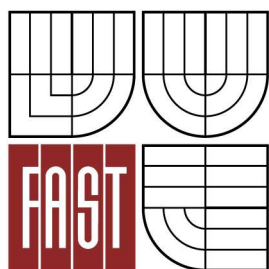




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV GEODÉZIE

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF GEODESY

# VYUŽITÍ FOTOGRAMMETRIE PRO DOKUMENTACI HISTORICKÝCH MĚŘIDEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. ZDENĚK CHARVÁT

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ BUREŠ, Ph.D.

BRNO 2012



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3646 Geodézie a kartografie
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3646T003 Geodézie a kartografie
<b>Pracoviště</b>	Ústav geodézie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. ZDENĚK CHARVÁT
<b>Název</b>	Využití fotogrammetrie pro dokumentaci historických měřidel
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	30. 11. 2011
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	25. 5. 2012
V Brně dne 30. 11. 2011	

.....  
doc. Ing. Josef Weigel, CSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

- HANZL, V.: M01-Teoretické základy fotogrammetrie. Elektronická studijní opora k předmětu M01-Teoretické základy fotogrammetrie, VUT v Brně, 2007
- LINDER, W. 2006. Digital Photogrammetry. A Practical Course. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 214 p.
- TŘASÁK, P, ŠTRONER, M.: Robustní metody vyrovnání. Geodetický a kartografický obzor č.7/2011, str. 156 - 165, Český úřad zeměměřický a katastrální, 2011, ISSN 0016-7096
- SINGELS, W. An Application of Photogrammetry in the Petrochemical Industry. Master Thesis, University of Stellenbosch, South Africa, 2008
- MARČIŠ, M., FRAŠTIA, M.: Fotogrametrická dokumentácia ruín pamiatkových objektov. In Juniorstav 2011 Sborník anotací : 13. Odborná konference doktorského studia, Brno, 4.2.2011. Vysoké učení technické v Brně - Fakulta stavební, 2011, ISBN 978-80-214-4232-0.
- MARČIŠ, M., FRAŠTIA, M.: Measuring the Deformations of Steel Column Using Convergent Photogrammetry. In IN GEO 2011 : 5th International conference on engineering surveying. Brijuni, Croatia, 22.-24.9.2011. Zagreb: University of Zagreb, 2011, s. 211--218. ISBN 978-953-6082-15-5.
- BUREŠ, J., Setting Up of Robot Welding Line for Car Bodies at BMW factory in Oxford UK., příspěvek na konferenci IN GEO 2004 Proceedings of the 3rd International FIG Conference on Engineering Surveying, ISBN 87-90907-34-5, International Federation of Surveyors, 2004, Bratislava, 2004
- Dokumentace software PhotoModeler.

## **Zásady pro vypracování**

Navrhněte a realizujte vhodný postup zpracování fotogrammetrické dokumentace vybraných technických artefaktů historických měřidel. Proveďte kalibraci použité kamery, pořídte měřické snímky, navrhněte a vykonejte postupy s cílem metrologické kalibrace artefaktu, zpracování jeho dokumentace a modelové vizualizace. Analyzujte přesnost variantních postupů a zhodnoťte výsledky.

## **Předepsané přílohy**

.....

Ing. Jiří Bureš, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

**Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá návrhem a realizací vhodného postupu zpracování fotogrammetrické dokumentace vybraných technický artefaktů historických měřidel. Práce se zabývá zjištěním nejvhodnějšího způsobu vyhodnocení kalibrace použité kamery pro metrologickou dokumentaci artefaktu, zpracováním, jeho dokumentací a modelovou vizualizací.

**Klíčová slova**

blízká fotogrammetrie, kalibrace kamery, digitální model, optický korelační systém, historické měřidlo, PhotoModeler Scanner, SketchUp, Geomagic Studio

**Abstract**

This diploma thesis describes the design and implementation of appropriate procedure photogrammetry processing of technical documentation of selected historical artifacts gauges. This thesis deals with finding the most suitable evaluation of the calibration of the camera used for metric artifacts documentation, processing documentation and model visualization.

