

Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.

Detekce změn tvaru a povrchu  
provozní skládky tuhého komunálního odpadu  
v čase z dat leteckého laserového skenování



**CzechGlobe**  
Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v. v. i.

ISBN 978-80-263-1832-3

9 788026 318323



Ztech – OVĚŘENÁ TECHNOLOGIE

# Detekce změn tvaru a povrchu provozní skládky tuhého komunálního odpadu v čase z dat leteckého laserového skenování

Technická dokumentace výsledku

Autorský kolektiv:

**Ústav výzkumu globální změny AV ČR, v.v.i., Oddělení dálkového průzkumu  
Země a Oddělení leteckých činností**

Ing. Olga Brovkina, CSc; Ing. Miroslav Píkl, PhD; doc. Mgr. Ing. František Zemek, PhD;  
Ing. Lukáš Fajmon.

**Město Klobouky u Brna**

František Hanák, Pavel Volek.

## **PODĚKOVÁNÍ:**

Ověřená technologie “Detekce změn tvaru a povrchu provozní skládky tuhého komunálního odpadu v čase z dat leteckého laserového skenování“ je jedním z výsledků projektu “Nové metody hodnocení objemu a povrchu aktivních a rekultivovaných skládek”, podpořeným Technologickou agenturou ČR v rámci veřejné soutěže v programu aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí o podporu na období řešení 04/2023 – 12/2025 (číslo projektu SS06020164).

Smlouva o uplatnění ověřené technologie byla uzavřena se správou města  
Klobouky u Brna

dne 16. 10. 2024

## OBSAH

<b>1 Úvod</b>	<b>4</b>
<i>Představení projektu TA ČR</i>	
<i>Účel a význam technologie</i>	
<i>Stav řešení problematiky v ČR</i>	
<i>Stav řešení problematiky v zahraničí</i>	
<b>2 Skládka tuhého komunálního odpadu (TKO)</b>	<b>6</b>
<i>Obecná informace ke skládce tuhého komunálního odpadu</i>	
<i>Proč je důležité sledovat změny tvaru/objemu a povrchu skládek TKO</i>	
<b>3 Princip leteckého laserového skenování při monitoringu skládek TKO</b>	<b>8</b>
3.1 Princip leteckého laserového skenování	
3.2 Přesnost principu leteckého laserového skenování při monitoringu skládek TKO	8
<i>Chyba přístroje</i>	
<i>Poziční chyba</i>	
<i>Vliv velikosti otisku (footprintu) dat leteckého laserového skenování na výškovou hodnotu pixelu v rastru DTM</i>	
<i>Vliv vegetace na přesnost DTM</i>	
<i>Vliv sklonu povrchu skládky TKO na poziční přesnost dat z leteckého laserového skenování</i>	
3.3 Doporučené prostorové rozlišení DTM z dat leteckého laserového skenování pro sledování změny tvaru a povrchu skládek TKO	17
3.4 Charakteristiky terénu odvozené z dat leteckého laserového skenování při sledování změny tvaru a povrchu skládek TKO	22
<i>Zdůvodnění a popis vypočtu svažitosti</i>	
<i>Zdůvodnění a popis vypočtu akumulace povrchového odtoku</i>	
<b>4 Postup detekce změn tvaru a povrchu provozní skládky TKO v čase z dat leteckého laserového skenování</b>	<b>24</b>
<i>Pozemní měření referenčních bodů</i>	
<i>Pořízení dat leteckého laserového skenování</i>	
<i>Opakované pořízení dat leteckého laserového skenování</i>	
<i>Zpracování dat leteckého laserového skenování</i>	
<i>Pořízení obrazových dat ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra a výpočet NDVI</i>	
<i>Příprava rastrové vrstvy chyby nízké a vysoké vegetace pro výpočet mapy nejistot DTM</i>	
<i>Příprava rastrové vrstvy chyby pozice XY na svazích pro výpočet mapy nejistot DTM</i>	
<i>Mapa nejistot DTM</i>	
<i>Mapa výškových a objemových změn skládky TKO</i>	
<b>5 Ověřování technologie</b>	<b>28</b>
<b>6 Ekonomické aspekty technologie</b>	<b>35</b>
<b>Závěr</b>	<b>38</b>
<b>Reference</b>	<b>39</b>

## 1. Úvod

### *Představení projektu TA ČR*

Ověřená technologie byla zpracována v rámci Programu aplikovaného výzkumu, experimentálního vývoje a inovací v oblasti životního prostředí – Prostředí pro život, Technologické agentury České Republiky, jako jeden z výstupů projektu “Nové metody hodnocení objemu a povrchu aktivních a rekultivovaných skládek” (č. projektu SS06020164). Cíle projektu se vztahují k využití pokročilých metod leteckého a bezpilotního dálkového průzkumu Země pro sledování provozních a uzavřených (rekultivovaných) skládek tuhého komunálního odpadu (TKO).

### *Účel a význam technologie*

Efektivní monitorování skládek TKO je klíčové pro zajištění jejich bezpečnosti, minimalizaci environmentálních rizik a optimalizaci využití prostoru. Změny tvaru a povrchu skládky v čase se vztahují především k množství svezeneho odpadu, úpravě výšky skládkových vrstev a deformacím (sedání) skládky, které jsou ovlivněny procesem zhutňování, povětrnostními podmínkami a dlouhodobými biochemickými procesy rozkladu odpadu v tělese skládky. Sledování změn tvaru/objemu a povrchu skládek TKO je důležité pro minimalizaci rizik spojených s provozem skládek a ochranu životního prostředí. Tradiční metody monitorování, k nimž patří zejména bodová geodetická měření, mohou poskytnout potřebnou úroveň přesnosti v měřených bodech, ale neumožňují získat homogenní pokrytí měřeními v celé ploše skládky. Takovýto způsob může vést k přehlížení kritických změn. Navíc jsou časově i kapacitně náročné, a tím i značně finančně nákladné, zejména pokud jde o opakované zaměřování více skládek. Metoda leteckého laserového skenování představuje moderní nástroj, který nabízí vysokou přesnost a rychlost sběru dat a pokrývá rozsáhlou lokalitu snímání celkově a detailně. Tato ověřená technologie popisuje vývoj postupu detekce změn tvaru/objemu a povrchu provozní skládky odpadů pomocí dat z leteckého laserového skenování a dokumentuje postup na provozních skládkách TKO. Ověřená technologie je předložena pro optimalizaci řízení skládek a dá se využít k plánování umístění odpadu, analýzu kapacity tělesa a usnadnění rozhodování o minimalizaci negativních dopadů na životní prostředí.

### *Stav řešení problematiky v České republice*

I přes to, že se metoda leteckého laserového skenování v České republice využívá v řadě vědeckých a praktických oblastí (např. Pavelka 2012, Brovkina a kol. 2017, Hlášek & Frohlich 2020, Novotný a kol. 2021), stále existuje mezera v testování a aplikaci této metody při monitorování stavu skládek TKO. Podle znalosti a informovanosti autorského týmu, a také podle veřejného vyhledávacího systému STARFOS (<https://starfos.tacr.cz/>), výzkumné projekty na detekce změn tvaru a povrchu provozní skládky TKO s využitím dat z leteckého nebo bezpilotního (dronu) laserového skenování v České republice

dosud nebyly řešeny. Pokrok v tomto směru byl zaznamenán v rámci několika projektů z minulých let uvedených níže:

- Projekt "Hodnocení starých skládek v prostoru Brno-východ a jejich identifikace s použitím leteckých snímků velkého měřítka" (ME 118, 1997-1998), kde se poprvé v ČR letecké snímkování (fotografování) používalo pro hodnocení starých skládek. Avšak projekt se nezabýval hodnocením změn parametrů skládek.
- Projekt "Dlouhodobé deformace těles skládek komunálních odpadů a jejich vliv na funkční bezpečnost povrchového těsnění" (GA ČR SGA02006GA-ST, 2006 - 2008). Cílem projektu bylo stanovit deformační parametry, jejich velikost a časový průběh u vybraných skládek odpadů v ČR. Deformace skládky se zkoumala v závislosti na druhu a způsobu ukládání odpadu. V projektu se používaly data dlouhodobého geodetického monitorování bez zapojení dat dálkového průzkumu Země.
- Projekt "NIKM – Národní inventarizace kontaminovaných míst" v rámci Operačního programu Životní prostředí (CZ.05.3.24/0.0/0.0/17\_077/0005853, 2018-2021) řešil identifikaci kontaminovaných míst na základě zpracování satelitních dat a klasifikace typických materiálů a odpadů vyskytujících se na vybraných skládkách byla prováděna z leteckých hyperspektrálních dat. Změny parametrů skládek nebyly v projektu nehodnoceny.

Je třeba zmínit i odborné články, které k uvedené problematice přispěly. Studie od Kudrny (2008, 2009) se zaměřují na dlouhodobé deformace těles komunálních skládek a jejich vliv na funkční bezpečnost povrchového těsnění. Změna výšky a stabilita povrchu skládky v čase se sledují pomocí geodetických měření. Adamcová a kol. (2020) navrhla model umožňující simulovat posun tělesa skládky na základě monitorovacích GNSS (Global Navigation Satellite System) měření prováděných během 4 let na skládce TKO Štěpánovice. Ve studiu se mapovaly vertikální a horizontální posuny referenčních bodů na povrchu skládky s přihlédnutím k tloušťce vrstvy odpadu a času. Principiálně je metoda shodná s geodetickými postupy hodnocení. Po 4 letech ukládání odpadu byl pozorován jev expanze, který poté mizí a dochází k většímu usazování horní vrstvy vlivem gravitace. Brovkina a kol. (2023) ukazuje použití leteckých hyperspektrálních dat při monitoringu skládek TKO.

#### *Stav řešení problematiky v zahraničí*

V zahraničí se metoda leteckého laserového skenování uplatňuje při sledování stavu skládek TKO. Například, Tagestad a kol. (2017) provedl studie využívající lidarové skenování k monitorování dynamiky skládek, kde analýza změn nadmořské výšky z dat leteckého laserového skeneru obsahovala jak kladné, tak záporné hodnoty pixelů, představující změnu o 0,1 až 1 metr v kladném i záporném směru. Detekční limit byl určen  $\pm 0,22$  m na základě vertikální přesnosti pořízení lidarových dat. Studie v Polsku (Pasternak a kol. 2023) používala lidarový senzor umístěný na dronu pro sledování povrchu skládky a hodnocení přesnosti výšek na skládce k porovnání s referenčními body. Maximální výškové rozdíly byly získány na ploše skládky pokryté vegetací a nepřesáhly 0,30 m. Přehledový článek (Sliusar a kol. 2022) zdůrazňuje význam metod laserového skenování v aplikacích sledování skládek TKO. Tyto studie ukázaly, že metoda

leteckého laserového skenování (buď pilotovaný nebo bezpilotní letecký systém) může přispět k včasné identifikaci potenciálních problémů na skládce TKO, jako jsou nestability terénu, a dokáže detekovat změny v rozměrech tělesa skládky.

## **2. Skládka tuhého komunálního odpadu**

### *Obecná informace ke skládce TKO*

Skládka TKO je speciálně vybavené území pro likvidaci odpadu. Je jedním z hlavních prvků odpadového hospodářství a provádí sběr, skladování, zpracování odpadů. Skládka TKO představuje oplocený prostor s infrastrukturou nezbytnou pro zajištění bezpečné a ekologicky čisté likvidace odpadů. Účelem skládky TKO je řešení problému hromadění odpadů a minimalizace jejich vlivu na životní prostředí.

Hlavními prvky skládky jsou příjezdová komunikace (s obousměrným provozem), prostor úložiště tuhého odpadu (zabírá 95 % plochy skládky a je omezen odvodňovacím příkopem), hospodářská zóna (nachází se na křižovatce příjezdové komunikace s hranicí skládky a zahrnuje domovní a průmyslové prostory), inženýrské stavby a komunikace (vodovod, kanalizace, stožáry elektrického osvětlení) (Obr. 1).

Skládka odpadu je obvykle rozdělena do provozních front (s ohledem na reliéf terénu). Ve většině případů mají provozní fronty délku od 30 m do 150 m a šířku 5 m. Odpadové vozy na ní vykládají komunální odpad. Buldozery odpad rozhrnují a pokrývají každodenním izolačním povrchem, čímž vytvářejí vrstvu o výšce 0,3 - 0,5 m. K izolaci se používá vrstva půdy o tloušťce nejméně 0,15 m, nebo se používá chemická pěna nebo polymerové folie. Každodenní izolace brání rozptylu odpadů, šíření zápachů a vzniku požárů. Po ukončení skládkování na jedné provozní frontě, začíná skládkování na další provozní frontě. Provozní fronta s ukončeným skládkováním vstupuje do procesu rekultivace (2 až 5 let). Počet a plocha provozních front se může lišit u různých skládek, záleží na původním plánování, rozměrech a záměru využití skládky.



