostorových dat. Autoři v této práci tedy dělí DZ podle použitého přístupu k analýze dat, a ne podle strategie získání změn. První dva tradiční přístupy můžou být dále rozděleny na mnoho podkategorií (tab. 6), které odpovídají

strategiím (technikám) získání změn. Některé techniky jsou použitelné pro pixelový i objektový přístup. Z tohoto důvodu jsou uvedeny bez rozdělení. [76]

Tab. 6. Techniky detekce změn podle typu přístupu [76]

Pixelový přístup	Objektový přístup
Přímé porovnání obrazů	Přímé porovnání objektů
Transformace obrazů	Porovnání klasifikovaných objektů
Porovnání klasifikovaných obrazů	Multitemporální porovnání objektů
	Integrace GIS
	Strojové učení
	Pokročilé metody

5.1 Hybridní detekce změn

Autor této práce se dále zaměřil na tzv. hybridní detekce změn (HDZ) dle autorů Hussaina a kol. [41]. HDZ kombinuje dvě a více technik (převážně pixelové a objektové přístupy) k maximalizaci jejich výhod a zároveň minimalizaci jejich nevýhod. HDZ může být dále dělena na procedurální nebo tzv. výsledkovou. Procedurální HDZ používá různé metody v různých fázích detekce. Výsledná procedura je tedy složena z mnoha technik, které byly vzájemně zkombinovány. Výsledková HDZ používá různé metody zcela odděleně a vzájemně analyzuje až jejich výsledky. Výsledná procedura je tak složena z mnoha paralelních technik, jejichž výsledky jsou zkombinovány. [76]

5.1.1 Hybridní detekce změn využívající družicová obrazová data

Následující práce jsou kombinací různých technik DZ, a mohou tak být označeny jako HDZ. Kombinace přímého porovnání obrazů a obrazové transformace (analýza hlavních komponent, anglicky: Principal Component Analysis) využívající obrazová data vysokého rozlišení družice IKONOS byla použita v práci [57]. Rastrové výsledky DZ potom byly analyzovány pomocí objektové klasifikace v softwaru eCognition spol. Trimble. Autoři [58] představili HDZ v podobě neřízené klasifikace založené na objektových příznacích extrahovaných z obrazových dat družice QuickBird. K detekci změn použili multivariační detekci změn (anglicky: Multivariate Alteration Detection, zkráceně: MAD) společně s transformací maximálního autokorelačního faktoru. Změněné objekty byly poté klasifikovány pomocí fuzzy odhadu maximální pravděpodobnosti. Jiné použití obrazových dat z družice QuickBird bylo demonstrováno v práci [59]. Autoři prezentovali detekci nelegálního osídlení (anglicky: informal settlements) pomocí objektového přístupu. Obrazové segmenty byly klasifikovány pomocí pravidel s fuzzy logikou a iterativně spojovány za využití rostoucího algoritmu a znalostní báze. Tato práce byla založena na předchozí studii [60], která se věnovala stejnému tématu, ale při využití dat z družice IKONOS. Hierarchická segmentace multitemporálních obrazových dat družice Landsat TM a ETM byla představena v práci [61]. Cílem této studie byla DZ pomocí klasifikace s fuzzy logikou implementovanou v softwaru Definiens Professional. Testovací území mělo rozlohu přibližně 900 km². Klasifikační metoda použitá v této práci byla vytvořena a aplikována v předchozí práci stejných autorů [62]. Automatická DZ budov v městském prostředí z družicových obrazových dat velmi vysokého rozlišení využívající existující geodatabázi byla prezentována v práci [40]. Představené řešení bylo založeno na segmentaci obrazových dat z družic IKONOS a QuickBird. Vytvořené segmenty byly následně analyzovány pomocí znalostní báze, která byla vytvořena pomocí GIS databáze a předchozích znalostí. Testovací území neznámé velikosti bylo složeno ze dvou podoblastí zachycujících části různých měst (Sherbrooke v Kanadě a Rabat v Maroku). Určení

parametrů segmentace, klasifikačních prahů a objektových vztahů bylo dosaženo použitím geodatabáze. I tato práce byla založena na předchozí práci stejných autorů [63]. Jiná skupina autorů [64] prezentovala DZ budov z multispektrálních scén družice QuickBird na základě tzv. morfologického indexu budovy (anglicky: morphological building index, zkráceně: MBI). MBI popisuje vztah mezi spektrálně prostorovými vlastnostmi budovy a morfologickými operátory. Použitím MBI je dle autorů možno automaticky detekovat budovy ze snímků vysokého rozlišení. Tato práce staví na předchozích pracích [65, 66], které se také zabývají využitím MBI. [76]

Výše zmíněné vědecké práce využívají satelitní obrazová data různých typů a rozlišení jako zdroje nových informací pro aktualizací proces. V uvedených pracích převládá použití obrazových dat z družice IKONOS (s rozlišením v nadiru: 0,82 m pro panchromatické a 3,28 m pro multispektrální pásma) a QuickBird (s rozlišením v nadiru: 0,65 m pro panchromatické a 2,62 m pro multispektrální pásma). Použití satelitních obrazových dat má své opodstatnění pro rozsáhlé nebo vzdálené oblasti. Nicméně, národní mapovací agentury v mnoha zemích pravidelně pořizují LMS, které obvykle poskytují mnohem vyšší prostorové rozlišení než satelitní obrazová data, a to i v případě srovnání s moderními komerčními družicemi jako např. WorldView-3 (panchromatické rozlišení: 0,31 m, multispektrální rozlišení: 1,24 m). Zvláště tyto organizace by měly být hlavními potenciálními uživateli moderních technik DZ, jako je např. HDZ pro účely aktualizace jimi spravovaných databází. LMS jsou skvělým zdrojem informací k monitorování stavu malých a detailních objektů, kterými jsou budovy nebo dokonce jejich části. Následně uvedené studie jsou proto věnovány použití LMS pro aktualizaci budov v národních geodatabázích v Dánsku, Německu, Finsku, Tchaj-wanu, Velké Británii a Švýcarsku. [76]

5.1.2 Hybridní detekce změn využívající letecká data

Jedna z prvních prací, která může být považována za aplikaci HDZ využívající LMS k aktualizaci budov v národní geodatabázi je [67]. V této studii byla navržena jednosnímková metoda DZ založená na řízené Mahalanobisově klasifikaci využívající existující vektorové objekty jako trénovací plochy pro specifikaci spektrálních vlastností třídy budov. V této práci byly použity barevné a barevné infračervené letecké snímky jako zdroj informací k aktualizaci budov v Dánské národní topografické databázi (TOP10DK). Čtyři testovací plochy pokrývaly celkem 0,3 km². Detekce budov byla založena primárně na spektrálních vlastnostech střech budov bez použití DMP. Výsledkem pak byla binární rastrová změnová mapa, která rozlišovala pouze mezi dvěma stavy: změna a beze změny. [76]

Německá studie [68] prezentovala přístup DZ založený na objektové klasifikaci multispektrálních LMS s využitím GIS databáze ATKIS. ATKIS je německá národní topografická a kartografická databáze v měřítku 1:25 000. Přístup byl vyzkoušen na dvou testovacích plochách (16 a 9,1 km²) a byl založen na řízené klasifikaci s využitím klasifikátoru maximální pravděpodobnosti (anglicky: Maximum Likelihood Classifier) nad trénovacími daty automaticky odvozenými z databáze ATKIS. Objekty byly klasifikovány do 4 tříd: osídlení, les, zeleň a voda. [76]

Detekce budov a změn budov podle [69] je založena na využití dat LLS a multispektrálních LMS. Vytvořená metoda detekuje budovy z nových leteckých dat a porovnává výsledky s existující vektorovou vrstvou budov z topografické databáze, která má být aktualizována. Testovací oblast měla rozlohu 5 km² (Finsko, Espoo). Metoda detekce budov se skládá ze segmentace DMP vytvořeného z dat LLS softwarem Definiens (nyní

eCognition, spol. Trimble). Vytvořené segmenty jsou následně klasifikovány v softwaru Matlab za využití následujících příznaků: NDVI, průměrný sklon a Haralickových texturálních [70] v podobě GLCM homogenity vypočtené z maxima DMP a GLCM homogenity vypočtené z NIR pásma LMS. DZ pak používá jednoduchou překrytovou analýzu. Prezentované řešení bylo vylepšenou verzí z předchozích prací [50, 71]. [76]

Multitypová detekce změn budov využívající data LLS, multispektrální LMS a existující modely budov byla prezentována autory [56]. Popsaná metoda detekuje budovy z nových leteckých dat a porovnává výsledky s existujícími 3D modely budov, které by měly být aktualizovány. Testovací území mělo rozlohu 2 km² (Tchaj-wan, Sin-ču). HDZ byla založena na vyhodnocení čtyř příznaků: výška, procento změněných bodů, změněná plocha a NDVI. Čtyři různé metody pro generaci nových obvodů budov byly vzájemně porovnány. TIN metoda byla určena jako nejlepší řešení ke generování obvodů budov z dat LLS v porovnání s metodami založenými na: úhlu, TIN-omezeném úhlu a maximu-minimu. [76]

V práci [72] byla představena metoda DZ s objektovým přístupem využívající letecké snímky, z nich vygenerovaný DMP a geodatabázi. LMS byly použity k tvorbě fotomozaiky a DMP s rozlišením 50-75 cm. Barevná fotomozaika byla klasifikována pomocí softwaru eCognition do sedmi tříd: stromy, křoviny, tráva/plodiny, nezpevněné povrchy, zpevněné povrchy, budovy a voda. Klasifikační pravidla byla založena především na spektrálních příznacích v podobě normalizovaných poměrů hodnot spektrálních pásem a vyhodnocení DMP. DZ byla testována na ploše 5x5 km² a dosáhla celkové kompletnosti 81,7 % a korektnosti 25,8 %. Autoři ve své práci zmínili, že klasifikace budov byla nejvíce ovlivněna chybami v DMP (z důvodu hlubokých stínů a opakujících se texturálních vzorů) a chybně klasifikovanou vegetací (z důvodu odlišných hodnot spektrálních poměrů pro stromy v květu). [76]

Objektově založená 3D DZ budov byla představena v práci [73]. Objekty s homogenním spektrem a výškou byly generovány pomocí Mean-shift segmentace ortofota a DMP. Generované segmenty byly následně klasifikovány jako budovy na základě analýzy v podobě rozhodovacího stromu a metody podpůrných vektorů (řízené klasifikaci). DZ byla provedena vyhodnocením překrývajících segmentů budov při využití strategie adaptivní indikace změn. Tato práce využívala skenované letecké snímkové dvojice poskytnuté Švýcarskou federální topografickou kanceláří SWISSTOPO. V práci byly použity letecké stereodvojice s pozemním rozlišením 38 cm ze 3 period (1994, 2002 a 2007). Testovací území (neznámé velikosti) bylo složeno ze tří podoblastí. Navržená HDZ používala rozdělení do třech tříd: změna, beze změny a nejistá změna. Vyhodnoceny však byly pouze dvě třídy: změna a beze změny. [76]

5.2 Současné problémy a navrhovaná řešení

Předchozí text jasně dokládá, že mnoho (dnes možná již většina) prací věnujících se DZ může být označena za HDZ. Použití sofistikovaných řešení kombinujících několik metod DZ je nezbytné k dosažení vysoké míry úspěšnosti. Většina z prezentovaných prací je založena na HDZ s procedurálním přístupem. Vědecké práce tedy kombinují různé metody DZ v různých fázích zpracování za účelem dosažení nejlepších výsledků. DZ s výsledkovým přístupem pak nelze označit za příliš vhodné z důvodu nízké efektivity zpracování. Vícenásobné zpracování velkého množství prostorových dat je totiž časově extrémně náročné a proto neekonomické. [76]

Výše zmíněné práce [40, 57, 58, 59, 61, 64] využívaly pro DZ pouze satelitní obrazová data (DMP nikoliv). Prezentované techniky DZ tedy byly založeny výhradně na analýze obrazových dat. Spektrální informace obsahující červené a blízké infračervené pásmo je možné využít k rozlišení vegetace od umělých objektů [56]. V případě budov však tento jednoduchý přístup není dostatečný. Spektrální hodnoty střešních pláštů totiž mohou být velmi podobné jiným umělým objektům (např. silnicím, cestám, chodníkům atd.). Tento problém může být vyřešen použitím objektového přístupu a analýzy geometrických a kontextuálních příznaků. Některé objekty (např. malé parkoviště a nádvoří přiléhající k domům) však mohou mít spektrální, geometrické, a dokonce i kontextuální příznaky podobné budovám [40]. V těchto případech neposkytuje ani objektový přístup uspokojivé řešení a může vést k falešné detekci změn. Další komplikace při DZ mohou být způsobeny různými světelnými podmínkami. Budovy se složitým tvarem střešního pláště jsou často takovým případem. Výrazně odlišné stíny způsobené různým časem a ročním obdobím sběru dat či nestejným typem použitého senzoru mohou vést k falešným indikacím změn nebo dokonce zcela znemožnit samotnou detekci změn [57]. Většinu z uvedených problémů je možno eliminovat použitím výškových informací (DMP). Výškové informace ze dvou období mohou být použity ke generaci rozdílové výškové mapy. DZ prostřednictvím výškových rozdílů je pak technologicky jednodušší než analýza plošných tvarů objektů a jejich rozdílů [56]. Výškové rozdíly jako prioritní zdroj informací o změnách pak vedou k redukci falešných indikací změn [73]. [76]

Kombinace obrazových a výškových dat by tedy měla být použita jako nejlepší zdroj informací pro DZ budov. V praxi jsou možné následující kombinace obrazových a výškových dat: satelitní obrazová data a z nich vygenerovaný DMP, satelitní obrazová data a LLS, letecké snímky a LLS, letecké snímky a z nich vygenerovaný DMP. Kombinace obrazových dat (leteckých nebo družicových) a dat LLS přináší specifické problémy, které odpovídají podstatě typů dat. Data LLS jsou obvykle pořizována během období vegetačního klidu (jaro/podzim), kdy může laserový paprsek snadněji proniknout vegetací až k zemskému povrchu. Sběr obrazových dat je však prováděn hlavně během letního (vegetačního) období, kdy jsou krátké stíny (Slunce je vysoko nad obzorem) a vegetace je jednoduše rozlišitelná od umělých objektů na základě rozdílu v odrazivosti červeného a blízkého infračerveného kanálu podle množství chlorofylu v zelených částech rostlin. V případě paralelního sběru dat je pak výhoda jednoho typu dat redukována ve prospěch druhého typu dat. Navíc ne všechny letecké nosiče jsou uzpůsobeny k současné instalaci letecké měřické kamery a laserového skeneru. Pořízení dat v různých obdobích [69] pak způsobuje jiné problémy. Pořízená data totiž zachycují různou realitu, protože zemský povrch se neustále mění. Dvojitý sběr dat je také finančně nákladnější, protože je nutné provést samostatné lety. [76]

Vzhledem k výše uvedeným informacím a závěrům může být stanoveno, že nejméně problematickým zdrojem informací pro DZ budov by měly být satelitní obrazová data a letecké snímky, které byly pořízeny s adekvátním překrytí pro následnou tvorbu DMP. Satelitní obrazová data reprezentují unikátní zdroj informací pro země (státy), které pravidelně neprovádí plošné letecké snímkování. Jsou vhodné pro mapování odlehlých oblastí. Naproti tomu LMS jsou již periodicky pořizovány mnohými zeměmi, resp. jejich národními mapovacími agenturami. LMS poskytují stejný unikátní zdroj informací jako satelitní snímky, ale jsou vhodnější pro detailní identifikaci změn budov (např. rekonstrukcí budov), protože mají vyšší prostorové rozlišení než satelitní obrazová data. Plný potenciál LMS začal být plně využíván až s rozvojem technik pro zcela automatické generování DMP [74] a nárůstem výkonu výpočetní techniky. [76]

Žádnou metodu z výše představených prací, které se věnují tématu aktualizace budov v národních geodatabázích (podkapitola 5.1.2), nelze plně převzít a aplikovat na situaci v ČR. Výchozí stav v každém státě je odlišný a požadavky často velmi specifické. Každý stát spravuje své geodatabáze obsahující geometrické a polohové určení budov a dalších staveb jiným způsobem a disponuje různými typy a kvalitou prostorových dat. Vzhledem k tomuto faktu je aplikace prezentovaných metod v jiných podmínkách často velmi komplikovaná nebo zcela nemožná. [19]

Následující část práce je věnována popisu metody pro automatickou DZ budov, která využívá strategii porovnání obrazů s pixelovým a objektovým přístupem a rozhodovacími pravidly. Metoda využívá multispektrální (barevné a blízké infračervené) LMS a z nich odvozený DMP. Metoda byla vytvořena pro aktualizaci budov v ZABAGED®. Její návrh je však univerzální, a proto je využitelná i pro jiné geodatabáze.

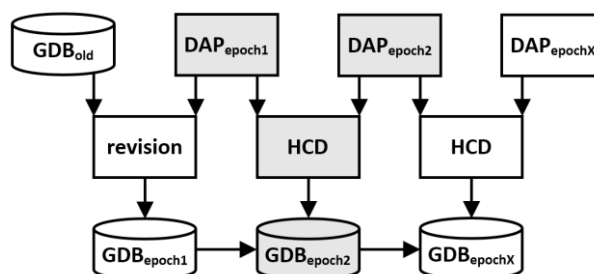
6 Využití leteckých obrazových dat pro aktualizaci budov

Tato kapitola vychází z autorových předchozích prací [11, 18, 19, 31, 75, 76]. Nová podoba evidence budov je vytvářena od roku 2014 a měla by být dokončena v roce 2021/2022. Budoucí výzvou pro ZÚ bude udržení nové podoby evidence budov v aktuálnosti. Vzhledem k výraznému zvýšení podrobnosti zákresu budov se jedná o nelehký úkol. Zákres budov převzatých z KN bude aktualizován opět prostřednictvím informací z KN (podkapitola 4.1.3). Kresbu budov doplněnou nad rámec obsahu KN lze však reálně aktualizovat pouze pomocí leteckých dat (obecně dat DPZ), které mohou mít obrazovou (např. ortofoto) či výškopisnou podobu (např. DMP). Letecké měřické snímkování je prováděno každé dva roky, tedy každé dva roky jsou k dispozici nezávislé podklady pro verifikaci stavebních objektů ZABAGED® na celém území ČR. Četnost průběžné aktualizace (dle dat ISKN) je 2-4x za rok a plošné aktualizace (dle ortofota a terénního šetření) 1x za 3 až 5 let. Vzniká zde tedy prostor pro aplikaci moderních technik detekce změn, které by automatizovaně vyhodnocovaly letecká data a mohly přispět ke zkrácení intervalu aktualizace budov na základě leteckých dat na periodu snímkování (dvouletá od roku 2012). Tento typ aktualizace je vhodný zejména pro novou podobu evidence budov v ZABAGED® (ZABARAK), protože dokáže detekovat i velmi malé změny budov doplněných nad rámec evidence katastru nemovitostí. [11]

6.1 Princip aktualizace budov

Princip aktualizace budov je vysvětlen na obrázku 61. Ve zjednodušené podobě je standardní aktualizace kresby budov prováděna manuální opravou (revision) starého stavu v databázi (GDB_{old}) podle nových leteckých obrazových dat (DAP_{epoch1}). Aktualizovaná databáze (GDB_{epoch1}) je poté používána až do další aktualizace. Zpravidla do té doby, než jsou k dispozici nová letecká obrazová data. Tento proces může být označen jako validace geodatabáze vůči situaci zachycené na leteckých obrazových datech (typicky LMS nebo ortofotu). [76]

Vytvořená metoda je založena na analýze starých LMS (DAP_{epoch1}) a nových LMS (DAP_{epoch2}) místo klasického porovnání starého stavu v databázi (GDB_{epoch1}) a nových LMS (DAP_{epoch2}). Metoda je založena na analýze LMS ze dvou epoch prostřednictvím hybridní delecce změn (HCD) a detekované rozdíly v podobě indikací změn jsou poté použity pro aktualizaci geodatabáze (GDB_{epoch2}). Tento aktualizací princip je označen na následujícím obrázku 61 světle šedou barvou. [76]



Obr. 61. Princip aktualizace budov [76]

Hlavní výhodou tohoto přístupu je prevence mnoha problémů, které vznikají při porovnání geodatabáze a leteckých obrazových dat. Jedná se např. o to, že ne všechny stavby jsou (a mají být) součástí geodatabáze (např. malé autobusové zastávky a telefonní

budky). Obrysy budov mohou být mírně posunutě nebo stočené (obr. 38 a 43) a neodpovídají tak zcela přesně realitě zachycené na LMS. Kromě výše zmíněného, budovy identifikované z leteckých obrazových dat se z důvodu přesahu střešního pláště mohou jevit větší, než jak jsou registrovány v geodatabázi. [76]

Tyto problémy byly zmíněny již v mnoha vědeckých pracích [56, 69]. Jejich odstranění je možné prostřednictvím zavedení tolerancí ve vzájemném překrytu. Tedy například, že budova identifikovaná v datech DPZ je ztotožněna s budovou v geodatabázi na základě společného překrytu o velikosti min. 50 %. Zavedení tohoto pravidla však způsobí, že částečná demolice budovy (ukázka č. 9, obr. 127 až 129) či přístavba budovy (ukázka č. 3, obr. 109 až 111) o méně než 50 % její původní rozlohy nebude detekována. Z tohoto důvodu vytvořená metoda vůči sobě porovnává LMS resp. z nich odvozené produkty (DMP, ortofoto) a teprve až identifikované změny konfrontuje s aktuálním stavem v geodatabázi (ZABAGED®). [76]

6.2 Popis metody

V následujícím textu je popsána vytvořená metoda, která využívá obrazovou korelaci leteckých měřických snímků a obrazovou analýzu pro detekci změn budov za účelem aktualizace jejich záznamu v GIS (dále již jen metoda). Metoda byla prezentována zde [18, 19] a v pozdější vylepšené podobě také zde [76]. Dle práce Hussaina a kol. [41] byla metoda zařazena do kategorie hybridních detekcí změn, protože kombinuje rastrový (pixelový) a objektový přístup. Zpracování a analýza dat probíhá ve dvou částech. První část používá rastrový přístup k identifikaci míst, kde došlo ke změně výšky umělých objektů. Druhá část využívá objektový přístup k odfiltrování změn, které nepřísluší budovám. Metoda využívá následující data: LMS ve viditelné a blízké infračervené části spektra ze dvou period snímkování, DMR a tematické podklady (GIS vrstvy). Jednotlivé kroky metody jsou vyjmenovány níže. [76]

1. Rastrové zpracování

1. Příprava barevných infračervených leteckých měřických snímků
2. Generování mračen bodů a tvorba digitálního modelu povrchu
3. Normalizace digitálního modelu povrchu
4. Výpočet rozdílového digitálního modelu povrchu
5. Tvorba vegetační masky
6. Rastrové vyhodnocení

2. Objektové zpracování

1. Vektorizace
2. Tvorba tematických podkladů
3. Filtrace
4. Segmentace
5. Tvorba masky stínů
6. Objektové vyhodnocení

6.2.1 Rastrové zpracování

6.2.1.1 Příprava barevných infračervených leteckých měřických snímků

Digitální letecké měřické kamery běžně pořizují obrazová data zároveň ve viditelném a blízkém infračerveném spektru. Blízký infračervený kanál je velmi dobrým zdrojem informací o stavu vegetace (množství chlorofylu v zelených částech rostlin) [77] a je využitelný pro odlišení vegetace od umělých objektů (více v podkapitole 6.2.1.5). Z tohoto důvodu byly LMS připraveny v tzv. nepravých barvách v kombinaci blízkého infračerveného kanálu pro červenou barvu, červeného kanálu pro zelenou barvu a zeleného kanálu pro modrou barvu místo tradiční kombinace červeného, zeleného a modrého kanálu pro odpovídající barvy. Použitá kombinace barev a kanálů je označována jako barevná infračervená (anglicky: Color Infra-Red, zkráceně: CIR). Následující obrázky 63 a 64 zachycují barevné infračervené LMS z roku 2010 a 2013. [11, 18, 19]



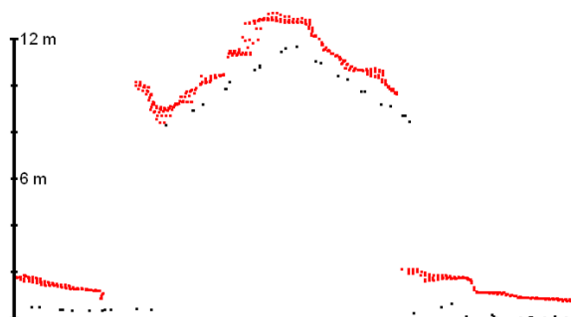
Obr. 63. Barevný infračervený LMS z roku 2010
[18]



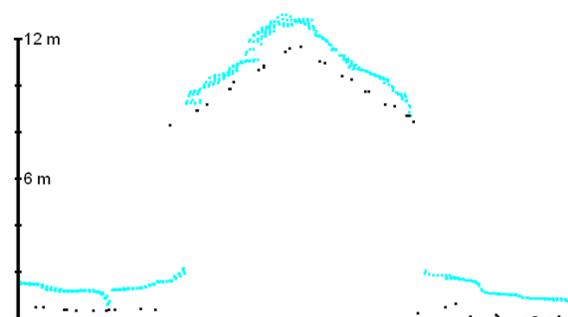
Obr. 64. Barevný infračervený LMS z roku 2013
[18]

6.2.1.2 Generování mračen bodů a tvorba digitálního modelu povrchu

LMS byly použity pro generování mračen bodů metodou automatické obrazové korelace. Technika generování mračen bodů byla již podrobněji popsána v podkapitole 2.2.4). Generování mračen bodů probíhalo po jednotlivých stereodvojicích sestavených z LMS s 60% podélným překrytem (ve směru letu). Tento přístup byl vyhodnocen jako nejvhodnější a to především z důvodu pouze 30% příčného překrytu LMS. Využití stereodvojic ze sousedních letových řad by nevedlo k plnému pokrytí snímkaného území a mělo pouze omezený přínos při zahuštění či zpřesnění mračen bodů. Dalším z důvodů bylo také zkrácení výpočetního času generování mračen bodů na minimum. Mračen bodů odpovídající vzájemným překrytům stereodvojic (dále již jen jako stereomodely) byla spojena a převedena do rastrové podoby DMP z důvodu celkové optimalizace zpracování. Pro spojení mračen bodů byl vytvořen vlastní přístup, který na překrytu stereomodelů preferuje nižší body a vyšší body filtruje. Vlastní přístup spojování mračen bodů vedl k lepším výsledkům než při využití komerčního softwaru MATCH-T. Porovnání výsledků spojení dvou stereomodelů nabízejí následující obrázky 65 a 66. [11, 18, 19]



Obr. 65. Profil referenčním mračnem bodů LLS (černě) a mračnem bodů z obrazové korelace spojeným v softwaru MATCH-T s odskokem +1 m (červeně) [19]



Obr. 66. Profil referenčním mračnem bodů LLS (černě) a mračnem bodů z obrazové korelace spojeným vlastním přístupem s odskokem +1 m (azurově) [19]

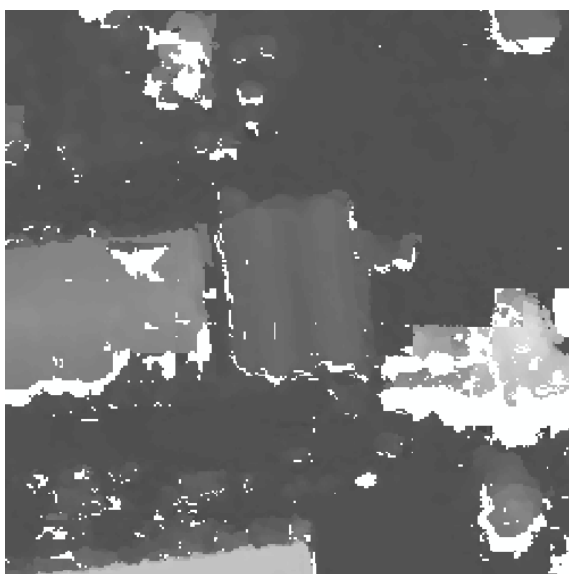
Mračna bodů byla generována pomocí softwaru MATCH-T. Následující obrázky v podkapitolách 6.2.1.3 a 6.2.1.4) zachycují výškové rastry vytvořené z mračna bodů o hustotě až 25 bodů/m², což odpovídá použití LMS s rozlišením na zemském povrchu o velikosti přibližně 20 cm. Prokázalo se, že takové množství výškových dat přináší značné nároky na hardware (kapacita úložiště, rychlost zpracování) bez přidané hodnoty pro detekci nových a zbořených budov. Hustota mračen bodů byla tedy při převodu do rastrové podoby redukována na 4 body/m², což odpovídá rozlišení 0.5 m/pixel (obr. 81 a 82). Tato redukce přinesla u LMS sjednocení polohové a výškové přesnosti na ±0.5 m (podkap. 2.2.5). [11, 19]

6.2.1.3 Normalizace digitálního modelu povrchu

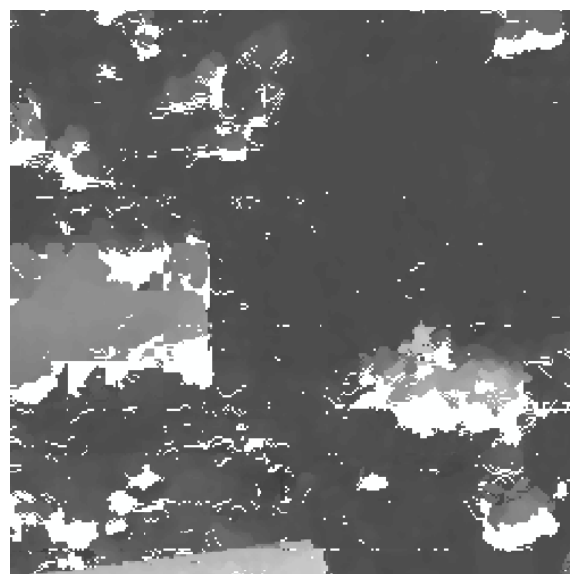
Normalizace je proces, při kterém je absolutní výška DMP redukována o výšku DMR (1). Vznikne tak normalizovaný digitální model povrchu (NDMP), který zobrazuje relativní výšku objektů nad terénem.

$$\text{NDMP} = \text{DMP} - \text{DMR} \quad (1)$$

Následující obrázky 67 a 68 znázorňují NDMP, kde odstíny šedé neodpovídají absolutním výškovým hodnotám (nadmořské výšce), ale odpovídají relativním výškám nad terénem. Tento typ vizualizace eliminuje výškovou členitost terénu a dává lepší představu o výšce objektů nacházejících se na zemském povrchu (stavby, vegetace atd.). [11, 18, 19]



Obr. 67. NDMP z roku 2010 [18]

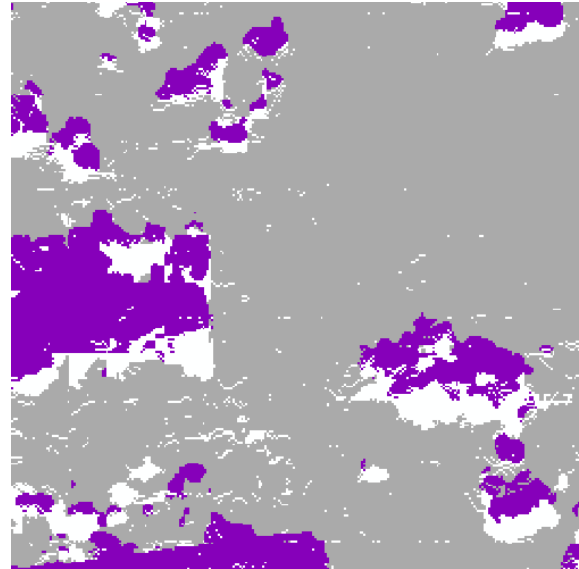


Obr. 68. NDMP z roku 2013 [18]

Pro normalizaci DMP byl použit DMR vytvořený z dat LLS. Konkrétně se jednalo o Digitální model reliéfu České republiky 4. Generace (DMR 4G). Pro území s členitým terénem je možno použít Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G), který je detailnější a může tak přispět ke zlepšení přesnosti výsledného NDMP. Obrázky 69 a 70 znázorňují klasifikované NDMP, kde objekty s relativní výškou více než dva metry nad terénem jsou zobrazeny fialovou barvou a objekty s nižší relativní výškou jsou vyobrazeny šedivou barvou. [11, 18, 19]



Obr. 69. Klasifikovaný NDMP z roku 2010, relativní výška: ≤ 2 m (šedivě), > 2 m (fialově) [18]



Obr. 70. Klasifikovaný NDMP z roku 2013, relativní výška: ≤ 2 m (šedivě), > 2 m (fialově) [18]

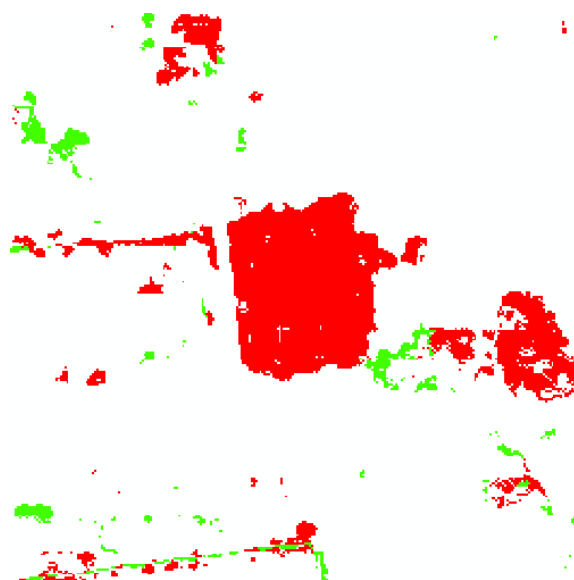
6.2.1.4 Výpočet rozdílového digitálního modelu povrchu

Výpočet rozdílového digitálního modelu povrchu (RDMP) je proces, kdy jsou od sebe odečteny NDMP (2), alternativně DMP (3) ze dvou různých období. V našem případě odpovídají různá období periodám leteckého snímkování stejné lokality. Pro získání kladných hodnot pro přírůstek výšky a záporných hodnot pro úbytek výšky je nutné odečíst výškový model ze staršího období (t_1) od výškového modelu z novějšího období (t_2).

$$\text{RDMP} = \text{NDMP}_{t_2} - \text{NDMP}_{t_1} \quad (2)$$

$$\text{RDMP} = \text{DMP}_{t_2} - \text{DMP}_{t_1} \quad (3)$$

Obrázek 71 reprezentuje klasifikovaný RDMP. Výškové rozdíly byly kategorizovány do dvou tříd: úbytek výšky ≤ -2 m, přírůstek výšky $\geq +2$ m. Výškové rozdíly v rozsahu hodnot -2 m až $+2$ m byly odstraněny. Prahové hodnoty (± 2 m) byly stanoveny s ohledem na minimální výšku budov (přízemní zástavba má minimální výšku cca 2,5 až 3 m) a byly zpřísněny tak, aby byly eliminovány výškové nepřesnosti DMP (± 0.5 m) vytvořeného metodou obrazové korelace LMS a DMR 4G (± 0.3 m), který byl použit pro normalizaci DMP. [11, 18, 19]



