

# Laserové skenování

---

*Metodika pro využití technologie na projektech*

## Obsah

|                                            |    |
|--------------------------------------------|----|
| Úvod .....                                 | 2  |
| Technologie laserového skenování .....     | 3  |
| Pozemní statické laserové skenování .....  | 3  |
| Pozemní STOP & GO laserové skenování ..... | 4  |
| Mobilní laserové skenování .....           | 4  |
| Letecké laserové skenování .....           | 4  |
| Zpracování dat .....                       | 6  |
| Aplikace .....                             | 8  |
| Porovnání jednotlivých technologií .....   | 8  |
| Podklad pro projekt .....                  | 12 |
| Požadované výstupy .....                   | 12 |
| 3D dokumentace provedení stavby .....      | 13 |
| Požadované výstupy .....                   | 14 |
| Příprava zakázky .....                     | 14 |
| Laserové skenování .....                   | 14 |
| Základní požadavky .....                   | 14 |
| Referenční body .....                      | 14 |
| Definice zájmového území .....             | 15 |
| Letový plán pro laserové skenování .....   | 15 |
| Vlícovací body .....                       | 16 |
| Digitální snímkování .....                 | 17 |
| Georeference leteckých snímků .....        | 17 |
| Požadavky na dodání dat .....              | 18 |
| Kontrola kvality .....                     | 19 |

## Úvod

Cílem tohoto materiálu je popsat technologie leteckého a pozemního laserového skenování a jejich využití v procesu plánování, realizace, monitoringu a dokumentace skutečného provedení staveb jakož i v procesu monitoringu stávajících staveb. V minulých několika letech byly tyto technologie využity na několika stavbách. Na základě získaných zkušeností a výsledků bylo rozhodnuto o začlenění těchto postupů mezi standardní metody a v některých případech se bude jednat i o vyžadované postupy. Tento materiál poskytne všem uživatelům základní přehled o technologiích laserového

skenování, jejich konkrétních aplikacích a dává návod při postupu objednávání těchto služeb a nastavení požadovaných technických parametrů.

## Technologie laserového skenování

Technologie laserového skenování se začala v praxi používat v 90. letech minulého století. Laserové skenování nebo též LIDAR (Light Detection And Ranging) využívá principu pulzního bezodrazového dálkoměru, který pracuje s vysokou frekvencí, řádově v desítkách tisíc Hertzů. Laserový paprsek je vyslán senzorem k povrchu objektu (terénu) a je měřen tranzitní čas od doby vyslání po dobu návratu odraženého paprsku. Současně jsou měřeny úhly vyslaného paprsku a v případě mobilních (leteckých) aplikací je zaznamenána poloha senzoru. Z těchto údajů lze vypočítat přesné prostorové souřadnice každého odrazu laserového paprsku. Vzniká tak přesný digitální 3D obraz dokumentovaných objektů a terénu ve formě tzv. mračna bodů. Laserový skener může být nesen pomocí letadla, vrtulníku nebo vozidla, případně umístěn staticky.

Z pohledu aplikace technologie existují tyto metodiky:

- Pozemní statické laserové skenování (přístroj je umístěn na stativu)
- Pozemní STOP & GO laserové skenování (přístroj je umístěn na vozidle, které zastavuje na každém skenovacím stanovišti)
- Mobilní laserové skenování (skenování probíhá z jedoucího vozidla)
- Letecké laserové skenování (skener je nesen letadlem nebo vrtulníkem)

Jednotlivé metodiky se liší přesností, hustotou měřených dat, rychlostí pořízení dat i finanční náročností. Volba vhodné metodiky je odvislá od účelu a nároků na výsledky. Právě pro orientaci mezi jednotlivými technologiemi slouží tento materiál.

Laserové skenování lze obecně charakterizovat těmito základními rysy:

- Eliminace lidského faktoru při měření, vysoká objektivnost
- Přesnost
- Vysoká hustota měřených bodů
- Krátká doba potřebná pro pořízení velkého množství dat
- Vysoká automatizace zpracování měřených dat

Jedná se o bezkontaktní metodu, tzn. lze ji využít i na komunikacích za provozu. Oproti klasickému geodetickému měření je laserové skenování mnohonásobně bezpečnější.

Přímým výstupem laserového skenování je tzv. mračno bodů. Jedná se o miliony bodů zaznamenávající odrazy laserových paprsků. Tato data je nutno dále zpracovat metodami klasifikace a automatické až manuální vektorizaci, tak aby s nimi bylo možné pracovat v systémech CAD nebo GIS. Společně s LIDAR daty jsou většinou pořizovány letecké snímky, které mohou být využity při dalším zpracování.

## Pozemní statické laserové skenování

Laserové skenování je moderní metoda pořizování přesné dokumentace prostorově složitých objektů, jako jsou fasády historických budov, průmyslové provozy a zařízení, konstrukce, nebo podzemní prostory, štoly a tunely.

Laserové skenování představuje skutečnou revoluci v oblasti geodézie a fotogrammetrie. Jeho nasazení umožňuje řešení takových úloh, které by při použití klasických metod představovaly neúměrně vysoké náklady nebo by nebyly vůbec realizovatelné.

Pozemní laserový skener je zařízení umístěné většinou na stativu, které snímá ve zvolené výšce okolí pomocí odražených laserových paprsků. Většinou je možné pořídit scénu v úhlu 360°v rozsahu od 2 do několika set metrů. Poloha mračna bodů se pak určuje buď pomocí vlíčovacích bodů nebo zaměření polohy skeneru pomocí totální stanice nebo GPS nebo kombinací obojího.

Výhody pozemního laserového skenování

- Vysoká rychlost zaměření
- Přesnost 1 -10 mm
- Pokročilý stupeň automatizace při zpracování
- Bezkontaktní měření
- Možnost měření v nepřístupných podmínkách nebo nebezpečných provozech
- Vyloučení možných chyb oproti klasickým metodám
- Úspora nákladů

### Pozemní STOP & GO laserové skenování

Metoda STOP&GO je pouze aplikací pozemního skenování, kdy je celý systém umístěn na automobilu nebo vozíku, aby bylo možné rychle přesouvat skener. Skenování samotné pak probíhá z místa, kde vozidlo na dobu skenování zastaví.