**Keywords**

close photogrammetry, calibration camera, digital model, optical correlation system, historical gauge, PhotoModeler Scanner, SketchUp, Geomagic Studio

### **Bibliografická citace VŠKP**

CHARVÁT, Zdeněk. *Využití fotogrammetrie pro dokumentaci historických měřidel*. Brno, 2012. 58 s., 27 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce Ing. Jiří Bureš, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25.5.2012

.....  
podpis autora

**Poděkování:**

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Burešovi, Ph.D. za cenné rady a za vstřícný přístup při vedení mé práce i pomoc při snímkování. Rád bych poděkoval také Ing. Petru Cikrlemu, Ph.D. za doporučení objektů ke zpracování a poskytnutou literaturu.

V Brně dne 25.5.2012

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>1. CÍL PRÁCE .....</b>	<b>10</b>
<b>2. PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....</b>	<b>11</b>
2.1. DĚLENÍ FOTOGRAMMETRIE .....	12
2.2. VYBRANÉ APLIKACE BLÍZKÉ FOTOGRAMMETRIE .....	12
<b>3. SOUČASNÉ PARAMETRY A VLASTNOSTI DSLR.....</b>	<b>14</b>
3.1. ZÁKLADNÍ POJMY .....	14
3.1.1. <i>Senzor</i> .....	15
3.1.2. <i>Ohnisková vzdálenost</i> .....	15
3.1.3. <i>Expozice</i> .....	16
3.1.4. <i>Formát záznamu snímku</i> .....	17
3.2. OPTICKÉ VADY OBJEKTIVU .....	17
<b>4. FOTOGRAMMETRICKÉ METODY, PŘESNOST A POUŽITÉ VYBAVENÍ .....</b>	<b>19</b>
4.1. POUŽITÉ FOTOGRAMMETRICKÉ METODY .....	19
4.1.1. <i>Centrální projekce v prostoru</i> .....	19
4.1.2. <i>Průřeková fotogrammetrie</i> .....	20
4.1.3. <i>Robustní vyrovnání</i> .....	20
4.1.4. <i>Přesnost blízké fotogrammetrie</i> .....	21
4.1.5. <i>Optické korelační systémy</i> .....	22
4.1.6. <i>Princip obrazové korelace</i> .....	22
4.2. POUŽITÉ PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ.....	23
4.2.1. <i>Neměřičská digitální kamera Nikon D7000</i> .....	23
4.2.2. <i>Objektiv Nikon 16-85 mm F 3,5-5,6 G AF-S DX ED VR</i> .....	24
4.2.3. <i>Kalibrační normály</i> .....	24
4.2.4. <i>Ostatní příslušenství</i> .....	25
4.3. POUŽITÉ PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....	26
4.3.1. <i>Zoner Photo Studio 13</i> .....	26
4.3.2. <i>PhotoModeler Scanner V6 (PMS)</i> .....	26
4.3.3. <i>Adobe Photoshop CS5</i> .....	27
4.3.4. <i>Google SketchUp 7.2</i> .....	27
4.3.5. <i>Geomagic studio 10</i> .....	27
<b>5. FOTOGRAMMETRICKÉ PRÁCE.....</b>	<b>28</b>
5.1. TESTOVÁNÍ PARAMETRŮ POTŘEBNÝCH PRO SNÍMKOVÁNÍ .....	28
5.1.1. <i>Nastavení kamery</i> .....	28
5.1.2. <i>Konfigurace snímků</i> .....	29
5.1.3. <i>Opakovatelnost vyhodnocení a zjištění změny PVO</i> .....	30
5.1.4. <i>Výběr fotogrammetrických terčů</i> .....	30
5.2. KALIBRACE KAMERY .....	32
5.2.1. <i>Kalibrační pole</i> .....	33