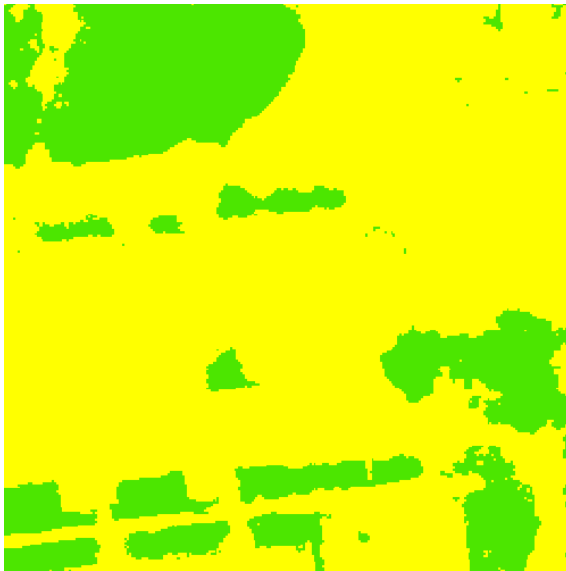
Obr. 71. Klasifikovaný RDMP, úbytek výšky ≤ -2 m (červeně), přírůstek výšky $\geq +2$ m (zeleně) [18]

6.2.1.5 Tvorba vegetační masky

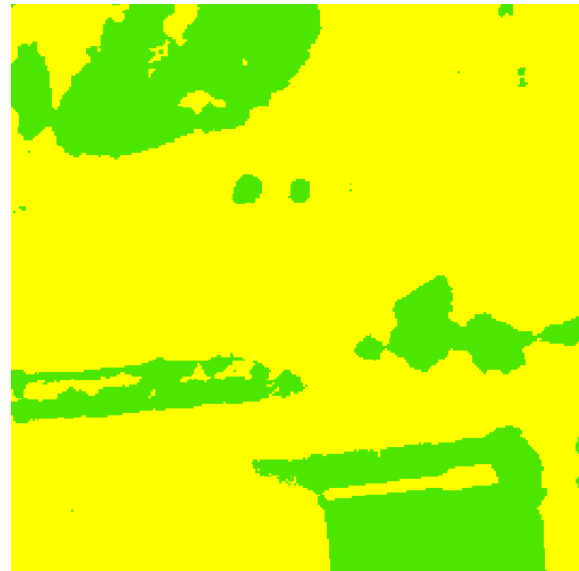
Informace z blízkého infračerveného (anglicky: Near Infrared, zkráceně: NIR) a červeného kanálu (anglicky: red, zkráceně: R) LMS umožňují výpočet normalizovaného rozdílového vegetačního indexu (anglicky: Normalized Differential Vegetation Index, zkráceně: NDVI) dle následující rovnice (4).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (4)$$

Hodnoty NDVI mohou nabývat hodnot -1 až 1 . Výpočtem NDVI rovnice pro každý obrazový pixel získáme odvozený NDVI rastr. Hodnota NDVI pro zdravou vegetaci by měla nabývat kladných hodnot (0 až 1) a pro ostatní (nezelené) objekty pak záporných hodnot (0 až -1) [77]. Prahováním (zpravidla s prahem rovným 0) lze převést NDVI rastr na binární masku, která může být použita k jednoduchému odlišení zelené vegetace od ostatních částí scény. Ukázky binárních NDVI masek (zkr. vegetačních masek) jsou na následujících obrázcích 72 a 73. Všechny části scény, které zachycují zelenou (zdravou) vegetaci, jsou reprezentovány zelenou barvou, zatímco žlutá barva vyjadřuje nezelenou vegetaci a všechny ostatní, především člověkem vytvořené, objekty (silnice, chodníky, stavby, vozidla atd.). Tyto masky byly použity k odfiltrování indikací změn výšky náležejících vegetaci, od indikací vystihujících výstavbu či demolici budov. [11, 18, 19]



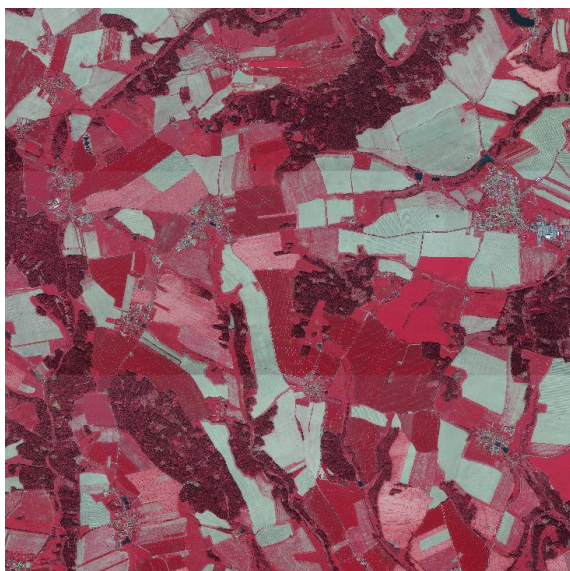
Obr. 72. Vegetační maska z roku 2010 [18]



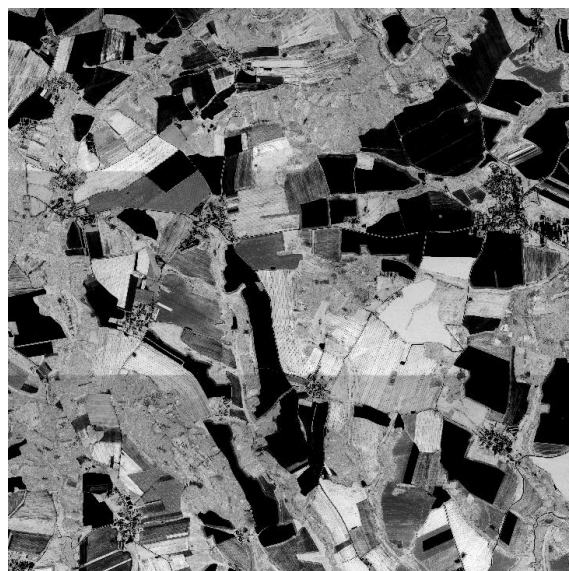
Obr. 73. Vegetační maska z roku 2013 [18]

Poznámka

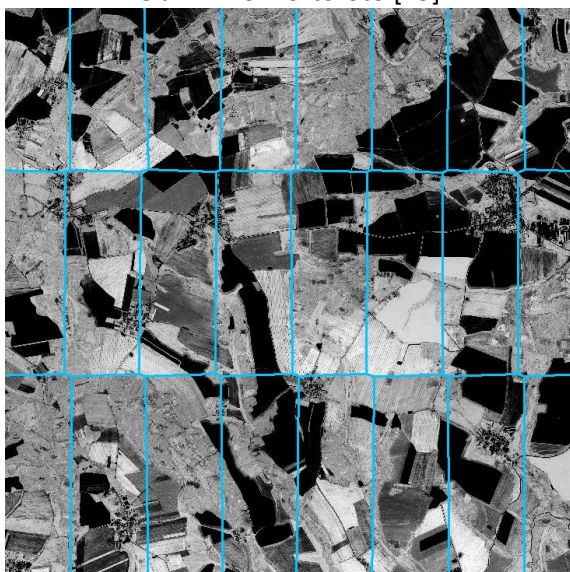
Během leteckého snímkování se mění světelné podmínky v závislosti na výšce Slunce nad obzorem a intenzitě slunečního svitu (denní doba a roční období), obsahu vodních par ve vzduchu a výskytu mraků (meteorologické podmínky). Změna světelných podmínek se projevuje změnou jasu a je nejčastěji pozorovatelná mezi LMS pořizovanými s velkým časovým odstupem, typicky např. sousedními letovými bloky snímkanými v různé dny, avšak může se vyskytnout i mezi sousedními snímkovými řadami (např. při přerušení snímkování). Změny jasu jsou nejpatrnější při spojení LMS do bezešvé ortofoto mozaiky. Na obrázku 74 je část CIR ortofota (ÚHÚL) s jasovými rozdíly v podobě horizontálních pruhů. Tato jasová nevyrovnanost je pak také patrná v odvozeném NDVI rastru na obrázku 75. Z obrázku 76 je zřejmé, že horizontální pruhy odpovídají průběhu švů ortofoto mozaiky (konkrétně snímkovým/letovým řadám). Zvolení jednotné prahové hodnoty pro tvorbu binárních NDVI masek pro všechny LMS by vedlo k výskytu chyb na rozhraní letových řad a tedy k neuspokojivým výsledkům. Možné řešení představuje barevné vyrovnání LMS nebo určení prahové hodnoty pro každý LMS zvlášť. Binární NDVI maska vytvořená z mozaikovaných samostatně prahovaných NDVI rastrů je na obrázku 77. Jasová nevyrovnanost zdrojových LMS se negativně neprojevila do binární NDVI masky. Prahové hodnoty pro jednotlivé NDVI rastry (středové části LMS) byly určeny automaticky na základě analýzy lesních celků vymezených pomocí doplňkové GIS vrstvy lesa. [75]



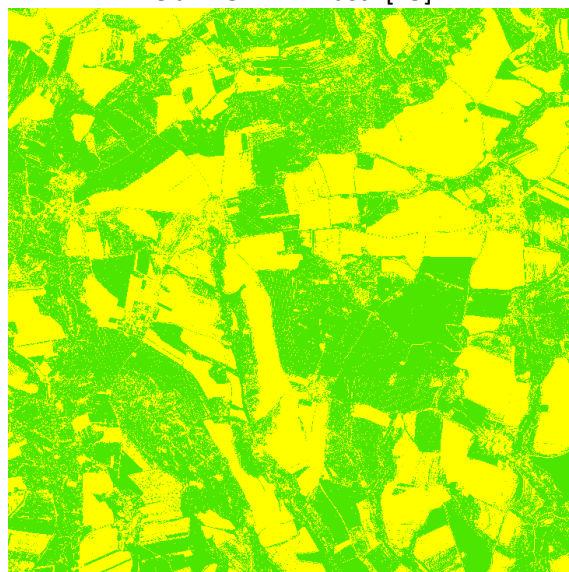
Obr. 74. CIR ortofoto [75]



Obr. 75. NDVI rastr [75]



Obr. 76. NDVI rastr a průběh švů ortofoto mozaiky [75]



Obr. 77. Vegetační maska [75]

6.2.1.6 Rastrové vyhodnocení

Rastrové vyhodnocení spočívá v identifikaci výškových změn budov. Do vyhodnocení vstupují následující rastry: klasifikované NDMP (6.2.1.3), klasifikovaný RDMP (6.2.1.4) a vegetační masky (6.2.1.5). Všechny rastry jsou analyzovány dle následující rozhodovací tabulky 7. Tabulka obsahuje výčet všech rastrů a možné kombinace jejich hodnot, které vystihují případy potenciálně nových, změněných nebo zbořených budov. Výsledkem vyhodnocení je opět rastr, jehož buňky mohou nabývat jedné z pěti možných hodnot, resp. tříd: nová, zvýšená, nezměněná, snížená a zbořená. [11, 18, 19]

Výsledný rastr je zjednodušen prostřednictvím binárních morfologických operací uzavření a otevření s využitím kruhové masky o průměru 2 m pro uzavření a 3 m pro otevření. Pro aplikaci morfologických operací bylo nutné převést výsledný rastr do binárních rastrů pro každou třídu a poté je opět spojit zpět dohromady. Zjednodušený výsledný rastr je na obrázku 78. [11, 18, 19]

Poznámka

Morfologie je metoda zpracování obrazu založená na binárních operacích otevření a uzavření objektu. Morfologické otevření je definováno jako oddělení všech částí objektu, které nepojmou použitou masku. Morfologické uzavření naopak vede k vyplnění všech přilehlých částí objektu, které neobsáhly použitou masku. Metody si lze zjednodušeně představit jako pískování objektu nebo jeho obalení. Obě vedou ke změně tvaru objektu a lze je použít odděleně či ve vzájemné kombinaci. Na výsledný tvar objektu má zásadní vliv velikost a podoba použité masky. Oválná (kruhová) maska vede k celkovému zkompaktnění a vyhlazení okrajů objektu. [12]

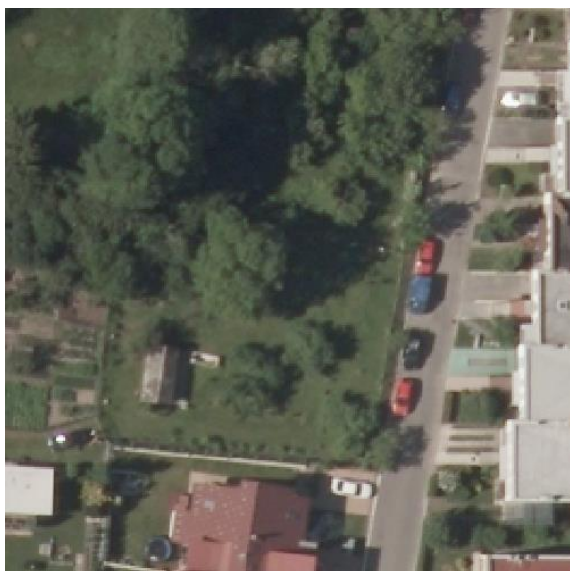
Tab. 7. Rozhodovací tabulka pro rastrové vyhodnocení [76]

období t1 (epocha 1)		RDMP	období t2 (epocha 2)		třída (druh změny)
NDMP	veg. maska		NDMP	veg. maska	
≥ 0 m	vegetace	nehodnoceno	≥ 2 m	ostatní	nová
≈ 0 m	ostatní	≥ +2 m	≥ 2 m	ostatní	nová
≥ 2 m	ostatní	≥ +2 m	≥ 4 m	ostatní	zvýšená
≥ 2 m	ostatní	≈ 0 m	≥ 2 m	ostatní	nezměněná
≥ 4 m	ostatní	≤ -2 m	≥ 2 m	ostatní	snížená
≥ 2 m	ostatní	≤ -2 m	≈ 0 m	ostatní	zbořená
≥ 2 m	ostatní	nehodnoceno	≥ 0 m	vegetace	zbořená

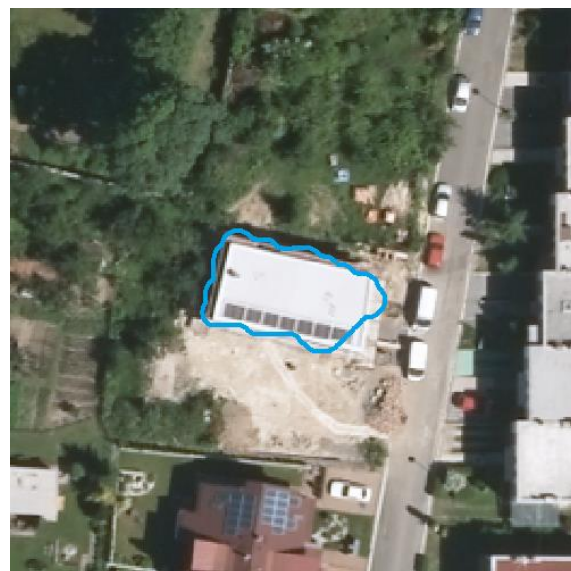


Obr. 78. Zjednodušený výsledný rastr

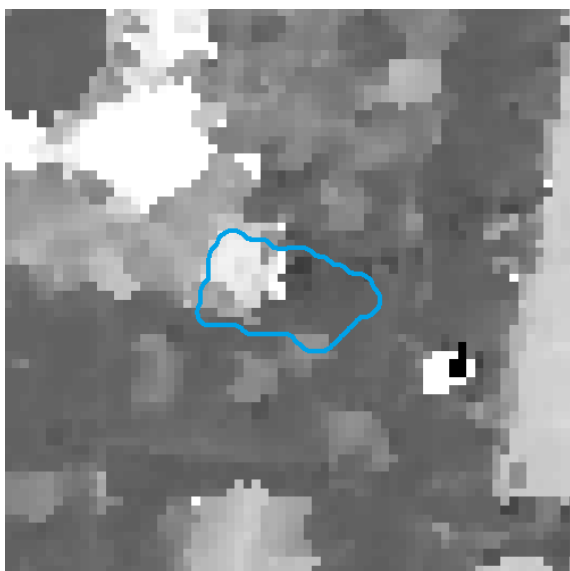
Následující ukázky dokumentují rastrové vyhodnocení pro novou budovu (obr. 79 až 84) a zbořenou budovu (obr. 85 až 90). V rámci ukázek je vyobrazena vylepšená vegetační maska, která obsahuje vegetaci klasifikovanou do 3 tříd (odstíny zelené) dle výšky NDMP (bez vlivu na zpracování). Změny zástavby byly v obou případech úspěšně detekovány. Obrázky dále dokládají, že tvar budov je při rastrovém vyhodnocení určen poměrně přesně a koresponduje se skutečným tvarem staveb. Rastrové vyhodnocení však vede k nalezení nadbytečného počtu potenciálních změn. Z tohoto důvodu jsou zjištěné změny analyzovány a filtrovány v rámci objektové části zpracování (podkapitola 6.2.2). [76]



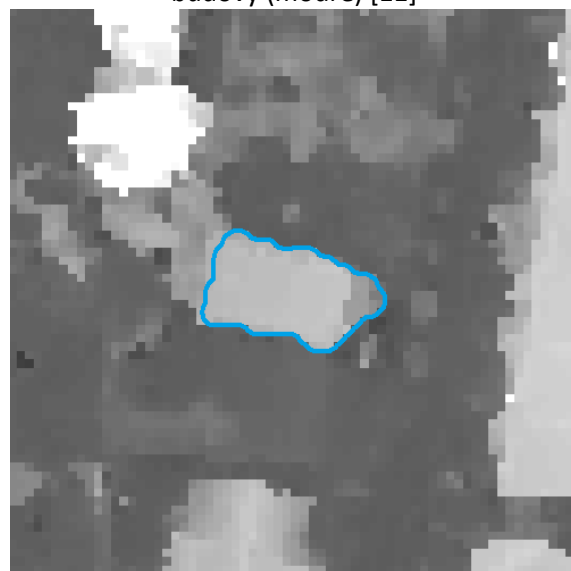
Obr. 79. Ortofoto z roku 2012 [11]



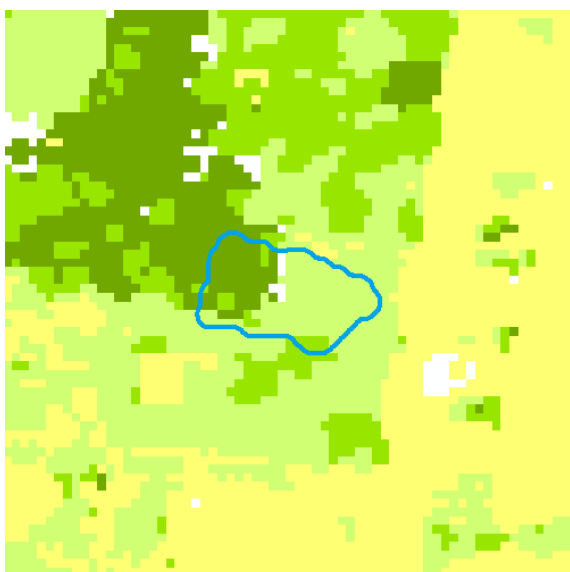
Obr. 80. Ortofoto z roku 2014 a obrys nové budovy (modře) [11]



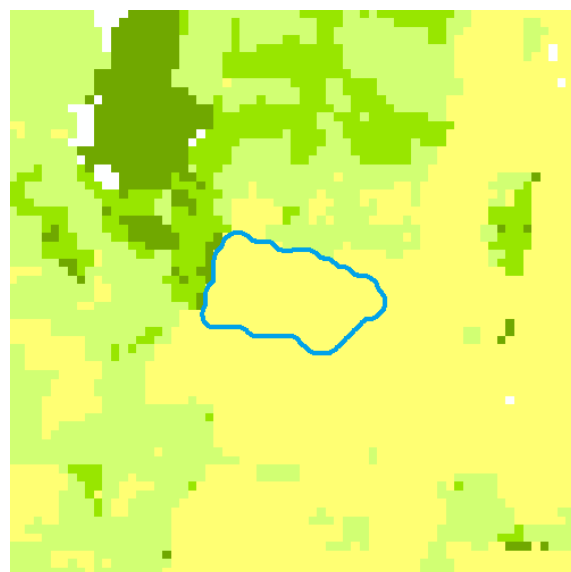
Obr. 81. NDMP z roku 2012



Obr. 82. NDMP z roku 2014



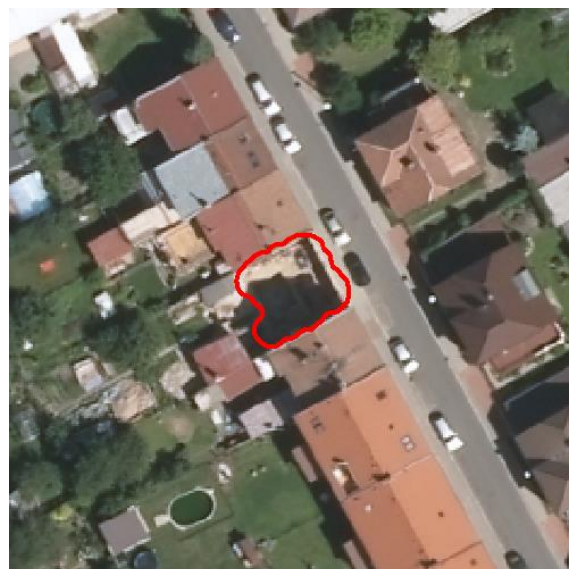
Obr. 83. Klasifikovaná vegetační maska z roku 2012



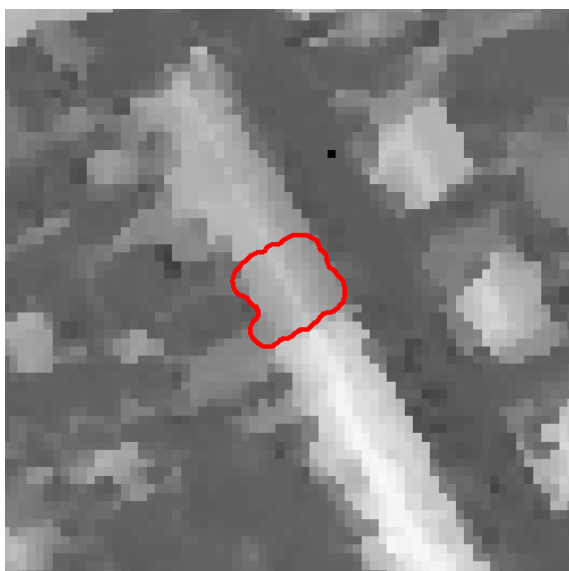
Obr. 84. Klasifikovaná vegetační maska z roku 2014



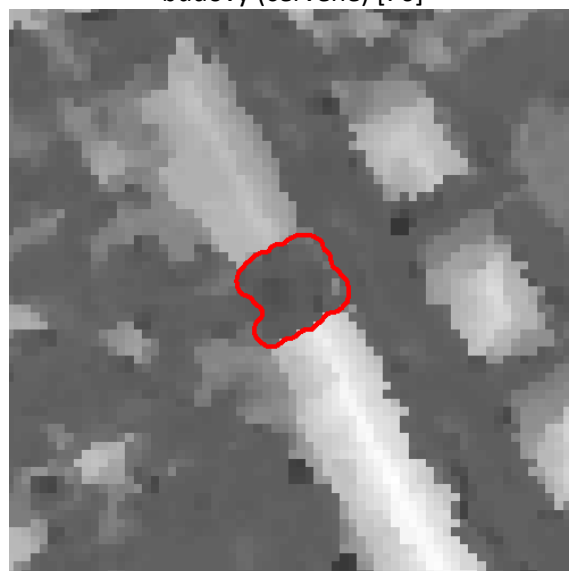
Obr. 85. Ortofoto z roku 2012 [76]



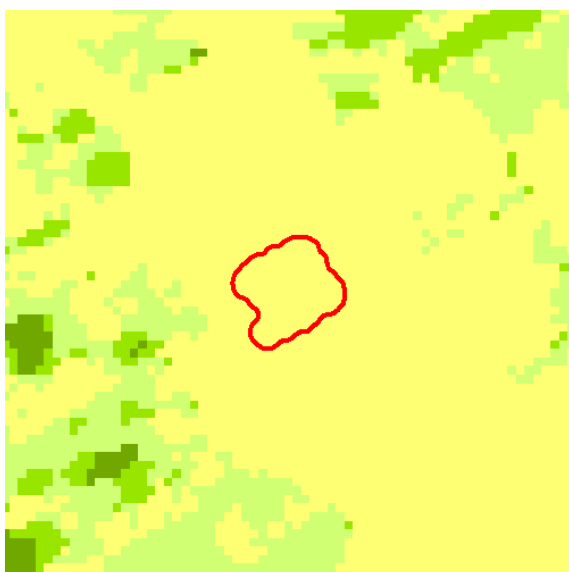
Obr. 86. Ortofoto z roku 2014 a obrys zbořené budovy (červeně) [76]



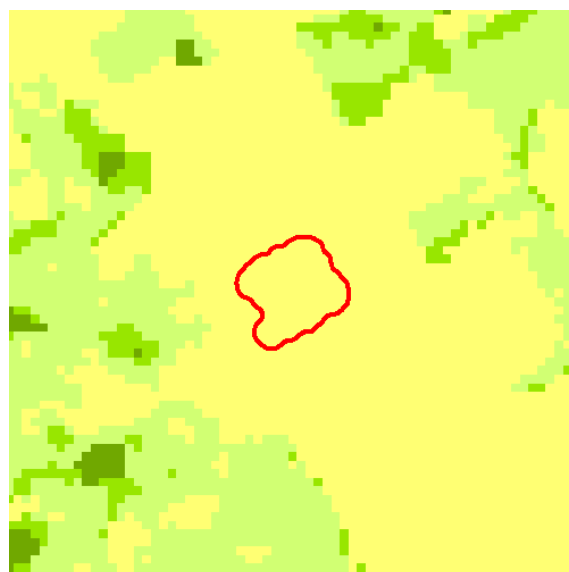
Obr. 87. NDMP z roku 2012



Obr. 88. NDMP z roku 2014



Obr. 89. Klasifikovaná vegetační maska z roku 2012



Obr. 90. Klasifikovaná vegetační maska z roku 2014

6.2.2 Objektové zpracování

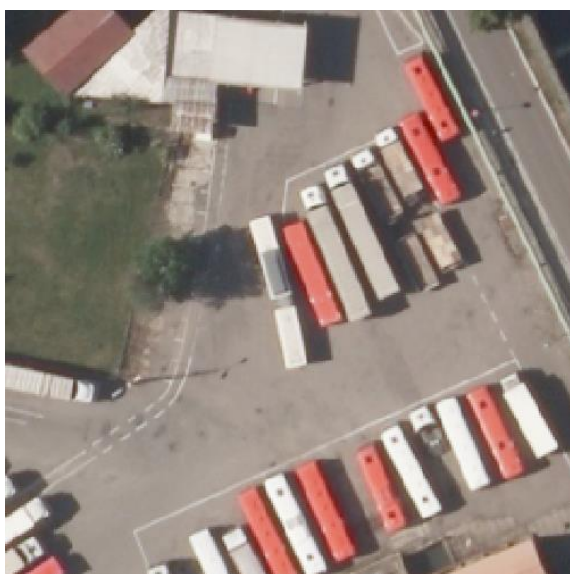
Cílem objektového zpracování je odfiltrovat detekované změny, které nepřísluší budovám na základě tematických podkladů a objektové analýzy obrazu (anglicky: Object Based Image Analysis) s využitím spektrálních a kontextuálních vlastností. [11, 19, 76]

6.2.2.1 Vektorizace

Změny v rastrové podobě byly převedeny do vektorové formy (např. ArcGIS: Raster to Polygon, QGIS: Polygonize). Vzniklé polygonové objekty (dále jako indikace) obsahovaly informaci o třídě (druhu změny) jako atributovou hodnotu. [76]

6.2.2.2 Tvorba tematických podkladů

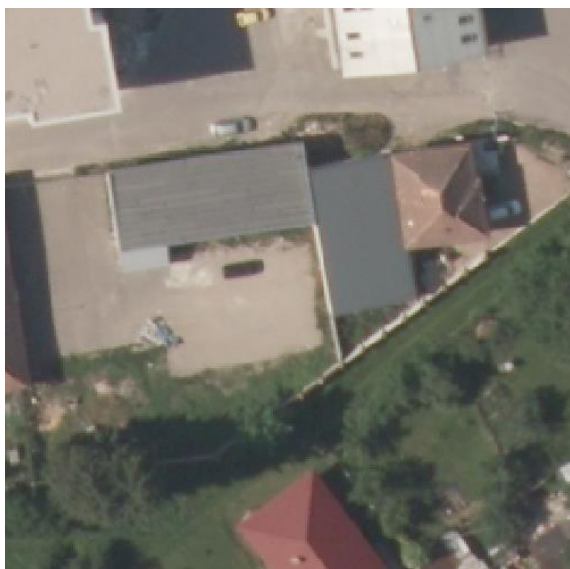
Pro identifikaci chybných indikací je vhodné využít tematické podklady (GIS vrstvy): silniční síť a parkoviště, železniční síť a kolejiště a průmyslové areály. Tyto vrstvy reprezentují území, kde se vyskytují prostředky dopravy nebo jiné objekty, které mění svou pozici v čase a mohou tak být v rastrovém zpracování vyhodnoceny jako změny. Nejedná se však o změny budov a tak jsou tyto indikace v rámci metody chybné. Může se jednat např. o nákladní vozy, kamiony, autobusy či vlaky. Zvláště pak, pokud se více těchto dopravních prostředků nachází blízko vedle sebe, což je typické pro parkoviště či kolejiště. Taková situace však může nastat i za provozu (např. stání na křižovatce). Skladovací a manipulační plochy v průmyslových areálech jsou také oblastmi s častým výskytem chybných indikací. Kontejnery, zboží naskládané na palety či kmeny stromů na otevřených skladovacích prostorech mění svoji pozici v čase. Tyto indikace je těžké charakterizovat použitím výškových, spektrálních i texturálních vlastností, protože jsou příliš variabilní, a to z hlediska výšky, barvy a tvaru. Kontextuální informace obsažené v tematických podkladech mohou být použity pro lepší porozumění analyzovanému území. Jedním z možných způsobů je vyloučit indikace, které mají průnik s tematickými podklady. Pro zachování indikací s velkou změnou výšky, které mohou odpovídat vícepodlažním budovám, je zaveden výškový práh NDMP. Výškový práh je stanoven na základě typické výšky dopravních prostředků a činí 4,5 m pro silniční síť a parkoviště (výška kamionu je cca 4 m) a 5 metrů pro železniční síť a kolejiště (výška vlaku je cca 4,5 m) a areály účelové zástavby. Ukázky odfiltrovaných chybných indikací jsou na následujících obrázcích 91 až 94. [11, 19, 76]



Obr. 91. Ortofoto z roku 2012 [11]



Obr. 92. Ortofoto z roku 2014 s vyznačenou chybnou indikací zbořené budovy (žlutě) [11]



Obr. 93. Ortofoto z roku 2012 [11]



Obr. 94. Ortofoto z roku 2014 s vyznačenou chybnou indikací nové budovy (žlutě) [11]

Možný zdroj tematických vrstev představují národní prostorové datasey. V rámci ČR je to ZABAGED®, která obsahuje více než 100 tematických objektů, přičemž mezi vhodné typy objektů pro odfiltrování chybných indikací patří: Silnice, dálnice (AP001), Ulice (AP002), Železniční trať (AN010), Železniční vlečka (AN050), Parkoviště, odpočívka (NF128), Kolejiště (NF129) a Areál účelové zástavby (NF127). ZABAGED® obsahuje dopravní síť (silniční a železniční) pouze v liniové podobě. Zamýšlené použití pro odfiltrování chybných indikací však vyžaduje plošnou podobu dat. Liniové objekty je proto nutné převést na plošné za použití nástroje obalové zóny (buffer) o velikosti odpovídající významnosti komunikace nebo trati. Kompletní přehled použitých typů objektů ZABAGED® a parametrů nabízí následující tabulka 8. [11, 19, 76]

Tab. 8. Použité objekty ZABAGED® pro filtraci chybných indikací [11, 76]

typ objektu	geometrie	filtrované okolí (buffer)	výškový práh
Dálnice	linie	3,5 m	4,5 m
Silnice	linie	3 m	4,5 m
Ulice	linie	2,5 m	4,5 m
Železniční trať	linie	1,5 m	5 m
Železniční vlečka	linie	1,5 m	5 m
Parkoviště, odpočívka	plocha	-	4,5 m
Kolejiště	plocha	-	5 m
Areál účelové zástavby	plocha	-	5 m

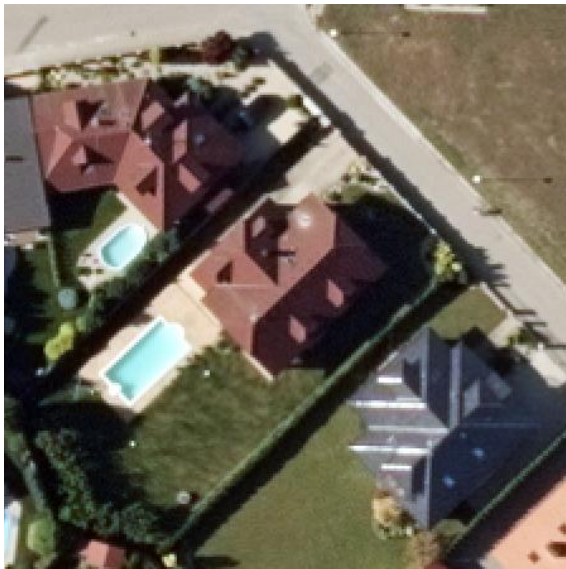
6.2.2.3 Filtrace

Filtrace je provedena ve 3 krocích. V prvním kroku jsou filtrovány indikace na základě jejich plochy. Indikace menší než 16 m² jsou vyloučeny ze zpracování. Určená hodnota odpovídá rozlišovací schopnosti metody a byla zvolena s ohledem na požadavek detekce změn, které svou velikostí odpovídají přibližně velikosti garáže pro 1 osobní automobil (3 x 5 m). Tato hodnota může být rovněž stanovena dle specifikace minimální velikosti budov vedených v GIS/geodatabázi. Druhý filtrační krok zmenšuje či případně zcela odstraňuje indikace, které se překrývají s použitými tematickými podklady a splňují specifikované výškové rozsahy (tab. 8). Třetí filtrační krok je založen na porovnání indikací se zákresem budov vedených v geodatabázi. Indikace vycházejí pouze z analýzy LMS a tak je možné, že některé indikace třídy „nová“ poukazují na budovy již v geodatabázi vedené. Obdobným