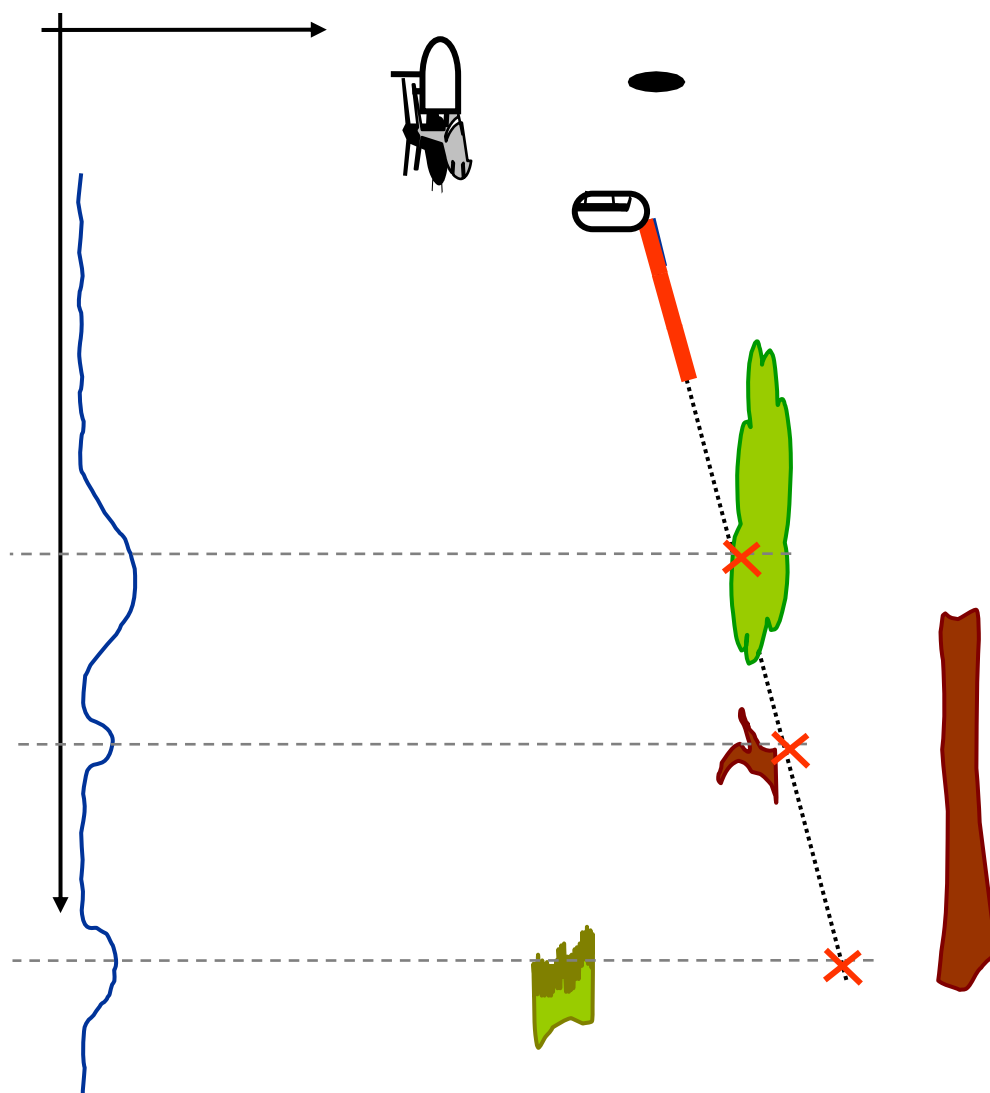
### Mobilní laserové skenování

Mobilní mapování většinou kombinuje sběr 3D dat z laserového skenování s fotografiemi, panoramatickými fotografiemi nebo videem. Systém může být dále doplněn dalšími senzory, které slouží především k diagnostickým účelům. Jedná se například o laserovou lištu pro sledování příčných nerovností vozovky nebo technologii georadaru.

### Letecké laserové skenování

U letecké varianty je skener nešen buď vrtulníkem nebo letadlem. Pro potřeby dopravního stavitelství se jeví jako výhodnější použití vrtulníku, který dokáže přesněji sledovat osu komunikace a letět nižší rychlostí. Díky tomu lze dosáhnout vysoké přesnosti ve výšce (až 15 mm) a získat data s hustotou až 120 bodů na m<sup>2</sup>. Oproti tomu letadlo použijeme tam, kde potřebujeme pokrýt větší území a stačí nám nižší přesnost a hustota měřených bodů.

Společně s laserovým skenerem nese většinou letoun i digitální kameru, která umožňuje současné pořízení digitálních snímků s vysokým rozlišením. Kamera je kalibrována společně s jednotkou IMU/GPS a získané snímky lze tedy využít k fotogrammetrickému vyhodnocení, nebo pro vytvoření ortofotomapy. Snímky lze při vyhodnocování efektivně kombinovat s laserovými daty.



*Princip leteckého laserového skenování: Vyslaný paprsek se odráží od vegetace a terénu a je zaznamenávána intenzita jednotlivých odrazů.*

Hustota bodů, rozlišení digitálních snímků pořizovaných společně s LIDAR daty a pochopitelně i pokrytí území jednou náletovou osou je přímo závislé na výšce letu. Následující tabulka ukazuje srovnání těchto základních parametrů:

| Výška nad terénem | Šíře pokrytého pásu | Bodů / m <sup>2</sup> | Rozlišení snímků    |
|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| 100 m             | 70-120 m            | 60 – 100              | 1 – 2 cm / pixel    |
| 200 m             | 140-230 m           | 30 – 50               | 2 – 4 cm / pixel    |
| 300 m             | 220-350 m           | 20 – 33               | 3 – 5 cm / pixel    |
| 500 m             | 360-580 m           | 10 – 20               | 5 – 9 cm / pixel    |
| 700 m             | 510-810 m           | 5 – 15                | 7 – 12,5 cm / pixel |

Existuje několik typů skenerů. Pro oblast silničního stavitelství se jako nejvhodnější jeví ty, jejichž paprsek je vysílán po kuželové ploše, což umožňuje získat body i na fasádách staveb případně bocích

jednotlivých konstrukcí. Druhou výhodou těchto systémů je „opakovanost“ měření, kdy každý úsek měřeného terénu je prakticky změřen dvakrát. Na existujících komunikacích tak lze například eliminovat projíždějící vozidla.

S rozvojem technologie byly některé systémy dovedeny až na úroveň milimetrové přesnosti určení výšky. Při aplikaci speciálních pracovních postupů je možné dosáhnout absolutní výškové přesnosti měřených bodů v rozsahu 15 – 20 mm. Tato data jsou využitelná zejména při projektování rekonstrukcí již existujících staveb nebo pro ověření přesností provedených staveb.

Jak již bylo řečeno, společně s LIDAR daty jsou zpravidla pořizovány i digitální snímky s vysokým rozlišením. Podobně jako u klasického leteckého snímkování jsou ke každému snímku s využitím GPS/IMU zaznamenávány parametry vnější orientace jednotlivých snímků. Díky tomu, lze snímky využít ke stereoskopickému vyhodnocení nebo ke zpracování ortofotomap zájmového území s vysokým rozlišením až 2 cm. Na těchto ortofotomapách je pak možné identifikovat nejmenší detaily vybavení komunikace, jakož i porušená místa na vozovce.