**Obrázek 1.** Typické uspořádání skládky odpadů: 1 – provozní fronta, 2 – část skládky ve fázi rekultivace, 3 – rekultivována část skládky ve fázi monitoringu, 4 – hospodářská zóna, 5 – příjezdová komunikace, 6 - sběr výluhů, 7 – zásoba půdy pro izolace odpadů.

*Proč je důležité sledovat změny tvaru/objemu a povrchu skládek TKO*

Sledování změny tvaru/objemu a povrchu skládek TKO je důležité z několika důvodů:

- nesprávná údržba tvaru, související s množstvím svezeneho odpadu a úpravou výšky skládkových vrstev, může ovlivnit stabilitu skládky a vést k sesuvům odpadu a půdy nebo jiným nebezpečným jevům, které by mohly ohrozit okolí skládky,
- sedání skládky může způsobit lokální nestabilitu svahů skládky, půdní erozi, a ohrozit ochranné vrstvy a drenážní systémy,
- nedostatečné sledování změn tvaru a povrchu skládky potenciálně zvyšuje provozní náklady na údržbu skládky a snižuje její dlouhodobou efektivitu.



### 3. Princip leteckého laserového skenování při monitoringu skládek TKO

#### 3.1. Princip leteckého laserového skenování

Letecké laserové skenování (LiDAR – Light Detection And Ranging) je technologie dálkového průzkumu, která používá laserový paprsek k měření vzdáleností mezi senzorem a povrchem, nad kterým letadlo letí. Během letu letadla nebo dronu, které nesou LiDAR senzor, se pomocí laserových impulsů získávají bodová mračna o celém povrchu, ze kterých je možné generovat 3D informace o holém povrchu terénu (reliéfu – digitální model reliéfu terénu - DTM) a povrchu pokryvu celého území (digitální model povrchu – DSM). Z takto získaných modelů (jejich odečtením) lze získat, mimo jiné, např. výšku objektů nad holým povrchem, výšku stromů, keřů apod.). Předtím než lze data v podobě bodové mračny použít k tvorbě výškových modelů, musí projít několika kroky předzpracování, což většinu zahrnuje: klasifikaci bodů, odstranění šumu, normalizaci dat, ředění mračny bodů a interpolace (viz <https://olc.czechglobe.cz/zpracovani-dat-z-laseroveho-skeneru/>).

Lidarová data umožňují detekovat změny tvaru a výšky povrchu skládky mezi jednotlivými lety. Porovnáním DTM či DSM z dat nasnímaných v různém čase (letech) lze vypočítat například změny objemu skládky, identifikovat místa potenciální a skutečné eroze jako důležité parametry pro monitorování stability a kapacity skládky.

#### 3.2. Přesnost principu leteckého laserového skenování při monitoringu skládek TKO

Přesnost metody leteckého laserového skenování je v ideálních podmínkách v řádu centimetrů (Dahlqvist a kol. 2011, Okyay a kol. 2019), avšak v praxi může být ovlivněna několika faktory, které mohou zvýšit míru nepřesnosti. Pro účely sledování změn tvaru a povrchu skládek TKO je potřeba zohledňovat vlivy chyby přístroje, poziční chyby, velikosti stopy dopadajícího paprsku (footprintu) a vegetace na celkovou přesnost metody leteckého laserového skenování.

##### *Chyba přístroje*

Chybu přístroje lze dohledat v dokumentaci od dodavatele LiDAR zařízení v sekci, která popisuje technické specifikace. Obvykle bývá uvedena přesnost měření vzdálenosti skeneru od povrchu objektu (range accuracy) nebo bodová přesnost (point accuracy), což zahrnuje odchylku měření vzdálenosti od skutečné hodnoty (například  $\pm 2$  cm), a údaje o přesnosti v osách X, Y a Z. V ověřené technologii jsme použili data pořízená pomocí platformy RIEGL LMS Q780. Její vzdálenostní chyba je 10–15 cm v závislosti na atmosférických podmínkách, jako je vlhkost, teplota nebo prašnost (Rieger 2012). Tyto faktory mohou způsobit rozptyl laserových paprsků vedoucí k nepřesnostem v získaných datech (Klaas-Witt & Emeis 2022). Vysoká vlhkost například způsobuje rozptyl paprsků na částicích vody ve vzduchu, zatímco teplota mění hustotu vzduchu a vede k ovlivnění rychlosti šíření laserového paprsku. Prašnost v ovzduší může blokovat nebo odrážet část laserových paprsků. LiDAR přístroje jsou navrženy tak, aby tyto vlivy byly minimalizovány, ale v extrémních podmínkách mohou tyto faktory způsobovat výrazné chyby v měření. Je proto důležité při plánování měření zohlednit aktuální atmosférické podmínky a vyhnout se nevhodným podmínkám způsobeným výše popsány faktory.

### *Poziční chyba*

Poziční chybou je myšlena chyba pozice X, Y a Z výsledného bodu v daném souřadném systému. Chyba vzniká v důsledku montáže senzorů na nosič (letadlo/dron), nepřesnostmi měření pozičních dat a při zpracování nasnímaných dat.

- Chyba montáže - senzor a přidružená zařízení prakticky nelze při montáži na nosič umístit vždy do stejně přesné pozice a pod stejným úhlem. V důsledku “velkých” vzdáleností, ve kterých měření probíhá, vzniká i v případě malé odchylky pozice senzoru při montáži relativně velká chyba pozice výsledných bodů. Dodavatelé LiDAR dat standardně provádějí korekci této chyby, avšak její stanovení se určuje empiricky na datech nasnímaných na kalibrační lokalitě. Pro jednu montáž na nosič by se velikost a směr této chyby neměly měnit.

- Chyba z pozičních dat - pozice výsledných bodů se počítá na základě pozice a orientace (náklon) nosiče. Tyto veličiny jsou s vysokou frekvencí a přesností měřeny v průběhu celého snímání LiDAR dat. I když je toto měření velmi přesné (ve srovnání s běžně dostupnými zařízeními např. v telefonech, levných dronech), je také zatíženo určitou chybou. Zejména měření pozice pomocí satelitních navigačních systémů je silně ovlivněno aktuální pozicí (viditelností) satelitů a stavem atmosféry, která jejich signály ovlivňuje.

- Chyby při vzniklé při zpracování - tento typ chyby vzniká v případě větších území, která se snímají z několika paralelních letových linií. V důsledku výše popsané chyby z pozičních dat dochází po základním předzpracování LiDAR dat k situaci, ve které je totožný objekt na různých liniích umístěn pozičně jinde (linie na sebe tzv. nesedí). Dodavatelé LiDAR dat proto využívají proces tzv. vzájemného vyrovnání linií, kterým se tato chyba minimalizuje.

Stanovení velikosti výsledné chyby lze provést oproti přesným geodetickým měřením objektů, které jsou jednoznačně identifikovatelné i v LiDAR datech. Nejlépe se tato chyba zjišťuje na průniku hran stavebních prvků (zejména střech). Lze využít i rozhraní (rohy) dostatečně kontrastních povrchů. Pro posouzení složky Z lze využít i dostatečně velké horizontální umělé povrchy, na kterých se neprojeví vliv složek XY.

#### Vliv chyby pozice XY na pozici Z

Pro zjišťování změny objemu skládky se využívá Z souřadnice “nadmořská výška” bodů LiDAR mračna. Pokud je mračno posunuto v souřadnicích XY (v horizontální rovině), odečítali bychom výšku na špatném místě a vzniká tak další chyba ve výškové informaci. Např. na svazích 45° vznikne chyba ve výšce o stejné hodnotě, jako je chyba v souřadnicích XY. Situaci dále zhoršuje fakt, že změna objemu je stanovována z více LiDAR vrstev z různých termínů. To znamená, že změna objemu mezi každými dvěma termíny je zatížena jinou chybou. Ta by proto měla být vyjádřena jako nejistota odhadů změnu objemu.

#### Stanovení chyby na lokalitě skládky Strážnice

Pro stanovení poziční chyby byla na lokalitě Strážnice provedena GPS měření polohy bodů XY a jejich nadmořské výšky Z prostřednictvím geodetického přístrojového

vybavení (Topcon HiPer HR). Pro měření byly vybrány body, které jsou jednoznačně identifikovatelné na LiDAR datech a které v průběhu opakovaného víceletého skenování nemění žádnou ze souřadnic určujících jejich pozici (X, Y, Z) (Obr. 2). Pro lokalitu Strážnice bylo nasnímáno celkem pět LiDAR datových řad z let 2023 - 2024.



**Obrázek 2.** Pozice GPS měření použité pro stanovení poziční chyby. Kroužkem jsou označeny body pro chybu Z, trojúhelníkem body použité pro stanovení chyby XY.

Pro zjištění chyby XY byl z každé datové řady vygenerován rastrový obraz intenzity odraženého laserového paprsku o velikosti pixelu 0.3 m. V každém rastru pak byly vizuálně identifikovány a digitalizovány vybrané body, na kterých bylo provedeno geodetické GPS měření. Poté byl pro každý vybraný bod vypočten rozdíl v pozici XY mezi digitalizovaným bodem a pozici tohoto bodu z geodetického měření. Tento postup byl proveden pro všechny LiDAR datové sady. Pro vyjádření chyby byly použity standardní statistiky (Tab. 1).

**Tabulka 1.** Stanovení chyby XY –  $\epsilon_{XY}$  a) relativní chyba jednotlivých linií vůči sobě, b) absolutní chyba vůči geodetickému GPS měření. RMSE je střední kvadratická chyba (root mean square error), sm. odch. je směrodatná odchylka.

a)

Bod	$\epsilon_{XY}$ průměr [m]	$\epsilon_{XY}$ sm. odch. [m]	$\epsilon_{XY}$ RMSE [m]
100	0,41	0,24	0,47
117	0,60	0,32	0,68
118	0,46	0,32	0,56
144	0,46	0,34	0,57
AVG	0,48	0,30	0,57

b)

Bod	$\epsilon_{XY}$ průměr [m]	$\epsilon_{XY}$ sm. odch. [m]	$\epsilon_{XY}$ RMSE [m]
100	0,24	0,20	0,31
117	0,54	0,30	0,62
118	0,31	0,28	0,42
144	0,44	0,34	0,56
Průměr	0,38	0,28	0,48

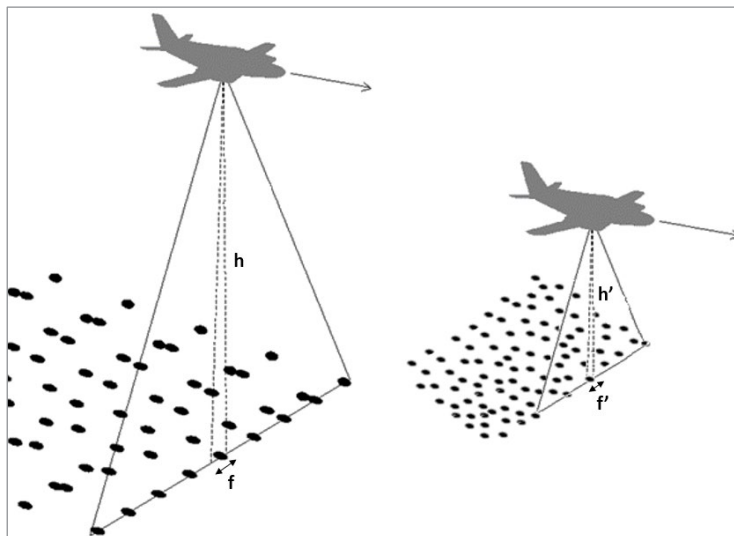
Chyba v souřadnici Z byla stanovena na 7 vybraných bodech (Tab. 2). Z LiDAR bodového mračna byl pro každý termín nejprve vygenerován rastrový model DTM. Z těchto vrstev byla na pozicích GPS geodetických měření odečtena hodnota výšky, která byla následně srovnána s hodnotou výšky geodetických GPS měření.

**Tabulka 2.** Stanovení chyby Z ( $\epsilon Z$ ) jednotlivých datových sad. RMSE je střední kvadratická chyba (root mean square error), sm. odch. je směrodatná odchylka.

