

# PROBLEMATIKA URČOVÁNÍ TLOUŠTĚK A KUBATUR KONSTRUKČNÍCH VRSTEV VOZOVEK

FACTORS IN THE DETERMINATION OF THICKNESS AND CUBIC CAPACITY  
OF ROADWAY STRUCTURAL LAYERS

*Ladislav BÁRTA<sup>1,2</sup>, Jiří SLÁMA<sup>3</sup>*

## Abstract:

*This paper sets out to examine the factors in the precise determination of the thickness and cubic capacity of structural roadway layers. The achievable accuracy of altitudinal measurements on the surface of structural layers using selected surveying methods will be discussed. By the same token, systematic changes in the surveying sources, in the land mass and in the layers of building materials, which occur between time separate surveys of the surfaces of roadway sublayers, will have a decisive effect on the final accuracy of quantities studied. Follow-up surveys checking the geometric accuracy of layer thicknesses will reflect the limits of surveying methods, namely with thin layers. The precise determination of cubic capacity will depend on accuracy and nicety of area and profile altitudinal measurements of structural sublayers.*

## Abstrakt:

*Tento článek se zabývá problematikou přesnosti určování tloušťek a kubatur konstrukčních vrstev vozovek. Poukázáno bude na reálně dosažitelnou výškovou přesnost zaměření povrchů konstrukčních vrstev při použití vybraných geodetických metod. Rozhodující dopad na výslednou přesnost studovaných veličin však budou mít systematické změny v geodetickém základu, v zemním tělese a v konstrukčních vrstvách, které nastávají v časovém období mezi geodetickým zaměřením ploch dílčích konstrukčních vrstev. Při kontrolách geometrické přesnosti tloušťek vrstev bude poukázáno na limity geodetických metod zejména na tenkých vrstvách. Přesnost určení kubatur bude závislá na přesnosti a podrobnosti plošného a profilového výškového měření dílčích konstrukčních vrstev.*

## 1 ÚVOD

Tento příspěvek je věnován problematice určování tloušťek a kubatur konstrukčních vrstev vozovek. Požadavky na přesnost kontrolního určení tloušťek vrstev jsou odvoditelné z požadavků na jejich geometrickou přesnost. V případě kubatur se však s nejistotami jejich určení obvykle nepracuje.

Příspěvek lze rozdělit do třech samostatných částí:

### **- geometrická přesnost a její kontrola**

---

<sup>1</sup> Bárta Ladislav, Ing., Ph.D., GEOPONT 3D, s.r.o., Gajdošova 432/7, 615 00 Brno, tel.: +420 606 742 445, e-mail: [barta@geopont.cz](mailto:barta@geopont.cz)

<sup>2</sup> Bárta Ladislav, Ing., Ph.D., Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Veverčí 95, 602 00 Brno, e-mail: [barta.l1@fce.vutbr.cz](mailto:barta.l1@fce.vutbr.cz)

<sup>3</sup> Sláma Jiří, Ing., GEOPONT 3D s.r.o., Gajdošova 432/7, 615 00 Brno, tel.: +420 602 711 713, e-mail: [slama@geopont.cz](mailto:slama@geopont.cz)

Do vzájemné souvislosti jsou dány tloušťky a kubatury konstrukčních vrstev na úrovni geometrické přesnosti, přesnosti kontrolního měření, metod kontrolního měření a způsobu jejich výpočtu. Cílem bylo formulovat kubaturu konstrukční vrstvy jako odvozený geometrický parametr mající svoji nominální hodnotu i variabilitu a umožnit tak stanovení požadavku na přesnost kontrolního určování kubatur konstrukčních vrstev.

#### **- rozbor přesnosti výpočtu kubatur**

Uveden je matematický a pravděpodobností model pro výpočet kubatury konstrukční vrstvy vystihující rovnoměrné rozložení bodů v zaměřované oblasti jejím rozdělením na ortogonální segmenty. Náhodné vlivy mající vliv na kvalitu určené kubatury v principu vycházející z nejistot metody měření a z nejistot generalizace zaměřovaného povrchu. Uvedeny jsou též systematické vlivy, které jsou dané změnami v geodetickém základu, v zemním tělese a v konstrukčních vrstvách, které nastávají v časovém období mezi geodetickým zaměřením dílčích ploch konstrukčních vrstev. Významný vliv mohou mít i zbytkové systematické vlivy metod podrobného měření.

#### **- simulační a testovací výpočty kubatur**

Pro simulační a testovací výpočty byla využita oblast 8 x 500 m zkušebního povrchu dálnice D1 v km 296 u Lipníku nad Bečvou. Cílem bylo posouzení kvality určení kubatur v závislosti na porobnosti měření a současně porovnání teoretických předpokladů s výsledky empirických výpočtů. Pracováno bylo s modely danými ortogonální sítí bodů o hustotě 0,1 x 0,1 m, 0,5 x 0,5 m, 1 x 1 m, 2,5 x 1 m, 5 x 1 m, 10 x 1 m, 20 x 1 m a 40 x 1 m. V případě simulačních výpočtů byly jednotlivé digitální modely povrchu vozovek zatěžovány náhodnými chybami definovaných parametrů. Při testovacích výpočtech se vyšlo z reálných podrobných modelů zkušebního povrchu zaměřených čtyřmi různými měřicími systémy (Leica MS 60, Trimble SX 10, Trimble S7, Trimble TX8).

## **2 GEOMETRICKÁ PŘESNOST A JEJÍ KONTROLA**

Nominální hodnoty geometrických parametrů a informace o jejich tolerované variabilitě lze získat z projektové dokumentace.