*Ortofotomapa s rozlišením 3 cm/pixel*

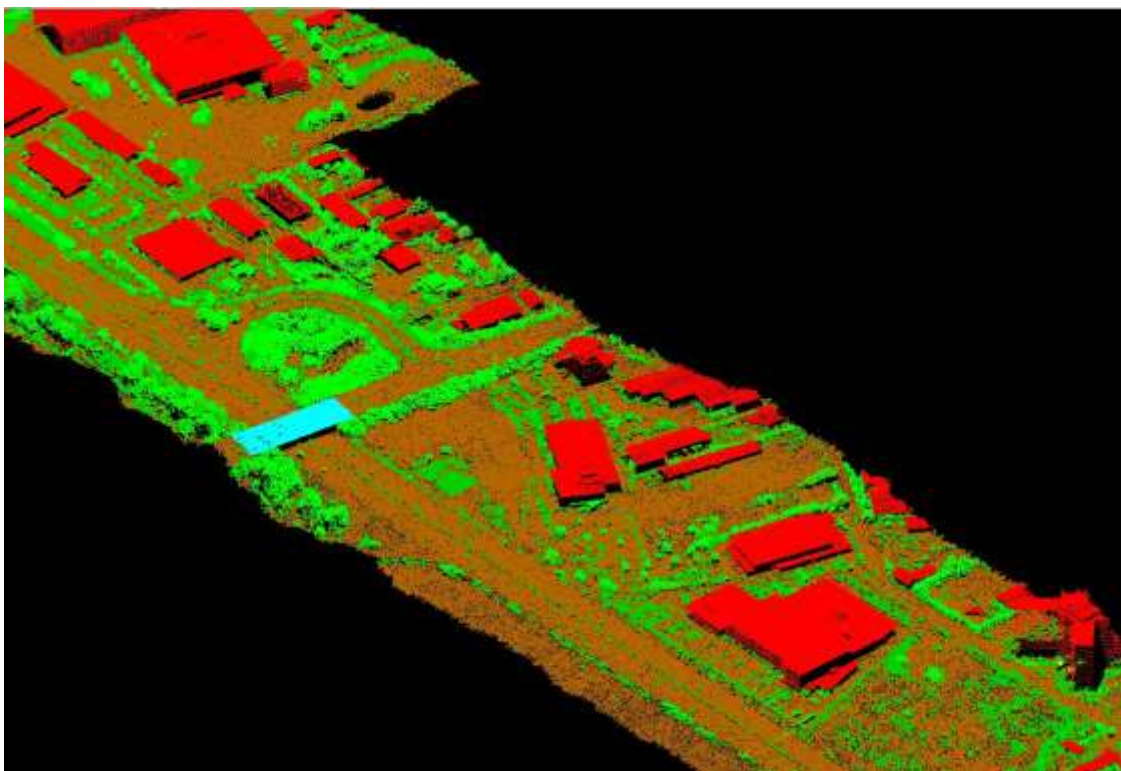
Letecké laserové skenování je možné využít na projektech od rozsahu několika kilometrů a zejména v případech dokumentace existujících komunikací za provozu.

### **Zpracování dat**

Primárním výstupem skenování (po provedení transformace do místního souřadnicového systému a vyrovnání s využitím vlíčovacích bodů) je zmíněné mračno bodů. Jedná se o desítky až stovky milionů bodů se souřadnicemi XYZ, které reprezentují jednotlivé odrazy laserového pulzu. Každý bod může navíc nést informaci o intenzitě odrazu (reflexivitě) a informaci o barvě převzatou z digitálních snímků.

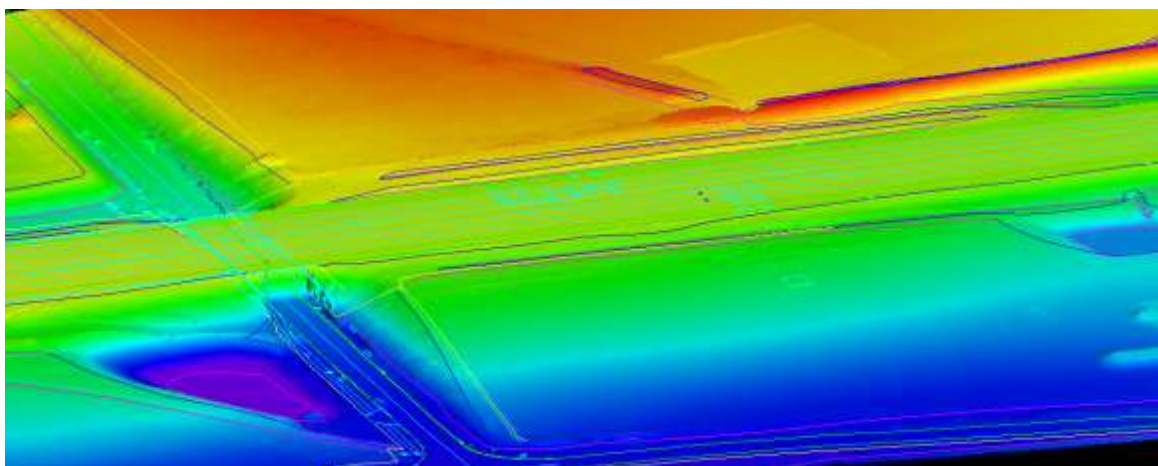
V první fázi zpracování jsou jednotlivé body klasifikovány do tříd. Automatizovaně jsou v mračnu bodů identifikovány body ležící na terénu (nejnižší nebo také nejvzdálenější odrazy laserových

paprsků). Z takto klasifikovaných bodů je možné generovat velmi detailní digitální model terénu nebo povrchu, modelovat budovy a další objekty ve 3D. S využitím orientovaných digitálních snímků je možné provádět mapování zájmového území s vysokou přesností. V případě potřeby jsou vybrané objekty jako šachty nebo propustky doměřeny geodeticky. Data je možné získat v libovolném formátu CAD nebo GIS. Z dat laserového skenování je možné v libovolném místě vytvořit podélný nebo příčný profil s vysokou přesností. Tím se tato technologie významně liší od klasických geodetických nebo fotogrammetrických metod, které se omezují pouze na měření v předem definovaných profilech.



*Klasifikované mračno bodů*

Na základě realizovaných projektů v České republice byly vyvinuty postupy a výměnné formáty sloužící k využití těchto dat v standardních SW řešeních určených pro projektování, jako je RoadPAC, Autodesk Civil 3D nebo Microstation.





*Digitální model terénu s vektorovou kresbou základní mapy dálnice*

V případě, že má uživatel k dispozici původní data resp. detailní model terénu, je schopen si generovat příčné profily v kterémkoliv místě projektu. Toto umožňuje mnohem vyšší flexibilitu projektování především v případech, kde dochází ke změnám navrhované trasy. Práci s nativním formátem lasrových dat umožňují různé nadstavby nad Autocad nebo Microstation, jako např. Terrascan nebo Pointools.