Bod	$\epsilon Z$ [m]											
	Datum (dd.mm.yyyy) a čas (hh:mm) pořízení dat leteckého laserového skenování											
	28. kvě 2023 9:17	23. kvě 2023 9:22	23. kvě 2023 9:25	12. srp 2023 8:41	10. říj 2023 10:42	10. říj 2023 10:44	15. bře 2024 8:53	15. bře 2024 8:58	15. bře 2024 9:01	30. dub 2024 9:04	30. dub 2024 9:10	30. dub 2024 9:13
6	0,07	0,07	0,02	0,05	0,00	0,01	0,05	0,05	0,06	0,03	0,05	0,01
14	0,09	0,09	0,07	0,09	0,04	0,03	0,08	0,09	0,09	0,04	0,04	0,01
18	0,12	0,13	0,12	0,12	0,08	0,06	0,10	0,13	0,13	0,13	0,12	0,07
20	0,02	0,00	-0,04	-0,03	-0,07	-0,07	0,04	0,00	0,01	-0,14	-0,12	-0,11
26	0,06	0,07	0,06	0,06	0,20	0,16	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,05
39	0,08	0,09	0,07	0,07	0,04	0,04	0,06	0,07	0,05	-0,06	-0,04	-0,08
46	0,04	0,06	-	0,06	-	0,01	0,06	0,06	0,04	-0,06	0,00	-0,12
Průměr [m]	0,07	0,07	0,05	0,06	0,05	0,03	0,06	0,07	0,06	0,00	0,02	-0,02
Sm. odch. [m]	0,03	0,04	0,05	0,05	0,09	0,07	0,02	0,04	0,04	0,09	0,08	0,08
RMSE [m]	0,08	0,08	0,07	0,07	0,09	0,07	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08

*Vliv velikosti otisku (footprint) dat leteckého laserového skenování na výškovou hodnotu pixelu v rastru DTM*

V leteckém laserovém skenování se termín footprint (otisk) vztahuje na oblast na zemi, která je osvětlena jedním laserovým pulsem vyslaným ze skenovacího systému na palubě letadla. Tento otisk představuje plochu (m<sup>2</sup>) na povrchu Země, kde laserová energie dopadá a odkud se odráží zpět, čímž vytváří datové body. Jedním z klíčových faktorů, ovlivňujících velikost footprintu je letová výška pořízení dat ALS: čím vyšší je letová výška snímání, tím větší je footprint, protože laserový paprsek se na delší vzdálenosti více rozptýluje (Obr. 3). Hustota bodů se při zvětšování footprintu z důvodu vyšší letové hladiny skenování a zachování frekvence snímání snižuje, čímž se snižuje počet pulzů na jednotku plochy.



**Obrázek 3.** Větší ( $f$ ) a menší ( $f'$ ) footprinty dat leteckého laserového skenování pořízených s vyšší ( $h$ ) a nižší ( $h'$ ) výšky.

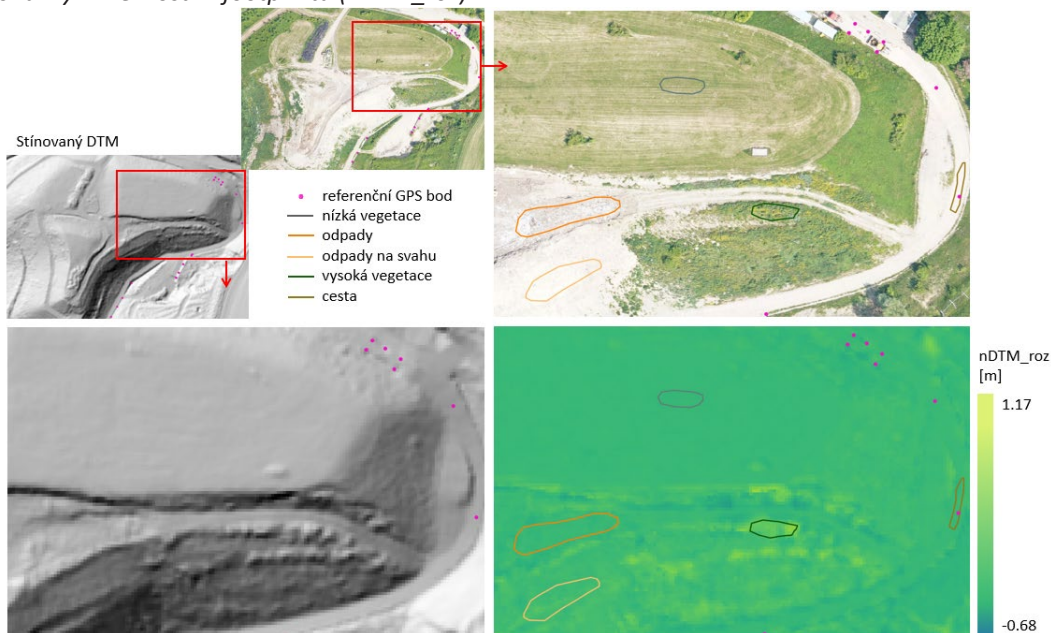
Pro testování vlivu velikosti footprintu na hodnoty pixelů v rastru DTM byly použity dva soubory dat z leteckého laserového skenování pořízené z různých výšek nad stejnou lokalitou skládky ve stejný den (Tab. 3). Datový soubor z větší výšky měl hustotu bodů 2,5 bodů/m<sup>2</sup>, zatímco soubor z nižší výšky měl hustotu 10 bodů/m<sup>2</sup> a byl následně zředěn na 2,5 bodů/m<sup>2</sup>. DTM bylo zpracováno z každého souboru s hustotou 2,5 bodů/m<sup>2</sup> s prostorovým rozlišením 0,8 m. Dále následovaly kroky:

- pro každý DTM byl proveden výpočet rozdílů mezi výškou z DTM a výškou z referenčních geodetických GPS bodů zaměřených na skládce,
- pro každý DTM byly vypočteny hodnoty rozdílů od celého rastru DTM čímž vzniká tzv. normalizovaný DTM (nDTM),
- odečet normalizovaných DTM od sebe (od DTM z vyšší letové výšky se odečítá DTM z nižší letové výšky),
- analýza hodnot odečteného rastru pro vybrané plochy na skládce (plocha s odpady, cestou, nízkou a vysokou vegetací) (Obr. 4).

**Tabulka 3.** Parametry dat leteckého laserového skenování (ALS) a rozdíly mezi výškami vybraných ploch. DTM je digitální model terénu, Prům. je průměr, Sm. odch. je směrodatná odchylka.

Výška pořízení dat [m]		Velikost otisku ALS dat [m]	Hustota bodů [bod/m <sup>2</sup> ]	Prostorové rozlišení DTM [m]	Rozdíl mezi DTM a referenčními body (z-souřadnice) [m]				
1500		0.37	2,5	0,8	0,138				
900		0.22	2,5	0,8	0,092				
Rozdíl mezi výškami vybraných ploch odvozených z normalizovaných DTM [m]									
odpady		odpady na svahu		cesta	nízká vegetace	vysoká vegetace			
Prům	Sm. odch.	Prům	Sm. odch.	Prům	Sm. odch.	Prům	Sm. odch.	Prům	Sm. odch.
-0,03	0,05	0,12	0,10	-0,01	0,01	-0,04	0,02	0,35	0,32

**Obrázek 4.** Nahoře vlevo je RGB snímek a stínovaný digitální model terénu (DTM) skládky TKO, nahoře vpravo je fragment RGB snímku skládky. Dole vlevo je fragment stínovaného DTM a vpravo dole je fragment mapy rozdílu normalizovaných DTM vytvořených z lidarových dat s různými velikostmi footprintu (nDTM\_roz).



Relativní rozdíl mezi výškami ploch odvozenými z normalizovaných DTM z lidarových dat s různým footprintem ukazuje na odlišný vliv footprintu na hodnoty výšek v rastru. U plochy s cestou byly rozdíly řádově menší než u ploch s nízkou a vysokou vegetací, což

naznačuje, že u homogenních povrchů, jako je cesta, hodnoty výšek DTM jsou méně ovlivněny velikostí footprintu. Naopak u ploch s vysokou vegetací, kde dochází k většímu rozptylu výšek v závislosti na hustotě a typu vegetace, mohou být hodnoty výšek DTM ovlivněny velikostí footprintu. Proto se doporučuje vynechat z rastru DTM plochy s vysokou vegetací (např. maskováním stromů a keřů), aby nevnášely dodatečnou chybu při analýze změny tvarů a povrchu skládky TKO. U plochy s odpady v rovině byly rozdíly menší než u plochy s odpady na svahu, což naznačuje, že hodnoty výšek DTM na svazích mohou být ovlivněny velikostí footprintu. Doporučuje se proto zohlednit sklon terénu při analýze změn tvaru a povrchu skládky TKO, aby se minimalizovaly potenciální chyby spojené s rozdílným sklonem.

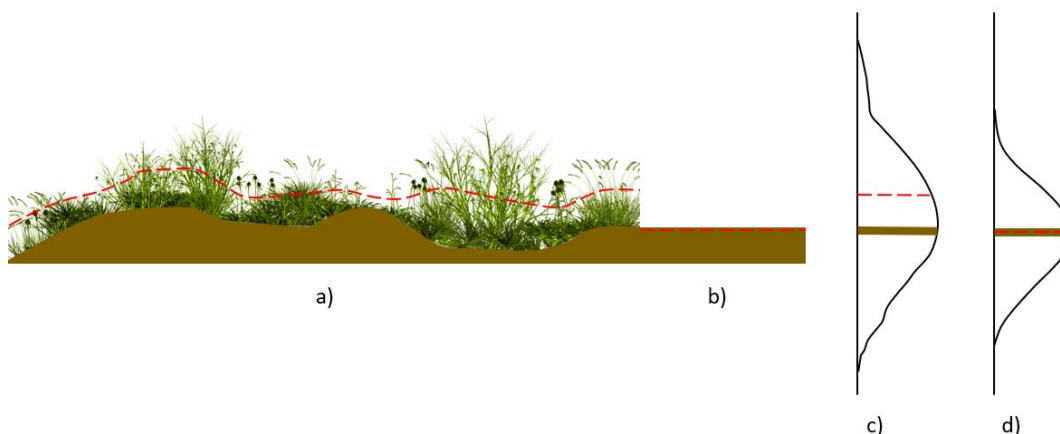
#### *Vliv vegetace na přesnost DTM*

V literatuře je prokázáno, že přesnost DTM z lidarového mračna bodů závisí (mimo jiné) na typu vegetace pokrývající povrch (Pfeifer a kol. 2004, Pavelka 2012, Moudrý a kol. 2023). V našem konkrétním případě jde o vysokou vegetaci (stromy a keře) a nízkou vegetaci (bylinný porost různé hustoty a výšky).

Vysoká vegetace jako keře a stromy může bránit laserovým pulzům v dosažení holého povrchu, což snižuje počet platných návratů vyslaného pulzu od země a ztěžuje filtrování bodů vegetace při zpracování dat leteckého laserového skenování. Při zohlednění vlivu stromů a keřů na přesnost DTM se lze opřít o výsledky již dříve provedených výzkumů v této oblasti. Např., Simpson a kol. (2017) ukázali, že pod listnatými stromy je přesnost DTM výrazně snížena, což způsobuje největší chyby (RMSE se blíží 1 m). Chyby jsou nižší za podmínek po opadu listoví (RMSE = 0,22 m). Stereńczak, K., & Kozak, J. (2011) prozkoumali různé rozlišení výstupních rastrů DTM a období získávání dat ALS a zjistili, že se průměrné chyby vlivu stromů a keřů na výškovou přesnost DTM pohybovaly mezi -0,2 a 0,34 m a RMSE mezi 0,28 a 0,79 m. Vyšší chyby byly v letní sezóně a v hustém porostu s podrostem.

Laserová měření na nízké vegetaci mají oproti povrchu terénu systematický posun směrem nahoru (Baltsavias 1999) (Obr. 5). Bollweg a de Lange (2003) zjistili na dlouhé husté trávě výškový posun DTM nahoru o 8 cm, a směrodatná odchylka laserových měření se zvýšila z  $\pm 7$  cm na zemi bez vegetace na  $\pm 14$  cm u nízké vegetace. Také Ahokas a kol. (2003) informují o systematické chybě výšky odvozené z leteckého lidarů o  $\pm 14$  cm, kterou vnáší travní porost.





**Obrázek 5.** Systematický posun leteckého laserového měření na nízké vegetaci ve srovnání s povrchem země. Přerušovaná čára ukazuje očekávání pozorovaných výškových hodnot nad povrchem s nízkou vegetací (a, c) (za předpokladu stacionárního vlivu vegetace, tj. rozložení bodů vzhledem k zemi nezávisí na lokalitě). Nad povrchem bez vegetace (b, d) je očekávaná výška laserových měření shodná s nadmořskou výškou povrchu.

Na základě zmíněných literárních zdrojů a expertních znalostí a zkušeností autorů se v ověřené technologii používají dvě hodnoty vlivu nízké a vysoké vegetace na skládce TKO na přesnost DTM vypočtené z ALS dat: 0,3 m pro nízkou vegetaci (bylinný porost) a 0,4 m pro vysokou vegetaci (stromy a keře).

Další upřesnění vlivu vegetace na skládce TKO na přesnost DTM se dá provést pomocí dodatečné analýzy s využitím měření výšky travního porostu na skládce platemetrem v různých termínech vegetačního období. Tato úloha nebyla součástí činností vývoje této technologie.

