

Zaměření vybraných typů nerovností vozovek metodou laserového skenování

1. Účel experimentů

V normě ČSN 73 6175 (736175) „Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek“ je uvedena řada metod k určování podélných a příčných nerovností povrchů vozovek.

Pro vlnové délky kategorie megatextura ($50\text{mm} < \lambda < 0.5\text{m}$) a nerovnost ($0.5 < \lambda < 50\text{m}$) se jeví jako vhodná alternativa technologie laserového skenování. Na rozdíl od ostatních používaných metod tato metoda zaměří celý povrch vozovky v husté síti bodů (typicky $2\text{x}2\text{mm}$ až $50\text{x}50\text{mm}$), z kterého je možné generovat libovolné výstupy. Měření je možné provádět za plného provozu i z místa mimo komunikaci.

Pokud je na naměřená data aplikován vhodný postup zpracování je možné ve výškové složce dosáhnout směrodatné odchylky menší než jeden milimetr. Účelem provedených experimentů bylo prokázání uvedeného tvrzení pomocí srovnání s metodou přesné nivelace a srovnáním opakovaných měření.

2. První experiment

2.1. Použité přístrojové vybavení

1. Skenovací systém Leica HDS3000 a příslušenství viz obr. 1. Základní parametry tohoto přístroje jsou: směrodatná odchylka délky 4 mm, směrodatná odchylka horizontálního a vertikálního úhlu 60 microradiánů (4 mgon), optimální pracovní rozsah 1–100 metrů, průměr laserového svazku v 50 metrech 5 milimetrů, rychlost měření až 4000 bodů za sekundu. Další parametry viz příloha 1.



Obr. 1 – Skenovací systém Leica HDS3000 a vřícovací body

2. Niveláční přístroj Sokkia SDL-2 s niveláční latí s čárovým kódem a upravenou patkou. Jedná se o niveláční přístroj pro přesnou nivelaci se směrodatnou kilometrovou odchylkou 1,5 mm.

Nivelační lať s čárovým kódem měla na patce umístěn speciální kulový přípravek, který umožňuje přesnější postavení latě na vybraný bod zejména na rovinatých površích.

3. Totální stanice Topcon GPT 7501. Jedná se o totální stanici vyšší třídy přesnosti. V experimentu byla použita pouze na určení horizontální polohy vyznačených kontrolních bodů.