Detailní 3D data také umožňují zpracování nejrůznějších vizualizací existujících nebo projektovaných staveb ve formě videí, virtuální reality nebo statických pohledů.

## Aplikace

V oblasti silničního stavitelství se laserové skenování využívá především k pořízení podkladů pro projekci nových staveb nebo rekonstrukcí, dále k monitoringu kubatur zemních prací, případně pro dokumentaci povrchů vozovek. Data lze s úspěchem využít i pro potřeby dokumentace skutečného provedení stavby a pasportizaci již existujících staveb. 3D data lze velmi efektivně využít pro následující aplikace:

- Podklad pro projekt
- Monitoring kubatur zemních prací
- Milimetrové měření vozovek
- Kontrolní měření v tunelech
- 3D dokumentace provedení stavby
- Pasportizace vybavení stavby
- Monitoring sesuvů svahů a skalních stěn
- Monitoring posunů stavebních objektů, zátěžové zkoušky
- Mosty
- Mostní uzávěry
- Provoz a údržba pozemních komunikací vč. mostů a tunelů / diagnostika
- Majetkoprávní vztahy
- Kontrola stavby před ukončením záruk
- Pasportizace vybavení komunikace (dopravní značení, svodidla, billboardy, atp.)
- Studie odtokových poměrů
- Přesné hlukové studie
- Analýzy bezpečnosti provozu, rozhledové studie

V následujícím textu se zaměříme na jednotlivé oblasti využití a zaměříme se na minimální požadavky, které by měly dodavatelé těchto služeb splňovat.

## Porovnání jednotlivých technologií

Následující tabulka dává základní orientaci pro volbu jednotlivých technologií k jednotlivými aplikacím:



**Aplikace zeměměřických technologií pro silniční stavby (vzhledem k poměru cena / přesnost a její garance)**

| Použití/technologie a přesnost                                                                                  | Klasická geodézie             |                               |                             |                                 |                         |                        |                         |                         |                             | Popis aplikace                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Pozn |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|                                                                                                                 | Prostorové měření (20-150 mm) | Prostorové měření (0,5-20 mm) | Technická nivelace (1-5 mm) | VPN a PN (nivelace) (0,5 - 1mm) | Statické LS (0,5-10 mm) | Stop&GO LS (2 - 20 mm) | Mobilní LS (20 - 50 mm) | Letecké LS (30 - 50 mm) | Fotogrammetrie (100-200 mm) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| Základní a podrobné bodové pole, vytyčovací sítě stavby                                                         |                               | x                             |                             | x                               |                         |                        |                         |                         |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| Podklad pro projekt                                                                                             | x                             | x                             |                             |                                 |                         |                        | x                       | x                       | x                           | Výběr technologie je dán především rozsahem projektu a účelem (novostavba/rekonstrukce). U rozsáhlejších staveb je efektivní letecký LS, u malých objektů postačí klasické zaměření. Fotogrammetrie je využitelná pro nižší stupně projektování a spíše pro vyhodnocení polohopisu. Data LS je nutné doplnit klasickým geodetickým měřením. v případě projektů ŘSD, kde bude navazovat kontrola dle směrnice 8/2011 je nutné zaměřit výškopisná data v hustotě 2000 bodů na m2.                                                                                         |      |
| Monitoring kubatur zemních prací                                                                                |                               |                               |                             |                                 |                         | x                      |                         |                         |                             | Technologie kombinující LS a klasické geodetické měření pro vytvoření digitálního modelu terénu a výpočty objemů zemních prací. Vyhotovení kvalitních dat pro výpočet kubatur zemních prací je závislé na kompletním vystižení reliéfu terénu (minimalizovat zastíněné plochy - skenování nejen z cest) a dodržení přesnosti měření vzhledem bodovému poli s možností ověření výsledků (zpětně ověřitelná cesta výpočtu). Je zaručená stejná přesnost v libovolném místě měřeného objektu. Výsledky jsou jednoznačný podklad pro oceňování prací a následnou fakturaci. |      |
| Pasportizace vybavení stavby                                                                                    |                               |                               |                             |                                 |                         |                        | x                       |                         |                             | Pro tento účel je ideální technologie mobilního LS doplněná o georeferencované snímky nebo panoramatické snímky.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |      |
| Kontrolní měření v průběhu stavby (vytyčení; zemních prací; usazení bednění, konstrukcí, montážních dílců; atd) | x                             | x                             | x                           | x                               | x                       |                        |                         |                         |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |
| Dokumentace podpůrných a montážních konstrukcí                                                                  |                               |                               |                             |                                 | x                       |                        |                         |                         |                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |      |