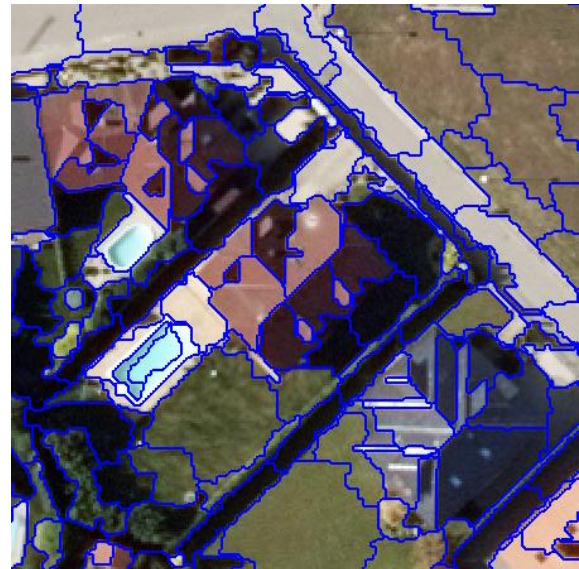
způsobem můžou některé indikace třídy zbořená vybízet k odstranění budov, které v geodatabázi nejsou vedeny. Odfiltrovány jsou tedy všechny indikace, které splňují jednu nebo druhou výše uvedenou vlastnost. Před porovnáním mohou být indikace zmenšeny pomocí záporné obalové zóny. Velikost záporné obalové zóny může být zvolena dle přesnosti zákresu budov v geodatabázi nebo s ohledem na velikost použité morfologické masky pro otevření, která definuje minimální šířku indikací (3 m). Hodnota záporné obalové zóny by měla být menší než $\frac{1}{2}$ velikosti použité masky pro morfologické otevření (<1,5 m), aby bylo zabráněno nárůstu počtu indikací rozpadnutím na jejich části. Pro filtraci indikací nových budov se musí jejich zmenšená podoba zcela překrývat se zákresem budov v geodatabázi a pro filtraci indikací zbořených budov se nesmí jejich zmenšená podoba překrývat se zákresem budov v geodatabázi. [11, 76]

6.2.2.4 Segmentace

Cílem segmentace obrazu je spojit/shlukovat pixely s podobnými spektrálními vlastnostmi a vytvořit tzv. obrazové objekty. Segmentace je prvotním krokem v objektové analýze obrazu. Segmentace obrazu je časově značně náročný proces a z toho důvodu byly vymezeny pouze části ortofota okolo indikací, které byly segmentovány. Vymezení bylo vytvořeno jako minimální ohraničující obdélník (anglicky: minimal bounding box, zkráceně: MBB), který byl zvětšen všemi směry o 1,5násobek délky stínu vrženého nejvyšším bodem NDMP uvnitř indikace. Délka stínu byla vypočtena na základě znalosti výšky nejvyššího bodu NDMP a času pořízení odpovídajícího LMS. Vymezené segmentované území tedy obsahovalo pouze indikaci a její nejbližší okolí s přilehlým stínem. Segmentace byla provedena v softwaru Definiens Developer verze 7.0.8 (v současnosti Trimble eCognition Developer) prostřednictvím algoritmu „multiresolution segmentation“ s využitím všech spektrálních pásem (R, G, B, NIR) se stejnými vahami a následujícím nastavením: měřítko (scale) 30, tvar (shape) 0.5 a kompaktnost (compactness) 0.8. Ukázka segmentace je na následujících obrázcích 95 a 96. [11, 76]



Obr. 95. Ortofoto z roku 2014



Obr. 96. Ortofoto z roku 2014 a obrazové objekty (modře)

Pro segmentaci obrazových dat byl rovněž s úspěchem vyzkoušen růstový algoritmus implementovaný v modulu i.segment softwaru GRASS GIS. Tento modul byl vytvořen v rámci akce Google Summer of Code 2012 Ericem Momsenem z North Dakota State University [78]. [11, 76]

6.2.2.5 Tvorba masky stínů

Maska stínů je binární maska vytvořená klasifikací stínů, resp. zastíněných částí ortofota či ortogonalizovaných snímků. Ukázka masky stínů v kombinaci s ortofotem je na obrázku 97. Klasifikace stínů je založena na spektrálním vyhodnocení obrazových objektů, které mají nízkou hodnotu intenzity (Intensity) v barevném modelu HSI (Hue, Saturation, Intensity) a nízkou průměrnou hodnotu NIR. Pro klasifikaci stínů byl použit software Definiens Developer verze 7.0.8. Obrazové objekty byly klasifikovány jako stíny na základě následujícího pravidla (5). [11, 19, 76]

$$\forall \text{objekt}_{\text{stín}} : HSI_I < 0.25 \vee (HSI_I \in (0.25, 0.4) \wedge \overline{NIR} < 85) \quad (5)$$



Obr. 97. Ortofoto z roku 2014 a klasifikované stíny (modře)



Obr. 98. Modelované stíny z DMP

Maska stínů může být také vytvořena alternativním způsobem z DMP pomocí GIS nástroje pro tvorbu stínovaného reliéfu s nastavením pro modelování stínů (např. ArcGIS: Hillshade). Modelované stíny (maska stínů) z DMP jsou na obrázku 98. Pro tvorbu je nutné znát přesný čas pořízení LMS, ze kterého lze zpětně určit pozici (azimut a výšku) Slunce na obloze. [19, 76]

Poznámka

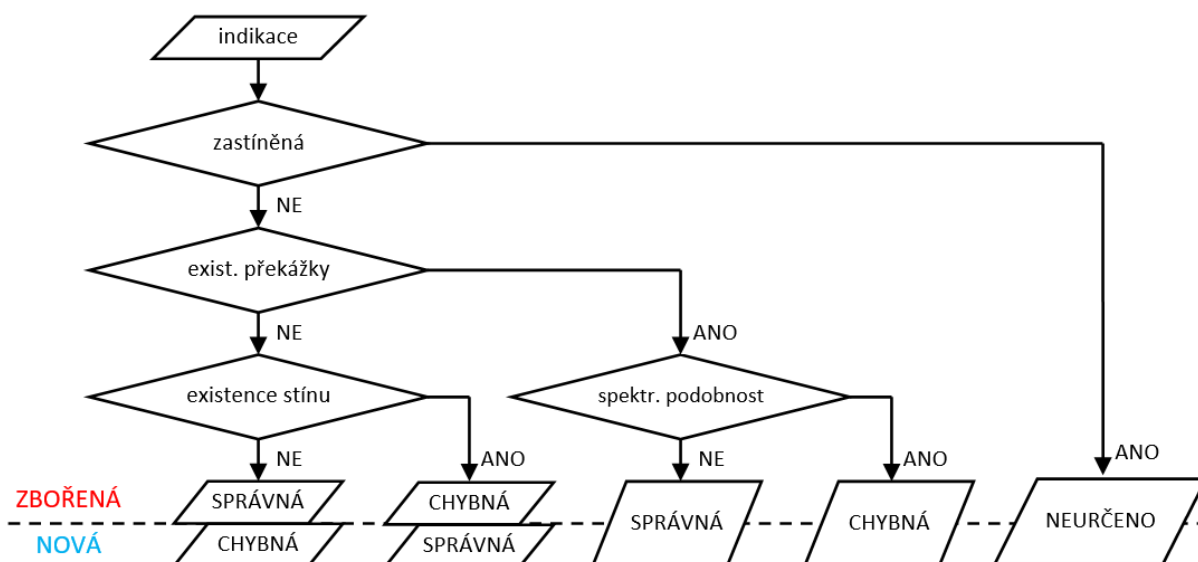
Modelované stíny mohou být použity jako vhodný podklad pro klasifikaci stínů. Klasifikace stínů v LMS totiž může být komplikovaná. Spektrální charakteristika stínů (intenzita v barevném modelu HSI a hodnota NIR kanálu) závisí na zastíněném objektu (asfalt, chodník, tráva atd.). V určitých případech nemusí být stíny na základě stanoveného pravidla správně klasifikovány. Z tohoto důvodu je vhodné klasifikovat stíny nejen na základě spektrálních vlastností, ale také s použitím dodatečné informace v podobě modelovaných stínů z DMP. Kombinací obou podkladů je možné získat velmi spolehlivou masku stínů. Tvorba masky stínů tohoto typu byla podrobně popsána v práci [12], kde byla použita při detekci budov. [19, 76]

Pro tvorbu masky stínů a její aplikaci byl také vyzkoušen open-source software InterIMAGE, který byl vytvořen na PUC-Rio (Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro) [79]. Tento znalostní software pro automatickou interpretaci obrazových dat je značně

podobný komerčnímu softwaru eCognition od společnosti Trimble. Nedosahuje však takové funkčnosti a ztrácí i z hlediska výkonu (rychlosti zpracování dat). [11]

6.2.2.6 Objektové vyhodnocení

Následující diagram (obr. 99) zobrazuje objektové vyhodnocení indikací. Cílem objektového vyhodnocení je určit, zda je indikace chybná, správná nebo neurčená. Všechny chybné indikace jsou vyloučeny. Všechny správné a neurčené indikace představují finální vektorovou změnovou mapu a jsou výsledkem metody. Jednotlivé kroky vyhodnocení jsou popsány níže. [11, 19, 76]



Obr. 99. Diagram objektového vyhodnocení [76]

Zastíněná indikace

V prvním kroku je analyzováno, zda je indikace zastíněná. K určení zastíněnosti je použita maska stínů. Jako zastíněná je označena každá indikace, která má méně než 16 m² nezastíněné plochy. Toto řešení je založeno na předpokladu, že vygenerovaný DMP může být v zastíněných oblastech nepřesný a spektrální analýza, která může být provedena v následujícím kroku vyhodnocení, je u zastíněných oblastí komplikovaná. Zastíněná indikace je označena jako „neurčená“ a je nutné ji zkontrolovat manuálně. Pokud je indikace nezastíněná, pokračuje vyhodnocení dalším krokem. [76]

Existence překážky

Tento krok rozděluje indikace podle existence výškové překážky ve směru slunečního svitu. Jako překážka je označen každý objekt přiléhající k indikaci ve směru slunečního svitu (azimut Slunce +180°), který nabývá průměrné hodnoty NDMP 2 metry a více. Existence překážky (jiná budova nebo vegetace) brání kontextuální analýze stínů, a proto je přistoupeno k vyhodnocení spektrální podobnosti. V případě neexistence výškové překážky pokračuje vyhodnocení analýzou existence přilehlého stínu. [76]

Spektrální podobnost

Indikace s existující výškovou překážkou ve směru slunečního svitu je analyzována na základě spektrální podobnosti mezi epochou 1 a 2. Spektrální podobnost je definována jako malá odlišnost (< 15°) v odstínu barvy (Hue) dle barevného modelu HSI v nezastíněné části indikace určené maskami stínů z epochy 1 a 2. Spektrální podobnost poukazuje na chybnou indikaci a spektrální rozdílnost na správnou indikaci. [76]

Existence stínu

Pokud ve směru slunečního svitu není výšková překážka, je použita kontextuální analýza přilehlého stínu dle masky stínů pro epochu 2. Výsledek vyhodnocení závisí na typu indikace, zda se jedná o indikaci nové nebo zbořené budovy. Nová budova by měla vrhat stín, zbořená nikoliv. Jako správné jsou tedy označeny indikace nových budov s přiléhajícím stínem a zbořených budov bez přiléhajícího stínu. [76]

Následující obrázky 100 a 101 znázorňují finální vektorovou podobu indikace zbořené budovy, která byla vyhodnocena jako správná, protože nebyla zastíněna, ve směru slunečního svitu se nenacházela žádná výšková překážka a k indikaci nepřilhal stín.



Obr. 100. Barevný LMS z roku 2010 [18]



Obr. 101. Barevný LMS z roku 2013 a správná indikace zbořené budovy (červeně) [18]

V průběhu zpracování bylo zjištěno, že u rekonstruovaných budov nemusí docházet ke změně spektrálních vlastností. Princip vyhodnocení existence přilehlého stínu nelze také použít, protože dochází pouze ke změně jeho délky dle rozsahu rekonstrukce (např. počtu podlaží nástavby). Tyto indikace je tak velmi obtížné verifikovat. Z tohoto důvodu byly všechny indikace rekonstrukcí, které prošly filtrací (podkapitola 6.2.2.3), vyčleněny z finální vektorové změnové mapy a nebyly vyhodnoceny. Vyhodnocení indikací nových a zbořených budov je popsáno v následující podkapitole 6.2. [76]

6.3 Testování a vyhodnocení

Vytvořená metoda byla testována na zájmovém území. Zájmové území se skládalo ze čtyř různých oblastí, které odpovídaly 4 mapovým listům Státní mapy v měřítku 1:5 000. Každý mapový list má plochu 5 km². Celková plocha zájmového území tedy byla 20 km² a byla rozdělena na dva typy území: vesnice a předměstí. Vesnice pokrývaly plochu 10 km² a obsahovaly přibližně 1400 samostatných budov. Předměstí pokrývaly stejnou plochu a obsahovaly okolo 4000 samostatných budov. Časový rozdíl mezi 1. a 2. epochou byl pouze 2 roky a proto nebylo očekáváno velké množství identifikovaných změn. Obce a předměstí byly vybrány z důvodu, že se jedná o rychle se rozvíjející typy území v rámci ČR, pro které jsou typické zcela nové či zbořené budovy. Ve městech či přímo v jejich historických centrech pak probíhá nová výstavba a demolice budov spíše výjimečně a pro toto území jsou typické spíše přístavby menšího významu či rekonstrukce budov v podobě nástaveb. [76]

Následující tabulka 9 obsahuje vyhodnocení indikací nových a zbořených budov. Indikace byly porovnány se změnami (reálnými změnami) získanými na základě vizuální interpretace ortofot z epochy 1 a 2. Všechny indikace byly analyzovány a rozděleny na správné a chybné. Následně byla vypočtena korektnost a kompletnost. Korektnost popisuje poměr mezi správnými a všemi indikacemi. Kompletnost vyjadřuje poměr mezi správnými indikacemi a reálnými změnami. Vyhodnocení indikací rekonstruovaných budov nebylo provedeno, protože dostatečně přesná identifikace rekonstrukcí budov je možná pouze stereofotogrammetrickým vyhodnocením nebo terénním šetřením, což by bylo v daném případě extrémně časově náročné. [76]

Tab. 9. Výsledky detekce změn budov [76]

Typ území	Typ indikace	Reálné změny	Indikace			Korektnost	Kompletnost
			Celkem	Správné	Chybné		
Vesnice	Nové	54	53	50	3	94 %	94 %
	Zbořené	11	10	10	0	100 %	91 %
Předměstí	Nové	39	38	34	4	89 %	87 %
	Zbořené	28	25	24	1	96 %	86 %
Celkem	Nové	93	91	84	7	92 %	90 %
	Zbořené	39	35	34	1	97 %	87 %
	Bez rozlišení	132	126	118	8	94 %	89 %

Vytvořená metoda dosáhla výborných výsledků pro vesnice a velmi dobrých pro předměstské oblasti. Vyhodnocením bylo zjištěno, že téměř všechny nové (84 z 93) a zbořené (34 z 39) budovy nacházející se v zájmovém území byly detekovány. Kompletnost detekce nových budov je 90 % a zbořených budov 87 %. Korektnost detekce nových budov je 92 % a zbořených budov dokonce 97 %. Kompletnost detekce vychází z rastrové části zpracování, ve které jsou identifikovány všechny změny. Korektnost detekce je pak dána kvalitou filtrace chybných indikací. Vzhledem k dosaženým výsledkům může být popsána metoda označena jako velmi bezpečná s nízkým počtem chybných indikací. Detekce změn budov má celkovou kompletnost 89 % a korektnost 94 %. Pro srovnání, v práci [72] byla dosažena pro nové budovy kompletnost 78,9 % a korektnost 19,7 % a pro zbořené budovy kompletnost 100 % a korektnost 35 %. [76]

Během vizuální kontroly bylo zjištěno, že většina neidentifikovaných změn, které způsobily nižší kompletnost kolem 90 %, se nacházela v průmyslových areálech (Areály účelové zástavby dle ZABAGED®). Neidentifikované změny v těchto oblastech náležely jednopodlažním stavbám (např. malým skladovým objektům) s relativní výškou do 5 metrů. Změny těchto staveb byly metodou identifikovány, ale následně byly indikace odstraněny během filtračního procesu při využití vybraných typů objektů ZABAGED®. Tyto nízké a obvykle plošně malé budovy mají často pouze dočasný charakter, a proto malou prioritu v aktualizacím procesu. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 6.2.2.2, filtrace indikací v průmyslových areálech je komplikovaná a přiměřená ztráta informací o změnách menších staveb je tolerovatelná. [76]

Následující podkapitoly 6.4 a 6.5 jsou zaměřeny na využití vytvořené metody v rámci aktualizacích činností ZÚ.

6.4 Zkušební provoz v roce 2016

Vytvořená metoda (podkapitola 6.2) byla testována ZÚ, Oddělení sběru dat Praha, v rámci zkušebního provozu v roce 2016 [75] s využitím následujících typů dat: LMS, barevné infračervené (CIR) ortofoto, DMR 4G a ZABAGED®. V rámci zkušebního provozu musely být některé části objektového zpracování vynechány, protože ZÚ nedisponuje licencí softwaru Definiens Developer (eCognition Developer). Zkušební provoz byl koncipován na využití metody při provádění plošné aktualizace ZABAGED®. Porovnávány tak byly LMS s časovým rozestupem 5 let. Cílem bylo vyhodnotit obrysy potenciálně nových a zbořených budov (tzv. indikace) a ověřit přínos jejich použití před samotným začátkem prací v terénu, které jsou součástí plošné aktualizace ZABAGED®.

6.4.1 Popis

V rámci zkušebního provozu bylo vybráno zájmové území o velikosti cca 90 km² (5 listů ZM10), na kterém byla provedena plošná aktualizace v roce 2011 s využitím ortofota z roku 2010 a mělo být nově aktualizováno v roce 2016 s využitím ortofota z roku 2015 (tab. 10). Konkrétní seznam mapových listů zájmového území je uveden v tabulce 11. [75]

Tab. 10. Plán plošné aktualizace zájmového území [75]

číslo listu ZM50	poslední plošná aktualizace		nová plošná aktualizace		popis území
	rok	rok ortofota	rok	rok ortofota	
23-12	2011	2010	2016	2015	Ledeč n. Sázavou

Tab. 11. Seznam mapových listů zájmového území [75]

číslo listu ZM10	největší obec
23-12-05	Ledeč nad Sázavou
23-12-11	Čechtice
23-12-25	Jiřice
23-12-22	Košetice
23-12-24	Senožaty

Barevné LMS byly použity pro tvorbu DMP pomocí softwaru Match-T, který byl součástí Inpho 7.1 od spol. Trimble. DMR 4G byl použit pro normalizaci DMP. CIR ortofoto bylo použito pro tvorbu klasifikované NDVI masky. CIR ortofoto bylo vytvořeno Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL) ze stejných snímků, ze kterých je vytvářeno Ortofoto ČR [80]. Stejně jako Ortofoto ČR jsou CIR ortofota v kladu SM5. Technologie zpracování a archivace CIR ortofota na straně ÚHÚL se však v průběhu času měnila. Jednotlivé ročníky CIR ortofota jsou tak zpracovány s různým prostorovým rozlišením a kompresí (tab. 12). [75]

Tab. 12. Varianty CIR ortofota [75]

rok	parametry
2010	0.5 m/pixel, ztrátová komprese (JPEG komprese s kvalitou 95)
2015	0.25 m/pixel, bezztrátová komprese

Z důvodu zajištění jednotnosti dat byly všechny rastrové podklady převedeny do rozlišení 0.5 m/pixel, které odpovídá rozlišení použitého rastru s nejmenší podrobností (CIR ortofoto z roku 2010). CIR ortofoto bylo zpracováno dle postupu, který je popsán v podkapitole 6.2.1.5. Tvorba masky stínů pro větší území je značně časově náročná, proto nebyla ve zkušebním provozu využita. Pro odfiltrování části chybných indikací byly využity vybrané typy objektů ze ZABAGED® (podkapitola 6.2.2.2). Indikace nových budov nelze

ověřit jinak než vizuální interpretací ortofota. Indikace zbořených budov však z principu musí ležet uvnitř obrysů budov ZABAGED®. Pro filtraci (a oříznutí) indikací zbořených budov tak byly využity i obrysy budov ze ZABAGED®. [75]

Cílem zkušebního provozu bylo prověřit všechny indikace nových a zbořených budov a přiřadit jim kategorizaci. Kategorizace spočívala v určení, zda se jedná o „správnou“ indikaci (změna ZABAGED®) či zda se jednalo o „chybnou“ indikaci (žádná změna ZABAGED®). U každé indikace bylo nutné provést vizuální kontrolu vůči podkladovému ortofotu, ZABAGED® a rozhodnout o správnosti případně chybnosti indikace. Tvary indikací byly vzhledem k nízké kvalitě zdrojových dat spíše orientační a nemusely tak vždy zcela přesně odpovídat realitě, bylo proto nutné zkontrolovat i jejich bezprostřední okolí (celou budovu). Pro zjednodušení ověření bylo vytvořeno a použito makro pro software Microstation (autor: Ing. Petr Červený, ZÚ), které umožňovalo systematicky projít a vyhodnotit všechny nalezené indikace (obr. 102). [75]

Procházení indikátorů pro aktualizaci dat v APV

Uživatel:

Zadejte číslo ZM10 nebo padesátky, kterou zpracováváte (bez pomlček)

Vytvoř seznam indikátorů patřících do této ZM10/ZM50

Procházení indikátorů v seznamu

Zap/vyp vysvěcení atk. indikátoru

Vyber vyřešení situace označené indikátorem

vyřešeno

Poznámka

Zapsat variantu vyřešení a poznámku na server

Bližší údaje k řešení tohoto indikátoru

Obr. 102. Ukázka makra pro procházení indikací [75]

6.4.2 Vyhodnocení

Následující část obsahuje soubor 12 ukázek (obr. 103 až 138) indikací a jejich řešení v rámci zkušebního provozu aktualizace budov v ZABAGED®. Vyhodnocení indikací provedly topografičtí pracovníci z Oddělení sběru dat Praha, ZÚ.

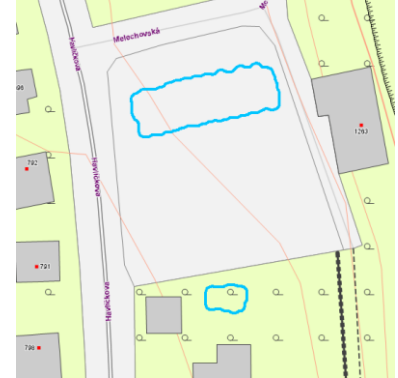
Ukázka č. 1. Nové budovy (správné indikace) [75]



Obr. 103. Ortofoto z roku 2010

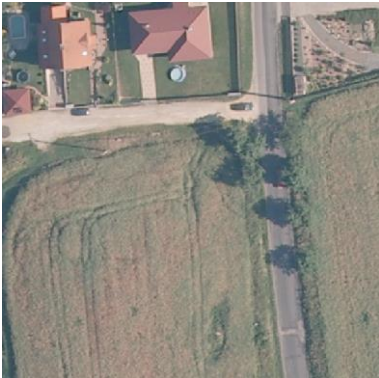


Obr. 104. Ortofoto z roku 2015 a indikace nových budov



Obr. 105. ZABAGED® a indikace nových budov

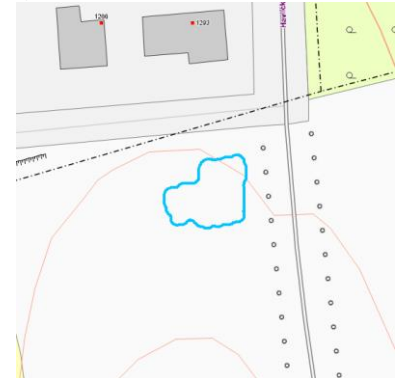
Ukázka č. 2. Nová budova (správná indikace) [75]



Obr. 106. Ortofoto z roku 2010



Obr. 107. Ortofoto z roku 2015 a indikace nové budovy



Obr. 108. ZABAGED® a indikace nové budovy

Ukázka č. 3. Nový přístřešek (správná indikace) [75]



Obr. 109. Ortofoto z roku 2010



Obr. 110. Ortofoto z roku 2015 a indikace nového přístřešku



Obr. 111. ZABAGED® a indikace nového přístřešku

Ukázka č. 4. Rozšíření přístřešku (správná indikace) a skládka materiálu („správná“ indikace) [75]



Obr. 112. Ortofoto z roku 2010



Obr. 113. Ortofoto z roku 2015 a indikace rozšíření přístřešku (vpravo) a skládky materiálu/odpadu (vlevo)



Obr. 114. ZABAGED® a indikace rozšíření přístřešku (vpravo) a skládky materiálu/odpadu (vlevo)

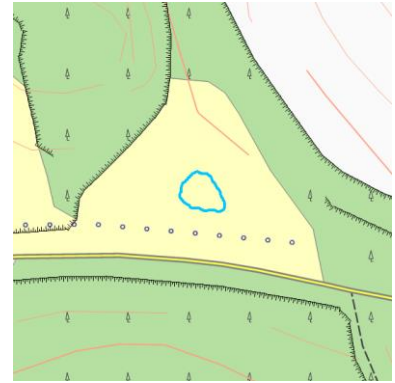
Ukázka č. 5. Skládka materiálu („správná“ indikace) [75]



Obr. 115. Ortofoto z roku 2010



Obr. 116. Ortofoto z roku 2015 a indikace skládky materiálu

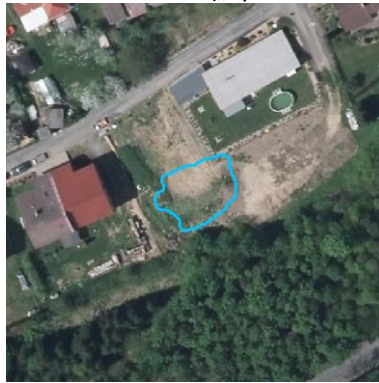


Obr. 117. ZABAGED® a indikace skládky materiálu

Ukázka č. 6. Změna terénu („správná“ indikace) [75]



Obr. 118. Ortofoto z roku 2010



Obr. 119. Ortofoto z roku 2015 a indikace změny terénu



Obr. 120. ZABAGED® a indikace změny terénu

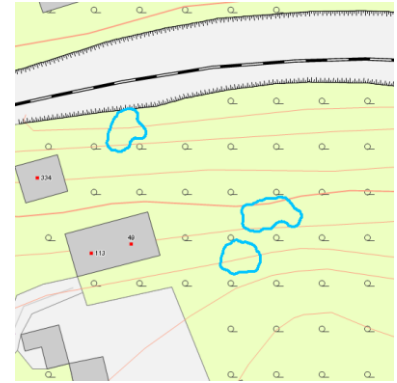
Ukázka č. 7. Nezelená vegetace (chybné indikace) [75]



Obr. 121. Ortofoto z roku 2010



Obr. 122. Ortofoto z roku 2015 a indikace nezelené vegetace

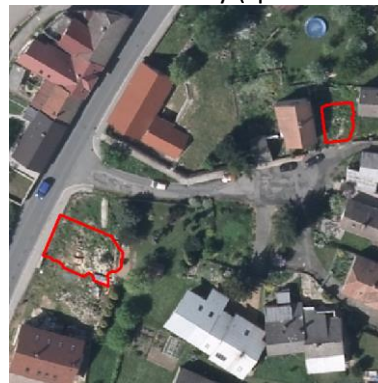


Obr. 123. ZABAGED® a indikace nezelené vegetace

Ukázka č. 8. Zbořené budovy (správné indikace) [75]



Obr. 124. Ortofoto z roku 2010



Obr. 125. Ortofoto z roku 2015 a indikace zbořené budovy



Obr. 126. ZABAGED® a indikace zbořené budovy

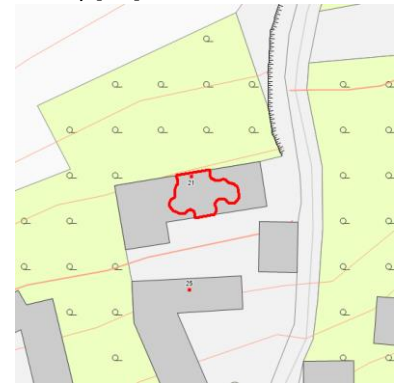
Ukázka č. 9. Ubouraná část budovy (správná indikace) [75]



Obr. 127. Ortofoto z roku 2010

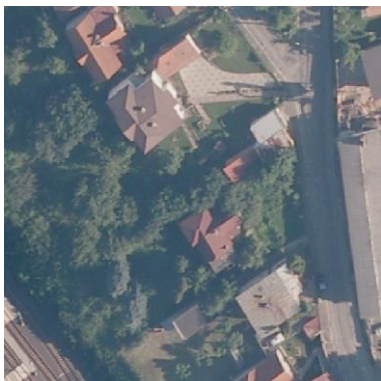


Obr. 128. Ortofoto z roku 2015 a indikace ubourané části budovy

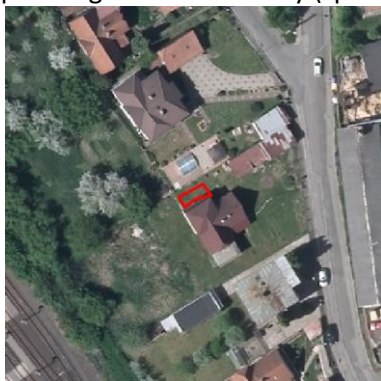


Obr. 129. ZABAGED® a indikace ubourané části budovy

Ukázka č. 10. Nepřesná geometrie budovy (správná indikace) [75]



Obr. 130. Ortofoto z roku 2010



Obr. 131. Ortofoto z roku 2015 a indikace nepřesné geometrie budovy



Obr. 132. ZABAGED® a indikace nepřesné geometrie budovy

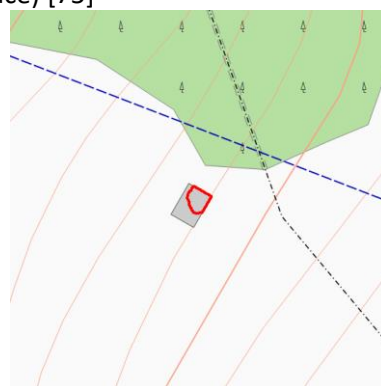
Ukázka č. 11. Terénní šetření (sporná indikace) [75]



Obr. 133. Ortofoto z roku 2010

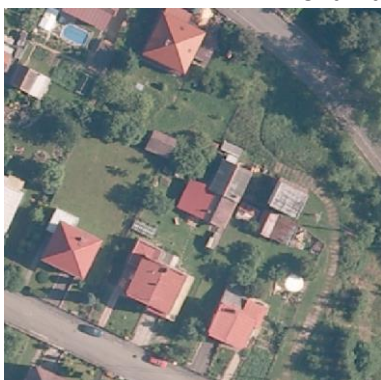


Obr. 134. Ortofoto z roku 2015 a indikace pro terénní šetření



Obr. 135. ZABAGED® a indikace pro terénní šetření

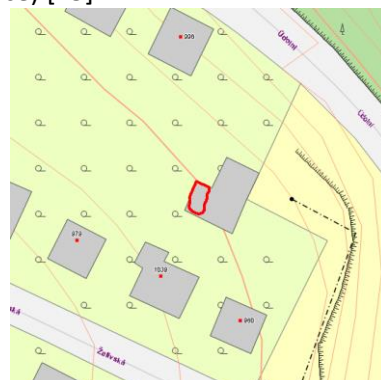
Ukázka č. 12. Falešná změna (chybná indikace) [75]



Obr. 136. Ortofoto z roku 2010



Obr. 137. Ortofoto z roku 2015 a indikace falešné změny



Obr. 138. ZABAGED® a indikace falešné změny

Správné indikace nových budov

Indikace nových budov odpovídaly zcela novým budovám o výměře $\geq 49 \text{ m}^2$ (ukázka č. 1 a 2), které ještě nebyly zaevidovány v KN či byly zaevidovány v KN avšak ještě neproběhla průběžná aktualizace budov v ZABAGED® s tímto stavem KN. Některé indikace se týkaly stavby nových přístřešků (ukázka č. 3) či pouze jejich rozšíření (ukázka č. 4). Tyto indikace dokládají, že metoda je vhodná pro sledování i velmi malých stavebních změn, které nemusí být vždy vedeny v KN. Indikace odpovídající skládkám materiálu (ukázka č. 4 a 5) nebo změně terénu (ukázka č. 6) byly rovněž zařazeny mezi správné indikace (označeny jako

„správné“), i když se přímo netýkaly budov. Jednalo se totiž o indikace změn, které se mohly promítnout do ZABAGED v jiné podobě (např. jako podklad pro změnu výškopisu, zavedení typu objektu Skládky atd.). Indikace tohoto typu jsou velmi variabilní. Mohou mít libovolný tvar, spektrální i texturální vlastnosti a nelze je tak automatizovaně odlišit od budov. Rozhodnutí, zda se jedná o budovu či jiný objekt a zda bude změna zapracována do ZABAGED® musí provést zpracovatel. [75]

Správné indikace zbořených budov

V případě zbořených budov byla plošná výměra indikací nastavena na $\geq 16 \text{ m}^2$. Vzhledem k takto nízké hodnotě minimální plochy indikace byly identifikovány nejen zcela zbořené budovy (ukázka č. 8) ale i menší změny budov, které odpovídaly pouze částečné demolici či zbourání přístaveb (ukázka č. 9). V případě zbořených budov bylo identifikováno velké množství indikací způsobených nepřesnou geometrií budov v ZABAGED® (ukázka č. 10). Ačkoliv samotná budova se nijak nezměnila, byla tato indikace zařazena mezi správné indikace, protože poukazovala na nepřesný zákres budovy v ZABAGED®. V ojedinělých případech byly zaznamenány také sporné indikace (ukázka č. 11). Jednalo se o indikace změn, které nebylo možno z dostupných podkladů jednoznačně vyhodnotit a o způsobu řešení bylo rozhodnuto až na základě terénního šetření. Tyto změny byly rovněž zařazeny mezi správné indikace, protože poukazují na možnou změnu v ZABAGED®. [75]

Chybné indikace

Během kontroly bylo zjištěno, že většina chybných indikací (u nových a zbořených budov) byla způsobena nepřesnostmi (chybami) v analyzovaných DMP resp. NDMP (ukázka č. 12) nebo nesprávnou identifikací vegetace z CIR ortofota ÚHÚL (ukázka č. 7). [75]

DMP byl vytvářen automaticky pomocí softwaru Match-T. Lokální chyby v DMP byly způsobeny nedostatečnou kresbou obrazu (absencí textury). Tyto chyby jsou pro obrazovou korelaci specifické. Zcela zamezit jim nelze a jejich redukce je možná pouze částečně, a to identifikací částí obrazu bez textury a jejich následným vyloučením ze zpracování či zvýšením kvality DMP. Odhalení míst s nedostatečnou kresbou, a tedy s možným výskytem chyb v DMP, je možné prostřednictvím objektového vyhodnocení s využitím texturálních vlastností a analýzy matice stupňů šedi (anglicky: Gray-Level Co-Occurrence Matrix, zkráceně: GLCM). Kvalita generovaného DMP závisí na kvalitě zdrojových LMS, zejména pak na textuře, ostrosti kresby v celé ploše snímku, správné expozici a míře šumu. Nejvýraznějšího zlepšení v kvalitě DMP lze dosáhnout samotnou změnou parametrů snímkování. Jedná se především o zvýšení prostorového rozlišení, a tím snížení průměrné pozemní vzdálenosti mezi středy pixelů (anglicky: ground sample distance, zkráceně: GSD), což vede k detailnějším LMS a tedy i možnosti generovat podrobnější DMP.