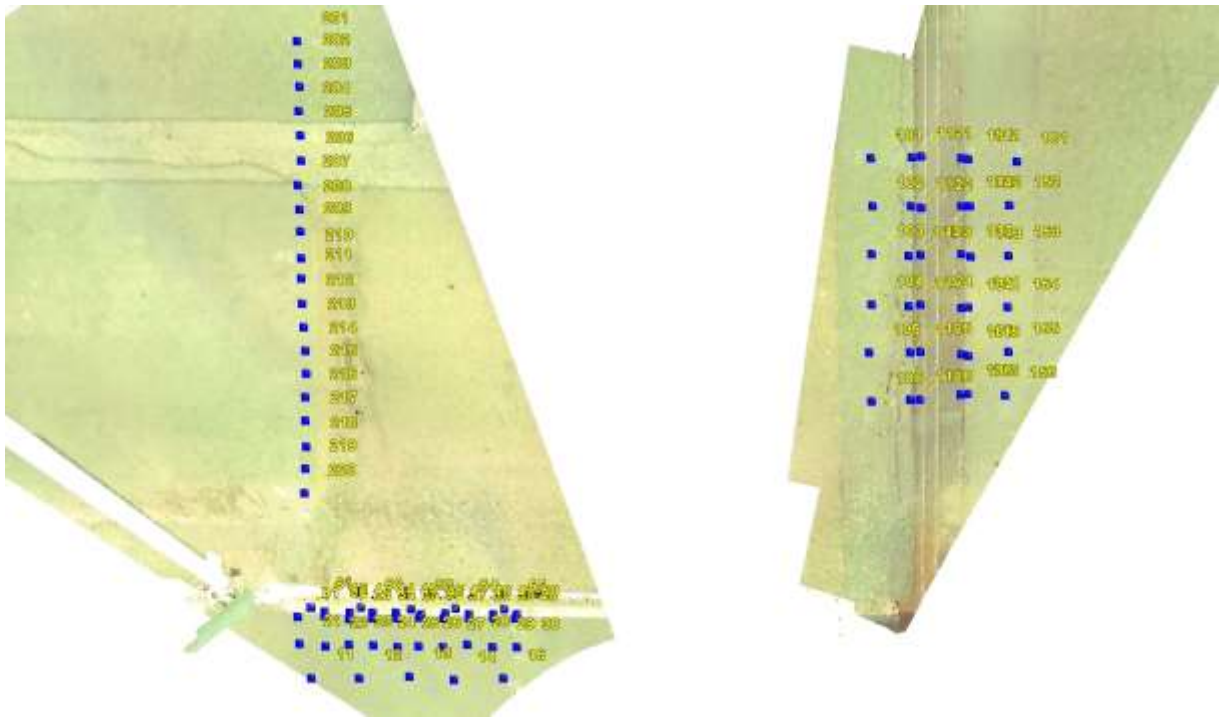
2.2. Lokalita měření

Ve zvolené lokalitě (viz obr. 2) byly Ing. L. Nekulou vybrány typické prvky vozovky určené k experimentu. Jedná se o schůdek, mostní závěr a linii.



Obr. 2 – Lokalita měření

Oblast schůdku má rozměr 1,8x0,6 metru a je vyznačena 39 kontrolními body, zaměřená oblast mostního závěru má rozměr 2x1 metr a byla zaměřena kontrolními 36 body a oblast linie má délku 3,8 metru a je vyznačena 20-ti kontrolními body umístěnými po 20 centimetrech,. Poloha jednotlivých kontrolních bodů je viditelná na následujícím obrázku z vyhodnocovacího softwaru Cyclone (obr. 3).



Obr. 3 – Mračno bodů s označenými kontrolními body

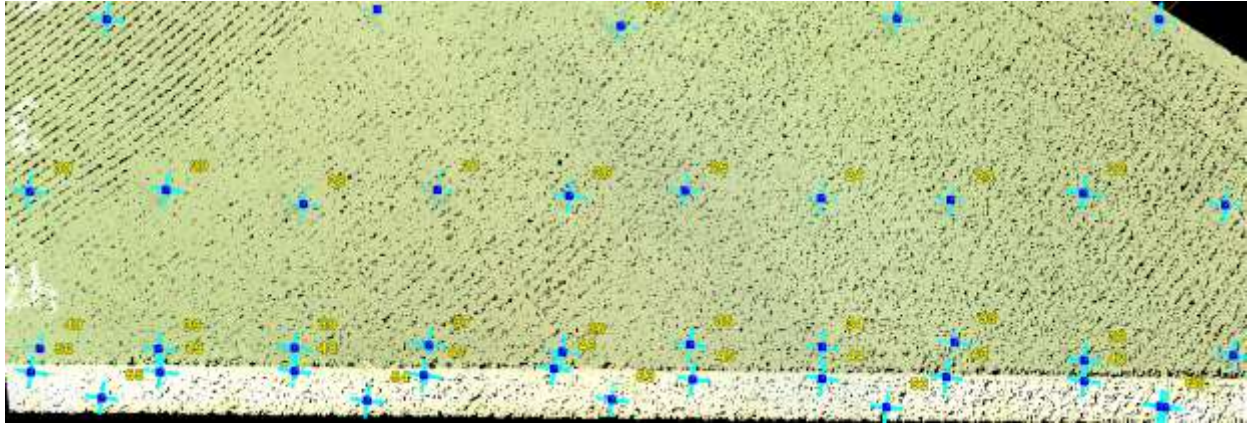
2.3. Postup měření

4. V terénu byly prvky definovány pomocí kontrolních bodů, které byly vyznačeny křížky křídou. Některé body byly pro lepší orientaci popsány.
5. Všechny kontrolní body byly zaměřeny metodou přesné nivelace s pomocným kulovým přípravkem umístěným na patě nivelační latě. Tento přípravek umožňuje přesnější postavení latě na vybraném bodu.
6. V okolí lokality byly rozmístěny čtyři vřícovací body, které je možné zaměřit totální stanicí a skenovacím systémem.
7. Všechny kontrolní body byly zaměřeny polohově totální stanicí a následně byly zaměřeny všechny vřícovací body.
8. Skenovacím systémem byly zaměřeny všechny vybrané oblasti s hustotou skenování 4 mm v horizontálním směru a 2 mm ve vertikálním směru ve vzdálenosti 8 metrů, přičemž nejvzdálenější místa měření byly vzdáleny přibližně 8 metrů.
9. Byly zaměřeny vřícovací body skenovacím systémem.
10. Bylo provedeno druhé zaměření vybraných oblastí skenovacím systémem při stejném nastavení hustoty měření. Oblast měření byla vybrána ručně a proto nedocházelo k měření po přesně stejných podrobných bodech mračna jako v předchozím zaměření.