### **2.1 POŽADAVKY NA GEOMETRICKOU PŘESNOST**

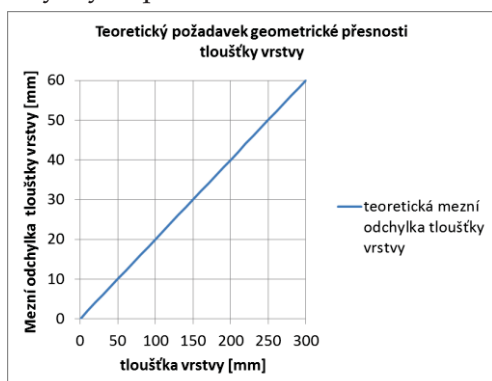
Tloušťky vrstev se kontrolují v místech nebo v četnosti předepsaných projektovou dokumentací. Nominální hodnoty tlouštěk  $t_{nom}$  jednotlivých vrstev jsou dány vzorovým řezem skladby vozovky. Standardně bývá definováno maximální možné oslabení tloušťky vrstvy v místě  $t_{min}$  jako funkce nominální hodnoty tloušťky  $t_{nom}$  [5], [6]. Výjimkou jsou CB kryty, kde se pracuje s maximálním možným oslabením tloušťky pro CB I, CB II a CB III nezávisle na tloušťce vrstvy. Z uvedených standardních požadavků lze formou symetrické mezní odchylky definovat požadavek na mezní odchylku tloušťky vrstvy v místě  $\delta_t$ .

$$t_{min} = 0.8 t_{nom} , \delta_t = \pm 0.2 t_{nom} \quad (1)$$

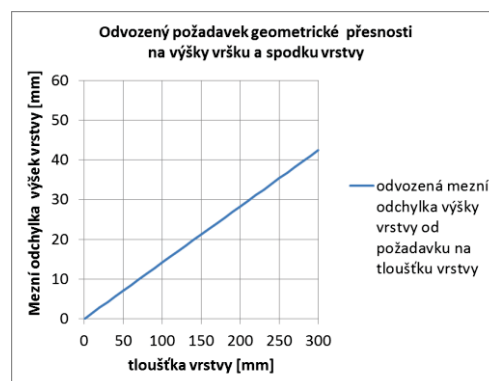
Z požadavku na geometrickou přesnost tloušťky vrstvy  $\delta_t$  lze dále určit minimální odvozený požadavek na výškové provedení jednotlivých ploch konstrukční vrstvy  $\delta_{H.o.}$ . Předpokládáno bude, že dolní i horní plocha konstrukční vrstva má být provedená se stejnou přesností.

$$\delta_{H.o.} = \delta_t / \sqrt{2} \quad (2)$$

Obecně lze konstatovat, že s klesající tloušťkou vrstvy rostou požadavky na výškové provedení jejich dílčích ploch. Existuje kritická tloušťka vrstvy, do které je taková vrstva v požadované tloušťce při její realizaci podle standardně předepisovaných požadavků pro výšky neproveditelná.



Graf 1 – Požadavek na tloušťku vrstvy



Graf 2 – Požadavek na výšky vrstvy

Nejvyšší standardně užívaný požadavek na výškové provedení konstrukční vrstvy je dán mezní odchylkou výšky  $\delta_H$  v hodnotě  $\pm 10$  mm [5], [6]. Realizace tenkých vrchních vrstev vozovek do 70 mm však vyžaduje zvýšený požadavek na přesnost výškového provedení jejich dílčích ploch. Velmi tenké vrstvy tloušťky do 35 mm může být výhodnější pokládat bez výškového vytyčení tzv. „na tloušťku“, kdy je realizovaná vrstva o definované tloušťce podle předchozí vrstvy (týká se obvykle obrusných vrstev nebo ochrany izolace mostů).

Kubatury jednotlivých konstrukčních vrstev se určují v půdorysné oblasti teoretiky příčně vymezené šířkovým uspořádání vozovky a podélně vymezené staničením počátku a konce řešeného úseku komunikace. Ze znalosti plochy oblasti pro výpočet kubatury a tloušťky konstrukční vrstvy vozovky lze určit nominální hodnotu kubatury  $V_{nom}$ . Je možné konstatovat, že skutečná kubatura položené vrstvy se nemůže lišit od její nominální hodnoty více, než umožní tolerovaná variabilita dílčích geometrických parametrů definujících její požadovaný rozměr a tvar.

Variabilitu nominální hodnoty kubatury konstrukční vrstvy lze odvodit z požadavků na maximální průměrné oslabení tloušťky konstrukční vrstvy  $t_{\emptyset min}$  [5], [6] se kterým se pracuje u všech konstrukčních vrstev podle rovnic 3 a 4 s výjimkou CB krytů.

$$t_{\emptyset min} = 0.85 t_{nom} \quad \text{pro} \quad t_{nom} < 35 \text{ mm} \quad (3)$$

$$t_{\emptyset min} = 0.90 t_{nom} \quad \text{pro} \quad t_{nom} > 35 \text{ mm} \quad (4)$$

Lze použít též požadavek na mezní průměrné výškové vychýlení realizovaných dílčích povrchů konstrukčních vrstev od projektových výšek  $\delta_{\emptyset H}$  [5]. Při praktickém posuzování výškového provedení konstrukčních vrstev se pracuje s aritmetickým průměrem absolutních výškových odchylek. Tím je dána určitá nesrovnalost mezi ustanovením norem a zavedenými zvyklostmi.

$$\delta_{\emptyset H} = \pm 5 \text{ mm} \quad (5)$$

Z rovnic 3, 4 a 5 lze následně stanovit symetrické relativní mezní odchylky kubatury v procentech  $\delta_V\%$  její nominální hodnoty  $V_{nom}$  pro jednotlivé výše uvedené případy.

$$\delta_{V\%} = \pm 15\% \quad \text{pro } t_{\text{nom}} < 35 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\delta_{V\%} = \pm 10\% \quad \text{pro } t_{\text{nom}} > 35 \text{ mm} \quad (7)$$

$$\delta_{V\%} = \pm \frac{\delta_{\theta H} 100 \sqrt{2}}{t_{\text{nom}}} \quad (8)$$

## 2.2 POŽADAVKY NA PŘESNOST KONTROLNÍHO MĚŘENÍ

Kontrolně určené hodnoty realizovaných geometrických parametrů lze považovat za skutečné za předpokladu provedení kontrolního měření s významně menší mezní odchylkou  $\delta_{\text{met}}$  vzhledem k požadované mezní odchylce geometrického parametru  $\delta$ . Směrodatná odchylka metody kontrolního měření  $\sigma_{\text{met}}$  se určí na základě volby součinitele konfidence  $t = 2, 2.5$  nebo  $3$ .