#### *Vliv sklonu povrchu skládky TKO na poziční přesnost dat z leteckého laserového skenování*

Sklon terénu může výrazně ovlivnit poziční přesnost dat z leteckého laserového skenování, zejména v osách X a Y. Když laserový paprsek zasáhne šikmý povrch, může dojít k odchylce v místě dopadu paprsku. U šikmých povrchů paprsek dopadá pod jiným úhlem než na rovné ploše, zvětšuje se plocha footprintu a to vede k menší přesnosti při určování polohy v osách X a Y. Čím větší je sklon povrchu, tím větší je riziko, že laserový paprsek odráží jinam, než by tomu bylo u rovného povrchu. Čím vyšší je výška skenování, tím více se chyby způsobené sklonem zvětšují. Z tohoto důvodu se pro přesné mapování skenuje z nižších výšek (cca 300-600 m). V praxi strmé svahy často vykazují větší poziční chyby, zejména v místech s rychlými změnami výšek. Sklon také ovlivňuje hustotu bodů v oblastech s různým úhlem, kde může dojít k rozptýlení bodů na větší ploše, což zhoršuje přesnost určení polohy. Moderní ALS systémy využívají kombinaci globálních navigačních systémů (GNSS) a inerciálních měřicích jednotek (IMU), které mohou do určité míry kompenzovat chyby způsobené sklonem terénu. Přesto však šikmé povrchy

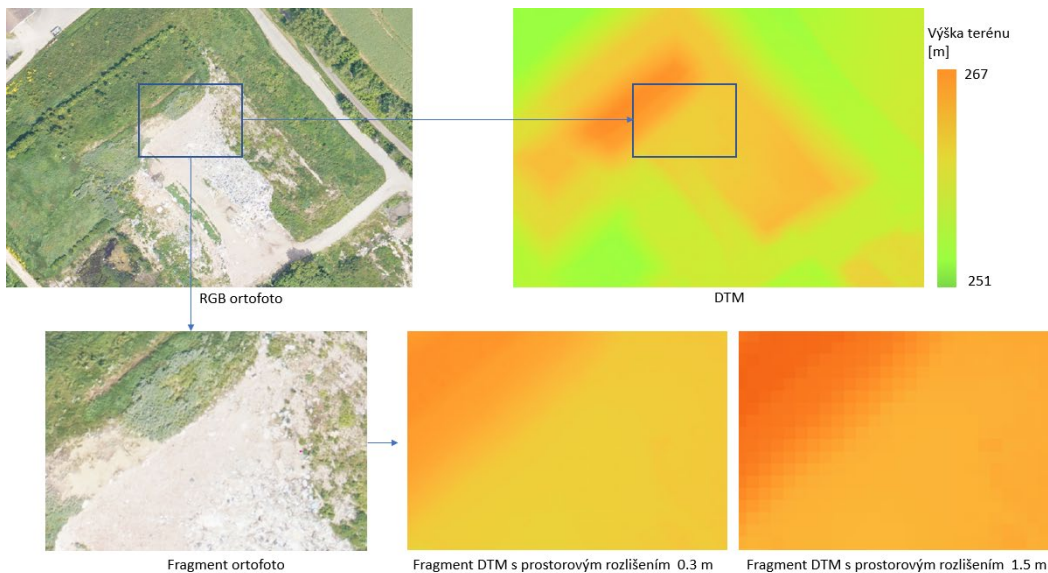
mohou zůstat náročné na přesné určení polohy v osách XY. Vzhledem k tomu, že skládky TKO jsou často objekty s proměnlivým sklonem terénu, zohlednění sklonu v analýze může výrazně zlepšit interpretaci získaných dat a umožnit korekci případných odchylek. Sklon terénu se vypočítá z DTM pomocí nástrojů GIS.

### 3.3. Doporučené prostorové rozlišení DTM z dat leteckého laserového skenování pro sledování změny tvaru a povrchu skládek TKO

Pro testování vhodného prostorového rozlišení DTM (digitálního modelu terénu) z dat leteckého laserového skenování, která zaznamenávají změny tvaru a povrchu skládek TKO, byly použity dva datové soubory, pořízené ve dvou termínech na stejné skládce a ze stejné výšky: 28. 5. 2023 a 5. 10. 2023. Hustota bodů byla 10 bodů/m<sup>2</sup>, což umožnilo vytvořit DTM rastry s prostorovým rozlišením 0,3 m.

Každý soubor byl následně zředěn na hustoty 5 bodů/m<sup>2</sup>, 2,5 bodů/m<sup>2</sup> a 1,5 bodů/m<sup>2</sup>. K zředění byl použit software LAStools a procedura *lasthin random* s nastavením parametru *seed*. Náhodný výběr pomocí *random* zajistí, že body v rámci každé buňky jsou vybírány náhodně, což zaručuje rovnoměrné zředění bodového mračka bez systematického zkreslení. Parametr *seed* umožňuje zadat číslo, které řídí náhodnost výběru. Když nastavíme specifickou hodnotu *seed* (např. *seed* 100), zajistíme, že stejné náhodné body budou vybrány pokaždé, když nástroj spustíme. To je důležité pro dosažení reprodukovatelných výsledků. V tomto případě byly použity čtyři různé hodnoty *seed* (4 různé kombinace náhodně vybraných bodů) pro každou úroveň hustoty bodů. Z každého zředěného souboru s každou hodnotou *seed* pak bylo vytvořeno DTM (celkem 24 rastry). Následně byly provedeny tyto kroky:

- pro každý DTM byly vypočteny rozdíly mezi výškou z DTM a výškou z geodetických měření GPS bodů zaměřených na skládce (Tab. 4),
- pro každý DTM byl proveden odečet hodnot rozdílu od celého rastru DTM, čímž vznikl normalizovaný DTM (nDTM),
- porovnání nDTM z různých termínů: odečet nDTM se stejným prostorovým rozlišením a stejným nastavením *seed*, ale z různých termínů. Odečet proběhl tak, že se odečetly hodnoty nDTM z pozdějšího termínu od nDTM z dřívějšího termínu (Tab. 4).



**Obrázek 6.** Ukázka fragmentu digitálního modelu terénu (DTM) skládky s různým prostorovým rozlišením.

**Tabulka 4.** Rozdíly mezi výškou DTM a referenčními body (z-souřadnice) z GPS měření: bod 1 - 251.236 m, bod 2 - 251.478 m, bod 3 - 255.160 m.

Termín pořízení dat	Hustota bodů [bod/m <sup>2</sup> ]	Prostorové rozlišení DTM [m]	Parametr "seed"	Výška DTM v referenčních bodech (z-souřadnice) [m]			Průměr rozdílu mezi výškou DTM a referenčními body (z-souřadnice) [m]
				1	2	3	
28.05.2023	10	0,3	-	251,308	251,552	255,231	0,072
	5	0,5	400	251,361	251,557	255,282	0,122
			300	251,330	251,561	255,282	0,094
			200	251,344	251,565	255,282	0,108
			100	251,328	251,565	255,254	0,092
	2,5	0,8	400	251,347	251,55	255,203	0,072
			300	251,334	251,562	255,259	0,098
			200	251,390	251,568	255,264	0,104
			100	251,307	251,556	255,247	0,078
	1,5	1,5	400	251,284	251,561	255,257	0,083
			300	251,209	251,566	255,281	0,088
			200	251,383	251,585	255,247	0,107
100			251,369	251,571	255,263	0,103	

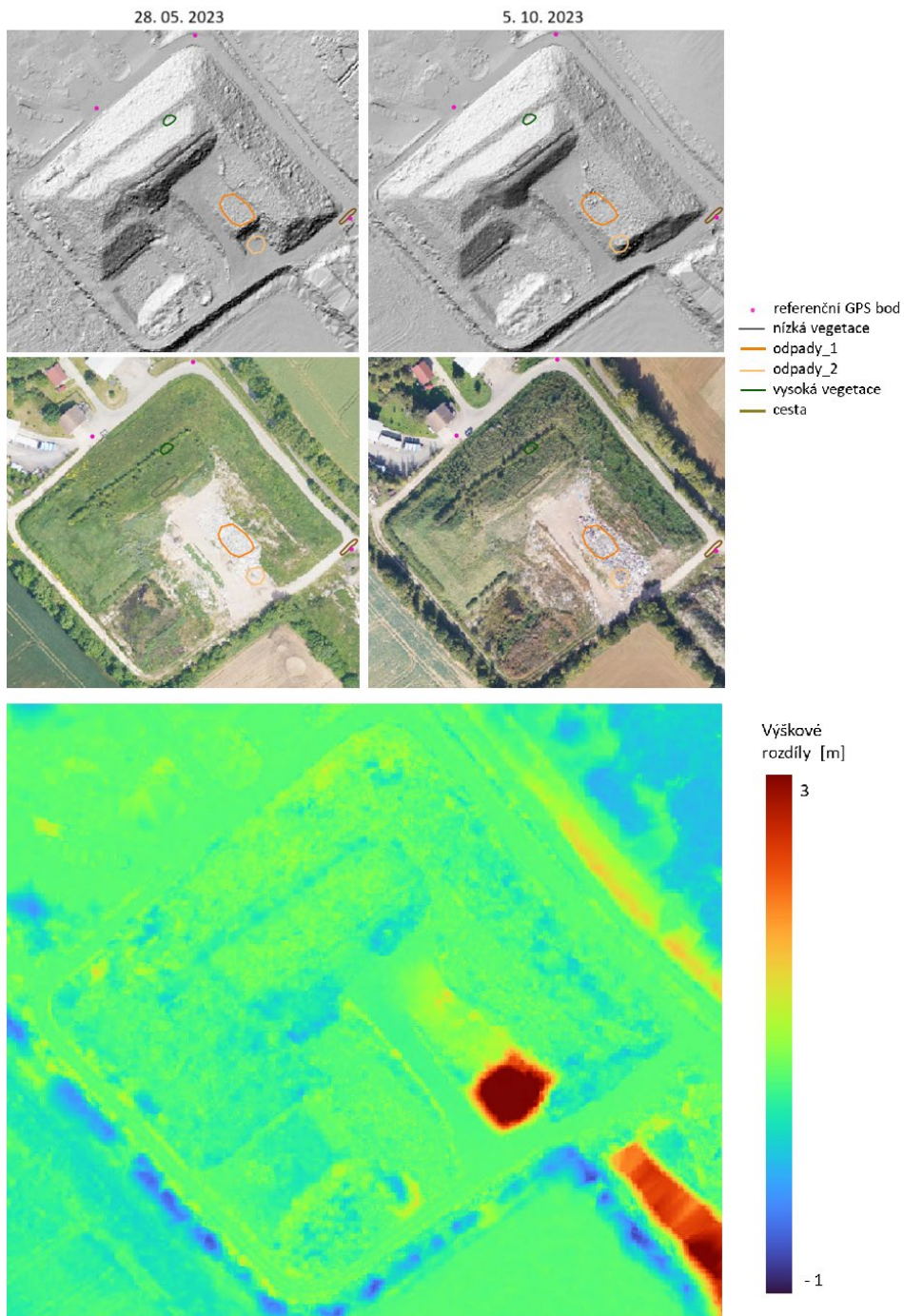
Pokračování tabulky 4:

Termín pořízení dat	Hustota bodů [bod/m <sup>2</sup> ]	Prostorové rozlišení DTM [m]	Parametr "seed"	Výška DTM v referenčních bodech (z-souřadnice) [m]			Průměr rozdílu mezi výškou DTM a referenčními body (z-souřadnice) [m]
				1	2	3	
5.10.23	10	0,3	-	251,246	251,505	255,166	0,010
	5	0,5	400	251,248	251,508	255,193	0,030
			300	251,244	251,517	255,211	0,039
			200	251,253	251,510	255,191	0,031
			100	251,247	251,508	255,191	0,030
	2,5	0,8	400	251,255	251,516	255,193	0,033
			300	251,249	251,527	255,199	0,039
			200	251,249	251,519	255,189	0,029
			100	251,244	251,531	255,191	0,031
	1,5	1,5	400	251,266	251,514	255,195	0,035
			300	251,267	251,510	255,197	0,032
			200	251,283	251,514	255,212	0,047
			100	251,250	251,525	255,196	0,036

Statistické výpočty z odečtených rastrů nDTM pro vybrané plochy na skládce (plochy s odpady, cestou, nízkou a vysokou vegetací) (Obr. 7) jsou uvedeny v Tab. 5. Směrodatní odchylka (sm. odch.) roste s menším prostorovým rozlišením, což naznačuje, že se zvýšením velikosti pixelů roste i nejistota měření. Na základě hodnot změny objemu, sm. odch. a výškových rozdílů se jeví jako nejvhodnější prostorové rozlišení 0,3 m a 0,5 m. Tato rozlišení minimalizují nejistoty (nízká sm. odch.) a lépe zachycují výškové rozdíly, čím poskytují přesnější výsledky v odhadu změny objemu skládky.