2.4. Postup vyhodnocení

1. Mračna bodů ze skenovacího systému byla transformována do souřadnicového systému totální stanice.
2. Do mračen bodů byly nahrány kontrolní body zaměřené totální stanicí viz obr. 3.

- Byl vytvořen program, který automaticky vybral podrobné body mračna v zadané maximální vzdálenosti od kontrolního bodu (většinou použito 10 mm – ke každému kontrolnímu bodu bylo automaticky vybráno několik desítek podrobných bodů). Pouze pro několik kontrolních bodů v blízkosti hran (například hrana schůdku), museli být podrobné body z mračna bodů vybrány ručně viz řada bodů 4x na hraně schůdku na obr. 4. Při praktickém vyhodnocení bude nutné použít vhodný algoritmus k detekci ostrých výškových hran v mračnu bodů a provádět ověření „správného“ výběru podrobných bodů.



Obr. 4 – Kontrolní body na schůdku

- Z vybraných podrobných bodů pro jednotlivé kontrolní body byla spočtena jejich průměrná výška.
- Na kontrolních bodech byly porovnány výšky určené přesnou nivelací a ze skenování. Protože ani v jenom případě nebyla měřena absolutní výška, ale výška relativní vztažená k postavení přístroje, bylo nutné provést nejprve sjednocení průměrných výšek z obou metod. Zbylé rozdíly potom ukazují odchylku metody.
- Protože skenovací systém Leica HDS3000 nemá kompenzátor, není možné tento přístroj urovnat přesně svisle (novější typy této řady již přesný kompenzátor mají). Z tohoto důvodu může být část odchylek určených metodou podle předchozího bodu způsobena právě náklonem (nesvislostí) skeneru. Proto byla na kontrolních bodech použita shodnostní transformace. Tato transformace nemění geometrii (tvar ani měřítko) použitých bodů, pouze jejich umístění v prostoru. Zbytkové odchylky po této transformaci byly posouzeny.
- Byly posouzeny rozdíly mezi prvním a druhým zaměřením skenerem na kontrolních bodech.
- Uvedené metody posouzení byly použity jednak samostatně na vybrané prvky (schůdek, závěr, linie) ale i na celou zaměřenou oblast najednou. Při uvažování celé oblasti se významněji projeví případná časová nestabilita stanovisek přístrojů a jiné systematické vlivy.

2.5. Výsledky

Základním výsledkem experimentu je směrodatná odchylka rozdílu výšek určená z odchylek výšek mezi metodou laserového skenování a metodou přesné nivelace. Tyto odchylky byly určeny podle bodů 5, 6, 7 a 8 v kapitole 2.4. Směrodatná odchylka rozdílu je dána známým vztahem:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i \cdot r_i}{n-1}}, \quad (1)$$

kde r_i je i -tý rozdíl a n je počet všech rozdílů.

Je nutné poznamenat, že tyto odchylky nebyly způsobeny pouze nepřesností metody laserového skenování, ale i nepřesností metody přesné nivelace. Samotná metoda přesné nivelace dosahuje přesnosti desetiny milimetru, ale to platí pouze v případě, že se jedná o přesně definovaný výškový bod. V případě bodu na povrchu vozovky může významnější chyba nastat z nepřesnosti přiložení latě na bod. Proto byla celková přesnost nivelace podrobena testování, které je popsáno dále ve zprávě. Byla zjištěna směrodatná odchylka nivelace 0,3 mm.

Výsledky jsou pro přehlednost uvedeny ve formě tabulky.

