

4. ZAMĚŘENÍ KARLOVA MOSTU V PRAZE METODOU LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

Kapitola se zabývá konkrétní aplikací LSS při skenování Karlova mostu v Praze. Jsou zde uvedeny jednotlivé kroky tvorby podrobné dokumentace –pořízení skenů, jejich registrace a tvorba výstupů. Kapitola je rozdělena do dvou částí. První je věnována projektu firmy Gefos a. s., ve druhé je popsáno využití školního LSS Callidus 1.1.

4.1. UŽITÍ LSS CYRAX 2500 A SOFTWARE CYCLONE

Jak již bylo napsáno, na tvorbě podkladů pomocí LSS Cyrax 2500 pracovala geodetická a fotogrammetrická společnost Gefos a. s., ve které vykonávám odbornou praxi. Projekt je rozdělen do dvou etap. Při první etapě, na podzim minulého roku, byly naskenovány vnější zdi mostu. Práci v terénu jsem se nezúčastnila, podílela jsem se až na kancelářských pracích (tj. registraci skenů a tvorbě 3D a 2D výstupů). Během druhé etapy, v dubnu tohoto roku, byl projekt doplněn o zaměření mostovky. Tentokrát jsem nejen vytvářela požadované výstupy, ale vyzkoušela si i laserové skenování v terénu.

4.1.1. PRÁCE V TERÉNU

4.1.1.1. SKENOVÁNÍ

Při skenování vnějších zdí byla většina stanovisek navržena na břehu a v blízkém okolí mostu. Protože při skenování středních oblouků nemohl být dodržen maximální dosah přístroje a při velkých úhlech dopadu se projevila špatná odrazivost laserového paprsku od mokrých kamenů mostu, byly střední oblouky naskenovány přímo z mostu.

4. ZAMĚŘENÍ KARLOVA MOSTU V PRAZE

Celkem bylo pořízeno cca 80 skenů vnějších zdí mostu a cca 70 skenů mostovky s hustotou skenování 500 bodů v řádku i sloupci skenované oblasti. Část mostu, která byla poté zaměřena i LSS Callidus, je zachycena pomocí pěti skenů.



Obr. č. 4.1: Zaměření Karlova mostu skenerem CyraX 2500

4.1.1.2. ZAMĚŘENÍ VB

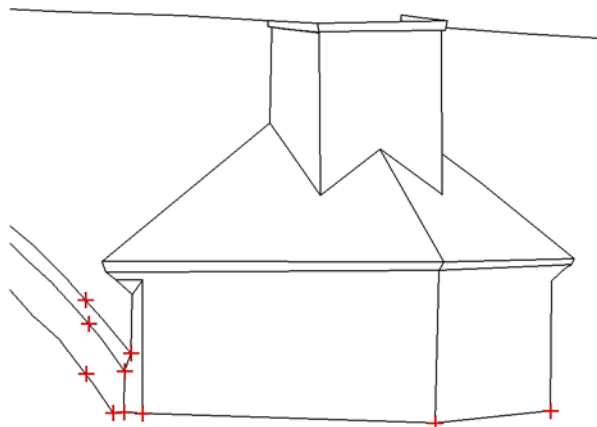
Jelikož bylo potřeba naskenovaný most umístit do souřadnicového a výškového systému, souběžně se skenováním byly pomocí klasických geodetických metod zaměřeny vlíčovací body (cca 170 VB pro vnější část mostu a cca 120 VB pro mostovku). Body signalizovaly kulové terče na stativích umístěných přímo na mostě a v jeho blízkém okolí. Měření bylo připojeno na body účelového bodového pole, které již bylo připraveno. K zaměření byla použita elektronická totální stanice TC 805L fy. Leica (v. č. 502456), která má tyto charakteristiky přesnosti: směrodatnou odchylku měřeného úhlu $\sigma_{\omega} = 0,5$ mgon a směrodatnou odchylku měřené délky $\sigma_d = 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$.

Laserovým skenováním bylo zaměřeno vše kromě míst, která byla zakryta přilehlými objekty (domy, stromy apod.). Tato „slepá“ místa byla průběžně doměřena elektronickou bezodrazovou totální stanicí TCRP 1202 fy. Leica (v.č. 210265).

Nejen přilehlé objekty, ale i turisté a zaparkovaná vozidla komplikovali skenování. Následující obrázky ukazují příklad vzniku „slepých“ míst na pilíři č. 14. Pomocí červených křížků jsou označeny podrobné body, jenž bylo potřeba doměřit pomocí klasických geodetických metod.