$$\delta_{\text{met}} = \pm 0.4 \delta, \quad \sigma_{\text{met}} = \pm \delta_{\text{met}} / t \quad (9)$$

Tloušťky vrstev jsou geodetickými metodami obvykle určovány z rozdílu výšek bodů na horní a dolní ploše konstrukční vrstvy. Přesnost kontrolního měření výšek lze odvodit jednak z mezních odchylek výšek vrstev a jednak z mezních odchylek pro tloušťky vrstev (nebo přímo z nominální hodnoty tloušťky vrstvy). Shodný požadavek na přesnost kontrolního měření výšek při  $t = 2$  se směrodatnou odchylkou  $\sigma_{H,\text{met}} = \pm 2 \text{ mm}$  lze získat výpočtem z mezních odchylek výšek dílčích ploch  $\delta_h = \pm 10 \text{ mm}$  a výpočtem z nominální tloušťky vrstvy  $t_{\text{nom}} = 70 \text{ mm}$ . Při nerovnosti vypočtených požadavků na přesnost kontroly jednotlivých geometrických parametrů se kontrolní měření provádí z vyšší určenou přesností.

Minimální požadavky na přesnost kontrolního určení kubatury ve formě směrodatné odchylky  $\sigma_{V\%}$  lze odvodit z relativních mezních odchylek nominální kubatury  $\delta_{V\%}$  výše uvedených. Při volbě součinitele konfidence  $t = 2.5$  bude  $\sigma_{V\%} = 2.4\%$  pro  $t_{\text{nom}} < 35 \text{ mm}$  a  $\sigma_{V\%} = 1.6\%$  pro  $t_{\text{nom}} > 35 \text{ mm}$ . Vyjít lze též z rovnice 8. Kubatura konstrukčních vrstev bude určována na základě výškového zaměření dílčích ploch s přesností odvozenou pro kontrolu geometrické přesnosti tlouštěk a výšek. Výše uvedených přesností kontrolního určení kubatury bude dosaženo na základě volby podrobnosti měření a uvážení dalších aspektů, které budou uvažovány dále v textu.

## 2.3 METODY KONTROLNÍHO MĚŘENÍ

Při kontrolním měření konstrukčních vrstev vozovek se dnes uplatňují jak selektivní tak neselektivní metody sběru prostorových dat i jejich kombinace.

V případě kontrolního určování tlouštěk v místě se určují výšky dolní a horní plochy posuzované konstrukční vrstvy v pozici polohově vytyčených kontrolních bodů. Přesnost polohového vytyčení při větších sklonech konstrukční vrstvy může mít zásadní vliv korektnost určené tloušťky vrstvy. Uvedený problém může být vyřešen například interpolací výšek v přesných pozicích kontrolních bodů za využití digitálních modelů vozovek.

Konstrukční vrstvy vozovek pro výpočet kubatury pokládky lze zdokumentovat selektivními metodami sběru prostorových dat zaměřením příčných profilů v hustotě kontrolních profilů nebo vyšší. Volitelná je též hustota zaměřovaných bodů v jednotlivých příčných profilech. Druhou volbou je dokumentace povrchu konstrukčních vrstev neselektivními metodami sběru prostorových dat pomocí podrobných modelů povrchu za využití skenovacích totálních stanic nebo detailních modelů povrchu za využití statických laserových skenerů. Zejména při řídkém měření profilovými metodami je pro následné správné určení kubatury konstrukční vrstvy zásadní pořízení modelu horní a dolní plochy

vrstvy měřením podrobných bodů ve stejných místech a ve stejné podrobnosti. Uvedený přístup vede přes shodnou generalizaci zaměřovaných ploch ke kvalitnějším výsledkům.

## 2.4 METODY VÝPOČTU URČOVANÝCH PARAMETRŮ

Tloušťky vrstev v místě lze určit algebraickým rozdílem výšek v diskrétně zaměřených bodech nebo rozdílem výšek interpolovaných z digitálních modelů terénu.

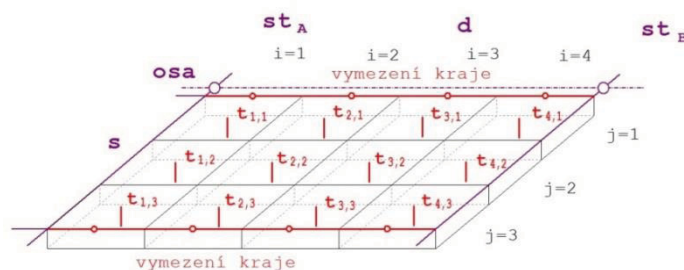
Vypočet kubatury lze realizovat jako součet objemů dílčích elementů, které jsou vymezeny prolnutím trojúhelníkových sítí digitálního modelu horní a dolní konstrukční vrstvy. V případě podrobného a detailního zaměření jednotlivých ploch konstrukční vrstvy může být při výpočtu kubatury vhodnější přejít na generalizovaný rastrový model. Uvedené metody výpočtu jsou integrovány v software DMT Atlas [4], který byl použit i při dále popisovaných simulačních a testovacích výpočtech pro ověření níže uvedeného matematického a pravděpodobnostního modelu pro výpočet kubatury.

## 3 URČENÍ KUBATURY KONSTRUKČNÍ VRSTVY

Tato kapitola se věnuje rozboru přesnosti určení kubatury zabudovaného materiálu do konstrukčních vrstev vozovky. Model úlohy je postaven na rozparcelování zájmové oblasti na ortogonální segmenty pevně definovaných podélných a příčných rozměrů. Použití odvozených vzorců je však univerzální za předpokladu rovnoměrného rozložení měřených bodů v zájmové lokalitě v určité podrobnosti.

### 3.1 MODEL ÚLOHY

Mějme část konstrukce vozovky podélně vymezenou staničením jejího počátku  $st_A$  a staničením jejího konce  $st_B$ . Příčně bude vrstva vozovky určena svým fyzickým krajem. Oblast pro výpočet kubatury o rozměru  $d$  a  $s$ , bude mít plochu  $P_{obl}$ .