	Počet bodů	Nivelace – sken 1 Transformace	Nivelace – sken 1 Rozdíl	Sken 1 – sken 2	Nivelace – sken 2 Transformace
Schůdek	39	0,60	0,61	0,43	
Závěr	36	0,59	0,60	0,36	
Linie	20	0,44	0,93	0,58	
Vše	95	0,63	0,86	0,78	0,57

Tab. 1 – Výsledné směrodatné odchylky v milimetrech určené na kontrolních bodech

3. Druhý experiment

Účelem tohoto experimentu bylo potvrzení výsledků prvního experimentu na výrazně větší oblasti. Na větší oblasti se totiž více projeví případné systematické chyby přístroje, zejména pokud jsou významně odlišné polohy umístění skeneru.

Z důvodu měření za provozu nebylo možné v tomto případě realizovat kontrolní měření metodou přesné nivelace a proto byla přesnost posouzena pouze na základě dvojího nezávislého zaměření stejnou metodou.

3.1. Použité přístrojové vybavení

Byl použit laserový skenovací systém Leica HDS3000 popsáný již v kapitole 2.1.

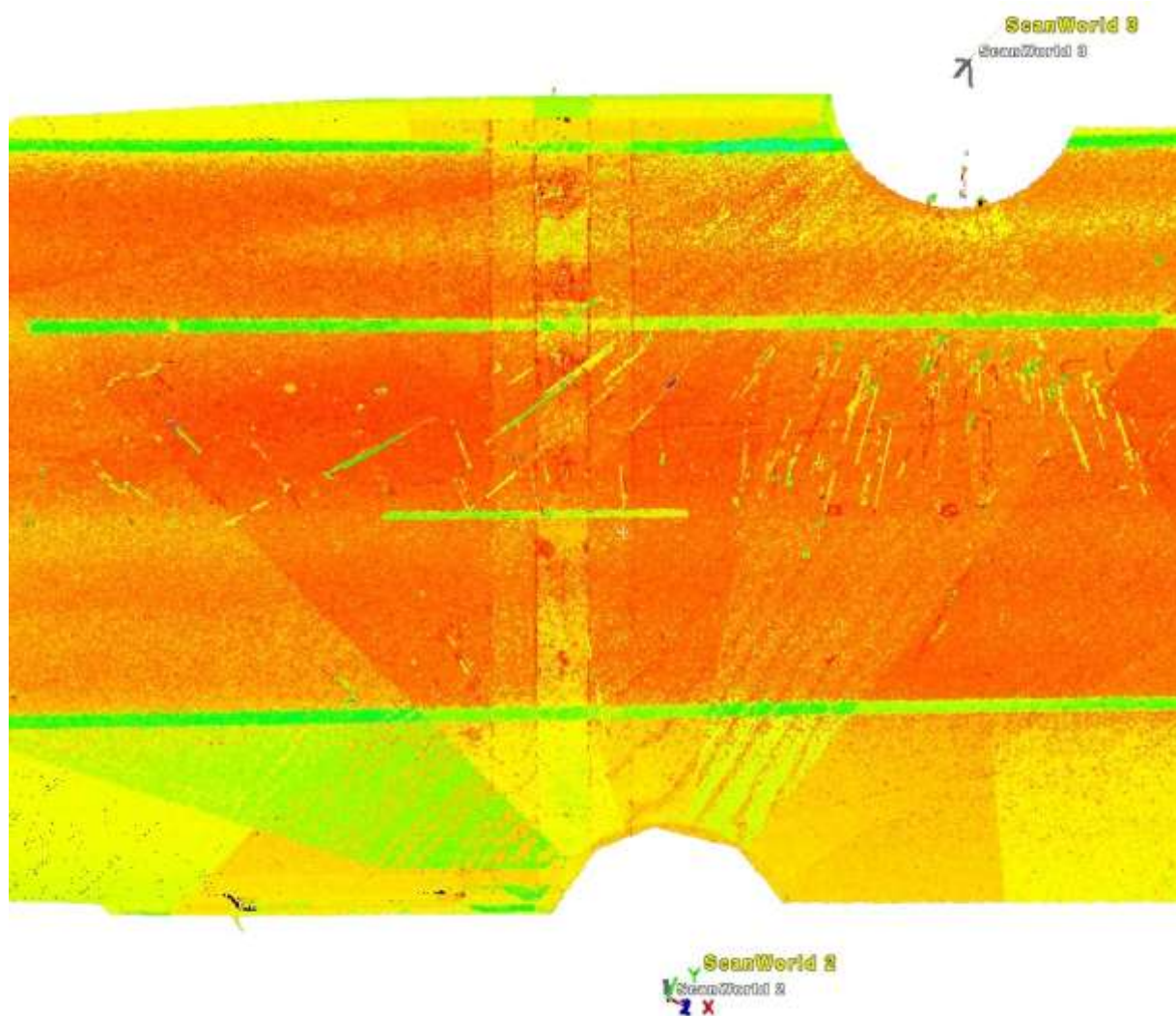
3.2. Lokalita měření

Jihovýchodní mostní závěr a přilehlá komunikace (šířka vozovky 7,8 m, ± 10 metrů v podélném směru od závěru) na Pražském okruhu komunikace Štěrboholská spojka (most přes železnici a tok Rokytky).