Obr.č.4.2: Vznik „slepých“ míst



Obr. č. 4.3: Doměření podrobných bodů

4.1.2. REGISTRACE

Protože byl zaměřen nadbytečný počet vřícovacích bodů, při registraci mračen v programu Cyclone bylo provedeno vyrovnání a výpočet chybové analýzy. Průměrná míra ztotožnění na vřícovacích bodech po transformaci je 1 mm v prostoru a maximální oprava na vřícovacím bodu 6 mm v prostoru. Registrací byl vytvořen ModelSpace s prostorovým rastrovým modelem mostu umístěným v S-JTSK a Bpv.

4.1.3. ZPRACOVÁNÍ

Předmětem vyhodnocení bylo vyhotovení drátového 3D modelu, půdorysu, příčných řezů a nárysů. Na tvorbě dokumentace jsem se spolupodílela s Ing. Martinem Donátem (dokumentace 1. etapy) a s Janem Hargašem (dokumentace 2. etapy). Data byla nejprve předzpracována v programu Cyclone a konečné úpravy provedeny v CAD systému MicroStationV8.

Drátový model vznikl postupnou vektorizací rastrového modelu v programu Cyclone. V programu sice existuje funkce automatické detekce hran, respektive funkce tvořící průsečík dvou rovin, ale vzhledem k nerovnostem a nepravidelnostem tvarů na Karlově mostě automatizace procesu nevedla k požadovaným výsledkům. Polylinie byly vykreslovány do nadefinovaných referenčních rovin. Vytvořený drátový model byl exportován do formátu *.DXF.

Řezy byly pořízeny na základě vektorizace v rovinách příslušných řezů, které prochází osami pilířů a vrcholy kleneb. Stejně jako drátový model i příčné řezy byly vytvořené v programu Cyclone. Vytvořené linie byly exportovány do formátu *.COE. Jedná se o převodní formát, který lze pomocí MDL aplikací naimportovat do CAD systému MicroStation a AutoCAD.

Závěrečné editace modelu a příčných řezů byly provedeny v CAD programu MicroStationV8. V modelu byly vykresleny části doměřené pomocí klasických metod a příčným řezům byly doplněny o délkové a výškové kóty. Z hotového modelu byl vytvořen půdorys a náhledy vnějších zdí mostu, vyexportováním příslušného pohledu do 2D a vymazáním neviditelných hran. Veškeré 2D výstupy jsou uvedeny v **příloze č. 2**, 3D model části mostu je pouze v digitální podobě na přiloženém CD.

4.1.4. PŘESNOST VÝSTUPŮ

Zadavatel projektu (Magistrát hlavního města Prahy – Odbor městského investora) požadoval směrodatnou odchylku drátového modelu $\sigma_1 \leq 5$ cm.

Pro zjištění přesnosti výsledného modelu je třeba uvážit vliv zaměření vlíčovacích bodů, přesnost skenování, registrace dat a vlastního vyhodnocení.

Elektronická totální stanice TC 1700, již bylo vlíčovací body polohově i výškově zaměřeny, má tyto charakteristiky přesnosti:

- směrodatná odchylka měřeného úhlu $\sigma_\omega = 0,5$ mgon
- směrodatná odchylka měřeného úhlu $\sigma_d = 2 + 2$ ppm

Přesnost polární metody je vyjádřena směrodatnými odchylkami v jednotlivých souřadnicích:

$$\sigma_x = \sqrt{\cos^2 \omega \cdot \sigma_d^2 + d^2 \cdot \sin^2 \omega \cdot \sigma_\omega^2} \qquad \sigma_y = \sqrt{\sin^2 \omega \cdot \sigma_d^2 + d^2 \cdot \cos^2 \omega \cdot \sigma_\omega^2}$$

Výškové měření bylo provedeno trigonometricky, směrodatná odchylka výšky je dána vztahem: $\sigma_h = \sqrt{\cot^2 g^2 z \cdot \sigma_d^2 + \frac{d^2}{\sin^4 z} \cdot \sigma_z^2}$, kde $\sigma_z = \frac{\sigma_\omega}{\sqrt{2}}$ (pro zenitový úhel měřený v jedné poloze).

Je třeba vzít v úvahu nejméně příznivé hodnoty naměřených veličin (maximální délka 50 m, strmé záměry), potom $\sigma_x \cong 3$ mm, $\sigma_y \cong 3$ mm a $\sigma_h \cong 2$ mm.

Přesnost zaměření vlíčovacích bodů je charakterizována směrodatnou odchylkou prostorového určení bodu $\sigma_{VB} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_h^2} < 5 \text{ mm}$.