Obr. 1 – Oblast pro výpočet kubatury

Podélně vozovku rozdělme na  $m$  pruhů a příčně na  $n$  pásů. Uvedenou parcelací vzniknou dílčí segmenty o rozměrech  $t_{i,j}$ ,  $d_{i,j}$  a  $s_{i,j}$ . Objem těchto dílčích segmentů vozovky bude určený zprostředkovaně na základě zaměření jejich vybraných rozměrů. Celková kubatura zabudovaných materiálů do konstrukční vrstvy vozovky pak bude určena součtem dílčích objemů. Kompletní výpočetní vzorce pro popsanou úlohu jsou uvedeny v souhrnné zprávě projektu [1].

Dále bude pracováno pouze s vlivem nejistot tlouštěk jednotlivých elementů  $\sigma_t$  na výslednou kubaturu  $V_t$  v definované oblasti  $P_{obl}$ . Tloušťky jednotlivých segmentů vycházejí z výškového určení dolní a horní plochy konstrukční vrstvy jedním měřením. Nejistota odhadu průměrné výšky dolní a horní plochy každého segmentu je dána generalizací povrchu vozovky a chybou metody výškového měření.

Nejistoty v určení průměrných výšek ploch jednotlivých segmentů vychází z daných geometrických vlastností povrchů konstrukčních vrstev. Nejistota průměrných výšek



pro segmenty  $\sigma_{H,aprox}$  rozměrově do 0.5 m souvisí s vlastní texturou povrchu, pro elementy od 0.5 do 4 m souvisí s jejími nerovnostmi a od 4 m lze pracovat s proměnlivostí povrchu konstrukčních vrstev vycházející z požadavků na výšky vrstev.

U metody podrobného měření je nutné zohlednit skutečnost, že skupiny podrobných bodů pořizovaných z jednoho stanoviska jsou jednostranně ovlivněny přesností jeho určení. U metody měření je tedy nutné samostatně uvážit vliv určení jednotlivých stanovisek  $\sigma_{H,s}$  a vliv z nich určených podrobných bodů  $\sigma_{H,p}$ .

Dále bude uvažováno, že jednotlivé plochy pro výpočet kubatury konstrukční vrstvy byly určeny stejnou metodou (stejná přesnost metody, stejný počet stanovisek měření  $n_s$  a stejný počet podrobných bodů  $n_p$  rovnoměrně rozmístěných v předemtné oblasti) a mají shodné geometrické vlastnosti (textura, nerovnost, výškové vymezení).

$$\sigma_{V,t}^2 = \sigma_{V,t,met,s}^2 + \sigma_{V,t,met,p}^2 + \sigma_{V,t,aprox}^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{V,t,met,s} = P_{obl} \frac{\sigma_{H,s} \sqrt{2}}{\sqrt{n_s}} \quad (11)$$

$$\sigma_{V,t,met,p} = P_{obl} \frac{\sigma_{H,p} \sqrt{2}}{\sqrt{n_p}} \quad (12)$$

$$\sigma_{V,t,aprox} = P_{obl} \frac{\sigma_{H,aprox} \sqrt{2}}{\sqrt{n_p}} \quad (13)$$

Pro větší vypovídací schopnost výsledku lze nejistoty vypočteného objemu vyjadřovat relativně v procentech celkového objemu ve formě relativní směrodatné odchylky  $\sigma_{V\%,t}$ .

$$\sigma_{V\%,t} = \frac{\sigma_{V,t}}{V} 100 \quad (14)$$

### 3.2 SYSTEMATICKÉ VLIVY

Působení systematických vlivů vnějšího prostředí může mít zásadní vliv na geometrickou přesnost realizované konstrukce vozovky a současně těž na věrohodnost zkušebních metod, kterými je geometrická přesnost verifikována.

Každá realizovaná vrstva je geodeticky určena měřením ve dvou časově odlišných etapách. V první etapě je zaměřen horní povrch spodní vrstvy. V druhé etapě je zaměřen horní povrch předemtné vrstvy. V časovém intervalu mezi zaměřením dílčích povrchu vrstev může dojít k systematickým změnám geodetického základu, systematickým změnám na zemním tělese komunikace nebo k systematickým změnám v konstrukčních vrstvách. Vliv systematických chyb může být minimalizován technologickým postupem měření, úpravou časového průběhu výstavby nebo matematickým modelováním.

- Geodetický bod (na stavbách jde o body vytyčovací sítě) nebo skupina takových bodů používaných pro vytyčení a následné kontrolní zaměření budované vrstvy může být systematicky ovlivněna stavební činností nebo jinými vlivy ve formě poklesů nebo zdvihů. Neidentifikovaná výšková změna na vytyčovací síti má přímý dopad na výšky, tloušťky a kubatury konstrukčních vrstev.
- Výsledky jednotlivých měřických technologií mohou být zatíženy systematickými vlivy. V principu se obvykle jedná konstantní chyby dané špatnými offsety nastavenými pro měřicí přístroj nebo odrazný systém nebo chyby proměnlivé zpravidla v závislosti

na vzdálenosti určovaného bodu od měřicího systému (osové chyby, podmínky při měření a měnící se úhel dopadu měřicího paprsku na zaměřovaný povrch).

- V průběhu výstavby dochází ke konsolidaci zemního tělesa. Změny jsou vyvolány zejména hmotou tělesa komunikace. Materiál v zemním tělese a podloží se působením gravitace stlačuje a dochází ke zvyšování jeho měrné hmotnosti (hustoty). Uvedené způsobuje poklesy v úrovni konstrukčních vrstev vozovky. Určitý význam může mít i vlastní fyzikální objemová nestabilita použitého materiálu.
- Měrná hmotnost (hustota) jednotlivých konstrukčních vrstev je ovlivněna jejich mechanickým zhutňováním při jejich budování. Vrstva je vždy pokládána s rezervou, aby se po zhutnění dostala do správných výšek. Uvedené však může mít dopad i na všechny nižší dříve položené vrstvy. Změnou jejich hustoty dojde ke změně jejich tloušťek i výšek jejich uložení.

Je nutné konstatovat, že kubatury, tloušťky a výšky jednotlivých konstrukčních vrstev vozovky jsou poplatné okamžiku jejich určení po jejich realizaci. Uvedené může způsobit rozpory mezi výsledky kontroly tloušťek všech vrstev vývrty nebo sondami z úrovně hotové vozovky a výsledky odvozenými z etapového geodetického měření dílčích vrstev.