5.2.2.	<i>Postup kalibrace kamery v programu PMS</i> .....	33
5.3.	GEODETICKÉ ZAMĚŘENÍ .....	35
5.3.1.	<i>Určení součtové konstanty elektronického dálkoměru</i> .....	35
5.3.2.	<i>Geodetické zaměření vlícovacích bodů</i> .....	35
5.4.	VYHODNOCENÍ PŘESNOSTI KALIBRACE POUŽITÉ KAMERY .....	36
5.5.	REALIZACE SNÍMKOVÁNÍ .....	37
5.5.1.	<i>Loket a motovídko v Moravské Třebové</i> .....	37
5.5.2.	<i>Loket v Kyjově</i> .....	38
5.5.3.	<i>Loket v Litomyšli</i> .....	39
5.5.4.	<i>Krejčovský metr</i> .....	39
5.5.5.	<i>Hrobní míra v Litovli</i> .....	40
<b>6.</b>	<b>VYHODNOCENÍ MODELŮ VYBRANÝCH HISTORICKÝCH MĚŘIDEL</b> .....	<b>41</b>
6.1.	ZPRACOVÁNÍ A VÝBĚR VHODNÝCH SNÍMKŮ .....	41
6.2.	POSTUP ZPRACOVÁNÍ V PROGRAMU PHOTOMODELER (PMS) .....	41
6.3.	TVORBA MODELU POMOCÍ OPTICKÉ KORELACE .....	43
6.4.	MODELOVÁNÍ A VIZUALIZACE ARTEFAKTŮ V PROGRAMU SKETCHUP .....	44
6.5.	ZPRACOVÁNÍ MRAČEN BODŮ V PROGRAMU GEOMAGIC STUDIO 10 .....	45
6.6.	VÝHOTOVENÍ DOKUMENTACE HISTORICKÝCH MĚŘIDEL .....	47
<b>ZÁVĚR</b> .....		<b>49</b>
<b>POUŽITÉ ZDROJE</b> .....		<b>51</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....		<b>53</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....		<b>54</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....		<b>56</b>
<b>OBSAH DISKU DVD</b> .....		<b>57</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....		<b>58</b>



## ÚVOD

V České republice se nachází mnoho velice cenných historických památek a artefaktů. O mnohé z nich není nijak zvlášť pečováno a není divu, že se na nich projevuje zub času. Tato práce je vztažena jen na velice úzkou historickou stopu měřidel v českých zemích, a to především na délkovou jednotku loket.

V současné době bereme jednotky měření jako samozřejmost, ale v dobách minulých byly míry jednoduché a nejednotné. Míry se odvíjely např. od některých částí těla (loket, palec, stopa, aj.). Délková jednotka loket je používána již od starověku, její existence je doložena v Egyptě, Mezopotámii, Perské říši, Řecku i dalších zemích. Díky své jednoduchosti a potřebě pouhé vlastní paže se loket k měření začal používat nezávisle na sobě v různých oblastech světa. Ve středověku bylo velmi častým jevem, že každá země a i každé větší obchodní město mělo svoji vlastní délku loktu. Proto se stalo zvykem, že na náměstích býval kov o délce loktu zazdíván pro případné spory obchodníků.

V českých zemích byl loket zaveden roku 1268 nařízením krále Přemysla Otakara II. o tzv. obnovení měr a vah. Postupně se tato jednotka rozšířila do různých měst. Jako významné lokty jsou často uváděny loket český, pražský, moravský, olomoucký a slezský. Těchto měřidel se nedochovalo mnoho a tato práce je věnována jejich kompletní dokumentaci, tedy zjištění skutečného rozměru lokte a vyhotovení jejich modelu.

S nástupem moderních digitálních kamer (fotoaparátů) je snaha o jejich využití v oblasti pozemní fotogrammetrie při tvorbě prostorových modelů, fotoplánů nebo v architektuře, archeologii a mnoha dalších oblastech. Protože etalony měřidel jsou pevně uchycené ve zdech a jejich vyjmutí by způsobilo změnu jejich délky v důsledku pnutí, je fotogrammetrie ideální metodou pro jejich vyhodnocení. Hlavní část práce je věnována správné funkčnosti fotogrammetrického vyhodnocení. Následuje část popisující snímkování a nakonec modelování a vizualizace měřidel.

Pro získání skutečného rozměru měřidel byly pro tento účel vytvořeny dva speciální kalibrační normály. Ty jsou pilířem fotogrammetrického vyhodnocení v této práci. Jejich použitím v terénu odpadá nutnost geodetického zaměření vlíčovacích bodů. Práce v terénu jsou tak rychlejší a díky umístěným kódovým značkám na normálech je pohodlnější i vyhodnocení.



## 1. CÍL PRÁCE

Tato práce se zabývá metodou blízké fotogrammetrie a jejím využitím pro zpracování podrobné dokumentace vybraných technických artefaktů historických měřidel. Cílem práce tedy bylo navrhnout a realizovat vhodný postup pro tuto dokumentaci. Jedná se o provedení kalibrace použité kamery, zajištění funkčnosti všech atributů potřebných pro snímkování, pořízení měřických snímků v terénu a jejich zpracování pro metrologickou kalibraci artefaktu. Jako hlavní cíl práce je vyhotovení dokumentace jednotlivých měřidel a jejich modelové vizualizace. Závěrem je pak analýza přesnosti a zhodnocení variantních postupů.