**Tabulka 5.** Statistické výpočty rozdílu DTM mezi termíny 28. 5. 2023 a 5. 10. 2023 pro vybrané plochy na skládce.

Plocha	Prostorové rozlišení rastru rozdílu DTM [m]	Změna objemu [m <sup>3</sup> ]		Výškové rozdíly [m]	
		Průměr	Sm. odch.	Průměr	Sm. odch.
odpady_1	0,3	70,58		0,34	
	0,5	71,67	4,02	0,34	0,02
	0,8	67,85	2,99	0,32	0,02
	1,5	76,9	3,09	0,37	0,02
odpady_2	0,3	370,98		5,47	
	0,5	364,17	4,55	5,20	0,07
	0,8	360,91	4,47	5,32	0,07
	1,5	374,02	5,13	5,20	0,07
nízká vegetace	0,3	1,14		0,02	
	0,5	2,10	0,61	0,003	0,04
	0,8	4,32	2,89	0,07	0,06
	1,5	6,42	0,89	0,12	0,02
vysoká vegetace	0,3	1,35		-0,05	
	0,5	4,95	2,60	-0,17	0,15
	0,8	4,74	1,13	-0,19	0,05
	1,5	3,55	1,26	0,06	0,14
cesta	0,3	0,04		0,002	
	0,5	0,19	0,11	0,01	0,01
	0,8	0,09	0,05	0,003	0,005
	1,5	0,09	0,06	0,003	0,01



**Obrázek 7.** Stínované digitální modely terénu (DTM) (nahore) a RGB snímky (střed) skládky TKO ve dvou termínech: 28. 5. 2023 a 5. 10. 2023. Data byla pořízena pomocí leteckého laserového skeneru a fotokamery. Dole je mapa rozdílu výšky terénu mezi těmito dvěma termíny. Maximální rozdíly pozorujeme v části skládky odpady<sub>2</sub>.

3.4. Charakteristiky terénu odvozené z dat leteckého laserového skenování při sledování změny tvaru a povrchu skládek TKO

#### *Zdůvodnění a popis vypočtu svažitosti*

Svažitost (sklon terénu) je charakteristika, která určuje úhel mezi vodorovnou rovinou a povrchem terénu. Svažitost hraje klíčovou roli v hodnocení stability skládky. Strmé svahy mohou být náchylné k sesuvům, což může představovat riziko jak pro samotnou skládku, tak pro okolí skládky. Svažitost ovlivňuje směr a rychlost odtoku srážkových vod. Příliš strmé svahy mohou způsobit rychlý odtok vody a vyvolat erozi, zatímco mírné svahy mohou podporovat hromadění vody v tělese skládky a zvýšit riziko kontaminace podzemních vod za předpokladu, že nebyla skládka správně zajištěna. Pravidelný monitoring svažitosti může odhalit změny v terénu, které mohou signalizovat pohyb částí svahu nebo vznik nových problémů se stabilitou skládky. Pro každý pixel se vypočítá maximální rychlost změny výšky od tohoto pixelu k jeho osmi sousedům. Svažitost je nejstrmější klesání z daného pixelu a je vyjádřena ve stupních nebo v procentech.

Pro posouzení stability svahu skládky může být použit sypný úhel. Sypný úhel nebo kritický úhel sypání zrnitého materiálu je nejstrmější úhel, do kterého lze materiál navrstvit bez jeho sesouvání. V tomto úhlu je materiál na lici svahu na hranici sesuvu. V literatuře se uvádí hodnoty sypných úhlů pro typické materiály (Beakawi Al-Hashemi a kol. 2018), např.:

- volná půda – 28 stupňů,
- vlhký jíl – 15 stupňů,
- vlhký písek – 40 stupňů
- drcený kámen a štěrk – 40 stupňů.

Yamawaki a kol (2017) při několikaletém průzkumu stability svahu odpadu na 19 řízených i nelegálních skládkách TKO a inertního odpadu doporučuje používat tzv. repose angle after avalanche (RAAA) jako vodítko pro posouzení stability svahu odpadu skládky. Je to úhel, pod kterým by se sesuv zastavil. Při překročení kritického sypného úhlu dojde k pádu sesuvu. V ověřené technologii používáme střední RAAA 39 stupňů (Yamawaki a kol. 2017).

#### *Zdůvodnění a popis vypočtu akumulace povrchového odtoku*

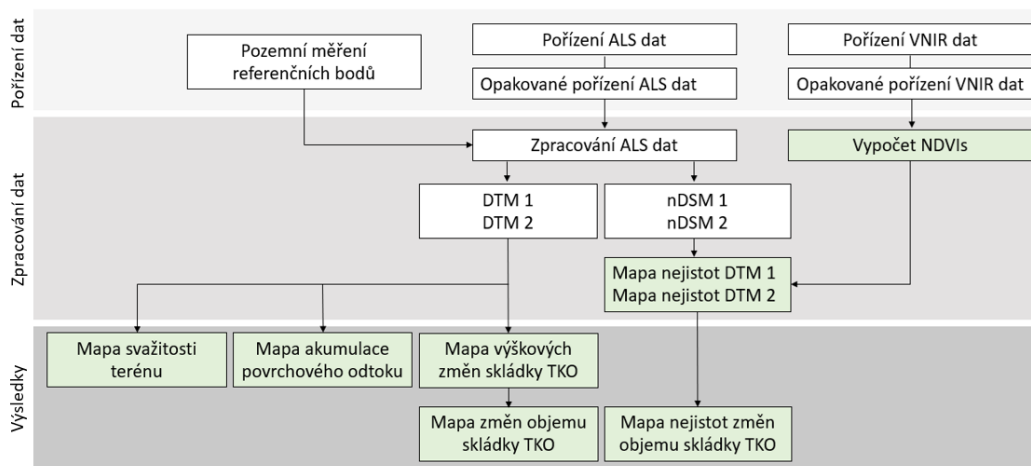
Akumulace povrchového odtoku je proces, při kterém se analyzuje směr a míra, jakou se srážková voda shromažďuje a odtéká po povrchu skládky. Při akumulaci velkého množství povrchového odtoku v určitých částech skládky mohou být tyto plochy náchylnější k erozi, což by mohlo poškodit konstrukci skládky nebo narušit ochranné vrstvy. Při nadměrném odtoku může voda přenášet kontaminanty z odpadu na skládce do okolního prostředí. Sledování akumulace odtoku pomáhá identifikovat místa, kde by mohla kontaminovaná voda opustit skládku. Znalost potenciální akumulace odtoku umožňuje zavést preventivní opatření, jako je odvodňovací systém nebo bariéry. Nadměrná akumulace vody v některých oblastech skládky může vést k podmáčení a následně ke zvýšenému riziku sesuvů půdy nebo odpadu. Monitorování akumulace povrchového odtoku tak pomáhá předcházet těmto nebezpečím.

Výpočet akumulace povrchového odtoku vychází z DTM vytvořeného z dat leteckého laserového skenování pomocí nástrojů GIS, kde se použijí funkce pro analýzu hydrologických dat. Na základě výpočtu svažitosti z DTM se vypočítají směrové vektory, které určují směr odtoku z každého pixelu do sousedních pixelů (tzv. *flow direction*). Směr je dán největším spádem mezi sousedícími pixely v DTM. Na základě směrů toku se vypočítá, kolik vody přitéká z pixelů nad ním (tzv. *flow accumulation*). Oblasti s vysokou akumulací odtoku představují v závislosti na svažitosti, délce svahu a složení materiálu místa, s vyšším potenciálem pro vznik vodní eroze nebo zamokření.



#### 4. Postup detekce změn tvaru a povrchu provozní skládky pomocí dat leteckého laserového skenování

Postup detekce změn tvaru a povrchu provozní skládky pomocí dat leteckého laserového skenování je popsán níže podle diagramu na Obr. 8. Postup sestává ze dvou fází: fáze získání a předzpracování laserových dat, kterou provádí poskytovatel dat a fáze vlastního výpočtu změn tvaru/objemu.



**Obrázek 8.** Diagram kroků pro detekce změn tvaru a povrchu provozní skládky tuhého komunálního odpadu (TKO) pomocí dat leteckého laserového skenování (ALS). Bílé bloky jsou aktivity pořizovatele leteckých dat laserového skenování (nebo laserového skenování z dronu). VNIR data jsou data ve viditelné a infračervené části elektromagnetického spektra, NDVI je normalizovaný rozdílový vegetační index, DTM je digitální model terénu, nDSM je normalizovaný digitální model terénu.

Pro výpočet mapy výškových změn skládky TKO se od sebe odečítají 2 rastrové vrstvy DTM. Každá z těchto vrstev je zatížena jinou chybou XYZ. Vzhledem k charakteru území skládek TKO je snadno proveditelné zjištění chyby Z a její korekce. Na vybraných referenčních bodech zaměřených prostřednictvím geodetické GPS lze zjistit výškový rozdíl mezi rastrem DTM a výškou geodetického měření, který je pak možné od původního rastru DTM odečíst, čímž vznikne normalizovaný rastr nDTM. Rastr změn výšky (DTM změn) vznikne odečtením rastru dřívějšího termínu (nDTM<sub>t-1</sub>) od rastru pozdějšího termínu (nDTM<sub>t</sub>)

$$\text{DTM}_{\text{změn}} = \text{nDTM}_{\text{t}} - \text{nDTM}_{\text{t-1}}$$

Z rastru výškových změn (DTM<sub>změn</sub>) lze získat rastr změny objemu skládky, vynásobením hodnoty změny výšky plochou pixelu.

Díky plošnému pokrytí a doplňkové informaci lidarových a VNIR obrazových dat lze změny tvaru/objemu skládky doplnit o odhad nejistoty popisovaných změn.

Mapa nejistot DTM se skládá z kombinované nejistoty ( $\sigma_{total}$ ) pořízených dat leteckého laserového skenování vypočtené v každém pixelu:

$$\sigma_{total} = \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2},$$

kde  $\sigma_1$  je chyba pozice Z na svazích,  $\sigma_2$  je chyba nízké a vysoké vegetace.

Nejistoty z obou DTM (t, t-1) je třeba zkombinovat, aby bylo možné odhadnout celkovou nejistotu při detekci změny. Pro dvě nezávislé nejistoty z DTM\_t ( $\sigma_{total1}$ ) a DTM\_t-1 ( $\sigma_{total2}$ ) se celková nejistota pro detekci změny vypočítá pomocí metody odmocnina sumy čtverců odchylek (root sum square):

$$\sigma_{changes} = \sqrt{(\sigma_{total1})^2 + (\sigma_{total2})^2}$$

### *Pozemní měření referenčních bodů*

Pozice referenčních bodů se využívá pro korekci chyby výšky dodaných rastrových modelů terénu (DTM). Referenční body by měly být umístěny na stabilních a přístupných plochách, která nejsou náchylné k posunu nebo výškovým změnám. Preferují se ideálně vodorovné, pevné povrchy, jako jsou silnice, betony nebo speciálně vybudované platformy. Obecně se doporučuje, aby referenční body nebyly příliš blízko sebe a vyskytovaly se v celé ploše skládky. Pokud jsou takovéto body součástí geodetického zaměření skládky TKO mohou být pro tento účel použity. V případě, že geodetické zaměření neexistuje, provádí se pozemní měření referenčních bodů na skládce pomocí metody globálního navigačního satelitního systému (GNSS). Toto měření není nutné opakovat při každém laserovém skenování, pokud nedošlo ke změně referenčních bodů.

### *Pořízení dat leteckého laserového skenování*

Letecké laserové skenování lokality skládky TKO probíhá za vhodného počasí (viz kapitola 3.2, podkapitola “Chyba přístroje”) v období bez sněhové pokrývky. Výška pořízení dat se vypočítává s ohledem na parametry laserového skeneru tak, aby hustota mračna bodů ve výsledném datovém souboru byla alespoň 5 bodů/m<sup>2</sup>. Tato hustota vyhovuje vytvoření DTM s prostorovým rozlišením 0,5 m a je dostačující pro detekce výškových změn na skládce TKO s dostatečnou přesností. Pro dosažení vyššího prostorového rozlišení rastru DTM je nutné pořizovat data leteckého laserového skenování s vyšší hustotou bodů (viz Tab. 4). Součástí dodaných dat by měl být vždy protokol obsahující informaci o dosažené přesnosti (chyba XYZ).

Česká technická norma ČSN 83 8036 “Skládkování odpadů - Monitorování skládek” uvádí: “deformace tělesa skládky se měří během provozování nejméně jednou ročně. Geodetické sledování může být prováděno jak leteckým měřením, tak pozemním způsobem”. V praxi geodetické zaměření se provádí jednou za rok a odevzdává se s roční zprávou na krajský úřad. Za včasnou prevenci možných negativních důsledků vlivu změn tvaru a povrchu skládky na životní prostředí může být doporučeno opakovat pořizování

dat leteckého laserového skenování (nebo skenování z dronu) a následné zpracování a analýzu hodnot DTM skládky každých 6 měsíců.