## 4 VÝPOČET KUBATUR NA POVRCHU TESTOVACÍ ZÁKLADNY

V této kapitole budou popsány simulační a testovací výpočty kubatur s cílem posouzení přesnosti jejich určení při různé podrobnosti měření. Zkušební povrch se nachází na exitu dálnice D1 v km 296 u Lipníku nad Bečvou. Jednalo se o s dálnicí souběžný neprovozovaný jízdní pás délky 500 m a šířky 8 m. Na tomto povrchu bylo technologií přesné nivelace zřízeno bodové pole, vlíčovací body v příčných profilech po 10 m při krajích a v ose vozovky a podélný profil s podrobností 0.25 m délky 500 m. Na uvedeném povrchu byly prováděny experimenty přesnosti mezinárodního indexu IRI ve smyslu TP 207 [3] v rámci projektu [2] a též vyhodnocovány přesnosti a možnosti geodetických metod pro práce na konstrukčních vrstvách vozovek v rámci projektu [1].

### 4.1 SIMULAČNÍ VÝPOČTY

Pro simulační výpočty byla použita oblast odpovídající povrchu vozovky testovací základny šířkově po obou stranách zúžená o 50 cm o ploše 3477 m<sup>2</sup>. V této oblasti byly vygenerovány ortogonální síť podrobných bodů v hustotě 0.1 x 0.1 m, 0.5 x 0.5 m, 1 x 1 m, 2.5 x 1 m, 5 x 1 m, 10 x 1 m, 20 x 1 m a 40 x 1 m. V této souvislosti bude dále hovořeno o parcelaci výpočetní oblasti a o jejich jednotlivých segmentech. K polohám těchto bodů byly dopočítány výšky idealizovaného rovinného povrchu dolní a horní vrstvy konstrukční vrstvy a následně byly vygenerovány referenční digitální modely tohoto povrchu. Simulační výpočet spočíval v přiřazování náhodných chyb jednotlivým podrobným bodům idealizované vozovky ve 12 iteracích pro každou variantu výchozího referenčního modelu. Následně proběhl výpočet skutečných kubatur a kubatur z digitálních modelů povrchů zatížených náhodnými chybami výšek jednotlivých podrobných bodů.

Přesnost tloušťky každého dílčího segmentu pro výpočet kubatury byla určena s nejistotou metody změření výšky na jeho horní a dolní ploše a s nejistotou odhadu skutečné průměrné výšky jeho spodní a horní plochy teoreticky danou nerovnostmi skutečného povrchu vozovky (chyba aproximace). Uvažována byla dvojnásobná výšková variabilita

povrchů konstrukčních vrstev oproti jejich požadovaným geometrickým vlastnostem. Symbol  $\delta_{L4M}$  v následující tabulce je mezní odchylka nerovnosti pod latí délky 4 m.

Tab. 1 – Výškové nejistoty ploch segmentů v závislosti na jejich velikosti

vliv	velikost segmentu	požadovaná geometrická vlastnost vrstvy	chyba aproximace $\sigma_{H,aprox}$ [mm]	chyba metody měření $\sigma_{H,met}$ [mm]	celková chyba segmentu $\sigma_{H,seg}$ [mm]
výšková realizace povrchu	> 4 m	$\delta_H = \pm 10$ mm	10.0	2.0	10.2
nerovnost povrchu	0.5 m až 4 m	$\delta_{L4M} = +5$ mm	2.5	2.0	3.2
textura povrchu	< 0.5 m		1.0	2.0	2.2

Cílem simulačních výpočtů bylo porovnání nejistot vypočtených pomocí teoretických vzorců s výsledky simulačního výpočtu při shodně definovaných parametrech povrchu vozovky. Symbol  $n_p$  udává počet bodů modelu,  $\sigma_{V,t}$  je směrodatná odchylka určené kubatury vypočtená exaktním vzorcem,  $\sigma_{V,t,sim}$  je směrodatná odchylka určená z rozptylu simulovaných výpočtů a  $\sigma_{V\%,t}$  je nejistota kubatury udaná v procentech celkové kubatury.

Lze konstatovat, že došlo k souladu vypočtených charakteristik přesnosti exaktním výpočtem a simulací. Výsledná nejistota kubatury do podrobnosti měření  $5 \times 1$  m nepřekročí  $\pm 0.5$  m<sup>3</sup>. Současně relativní přesnost  $i$  při tloušťce 0.015 m nepřekročí 1% celkové kubatury. Optimální podrobnost měření pro kvalitní určení kubatur je 0.5 až 4 m. Vyšší podrobnost měření lze považovat za zcela nepřínosnou. Též při nižší podrobnosti měření a větších tloušťkách lze dosáhnout velmi dobrých relativních přesností určení kubatur.

Tab. 2 – Výsledky simulačních výpočtů

	0.1 x 0.1 m	0.5 x 0.5 m	1 x 1 m	2.5 x 1 m	5 x 1 m	10 x 1 m	20 x 1 m	40 x 1 m
$n_p$	358272	15684	4509	1809	909	459	234	126
$P_{obl}$ [m <sup>2</sup> ]	3477.5	3477.5	3477.5	3477.5	3477.5	3477.5	3477.5	3477.5
$\sigma_{H,seg}$ [m]	2.2	2.2	3.2	3.2	3.2	10.2	10.2	10.2
$\sigma_{V,t}$ [m <sup>3</sup> ]	0.02	0.09	0.23	0.37	0.52	2.34	3.28	4.47
$\sigma_{V,t,sim}$ [m <sup>3</sup> ]	0.02	0.07	0.19	0.42	0.42	2.07	3.20	5.28
$\sigma_{V\%,t}$ [%] t=15 mm, V=52 m <sup>3</sup>	0.03	0.17	0.45	0.71	1.00	4.49	6.29	8.57
$\sigma_{V\%,t}$ [%] t=35 mm, V=122 m <sup>3</sup>	0.01	0.07	0.19	0.30	0.43	1.92	2.69	3.67
$\sigma_{V\%,t}$ [%] t=70 mm, V=243 m <sup>3</sup>	0.01	0.04	0.10	0.15	0.21	0.96	1.35	1.84
$\sigma_{V\%,t}$ [%] t=100 mm, V=348 m <sup>3</sup>	0.01	0.02	0.07	0.11	0.15	0.67	0.94	1.28