Výrobce LSS Cyrax 2500 udává apriorní směrodatnou odchylku prostorového určení bodu $\sigma_s \leq 6$ mm (při skenování do vzdálenosti 50 m).

Maximální oprava na vlíčovacím bodě při registraci skenů je $\sigma_R = 6$ mm a při vektorizaci byly zanedbávány prvky do 2 cm ($\sigma_v \leq 2$ cm).

Celková přesnost modelu je: $\sigma_2 = \sigma_{VB} + \sigma_s + \sigma_R + \sigma_v = 3,7$ cm. Z porovnání $\sigma_2 < \sigma_1$ plyne, že požadovaná přesnost byla dodržena.

4.2. UŽITÍ LSS CALLIDUS 1.1 A SOFTWARE LMS A REALWORKS

Jedním z cílů diplomové práce bylo zaměřit část mostu pomocí LSS Callidus 1.1, vyhodnotit naskenovaná data a porovnat tyto výsledky s dokumentací pořízenou LSS Cyrax 2500. Tuto část diplomové práce jsem prováděla sama. Skener mi zapůjčila laboratoř fotogrammetrie Fsv. Během přípravných prací jsem se naučila ovládání skenovacího programu LMS, v terénu naskenovala zvolenou část mostu a zaměřila signalizované vlíčovací body. Veškeré práce spojené se skenováním v terénu však nemůže zvládnout jedna osoba. Využila jsem pomoci kolegů z firmy a Ing. Josefa Pazdery (z Fsv) při dopravě skeneru na Karlův most, přemísťování přístroje mezi stanovisky a při ochraně vlíčovacích bodů (hranolů) před turisty.

4.2.1. PRÁCE V TERÉNU

4.2.1.1. SKENOVÁNÍ

Měření proběhlo za slunného počasí dne 18. 3. 2005. Pro naskenování pravé části mostu mezi 13. a 14. pilířem byla zvolena 3 stanoviska a pomocí hranolů na stativěch signalizovány 4 vřícovací body. Rozmístění stanovisek je patrné z obrázku č. 4.5.

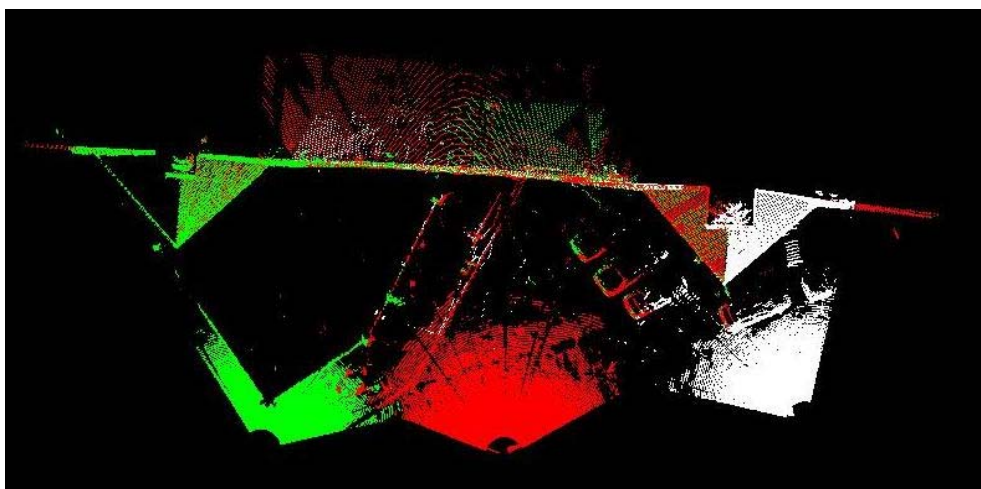


Obr. č. 4.4: Přenos skeneru Callidus mezi jednotlivými stanovisky skenování

Všechny skeny byly pořízeny se stejnými parametry:

- pracovní dosah 80 m
- přesnost skenování $\sigma \leq 10$ mm (dle výrobce LSS Callidus 1.1)
- hledání hranolů s rozlišením $0,125^\circ$
- doskenování hranolů s rozlišením $0,0625^\circ$
- rozlišení skenu $0,25^\circ \times 0,25^\circ$
- oblast skenování v horizontální rovině $0^\circ - 150^\circ$ a ve vertikální rovině $20^\circ - 60^\circ$
- videokamera byla vypnuta
- čas skenování jednoho skenu cca 20 minut

Při vyhledávání hranolů skener našel i mnoho jiných objektů, které vykazovaly vysokou odrazivost (např. informační tabule, odrazky vozidel). Všechny tyto objekty byly naskenovány s vyšším rozlišením a měření zaznamenána do souboru. Bylo třeba vyselektovat měření odpovídající hranolům.