Chybné indikace z důvodu nesprávné identifikace vegetace byly často způsobeny stromy, které nebyly ve druhé epoše odfiltrovány pomocí NDVI masky. Tyto stromy v druhé epoše nabývaly záporných hodnot NDVI a byly tak maskovány jako nezelená vegetace. U vegetace k tomuto stavu může dojít výraznou ztrátou chlorofylu v zelených částech rostlin (strom je nemocný, usychá nebo zcela uschl) či v květenství, kdy květy zakrývají zelené části rostlin (typicky listy). Metoda pak v 2. epoše tyto stromy vyhodnotila jako budovy. Některé chybné indikace zbořených budov byly pro změnu způsobeny pokácenými stromy, které byly v 1. epoše vyhodnoceny jako budovy, protože měly negativní NDVI index. Obdobně jako v předchozím případě se jednalo o stromy nemocné či již uhynulé, které byly pokáceny.

V tomto případě není použití NDVI masky dostačující. Pro odfiltrování těchto chybných změn je nutné použít objektové vyhodnocení s využitím kontextuálních a texturálních příznaků.

Výsledky

Výsledky kategorizace indikací jsou uvedeny v následujících tabulkách 13 a 14. Celkový počet indikací byl velmi malý, což bylo způsobeno prováděním průběžné aktualizace budov v ZABAGED® s využitím informací z KN v období mezi roky 2010 až 2015 (min. 10krát). Při provádění průběžné aktualizace budov tak byla většina nové výstavby již zapracována do ZABAGED®. [75]

Tab. 13. Indikace nových budov [75]

typ indikace	ZM231205	ZM231211	ZM231222	ZM231224	ZM231225
správná	16	3	5	2	8
„správná“	17	2	9	4	2
sporná	1	2	0	0	0
chybná	15	10	21	17	12
celkem	49	17	35	23	22
úspěšnost	69,4 %	41,2 %	40,0 %	26,1 %	45,5 %
průměr = 44,4 %, medián = 41,2 %					

Tab. 14. Indikace zbořených budov [75]

typ indikace	ZM231205	ZM231211	ZM231222	ZM231224	ZM231225
správná	11	12	6	7	7
„správná“	6	0	2	0	0
sporná	1	0	0	0	0
chybná	22	18	11	8	9
celkem	40	30	19	15	16
úspěšnost	45,0 %	40,0 %	42,1 %	46,7 %	43,8 %
průměr = 43,5 %, medián = 43,8 %					

Během zkušebního provozu bylo zjištěno, že použitá metoda by mohla být dále upravena a vylepšena použitím dalších typů objektů ZABAGED® pro odfiltrování chybných indikací. Jedná se o typy objektů Liniová vegetace (EC035) a Cesta (AP010). V případě typu objektu Liniová vegetace se jedná o objekt, u kterého se nahrazení stavbou neočekává, protože stromořadí zpravidla lemují komunikace a vodní toky velmi těsně. V případě typu objektu Cesta se jedná o doplnění dalších typů objektů definujících dopravní síť. [75]

Závěr

Na základě porovnání výsledků z podkapitoly 6.3 a zkušebního provozu v roce 2016 je patrné, jak významně se na výsledcích podílí způsob vyhodnocení. Výsledky z podkapitoly 6.3 byly získány na základě vyhodnocení LMS z let 2012 a 2014 a odpovídají situaci, kdy jsou indikace použity jako jediný podklad pro aktualizaci budov v databázi. Dokládají tak plný potenciál vytvořené metody. V roce 2016 byl zkušební provoz proveden na základě vyhodnocení LMS z let 2010 a 2015 a tedy celkové množství indikací mělo být značné, protože se jedná o delší časové období. Úspěšnost detekce nových a zbořených budov měla být podobná, protože byla použita stejná metoda (pouze bez masky stínů). Princip aktualizace budov (podkapitola 6.1) využívá periodicky dostupná letecká data jako jediný podklad (zdroj informací) pro identifikaci změn. Databáze ZABAGED® je však několikrát do roka aktualizována na základě dat ISKN, prostřednictvím tzv. průběžné aktualizace budov. Mezi roky 2010 a 2015 proběhlo několik aktualizací budov v ZABAGED®, během kterých byly

zpracovány budovy nově zapsané do ISKN. Ve zkušebním provozu v roce 2016 tak byla metoda („zcela nevhodně“) testována na již aktualizovaných datech ZABAGED®, díky čemuž bylo dosaženo přibližně poloviční úspěšnosti a téměř vyrovnaného poměru správných a chybných indikací v porovnání s výsledky z podkapitoly 6.3. Průměrná úspěšnost detekce nových budov byla 44,4 % a zbořených budov 43,5 %. I přes opakovaně aktualizovaný stav budov v ZABAGED®, metoda identifikovala dosud nevidované změny budov. Z tohoto zjištění lze odvodit, že průběžná aktualizace budov s využitím dat ISKN má své výhody (libovolná periodičita, přesná geometrie budov), ale také nevýhody (často malý zájem vlastníků o správnost dat v ISKN, komplikace při konfrontaci aktuálních dat ISKN a neaktuálního ortofota). Indikace identifikovaly nové a zbořené budovy na zájmovém území a byly použity pro výběr území pro provedení terénního šetření, což přispělo ke zefektivnění topografických prací. Zkušební provoz poukázal také na to, že indikace mohou být využity pro validaci přesnosti zákresu budov v ZABAGED®. V rámci zkušebního provozu se jednalo o ověření existence budovy (NDMP ≥ 2 m) v celé její ploše. Ověření existence budovy může být také označeno jako zjednodušená detekce zbořených budov. Tato validace může být využita i pro zpřesněné SO ZABAGED®. V rámci zpřesněný SO ZABAGED® začaly být evidovány i velmi malé stavební objekty, které často nejsou obsahem katastrální mapy. Kresbu těchto staveb tak z principu nelze aktualizovat jinak než pomocí leteckých dat. [75]

Na základě zkušebního provozu bylo zjištěno, že metoda umožňuje zcela nezávislou kontrolu evidence budov v ZABAGED® a i přes nižší úspěšnost vede k aktualizaci budov a tím zkvalitnění obsahu ZABAGED®. Toto zjištění vedlo k rozhodnutí, že metoda bude použita pro tvorbu podkladových dat o možných změnách budov a proces vyhodnocení těchto podkladových dat bude implementován do činností plošné aktualizace ZABAGED®.

Před trvalým nasazením této metody však musel být vyřešen problém týkající se rychlosti tvorby DMP. Pro tvorbu DMP metodou obrazové korelace LMS je zapotřebí specializovaný software. ZÚ disponuje pouze jednou licencí softwaru MATCH-T DSM od společnosti Inpho, resp. Trimble, který umožňuje tvorbu DMP z LMS. Tento software je využíván pro lokální aktualizace DMR 5G a následně i DMR 4G. Ve zkušebním provozu bylo zjištěno, že při 1 licenci softwaru MATCH-T a požadované vysoké kvalitě výsledného DMP je rychlost tvorby mračna bodů velice nízká (cca 6 minut pro jednu snímkovou dvojici). Tvorba celorepublikového DMP by tak teoreticky trvala 200 kalendářních dní čistého strojového času. Toto zjištění vedlo k rozhodnutí, že ZÚ z kapacitních důvodů nebude vlastními prostředky vytvářet DMP pomocí metody obrazové korelace pro celé území ČR, ale bude tato data přebírat od ÚHÚL. Změna DMP je podrobně popsána v následující podkapitole 6.5. [75, 81]

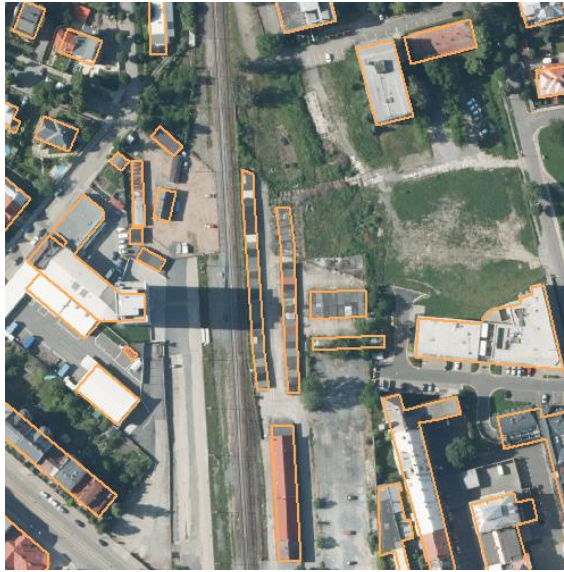
6.5 Reálný provoz od roku 2017

Od roku 2017 byl proces vyhodnocení indikací, které označují možné změny, které dosud nejsou vedeny v datech ZABAGED® označen jako tzv. výběrová aktualizace. Výběrová aktualizace se stala dalším způsobem aktualizace dat ZABAGED® krom standardně prováděné plošné a průběžné aktualizace. Výběrová aktualizace budov je zaměřena na vyhodnocení indikací změn budov a realizuje se pouze v místě indikací a jejich bezprostředním okolí. Tvary indikací jsou spíše orientační a nemusejí vždy zcela odpovídat skutečným změnám budov, je proto nutné kontrolovat i bezprostřední okolí indikací, resp. celé budovy, které indikace označují. Při této aktualizaci nedochází ke kontrole území celých mapových listů jako např. v případě plošné aktualizace, ale pouze ke kontrole konkrétních budov, u kterých byla identifikována možná změna. Z tohoto pohledu je výběrová aktualizace budov podobná průběžné aktualizaci budov, která je založena na analýze rozdílů v datech ISKN. Výběrová aktualizace budov je založena na analýze rezortních leteckých dat a jedná se tak o nezávislý a doplňující způsob aktualizace budov. [82]

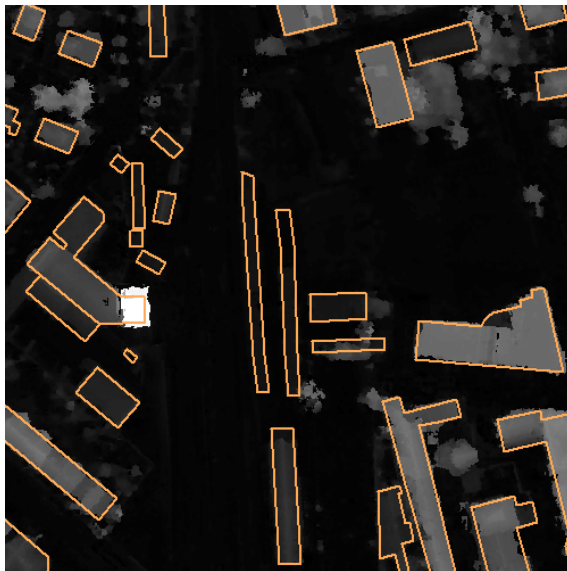
6.5.1 Výběrová aktualizace

V roce 2017 byl proveden pilotní provoz výběrové aktualizace budov ZABAGED® s využitím NDMP od Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL). ÚHÚL pravidelně vytváří NDMP pokrývající celé území ČR pro potřeby projektu Národní inventarizace lesů (NIL). NDMP je vytvářen z LMS a DMR 4G ZÚ na základě smlouvy o vzájemném poskytování dat. LMS ZÚ jsou pořizovány zpravidla od května do konce léta, a tak zachycují lesy ve vegetačním období. LMS jsou předávány ÚHÚL vždy do konce roku, ve kterém proběhlo snímkování. ÚHÚL pak vytváří NDMP zpravidla do 6 měsíců po předání LMS ze strany ZÚ. Do roku 2017 byl pro tvorbu DMP metodou obrazové korelace využíván software PhoTopoL Corr. Generování mračen bodů probíhalo po stereodvojicích. To znamená, že pro každou snímkovou dvojici se vygenerovalo mračno bodů, které mělo rozsah vzájemného překrytu snímkové dvojice. Vygenerovaná mračna bodů pak byla normalizována s využitím DMR 4G (z absolutní nadmořské výšky na relativní výšku vůči terénu) a následně mozaikována do bezešvé podoby podobně jako ortofoto, čímž vzniknul bezešvý NDMP. [83]

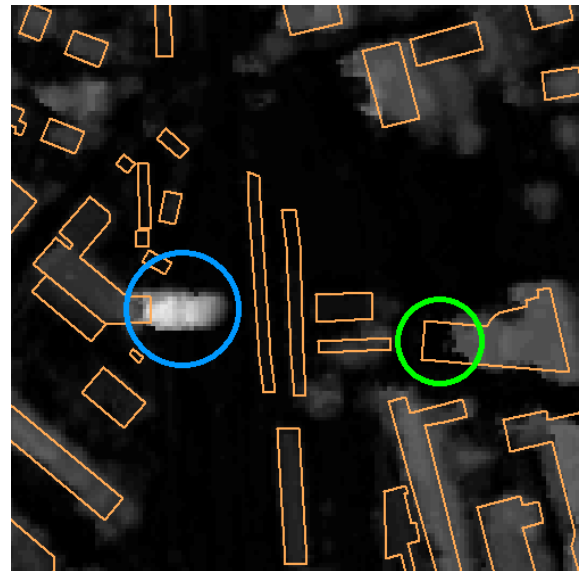
Za účelem posouzení kvality a vhodnosti použití NDMP ÚHÚL jako výchozího podkladu pro metodu detekce změn budov (podkapitola 6.2) bylo provedeno jeho porovnání s NDMP ZÚ. Z přímého porovnání dat (obr. 139 až 141) bylo zjištěno, že NDMP ÚHÚL má nižší kvalitu, a to nejen z důvodu menšího prostorového rozlišení (NDMP ÚHÚL: 2 m/pixel, NDMP ZÚ: 0,5 m/pixel). Nižší kvalita se projevila především absencí náhlých změn výšky na okrajích budov (mezi budovami a okolím je plynulý přechod výšky) a také v podobě většího výskytu chyb (nahodnocení nebo podhodnocení výšky). Některé tyto chyby (např. nahodnocení na obr. 141) vznikly způsobem tvorby NDMP. ÚHÚL vytvořil NDMP z normalizovaného mračna bodů, které bylo triangulováno (tvorba TIN) a rasterizováno. Tímto způsobem došlo v oblastech bez známé výškové informace (typicky ve stínech) k interpolaci výškových hodnot z okolních známých hodnot (např. hrany střechy a výšky okolního terénu). Budovy v takovém případě mohly ztratit rozeznatelný skokový přechod výšky mezi hranou střechy a přilehlým terénem. Kvalita NDMP ÚHÚL byla dostatečná pro určení výšky souvislé vegetace v podobě lesa (pro potřeby NIL), ale pro lokalizaci solitérních objektů v podobě budov či dokonce jejich částí nebyla vhodná. Jakékoliv nepřesnosti ve vstupních datech totiž zpravidla vedou ke vzniku chybných indikací. Z těchto důvodů byl NDMP ÚHÚL využit jako podklad pro zjednodušenou detekci zbořených budov, která je podrobně popsána dále v textu. [83, 84]



Obr. 139. Ortofoto ČR z roku 2015 (0,25 m/pixel) a budovy ZABAGED® [84]



Obr. 140. NDMP ZÚ z roku 2015 (0,5 m/pixel) a budovy ZABAGED® [84]



Obr. 141. NDMP ÚHÚL z roku 2015 (2 m/pixel), budovy ZABAGED® a chyby v podobě nadhodnocené (modře) a podhodnocené (zeleně) výšky [84]

Indikace zbořených budov byly získány zcela automaticky na základě analýzy NDMP ÚHÚL z roku 2015 a obrysů budov z 2. 5. 2017. Analýza probíhala po listech SM5 a spočívala v identifikaci částí budov, které měly relativní výšku nižší než 2 m (tzn. nedosahovaly výšky ani jednoho podlaží). Pixely s touto výškou byly převedeny do vektorové podoby, čímž vznikly tzv. indikace. Indikace byly dále shlukovány a filtrovány dle definovaných pravidel min. šířky, plochy a poměru vůči ploše budovy. [82]

Souhrn pravidel použitých pro filtraci indikací zbořených budov [82]:

1. minimální šířka indikace je 3 m v jakémkoliv směru
2. minimální plocha indikace je 16 m²
3. indikace s plochou ≥ 150 m² (bez ohledu na velikost budovy)
4. budova s plochou < 50 m²: plocha indikace/í je ≥ 90 % plochy budovy
5. budova s plochou ≥ 50 m²: plocha indikace/í je ≥ 50 % plochy budovy

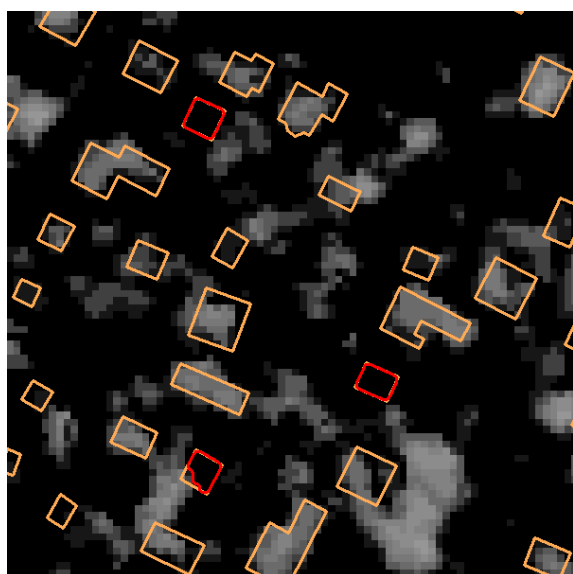
Z důvodu časové nejednotnosti analyzovaných dat, mezi kterými byl rozdíl 2 roky, bylo do metody zapracováno využití nereferenčních údajů vedených v RÚIAN. Konkrétně se jednalo o odfiltrování indikací zbořených budov, které odpovídaly stavebním objektům s datem dokončení 2015 a novějším. Ukázka využití NDMP ÚHÚL pro zjednodušenou detekci zbořených budov je na obrázcích 142 až 145. [82]



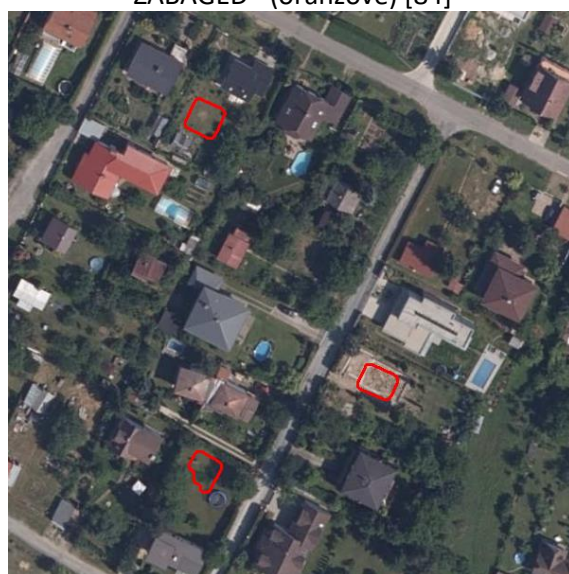
Obr. 142. ZABAGED® [84]



Obr. 143. Ortofoto ČR a budovy ZABAGED® (oranžově) [84]



Obr. 144. NDMP ÚHÚL, budovy ZABAGED® (oranžově) a indikace zbořených budov (červeně) [84]



Obr. 145. Ortofoto ČR a indikace zbořených budov (červeně) [84]

Pro provedení výběrové aktualizace budov v roce 2017 byla vybrána dvě oddělení sběru dat: České Budějovice a Plzeň. Zájmové území odpovídalo rozsahu plošné aktualizace konkrétních oddělení pro rok 2017, aby bylo omezeno pouze na mapové listy, kde ještě nezačala plošná aktualizace. Následující tabulka 15 uvádí počet mapových listů ZM50 (plochu) a indikací zbořených budov pro jednotlivá oddělení sběru dat v rámci výběrové aktualizace v roce 2017. [82]

Tab. 15. Výběrová aktualizace v roce 2017 [82]

Oddělení sběru dat	Počet mapových listů ZM50	Počet indikací zbořených budov
České Budějovice	3	1121
Plzeň	3	403

Cílem výběrové aktualizace budov bylo prověřit všechny indikace zbořených budov a přiřadit jim odpovídající variantu řešení dle konkrétního způsobu aktualizace ZABAGED®. Pro procházení indikací bylo použito makro pro Microstation, které umožňovalo systematicky projít a vyhodnotit všechny indikace. Zpracovatel provedl vizuální kontrolu indikací vůči ortofotu a ZABAGED®. V případě zjištění nesouladu kresby budovy ZABAGED® s realitou, provedl aktualizaci ZABAGED® a následně vybral jednu z variant řešení (provedl kategorizaci) dané indikace. Varianty řešení s vysvětlením jsou uvedeny v tabulce 16. [82]

Tab. 16. Varianty řešení [82]

Varianta řešení	Popis
správná indikace	indikace vedoucí ke změně ZABAGED®
chybná indikace	indikace, která nevede ke změně ZABAGED®
nejistá indikace	indikace, kterou nelze dle podkladových dat vyhodnotit (určena pro šetření v terénu)

6.5.2 Vyhodnocení

Tab. 17. Vyhodnocení indikací zbořených budov v roce 2017 [82]

Celkem	Správné indikace	Chybné indikace	Nejisté indikace
1524	59.6 %	37.7 %	2.7 %

Výsledky vyhodnocení se nacházejí v tabulce 17. Z celkového počtu 1524 indikací bylo vyhodnoceno 59.6 % jako správných. Správné indikace poukazují na budovy ZABAGED®, jejichž kresba není v souladu se skutečností nebo již neexistují a musí se z databáze smazat. Nejisté indikace označují potenciálně zbořené nebo ubourané budovy, jejichž existenci či přesný tvar nelze s jistotou vyhodnotit nad ortofotem. O jejich existenci a úpravě kresby je rozhodnuto až na základě terénního šetření v rámci plošné aktualizace. V průměru se jedná pouze o 7 budov na jeden list ZM 50 (2.7 % z celkových 1524 indikací), tedy množství, které terénní práce nijak výrazně nezpomaluje. Chybných indikací bylo přibližně 38 %, což lze vzhledem ke kvalitě použitého NDMP od ÚHÚL (rastr s rozlišením 2 m/pixel) považovat za dobrý výsledek.

6.5.3 Provoz od roku 2018

Tvorba DMP ÚHÚL prošla v roce 2018 výrazným zlepšením, které bylo způsobeno přechodem ze softwaru PhoTopoL Corr na software ERDAS. ÚHÚL se tím podařilo dosáhnout mnohem vyšší kvality vytvářeného DMP a optimalizovat generování mračen bodů díky distribuovanému zpracování na více počítačích, což umožňuje jimi vlastněná licence softwaru ERDAS. Vyšší kvalita NDMP vedla ke snížení množství chybných indikací zbořených budov. Vylepšená kvalita NDMP však stále není dostačující pro spolehlivou detekci nových budov. Výběrová aktualizace budov (detekce zbořených budov) tedy stále probíhá ve své zjednodušené podobě z roku 2017. I přes zjednodušenou podobu má výběrová aktualizace budov přínos pro aktualizaci budov ZABAGED®. V roce 2018 bylo touto metodou odhaleno 3576 zbořených budov. [86]

7 Tvorba 3D modelů budov

3D modely budov mohou být využity pro různé účely. Hlavními oblastmi využití jsou virtuální modely měst (vizualizace, územní plánování), inteligentní navigace (rozšířená realita), monitorování životního prostředí (šíření hluku ze silniční dopravy, znečištění ovzduší), speciální aplikace (modelování šíření elektromagnetických vln pro telekomunikační sítě) a v neposlední řadě také analýza přírodních katastrof (přesné povodňové mapy). 3D modely budov tak mohou najít uplatnění pro široké spektrum oborů. [11, 87]

Nejčastější formou prostorových dat pro tvorbu 3D modelů budov jsou mračna bodů. Mračna bodů mohou být získána aktivními senzory (typicky laserovými skenery), nebo lze vygenerovat technikou obrazové korelace za využití družicových nebo leteckých snímků. Obě techniky představují moderní a progresivní metody neselektivního sběru prostorových dat. Mračna bodů reprezentují geometrii povrchu snímaného objektu prostřednictvím homogenně distribuovaných prostorových bodů stejné kvality. Bohužel, vyjádření budov mračnem bodů není pro mnoho aplikací příliš vhodné. Manipulace s hustým bodovým mračnem (desítky bodů na metr čtvereční) pokrývajícím velké území je značně obtížná a velmi hardwarově náročná. Pro úkoly regionálního či národního rozsahu je tedy vhodná generalizace mračna bodů do jednodušší vektorové podoby. [11, 88]

Databáze 3D modelů budov na národní úrovni jsou stále zcela výjimečné. Jejich vytvoření je totiž podmíněno dostupností prostorových dat vysoké kvality (přesný 2D zakres budov, hustá mračna bodů). První aplikace jsou ve vyspělých evropských zemích (např. v Nizozemsku [89]). ČR by se v blízké době mohla také přidat k těmto zemím, protože bude mít k dispozici potřebná prostorová data (kapitola 2 a 4). Tvorba 3D modelů budov by měla respektovat směrnici INSPIRE, k jejíž implementaci se zavázaly členské státy Evropské unie. Další část této kapitoly je tedy věnována části směrnice INSPIRE, která se týká budov. [11]

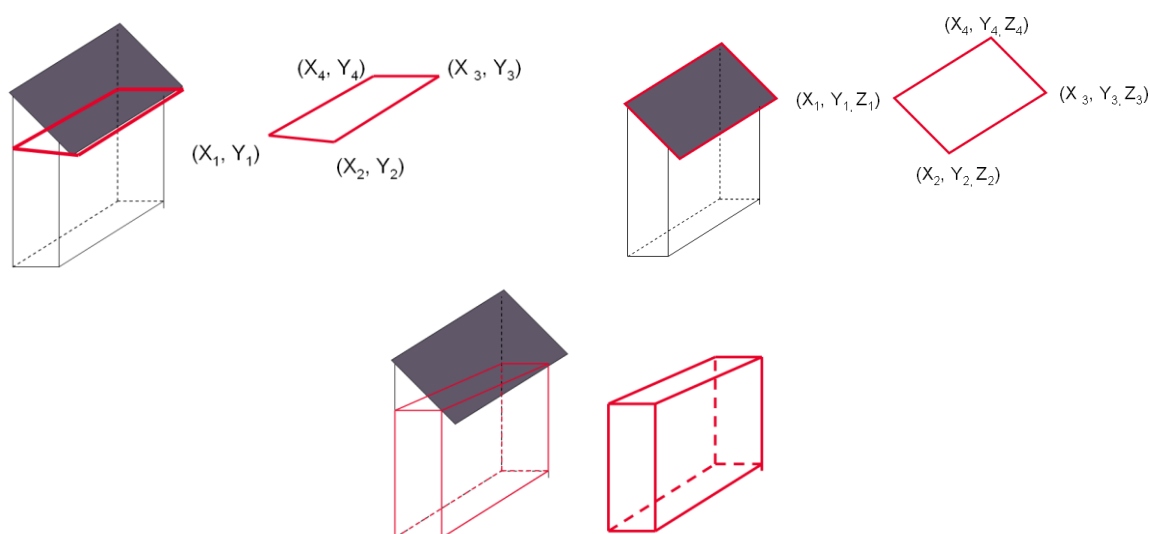
7.1 Směrnice INSPIRE

Tato podkapitola vychází z dokumentů [23, 27, 29, 90]. Problémy týkající se poskytování, dostupnosti, kvality, organizace a sdílení prostorových dat jsou celosvětovým problémem. V rámci Evropské unie vznikla 14. 3. 2007 směrnice 2007/2/EC Infrastructure for Spatial Information in Europe (dále již jen INSPIRE). INSPIRE má za cíl zpřístupnit uživatelům prostorová data skrze internet a sjednotit (harmonizovat) jejich podobu tak, aby bylo možno kombinovat data různých členských států EU dohromady. Směrnice INSPIRE se tedy podrobně zabývá prostorovými daty, metadaty, interoperabilitou prostorových datasetů, síťovými službami, službami pro sdílení, monitorování a reportování. INSPIRE nevyžaduje sběr nových dat, nicméně členské země musí být v budoucnu schopny poskytnout svá prostorová data v souladu s touto směrnicí. [11, 27, 90]

INSPIRE obsahuje v technických pokynech přílohy III datovou specifikaci pro prostorová data na téma budovy (v angličtině: INSPIRE Data Specification on Buildings – Technical Guidelines). Aktuální dokument [90] je verze 3.0 a pochází z 10. 12. 2013. Veškeré informace a technické pokyny jsou volně dostupné na internetových stránkách INSPIRE [91]. [11, 27]

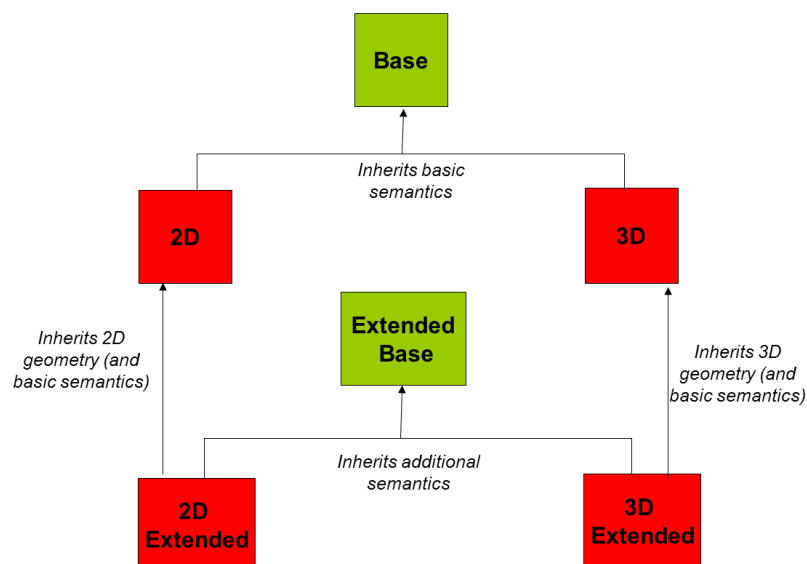
Dle INSPIRE jsou prostorová data budov definována pomocí tzv. aplikačních schémat. Základní aplikační schéma (BuildingsBase) obsahuje obecný abstraktní popis budov. Toto aplikační schéma je společné pro odvozená aplikační schémata, která popisují geometrickou

reprezentaci budov ve 2D/2.5D (Buildings2D) nebo ve 3D (Buildings3D) dle specifik CityGML. Ukázky jednotlivých geometrických reprezentací jsou na obrázku 146. [11, 27, 90]



Obr. 146. Budova reprezentovaná 2D daty (nahore vlevo), 2.5D daty (nahore vpravo) a 3D daty (dole uprostřed) [90]

Kromě zmíněných základních aplikačních schémat je také možno použít jejich rozšířené verze (BuildingsExtendedBase, BuildingsExtended2D, BuildingsExtended3D), které obsahují mnoho dalších údajů. Specifikace dat budov tedy obsahuje celkem 6 aplikačních schémat. Následující obrázek 147 dokumentuje vztahy mezi základními a rozšířenými aplikačními schématy. [11, 27, 90]



Obr. 147. Schéma závislostí mezi základními a rozšířenými aplikačními schématy [90]

Poskytování dat budov pak může být provedeno 4 způsoby (tzv. profily), které obsahují různé kombinace aplikačních schémat. Přehled profilů s kombinacemi schémat je v tabulce 18. [90]

Tab. 18. Profily pro téma budovy [90]

Profil	Aplikační schémata	
	Základní	Rozšířená
Core 2D profile	BuildingsBase, Buildings2D	
Core 3D profile	BuildingsBase, Buildings3D	
Extended 2D profile	BuildingsBase, Buildings2D	BuildingsExtendedBase, BuildingsExtended2D
Extended 3D profile	BuildingsBase, Buildings3D	BuildingsExtendedBase, BuildingsExtended3D

Podle INSPIRE je budova konstrukce nad a/nebo pod povrchem, která je určena nebo používána jako úkryt pro lidi, zvířata, věci, k výrobě zboží nebo poskytování služeb a která má charakter trvalé struktury. [11, 27, 90]

Poznámka

Tato definice je velice obecná a ve své podstatě správná. Neshoduje se však s definicí budov, které jsou vedeny v katastru nemovitostí. „Podle zákona č. 256/2013 Sb., o katastru nemovitostí (katastrální zákon) se budovou rozumí nadzemní stavba spojená se zemí pevným základem, která je prostorově soustředěna a navenek převážně uzavřena obvodovými stěnami a střešní konstrukcí (§ 2 písm. l).“ [151]

Priority v evidenci budov a konstrukcí dle INSPIRE jsou uvedeny níže. [11, 27, 90]

I. Priorita (očekávaný obsah)

- 1) Tradiční budovy – budovy sloužící lidem k bydlení, pro průmyslové účely, komerční účely a služby, s rozlohou 15-20 m² a větší (např. rodinné domy, bytové domy, průmyslové objekty, obchody atd.)
- 2) Specifické (významné) budovy – budovy s velkou rozlohou či výškou, atypické budovy, které mohou sloužit jako orientační body (věže, stadiony, kostely atd.)

II. Priorita (doporučený obsah)

- 3) Netradiční budovy – budovy, které pouze částečně splňují definici budovy (podzemní úkryty, stanice, parkoviště, mobilní domy, chaty atd.)
- 4) Doplňkové stavby – budovy s malou rozlohou okolo 10 m², které jsou užívány pouze ve spojení s jinými většími budovami (garáže, zahradní domky atd.)
- 5) Jiné konstrukce – zdi, lávky, komíny, protihlukové stěny atd.

III. Priorita (možný obsah)

- 6) Jiné budovy a konstrukce – velmi malé objekty o rozloze několika m² (telefonní budky, autobusové zastávky atd.)