## 4.2 VÝPOČTY S REÁLNÝMI DATY

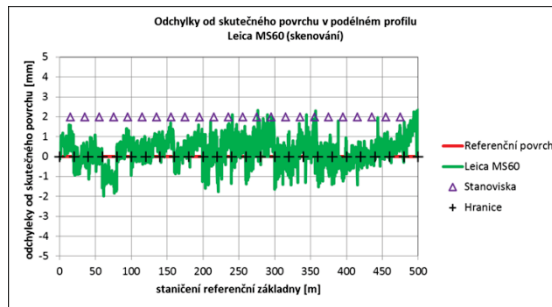
Pro testovací výpočty byly použity reálně pořízené modely povrchu vozovky čtyřmi různými měřicími systémy pracující v režimu bezkontaktního sběru prostorových dat. Jednalo se multistanici Leica MS60, multistanici Trimble SX10, totální stanici Trimble S7 a statický skener Trimble TX8. Povrch byl zaměřen z 11 stanovisek vzájemně vzdálených 50 m. Skenováno bylo do vzdálenosti 30 m od přístrojů. Překryty skenů pak byly 10 m. Odlišná technologie měření byla použita pouze u multistanice Leica MS60, kde bylo skenováno jen ve směru kilometráže referenční základny. Pro zaměření povrchu vozovky bylo proto potřeba 22 stanovisek. Přístroje byly referencovány s využitím bodového pole základny a vybraných vřícovacích bodů na vlastním povrchu. Podrobnost měření primárních dat byla závislá na možnostech jednotlivých měřicích systémů.

Přístrojem Leica MS60 byl referenční povrch zaměřen se směrodatnou odchylkou  $\sigma_H=0.7$  mm se systematickým výškovým vychýlením měření od skutečného povrchu  $\sigma_{sys} = +0.288$  mm.





Obr. 2 – Leica MS 60

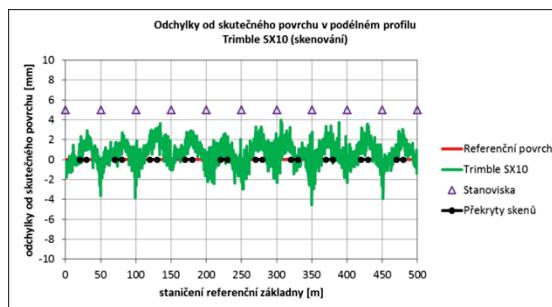


Graf 3 – Výškové odchylky na podélném profilu základny

Přístrojem Trimble SX10 byl referenční povrch zaměřen se směrodatnou odchylkou  $\sigma_H=1.3$  mm se systematickým výškovým vychýlením měření od skutečného povrchu  $\sigma_{sys} = +0.638$  mm.



Obr. 3 – Trimble SX 10

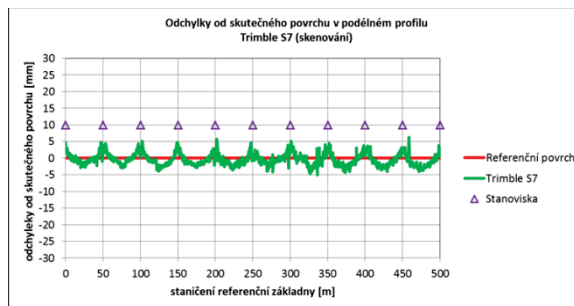


Graf 4 – Výškové odchylky na podélném profilu základny

Přístrojem Trimble S7 byl referenční povrch zaměřen se směrodatnou odchylkou  $\sigma_H=1.9$  mm se systematickým výškovým vychýlením měření od skutečného povrchu  $\sigma_{sys} = -0.475$  mm.



Obr. 4 – Trimble S7

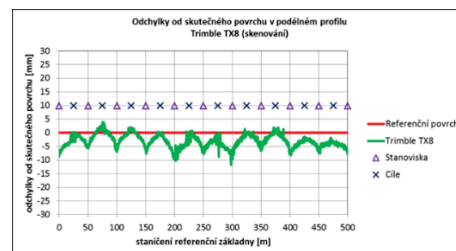


Graf 5 – Výškové odchylky na podélném profilu základny

Přístrojem Trimble TX8 byl referenční povrch byl zaměřen se směrodatnou odchylkou  $\sigma_H=3.9$  mm se systematickým výškovým vychýlením měření od skutečného povrchu  $\sigma_{sys} = -3.047$  mm.

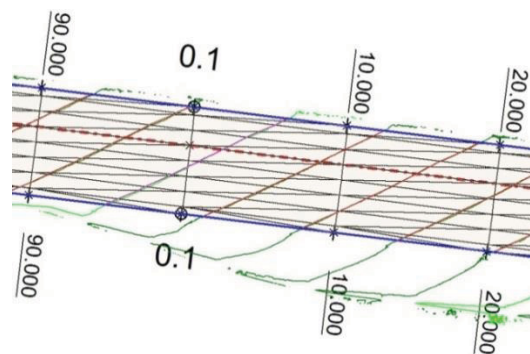


Obr. 5 – Trimble TX8



Graf 6 – Výškové odchylky na podélném profilu základny

Kontrolní výpočty kubatur byly provedeny na digitálních modelech povrchu vzniklých zředěním originálních dat na rastr 0.1 x 0.1m, 0.5 x 0.5 m, 1 x 1m, 2.5 x 1m, 5 x 1m, 10 x 1 m, 20 x 1 m a 40 x 1 m. Pro podrobnost 5 x 1 a menší byly prováděny variantní výpočty na digitálních modelech povrchu s podélně posouványými pozicemi bodů rastru v předemné oblasti za účelem snímání výšek z originálních dat v různých pozicích. Například pro podrobnost 20 x 1 m při podélném posunu bodů rastru po 2.5 m bylo vytvořeno 8 různých modelů. V uvedeném rozsahu byly zkompletovány jednotlivé digitální modely povrchu pro horní plochu konstrukční vrstvy. Spodní model konstrukční vrstvy byl považován za bezchybný a byl tím pádem i shodný pro všechny varianty výpočtu. Tím je dána odlišnost v přesnosti určených kubatur od hodnot uvedených u simulačních výpočtů.