Obr. č. 4.5: Rozmístění stanovisek při skenování LSS Callidus1.1

4.2.1.2. ZAMĚŘENÍ VB

Stejně jako v předchozím případě byly vřícovací body zaměřeny elektronickou totální stanicí TC 805L fy. Leica (v. č. 502457) s připojením na body účelového bodového pole.

4.2.2. REGISTRACE

Naskenovaná data mají formát, který program RealWorks nepodporuje, proto byla nejprve otevřena v programu 3D-Extractor a vyexportována do vhodného formátu (ASCII soubor ve formátu X, Y, Z). Jelikož program RealWorks není plně kompatibilní se skenerem Callidus, nedokáže identifikovat naskenované hranoly. Proto byly v 3D-Extractor ještě zjištěny naměřené směry a délky na jednotlivé hranoly a z těchto hodnot pomocí prostorové polární metody (viz. obr. č. 2.4) v programu Excel vypočteny souřadnice jejich středů v místních systémech skenů (viz. tab. č. 4.1).

sken č.	číslo VB	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	2	5,84	20,66	0,09
	3	7,45	8,09	0,14
2	1	22,23	10,22	7,95
	2	10,99	5,95	-0,16
	3	14,36	-6,27	-0,14
3	2	16,69	3,37	-0,45
	3	26,61	-4,50	-0,35

Tab. č. 4.1: Souřadnice VB v místních systémech jednotlivých skenů

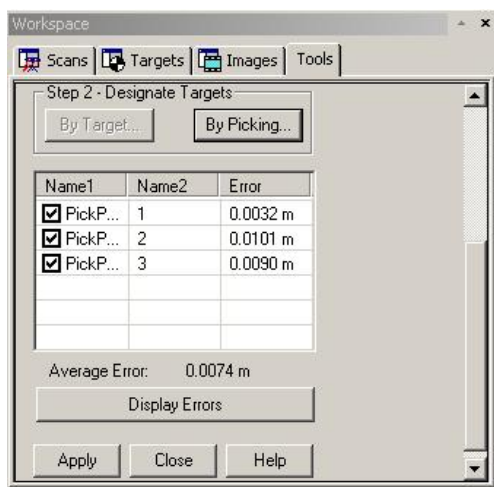
Textové soubory obsahující souřadnice všech bodů mračen, včetně vlíčovacích bodů, byly nainportovány do programu RealWorks Pro Version. Program umožňuje současně registrovat jen dvě mračna bodů, proto byla mračna nejprve postupně zaregistrována do místního systému a až poté transformována do S-JTSK a Bpv. Jak je patrné z tab. č. 4.1, ačkoliv byly signalizovány 4 vlíčovací body, sken č. 2 je jediným, který obsahuje alespoň 3, proto byl zvolen za referenční. K němu bylo nejprve připojeno stanoviště č. 1 a k nově vzniklému mračnu ze stanic č. 1 a č. 2 poté spojeno stanoviště č. 3. Registrace v obou případech byla provedena se střední chybou (tj. průměrnou vzdáleností bodů z podobných částí mračen) $\sigma_0 = 70$ mm.

Takto spojené skeny byly pomocí vlíčovacích bodů natransformovány do S-JTSK a Bpv s průměrnou chybou transformace $\sigma_0 = 7$ mm. Souřadnice VB jsou uvedeny v následující tabulce.

číslo VB	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	1042935,13	743746,86	197,85
2	1042925,23	743759,84	189,76
3	1042919,92	743771,33	189,87

Tab. č. 4.2: Souřadnice VB v S-JTSK a Bpv

Jelikož byl při transformaci použit minimální počet vřícovacích bodů, nedošlo k vyrovnání a nedalo se zjistit, zda při zaměření některého z VB nedošlo k nahodilé chybě. Odchyłky na jednotlivých vřícovacích bodech znázorňuje následující obrázek.