|                                                                                                       |   |   |   |   |   |   |   |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|--|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kontrolní měření částí stavebních objektů před zakrytím jako součást dokumentace skutečného provedení | x | x |   |   | x |   |   |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Kontrolní měření geometrických parametrů stavebních objektů                                           |   | x |   | x | x |   |   |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Kontrolní měření v tunelech                                                                           |   | x |   | x | x | x |   |  |  |  | Technologie kombinující LS a klasické geodetické měření při výstavbě a dokumentaci tunelů, se kterou lze vytvářet 3D model tunelu s vysokou přesností a pasportizovat vybavení tunelu. Při doržení základních principů a připojení měření na vytyčovací síť stavby, lze 3D model tunelu porovnávat s projektem, počítat profily a objemy nad a pod výrubu a kontrolovat dodržení geometrické kvality. Zároveň lze pasportizovat a vektorizovat vybavení tunelu a geometrické tvary.                                                                                                                                     |
| Milimetrové měření vozovek                                                                            |   |   |   |   | x | x |   |  |  |  | Unikátní technologie kombinující LS a klasické geodetické měření při výstavbě komunikací, se kterou lze kontrolovat jednotlivé vrstvy komunikace s vysokou přesností a to v plošném rozsahu. Při doržení základních principů a připojení měření na vytyčovací síť stavby, lze jednotlivé vrstvy vozovky porovnávat s projektem, počítat mocnosti a objemy vrstev a kontrolovat dodržení geometrické kvality. Výstupy jsou podrobné digitální modely a řezy v libovolném místě a garantovanou stejnou vysokou přesností v libovolném místě měřeného objektu a zaručí přesné geometrické informace a jejich ověřitelnost. |
| Měření průjezdných prostorů mostů a tunelů                                                            |   | x |   |   | x | x | x |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Monitoring sedání zemního tělesa, sesuvů svahů a skalních stěn                                        | x | x | x | x | x | x | x |  |  |  | Výběr technologie záleží na rozsahu monitorovaných objektů a požadované přesnosti. V případě ověření, zda k posunu dochází, či nikoliv je nutné použití pozemního statického LS navázaného na bodové pole určené velmi přesnou nivelací.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Geodetický monitoring objektů dotčených stavbou                                                       |   | x |   | x | x | x |   |  |  |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Měření posunů a deformací stavebních objektů, zátěžové zkoušky.                                       |   | x |   | x | x |   |   |  |  |  | Vzhledem k nezbytné vysoké přesnosti je pro tyto aplikace možné využít pouze statický LS připojený na přesné bodové pole. Oproti standardním geodetickým metodám umožňuje LS určit i plošný rozsah změn, které by při měření na diskrétních bodech nebyly odhaleny.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|                                                                       |   |   |   |   |   |   |   |   |  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |  |
|-----------------------------------------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| Mosty, galerie, opěrné zdi                                            |   | x |   | x | x | x |   |   |  | Sběr dat pro kompletní 3D dokumentaci mostní konstrukce jako celku (kryty vozovky, mostovku, sloupy, pylíře) s použitím dat LS připojených na přesné bodové pole. Pasportizace a vektorizace detailů s milimetrovým rozlišením horní i spodní části mostu včetně dilatačních spár, mostních závěrů a vybavení mostu před a při rekonstrukci a při výstavbě. |  |
| Mostní uzávěry                                                        |   | x |   | x | x |   |   |   |  | Vzhledem k nezbytné vysoké přesnosti je pro tyto aplikace možné využít pouze statický LS připojený na přesné bodové pole. Tím se dosáhne možnosti monitorování geometrických změn v čase v podélném a příčném směru, plošná geometrie vůči srovnávací rovině a jednotlivým etapám měření navzájem.                                                          |  |
| Geodetická část dokumentace skutečného provedení stavby ve 3D         | x | x |   |   | x | x | x | x |  | Vyhotovení komplexní dokumentace stavby ve 3D - lze použít kombinaci jednotlivých metod - návaznost na zpracování pasportu vybavení komunikace.                                                                                                                                                                                                             |  |
| Provoz a údržba pozemních komunikací vč. mostů a tunelů / diagnostika |   | x |   | x |   |   |   | x |  | Sběr dat pro základní údržbu komunikací - vizuální diagnostika, podklady pro údržbu zeleně, pasport svodidel a dopravního značení, určování majetkoprávních vztahů - jinou technologií ekonomicky neřešitelné.                                                                                                                                              |  |
| Majetkoprávní vztahy                                                  | x |   |   |   |   |   |   | x |  | využití zejména pro rekonstrukce stávajících staveb pro přípravu projekčních podkladů - oproti klasickým geodetickým metodám je zde především vyšší rychlost pořízení dat a nižší náklady. U staveb menšího rozsahu nemá LS smysl.                                                                                                                          |  |
| Kontrola stavby před ukončením záruk                                  |   | x | x | x | x | x | x |   |  | Volba technologie je závislá na jednotlivých typech kontrol a rozsahu kontrol - ideální je využít např. pro nerovnosti vozovky, kvalitu mostních uzávěrů a obecně pro identifikaci změn oproti zaměření skutečného stavu po dokončení stavby.                                                                                                               |  |

## Podklad pro projekt

Vzhledem k používání nových technologií při výstavbě, jako je 3D nivelace stavebních strojů apod., je nezbytně nutné již od přípravných prací pracovat s co možná nejvěrnějším 3D digitálním modelem terénu (DTM). Tento digitální model terénu slouží pro určování kubatur zemních prací a je společně s 3D modelem projektu předáván dodavateli.

Letecké laserové skenování je ideální technologií pro pořízení modelu terénu s dostatečnou hustotou a přesností. Ve vyjimečných případech nebo u staveb malého rozsahu je možné letecké skenování nahradit pozemním. U leteckého skenování jsou jednoznačně preferovány systémy s kuželovým rozmětem laserových paprsků. Měření za účelem získání podkladů pro projekt se výrazně doporučuje provádět v období bez vegetace (ideálně únor – duben). Méně vhodné je povegetační období (říjen – listopad).

Pořízení dat v této kvalitě musí být povinnou součástí projekčních prací, ať již jsou geodetické přípravné práce zadávány samostatně nebo v rámci projektu. Minimální šíře pásu měřeného území je +/- 40 m od osy navrhované komunikace.

Následující tabulka udává minimální požadavky na kvalitu měření DTM:

| Typ projektu  | Hustota přímo měřených bodů DTM | Střední výšková odchylka měřených bodů DTM                        | Střední polohová odchylka měřených bodů DTM |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Nová výstavba | 5 bodů / m <sup>2</sup>         | 0,10 m na nezpevněných plochách<br>0,05 m na zpevněných plochách  | 0,14 m                                      |
| Rekonstrukce  | 10 bodů / m <sup>2</sup>        | 0,05 m na nezpevněných plochách<br>0,025 m na zpevněných plochách | 0,14 m                                      |

Dodavatel měření musí doložit v technické zprávě prokazatelným způsobem dodržení hustoty a požadované přesnosti měřených bodů v celém rozsahu zájmového území.

Souřadnice měřených bodů musí být vypočteny v S-JTSK a BpV. Jednotlivé body musí být rozklasifikovány minimálně do těchto tříd: terén, vegetace, povrchy komunikací, budovy, ostatní. Ve specifických případech může být škála tříd rozšířena. Mračno bodů musí být očištěno od šumů a falešných odrazů. Body klasifikované do třídy „terén“ musí být zkontrolovány na základě vygenerované plochy modelu terénu.

Body digitálního modelu terénu jsou převedeny do formátu TIN. Získaný DTM je dále zředěn tak, aby s ním bylo možné pracovat v CAD (nižší hustota bodů v místech, kde nedochází ke změnám terénu, vyšší hustota bodů v místech, kde se mění sklon terénu). DTM je dále doplněn o povinné spojnice na hranách stávajících komunikací a staveb.

Nedílnou součástí podkladů pro projekt je zpracování digitální barevné ortofotomapy s rozlišením max. 5 cm/pixel za účelem paralelního pořízení polohopisných dat s minimální polohovou přesností 14 cm.

## Požadované výstupy

- 3D mračno bodů ve formátu ASCII XYZC s minimálním členěním tříd: terén, vegetace, povrchy komunikací, budovy, ostatní
- Digitální model terénu ve formátu TIN vhodně zředěný tak, aby s ním bylo možné pracovat v CAD

- V případě rekonstrukcí a u stávajících komunikací a staveb povinné spojnice ve formátu DXF
- Digitální ortofotomapa ve formátu TIFF, rozdělená do mapových listů společně s listokladem
- Místopisy vlíčovacích bodů společně s výpočtem jejich souřadnic
- Technická zpráva obsahující statistické prokázání dodržení kvality měření

Všechny výstupy musí být v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém systému BpV. V případě požadavků projektanta mohou být součástí předání dat i vygenerované příčné profily ve zvolených intervalech, případně vektorový mapový podklad vzniklý vyhodnocením LiDAR dat, ortofotomapy a geodetického doměření „skrytých“ objektů v terénu (propustky, stavby v hustě zalesněných oblastech, atp.).