Obr. 6 – Ukázka modelu v podrobnosti 10 x 1 m

V následujících tabulkách budou uvedeny odchylky od skutečné hodnoty kubatury. Ta byla získána s využitím naměřených dat všech použitých technologií v maximálním detailu po jejich výškové korekci na skutečný povrch vozovky. Korekční hodnoty byly určeny porovnáním výšek jednotlivých digitálních modelů v místech 2000 nivelovaných bodů podélného profilu základny.

První tabulka dokumentuje vyhodnocení výškově nekalibrovaných digitálních modelů. Ve výsledcích je patrná významná odlišnost odchylek kubatur od skutečné hodnoty již při použití modelů v nejvyšší podrobnosti. Výsledky jsou v tomto případě zatíženy souhrnně náhodnými i systematickými vlivy. Na popisované odchylky mají největší vliv náhodné chyby vycházející z nejistot průměrných výškových horizontů stanovisek měření a neošetřené systematické chyby jednotlivých technologií měření.

Tab. 3 – Odchylky kubatur výškově nekalibrovaných modelů

	0.1 x 0.1 m	0.5 x 0.5 m	1 x 1 m	2.5 x 1 m	5 x 1 m		10 x 1 m		20 x 1 m		40 x 1 m	
	dV	dV	dV	dV	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>
	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
Leica MS60	0.78	0.80	0.70	0.60	0.47	0.68	-0.79	1.65	-2.56	2.83	-3.17	7.57
Trimble SX10	2.31	2.35	2.27	2.07	1.84	2.26	1.06	2.99	-1.45	4.51	-1.45	8.45
Trimble S7	-1.85	-1.87	-1.98	-2.11	-2.23	-2.01	-3.05	-1.42	-5.56	0.45	-6.06	5.55
Trimble TX8	-10.25	-10.21	-10.32	-10.35	-10.55	-10.22	-11.40	-9.26	-14.44	-7.84	-13.76	-3.84

Očekávané nejistoty kubatur bez působení systematických vlivů pro měření v nejvyšší podrobnosti 0.1 x 0.1 m udává následující tabulka. Symbol  $n_s$  udává počet stanovisek použitých pro zaměření jedné plochy konstrukční vrstvy,  $\sigma_{met,S}$  je nejistota výškových horizontů jednotlivých postavení přístroje,  $n_p$  je počet všech podrobných bodů použitých pro vystižení jedné plochy konstrukční vrstvy,  $\sigma_{met,P}$  je přesnost podrobného měření a  $\sigma_{H,prum}$  je chyba z aproximace výšky každého segmentu pro výpočet kubatury.

Tab. 4 – Náhodné složky přesnosti kubatury pro modely v podrobnosti 0.1 x 0.1 m

vliv průměrného horizontu přístroje	vliv průměrného horizontu přístroje	vliv podrobného měření	vliv aproximace výšky segmentu
$P_{obl} = 3477.5 \text{ m}^2$	$P_{obl} = 3477.5 \text{ m}^2$	$P_{obl} = 3477.5 \text{ m}^2$	$P_{obl} = 3477.5 \text{ m}^2$
$n_s = 11$	$n_s = 22$	$n_p = 358272$	$n_p = 358272$
$\sigma_{met,s} = 0.25 \text{ mm}$	$\sigma_{met,s} = 0.25 \text{ mm}$	$\sigma_{met,p} = 1.98 \text{ mm}$	$\sigma_{H,prum} = 1 \text{ mm}$

$\sigma_{V,t,met,s}$	$\sigma_{V,t,met,s}$	$\sigma_{V,t,met,p}$	$\sigma_{V,t,prum}$
[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
0.262	0.185	0.012	0.006

Po výškových korekcích jednotlivých digitálních modelů povrchu o nezávisle určené výškové offsety došlo k výraznému zmenšení odchylek vypočtených kubatur od její skutečné hodnoty. Nově vypočtené odchylky však významně překračují předpokládané mezní hodnoty. Je zde však nutné vzít v úvahu, že jednotlivé experimenty nebyly zcela časově synchronizovány a mohlo tím pádem dojít i k určitým změnám na vlastním zkušebním povrchu. Dále jsou měřená data zatížena systematickými vlivy proměnlivými se vzdáleností měřených bodů od měřicího systému. Uvedeným chybám kubatur do 0.34 m<sup>3</sup> v oblasti 3477 m<sup>2</sup> pro názornost odpovídá chyba v průměrné tloušťce vrstvy pod 0.1 mm.

Tab 5 – Odchylky kubatur výškově kalibrovaných modelů

	0.1 x 0.1 m	0.5 x 0.5 m	1 x 1 m	2.5 x 1 m	5 x 1 m		10 x 1 m		20 x 1 m		40 x 1 m	
	dV	dV	dV	dV	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>
	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
Leica MS60	-0.23	-0.21	-0.31	-0.41	-0.54	-0.33	-1.80	0.64	-3.57	1.82	-4.18	6.56
Trimble SX10	0.09	0.13	0.05	-0.15	-0.38	0.04	-1.16	0.77	-3.67	2.29	-3.67	6.23
Trimble S7	-0.20	-0.22	-0.33	-0.46	-0.58	-0.36	-1.40	0.23	-3.91	2.10	-4.41	7.20
Trimble TX8	0.34	0.38	0.27	0.24	0.04	0.37	-0.81	1.33	-3.85	2.75	-3.17	6.75

V poslední tabulce je za skutečnou kubaturu považovaná hodnota vypočtená samostatně pro každou metodu měření z digitálního modelu nejvyšší podrobnosti. Následně lze vzájemně lépe porovnat vývoj odchylek kubatur při klesající podrobnosti měření pro jednotlivé technologie. Tabulky oproti předchozím obsahují i teoreticky vypočtené přesnosti určení kubatury  $\sigma_{V,t}$  a v případě variantních výpočtů kubatur při podélném posouvání rastru bodů dále také empiricky vypočtené přesnosti určení kubatury  $\sigma_{V,t,temp}$ .