Obr. č. 4.6: Chyby na VB při transformaci do S-JTSK

Porovnání mračen bodů (z LSS Cyrax 2500 a LSS Callidus) pomocí příčných řezů poukazovalo na chybnou registraci mračen bodů získaných LSS Callidus (více viz. kapitola 5.3). Zaměřené vřícovací body nakonec nebyly použity a mračno bodů bylo ještě jednou zaregistrováno na lomové body konstrukce mostu. Jejich skutečné souřadnice byly odečteny z drátového modelu vytvořeného na základě mračna bodů z LSS Cyrax 2500. Původní i nové souřadnice vřícovacích bodů obsahuje následující tabulka.

	původní (LSS Callidus)			nové (LSS Cyrax 2500)		
číslo VB	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]
101	1042934,56	743746,43	194,83	1042934,59	743746,33	194,83
102	1042933,01	743750,22	191,71	1042932,96	743750,20	191,63
103	1042923,11	743773,07	194,19	1042923,27	743773,06	194,00
104	1042921,20	743772,34	192,79	1042921,31	743772,31	192,58
105	1042920,20	743774,77	192,76	1042920,32	743774,83	192,55
106	1042922,11	743775,61	194,20	1042922,26	743775,63	194,02
107	1042920,51	743778,99	191,51	1042920,63	743779,04	191,32

Tab. č. 4.3: Souřadnice VB v S-JTSK a Bpv

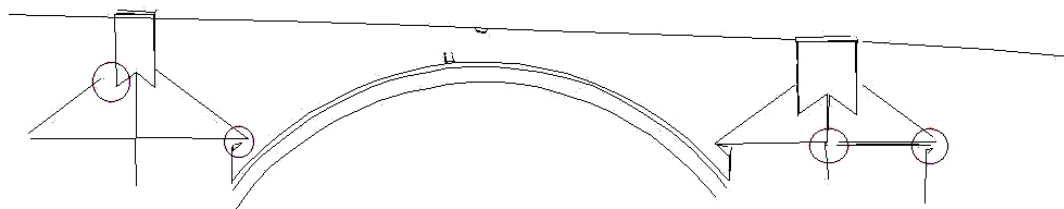
Tabulka č. 4.4 znázorňuje chyby při transformaci na jednotlivých vřícovacích bodech. Ve sloupci č. 2 jsou uvedeny směrodatné odchylky (σ_1) při užití všech VB, sloupec č. 3 obsahuje chyby (σ_2) po vypuštění bodů s odchylkami výrazně překračující průměrnou hodnotu ($\sigma_0 = 64$ mm).

číslo VB	σ_1 [mm]	σ_2 [mm]
101	82	----
102	63	16
103	102	----
104	92	----
105	49	28
106	9	38
107	52	29
σ_0 [mm]	64	15

Tab. č. 4.4: Chyby na VB při transformaci

4.2.3. ZPRACOVÁNÍ

Po umístění mračna do S-JTSK následovalo vytvoření drátového 3D modelu. Segmentací byly separovány jednotlivé plochy a na okrajové body těchto ploch pomocí snapu nakresleny linie. Naskenované mračno obsahuje „slepá“ místa, protože některé hrany nebyly naskenovány celé. Jelikož program neumožňuje kreslení mimo body mračna, nejsou tyto linie v kresbě dotažené (viz. obr. č. 4.7).



Obr. č. 4.7: Kresba drátového modelu v RealWorks

Takto vytvořený model byl exportován do formátu *.DGN, otevřen v programu Microstation V8, v něm dostal drátový 3Dmodel svou konečnou podobu. Poté byl model použit jako podklad pro půdorys a nárys. Veškeré 2D výstupy jsou uvedeny v *příloze č. 3*, 3D model části mostu je pouze v digitální podobě na přiloženém CD.

4.2.4. PŘESNOST VÝSTUPŮ

Pro zjištění přesnosti výsledného modelu je třeba uvážit vliv zaměření vřícovacích bodů, přesnost skenování, registrace dat a vlastního vyhodnocení.

Vřícovací body byly zaměřeny stejnou totální stanicí jako v předchozím případě. Přesnost zaměření vřícovacích bodů je charakterizována směrodatnou odchylkou prostorového určení bodu $\sigma_{VB} \leq 0,5 \text{ cm}$ (viz. kapitola 4.1.4).

Vlastní skenování systémem Callidus 2500 je pro vzdálenosti do 32 m charakterizováno apriorní směrodatnou odchylkou prostorového určení bodu $\sigma_S \leq 1 \text{ cm}$ (uvedeno výrobcem LSS Cyrax 2500).

Maximální oprava na vřícovacím bodě při registraci skenů je $\sigma_R = 3,8 \text{ cm}$. Přesnost vykreslení linií při vektorizaci $\sigma_V \leq 3 \text{ cm}$ (vzhledem k nižší hustotě mračna).

Celková přesnost modelu je: $\sigma = \sigma_{VB} + \sigma_S + \sigma_R + \sigma_V = 8,3 \text{ cm}$.