#### *Zpracování dat leteckého laserového skenování*

Prvotní zpracování dat z laserového skeneru probíhá zejména v programech dodaných výrobcem skeneru. Výpočet trajektorie letu, usazení dat do souřadného systému a jejich korekce (georeferencování), relativní orientaci jednotlivých letových linií, export mračna bodů a zpracování rastrů DTM, nDSM a provádí realizátor kampaně leteckého laserového skenování.

#### *Pořízení obrazových dat ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra a výpočet NDVI*

Pořízení obrazových dat ve viditelném a blízkém infračerveném spektru spolu s daty z leteckého laserového skenování je volitelné, ale může výrazně přispět k přesnějšímu posouzení chyb při analýze změn hodnot DTM na skládce. Jde o termín pořízení dat ve vegetačním období od konce dubna do konce října. Data ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra se používá pro výpočet normalizovaného rozdílového vegetačního indexu (NDVI), který kvantifikuje vegetaci měřením rozdílu mezi blízkým infračerveným světlem NIR (které vegetace silně odráží) a červeným světlem RED (které vegetace absorbuje):

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}), \text{ (nabývá hodnot z intervalu } [-1,1].$$

Hodnoty NDVI pro zapojenou zdravou zelenou vegetaci se obvykle pohybují nad 0,3. Vyšší hodnoty (blíže k 0,8) naznačují hustší a zdravější vegetaci, zatímco nižší hodnoty (kolem 0,3) mohou naznačovat méně hustou nebo stresovanou vegetaci. Pomocí GIS se vytvoří maska zelené vegetace na skládce tím způsobem, že z rastru NDVI se vyberou hodnoty v rozmezí 0,2 až 0,8. Maska zelené vegetace (Maska\_NDVI), se pak používá jako jeden z podkladů pro vytvoření mapy nejistot DTM skládky.

#### *Příprava rastrové vrstvy chyby pozice Z na svazích pro výpočet mapy nejistot DTM*

Jedním z hlavních faktorů, který na skládkách TKO ovlivňuje přesnost pozice Z na svazích je kombinace sklonu terénu a chyby XY ( $\epsilon_{XY}$ ). Informace o chybě XY se získá z protokolu, který poskytne dodavatel dat. Kombinací svažitosti a chyby XY je možné vypočítat velikost očekávané chyby Z na svazích. Tento přístup umožní lokalizovat oblasti s největší chybou v poloze Z a zohlednit tuto chybu při analýze změn tvaru a povrchu skládky TKO.

$$\sigma_z = \epsilon_{XY} \times \tan(\alpha),$$

kde  $\epsilon_{XY}$  je velikost chyby XY,  $\alpha$  je hodnota svažitosti terénu. Výpočet se může provést pomocí nástroje Raster Calculator v GIS softwaru (např. v QGIS).

### *Příprava rastrové vrstvy chyby nízké a vysoké vegetace pro výpočet mapy nejistot DTM*

Vrstva chyby vegetace se připravuje z rastru Maska\_NDVI (předchozí krok) a rastru nDSM (předává pořizovatel ALS dat) pomocí rastrové analýzy v GIS:

- rastr nDSM se použije k maskování stromů a keřů. Hodnotám souřadnice Z (výška objektu) v rastru nDSM, které jsou vyšší než 0,4 m, bude přiřazena hodnota 0. Tím se odstraní pixely s hodnotou Z nad 0,4 m, kde se nacházejí (mimo jiné) stromy a většina keřů. Pod touto maskou (Maska\_vys\_veg) je buď vysoká vegetace nebo nějaké antropogenní objekty (např. kupa pneumatik, apod.). Ostatním pixelům rastru nDSM bude přiřazena hodnota 1, čímž vznikne rastr nDSM\_0\_4m;
- pomocí rastrové kalkulačky v GIS se provede průnik rastru nDSM\_0\_4m a rastru Maska\_NDVI. Výsledný rastr bude mít hodnotu 1 pro bylinnou vegetaci nižší než 0,4 m - Maska\_niz\_veg (maska nízké vegetace)
- pomocí rastrové kalkulačky v GIS se provede průnik rastru Maska\_NDVI a Maska\_vys\_veg, Výsledkem bude plocha živých stromů a keřů;
- hodnotám v rastru Maska\_niz\_veg a Maska\_vys\_veg budou přiřazeny chyby, které způsobuje nízká a vysoká vegetace při výpočtu DTM:  $\pm 0,3$  m pro nízkou vegetaci a  $\pm 0,4$  m pro vysokou vegetaci. Přičtením a odečtením těchto hraničních chybových hodnot k původnímu DTM získáme interval, ve kterém se pohybují výšky každého pixelu v závislosti na výšce vegetace.

## 5. Ověřování technologie

Ověřování technologie proběhlo na skládce TKO Klobouky u Brna. Skládka TKO Klobouky u Brna je v provozní fázi od r. 1994 (Obr. 9). V současnosti (2024) se rozhoduje o rozšiřování její plochy. Na ploše objektu se nachází také rekultivovaná část skládky, která je ve fázi monitoringu už 12 let. Objekt je zajímavý tím, že je relativně velký (v porovnání s ostatními objekty projektu) - má plochu 8 ha, a je velmi dynamický. Proto je vhodným příkladem pro aplikaci dat leteckého laserového skenování k detekci aktivních změn povrchu a monitorování potenciálního sesedání tělesa skládky v průběhu času.



**Obrázek 9.** Pohled na část skládky Klobouky u Brna v různých časových obdobích.

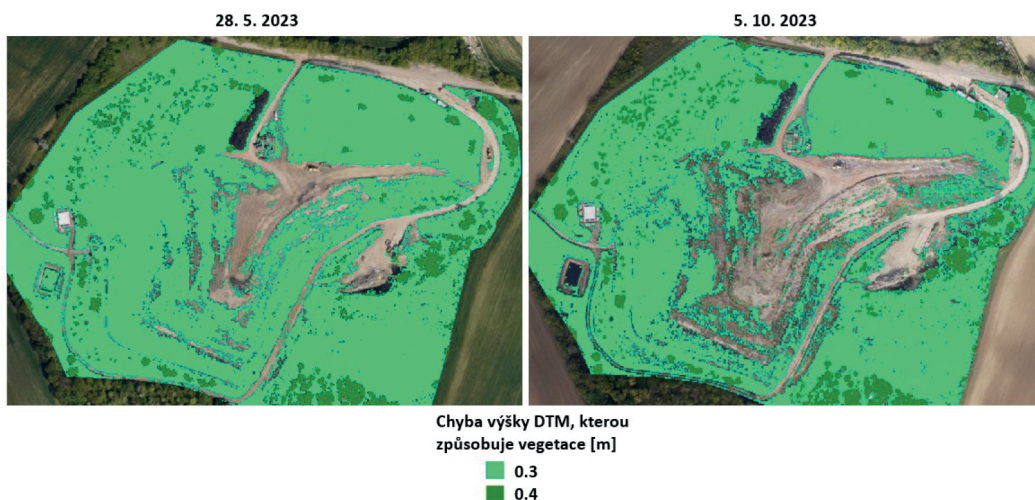
Data leteckého laserového skenování byla pořízena pomocí platformy RIEGL LMS Q780, součásti letecké laboratoře zobrazujících systémů (FLIS – Flying Laboratory of Imaging Systems, <https://olc.czechglobe.cz/flis/>), ve výšce 900 m nad terénem, a to v termínech 28. 5. 2023, 5. 10. 2023. Hustota mračna bodů výsledných souborů dat byla 10 bodů/m<sup>2</sup>, což umožnilo vytvoření DTM s prostorovým rozlišením 0,3 m. Zároveň s daty ASL byla pořízená data ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra pomocí hyperspektrálního skeneru CASI-600 s prostorovým rozlišením 0,8 m.

Geodetické zaměření skládky ze srpna 2023 bylo k dispozici od provozovatele skládky pro účely zpracování technologie. Vybrané body skládky se měřili pomocí polní GPS (Topcon HiPer HR) v říjnu 2023 pro upřesnění zpracování dat leteckého laserového skenování (Obr. 10).



**Obrázek 10.** Geodetické zaměření skládky (modré body), a body zaměřené polní GPS (Topcon HiPer HR) pro účely zpracování technologie (růžové body) na skládce Klobouky u Brna. Pozadí je RGB ortofoto pořízené 28. 5. 2023 (FLIS).

Rastrová vrstva chyby DTM, kterou způsobuje nízká (bylinná) a vysoká (stromy a keře) vegetace byla spočítána z dat ve viditelné a blízké infračervené oblasti spektra pro každý termín (Obr. 11) na základě postupu popsaného v kapitole 4, podkapitola “Příprava rastrové vrstvy chyby nízké a vysoké vegetace pro výpočet mapy nejistot DTM”.



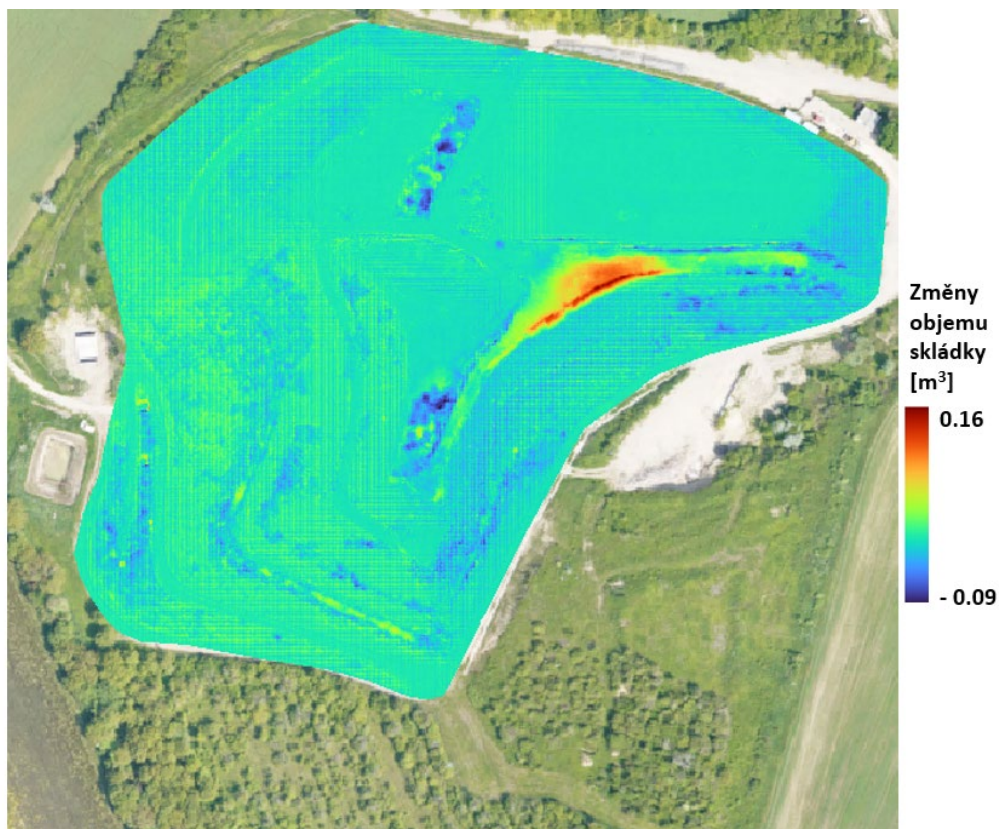
**Obrázek 11.** Rastrová vrstva chyby digitálního modelu terénu (DTM), kterou způsobuje vegetace na skládce TKO Klobouky u Brna ve dvou termínech. Světle zelený odstín označuje nízkou (bylinnou) vegetaci. Tmavě zelený odstín označuje vysokou vegetaci (stromy a keře). Pozadí je RGB ortofoto pořízené 28. 5. 2023 a 5. 10. 2023 (FLIS).

Rastrová vrstva chyby pozice XY na svazích pro výpočet mapy nejistot byla spočítána z rastru svažitostí terénu v GIS (Obr. 12).