Tab 6 – Odchylky vyhodnocené pro každou technologii samostatně

	0.1 x 0.1 m	0.5 x 0.5 m	1 x 1 m	2.5 x 1 m	5 x 1 m		10 x 1 m		20 x 1 m		40 x 1 m				
	$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$	$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$	$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$	$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$	$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$		$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$		$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$		$\sigma_{V,t}[\text{m}^3]$				
	0.01	0.06	0.17	0.26	0.37		1.66		2.32		3.16				
	dV	dV	dV	dV	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	$\sigma_{V,t,temp}$	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	$\sigma_{V,t,temp}$	dV <sub>min</sub>	dV <sub>max</sub>	$\sigma_{V,t,temp}$
	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]
Leica MS60	0.00	0.02	-0.08	-0.18	-0.31	-0.10	-1.57	0.87	1.11	-3.34	2.05	1.98	-3.95	6.79	4.07
Trimble SX10	0.00	0.04	-0.04	-0.24	-0.47	-0.05	-1.25	0.68	0.97	-3.76	2.20	1.90	-3.76	6.14	3.38
Trimble S7	0.00	-0.02	-0.13	-0.26	-0.38	-0.16	-1.20	0.43	0.90	-3.71	2.30	2.09	-4.21	7.40	3.95
Trimble TX8	0.00	0.04	-0.07	-0.10	-0.30	0.03	-1.15	0.99	1.10	-4.19	2.41	2.12	-3.51	6.41	3.52

Odchylky kubatur všech variant výpočtu nepřekračují teoreticky stanovené meze. Při zohlednění bezchybnosti spodní vrstvy konstrukční vrstvy bylo dosaženo též souladu s výsledky simulačních výpočtů popisovaných v předchozí podkapitole. Zajímavý je vzájemný soulad odchylek objemu mezi technologiemi měření v jednotlivých podrobnostech. Zda se, že výsledky jsou více jak rozdílnou přesností technologie měření ovlivněny stejným způsobem generalizace povrchu vozovky.

## 5 ZÁVĚR

Proveditelnost a kontrola konstrukčních vrstev z pohledu tloušťek má za geodetické podpory svoje limity. Realizace vrchních vrstev vozovky v požadovaných tloušťkách vyžaduje zvýšenou kvalitu jejich výškového provedení oproti standardům pro tloušťky 70 mm a menší. Zde lze z tohoto pohledu hovořit o tenkých konstrukčních vrstvách vozovek. S ohledem na možnosti geodetických metod snad jen s výjimkou přesné nivelace jsou práce na vrstvách s tloušťkou 35 mm a menší s geodetickou podporou neproveditelné. V této souvislosti se hovoří o velmi tenkých vrstvách vozovek. Takové vrstvy se obvykle pokládají bez výškového vytyčení tzv. „na tloušťku“.

Nominální hodnoty kubatur konstrukčních vrstev mají předvídatelnou variabilitu danou požadavky na geometrické provedení jejich dílčích ploch (výšky, nerovnosti a textury povrchu). Lze pracovat například s požadavky na maximální průměrné oslabení konstrukční vrstvy nebo s požadavky na maximální průměrné výškové vychýlení jejich dílčích ploch. Tohoto lze využít k stanovení požadavků na geometrickou přesnost a následně na přesnost kontrolního určování kubatur, které mohou být uvedeny absolutně nebo v relativně v procentech nominální hodnoty kubatury. Požadavky na přesnosti kubatur v procentech nominální hodnoty mají určité úskalí v souvislosti s konstantní přesností jejich kontrolního určování určitou technologií nezávisle na velikosti tloušťky vrstvy. U tenkých a velmi tenkých vrstev může dojít k situaci, že požadovaná relativní přesnost se stane nedosažitelná a současně nebude ani potřebná. Na druhé straně v případě velkých tloušťek vrstev a tím i dokumentaci zabudování velkých objemů materiálu může dojít k zbytečné velké volnosti v požadavcích na přesnost kontrolního určování kubatur.

Kvalitní určování kubatur konstrukčních vrstev vozovek může být ze strany jednotlivých geodetů podpořeno zejména maximálním potlačením systematických chyb v geodetickém základu staveb a systematických chyb používaných měřících systémů a technologických postupů. Následně je přesnost kubatury dána nastavením přesnosti měření a jeho podrobností a předpokládanou variabilitou zaměřovaného povrchu. Současně je však nutné konstatovat, že vysoká podrobnost měření poskytovaná laserovými skenovacími systémy lze pro danou úlohu určování kubatur konstrukčních vrstev považovat za zcela nadbytečnou.

**Poděkování:** *Tento článek byl zpracován mimo jiné i s teoretickou podporou projektu specifického výzkumu FAST-S-16-3507.*

## LITERATURA

- [1] Průkaznost kontroly geometrie konstrukčních vrstev vozovek podle požadavků technických předpisů MD a návrh na jejich úpravu. Souhrnná zpráva projektu SFDI, Sláma, J., Bárta, L., ŘSD ČR, 2017, 52 stran + přílohy.
- [2] Plošná grafická interpretace nerovností vozovek a analýza kumulace vody na vozovce s predikcí míst vzniku akvaplaningu. Souhrnná zpráva projektu SFDI, Atlas, spol. s r.o., ŘSD ČR, 2017, 41 stran + přílohy.
- [3] TP 207 – Experiment přesnosti pro měření povrchových vlastností a dalších parametrů vozovek pozemních komunikací. TP, Nekula, L., Ministerstvo dopravy, 2017, 37 stran.

- [4] <http://www.atlasltd.cz/>
- [5] ČSN 73 6121 - Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody. ČSN, Český normalizační institut, Praha, 2008, 35 stran.
- [6] ČSN 73 6122 - Stavba vozovek - Vrstvy z litého asfaltu - Provádění a kontrola shody. ČSN, Český normalizační institut, Praha, 2008, 32 stran.

**Lektoroval:** *Ing. Jiří Bureš, Ph.D.*

*Vysoké učení technické v Brně*