## 2. PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Samotný obor fotogrammetrie je stále se rozvíjejícím odvětvím. Jde o měření na fotografických snímcích a jeho zpracování. Za základní princip fotogrammetrie je možné uvést středové promítání, snímky pak můžeme s určitou přesností považovat za centrální projekci prostorových objektů. Cílem fotogrammetrie je tedy rekonstrukce tvarů, měření rozměrů a určení polohy předmětů, které jsou zobrazeny na fotografických snímcích. Za základní směry fotogrammetrie můžeme považovat pozemní, leteckou a družicovou fotogrammetrii. Jako vývojové fáze fotogrammetrie lze zmínit analogovou, analytickou a digitální. V současné době se analogové nebo analytické vyhodnocení používá jen ojediněle, ve většině případů probíhá snímkování i vyhodnocení pomocí digitálních technologií. Spolu s jejich rozvojem se této metody využívá stále častěji v mnoha oblastech lidské činnosti. Vedle uplatnění v oboru geodézie a kartografie se jedná ve většině případů o tyto aplikace: [1][2]

- stavebnictví - dokumentační účely, podklady pro rekonstrukce, měření deformací staveb a jejich částí,
- památková péče - dokumentace budov a historických předmětů,
- zemědělství - sledování osevních plánů, sklony a expozice svahů,
- lesnictví - mapy porostu, postup těžby, kalamity,
- vodní hospodářství - vyhodnocení digitálního modelu terénu, modelování povodí, rozsah záplav,
- strojírenství - proměřování výrobků přesného strojírenství, sledování přesnosti montáže dílů,
- medicína - sledování rehabilitačních výsledků, plastická chirurgie, zubní aplikace, pohybová studie,
- antropologie,
- kriminalistika - dokumentace dopravních nehod,
- ekologie - sledování skládek, znečištění,
- design - určování modelů a tvarů,
- archeologie - dokumentace a vyhotovení modelů.

Digitální fotogrammetrie nabízí řadu výhod, mezi největší patří rychlost pořízení dat, snímkování je bezdotykové, což je např. pro archeologii často nezbytné. Jako další výhodu lze zmínit i snadné ukládání dat a opětovné vyhodnocení.



## 2.1. Dělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie se během svého vývoje rozdělila na různé typy podle metod pořízení i vyhodnocení snímků. V různých částech světa je dělena odlišně. Klasická evropská fotogrammetrie se dělila na pozemní a leteckou, technologicky se jednalo o různé postupy. V současné době nemá toto dělení přílišné opodstatnění, jelikož všechny typy se dnes řeší podobnou technologií a často i na stejném zařízení. V několika posledních letech se situace změnila se vznikem kvalitních digitálních fotoaparátů. Pozemních aplikací přibývá a vznikají samostatné programy či specializované moduly pro pozemní aplikace. V současné době lze fotogrammetrii dělit podle [2]:

- polohy stanoviště - pozemní, blízká, letecká, družicová,
- počtu a konfigurace vyhodnocovaných snímků - jednosnímková, vícesnímková,
- technologického způsobu zpracování - analogové, analytické, digitální,
- typu výstupu - grafické, číselné (numerické).

Podle uvedeného rozdělení se tato práce zabývá řešením pozemní vícesnímkové digitální fotogrammetrie s grafickým výstupem.

## 2.2. Vybrané aplikace blízké fotogrammetrie

Uvedené příklady aplikací slouží pro představu v jakých konkrétních případech lze využít fotogrammetrii.

Jednou z aplikací je např. zjištění deformací ocelové konstrukce použitím konvergentní fotogrammetrie. Protože měření deformací konstrukce v zátěžovém testu vyžaduje často výsledky na 0,01 - 0,1mm, použití klasických geodetických metod je problematické. Tuto práci řešil Marciš M. a Fraštia M. z STU v Bratislavě. Konstrukce byly vystaveny tlaku 240 kN/m<sup>2</sup>. Během této nevratné opera konstrukce bylo nutné zjistit deformace na 38 místech, kde byly umístěny terče. Jednotlivé body byly určeny s přesností 0,1mm a to ze vzdálenosti kamery 1,5 m od objektu. [16]