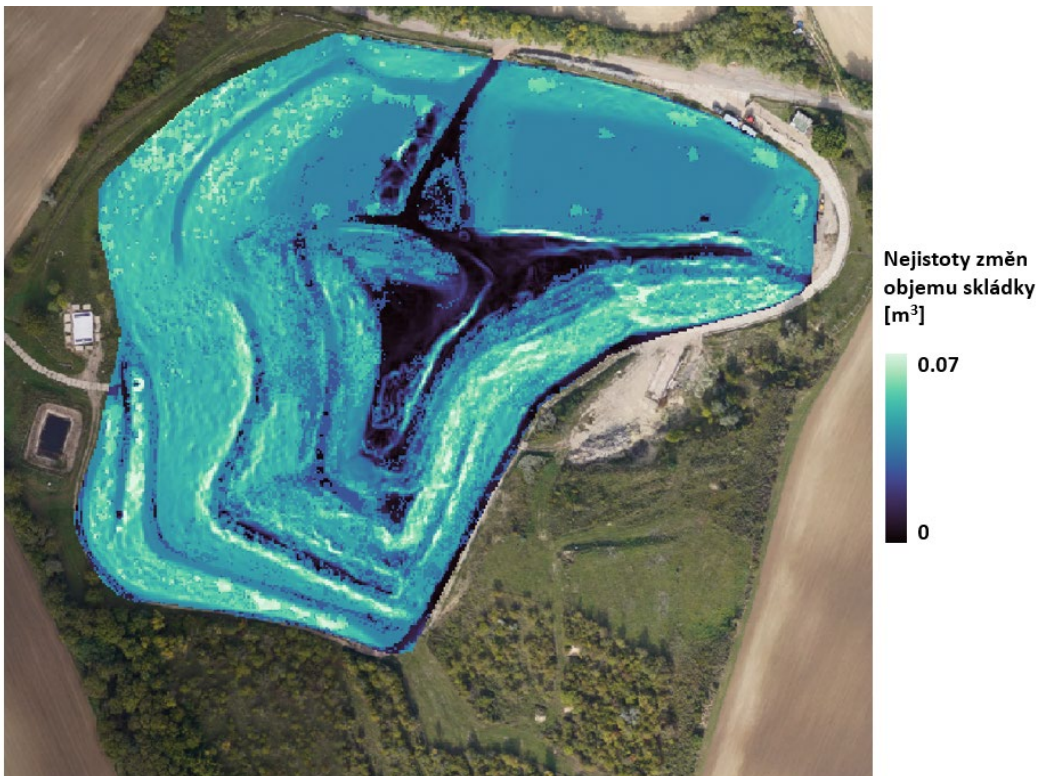
**Obrázek 12.** Chyba pozice XY na svazích skládky TKO. Pozadí obrázku je RGB ortofoto pořízené 28. 5. 2023 (FLIS).

Změny objemu skládky TKO mezi termíny 28. 5. 2023 a 5. 10. 2023 byly spočítány z rastru změny výšek DTM vynásobením hodnoty změny výšky plochou pixelu (0,3 m × 0,3 m) (Obr. 13). Nejistoty změn objemu skládky při použití metody leteckého laserového skenování jsou ukázány na Obr. 14.



**Obrázek 13.** Změny objemu skládky mezi termíny 28. 5. 2023 a 5. 10. 2023 spočítané z dat leteckého laserového skenování. Každý pixel reprezentuje změnu objemu v  $m^3/\text{pixel}$ . V tomto případě je plocha jednoho pixelu  $0,09 m^2$ .





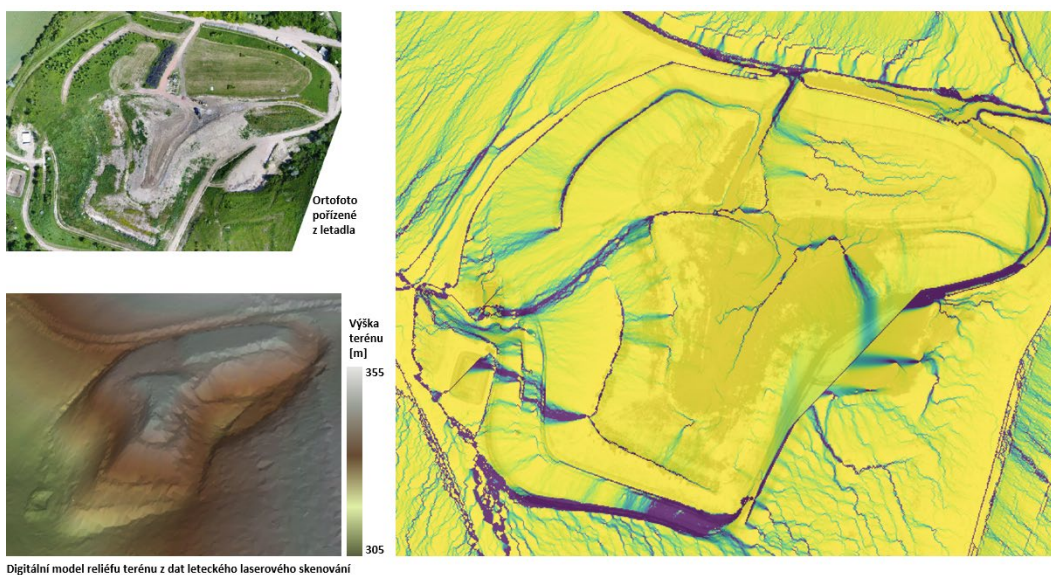
**Obrázek 14.** Nejistoty změn objemu skládky TKO. Pozadí je RGB ortofoto pořízené 28. 5. 2023 (FLIS).

Jako příklad, pro výpočet změny objemu na konkrétní oblasti skládky byl proveden součet všech hodnot pixelů rastru objemových změn skládky uvnitř oblasti (Obr. 15). Změna objemu (a nejistota) pro oblast 1 činila  $163 \text{ m}^3 (\pm 9,8 \text{ m}^3)$ , změna objemu (a nejistota) pro oblast 2 činila  $-30 \text{ m}^3 (\pm 2,5 \text{ m}^3)$ .



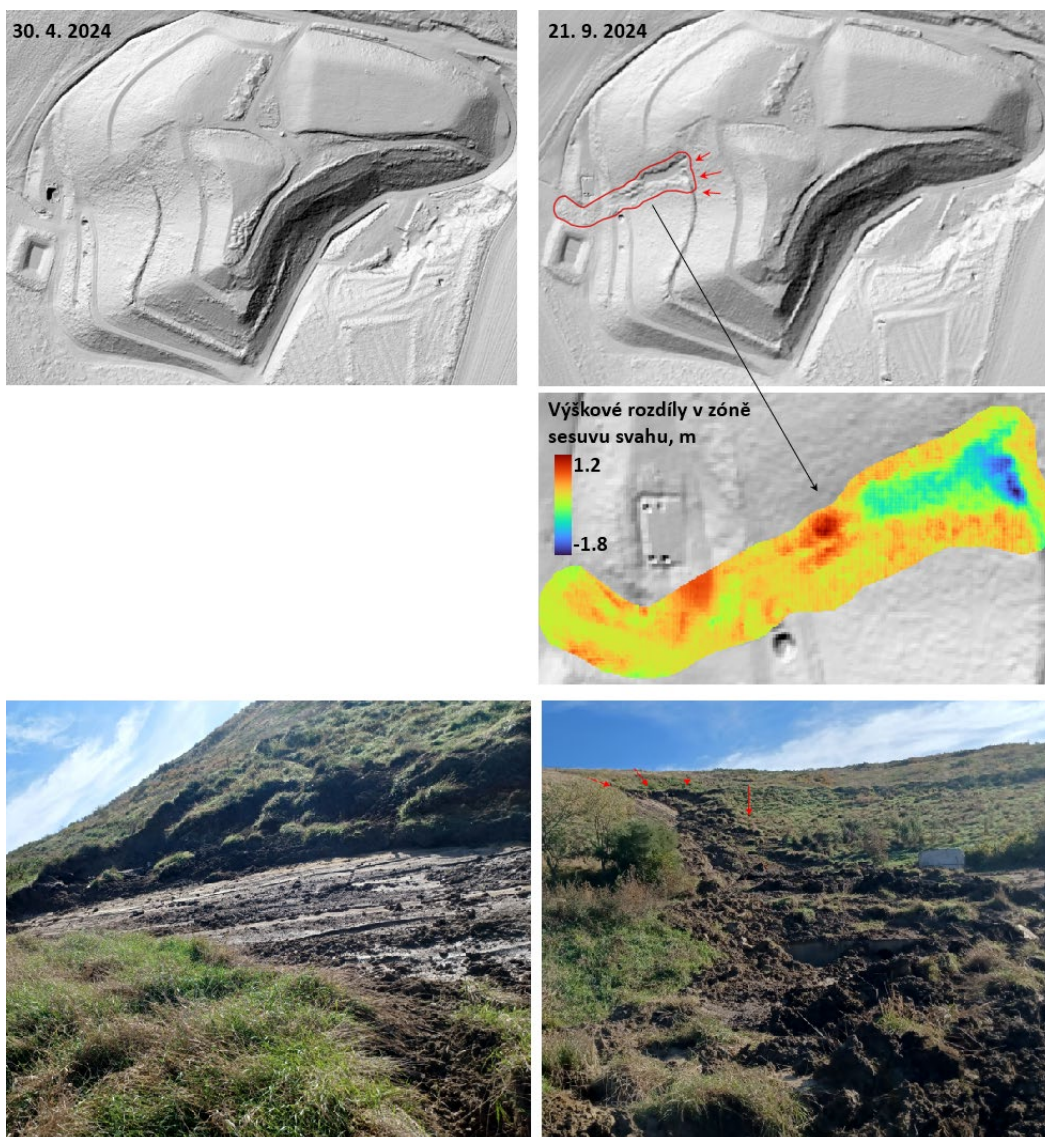
**Obrázek 15.** Ortofoto oblastí skládky, kde byly zjištěny největší změny objemu mezi termíny 28. 5. 2023 a 5. 10. 2023.

Akumulace povrchového odtoku byla vypočtena z DTM pomocí nástroje GIS (Obr. 16). Tato mapa poskytuje cenné informace o tom, kudy a jaké množství vody potenciálně stéká po povrchu skládky za předpokladu, že by nedocházelo ke vsakování srážkové vody do tělesa. Oblastí s vysokou koncentrací odtoku (modrá barva) jsou náchylnější k erozi, což může vést k destabilizaci skládky nebo úniku znečišťujících látek do okolního prostředí. Odtokové cesty mohou naznačit, kam by se voda mohla přirozeně dostávat, což je užitečné pro navrhování odvodňovacích systémů. Akumulace povrchového odtoku také indikuje oblasti, které by byly náchylnější k zaplavení během intenzivních srážek, a které jsou často spojeny s vyšším rizikem sesuvu, zejména pokud je svah strmý a není dostatečně zpevněn.



**Obrázek 16.** Akumulace povrchového odtoku skládky TKO Klobouky u Brna. Oblastí s vysokou koncentrací odtoku jsou označeny modrou barvou.

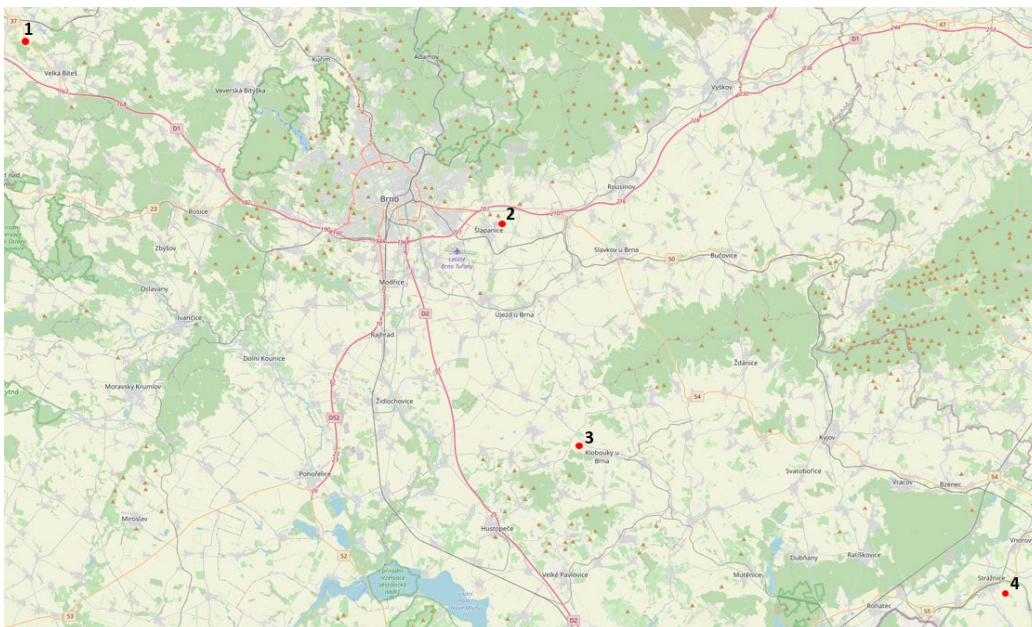
Příklad využití dat leteckého laserového skenování pro operativní mapování sesuvu svahu skládky v důsledku extrémního množství dešťových srážek (Obr. 17). Sesuv svahu vznikl v části vysoké potenciální akumulace povrchového odtoku. Sesuvy svahů patří mezi nebezpečné jevy, které pro provozovatele přinášejí významné finanční náklady. Analýzou DTM z lidarových dat lze identifikovat plochy, které jsou potenciálně ohrožené a následně jim lze zvýšit prioritu při geodetickém zaměření skládky, které umožňuje detekovat i minimální změny/deformace terénu.