3.3. Postup měření

Byly zvoleny dvě stanoviska viz obr. 5.

Hustota skenování byla nastavena na 10 mm ve vodorovném směru a 2 mm ve svislém směru pro vzdálenost 10 metrů. Toto nastavení zajistilo minimální pokrytí povrchu vozovky podrobnými body ve čtvercové síti 1,5 x 2 cm (v nejvzdálenějších oblastech 15 metrů od stanoviska skeneru). Ve vzdálenosti dva metry od stanoviska skeneru byla hustota sítě bodů 2 x 0,5 mm. Výška skeneru nad vozovkou byla přibližně 2 metry.



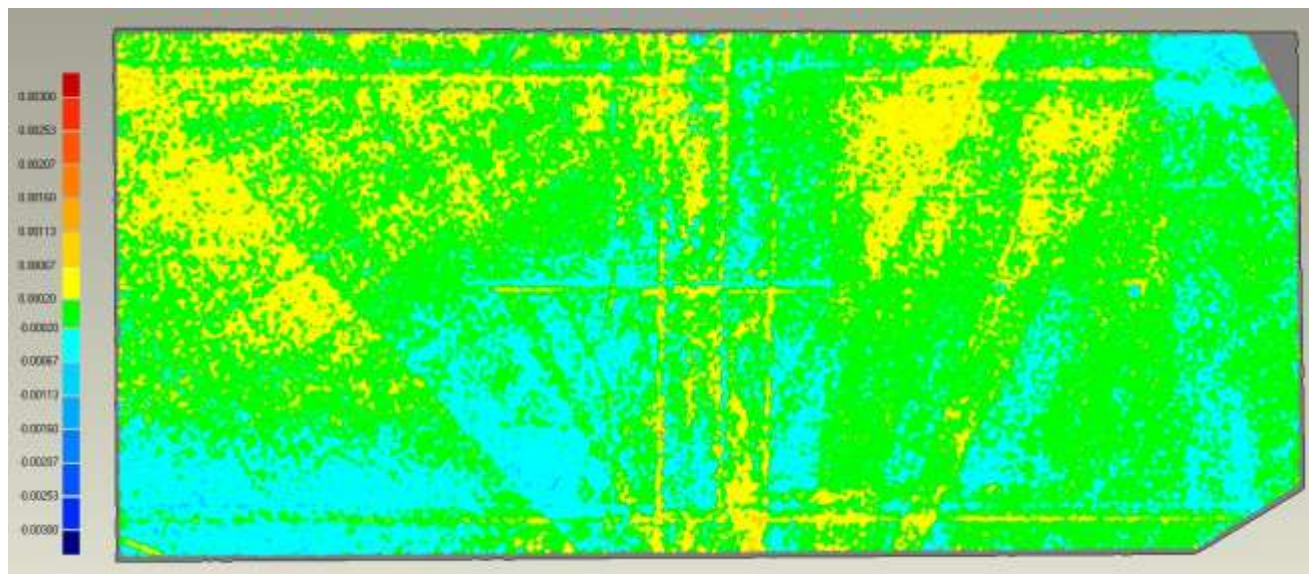
Obr. 5 – Umístění stanovisek skeneru

3.4. Postup vyhodnocení

1. Transformace mračen bodů z obou stanovisek do společného souřadnicového systému metodou optimální umístění mračen (metoda ICP – Iterative Closest Point) v softwaru Cyclone.
2. Výběr části mračen bodů zájmové oblasti.
3. Manuální očištění vybrané části mračen bodů o objekty, které nejsou předmětem měření (projíždějící automobily).
4. Odstranění náhodné složky směrodatné odchylky bodů na povrchu vozovky metodou průměrování souřadnic a vytvoření pravidelného rastru bodů na povrchu vozovky ve čtvercové síti 5x5 cm (provedeno automaticky vlastním programem). Při praktickém používání by bylo vhodné testovat každý průměr na odlehlá měření (např. kamínek na vozovce) a jejich případné automatické vyloučení.
5. Hypsometrické zobrazení odlehlosti obou zaměření povrchu vozovky s využitím softwaru Geomagic Studio 10.