Na národní úrovni jednotlivých zemí existuje většinou několik databází, které obsahují informace o budovách. Nejčastější je evidence v podobě topografického zobrazení budov v měřítku okolo 1:10 000 (v ČR např. Základní báze geografických dat České republiky) a katastrální mapa v měřítku 1:2 000 nebo větším. Dále existují v mnoha zemích statistické informace vztahující se k budovám (v ČR tyto informace spravuje Český statistický úřad). Pouze některé země či dokonce jenom konkrétní oblasti mají trojrozměrné prostorové informace o budovách. Lokální databáze pro specifické účely (např. pro leteckou dopravu, lodní dopravu, evidenci historických budov atd.) obsahují většinou velké množství kvalitních a aktuálních informací. Bohužel, v těchto databázích je vedeno většinou velmi omezené množství budov a nelze tak jejich informační potenciál využít na národních úrovních. [11, 27]

Část směrnice INSPIRE týkající se budov byla vytvořena jako dokument, který navazuje na již existující dokumenty a směrnice, které se taktéž týkají budov (ať již okrajově), jako

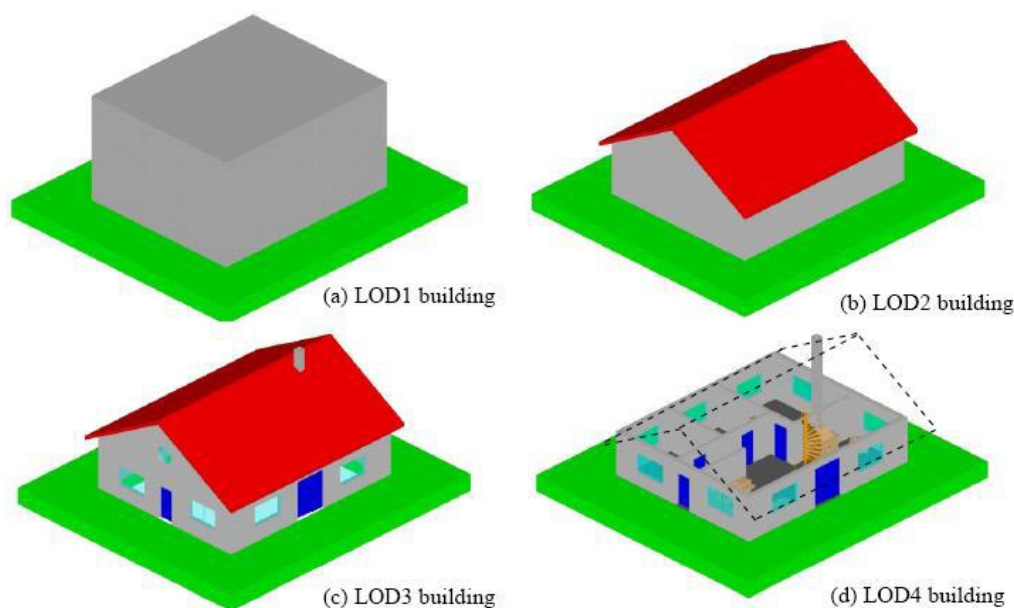
např. směrnice pro hluk, kvalitu ovzduší, energetickou náročnost budov, statistická sčítání, povodně či ochranu půdy. [11, 27, 90]

Dle INSPIRE mezi hlavní existující normy a standardy týkající se budov patří [11, 27, 90]:

- a) Slovníky, definice, terminologie
 - ISO6707 - Building and Civil Engineering
 - DFDD (Digital Feature Data Dictionary) - DGIWG (Digital Geospatial Information Working Group)
 - CLGE (Council of European Geodetic Surveyors)
- b) Klasifikační metody
 - Eurostat - hierarchická klasifikace druhů staveb podle účelu
- c) Datové modely
 - ISO 19152 - Geographic information - Land Administration Domain Model (LADM)
 - CityGML - standard Open Geospatial Consortium (OGC) pro reprezentaci 3D modelů měst a budov

Datový model CityGML byl v drobné obměně přijat jako součást směrnice INSPIRE pro prezentaci 3D modelů budov. CityGML nabízí různé úrovně detailu (v angličtině: Level of Details, zkráceně: LoD) pro reprezentaci prostorových modelů budov [11, 27, 90]:

- LoD0 – budova je reprezentována jako 3D plocha, nejedná se o prostorový model (2.5D data, obr. 146)
- LoD1 – budova je reprezentována jako blokový/krabicový model (budova s plochou střechou – LoD1, obr. 148)
- LoD2 – budova je reprezentována jako prostorový model se svislými stěnami a skutečným tvarem střechy, který je generalizován do podoby několika typů střešních plášťů (budova se sedlovou střechou – LoD2, obr. 148)
- LoD3 – budova je reprezentována jako prostorový model s věrným a přesným vyjádřením exteriéru, tedy včetně oken, dveří, balkonů, komínů atd., je také možno pokrýt model budovy texturou, která vyjadřuje podobu fasády. (budova se sedlovou střechou včetně oken a dveří – LoD3, obr. 148)
- LoD4 – budova je reprezentována jako prostorový model, který je exteriérově identický s LoD3, LoD4 však obsahuje i detailní model interiéru včetně veškerého příslušenství (LoD4, obr. 148)



Obr. 148. 3D modely budov v LoD1 až LoD4 (LoD0 není vyobrazen) [90]

Na základě požadavků, existujících norem a analýzy obecně dostupných dat v jednotlivých členských zemích Evropské unie byl stanoven tzv. základní a rozšířený profil popisující budovy. Základní profil určuje informace o budovách, u kterých je vyžadována harmonizace v rámci Evropské unie (zeleně na obr. 149). Rozšířený profil určuje informace, které by se měly nebo mohly harmonizovat na národních úrovních (růžově na obr. 149). [11, 27, 90]

	Harmonisation relevant at European level			Harmonisation relevant at national/local level	
	INSPIRE Directive/GCM	International use cases	European Directives/initiatives	European Directives/initiatives	Local use cases
Widely available		Building/BuildingPart		OtherConstruction	Installation
	inspireId	heightAboveGround	numberOfFloors	constructionNature	installationNature
	beginLifespanVersion	elevation	currentUse		BuildingUnit
	endLifespanVersion		dateOfConstruction	Association to CP	officialArea
	externalReference		dateOfRenovation		officialValue
			conditionOfConstruction		address
			dateOfDemolition		
		buildingNature	numberOfDwellings		connectionToGas
			numberOfBuildingUnits		connectionToWater
					connectionToSewage
Rarely available			heightBelowGround		connectionToElectricity
			numberOfFloorsBelowGround		
			materialOfStructure		document
			materialOfRoof	Wall - Roof - Ground	floorDescription
			materialOfFacade	Opening	Room
			roofType		Texture
			heatingSource/System		
			energyPerformance		

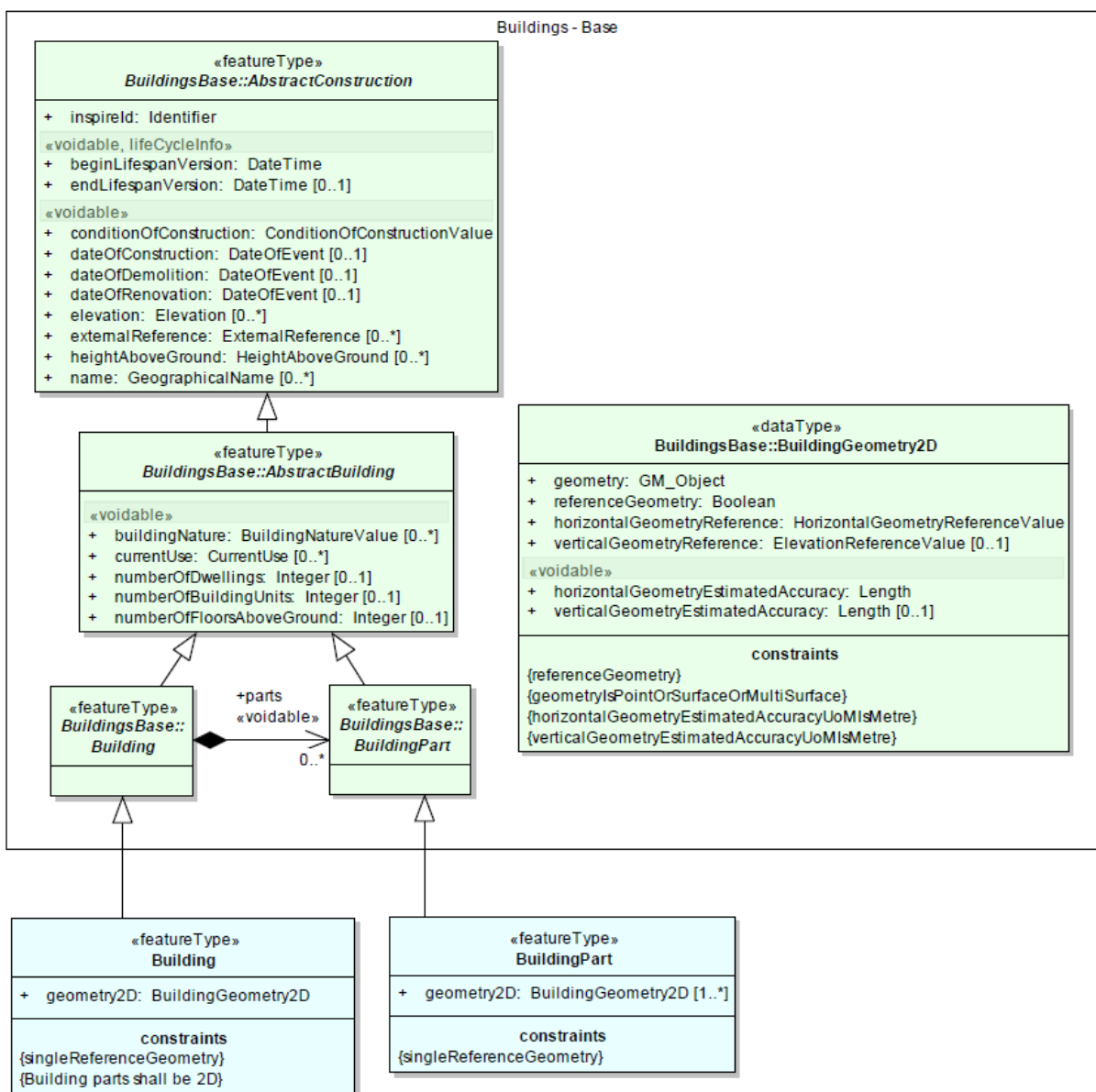
Obr. 149. Rozdělení informací o budovách z hlediska harmonizace a dostupnosti [90]

Poznámka k obr. 149

Následuje výčet informací o budovách v tzv. základním profilu. Anglický název je doplněn českým překladem příp. popisem. V závorce je uvedena zkratka možného správce dat nebo přímo zdroje dat pro Českou republiku. [11, 27, 90]

inspireId – jednoznačný identifikátor
beginLifespanVersion – datum vzniku/změny prostorového objektu
endLifespanVersion – datum zániku prostorového objektu
externalReference – odkaz na externí informační systém (KN)
name – jméno stavby (Geonames)
Building/BuildingPart – budova/část budovy (KN, ZABAGED®)
heightAboveGround – výška budovy nad zemí (DMP 1G)
elevation – kóta/výška budovy (DMR 4G, DMR 5G)
buildingNature – typ budovy (ZABAGED®)
numberOfFloors – počet podlaží (ČSÚ)
currentUse – účel budovy (KN, ZABAGED®)
dateOfConstruction – datum výstavby (KN)
dateOfRenovation – datum poslední velké rekonstrukce (SÚ)
conditionOfConstruction – stav stavby (SÚ)
dateOfDemolition – datum demolice (SÚ)
numberOfDwellings – počet obydlí (ČSÚ)
numberOfBuildingUnits – počet bytových jednotek (KN, ČSÚ)

Na následujícím obrázku 150 je aplikační schéma budov ve 2D (Buildings2D). Zelené rámce představují základní atributový popis (BuildingsBase) a modré rámce geometrický popis (Buildings2D). Toto schéma je součástí základního 2D profilu (Core 2D profile), který představuje typickou podobu prostorových dat budov publikovaných podle směrnice INSPIRE. Následující text pak stručně popisuje dvě z evidovaných vlastností o budovách (*elevation* – výšku, *heightAboveGround* – výšku nad zemí), které jsou součástí základního aplikačního schématu. [11, 27, 90]



Obr. 150. Aplikační schéma budov ve 2D (Buildings2D) dle směrnice INSPIRE [90]

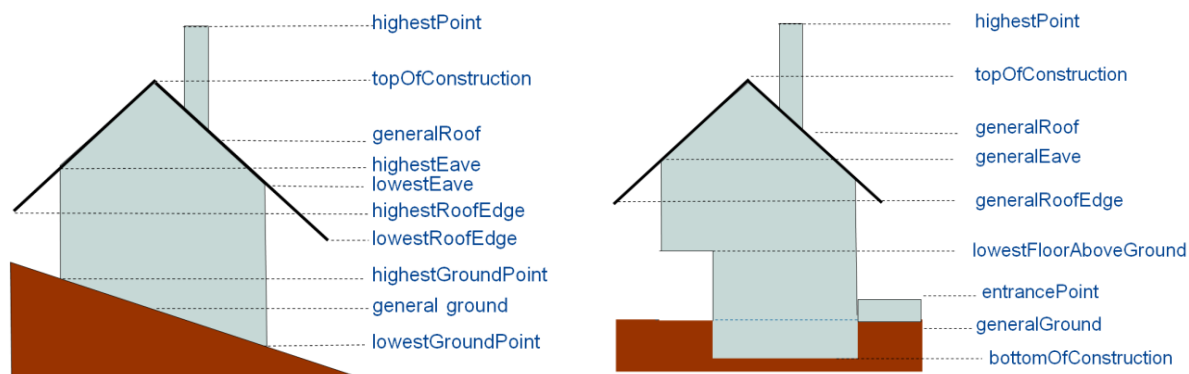
Následující popis dvou vlastností (absolutní a relativní výšky budovy) základního aplikačního schématu nastiňuje komplexnost celé harmonizační procedury. Absolutní výška budovy totiž může být vztažena k různým částem budovy (obr. 151). Stejně tak lze přistupovat i v případě určení relativní výšky budovy. Jednotnost přístupu v tomto směru neexistuje. Směrnice INSPIRE nabízí univerzální rámec pro práci s prostorovými daty, aby nedocházelo k nejistotě či zmatečnosti. Vytvořený rámec jasně definuje a popisuje vlastnosti budovy. V tomto případě její výšku a část budovy, ke které je tato výška vztažena. [11, 27]

AbstractConstruction – abstraktní datový typ (nadřazený abstraktnímu datovému typu *AbstractBuilding*), který obsahuje:

elevation – kóta, absolutní výška budovy

elevationReference – část budovy, ke které je výška vztažena (obr. 151)

elevationValue – hodnota výšky a použitý výškový systém



Obr. 151. Příklady referenčních hodnot výšky (ElevationReferenceValue) pro různé druhy budov [90]

heightAboveGround – relativní výška budovy, rozdíl dvou referenčních výškových částí budovy

heightReference - horní referenční výšková část budovy
generalRoofEdge, *lowestRoofEdge*,
highestRoofEdge, *generalEave*, *lowestEave*,
highestEave, *generalRoof*,
topOfConstruction, *highestPoint*

lowReference - dolní referenční výšková část budovy
generalGround, *lowestGroundPoint*,
lowestFloorAboveGround, *entrancePoint*,
highestGroundPoint

status – odhadnutá nebo měřená veličina

Výše uvedené vlastnosti jsou pouze malou ukázkou a dokumentují náročnost harmonizace prostorových dat budov. Celý dokument týkající se specifikace budov [90] má celkem 323 stran. Podrobnější informace jsou k nalezení na internetových stránkách věnujících se směrnici INSPIRE [91], kde je k nalezení i plné znění tohoto dokumentu. [11, 27]

8 Existující softwarová řešení pro tvorbu 3D modelů budov

Tato kapitola vychází z dokumentů [11, 23, 27, 87, 88, 92]. V rámci projektu nového výškopisného mapování území ČR byla pořízena data LLS z celého území ČR. Mračno bodů, které je výsledkem techniky LLS, lze využít jako podklad pro tvorbu 3D modelů budov. Zásadní vliv na tvorbu 3D modelů budov má hustota a kvalita (rovnoměrnost, polohová přesnost) bodového mračna, která je dána parametry laserového skenování (frekvence měření, výška a rychlost letu, vzdálenost letových os atd.). Následující text se věnuje krátké rešerši dané tematiky, popisu dvou existujících softwarových řešení a jejich testování při využití různých vstupních datasetů. Účelem testování je ověřit možnost zcela automatické tvorby vektorových modelů budov z dat LLS, která ZÚ vlastní. [11]

8.1 Rešerše

Existuje několik přístupů pro generování 3D modelů budov. Tyto přístupy lze rozdělit podle druhu využitých dat a technik zpracování. Vstupní data mohou představovat mračna bodů, snímky (letecké nebo pozemní), mapy, GIS vrstvy, půdorysy budov atd. Metody zpracování mohou být poloautomatické (nutnost lidské interakce) nebo plně automatické (bez nutnosti lidské interakce). [11, 87]

Již v roce 1996 prezentoval Norbert Haala plně automatickou techniku pro extrakci budov [93], která byla brzy následována jinými pracemi [94, 95]. Většina z těchto raných prací používala jako vstupní data pro rekonstrukci budov letecké snímky [96]. Generování 3D modelů budov z dat laserového skenování se stalo populárním o něco později (cca od roku 1998) [97, 98]. Byl to výsledek vývoje zařízení pro laserové skenování (laserové skenery, záznamové zařízení, inerciální měřicí jednotky) a zdokonalení technik přímého georeferencování. V současné době je letecké laserové skenování hlavní technologií pro sběr výškopisných dat z velkých oblastí nebo pro území celých států. [11, 87, 96]

Na konci devadesátých let byly představeny první poloautomatické programy pro tvorbu prostorových modelů budov, které spojovaly manuální a automatické kroky. Cybercity Modeler [99] je založen na stereo měření klíčových bodů (např. rohy budovy, uzlové body střešního pláště) operátorem v prvním kroku a plně automatickým zpracováním ve druhém kroku (generování topologie budovy a vyrovnání klíčových bodů pomocí metody nejmenších čtverců). Největším problémem při tvorbě prostorových modelů budov je jejich obrovská variabilita. V reálném světě se můžeme setkat s nekonečným množstvím tvarů fasád a střešních pláštů. Pro Cybercity Modeler toto problém není, protože všechny budovy jsou digitalizovány manuálně pomocí stereofotogrammetrie. Úroveň automatizace tohoto přístupu je však velmi nízká. inJect [100] je systém pro modelování budov pomocí omezené sady parametrických primitiv (model budovy se střechou stanovou, sedlovou, valbovou atd.). Výběr vhodných primitiv a měření určitých bodů se provádí manuálně operátorem. Komplexní (složitě) budovy musí být rozděleny do jednodušších částí, tak aby mohly být vymodelovány pomocí definovaných prostorových primitiv. Software vypočítá zbývající parametry automaticky a vytvoří 3D model budovy. Software inJect snižuje počet manuálních operací ve srovnání se softwarem Cybercity Modeler. Na druhou stranu, komplexní stavby je velmi obtížné (a atypické stavby téměř nemožné) modelovat pomocí přístupu používajícího prostorová primitiva. [11, 87, 96]

Pozdější práce a publikace se snaží problematiku tvorby 3D modelů budov řešit odlišně a pokud možno zcela automatizovaně. Prioritním zdrojem informací se stala bodová

mračna, která jsou výsledkem technik laserového skenování či automatické obrazové korelace. Prvním důležitým úkolem při tvorbě 3D modelů budov je samotná identifikace bodů, které budovu popisují. Tyto body představují především střechu budovy a její části v případě, že data byla pořízena ze vzduchu (např. z letadla). Druhým důležitým úkolem je segmentace a konverze těchto částí střechy do geometricky a topologicky správného modelu střešního pláště. Tento úkol je značně náročný. Možné zjednodušení tohoto problému představuje použití dalších zdrojů informací, jakými jsou mapy, GIS vrstvy nebo přímo digitální katastrální mapy, které obsahují zákres budov. Tyto informace mohou výrazně pomoci při tvorbě 3D modelů budov, protože nemusejí být použity sofistikované algoritmy pro klasifikaci surového mračna bodů [101]. Budovy jsou konstruovány na pozici jejich půdorysu a tvar těchto půdorysů lze použít pro přesné určení vnějších/obvodových stěn budovy. Střešní roviny mohou být také detekovány s využitím půdorysu budovy. Předpokládá se, že směr normály střešní roviny je obvykle kolmý k přiléhající linii půdorysu [102, 103, 104]. Složitý půdorysný tvar může být také rozložen na menší části, čímž se opět zjednodušuje tvorba modelu střešního pláště [105, 106, 107]. [11, 88]

Kombinace různých datových zdrojů je výhodná pro rekonstrukci 3D modelů budov. Mnoho zemí disponuje digitální katastrální mapou, a proto je možné použít evidované půdorysy zástavby pro 3D modelování jednotlivých budov či celých měst. Využití půdorysů budov, které pocházejí z katastrální mapy, však s sebou přináší jistá úskalí. Katastrální mapa většinou eviduje pouze styk obvodových zdí s terénem. Velké množství budov má však odlišný tvar půdorysu a obrysu střešního pláště. Některé domy mohou mít velké přesahy střech přes obvodové zdivo. To je názorně vidět na obrázku 152. Tato odlišnost může vést k tvorbě nepřesných a vizuálně neatraktivních modelů budov. U jiných podpůrných zdrojů dat (např. map) může nastat situace, že jsou starší ve vztahu k prostorovým datům. Pozice budov jsou známy s určitou nejistotou vzhledem k přesnosti mapy dané její generalizací. Tyto nejistoty, dle práce [108] nevyšší než 0,5 m, se odvíjejí od kvality a měřítka mapy. Účel mapy představuje také zcela zásadní informaci, která ovlivňuje kvalitu dat. Použití jiných mapových podkladů tak může být velice problematické. [11, 88]



Obr. 152. Ortofoto se dvěma budovami s přesahem střechy (zelená linie) přes obvodové zdivo (azurová linie, vlevo), šikmý snímek stejných budov z východu (vpravo) [88]

V práci [109], byl použit robustní algoritmus pro automatickou rekonstrukci budov z řídkého bodového mračna LLS. Žádné předchozí znalosti a jiné doplňkové zdroje informací nebyly v této práci potřeba. Klasifikace mračna bodů na terénní a neterénní body byla provedena pomocí filtračního procesu, který používá globální funkce ve formě ortogonálních polynomů. Iterační proces byl založen na polynomu, který prochází jednotlivými body

mračna. V následujících iteracích byl snižován stupeň polynomu. Snížení stupně polygonu bylo provedeno na základě hodnocení reziduí. Předpokladem bylo, že terénní body mají negativní rezidua a neterénní body mají pozitivní rezidua. Stupeň polynomu byl snížen tak, aby procházel pouze body reprezentujícími terén. Konečný výsledek byl dosažen, když iterace neměnila tvar terénu, tedy jen terénní body ovlivňovaly polynom [110]. Oddělené oblasti neterénních bodů byly poté filtrovány podle velikosti a výšky nad terénem. Filtrované body, které tvořily části střešních rovin, byly dále seskupeny do segmentů a zařazeny do střešních ploch. Mezi střešními plochami byly identifikovány topologické vztahy a z těchto informací byl vytvořen tzv. graf sousednosti (topologie), který je velmi užitečný pro stanovení konkrétního typu střešního pláště. Lomové hrany mezi střešními plochami byly vypočteny průnikem střešních rovin. Hranice budov byly odvozeny od okrajů střech, které byly zjištěny pomocí Houghovy transformace. Toto řešení bylo pouze přibližné, protože detekované linie nebyly geometricky správné (nebyly navzájem rovnoběžné a kolmé). Extrahované linie tedy byly opraveny pomocí vyrovnání s váhovými koeficienty podle jejich zařazení do tří tříd: horizontální lomové hrany (hřeben střechy), nehorizontální lomové hrany (nároží střechy) a okrajové linie (okap střechy). Vyrovnání neměnilo topologické vztahy mezi střešními plochami. Generování 3D modelů budov bylo provedeno po vyrovnání okrajových linií. [11, 88]

Řešení [109] je sofistikovanější než přístup, který je popsán v [101], kde tvary budov byly určeny pomocí segmentace DMP v rastrové podobě a následné extrakce rovin pomocí speciálního algoritmu [111]. Tento algoritmus je rychlý a jednoduchý ve srovnání s jinými algoritmy [112]. Algoritmus je založen na segmentaci DMP v pravidelné mřížce do 3D liniových segmentů, které se používají jako výchozí pozice pro metodu označovanou jako *region growing*. Hlavní výhodou tohoto algoritmu je, že nevyžaduje žádné apriorní znalosti. Nicméně, algoritmus neumožňuje přesnou extrakci vnějších hranic budovy. Autor vyřešil tento problém prostřednictvím použití dalšího zdroje dat, kterými byly půdorysy budov. [11, 88]

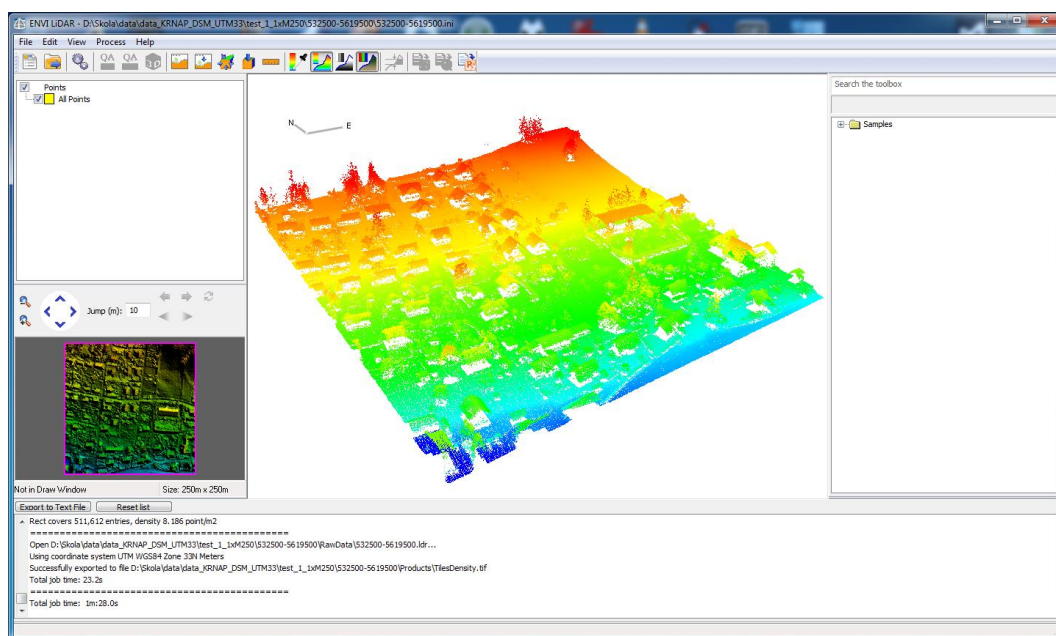
Problém generování 3D modelů budov je poměrně starý (téměř tři desetiletí výzkumu). Starší přístupy byly omezeny nízkou kvalitou vstupních dat a malým výkonem tehdejšího hardwaru. V dnešní době je kvalita dat a výkon hardwaru na vysoké úrovni, která umožňuje nasazení plně automatizovaných metod zpracování. Následující část textu je věnována analýze současných komerčních softwarových produktů, které jsou zaměřeny na automatické generování 3D modelů budov z mračna bodů. [11, 87]

8.2 Popis softwaru ENVI LiDAR

ENVI LiDAR pochází od společnosti Exelis Visual Information Solutions (Exelis VIS), která se zaměřuje na produkci programového vybavení pro analýzu a vizualizaci geoinformací. Tato společnost je dceřinou společností ITT Exelis, jejíž hlavními směry jsou zbrojní průmysl a aerokosmonautika. Zkušební verze softwaru byla získána od společnosti ARCDATA PRAHA s.r.o., která je distributorem produktů Exelis VIS pro Českou republiku. [11, 88, 113]

ENVI LiDAR slouží pro automatizované zpracování a interaktivní kontrolu dat leteckého laserového skenování. Software disponuje uživatelsky přívětivým a jednoduchým grafickým rozhraním, které umožňuje několik možností náhledu na analyzovaná data (profily, izometrický pohled a perspektivní pohled - viz obr. 153). Vstupní data mohou být v binárním

formátu LAS (LiDAR/LASer data exchange format) či textovém ASCII. Software umožňuje práci s georeferencovanými daty v libovolné projekci a geodetickém datu. Doporučována hustota mračna bodů je více než 1-2 body/m², přičemž vyšší hustota dat vede k lepším výsledkům. Výsledkem zpracování je klasifikace mračna bodů do několika tříd (terén, budovy, stromy, nadzemní elektrické vedení a jeho stožáry). Z rozříděných dat lze vytvořit výškopisné modely (digitální model terénu a digitální model povrchu) a vektorové modely staveb a vegetace, které lze ze softwaru exportovat a dále použít v jiných programech. V případě budov jsou podporovány následující výstupní formáty: DXF, SHP (pro 2D) a Google Earth KML (pro 3D). Celé nastavení zpracování probíhá skrze jedno dialogové okno (Project Properties) se třemi záložkami (Outputs, Area Definition, Production Parameters). Samotné zpracování dat pak probíhá zcela automaticky bez nutnosti další interakce. [11, 88, 113]



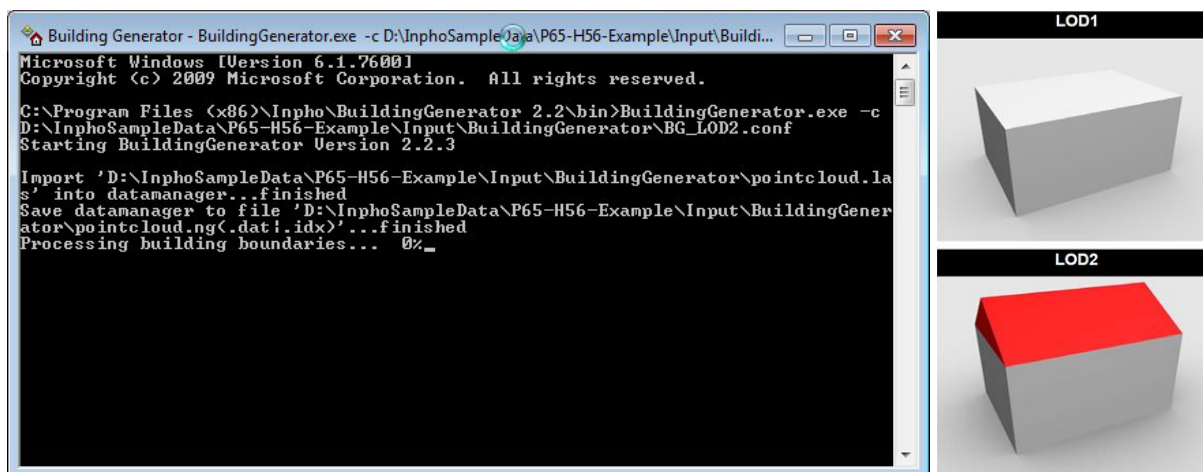
Obr. 153. Ukázka rozhraní programu s vizualizací neklasifikovaného mračna bodů (barevná hypsometrie) [88]

8.3 Popis softwaru Inpho Building Generator

Inpho Building Generator nabízí společnost Inpho GmbH (v současnosti Trimble Navigation), která se zaměřuje na produkci softwarového vybavení pro leteckou fotogrammetrii a zpracování prostorových dat. Zkušební licence softwaru Inpho Building Generator ve verzi v2.2.3 byla získána od společnosti PAP & spol. s r.o., která zprostředkovává prodej softwaru společnosti Inpho (Trimble Navigation) pro Českou republiku. [11, 87, 114, 115]

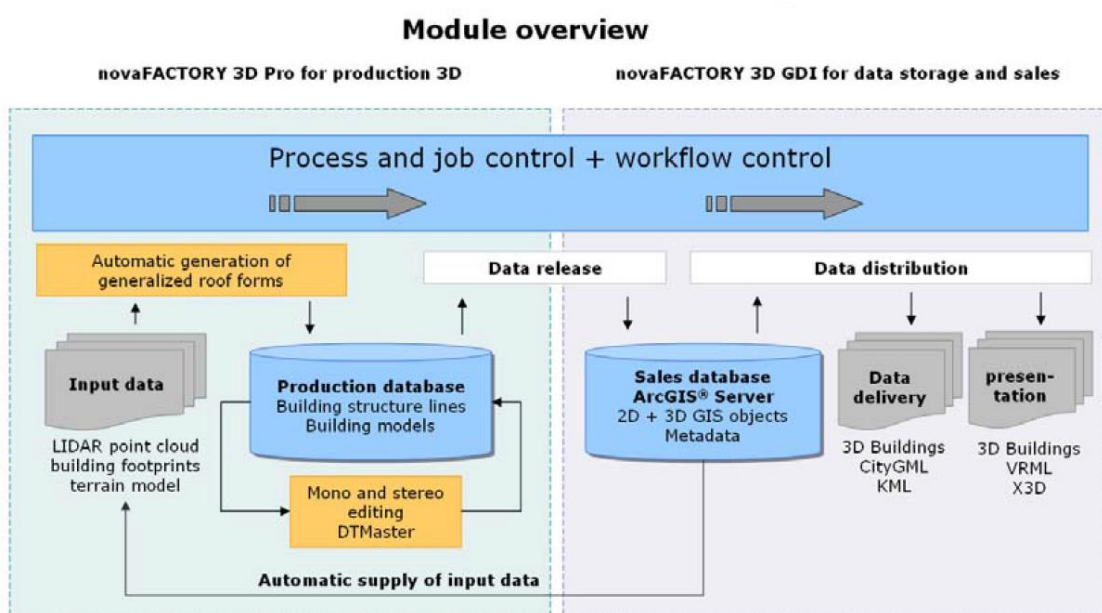
Inpho Building Generator představuje plně automatický nástroj na tvorbu modelů budov v Level of Detail 1 (LoD1) nebo Level of Detail 2 (LoD2). Oba typy modelů jsou prezentovány na obrázku 154. Modely budov LoD1 jsou jednoduché krabicové modely, zatímco modely budov LoD2 mají skutečný tvar střechy (např. stanovou nebo mansardovou). Nutnými vstupními daty programu jsou: digitální model terénu, mimo terénní mračno bodů a 2D obrysy budov. Inpho Building Generator generuje pro každý obrys budovy prostorový 3D model. Vytvořené modely mohou být uloženy (exportovány) do vektorového formátu společnosti Inpho nebo do objektového formátu XML společnosti M.O.S.S. M.O.S.S. je německá společnost, která spolupracovala se společností Inpho na vývoji Inpho Building Generator. Inpho Building Generator nemá vlastní grafické uživatelské rozhraní, spouští se z

příkazové řádky (obr. 154). Všechny parametry a nastavení jsou definovány v konfiguračním souboru. Konfigurační soubor je textový soubor ve formátu ASCII, kde každý parametr je umístěn na novém řádku. Parametry mají standardní zápis: PARAMETER=<value>. Minimální zápis v konfiguračním souboru obsahuje nastavení vstupních a výstupních cest. Všechny ostatní parametry mají výchozí hodnoty, které lze změnit. [11, 87, 114]