**Obrázek 17.** Nahoře jsou stínové modely reliéfu terénu z dat leteckého laserového skenování pořízených před a po sesuvu části svahu skládky TKO. Uprostřed je mapa výškových změn části sesuvného svahu. Dole jsou fotografie svahu skládky hned po sesuvu.

## 6. Ekonomické aspekty technologie

Pro vyhodnocení ekonomické efektivity použití metody leteckého laserového skenování skládky TKO k výpočtu změn objemu TKO v čase jsme porovnali náklady této metody s metodou geodetického zaměření a metodou laserového skenování z dronu. Zohledněna byla časová náročnost a počet specialistů na pořízení díla (Tab. 6) a další finanční náklady (Tab. 7) potřebné k získávání dat a zpracování výsledků pro potenciální monitorování čtyř skládek TKO v blízkosti města Brna (Obr. 18).



**Obrázek 18.** Umístění skládek TKO vzhledem zohlednění ekonomických aspektů technologie: 1 - Osová Bítýška, 2 - Šlapanice, 3 - Klobouky u Brna, 4 - Strážnice.

**Tabulka 6.** Příklad časových a kapacitních nákladů pro zaměření skládek TKO (Obr. 18) pomocí metody leteckého laserového skenování (A), laserového skenování z dronu (B) a metody geodetického zaměření (C). Čas na sběr dat v případě B a C zahrnuje i čas na dopravu autem.

Skládka TKO	Vzdálenost od Brna [km]	Plocha [ha]	Čas na sběr dat [h]			Čas na zpracování dat [h]			Kapacita lidí		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	35	1,4	2	3	10	3	3	8	2	1	2
2	10	2,5		3,5	10	3	3	8			
3	35	8,0		6,5	20	3	3	8			
4	80	4,0		4	16	3	3	8			
Celkem			2 h	17 h	56 h	12 h	12 h	32 h			

Letecké laserové skenování: 2 h + 12 h = 14 h

Laserové skenování z dronu: 17 h + 12 h = 29 h

Geodetické zaměření: 56 h + 32 h = 88 h

**Tabulka 7.** Příklad finančních nákladů pro zaměření čtyř skládek TKO (Obr. 18) pomocí metody leteckého laserového skenování (A), laserového skenování z dronu (B) a metody geodetického zaměření (C).

Náklady	A	B	C
Osobní náklady, Kč*	6 700		
Ostatní přímé náklady, Kč	185 000 (palivo a údržba)		
Celkem, Kč	191 700	54 000	176 000

\*Průměrný plat zaměstnance je 54 000 Kč (včetně odvodů)

Cena laserového skenování z dronu se spočítala z průměrné sazby za pracovní den 15 000 Kč (např. <https://3d.geoobchod.cz/#cenik>). Cena geodetického zaměření skládky se může lišit v závislosti na velikosti skládky, složitosti terénu, typu měření a požadované přesnosti. Orientačně se ceny pro zaměření členitých nebo zalesněných oblastí s výškovými rozdíly se pohybují mezi 8 000 Kč až 22 000 Kč za hektar (v době psaní

technologie) (<https://geodeziepp.cz/cenik.htm>, <https://www.geoka.cz/cenik/>, <https://zamerime.cz/cenik.php>). Finanční náklady pro zaměření čtyř skládek TKO (Obr. 18) pomocí metody geodetického zaměření se počítaly z průměrné sazby za hektar terénu skládky 11 000 Kč (Tab. 7).

V uvedeném příkladu zaměření čtyř skládek TKO:

Letecké laserové skenování (A) je nejrychlejší metodou, ale také nejdražší. Je vhodné tam, kde je potřeba rychlá a přesná data s pokrytím plošně větších oblastí a vyšší finanční náklady nejsou limitním faktorem.

Laserové skenování z dronu (B) je cenově nejvýhodnější, avšak časově náročnější než letecké skenování. Je vhodné pro projekty, kde je finanční úspora prioritou a čas není zásadním faktorem.

Geodetické zaměření (C) je zdaleka nejvíce časově náročné. Z hlediska finančních nákladů se výrazně neliší od leteckého laserového skenování.

Výběr metody záleží na prioritách provozovatele skládky. V případě, že je prioritou rychlost nasnímání jedné lokality (na lokalitě probíhá nějaký plošně rozsáhlý a časově velmi dynamický jev), je letecké skenování nejlepší volbou. Vyšší náklady na pořízení dat leteckým laserovým skenováním lze omezit sloučením více lokalit do jedné letecké kampaně, což by vyžadovalo dohodu o využití technologie ze strany více provozovatelů skládek TKO. Pro provozní monitoring změn tvaru/objemu skládkového tělesa vychází nejkonomičtěji využití dronové technologie. Naproti tomu použití geodetických měření má svoje opodstatnění v případech, kdy je potřeba zjistit/monitorovat i malé změny terénu s vysokou přesností, např. potenciálně problémové části svahů a tím včas odhalit možné vznikající rizikové situace.

## Závěr

Použití technologie leteckého laserového skenování při monitorování změn tvaru a povrchu skládek tuhého komunálního odpadu se ukazuje jako efektivní a přesná metoda. V porovnání s tradičními geodetickými metodami je rychlejší, méně náročná na lidské zdroje a poskytuje detailní informace o prostorově rozsáhlé lokalitě s více skládkami. Výsledky z testovaných skládek potvrdily schopnost této technologie detekovat klíčové změny, které mohou ovlivnit stabilitu a bezpečnost skládky, což je důležité pro optimalizaci jejího provozu a minimalizaci environmentálních rizik. Postup popsany v technologii je použitelný nejen pro letecké laserové skenování, ale také pro laserové skenování z dronů. To může být vhodnou alternativou v projektech, kde je prioritou finanční úspora a kde není potřeba monitorovat příliš rozsáhlé území.

## Zkratky:

ALS - letecké laserové skenování (airborne laser scanning)

ČSN - česká technická norma

DPZ – dálkový průzkum Země

DSM - digitální model povrchu (digital surface model)

DTM - digitální model terénu (digital terrain model)

FLIS - letecká laboratoř zobrazujících systémů (Flying Laboratory of Imaging Systems, <https://olc.czechglobe.cz/flis/>)

GIS - geografický informační systém (geographic information system)

GNSS – globální navigační satelitní systém (Global Navigation Satellite System)

IMU - inerciální měřicí jednotky (inertial measurement unit),

LiDAR – Light Detection And Ranging

nDSM - normalizovaný digitální model povrchu (normalized digital surface model)

nDTM – normalizovaný digitální model terénu (normalized digital terrain model)

NDVI - normalizovaný rozdílový vegetační index (normalized difference vegetation index)

QGIS – kvantový GIS (Quantum Geographic Information System)

RMSE – střední kvadratická chyba (root mean square error)

Sm. odch. – směrodatná odchylka (standard deviation)

TKO – tuhý komunální odpad

VNIR - viditelné a blízké infračervené (visible and near infrared)

## Reference

- Adamcová, D., Bartoň, S., Osinski, P., Pasternak, G., Podlasek, A., Vaverková, M.D., Koda, E. 2020. Analytical Modelling of MSW Landfill Surface Displacement Based on GNSS Monitoring. *Sensors*, 20, 5998. <https://doi.org/10.3390/s20215998>
- Ahokas, E., Kaartinen, H., Hyyppä, J. 2003. A quality assessment of airborne laser scanner data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, 3/W13, Dresden, Germany.
- Baltsavias, E. P. 1999. Airborne laser scanning: basic relations and formulas, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2–3): 199–214. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00015-5](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00015-5)
- Beakawi Al-Hashemi, Hamzah M., Baghabra Al-Amoudi, Omar S. 2018. A review on the angle of repose of granular materials. *Powder Technology*. 330: 397–417.
- Bollweg, A. & R. de Lange. 2003. Wat ruist er doorhet struikgewas. Technical Report AGI-GAR-2003-22 (in Dutch), *Adviesdienst Geo-Informatie en ICT*, Rijkswaterstaat, The Netherlands.
- Brovkina, O., Kopkáně, D., Polák, M., Bednařík, A., Hanuš, J. 2023. Application of airborne data to monitor urban infrastructure objects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*.
- Brovkina, O., Novotny, J., Cienciala, E., Zemek, F., Radek, R. 2017. Mapping forest aboveground biomass using airborne hyperspectral and LiDAR data in the mountainous conditions of Central Europe. *Ecological Engineering*, 100. 219–230.
- ČSN 83 8036. Skládkování odpadů - Monitorování skládek. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- Dahlqvist, S., Rönnholm, P., Salo, P., Vermeer, M. 2011. Evaluating the correctness of airborne laser scanning data heights using vehicle-based RTK and VRS GPS observations. *Remote Sens.*, 3, 1902–1913. <https://doi.org/10.3390/rs3091902>
- European Committee for Standardization. 2013. Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9b04ff6b-6e80-11e5-9317-01aa75ed71a1>
- Hlásěk, D. & Fröhlich, J. 2020. Potenciál využití dat leteckého laserového skenování (LiDAR) v archeologii severně od Písku. *Academia.edu*. <https://www.academia.edu/43202408>
- Klaas-Witt, T., & Emeis, S. 2022. The five main influencing factors for lidar errors in complex terrain. *Wind Energy Science*, 7, 413–431. <https://doi.org/10.5194/wes-7-413-2022>
- Kudrna, Z. 2008. Sedání vybraných skládek TKO v České republice. *Stavební konstrukce z pohledu geotechniky*, Brno: Akademické nakladatelství CERM, 35–40.
- Kudrna, Z. 2009. Long-term deformations of municipal landfill bodies and their effects on functional safety of superficial sealing. *Acta Geodyn. Geomater.*, 6 (4), 465–473.
- Moudrý, V., Cord, A.F., Gábor, L., Laurin, G.V., Barták, V., Gdulová, K., Malavasi, M., Rocchini, D., Stereńczak, K., Prošek, J., Klápště, P. and Wild, J. 2023. Vegetation structure derived from airborne laser scanning to assess species distribution and habitat suitability: The way forward. *Divers Distrib*, 29: 39–50. <https://doi.org/10.1111/ddi.13644>



- Novotný, J., Navrátilová, B., Albert, J., Cienciala, E., Fajmon, L., Brovkina, O. 2021. Comparison of spruce and beech tree attributes from field data, airborne and terrestrial laser scanning using manual and automatic methods. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*.
- Okay, U., Telling, J., Glennie, C. Dietrich, W. 2019. Airborne lidar change detection: An overview of Earth sciences applications. *Earth-Science Reviews*. 198. 102929. 10.1016/j.earscirev.2019.102929.
- Pasternak, G., Zaczek-Peplinska, J., Pasternak, K., Jóźwiak, J., Pasik, M., Koda, E., Vaverková, M.D. 2023. Surface Monitoring of an MSW Landfill Based on Linear and Angular Measurements, TLS, and LIDAR UAV. *Sensors*, 23, 1847. <https://doi.org/10.3390/s23041847>
- Pavelka, P. 2012. Letecké laserové skenování – možnosti a aplikace. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Materiály konferenci TELČ 2012. <https://lfgm.fsv.cvut.cz>
- Pfeifer, N., Gorte, B.G., Elberink, S.O. 2004. Influences of vegetation on laser altimetry—analysis and correction approaches. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences*. Specifically, XXXVII, 8/W2: 283-287.
- Rieger, P. 2012. RIEGL quality assurance and system integration. *RIEGL*.
- Simpson, J.E., Smith, T.E.L., Wooster, M.J. 2017. Assessment of errors caused by forest vegetation structure in airborne LiDAR-derived DTMs. *Remote Sens.*, 9, 1101. <https://doi.org/10.3390/rs9111101>
- Sliusar, N., Filkin, T., Huber-Humer, M., Ritzkowski, M. 2022. Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: A comprehensive review. *Waste Management*. 139. 1-16.
- Stereńczak, K., & Kozak, J. 2011. Evaluation of digital terrain models generated in forest conditions from airborne laser scanning data acquired in two seasons. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26(4), 374–384.
- Tagestad, J. D., Larson, K. B., Royer, P. D. 2017. Analysis of remotely sensed datasets to detect changes in waste sites. Pacific Northwest National Laboratory report.
- Yamawaki, A., Doi, Y., Omine, K. 2017. Slope stability and bearing capacity of landfills and simple on-site test methods. *Waste Management & Research*, 35(7):730-738. doi:[10.1177/0734242X17706055](https://doi.org/10.1177/0734242X17706055)