### 3D dokumentace provedení stavby

Metodika provedení dokumentace po dokončení stavby je obdobná s metodikou pořízení podkladů pro projekt. Kromě výstupu ve formě digitálního modelu terénu, který může být využit ke kontrole provedení stavby vůči projektu (dodržení přesnosti, kvalita provedení povrchů vozovek) je povinnou součástí pořízení ortofotomapy s vysokým rozlišením, která bude využita ke kontrole vybavenosti stavby (svodidla, dopravní značení, atp.)

Na základě získaných dat dále zhotovitel zpracuje základní mapu dálnice dle platných předpisů. Pro tyto potřeby bude laserové skenování doplněno i pozemním geodetickým měřením v nezbytném rozsahu. Minimální šíře pásu měřeného území je +/- 40 m od osy navrhované komunikace.

Následující tabulka udává minimální požadavky na kvalitu měření DTM:

| Typ projektu                     | Hustota přímo měřených bodů DTM | Střední výšková odchylka měřených bodů DTM                        | Střední polohová odchylka měřených bodů DTM |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Dokumentace skutečného provedení | 10 bodů / m <sup>2</sup>        | 0,05 m na nezpevněných plochách<br>0,025 m na zpevněných plochách | 0,14 m                                      |

Dodavatel měření musí doložit v technické zprávě prokazatelným způsobem dodržení hustoty a požadované přesnosti měřených bodů v celém rozsahu zájmového území.

Souřadnice měřených bodů musí být vypočteny v S-JTSK a BpV. Jednotlivé body musí být rozklasifikovány minimálně do těchto tříd: terén, vegetace, povrchy komunikací, budovy, ostatní. Ve specifických případech může být škála tříd rozšířena. Mračno bodů musí být očištěno od šumů a falešných odrazů. Body klasifikované do třídy „terén“ musí být zkontrolovány na základě vygenerované plochy modelu terénu.

Body digitálního modelu terénu jsou převedeny do formátu TIN. Získaný DTM je dále zředěn tak, aby s ním bylo možné pracovat v CAD (nižší hustota bodů v místech, kde nedochází ke změnám terénu, vyšší hustota bodů v místech, kde se mění sklon terénu). DTM je dále doplněn o povinné spojnice na hranách stávajících komunikací a staveb.

Nedílnou součástí odevzdání je zpracování digitální barevné ortofotomapy s rozlišením max. 5 cm/pixel za účelem paralelního pořízení polohopisných dat s minimální polohovou přesností 14 cm.

## Požadované výstupy

- 3D mračno bodů ve formátu ASCII XYZC s minimálním členěním tříd: terén, vegetace, povrchy komunikací, budovy, ostatní
- Digitální model terénu ve formátu TIN vhodně zředěný tak, aby s ním bylo možné pracovat v CAD
- V případě rekonstrukcí a u stávajících komunikací a staveb povinné spojnice ve formátu DXF
- Digitální ortofotomapa ve formátu TIFF, rozdělená do mapových listů společně s listokladem
- Základní mapa dle předpisů ŘSD
- Místopisy vlíčovacích bodů společně s výpočtem jejich souřadnic
- Technická zpráva obsahující statistické prokázání dodržení kvality měření

Všechny výstupy musí být v souřadnicovém systému S-JTSK a výškovém systému BpV. V případě požadavků mohou být součástí předání dat i vygenerované kontrolní příčné profily ve zvolených intervalech, případně další vektorový mapový podklad vzniklý vyhodnocením LiDAR dat, ortofotomapy a geodetického doměření „skrytých“ objektů v terénu.

## Příprava zakázky

Pro získání co nejkvalitnějších dat je nutné při zadávání zakázek co nejpřesněji specifikovat požadavky na straně zadavatele tak, aby výsledek splnil očekávání. Tato kapitola se zabývá hlavními aspekty přípravy a plánování zakázek s využitím technologie laserového skenování.

Při plánování jakéhokoliv projektu měření a sběru geoprostorových dat je nutné zvolit vhodnou metodu. Pro volbu mohou být rozhodující nejrůznější požadavky jako je přesnost, detail, míra vyhodnotitelnosti, atp. Jednotlivé metody a jejich aplikace byly popsány v předchozích kapitolách tohoto materiálu.

## Laserové skenování

### Základní požadavky

Pro LiDAR projekt je nezbytné definovat minimálně tyto následující parametry:

| Požadavek                                                        | Popis                                                                                        |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Geometrická přesnost digitálního modelu terénu / povrchu         | Absolutní a relativní výšková přesnost                                                       |
| Geometrická přesnost ortofotomapy                                | Absolutní a relativní polohová přesnost                                                      |
| Geometrická přesnost vyhodnocovaných objektů ve vektorové kresbě | Absolutní a relativní polohová a výšková přesnost                                            |
| Vyhodnocení                                                      | Které objekty mají být vyhodnoceny ve formě 3D vektorové kresby (z dat LiDAR a ortofotomapy) |
| Rozlišení ortofotomapy                                           | Velikost pixelu (GSD - rozlišení na terénu)                                                  |
| Způsob využití 3D modelu                                         | Podklad pro project, Dokumentace stavby, Měření kubatur, atp.                                |
| Požadovaná kvalita ortofotomap                                   | Pokrytí, povolená oblačnost, stíny, atp.                                                     |
| Hustota bodů                                                     | Počet měřených bodů na m <sup>2</sup>                                                        |

### Referenční body

Pro převod měřených dat do S-JTSK a BpV je nutné zaměřit v lokalitě projektu dostatek bodů, které budou použity pro provedení transformace a dále vlíčovací body pro potřeby přesného výškového vlíčování LiDAR dat. Měření jsou zpravidla prováděna technologií GPS. V případě existence vytyčovací sítě je nezbytné tato měření navázat na body této sítě.

### Definice zájmového území

Zájmové území musí být definováno v digitální vektorové formě DGN nebo DXF souboru buď jako ohraničení území nebo jako osa se zadanou minimální šíří pásu k zaměření. Zadáním v digitální formě se předejde případným nedorozuměním.

### Letový plán pro laserové skenování

Plánování vlastního letu je prováděno dodavatelem a musí zohlednit tyto základní parametry:

- Výška letu
- Úhlové rozpětí skeneru
- Minimální požadovaná hustota bodů
- Hranice zájmového území
- Speciální rozvržení letových os a jejich překrytů v případě požadavku na "opakované měření"
- Použitý skener a letoun

V případě náletu širšího území, které nelze pokrýt jednou letovou osou, je doporučen minimální příčný překryt pásů 20%. Pro umožnění odhalení a eliminace systematických chyb GPS/IMU měření je nutné přes překrývající se pásy naplánovat v pravidelných intervalech křížné pásy. Křížné pásy musí být umístěny minimálně na začátku a konci každého bloku, v případě dlouhých bloků, pak i v pravidelných roztupech mezi nimi. Vzdálenost mezi křížnými pásy je závislá na kvalitě použitého zařízení GPS/IMU. V některých případech je křížné pásy možné nahradit polygony pozemních vlíčovacích bodů.