Obr. 154. Ukázka prostředí příkazového řádku softwaru Inpho Building Generator (vlevo) a modely budov LoD1 a LoD2 (vpravo) [115]

Inpho nabízí společně s M.O.S.S. koncept v podobě novaFACTORY 3D (obr. 155). Tento koncept umožňuje import automaticky generovaných budov ze souboru XML do produkční databáze Oracle. Rozšíření softwaru DTMaster (od společnosti Inpho) o DTMaster Building AddOn (součást novaFACTORY 3D od M.O.S.S.) umožňuje připojení k produkční databázi a editaci modelů budov v ní uložených. Celý koncept práce s produkční databází umožňuje současný přístup pro více uživatelů bez vzniku vzájemných kolizí, což je velice výhodné v případě zpracování rozsáhlých projektů. Všechny budovy mohou být z databáze exportovány do následujících formátů: CityGML, KML/KMZ, VRML, Autodesk 3D DXF, ESRI 3D-Shape, ESRI Geodatabase. [11, 87, 114]



Obr. 155. Koncept novaFACTORY 3D [114]

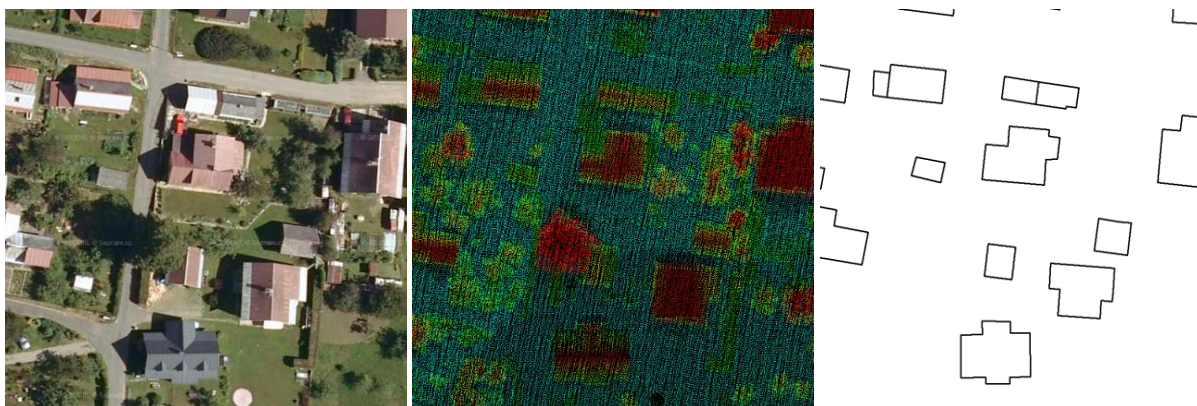
8.4 Popis vstupních dat

Testování softwaru bylo provedeno na třech datasetech s rozdílnou hustotou mračna bodů (tab. 19). První a druhý dataset pokrývají identické území (část města Rokytnice nad Jizerou) a tak výstupy vytvořené na základě těchto dat jsou navzájem porovnatelné. Vzorový dataset dodaný k softwaru ENVI LiDAR nezachycuje území ČR a je tvořen velmi hustým mračnem bodů. Představuje tak zajímavý dataset vhodný pro přesné modelování. [11, 87, 88]

Tab. 19. Srovnání vstupních dat (# odpovídá číslu datasetu) [88]

#	Vlastník dat	Území	Hustota (bodů/m ²)
1	Český úřad zeměměřický a katastrální	Rokytnice nad Jizerou (ČR)	1.2
2	Krkonošský národní park	Rokytnice nad Jizerou (ČR)	8.2
3	ENVI LiDAR vzorový dataset	Kleinwolkersdorf (Rakousko)	21.8

Následující obrázek 156 zachycuje pouze část druhého datasetu. Levá část obrázku je ortofoto. Prostřední část obrázku je mračno bodů v barevné hypsometrii vztažené k výšce terénu. Barevná škála není tvořena z absolutních výškových hodnot, ale z relativních výšek bodů nad terénem. Tento druh vizualizace eliminuje členitost terénu, což poskytuje lepší představu o výškových poměrech objektů nacházejících se nad terénem (domy, vegetace atd.). Pravá část obrázku je půdorys budov z digitální katastrální mapy. [87]



Obr. 156. Detail testovacího území: ortofoto (vlevo), mračno bodů (uprostřed) a obrysy budov (vpravo) [87]

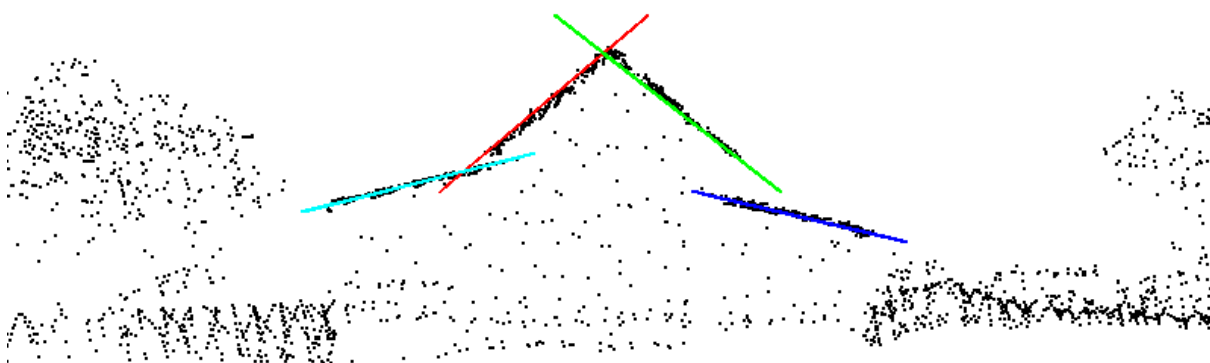
8.5 Srovnání

Vytvořené 3D modely budov mohou být vizualizovány jako drátěné objekty nebo realistické 3D objekty pokryté texturami (v případě softwaru ENVI LiDAR). Čtveřice obrázků (obr. 158) představuje půdorysný pohled na drátěné modely budov (vlevo) a 3D pohled na modely budov (vpravo) vytvořené z druhého datasetu softwarem ENVI LiDAR (nahore) a softwarem Inpho Building Generator (dole). Srovnání softwarů z hlediska vlastností je v tabulce 20. Jednoduché vizuální posouzení kvality výsledků se nachází v tabulce 21. [11, 87]

8.5.1 ENVI LiDAR

ENVI LiDAR má uživatelsky přívětivé grafické rozhraní, které je intuitivní a umožňuje uživateli náhled na analyzovaná data v několika možnostech (obr. 153). Hlavní výhodou tohoto programu je možnost automatického zpracování mračna bodů bez nutnosti složitěho

nastavování. Během detailní prohlídky vytvořených modelů budov bylo zjištěno že ENVI LiDAR nevytváří topologicky čisté modely budov. Všechny budovy jsou složeny z několika menších částí (nepravidelných mnohostěnů), které k sobě přiléhají (lepší varianta, obr. 159) nebo se navzájem prolínají či k sobě nedoléhají (horší varianta). Software tedy nevytváří skutečné modely budov, ale pouze shluky prostorových primitiv, které vytváří zdánlivý model stavby. Software využívá pro tvorbu 3D modelů budov metodu RANSAC (Random Sample Consensus) [116]. Princip této metody vychází z lineární regrese a spočívá v prokládání geometrických primitiv (např. rovin) měřenými daty (mračnem bodů). Ukázka této metody je na obrázku 157. [11, 87, 88]



Obr. 157. Řez mračnem bodů s rovinami procházejícími body, které představují střešní plášť [88]

Nedostatkem softwaru je absence jakékoliv topologické kontroly, která vede při použití řídkého mračna bodů (do 10 bodů/m²) k tvorbě značně nedokonalých modelů budov. Některé stavby se dokonce rozpadly na více menších částí (obr. 158). Zpracování různých datasetů prokázalo, že pro dosažení kvalitních modelů budov (obr. 160) je nutno použít velmi husté mračno bodů (20 bodů/m² a více). Takto hustá mračna bodů však nejsou stále zcela běžná. Mračna bodů s velmi nízkou hustotou (1-2 body/m²) jsou pak zcela nepoužitelná. [11, 87, 88]

Tab. 20. Srovnání softwarů [27]

vlastnost	ENVI LiDAR	Inpho Building Generator
grafické uživatelské rozhraní	ano	ne
požadovaná hustota mračna bodů	≥ 20 bodů/m ²	1-2 body/m ²
vstupní data	mračno bodů	mračno bodů, DMR, obrysy budov

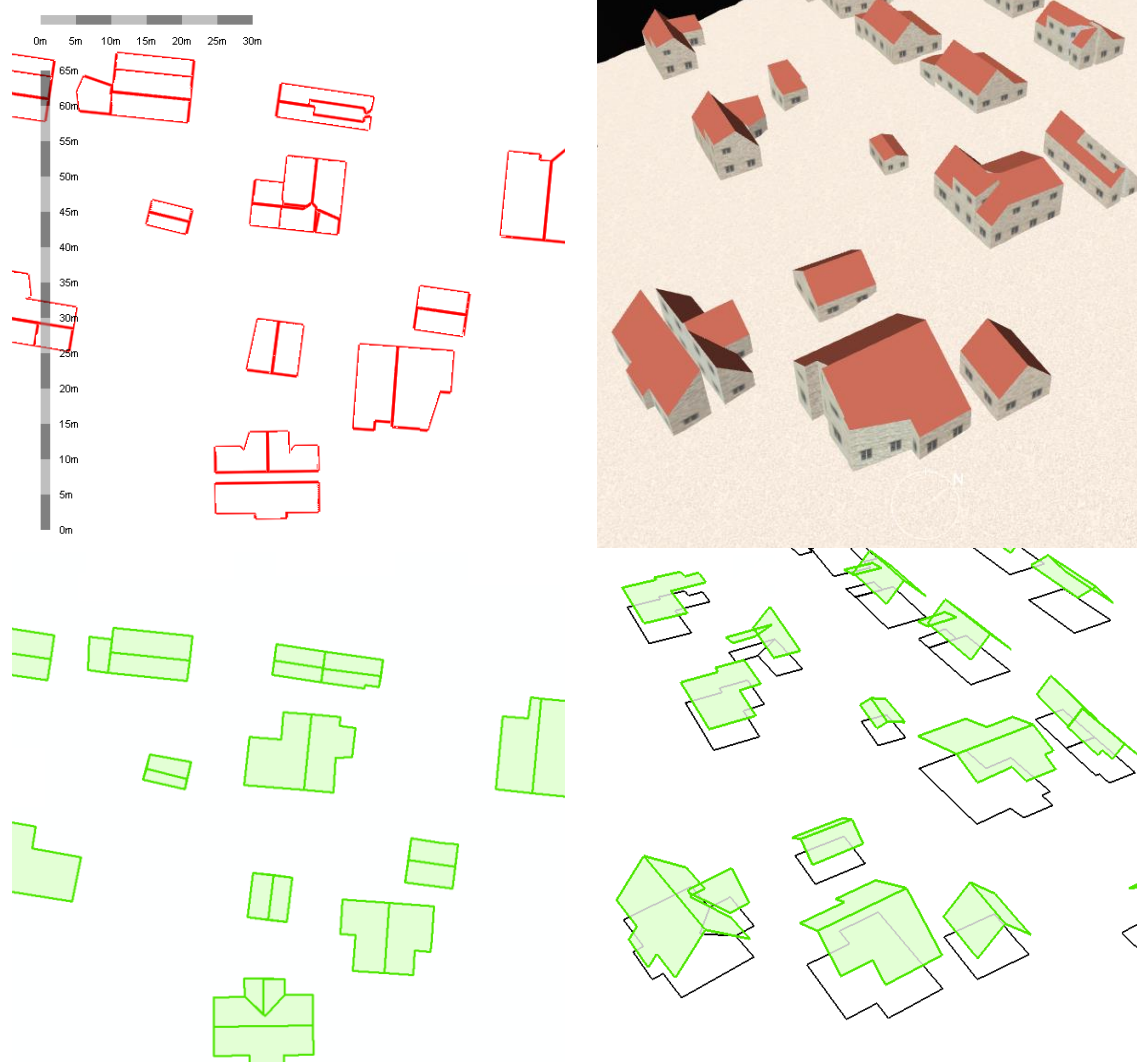
8.5.2 Inpho Building Generator

Inpho Building Generator nemá žádné grafické uživatelské rozhraní (obr. 154). Veškeré nastavení je dostupné pouze v konfiguračním souboru. Editace vytvořených modelů budov je možná pouze pomocí jiného softwarového produktu od společnosti Inpho. Inpho Building Generator tak není samostatnou aplikací, ale spíše jednou ze částí celého fotogrammetrického programového balíčku od společnosti Inpho. Kvalita vytvořených 3D modelů budov s reálným tvarem střechy (LoD2) není ideální. Hlavní výhodou tohoto softwaru je možnost použít řídké mračno bodů (1-2 body/m²). Využití obrysů budov (z digitální katastrální mapy) je v tomto případě značně výhodné. Informace o obrysu budovy totiž výrazně usnadňují rekonstrukci jejího modelu. Budovy jsou rekonstruovány na pozici svých obrysů. Tvar obrysů může být použit pro přesné určení obvodového pláště (obvodových stěn) budovy. Střešní roviny mohou být detekovány v mračnu bodů pomocí jednotlivých hran obrysu budovy. Střešní roviny jsou totiž většinou kolmé vůči přilehlým obvodovým hranám. Vytvořené modely budov jsou velmi přesné a neobsahují žádné

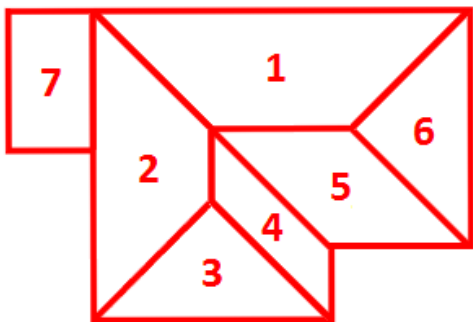
viditelné chyby, proto může být výsledek zpracování označen jako uspokojivý. Zpracování rozdílných datasetů ukázalo, že použití extrémně hustého mračka bodů (třetí dataset) nemá žádný význam. Vytvořené 3D modely budov vypadají stejně. Inpho Building Generator není schopen využít hustá mračka bodů pro tvorbu komplexních modelů budov. Komplexní budovy s komplikovaným tvarem střechy a malými detaily (jako jsou vikýře) mohou být vymodelovány následně prostřednictvím manuálního zpracování operátorem v dalším softwaru společnosti Inpho. [11, 87]

Tab. 21. Vizualní posouzení kvality výsledků (# odpovídá číslu datasetu) [87]

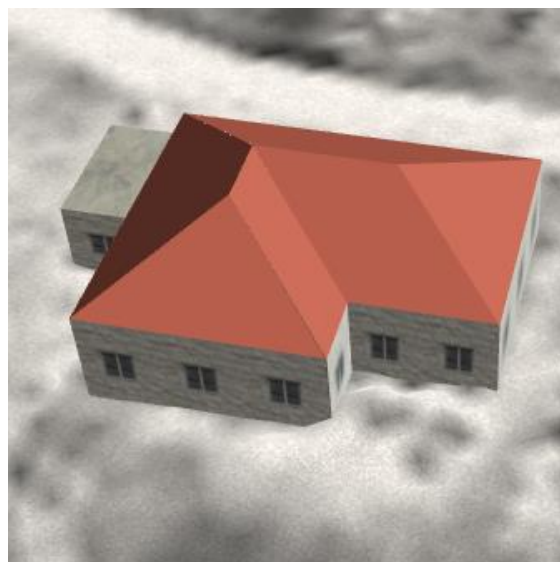
#	ENVI LiDAR	Inpho Building Generator
1	nepoužitelné	špatné
2	špatné	dobré
3	výborné	dobré (bez benefitu)



Obr. 158. 3D modely budov LoD2, ENVI LiDAR (nahore) a Inpho Building Generator (dole), půdorysný pohled na drátěné modely budov (vlevo) a 3D pohled na modely budov (vpravo) [87, 88]



Obr. 159. Půdorysný pohled na mnohostěny budovy LoD 2 z třetího datasetu (ENVI LiDAR) [88]



Obr. 160. 3D pohled na texturovaný model budovy LoD 2 z třetího datasetu (ENVI LiDAR) [88]

9 Automatická rekonstrukce modelů střech z obrysů budov a leteckých obrazových dat

Tato kapitola navazuje na autorovy předchozí publikace [87, 124], které byly zaměřeny na porovnání existujících komerčních řešení pro tvorbu 3D modelů budov využívající pouze MB (ENVI LiDAR) nebo MB a obrysy (Inpho Building Generator). Modely budov vytvořené v rámci předchozích prací nebyly uspokojivé. Modely budov vytvořené softwarem Inpho Building Generator byly topologicky korektní. Bohužel, vytvořené modely budov měly velmi jednoduchý tvar střešního pláště, který často neodpovídal reálným tvarům střech. ENVI LiDAR vytvořil realistické a zároveň i složité 3D modely budov. Vygenerované modely budov však byly složeny z mnoha navzájem se překrývajících či na sebe ne zcela přesně navazujících mnohostěnů a obsahovaly tak mnoho topologických chyb. Vzhledem ke zjištěným nedostatkům existujících řešení bylo přistoupeno k tvorbě vlastní metody pro automatickou tvorbu topologicky správných a realistických modelů střech. Pouze takové modely střech lze použít k tvorbě věrných 3D modelů budov v LoD2. Vytvořená metoda využívá vektorové obrysy budov spolu s obrazovými a výškovými informacemi odvozenými z LMS k rekonstrukci modelů střech. V metodě byly zohledněny požadavky ZÚ pro tvorbu 3D modelů budov, které zahrnují využití stávajících prostorových dat v podobě LMS s rozlišovací schopností na zemském povrchu cca 0,2 m a obrysů budov ZABAGED® s polohovou přesností do 2 m (obvykle do 1 m), které tak mohou být vůči obrazovým datům mírně posunuté. [120]

9.1 Úvod

Experti z celé řady oborů používají prostorová data k řešení specializovaných úkolů jako tvorba hlukových map, pasportizace komunikací [117], modelování znečištění ovzduší, odhad solárního potenciálu střech budov, plánování nové telekomunikační infrastruktury, návrh domů s ohledem na požadavky denního osvětlení nebo tvorba virtuálních prostředí pro simulátory. Tyto úkoly vyžadují použití detailních digitálních výškových modelů a 3D modelů budov. Podrobné digitální výškové modely, jako digitální modely reliéfu (DMR) a digitální modely povrchu (DMP), jsou v současnosti již většinou široce dostupné a běžně používané. Detailní 3D modely budov, 3D modely budov s generalizovaným tvarem střešního pláště označované jako Level of Detail 2 (LoD2) budovy [118], jsou však dostupné pouze pro určité oblasti, většinou urbanizovaná území, ve formě 3D městských modelů. Absence 3D modelů budov v LoD2 (následně již jen jako 3D modelů budov) pro větší oblasti nebo území celých států komplikuje (a někdy i zcela znemožňuje) řešení těchto specializovaných úkolů. Existuje tedy zjevná poptávka po 3D modelech budov, které by odborníci a vědci mohli použít. Tento široký zájem vedl k definování podoby možné publikace 3D modelů budov dle tématu budov směrnice INSPIRE [119]. [120]

9.1.1 Data

Sběr prostorových dat v podobě 3D bodů je možný pomocí různých technik. Nejběžnější techniky představují terestrické (pozemní) nebo letecké laserové skenování a fotogrammetrii. K tvorbě 3D modelů budov musejí být použity letecké techniky sběru dat, protože umožňují rychlé a neselektivní mapování rozsáhlých oblastí. Letecké laserové skenování (LLS) a letecká fotogrammetrie (LF) jsou konvenční metody pro sběr leteckých dat. LLS slouží ke sběru informací pro tvorbu DMP a především DMR díky registraci vícenásobných odrazů. Laserový pulz může proniknout vegetací (typicky korunami stromů) a poskytnout tak informaci o výšce terénu [121]. LF primárně produkuje bezešvé ortofoto mapy (následně už jen jako ortofota) z vertikálních snímků (s odchylkou osy záběru

od svislice do 5° [22]), které zachycují zemský povrch v nadírovém směru. LF je také používána ke sběru šikmých leteckých snímků (s odchylkou osy záběru od svislice větší než 5° [22]), které umožňují pohled na snímanou scénu z různých směrů. Šikmé snímky mohou významně pomoci s interpretací prvků na zemském povrchu v oblastech s velkým zakrytím. V mnoha zemích jsou ortofota pořizována v pravidelných intervalech k aktualizaci GIS a jiných mapových produktů. Četnost aktualizace je dána především požadavky národních mapovacích agentur, ale je ovlivněna také ekonomickými aspekty sběru dat (např. velikostí území a výškovou členitostí georeliéfu). Četnost aktualizace se tak může pohybovat od 1 roku (např. v Nizozemsku) [89] po několik let (např. ve Velké Británii) [72]. [120]

Ortofota a zdrojové letecké měřické snímky (LMS) reprezentují běžný a často také nejaktuálnější typ prostorových informací dostupných pro celé státy. Primární výhodou LMS je, že neobsahují pouze polohové informace, ale také výškové informace pokud jsou pořízeny s dostatečnými vzájemnými překryty. Polohové a výškové informace v nich obsažené jsou jednotné v čase. Moderní algoritmy obrazové korelace mohou automaticky generovat velmi hustá mračna bodů (MB) ze snímkových dvojic v ultra-vysokém rozlišení (s prostorovým rozlišením menším než 0,3 m [122]), které jsou vhodné pro tvorbu detailních DMP. Obrazová korelace poskytuje výškové a také spektrální informace o zemském povrchu, ale neproniká vegetací jako LLS. 3D modely budov mohou být generovány jak z laserového mračna bodů (LMB) tak také z obrazového mračna bodů (OMB). Největší rozdíl mezi jednotlivými typy mračen je, že obrazová korelace neumožňuje generování bodů (výškové informace) v částech obrazu bez textury (např. hluboké stíny a vysoce odrazivé materiály) nebo ve stereoskopickém zákrytu. Šikmé letecké snímky mohou být použity jako alternativa nebo náhrada za vertikální snímky k omezení efektu stereoskopického zákrytu ve městech [148]. LLS může selhat ve snímání objektů, které jsou velmi odrazivé nebo absorbující laserové paprsky (např. vodní plochy). Tyto vlastnosti (nevýhody) je třeba vzít v úvahu nebo je lze vyřešit spojením OMB a LMB pro tvorbu velmi spolehlivého DMP [21]. Bohužel, současný sběr leteckých a obrazových dat ze stejné letecké platformy stále není velmi běžný. [120]

9.1.2 Obrisy budov

3D modely budov mohou být vytvořeny pouze na základě leteckých dat jako zcela nezávislé objekty nebo jejich tvorba může být podpořena nebo zcela navázána na existující 2D obrisy budov. Oba přístupy mají své výhody i nevýhody. Velikosti a tvary modelů budov vytvořených pouze na základě leteckých dat (typicky MB) jsou definovány velikostí a tvary střech. Střechy mají obvykle přesahy přes obvodové zdi, tedy obrisy budov odvozené ze střech mohou být větší, než je reálná zastavěná plocha (obr. 152). Spojením takových modelů budov s jinými prostorovými objekty (např. silniční sítě nebo sítěmi infrastruktury) pak může vést ke vzniku nežádoucích topologických konfliktů. Z tohoto důvodu lze využít alternativní přístup, který využívá již existující půdorysy nebo obrisy budov (dále jen jako obrisy budov). Obrisy budov můžou být získány z katastru nemovitostí nebo národních geodatabází, které slouží k produkci map a plánů velkého měřítka. 3D modely budov založené na již existujících obrysech je možno kombinovat s jinými prostorovými objekty ze zdrojových databází, což výrazně zvyšuje jejich využitelnost. Kombinace existujících 2D dat s 3D daty (MB) však může vést ke komplikacím. V závislosti na účelu zdrojové geodatabáze můžou být obsažené obrisy budov polohově nepřesné, příliš generalizované nebo posunuté. Obrisy budov v katastrálních mapách jsou obvykle velmi přesné, přičemž reprezentují průnik obvodového zdiva s terénem [119], který však nemusí nutně odpovídat tvaru střechy. Tvar střechy může být jednodušší nebo naopak komplexnější (složitější), než je půdorys budovy.

Výsledné 3D modely budov založené na již existujících obrysech budov tedy nemusí přesně odpovídat geometrii střech. [120]

Výběr zdrojových prostorových dat by tedy měl odpovídat účelu použití výsledných 3D modelů budov. Existující 2D obrysy budov by měly být využity pokud je zamýšleno 3D modely budov kombinovat s dalšími existujícími geodaty. V ostatních případech mohou být 3D modely budov vytvořeny pouze z leteckých prostorových dat. [120]

9.1.3 3D modely budov

Mnoho vědců již zkoumalo různé aspekty rekonstrukce 3D modelů budov, přičemž první studie věnované tomuto tématu jsou z konce 90. let [123]. Některé z prvních studií v této oblasti byly zmíněny v předchozích publikacích [87, 124]. Velmi komplexní přehled metod a principů automatické rekonstrukce 3D modelů budov byl poskytnut [125]. Tato publikace byla následována jinými pracemi, které prezentovaly výsledky ISPRS testu pro detekci budov a rekonstrukci 3D modelů budov [126, 127]. Následující text je členěn do částí podle typu prostorových dat použitých pro rekonstrukci 3D modelů budov. [120]

9.1.3.1 Laserová mračna bodů

Mnoho studií se zabývá tvorbou 3D modelů budov výhradně z laserových mračen bodů (LMB) [89, 128, 129]. Algoritmy založené na grafech topologie střechy [89, 129, 130] představují dobře vytvořené přístupy využívající LMB s vysokou hustotou (20 bodů/m²). V případě LMB s nízkou hustotou (nejméně 3 body/m²) je tvorba střešních modelů možná pomocí globálně optimálních řešení [128]. Taková řešení vyžadují segmentaci MB do střešních rovin, extrakci a regularizaci obrysů budov a výškových hran, dělení budov na menší objemové buňky a jejich kategorizaci na vnitřní nebo vnější na základě analýzy viditelnosti [128]. Plochy mezi vnitřními a vnějšími buňkami pak tvoří rekonstruovaný 3D model budovy. Autoři [128] uvedli, že jejich řešení bylo robustní z hlediska chybějících bodů (např. z důvodu zákrytů), ale že dosažené výsledky byly zcela závislé na kompletnosti detekovaných střešních rovin. Vzhledem k použití LMB je důležité si uvědomit, že modely budov jsou odvozeny z bodů klasifikovaných jako střechy a tedy mohou být větší, než je skutečná zastavěná plocha. [120]

9.1.3.2 Obrazová mračna bodů

Nedávno publikovaná studie [131] představila tvorbu modelů budov v LoD2 z fotogrammetrických MB bez použití podpurných dat v podobě obrysů budov. V této práci byla tvorba budov založena na segmentaci OMB pomocí růstového algoritmu, extrakci primitiv použitím tzv. Random Sample Consensus [132] a tvorbě 3D modelů budov pomocí softwaru PolyFit. PolyFit je nástroj pro generování jednoduchých polygonových modelů z protínajících se rovin detekovaných v MB [133]. Podle autorů [133] je software PolyFit schopen zpracovat MB se šumem, odlehlými body i chybějícími daty. [120]

9.1.3.3 Mračna bodů a obrazová data

Tvorba modelů budov na základě výškových a obrazových dat byla popsána v technicky velmi zajímavých pracích [134, 135]. Obrazová data mohou být použita k detekci střešních hran. Detekované střešní hrany mohou tvořit vrcholy rekonstruovaného modelu střechy. Řešení prezentované v práci [134] bylo založeno na extrakci vrcholů střešních rovin z věrného ortofota (v angličtině true orthophoto) s rozlišením 0,1 m/pixel pomocí Cannyho hranového detektoru a jejich integraci s DMP (0,1 m/pixel) vytvořeného z OMB. Detekované střešní hrany mohou také podpořit extrakci střešních rovin z MB [135]. Metody založené

na extrakci střešních rovin za použití růstového algoritmu z velmi hustých LMB (35 bodů/m²) podpořené hranami extrahovanými z ortofotosnímků s vysokým rozlišením (0,05 m/pixel) byly podrobně popsány v [135]. [120]

9.1.3.4 Laserová mračna bodů a obrysy

Vytvoření celostátního 3D modelu území spojením obrysů budov z národní topografické databáze s polohovou přesností 1-2 m a výškových dat z laserového skenování bylo prezentováno v Nizozemsku [89]. Mračna bodů s redukovanou hustotou 3 body/m² (původní 20 bodů/m²) byly použity k tvorbě 3D modelu území obsahujícím všechny topografické objekty v LoD0 (3D plochy, 3D linie) a modely budov v LoD1 (krabicové modely). V této studii bylo zmíněno, že spojení velmi přesných mračen bodů s méně přesnými obrysy budov může komplikovat tvorbu výsledných modelů budov. To byl také důvod, proč se vytvářely modely budov v nižší kvalitě LoD1 místo LoD2. [120]

9.1.3.5 Obrazová mračna bodů a obrysy

Tři evropské národní mapovací agentury (Velká Británie, Irsko a Španělsko) testovaly využití šikmých leteckých snímků pro generování velmi hustých MB, texturovaných polygonových sítí a 3D modelů budov v LoD2 ze známých obrysů [148]. Pro tvorbu 3D modelů budov byl použit City Modeller, modul softwaru Tridicon/Hexagon. Podle autorů práce [148] jsou MB generovaná ze šikmých snímků čistší, ve srovnání s použitím konvenčních nadírových snímků, a obsahují navíc body na fasádách budov. Na druhou stranu, použití středofórmátových kamer pro sběr šikmých snímků s překrytí až 80 % vede k velkému počtu letových hodin, a tedy k vyšším nákladům leteckého mapování. Obrovský počet snímků pak prodlužuje dobu zpracování a klade značné nároky na kapacitu úložišť. [120]

9.1.3.6 Obrysy a atributy

Rychlá automatická tvorba 3D modelů budov z obrysů a atributových dat (počet podlaží a typ střechy) byla představena [136]. Tento přístup vyžaduje ortogonalizaci („zpravoúhlení“) polygonů budov a jejich rozdělení na obdélníky. Pro každý obdélník je vygenerován základní 3D model budovy podle připojených atributů. Rozšíření přístupu pro automatické generování modelů budov s obecným tvarem je možné tvorbou tzv. straight skeletonů pomocí smršťovacího procesu [137]. Bohužel, tato technika umožňuje tvorbu pouze modelů střech valbového typu. Vynechání analýzy výškových dat výrazně zjednodušuje tvorbu modelů budov v LoD2, ale snižuje jejich výslednou věrnost. [120]

9.2 Popis konstrukce modelu střechy

9.2.1 Příprava dat

Vytvořená technika kombinuje obrazová a výšková data v rastrovém formátu odvozené ze standardních svislých LMS s přibližně 55% podélným a 20% příčným překrytem. Obrazová data reprezentuje Ortofoto ČR, což je barevné ortofoto s velikostí pixelu 0,25 m (pro roky 2009-2015). Výšková data představuje NDMP vytvořený odečtením DMR od DMP. Všechny výškové modely jsou v rastrové podobě s rozlišením 1 m/pixel. Jako DMR byl použit DMR 5G, který byl vytvořen technikou LLS. DMP pochází od ÚHÚL a byl vytvořen z OMB, které byly spojeny jednoho modelu a převedeny do rastrové podoby. OMB byla vygenerována modulem enhanced Automatic Terrain Extraction (eATE) softwaru ERDAS IMAGINE nebo IMAGINE Photogrammetry (dříve Leica Photogrammetry Suite). Modul eATE používá tzv. pixel-by-pixel korelační techniku ke generování velmi hustých OMB na překrytu

stereodvojic [138]. V případě dat ÚHÚL byla použita normalizovaná křížová korelace k vytvoření MB s hustotou 1 bod/m². Vygenerovaná MB měly nižší avšak stále dostatečnou kvalitu (výškové odchylky do 1 m), než které lze dosáhnout nejnovějšími algoritmy [139, 140]. Normalizací DMP jsme do výsledného NDMP zanesly výškovou chybu použitého DMR 5G. NDMP byl navíc z optimalizačních důvodů převeden do 8bitové hloubky (celá čísla/metry od 0 do 255). Provedením všech těchto zpracovatelských kroků tak mohla výšková nepřesnost NDMP dosahovat hodnot až 2 m. Vytvořená metoda však nevyžaduje použití velmi přesných výškových dat. Při její tvorbě bylo očekáváno použití výškových dat s výrazně nižší přesností, než jakou má ortofoto. Ukázka použitého ortofota je na obrázku 161, na kterém lze pozorovat malý severozápadní posun obrazu střechy budovy vůči terénu. Jedná se o radiální posun obrazu objektů nad terénem z důvodu centrální projekce. Použité ortofoto nebylo tzv. věrným ortofotem. [120]



Obr. 161. Barevné ortofoto [120]