3.5. Výsledky

Směrodatná odchylka dvojího nezávislého zaměření je menší než 0,5 milimetru. Plošné zobrazení odchylek této kontroly v milimetrech viz obr. 6.



Obr. 6 – Plošné zobrazení dvojího kontrolního nezávislého zaměření vybraného uzávěru
Z obrázku je vidět že více než 95% porovnávaného povrchu má menší odlehlost než $\pm 0,7$ mm. Jsou zde patrné jisté systematické vlivy, ale jejich velikost je ale menší než jeden milimetr.

4. Třetí experiment

Účelem tohoto experimentu bylo určení přesnosti (směrodatné odchylky) metody přesné nivelace při použití pro určení výšek nevhodně stabilizovaných bodů (křížky na vozovce) a při použití speciálního kulového nástavce na patu nivelační latě.

Přesnost metody přesné nivelace při použití trvale stabilizovaných výškových bodů (nivelační značky) je známá a pohybuje se v rozmezí 0,05 až 0,10 milimetru pro jedno odečtení. Vliv nevhodné výškové stabilizace ale znám není, je závislý na konkrétním typu stabilizace a může být významný. Protože se metoda přesné nivelace s uvedenou stabilizací používá jako referenční metoda, je nutné experimentální určení její přesnosti.

4.1. Použité přístrojové vybavení

Byl použit nivelační přístroj Sokkia SDL-2 s nivelační latí s čárovým kódem a upravenou patkou popsány již v kapitole 2.1.

4.2. Lokalita měření

Betonová manipulační plocha požárních vozidel umístěná jihozápadně od budovy Fakulty stavební viz obr. 7.



Obr. 7 – Lokalita testování metody přesné nivelace

4.3. Postup měření

Pomocí pásma byla rozměřena pravidelná síť bodů. Rozměr oblasti byl 5x10 metrů a body byly vzdáleny 1 metr v obou směrech. Celkem bylo křídou vyznačeno 66 bodů.

Všechny vyznačené kontrolní body byly zaměřeny metodou přesné nivelace ze tří kolem této oblasti rozmístěných stanovisek.

4.4. Postup vyhodnocení

Dále uvedeným způsobem byly posouzeny všechny tři možné kombinace trojího zaměření kontrolních bodů.

1. Protože nadmořská výška stanovisek nebyla vztažena k pevnému bodu, byly výšky z jednotlivých stanovisek srovnány k průměru jejich výšek.
2. Byly určeny odchylky na všech kontrolních bodech a byla z nich určena směrodatná odchylka jednoho rozdílu.
3. Protože ve směrodatné odchylce rozdílu vystupuje metoda přesné nivelace dvakrát, byla určena směrodatná odchylka jednoho zaměření vydělením druhou odmocninou.

4.5. Výsledky

Směrodatná odchylka jednoho zaměření jednoho bodu přesnou nivelací vyšla ze tří kombinací trojího zaměření 66 bodů 0.26, 0.27 a 0.27 mm.

5. Závěr

Některé přesnější modely laserových skenovacích systémů dosahují, při vhodném zpracování naměřených dat, relativní výškovou přesnost vymodelovaného bodu na povrchu vozovky vyšší než 1 milimetr a to i pro oblasti rozměrů desítek metrů. Absolutní přesnost zaměření jednoho bodu je sice nižší, ale díky velkému počtu nadbytečných podrobných bodů je možné náhodnou složku chyby významně potlačit.

Výsledky uvedených experimentů ukazují, že technologie laserového skenování je vhodná k určování některých typů nerovností vozovek, jako je schůdek nebo mostní závěr, a dále k určování plošných nerovností vlnových délek kategorie megatextura ($50\text{mm} < \lambda < 0.5\text{m}$) a nerovnost ($0.5 < \lambda < 50\text{m}$).

6. Přílohy

1) Priloha_1_HDS3000 – Technické specifikace skenovacího systému Leica HDS3000.

Ing. Bronislav Koska, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra speciální geodézie