### Letová výška

Volba letové výšky (nad terénem) je určena na základě použitého skeneru, požadované hustoty a přesnosti měřených bodů, úhlu skeneru a šíři skenovaného pásu. Při plánování skenování musí dodavatel brát v úvahu následující faktory a jejich důsledky:

- Intenzita /síla laserového záření použitého senzoru určuje letovou výšku (zvětšující se výška způsobuje snižování množství odrazů, které se vrátí k senzoru)
- Použitý GPS/IMU systém určuje polohovou a výškovou přesnost měřených bodů v závislosti na výšce letu nad terénem
- Frekvence laserového skeneru určuje hustotu měřených bodů (v závislosti na výšce a skenovacím úhlu)
- Rozptyl laserového paprsku určuje velikost "stopy" paprsku na terénu v závislosti na výšce.

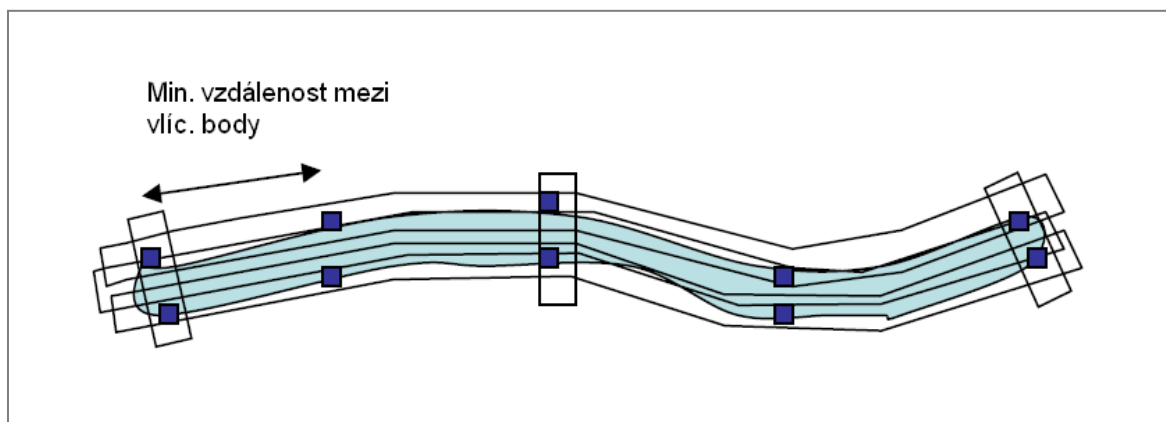
I pro velmi přesné aplikace je dostačující výška letu 200 m nad terénem. Při této výšce dosahují kvalitní systémy hustotu 10 bodů na m<sup>2</sup> při průměru stopy laserového paprsku 10 cm. Následující tabulka ukazuje parametry pro rotační skener s frekvencí 50 kHz a úhlem +/- 20 deg:

| Výška letu | Frekvence otáček skeneru | Šíře pásu | Rychlost |         | Stopa paprsku     | Hustota bodů na m <sup>2</sup> |
|------------|--------------------------|-----------|----------|---------|-------------------|--------------------------------|
| [m]        | [rpm]                    | [m]       | [m/s]    | [knots] | [m ] <sup>2</sup> | Total                          |
| 105        | 2100                     | 76        | 10,29    | 20,00   | 0,009             | 63,6                           |
| 130        | 2100                     | 95        | 20,58    | 40,00   | 0,013             | 25,7                           |
| 200        | 2100                     | 146       | 20,58    | 40,00   | 0,031             | 16,7                           |
| 305        | 2100                     | 222       | 20,58    | 40,00   | 0,073             | 10,9                           |



## Vlícovací body

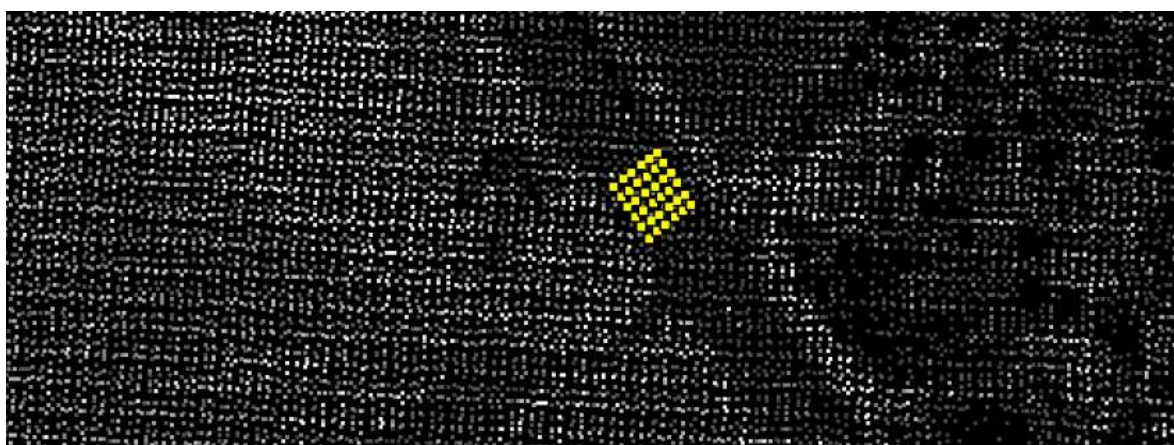
Pro zajištění vysoké výškové přesnosti dat je potřeba v zájmové oblasti zaměřit speciální vlícovací plochy resp. body. Rozmístění vlícovacích ploch musí být pravidelné podél náletové osy v intervalech minimálně po 3 – 5 km.



Vlícovací plochy musí být umístěné na začátku a konci snímaného území. Doporučuje se vždy volit dvojici vlícovacích ploch na obou stranách snímaného pásu. Vlícovací plochy mohou být zaměřeny ve formě diskretních bodů ve formě profilů (ideálně křížně a kolmo k ose snímání) nebo jako několik bodů zaměřených na ploše několika m<sup>2</sup>. Čím více vlícovacích bodů je zaměřeno, tím vyšší je spolehlivost výškového vyrovnání laserového mračna bodů.