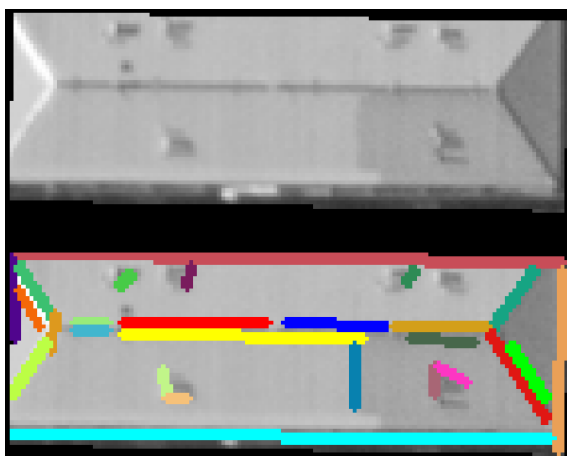
Obrysy budov byly získány od ZÚ a představují polohově zpřesněný typ objektu Budova jednotlivá nebo blok budov ZABAGED® [141]. Obrysy budov byly zpracovávány po jednom, přičemž pro každý obrys byly spočítány tři přibližné výšky střechy (horní, spodní, celková) založené na NDMP. Horní výška střechy byla vypočtena jako 95% percentil všech hodnot NDMP uvnitř obrysu budovy. Tento způsob byl zvolen z důvodu eliminace náhodných chyb a také filtrace extrémních hodnot, které odpovídají nejvyšším objektům na střeše v podobě komínů či antén. Horní výška střechy by teoreticky měla odpovídat referenční výšce *topOfConstruction* dle směrnice INSPIRE pro téma budov (podkapitola 7.1, obr. 151). Spodní výška střechy byla vypočtena jako 3. kvartil (horní kvartil $Q_{0,75}$) všech hodnot NDMP uvnitř nárazníkové zóny („bufferu“) o velikosti 1 m kolem obrysu budovy. Tento způsob byl zvolen vzhledem ke zjištěné polohové přesnosti obrysů budov ZABAGED® dle vyhodnocení v podkapitole 4.2. Spodní výška střechy by měla odpovídat referenční výšce *generalEave* dle směrnice INSPIRE pro téma budov (podkapitola 7.1, obr. 151). Celková výška střechy byla vypočtena jako horní výška mínus spodní výška. Barevné ortofoto bylo převedeno do stupňů šedi jako vážený součet červeného (R), zeleného (G) a modrého (B) kanálu dle následující rovnice (5) [150]. [120]

$$0,299*R + 0,587*G + 0,114*B \quad (5)$$

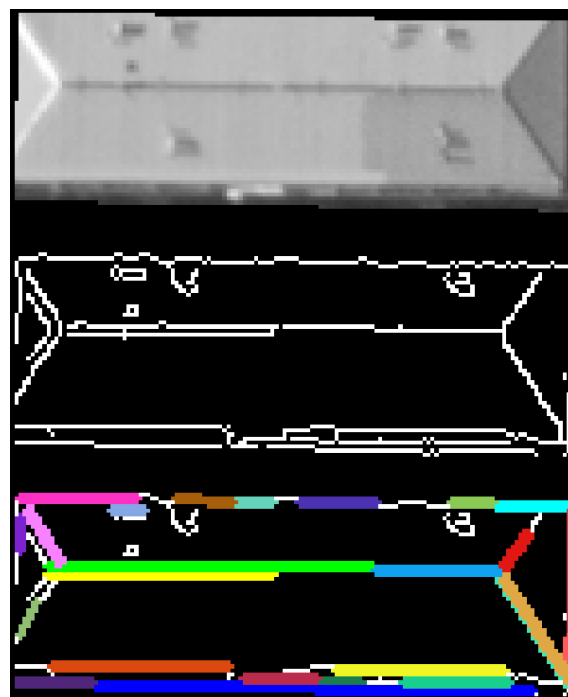
9.2.2 Detekce hran

Střešní hrany byly detekovány z ortofota ve stupních šedi pomocí algoritmu Line Segment Detector (LSD). Algoritmus LSD detekuje lokálně rovné kontury (liniové segmenty) v obrázcích ve stupních šedi bez nutnosti úpravy parametrů [142]. Podle autorů [143] je LSD nástroj pro automatickou analýzu, který funguje na podobném principu jako lidský zrak, kdy detailnost hran odpovídá velikosti analyzovaného obrazu. Tento hranový detektor byl vybrán, protože dosahuje uspokojivých výsledků bez potřeby úpravy parametrů, je rychlý

a je součástí knihovny Open Source Computer Vision (OpenCV) [144]. Jedná se tak o vhodný algoritmus pro zcela automatickou detekci hran. Limitací algoritmu je zpracování obrazu pouze v odstínech šedi, tedy některé hrany mohou převodem barevného obrazu do stupňů šedi ztraceny. Toto omezení není nevýhodou při detekci střešních hran, které jsou typicky definovány střešními rovinami s různou světlostí v závislosti na jejich expozici vůči Slunci. LSD byl porovnán se standardní technikou pro detekci hran založenou na Cannyho hranovém detektoru [145] s automatickou volbou parametrů [146] následovaný progresivní pravděpodobnostní Houghovou transformací [147] pro detekci linií. Výsledky detekce hran pomocí obou přístupů jsou na obrázcích 162 a 163. Oba přístupy detekovaly hrany, které reprezentují hlavní hrany střechy a další elementy jako vikýře a obvod střechy. Identifikované hrany po obvodu střechy byly detekovány z důvodu použití výřezu ortofota dle obrysu budovy, a tedy výskytu náhlé změny hodnot na okraji budovy. Na základě vizuálního porovnání poskytuje LSD (obr. 162) lepší výsledky. Detekované hrany na sebe navazují a nepřekrývají se, což je důležité pro následné zpracování. Následné zpracování (v angličtině post-processing) spočívá ve spojení přibližně navazujících hran a odfiltrování duplicitních hran. [120]



Obr. 162. Ortofoto budovy s valbovou střechou (nahore) a detekované hrany pomocí algoritmu Line Segment Detector (dole) [120]

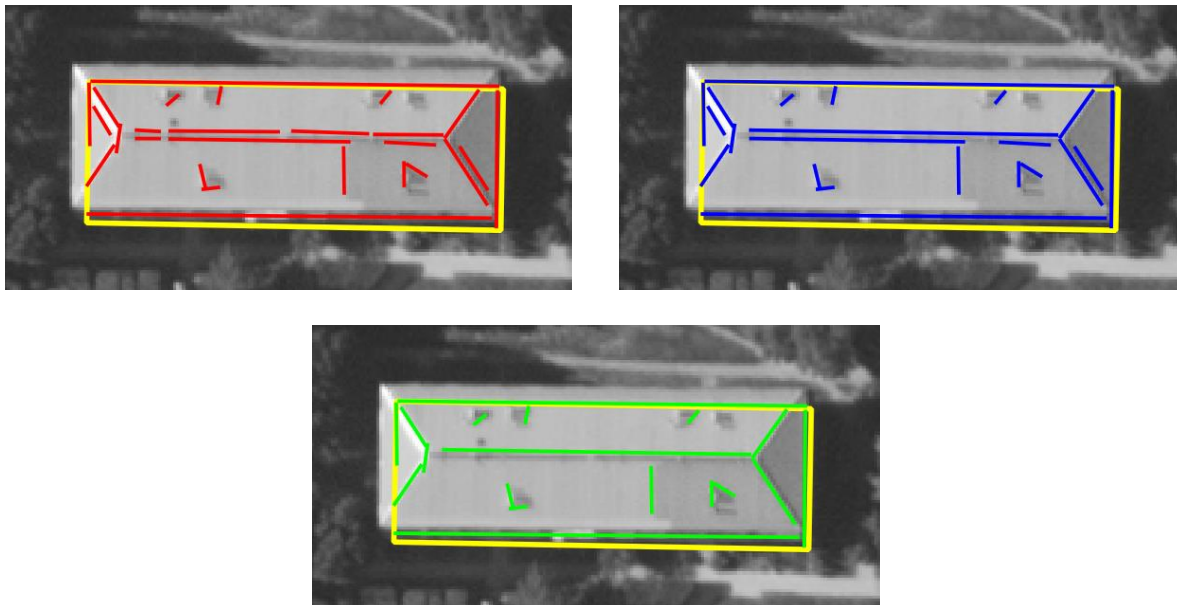


Obr. 163. Ortofoto budovy s valbovou střechou (nahore) a výsledek Cannyho hranového detektoru s automatickou volbou parametrů (uprostřed) následovaný progresivní pravděpodobnostní Houghovou transformací (dole) [120]

9.2.3 Následné zpracování hran

Vytvořená metoda je založena na detekci a kategorizaci střešních hran. Pro zajištění správné kategorizace je nutné, aby detekované hrany představovaly smysluplné elementy střechy (hřebeny, nároží, úžlabí, vikýře). Některé elementy střechy však byly při detekci hran fragmentovány (hřeben na obr. 162) nebo duplikovány (hřeben a dvě nároží na obr. 162). Z tohoto důvodu byly před kategorizací přibližně navazující hrany spojeny a duplicitní hrany odfiltrovány. Detekované hrany byly spojeny pokud měly podobný úhel (rozdílový úhel

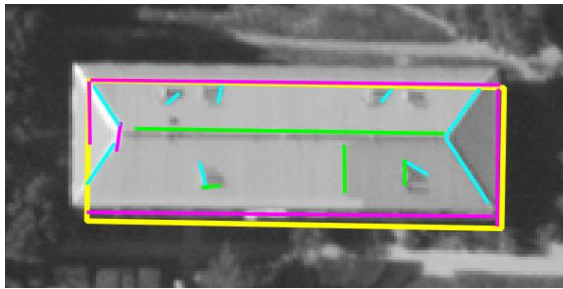
$\delta \leq 9^\circ$), přiléhaly k sobě (vzdálenost koncových bodů $\leq 1,25$ m) a jejich spojením vznikla nová hrana s délkou větší než délka každé ze spojovaných hran. Úhel hran je počítán pouze v rozsahu od 0-180°, z čehož vyplývá, že orientace hran není uvažována. Následně byly odfiltrovány duplicitní hrany. Duplicitní hrana je každá kratší paralelní hrana (leží ve vzdálenosti do 1 m) k hraně jiné. Výsledky spojení a filtrace jsou na obrázku 164. Hrany reprezentující hřeben střechy byly spojeny a kratší duplicitní hrany byly odfiltrovány. [120]



Obr. 164. Ortofoto budovy s valbovou střechou, obrys budovy (žlutě), detekované hrany (červeně, nahoře vlevo), spojené hrany (modře, nahoře vpravo) a výsledné hrany po filtraci (zeleně, dole uprostřed) [120]

9.2.4 Kategorizace hran

Kategorizace hran je založena na analýze jejich výšky dle NDMP, vzájemných prostorových vztazích a vztazích vůči obrysu budovy. Kategorizace vede k identifikaci hřebenů, nároží/úžlabí a okapnic. Identifikace hřebenu střechy je založena na několika charakteristických vlastnostech. Hlavní specifické vlastnosti hřebene jsou: paralelnost s alespoň jednou stranou budovy ($\delta \leq 9^\circ$), malý rozdíl ve výšce koncových bodů ($h \leq 2$ m) a v případě tzv. hlavního hřebene by výška koncových bodů měla odpovídat horní výšce střechy ($h \leq 2$ m). Nároží a úžlabí jsou kategorizována dle jiných vlastností. Hrana je označena jako nároží/úžlabí pokud není paralelní ($\delta > 9^\circ$) s žádným segmentem obrysu budovy a zároveň neleží celá v blízkosti ($d > 1$ m) obrysu budovy. Nároží/úžlabí o délce min. 2,5 m musejí mít výškový rozdíl koncových bodů alespoň 0,5 m. Pro nároží/úžlabí s délkou kratší než 2,5 m není rozdíl výšky koncových bodů kontrolován a pro jejich klasifikaci postačují pouze první dvě podmínky. Zbývající hrany jsou klasifikovány jako okapnice nebo nekategorizované hrany. Okapnice je hrana paralelní ($\delta \leq 9^\circ$) s jakýmkoliv segmentem obrysu budovy a zároveň leží celá v blízkosti ($d \leq 1$ m) obrysu budovy. Okapnice musejí mít malý rozdíl ve výšce koncových bodů ($h \leq 2$ m). Všechny ostatní hrany, které nesplnily předchozí klasifikační kritéria pro střešní elementy byly označeny jako nekategorizované. Výsledky kategorizace hran jsou na obrázku 165. Všechny hrany reprezentující hlavní elementy střechy byly správně kategorizovány. [120]



Obr. 165. Ortofoto budovy s valbovou střechou, obrys budovy (žlutě) a kategorizované hrany: hřebeny (zeleně), nároží/úžlabí (azurově), okapnice a nekategorizované (magenta) [120]

Z důvodu následujícího zpracování jsou hřebeny a nároží/úžlabí seřazeny. Hřebeny jsou seřazeny podle výšky (od nejvyšších po nejnižší) a nároží/úžlabí podle délky (od nejdelších po nejkratší). Rekonstrukce modelu střechy začíná nejvyšším hřebenem a k němu přiléhajícími nárožími/úžlabími. Nároží/úžlabí jsou považována za přilehlá k hřebenu pokud se nachází jeden z jejich koncových bodů blízko ($d < 1,5$ m) k jednomu z koncových bodů hřebene. Nároží a úžlabí jsou od sebe odlišeny podle jejich orientace k hřebeni. Nároží tvoří s hřebenem tupý úhel, zatímco úžlabí tvoří s hřebenem ostrý úhel. [120]

9.2.5 Definice typů střech

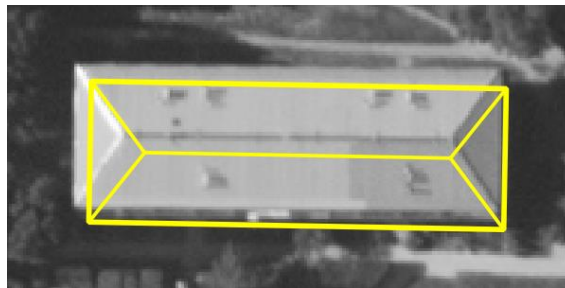
Typ více-rovinné střechy (valbová/polovalbová, sedlová, stanová nebo vikýř) je určen podle existence hřebenu, jeho polohy vůči obrysu budovy a existenci k hřebenu přiléhajících nároží/úžlabí. Valbová (a polovalbová) střecha je definována jako střecha s jedním hřebenem a alespoň jedním přiléhajícím nárožím (obr. 165). Sedlová střecha je určena jako střecha s jedním hřebenem, žádným přiléhajícím nárožím a alespoň jedním koncovým bodem hřebene v blízkosti ($d < 1.5$ m) obrysu budovy. Vikýř je specifikován jako střecha s jedním hřebenem, alespoň jedním přiléhajícím úžlabím a žádným nárožím. Stanová střecha je definována jako střecha nemající hřeben, ale mající alespoň jedno nároží. Typ jedno-rovinné střechy (plochá nebo pultová) je určen na základě výškové analýzy okapnic (obvodových segmentů) a přibližných výšek střechy. Plochá střecha je definována jako střecha s podobnou výškou obvodových segmentů, spodní a horní výšky střechy. Pultová střecha je specifikována jako střecha, která má stejně skloněné paralelní okapnice. Střecha je klasifikována jako neznámá, pokud konfigurace hran nebo výšková analýza neodpovídá předchozím definicím typů střech. [120]

9.2.6 Tvorba modelů střech

Z důvodu použití konvenčního ortofota, s radiálními posuny obrazu mimo terénních objektů, mohou být detekované elementy střechy (hřebeny, nároží, úžlabí) posunuty vůči své skutečné poloze. Jejich polohu tak nelze využít pro tvorbu modelů střech jako v případě práce [134], která využívala věrné ortofoto. Z tohoto důvodu jsou modely pro jednotlivé typy střech vytvářeny podle předem definovaných pravidel s využitím informací o úhlech, délkách a topologii detekovaných hran. Společným pravidlem (nebo také omezením) pro všechny rekonstruované typy střech je využití obrysů budov s alespoň dvěma přibližně paralelními stranami (následně jako polygon). Společným pravidlem pro všechny typy střech s hřebenem je pak konstrukce hřebene vždy uprostřed mezi paralelními stranami polygonu. Úhel hřebenu je vypočten jako průměr úhlů paralelních stran polygonu, pokud mají úhel podobný ($\delta \leq 9^\circ$) jako detekovaný hřeben. Další definovaná pravidla pro rekonstrukci jednotlivých typů střech jsou uvedena dále v textu. [120]

9.2.6.1 Tvorba modelu valbové střechy

Tvorba modelu valbové střechy začíná konstrukcí hřebene podle definovaných pravidel. Délka konstruovaného hřebene odpovídá délce detekovaného hřebene. Hřeben je konstruován s využitím informací o úhlu a délce z centroidu polygonu (hlavní hřeben) nebo tzv. fixního koncového bodu hřebene (vedlejší hřeben). Následně jsou vytvořeny nároží. Nároží jsou úsečky spojující koncové body zkonstruovaného hřebene a nejbližší vrcholy polygonu. Po sestrojení nároží algoritmus kontroluje rozdíl úhlů detekovaných a zkonstruovaných nároží. Valbový typ střechy je potvrzen v případě, že alespoň jeden úhel zkonstruovaného nároží má podobný úhel ($\delta \leq 9^\circ$) jako jeden z úhlů detekovaného nároží. Vektorový model střechy (tzv. kostra) je vytvořen spojením hřebene, nároží a polygonu. Obrázek 166 ukazuje kostru valbové střechy. V případě, že si úhly zkonstruovaných a detekovaných nároží neodpovídají, pokračuje algoritmus tvorbou modelu polovalbové střechy. [120]



Obr. 166. Ortofoto budovy a kostra valbové střechy [120]

9.2.6.2 Tvorba modelu polovalbové střechy

Tvorba modelu polovalbové střechy je podobná tvorbě modelu valbové střechy. Konstrukce hřebene je zcela identická. Hlavní rozdíl je v tvorbě nároží, které jsou konstruovány na základě detekovaných úhlů. Z detekovaných nároží jsou vybrány ty, které svírají s hřebenem podobný úhel ($\delta \leq 9^\circ$) a následně je spočten jejich průměrný úhel. Pokud je detekováno pouze jedno nároží, použije se pouze jeho úhel. Nároží jsou sestrojeny jako úsečky spojující koncové body hřebene a průsečíky polopřímek nároží a stran polygonu kolmých k hřebenu. V případě rekonstrukce modelu polovalbové střechy neprobíhá žádná kontrola, protože všechny známé hodnoty jsou použity pro jeho sestrojení. Kostra polovalbové střechy je vytvořena spojením hřebene, nároží a polygonu. [120]

9.2.6.3 Tvorba modelu sedlové střechy

Model sedlové střechy je tvořen pouze hřebenem a polygonem. Stejně jako v předchozích případech probíhá tvorba hřebene podle definovaných pravidel. Hřeben je konstruován pouze pomocí informací o úhlu z centroidu nebo fixního koncového bodu hřebene. Koncové body hlavního hřebene jsou tvořeny průsečíky polopřímek hřebene a stran polygonu kolmých k hřebenu. V případě vedlejšího hřebene pouze jedním průsečíkem a fixním koncovým bodem hřebene. Délka detekovaného hřebene není využita pro jeho konstrukci nýbrž pro kontrolu výsledného modelu střechy. Model sedlové střechy je potvrzen pokud rozdíl v délce zkonstruovaného a detekovaného hřebene je menší než definovaný práh ($d < 2$ m). [120]

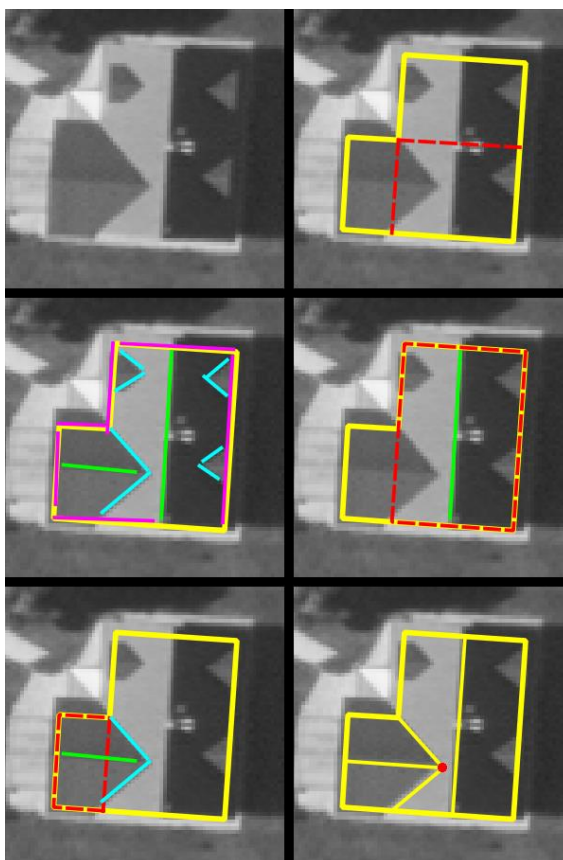
9.2.6.4 Tvorba modelu stanové střechy

Kostra stanové střechy je tvořena pouze 4 nárožími a polygonem. Nároží jsou sestrojeny jako úsečky spojující centroid a vrcholy polygonu. V případě stanové střechy se neporovnává délka detekovaných nároží s délkou konstruovaných nároží, protože při spojování hran

mohou být protější nároží spojena do diagonály polygonu. Typ stanové střechy je potvrzen, pokud úhel alespoň jednoho zkonstruovaného nároží odpovídá úhlu jednoho detekovaného nároží. [120]

9.2.6.5 Tvorba modelu střechy se složitým tvarem

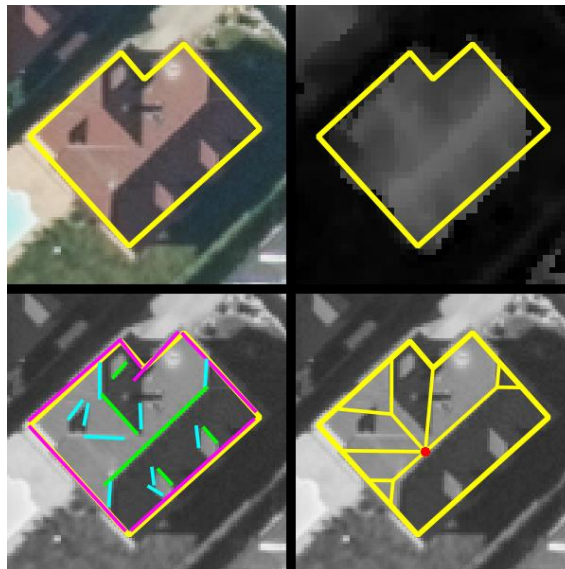
Pokud má obrys budovy více než 4 vrcholy je rozložen na jednodušší části. Rozložení obrysu spočívá v jeho rozdělení na jednotlivé obvodové úsečky a jejich prodloužení směrem dovnitř budovy. Vnitřní úsečky si lze představit jako řezy obrysem budovy v jeho lomových bodech. Vnitřní úsečky se mohou navzájem křížit a vytvářet tak další menší vnitřní úsečky. Cílem je zkombinovat obvodové úsečky a vnitřní úsečky (dále již jen jako úsečky) do podoby nejbližších paralelních úseček po obou stranách identifikovaného hřebenu. Takové úsečky definují dvě paralelní strany polygonu. V závislosti na existenci úžlabí přiléhajících ke hřebeni musí polygon splňovat určitá kritéria. Pokud neexistují úžlabí přiléhající ke hřebeni, jedná se o jednoduchý tvar polygonu, který odpovídá obdélníku. V případě sedlové střechy má hřeben a paralelní strany obdélníku přibližně stejnou délku ($d < 2$ m). V případě valbové a polovalbové střechy jsou paralelní strany obdélníku přibližně stejně dlouhé nebo delší než hřeben. Pokud existují úžlabí přiléhající ke hřebeni, jedná se o složitý tvar polygonu a jeho komplikovanost závisí na počtu úžlabí. Takový polygon představuje vedlejší obdélník a obsahuje tzv. fixní koncový bod hřebene. Fixní koncový bod hřebene je definován jako průsečík polopřímky úžlabí a přímky hřebene. Ukázka tvorby modelu střechy pro složitý obrys budovy je na obrázku 167. [120]



Obr. 167. Ortofoto budovy se složitým tvarem a sedlovou střechou,
 nahoře vpravo: obrys budovy (žlutě) a vnitřní úsečky (červeně),
 uprostřed vlevo: kategorizované hrany (barvy jako na obr. 165),
 uprostřed vpravo: hlavní hřeben (zeleně) a polygon (červeně),
 dole vlevo: vedlejší hřeben (zeleně), přiléhající úžlabí (azurově) a polygon (červeně),
 dole vpravo: kostra střechy (žlutě) s fix. koncovým bodem vedlejšího hřebene (červená tečka) [120]

9.3 Výsledky a diskuze

Mezi silné stránky vytvořené metody patří robustnost a topologická korektnost daná použitím pravidel pro rekonstrukci jednotlivých typů střech. Obrázek 168 znázorňuje tvorbu modelu střechy pro budovu ve tvaru písmene L s polovalbovou střechou. Při tvorbě modelu střechy nebyla detekována všechna nároží a detekovaná úžlabí jsou výrazně kratší než ve skutečnosti. Robustnost metody demonstruje tvorba modelu střechy i přes zmíněnou nekompletnost a nepřesnost detekce střešních elementů. Ve vytvořeném modelu střechy však došlo k napojení vedlejšího hřebene na hřeben hlavní, což neodpovídá skutečnému tvaru střechy. V důsledku mírně zjednodušeného obrysu budovy v jejím západním rohu došlo k určení fixního koncového bodu hřebene na odvrácené (na obrázku zastíněné) straně hlavní střechy, což vedlo ke křížení hlavního a vedlejšího hřebene. V případě že nastane tato situace, je fixní koncový bod hřebene posunut do průsečíku hřebenů, což vede ke změně úhlu konstruovaných úžlabí. Tento krok je validní, pokud rozdíl úhlu konstruovaných a detekovaných úžlabí je v toleranci ($\delta \leq 9^\circ$). Vytvořený model střechy je tak topologicky korektní a zároveň velmi blízký skutečnosti. V případě znázorněném na obrázku 168 byl použit NDMP s rozlišením 0,5 m/pixel vytvořený z OMB. [120]



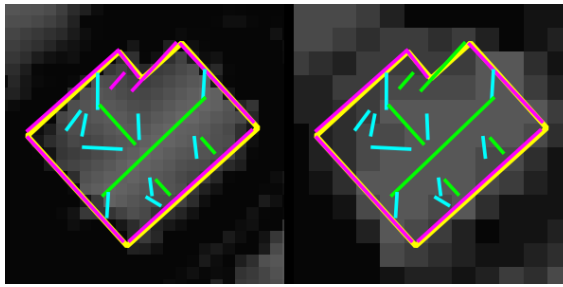
Obr. 168. Ortofoto budovy se složitým tvarem a polovalbovou střechou,
nahore vlevo: obrys budovy (žlutě),

nahore vpravo: NDMP s rozlišením 0.5 m/pixel a obrys budovy,

dole vlevo: kategorizované hrany (barvy jako na obr. 165),

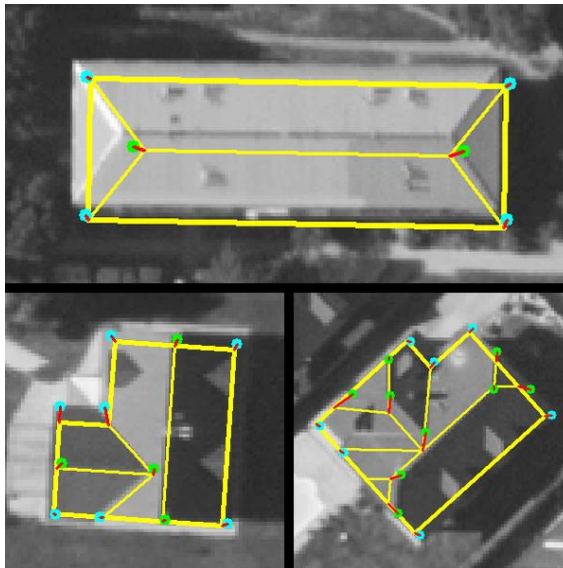
dole vpravo: model střechy (žlutě) s fix. koncovým bodem vedlejšího hřebene (červená tečka) [120]

Vytvořená metoda umožňuje použití NDMP různého rozlišení. Úspěšně otestovány byly NDMP s rozlišením 0,5 - 2 m/pixel. Střešní hrany jsou detekovány z ortofota a NDMP slouží pouze jako doplňující podklad k jejich kategorizaci. Pro úspěšnou rekonstrukci modelu střechy je nezbytná detekce všech klíčových elementů střechy, která je možná pouze v případě použití ortofota s vysokým rozlišením. Obrázek 169 ilustruje výsledky kategorizace hran při použití NDMP s rozlišením 1 a 2 m/pixel. Použití NDMP s rozlišením 1 nebo 2 m/pixel (obr. 169) vedlo pokaždé pouze k jedné změně v kategorizaci hran oproti použití NDMP s rozlišením 0,5 m/pixel (obr. 168). Tato změna se netýkala kategorizace klíčové hrany (hřebenu, nároží, úžlabí), a tudíž konstrukce modelu střechy nebyla ovlivněna. [120]



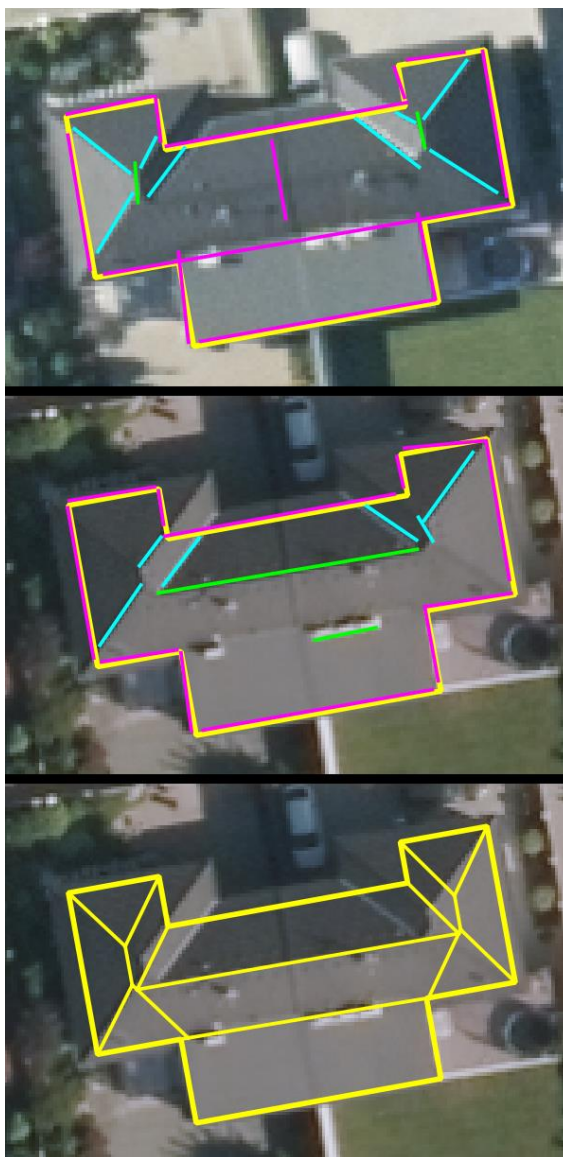
Obr. 169. NDMP s rozlišením 1 m/pixel a kategorizované hrany (barvy jako na obr. 165, vlevo), NDMP s rozlišením 2 m/pixel a kategorizované hrany (vpravo) [120]

Metoda byla testována na datasetu obsahujícím přibližně 30 budov různých tvarů (počet vrcholů polygonu: 4-16) a složitosti střech (počet typů střech pro jednu budovu: 1-3). Ukázky vyhodnocení budov s jednoduchým a středně složitým tvarem jsou na obrázku 170. K získání referenčních dat ve formě odpovídajících 3D bodů (barevné tečky na obrázku 170) bylo využito stereofotogrammetrické vyhodnocení. Odmocnina ze střední kvadratické chyby (v angličtině Root Mean Square Error, zkráceně RMSE) [149] byla vypočtena pro každou budovu mezi referenčními body a vrcholy polygonu (vstupní data) a uzlovými body kostry střechy (konstruovaná data). Průměrná hodnota RMSE pro polygon budovy je 0,73 m a 0,92 m pro uzlové body kostry střechy. [120]



Obr. 170. Ukázky vyhodnocení s referenčními body na okapních hranách (azurové tečky), hřebenech/náročích (zelené tečky) a posuny mezi odpovídajícími si body (červeně) [120]

Vyhodnocením bylo zjištěno, že neúspěšné rekonstrukce modelů střech byly většinou způsobeny z důvodu neúplné detekce klíčových střešních elementů. Příčinnou bylo nevhodné nasvětlení střechy, které znemožňovalo detekci některých hran. Možné řešení uvedeného problému představuje použití multitemporálních obrazových dat s odlišnou pozicí Slunce na obloze. V případě ortofot se může jednat o LMS z předešlé periody snímkování. Různé nasvícení střešního pláště zpravidla vede k detekci jiných střešních hran. Kombinace střešních hran z různých období pak umožňuje zrekonstruovat model střechy. Na obrázku 171 se nachází budova se složitým tvarem a kategorizovanými hranami v různých časových obdobích (rok 2014 a 2016) a výsledný model střechy, který vznikl jejich kombinací. [120]



Obr. 171. Ortofoto budovy se složitým tvarem a kategorizovanými hranami (barvy jako na obr. 165) v roce 2014 (nahore), v roce 2016 (uprostřed) a rekonstruovaný model střechy (dole) [120]

Nevýhodou vytvořené metody jsou omezení vycházející z aplikace pravidel pro jednotlivé typy střech. Největším omezením současné implementace je neumožnění rekonstrukce hřebenů střech na jiném místě než uprostřed obrysu budovy a nedefinovaných typů střech (pilová, mansardová, motýlová, kopulovitá atd.). Další nevýhodou metody je způsob určení výšky detekovaných hran, který neuvažuje radiální posuny obrazů střech budov. Detekované hrany střechy jsou prakticky vždy horizontálně (polohově) posunuty. Pro jejich kategorizaci jsou však použity výšky koncových bodů určené z polohově správného NDMP. Nepřesné určení výšek může v extrémních případech vést k chybné kategorizaci hran a tím k nemožnosti vytvořit model střechy. Z tohoto důvodu je vhodné používat pouze středové části ortogonalizovaných snímků, kde je posun obrazu minimální. Středové části ortogonalizovaných snímků jsou běžně použity v bezešvé ortofoto mozaice (ortofotu), která byla použita v rámci metody. Z přechozího vyplývá, že věrné ortofoto je ideálním podkladem pro detekci hran a šikmé snímky jsou zcela nevhodné. Pro zajištění tvorby co nejpřesnějších 3D modelů budov je tedy nutné po vytvoření modelu střechy znovu určit výšky všech uzlových bodů. [120]

10 Závěr

V rámci práce byla navržena a otestována metoda pro aktualizaci budov v ZABAGED®. Vytvořená metoda se řadí mezi hybridní detekce změn budov a využívá bitemporální multispektrální digitální LMS jako jediný zdroj informací pro automatickou detekci změn budov. LMS byly vybrány jako nejvhodnější typ leteckých dat pro provádění aktualizace, protože jejich sběr probíhá periodicky pro celé území ČR. LMS jsou využity ve formě ortofotosnímků a DMP vytvořeného obrazovou korelací. Analýza dat probíhá ve dvou částech. První část používá rastrový přístup k identifikaci míst se změnou výšky umělých objektů kategorizovaných do 5 tříd (nová, zvýšená, nezměněná, snižená, zbořená). Identifikace změn je založena na porovnání DMP a spektrálním vyhodnocení pro odlišení vegetace. Rastrové zpracování vede k nadhodnocení množství změn. Druhá část analýzy je založena na objektovém zpracování, které je použito k odfiltrování chybných a nadbytečných indikací změn, které nepřísluší budovám. Objektová analýza využívá klasifikaci stínů jako kontextuální informaci pro verifikaci indikací změn. Filtrace chybných indikací je založena na předpokladu, že existující budovy vrhají stín ve směru slunečního svitu a zbořené nikoliv. Výhoda odděleného rastrového a objektového zpracování spočívá v předvýběru míst pro provedení segmentace obrazu. Segmentace obrazu, výpočetně náročná část objektové analýzy, tak není prováděna pro celý snímek, ale pouze okolí potenciálních změn, což přispívá k rychlejšímu zpracování dat a nižším nárokům na hardware. Metoda byla otestována na několika zájmových lokalitách s různými typy sídelních útvarů (vesnice, předměstí) o celkové rozloze 20 km². Vyhodnocení prokázalo velmi dobré výsledky metody v podobě průměrné korektnosti 94 % a průměrné kompletnosti 89 %.