Vlícovací body musí být zaměřeny na dobře definovaných površích jako jsou betonové, šterkové nebo asfaltové povrchy. Následující tabulka ukazuje vhodné a nevhodné umístění vlícovacích bodů:

| Vhodné umístění vlícovacích bodů | Nevhodné umístění vlícovacích bodů   |
|----------------------------------|--------------------------------------|
| Asfalt                           | Zalesněné území                      |
| Beton                            | Dno příkopu                          |
| Šterk                            | Hustá vegetace (tráva, obilí, apod.) |



*Ukázka jedné vlícovací plochy skládající se z rastru 6 x 6 bodů zaměřených na povrchu komunikace*

Pro zajištění polohové přesnosti laserových bodů a následného zpracování ortofotomap je nezbytné výškové vlícovací body doplnit v obdobném rozložení i zaměřením polohových bodů, které mohou být jednoznačně identifikovány v laserových datech. Tyto body mohou být reprezentovány

jednoznačnými terénními hranami, které lze identifikovat v mračnu bodů. Druhou možností je využití informací o intenzitě odrazu a pak lze použít např. vodorovné dopravní značení.



*Vodorovné dopravní značení je možné v LiDAR datech jednoznačně identifikovat s využitím intenzity odrazu.*

### Digitální snímkování

Při současném pořizování digitálních snímků za účelem zpracování ortofotomap je nutné doplnit požadavky na snímkování. Je vhodné provádět nálet při minimálním slunečním úhlu  $20^\circ$ , aby bylo zaručeno dostatečné osvětlení a bylo možné „čist“ snímky i v oblasti stínů. Požadavek na rozlišení snímků resp. ortofotomap má přímý vliv na letovou výšku. V případě požadavku na velmi vysoké rozlišení je nutné výšku náletu příslušně snížit. Při zadávání zakázky je také nutné stanovit podélný a příčný překryt snímků. Vzhledem k tomu, že se nepředpokládá stereografické vyhodnocování snímků, může být běžný podélný překryt 60 – 80 % snížen na 20 – 30 %. Digitální kamery používané pro tento typ aplikací mají většinou výrazně menší úhel záběru než klasické velkoformátové fotogrammetrické kamery. Vzhledem k tomu, že snímky slouží pouze jako doplněk k vyhodnocení laserových dat, není nutné snímkovat širší území než to, které je pokryté laserovými daty.

Při použití kamery o rozlišení 4000 x 4000 pixelů s ohniskovou vzdáleností 55 mm je při letové výšce 200 m nad terénem je výsledné rozlišení snímků 4 cm/pixel.

### Georeference leteckých snímků

Pro každý pořízený snímek musí být při náletu pořízeny parametry vnější orientace ( $X, Y, Z, \omega, \phi, \kappa$ ) získané z GPS/IMU jednotky. Tyto parametry mohou být přímo využity pro triangulaci snímků a vytvoření ortofotomapy. Takto získaná ortofotomapa však nemusí dosahovat požadovaných přesnostních parametrů vzhledem k malým chybám v určení parametrů vnější orientace. Pokud je však ortofotomapa používána pouze pro interpretaci laserových dat a jejich klasifikaci, je tento postup dostačující.

V případě požadavků na vyšší polohovou přesnost ortofotomap je nutné do procesu triangulace snímků využít i pozemních vlícovacích bodů. Tyto body mohou být podobně jako ve fotogrammetrii polohové i výškové. V případě bodů na terénu je možné  $Z$  souřadnici převzít z laserových dat. Rozložení vlícovacích bodů je totožné jako u vlícovacích bodů pro laserové skenování (viz výše). Doporučuje se volit body jednoznačně identifikovatelné na snímcích. Je postačující použít body

s přirozenou signalizací. Vhodnými body mohou být rohy vodorovného dopravního značení nebo povrchové znaky inženýrských sítí.



*Ukázka vličovacích bodů použitých pro zpracování ortofotomapy*

### Požadavky na dodání dat

Ve specifikaci zakázky je nutné jednoznačně určit požadavky na předání dat. Data jsou předávána na vhodném elektronickém médiu, většinou DVD nebo USB pevný disk. Laserová data jsou dodávána buď v binárním nebo textovém formátu, snímky a ortofotomapy ve formě TIFF nebo ECW souborů. Digitální model terénu je pak většinou dodáván ve formátu DXF ve formě trojúhelníkového modelu nebo jako seznam souřadnic. Povinné spojnice jsou dodávány ve formátech DWG/DXF/DGN s daným rozdělením do vrstev. Obdobně jsou v případě požadavku dodávány příčné profily eventuálně vyhodnocené prvky polohopisu. Běžným formátem pro předání laserových dat jsou binární soubory TerraScan nebo LAS. Pro práci s daty v některých aplikacích je vhodné požadovat dodání dat i ve formě ASCII textového souboru. U laserových i rastrových dat je vhodné definovat maximální velikost jednoho souboru, aby nedocházelo k problémům s načítáním velkých objemů dat při dalším zpracování. Je doporučeno požadovat laserová data v blocích po cca 1 – 2 km letové osy a ortofotomapy v kladu listů 500 x 500 m.

Pro laserová data je nutné definovat obsah předání:

- Souřadnice a jejich pořadí (X,Y,Z)
- Klasifikace každého bodu (terén, vegetace, povrchy komunikací, budovy, ostatní,...)
- Čas
- Intenzita odrazu
- Číslo snímkaného pásu
- Informaci o pořadí odrazu (první, poslední)
- Časově označené údaje o orientaci

Souřadnice laserových bodů jsou základními daty a jsou obsaženy v každé dodávce. Pro další možné zpracování dat je vhodné požadovat i základní klasifikaci bodů. Intenzita a informace o pořadí odrazu mohou být využity v pokročilejších metodách klasifikace jednotlivých bodů. Čas a časově označené údaje o orientaci mohou být využity pro kontrolu nebo zpřesnění georeference dat.

## Kontrola kvality

Pro každou zakázku musí být stanoven alespoň základní plán kontroly kvality na straně dodavatele. Jeho splnění by mělo být dokumentováno v technické zprávě. Kontrolní postupy by měly zahrnovat alespoň následující minimum:

| Oblast kontroly                       | Provedení                                                     |
|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Georeference dat                      | Výpočet GPS dat společně s daty IMU                           |
|                                       | Výpočet IMU dat společně s GPS                                |
|                                       | Kontrola odchylek v překrývajících se pásích / vyrovnání pásů |
|                                       | Kontrola odchylek na vlícovacích a kontrolních bodech         |
| Klasifikace laserových dat            | Vizuální kontrola, kontrolní kresba DTM                       |
| DTM/DSM                               | Kontrola odchylek na vlícovacích a kontrolních bodech         |
| Kalibrace kamery                      | Kalibrační protokol kamery                                    |
| Měření kontrolních a vlícovacích bodů | Protokoly o výpočtech                                         |
| Georeference snímků / triangulace     | Protocol a triangulace                                        |
|                                       | Kontrola odchylek na vlícovacích a kontrolních bodech         |
| Ortofotomapy                          | Kontrola souřadnic vlícovacích a kontrolních bodů             |
|                                       | Kvalita snímků, vizuální kontrola                             |