Metoda byla vytvořena pro aktualizaci budov v ZABAGED® a je založena na současném přechodném stavu geodatabáze, kdy jsou budovy (obecně stavební objekty) vedeny ve dvojí podobě (v původní nezpřesněné a nové zpřesněné), přičemž každá z nich je aktualizována odlišným způsobem. Aktualizace nové evidence zpřesněných stavebních objektů (SO) ZABAGED® je založena na identifikaci změn v použité a aktuální kresbě ISKN. Využití výsledků metody v procesu aktualizace budov v ZABAGED® umožňuje provádění zcela nezávislé kontroly kresby budov. Metoda nachází své uplatnění především pro aktualizaci zpřesněných SO doplněných nad rámec katastrální kresby, které nelze aktualizovat jinak než pomocí leteckých dat. Metoda by tak měla přispět k zajištění trvale udržitelné kvality kresby budov v ZABAGED®.

Ačkoliv byla metoda navržena pro potřeby aktualizace budov v ZABAGED®, z předchozího textu vyplývá jedna z hlavních výhod metody, která by se dala popsat jako určitá nezávislost na způsobu a přesnosti vedení budov v geodatabázi. Pro použití metody nezáleží, zda budovy v geodatabázi mají zcela přesnou pozici a jejich obrysy korespondují s tvarem obvodových zdí nebo střešního pláště. Při návrhu metody byl také kladen důraz na využití pouze základních parametrů, které jsou obecné a snadno modifikovatelné. Vytvořená metoda tak může být označena jako univerzálně použitelná a mohla by najít uplatnění i u jiných organizací, s odlišnými požadavky a pro různé způsoby evidence budov.

V druhé polovině této práce byl představen obsah jedné části směrnice INSPIRE, která se týká prostorových dat budov. Při podrobné analýze tohoto dokumentu bylo zjištěno, že harmonizační rámec je připraven zcela univerzálně a jeho implementace probíhá dle lokálně dostupných dat. Současné evidence budov rezortu ČÚZK však neumožňují tvorbu a publikaci dnes tolik žádaných 3D modelů budov. Tato situace by se měla změnit se zpřesněním zákresu

budov v ZABAGED®. Po splnění této podmínky bude možné na podkladě dostupných výškopisných dat rozšířit dvojrozměrný zákres budov o třetí rozměr a vytvořit 3D modely budov.

Testovaná dostupná komerční řešení pro tvorbu 3D modelů budov z leteckých dat ZÚ však nenabízejí dostatečně kvalitní výsledky. Na základě analýzy odborné literatury tak byla navržena metoda pro automatickou rekonstrukci modelů střech při využití obrysů budov ZABAGED®, ortofota a NDMP. Metoda byla vytvořena a testována na produkčních prostorových datech ZÚ s rozlišením 0,25 m/pixel pro ortofoto a 0,5-2 m/pixel pro DMP. Použitá data patří z hlediska typu a kvality mezi běžně dostupné prostorové datasety, díky čemuž je metoda široce použitelná (nejen pro ČR) a dokládá, že tvorba topologicky správných a realistických modelů střech (obecně 3D modelů budov) nevyžaduje použití datasetů s extrémně vysokým prostorovým rozlišením. Rekonstrukce modelu střechy je založena na extrakci střešních hran z ortofota a jejich kategorizaci podle výškových informací a prostorových vztahů. Kategorizované hrany jsou použity k určení typu střechy a klíčových parametrů (především úhlů a délek nároží a úžlabí). Budovy se složitým tvarem jsou řešeny po částech. Dekompozice na jednodušší tvary probíhá podle identifikovaných hřebenů a přilehajících úžlabí. Popsaná metoda umožňuje tvorbu modelů střech složených z různých typů (sedlová, valbová, polovalbová, stanová, plochá a pultová). Tvorbu modelů střech lze ovlivnit pomocí několika parametrů, které představují převážně délkové a úhlové tolerance. Dosažené výsledky lze označit za uspokojivé a motivující k dalšímu vývoji metody. Budoucí vývoj metody bude zaměřen na možnost použití zcela blokovaných půdorysů budov (historická městská centra), extrakci výškových hran z přesného NDMP a implementaci dalších typů střech. Budoucí plány také obsahují tvorbu 3D modelů budov podle standardu CityGML a rozsáhlejší testování ve spolupráci se ZÚ, které by mohlo vést k tvorbě nových 3D produktů.

11 Seznam použité literatury

[1] HRON, Vojtěch. Ověření možnosti zahuštění dat leteckého laserového skenování metodou obrazové korelace. Semestrální práce z předmětu D53DFM. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie. Praha, 2013.

[2] BĚLKA, Luboš, Petr DUŠÁNEK, Radek FIALA, Jakub GAMRÁT, Oldřich KAFKA, Josef PEICHL a Jiří ŠÍMA. Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G) [online]. Zeměměřický úřad. Pardubice, 2010. Aktualizace: 15.1.2012. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_4G_15012012.pdf

[3] RIEGL LMS-Q680i. RIEGL - Produktdetail [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/23/>

[4] LiteMapper 6800. IGI - Smart Solutions [online]. 2015. Dostupné z: <http://www.igi.eu/lm-6800.html>

[5] DUŠÁNEK, Petr. Projekt nového výškopisného mapování ČR 2009-2013. Prezentace. Zeměměřický úřad, Zeměměřický odbor Pardubice, 2018.

[6] Datové sady: ZABAGED® - výškopis. Geoportál ČÚZK [online]. c2010. Poslední revize: 13.02.2018. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/Default.aspx?mode=TextMeta&text=vyskopisZBG&side=vyskopis&head_tab=sekce-02-gp&menu=30

[7] Datové sady: Ortofoto České republiky. Geoportál ČÚZK [online]. c2010. Poslední revize: 11.04.2019. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/Default.aspx?mode=TextMeta&text=ortofoto_info&side=ortofoto&menu=23

[8] UltraCam Photogrammetric Digital Aerial Mapping Systems: UltraCamXp - Technical. UltraCam [online]. c2012. Dostupné z: <http://www.microsoft.com/ultracam/en-us/UltraCamXpTechnical.aspx>

[9] Microsoft UltraCam Blog [online]. 2012. Dostupné z: <https://ultracam.wordpress.com/page/14/>

[10] Mapový podklad © Český úřad zeměměřický a katastrální, www.cuzk.cz

[11] HRON, Vojtěch. Využití leteckých dat pro aktualizaci budov v ZABAGED®. Odborná studie. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geomatiky. Praha, 2015.

[12] HRON, Vojtěch. Klasifikace leteckých barevných snímků s využitím dat laserového skenování. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra mapování a kartografie. Praha, 2012.

[13] VÝROČNÍ ZPRÁVA 2015. Zeměměřický úřad [online]. 2016. Dostupné z: <https://www.cuzk.cz/Urady/Zememericcky-urad/Zpravy-ZU/Vyrocnizpravy-ZU-souhrne-informace.aspx>

[14] Leica ALS80-CM: City Mapping Airborne LIDAR Product Specifications. Leica [online]. Dostupné z: http://apps.hexagon.se/downloads123/zz/airborne/ALS80/product-specification/Leica_ALS80_CM_ProductSpec_en.pdf

[15] SHAN, Jie a Charles K. TOTH. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. Second Edition. Boca Raton: CRC Press, 2018. ISBN 978-149-8772-273.

[16] Leica ALS80: Fast & flexible airborne LiDAR sensor. Leica [online]. Dostupné z: http://apps.hexagon.se/downloads123/zz/airborne/ALS80/brochures-datasheet/Leica_ALS80_DS_en.pdf

[17] The Leica ADS100 Airborne Digital Sensor: Airborne Evolution. Leica [online]. Dostupné z: http://apps.hexagon.se/downloads123/zz/airborne/ADS100/brochures-datasheet/Leica_ADS100_DS_en.pdf

[18] HRON, Vojtěch. Využití obrazové korelace leteckých měřických snímků pro potřeby aktualizace budov v ZABAGED® [online]. Digitální technologie v geoinformatice,

kartografií a dálkovém průzkumu země. Praha: ČVÚT v Praze, Fakulta stavební, 2014, s. 53-61. ISBN 978-80-01-05598-4. Dostupné z: <http://gkinfo.fsv.cvut.cz/2014/sbornik2014.pdf>

[19] HRON, Vojtěch, Lena HALOUNOVÁ. Use of Aerial Images for Regular Updates of Buildings in the Fundamental Base of Geographic Data of the Czech Republic [online]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. Munich: ISPRS, 2015, p. 73-79. ISSN 1682-1750. Dostupné z: <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-3-W2/73/2015/isprsarchives-XL-3-W2-73-2015.pdf>

[20] HRON, Vojtěch. Srovnání normalizovaných digitálních modelů povrchu z leteckých dat na části území města Černošice. Specializovaná mapa s odborným obsahem. ČVUT v Praze, FSv, 2014.

[21] Mandlbürger, G. et al., 2017. IMPROVED TOPOGRAPHIC MODELS VIA CONCURRENT AIRBORNE LIDAR AND DENSE IMAGE MATCHING. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, IV-2/W4, pp. 259–266. DOI:10.5194/isprs-annals-iv-2-w4-259-2017

[22] Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí [online]. VÚGTK, c2005-2019 [cit. 2019-08-21]. Dostupné z: <http://www.vugtk.cz/slovník/index.php>

[23] HRON, Vojtěch. Problematika tvorby vektorových modelů budov. Praha, 2014. Odborná studie. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geomatiky.

[24] ČÚZK: Geoportál: Katastr nemovitostí [online]. ČÚZK. c2010. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/%28S%281oredyJ0qgevbe45hhxuyx2c%29%29/Default.aspx?mode=TextMeta&side=katastr&text=katastr_uvod&news=yes&menu=21

[25] Současný stav katastrálních map. Certifikační autorita katastrálních informací [online]. Dostupné z: <https://www.caki.cz/soucasny-stav-katastralnich-map/>

[26] Digitalizace katastrálních map a další postup obnovy katastrálního operátu. ČÚZK [online]. Praha, c2019 [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: <https://www.cuzk.cz/Katastr-nemovitosti/Digitalizace-a-vedeni-katastralnich-map/Digitalizace-katastralnich-map/Digitalizace-katastralnich-map.aspx>

[27] HRON, Vojtěch. Problematika tvorby vektorových modelů budov. Praha, 2014. Semestrální práce z předmětu D53DMK. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra geomatiky.

[28] ŠÍMA Jiří. Vyhodnocení přesnosti technologie nápravy budov v ZABAGED® s využitím geodat z DKM, LLS a ortofotosnímků. Technická zpráva. 2013. 11 s. Zeměměřický úřad.

[29] ČÚZK: Geoportál: Základní báze geografických dat České republiky. ČÚZK: Geoportál: Základní báze geografických dat České republiky [online]. c2010. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/%28S%28yj2bzhif3mxyzn45zdy4bj45%29%29/default.aspx?mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24

[30] PRESSOVÁ, Jana. Katalog objektů ZABAGED®. verze 3.0 ve znění dodatku č.1 a č. 2. Praha: Zeměměřický úřad, 2018, 166 s. Dostupné z: https://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/KATALOG_OBJEKTU_ZABAGED_2018.pdf

[31] HRON, Vojtěch. Návrh aktualizace budov ZABAGED®. Verze: 1.0. Praha, 2015. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.

[32] ŠÍMA Jiří. Výsledky geodetického ověření zvýšení přesnosti vybraných typů objektů v ZABAGED® s využitím geodat z KMD a ortofotosnímků. Technická zpráva. 2018. 51 s. Zeměměřický úřad.

[33] SETNIČKA, Martin, Vojtěch HRON a Karel BRÁZDIL. Informační zpráva o přípravě technologie zpřesnění staveb v ZABAGED s využitím DMP 1G a dalších resortních zdrojů dat. Pardubice, 2013, 11 s. Zeměměřický úřad, Zeměměřický odbor Pardubice.

- [34] Principy dalšího vedení budov ZABAGED. Pracovní verze. Pardubice, 2013, 18 s. Zeměměřický úřad, Zeměměřický odbor Pardubice.
- [35] ŠÁRA, Pavel a Zdeněk VALENTA. Pracovní postup zpřesňování stavebních objektů. Verze 3.1. Praha, 2019, 72 s. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.
- [36] Metodický pokyn práce s kresbou budov katastru. Verze 2.0. Praha, 2015. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.
- [37] SETNIČKA Martin, Filip Skalický, Tomáš Stolička a Pavel Šára. Pracovní postup zapracování zpřesněných stavebních objektů ZABARAK do ZABAGED. Verze 1.2. 58 s. Zeměměřický úřad.
- [38] Katastrální mapa. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2019-07-29]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Katastr%C3%A1ln%C3%AD_mapa
- [39] Singh, A., 1989. Review Article: Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (6), pp. 989-1003. DOI: 10.1080/01431168908903939
- [40] Bouziani, M., Goïta, K., He, D.C., 2010. Automatic change detection of buildings in urban environment from very high spatial resolution images using existing geodatabase and prior knowledge. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, pp. 143-153.
- [41] Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D., 2013. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80, pp. 91-106.
- [42] Lunetta, R.S., Elvidge, C.D., 1999. Remote sensing change detection. In: *Environmental Monitoring Methods and Applications*. Taylor & Francis, London, pp. 318.
- [43] Jung, F., 2004. Detecting building changes from multitemporal aerial stereopairs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58, pp. 187–201.
- [44] Murakami, H., Nakagawa, K., Hasegawa, H., Shibata, T. and Iwanami, E., 1999. Change detection of buildings using an airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, pp. 148–152.
- [45] Masaharu, H. and Hasegawa, H., 2000. Three-dimensional city modeling from laser scanner data by extracting building polygons using region segmentation method. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, pp. 556–562.
- [46] Rottensteiner, F. and Briese, C., 2002. A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34, pp. 295–301.
- [47] Vu, T.T., Matsuoka, M. and Yamazaki, F., 2004. LIDAR-based change detection of buildings in dense urban areas. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5, pp. 3413–3416.
- [48] Wang, Z. and Schenk, T., 2000. Building extraction and reconstruction from lidar data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33, Amsterdam, The Netherlands.
- [49] Sampath, A. and Shan, J., 2007. Building boundary tracing and regularization from airborne LIDAR point clouds. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73, pp. 805–812.
- [50] Matikainen, L., Hyyppä, J., Kaartinen, H., 2004. Automatic detection of changes from laser scanner and aerial image data for updating building maps. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, pp. 434–439.

- [51] Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S. and Kubik, K., 2007. Building detection by fusion of airborne laser scanner data and multi-spectral images: performance evaluation and sensitivity analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62, pp. 135–149.
- [52] Walter, V., 1999. Comparison of the potential of different sensors for an automatic approach for change detection in GIS databases. In: *Integrated Spatial Databases: Digital Images and GIS. International Workshop ISD '99. In: Lecture Notes in Computer Science*, Springer, pp. 47-63.
- [53] Armenakis, C., Leduc, F., Cyr, I., Savopol, I., Cavayas, F., 2003. A comparative analysis of scanned maps and imagery for mapping applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57 (5-6), pp. 304-314.
- [54] Baltsavias, E.P., 2004. Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: Current status and steps towards operational systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58 (3-4), pp. 129-151.
- [55] Holland, D.A., Boyd, D.S., Marshall, P., 2006. Updating topographic mapping in Great Britain using imagery from high-resolution satellite sensors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60 (3), pp. 212-223.
- [56] Chen, L.C., Huang, C.Y., and Teo, T.A., 2012. Multi-type change detection of building models by integrating spatial and spectral information. *International Journal of Remote Sensing*, 33 (6), pp. 1655–1681.
- [57] Al-Khudhairy, D.H.A., Caravaggi, I., Giada, S., 2005. Structural damage assessments from Ikonos data using change detection, object-oriented segmentation, and classification techniques. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 71(7), pp. 825–837.
- [58] Niemeyer, I., Marpu, P.R., Nussbaum, S., 2008. Change detection using object features. In: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G.J. (Eds.), *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 185–201.
- [59] Hofmann, P., Strobl, J., Blaschke, T., Kux, H., 2008. Detecting informal settlements from QuickBird data in Rio de Janeiro using an object-based approach. In: Blaschke, T., Lang, S., Hay, G.J. (Eds.), *Object-Based Image Analysis: Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 531–553.
- [60] Hofmann P., 2001. Detecting Informal Settlements from IKONOS Image Data Using Methods of Object Oriented Image Analysis – An Example from Cape Town (South Africa). In: Jürgens, C. (Ed.), *Remote Sensing of Urban Areas / Fernerkundung in urbanen Räumen*. Regensburg: University Regensburg, Germany, 2001, pp. 107-118.
- [61] Gamanya, R., De Maeyer, P., De Dapper, M., 2009. Object-oriented change detection for the city of Harare, Zimbabwe. *Expert Systems with Applications*, 36, pp. 571–588.
- [62] Gamanya, R., De Maeyer, P., De Dapper, M., 2007. An automated satellite image classification design using object-oriented segmentation algorithms: A move towards standardization. *Expert Systems with Applications*, 32, pp. 616-624.
- [63] Bouziani, M., Goïta, K., He, D.C., 2007. Change detection of buildings in urban environment from high spatial resolution satellite images using existing cartographic data and prior knowledge. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Spain, pp. 2581-2584.
- [64] Huang, X., Zhang, L., Zhu, T., 2014. Building Change Detection From Multitemporal High-Resolution Remotely Sensed Images Based on a Morphological Building

Index. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 7(1), pp. 105-115.

[65] Huang, X., Zhang, L., 2011. A multidirectional and multiscale morphological index for automatic building extraction from multispectral GeoEye-1 imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77(7), pp. 721-732.

[66] Huang, X., Zhang, L., 2012. Morphological building/shadow index for building extraction from high-resolution imagery over urban areas. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(1), pp. 161-172.

[67] Knudsen, T., Olsen, B.P., 2003. Automated change detection for updates of digital map databases. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(11), pp. 1289-1296.

[68] Walter, V., 2004. Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58, pp. 225-238.

[69] Matikainen, L., Hyypä, J., Ahokas, E., Markelin, L., Kaartinen, H., 2010. Automatic Detection of Buildings and Changes in Buildings for Updating of Maps. *Remote Sensing*, 2(5), pp. 1217-1248.

[70] Haralick, R.M., Dinstein, I., Shanmugam, K., 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3(6), pp. 610-621. DOI: 10.1109/TSMC.1973.4309314

[71] Matikainen, L., Hyypä, J., Hyypä, H., 2003. Automatic detection of buildings from laser scanner data for map updating. In: *The ISPRS Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Germany, Vol. XXXIV, Part 3/W13, pp. 218-224.

[72] Gladstone, C.S., Gardiner, A., Holland, D. 2012. A semi-automatic method for detecting changes to Ordnance Survey topographic data in rural environments. *Proceedings of the 4th GEOBIA*. pp. 396-401. Dostupné z: <http://mtc-m16c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.14.17.56/doc/110.pdf>

[73] Qin, R., Huang, X., Gruen, A., Schmitt, G., 2015. Object-Based 3-D Building Change Detection on Multitemporal Stereo Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(5), pp. 2125-2137.

[74] Hirschmüller, H., 2008. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2), pp. 328-341. DOI: 10.1109/TPAMI.2007.1166

[75] HRON, Vojtěch. Využití obrazové korelace leteckých měřických snímků pro potřeby aktualizace budov v ZABAGED®. Praha, 2016. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.

[76] Hron, V., Halounová, L., 2016. Nationwide hybrid change detection of buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41, pp. 497-504. DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B7-497-2016

[77] LILLESAND, Thomas M., Ralph W. KIEFER a Jonathan W. CHIPMAN. *Remote sensing and image interpretation*. Seventh edition. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, [2015]. ISBN 978-1-118-34328-9.

[78] GRASS GSoC 2012 Image Segmentation. GRASS-Wiki [online]. GRASS MediaWiki, 2015 [cit. 2019-07-27]. Dostupné z: https://grasswiki.osgeo.org/wiki/GRASS_GSoC_2012_Image_Segmentation

[79] InterIMAGE - interpreting images freely [online]. c2010 [cit. 2019-08-30]. Dostupné z: <http://www.lvc.ele.puc-rio.br/projects/interimage/>

[80] Prohlížeč služba WMS - ortofoto CIR. Geoportál ČÚZK [online]. 2018-11-06. Dostupné z: <https://geoportal.cuzk.cz/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.verejne>

&metadataID=CZ-CUZK-WMS-ORTOCIR&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3132

[81] DUŠÁNEK Petr a Vojtěch HRON. Analýza možností aktualizace DMP z dat obrazové korelace. 2019 (v. 1.0). Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.

[82] HRON Vojtěch. Výběrová aktualizace. Zbořené budovy, 1. fáze. 2017. 11 s. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.

[83] Dokumentace projektu NIL. Tvorba nDSM. 2017. Ústav pro hospodářskou úpravu lesů.

[84] HRON Vojtěch. Využití nDMP ÚHÚL k detekci zbořených budov. 2017. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.

[85] HRON Vojtěch. Výběrová aktualizace. Zbořené budovy, 2. fáze - vyhodnocení. 10 s. 2017. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.

[86] HRON Vojtěch. Příprava indikací zbořených budov na podkladě nDMP od ÚHÚL. 2019. Zeměměřický úřad, Odbor ZABAGED, Oddělení správy a rozvoje dat ZABAGED.

[87] Hron, V., Kostin, V., Halounová, L., 2014. Comparison of software solutions for automatic generation of 3D building models. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 1(2), pp. 513-520. DOI:10.5593/sgem2014/b21/s8.065

[88] HRON, Vojtěch, Lena HALOUNOVÁ. Automatic Generation of 3D Building Models from Point Clouds [online]. In: Symposium GIS Ostrava 2014 Geoinformatics for Intelligent Transportation. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, 2014, ISSN 1213-239X. ISBN 978-80-248-3311-8. Dostupné z: http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2014/proceedings/papers/gis20145273a643d16ea.pdf

[89] Vosselman, G. et al., 2015. From Nationwide Point Clouds to Nationwide 3D Landscape Models. Photogrammetric Week, pp. 247-256. <https://phowo.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo15/250Vosselman.pdf>

[90] D2.8.III.2 INSPIRE Data Specification on Buildings – Technical Guidelines. D2.8.III.2_v3.0. European Commission Joint Research Centre, 2013. Dostupné z: <https://inspire.ec.europa.eu/file/1533/download?token=ouzQkBuP>

[91] INSPIRE [online]. 2019 [cit. 2019-08-30]. Dostupné z: <https://inspire.ec.europa.eu/>

[92] HRON, Vojtěch. Automatická tvorba modelů budov z bodového mračna mračna [online]. Praha, 2013. Dostupné z: <https://db.tt/FORZOV7j>. Semestrální práce z předmětu D29PPG. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Výpočetní a informační centrum.

[93] Haala, N., 1996. Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten. Ph.D. Thesis. Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Deutsche Geodätische Kommission, C460.

[94] Henricsson, O., Baltsavias, E., 1997. 3-D building reconstruction with ARUBA: a qualitative and quantitative evaluation. In: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II). Birkhäuser, Basel, pp. 65–76.

[95] Fischer, A., Kolbe, T., Lang, F., Cremers, A., Förstner, W., Plümer, L., Steinhage, V., 1998. Extracting buildings from aerial images using hierarchical aggregation in 2D and 3D. In: Computer Vision and Image Understanding. 72 (2), 185–203.

[96] Brenner, C., 2005. Building reconstruction from images and laser scanning, In: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 6, Issues 3–4, pp. 187-198, ISSN: 0303-2434.

[97] Brenner, C., Haala, N., 1998. Rapid acquisition of virtual reality city models from multiple data sources. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, Part 5, pp. 323–330.

[98] Vosselman, G., 1999. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. *ISPRS Conference 'Automatic Extraction of GIS Objects from Digital Imagery*, vol. 32/3-2W5. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Munich, pp. 87–92. ISBN: 0256-1840.

[99] Grün, A., Wang, X., 1998. CC-Modeler: a topology generator for 3-D city models. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 32, Part 4. Stuttgart, pp. 188–196.

[100] Gülch, E., Müller, H., Läbe, T., Ragia, L., 1998. On the performance of semi-automatic building extraction. In: *Proceedings ISPRS Symposium, Comm. III, Columbus, OH*.

[101] Haala, N., Brenner, C. (1997) Generation of 3D city models from airborne laser scanning data. *Proceedings 3rd EARSEL Workshop on LIDAR Remote Sensing on Land and Sea*, Tallinn, Estonia, 17–19 July, pp. 105–112.

[102] Haala, N., Anders, K.-H. (1997) Acquisition of 3D urban models by analysis of aerial images, digital surface models and existing 2D building information. *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III*, Orlando, FL, United States, 21-23 April, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 3072, pp. 212-222.

[103] Jibrini, H., Paparoditis, N., Deseilligny, M. P., Maitre, H. (2000) Automatic building reconstruction from very high resolution aerial stereopairs using cadastral ground plans. *19th ISPRS Congress, Amsterdam, Netherlands, 16-23 July*, pp. 16-23.

[104] Vosselman, G., Dijkman, S. T. (2001) 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34 (Part 3/W4), 37–43.

[105] Haala, N., Brenner, C., Anders, K.-H. (1998) 3D urban GIS from laser altimeter and 2D map data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32 (Part 3/1), 339–346.

[106] Brenner, C. (2000) Towards fully automatic generation of city models. *19th ISPRS Congress, Amsterdam, Netherlands, 16-23 July*, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (Part B3/1), pp. 85–92.

[107] Vosselman, G. (2002) Fusion of laser scanning data, maps, and aerial photographs for building reconstruction. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Toronto, Ont., Canada, 24-28 June, pp. 85-88.

[108] Suveg, I., Vosselman, G. (2000) 3D Reconstruction of building models. *19th ISPRS Congress, Amsterdam, Netherlands, 16-23 July*, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 33 (Part B2), pp. 538-545.

[109] Nizar, A. A., Filin, S., Doytsher, Y. (2006) Reconstruction of buildings from airborne laser scanning data. *Prospecting for Geospatial Information Integration*, Reno, NV, United States, 1-5 May, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2, pp. 988-997.

[110] Akel, N. A., Zilberstein, O., Doytsher, Y. (2004) A robust method used with orthogonal polynomials and road network for automatic terrain surface extraction from LiDAR data in urban areas. *20th ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12-23 July*, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35 (Part B3), pp. 243-248.

[111] Jiang, X., Bunke, H. (1994) Fast segmentation of range images into planar regions by scan line grouping. *Machine Vision and Applications*, 7 (Issue 2), 115-122.

- [112] Hoover, A. et al. (1996) An experimental comparison of range image segmentation algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18 (Issue 7), 673-689.
- [113] ENVI LiDAR. ENVI LiDAR Help [součást instalace softwaru]. Document Version 3.2. Exelis Visual Information Solutions, c 2012.
- [114] TRIMBLE. DTMaster 5.5: REFERENCE MANUAL [součást instalace softwaru]. Germany: Trimble, c 2005, 2012.
- [115] TRIMBLE. BuildingGenerator 2.2: REFERENCE MANUAL [součást instalace softwaru]. Germany: Trimble, c 2011.
- [116] Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981) Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24 (Number 6), 381-395.
- [117] Hůlková, M., Pavelka, K., Matoušková, E., 2018. Automatic classification of point clouds for highway documentation. *Acta Polytechnica*, 58(3), pp. 165-170. DOI:10.14311/AP.2018.58.0165
- [118] Gröger, G., Plümer, L., 2012. CityGML – Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71, pp. 12-33. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2012.04.004
- [119] Med, M., Souček, P., 2016. ANALYSIS AND IMPLEMENTATION OF APPLICATION SCHEMAS FOR THE INSPIRE BUILDINGS THEME. *Acta Polytechnica*, 56(4), pp. 291–300. DOI:10.14311/ap.2016.56.0291
- [120] Hron, V., Halounová, L., 2019. Automatic reconstruction of roof models from building outlines and aerial image data. *Acta Polytechnica*. [accepted, expected publication at the end of 2019]
- [121] Vosselman, G., Maas, H.-G. ed. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. Dunbeath: Whittles, c2010. ISBN 978-1904445-87-6.
- [122] Qin, R., Tian, J., Reinartz, P., 2016. 3D change detection – Approaches and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, pp. 41–56. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013
- [123] Haala, N., Brenner, C., 1999. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3), pp. 130-137. DOI:10.1016/S0924-2716(99)00010-6
- [124] Hron, V., Halounová, L., 2015. Automatic generation of 3D building models from point clouds. *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 214, pp. 109-119. DOI:10.1007/978-3-319-11463-7_8
- [125] Haala, N., Kada, M., 2010. An update on automatic 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6), pp. 570-580. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2010.09.006
- [126] Rottensteiner, F. et al., 2012. THE ISPRS BENCHMARK on URBAN OBJECT CLASSIFICATION and 3D BUILDING RECONSTRUCTION. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, I-3, pp. 293-298. DOI:10.5194/isprsannals-I-3-293-2012
- [127] Rottensteiner, F. et al., 2014. Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, pp. 256-271. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2013.10.004
- [128] Yan, J., Jiang, W., Shan, J., 2016. A GLOBAL SOLUTION TO TOPOLOGICAL RECONSTRUCTION OF BUILDING ROOF MODELS FROM AIRBORNE LIDAR POINT CLOUDS. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, III-3, pp. 379-386. DOI:10.5194/isprs-annals-III-3-379-2016

- [129] Xiong, B., Oude Elberink, S., Vosselman, G., 2014. A graph edit dictionary for correcting errors in roof topology graphs reconstructed from point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, pp. 227–242. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2014.01.007
- [130] Xiong, B. et al., 2015. Flexible building primitives for 3D building modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101, pp. 275–290. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2015.01.002
- [131] Pâravu, I. M., Remondino, F., Ozdemir, E., 2018. LOD2 Building Generation Experiences and Comparisons. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 8(2), pp. 59–64. DOI:10.2478/jaes-2018-0019
- [132] Fischler, M. A., Bolles, R. C., 1987. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Readings in Computer Vision*, pp. 726–740. DOI:10.1016/b978-0-08-051581-6.50070-2
- [133] Nan, L., Wonka, P., 2017. PolyFit: Polygonal Surface Reconstruction from Point Clouds. *IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 2372–2380. DOI:10.1109/iccv.2017.258
- [134] McClune, A. P. et al., 2016. AUTOMATIC 3D BUILDING RECONSTRUCTION FROM A DENSE IMAGE MATCHING DATASET. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B3, pp. 641–648. DOI:10.5194/isprs-archives-XLI-B3-641-2016
- [135] Awrangjeb, M., Zhang, C., Fraser, C. S., 2013. Automatic extraction of building roofs using LIDAR data and multispectral imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, pp. 1–18. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2013.05.006
- [136] Sugihara, K., Murase, T., Zhou, X., 2015. Automatic generation of 3D building models from building polygons on digital maps. *International Conference on 3D Imaging, IC3D 2015 - Proceedings*. DOI:10.1109/ic3d.2015.7391817
- [137] Murase, T., Sugihara, K., 2018. Automatic Generation of 3D Building Models for Environmental Education by Straight Skeleton Computation. *International Conference on Signal Processing, ICSP*, pp. 1040–1045. DOI:10.1109/icsp.2018.8652493
- [138] IMAGINE Photogrammetry Brochure. Hexagon Geospatial [online], c2018, [2019-05-01]. <https://www.hexagongeospatial.com/brochure-pages/imagine-photogrammetry-brochure>
- [139] Remondino, F. et al., 2014. State of the art in high density image matching. *Photogrammetric Record*, 29(146), pp. 144–166. DOI:10.1111/phor.12063
- [140] Haala, N., 2014. Dense Image Matching Final Report. EuroSDR Publication Series, Official Publication No. 64, pp. 115–145. http://www.eurosdrr.net/sites/default/files/uploaded_files/eurosdrr_no64_c.pdf
- [141] ČÚZK: Geoportál: ZABAGED® - planimetric components - introduction. ČÚZK - Home [online]. Prague: ČÚZK, c2019 [2019-05-20]. https://geoportal.cuzk.cz/Default.aspx?lng=EN&mode=TextMeta&text=dSady_zabaged&side=zabaged&menu=24
- [142] Grompone von Gioi, R. et al., 2010. LSD: A Fast Line Segment Detector with a False Detection Control. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(4), pp. 722–732. DOI:10.1109/tpami.2008.300
- [143] Grompone von Gioi, R. et al., 2012. LSD: a Line Segment Detector. *Image Processing On Line*, 2, pp. 35–55. DOI:10.5201/ipol.2012.gjmr-lsd
- [144] Feature Detection. OpenCV 3.0.0-dev documentation [online], c2014, [2019-05-01]. https://docs.opencv.org/3.0-beta/modules/imgproc/doc/feature_detection.html
- [145] Canny, J., 1986. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 8(6), pp. 679–698. DOI:10.1109/TPAMI.1986.4767851

[146] Rosebrock, A. Zero-parameter, automatic Canny edge detection with Python and OpenCV. PyImageSearch [online]. c2019, April 6, 2015 [2019-05-01]. <https://www.pyimagesearch.com/2015/04/06/zero-parameter-automatic-canny-edge-detection-with-python-and-opencv/>

[147] Matas, J., Galambos, C., Kittler, J., 2000. Robust detection of lines using the progressive probabilistic hough transform. Computer Vision and Image Understanding, 78(1), pp. 119-137. DOI:10.1006/cviu.1999.0831

[148] Remondino, F. et al., 2016. OBLIQUE AERIAL IMAGERY FOR NMA – SOME BEST PRACTICES. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B4, pp. 639-645. DOI:10.5194/isprs-archives-XLI-B4-639-2016

[149] Avbelj, J., Müller, R., 2014. Quality assessment of building extraction from remote sensing imagery. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). pp. 3184-3187. DOI:10.1109/IGARSS.2014.6947154

[150] Grayscale. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-08-22]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Grayscale>

[151] ČÚZK - 1. Jaké stavební objekty se zapisují do RÚIAN?. ČÚZK [online]. Praha: ČÚZK, c2019 [cit. 2019-08-30]. Dostupné z: <https://www.cuzk.cz/Uvod/Produkty-a-sluzby/RUIAN/1-Editacni-agendovy-system-ISUI/Casto-kladene-dotazy-k-RUIAN-FAQ/FAQ-Obecne-metodicke-dotazy/1-Jake-stavebni-objekty-se-zapisuji-do-RUIAN.aspx>

12 Přílohy

- CD
 - DP_2019_HRON_Vojtech.pdf
 - DP_2019_HRON_Vojtech_TEZE.pdf
 - software
 - buildingsUpdate
 - roofModelsReconstruction