Způsob využití fotogrammetrie jako metody oproti laserovému skenování popisuje Chlepková, M. z STU v Bratislavě. Konkrétněji jde o využití digitální fotogrammetrie v procesu testování ostění dílců tunelu při požáru. Hlavním cílem je zaměřit stavební díl před a po testu. Pomocí tohoto vyhodnocení lze pak vybrat nejlepší typ tunelového ostění. Pak je možné předejít fatálním škodám na tunelu v případě požáru. [17]



Testování fotogrammetrie na velmi blízké vzdálenosti popisuje Marciš M. ve své práci o snímkování pro velmi blízké vzdálenosti, tj. snímkování objektů o rozměrech několika centimetrů s následným zpracováním s přesností 0,1 - 0,01mm. V práci je popsán vliv změny zaostření kamery a nastavení hloubky ostroty na vnitřní přesnost vyhodnocení. [18]

Jako speciální aplikaci fotogrammetrie je možné zmínit činnosti mapování při použití fotografie za pomoci dálkově ovládaného létajícího modelu. Aplikace uvedené metody je reakcí na poptávku po efektivním a rychlém sběru prostorových dat na menších plochách s geodetickou přesností. Využití RC leteckých modelů je možné pro přesné geodetické aplikace a speciální práce v oblastech archeologie, ochrany životního prostředí, dopravy a architektury. Snímky jsou pořizovány dálkově ovládanou digitální kamerou, připevněnou k RC modelu létávajícímu nad mapovanou oblastí ve výškách od 1 do 200m. Po rektifikaci a vyhodnocení jsou data podkladem pro rozličné prostorové analýzy. Metoda letecké fotogrammetrie přináší velice rychlou a přesnou trojrozměrnou lokalizaci sledovaných objektů.



### 3. SOUČASNÉ PARAMETRY A VLASTNOSTI DSLR

V následujících kapitolách budou popsány základní pojmy digitálního fotoaparátu DSLR (*Digital Single Lens Reflex*), funkčnost jednotlivých částí a možnosti nastavení jednotlivých parametrů. Protože se digitální fotoaparáty stále modernizují a zdokonalují, je této kapitole věnována zvláštní pozornost. Důraz je kladen především na části, které jsou důležité pro správné pořízení snímků z hlediska fotogrammetrie. Zkratky uvedené v této kapitole je možné nalézt v kapitole "*Seznam symbolů a zkratek*" na konci této práce. V této kapitole je čerpáno z [10].

#### 3.1. Základní pojmy

Samotný digitální fotoaparát se skládá ze dvou částí, a to těla a objektivu. Ústřední částí těla je u DSLR sklopné zrcátko. V klidové stavu, kdy se neexponuje, prochází světlo objektivem v jehož optickém středu je umístěna clona. Ta je v tomto klidovém stavu otevřena vždy na maximum, aby obraz v hledáčku byl co nejjasnější a umožnil tak dostatečné osvětlení senzorů v těle DSLR. Světlo dopadá na zrcátko, které je skloněno o  $45^\circ$ , a tím odráží světlo přes matnici do hledáčku.

Matnice (*Focus Screen*) je v principu průhledné či plastové plátno, na kterém se obraz promítne. V hledáčku je tedy možné vidět obraz stejný, jaký budeme fotografovat. To je jedna z hlavních výhod DSLR. Obraz vytvořený objektivem je převrácený, k jeho otočení slouží hranol (*Pentaprism*).

V hledáčku je umístěn i expoziční senzor, který měří množství dopadajícího světla a určuje expoziční hodnoty. Expozicí se budeme podrobněji zabývat v podkapitole 3.1.3. Součástí moderní DSLR je i AF (*Auto Focus*) umístěný za polopropustným hlavním zrcátkem, senzory AF vyhodnocují stupeň ostrosti obrazu. Z uvedeného vyplývá, že po celou dobu, kdy je možné obraz sledovat v hledáčku a kdy pracují expoziční i zaostřovací senzory, je hlavní obrazový senzor zakryt zrcátkem, ale i závěrkou umístěnou před obrazovým snímačem.

V okamžiku expozice (stisknutím spouště) se obě zrcátka sklopí, tím zastíní hledáček, clona v objektivu se uzavře na změřenou a nastavenou hodnotu a na nastavenou dobu se otevře i závěrka. Světlo tak dopadá na obrazový snímač, dokud se závěrka neuzavře. Senzor pak vyhodnotí obraz, tato část je podrobněji uvedena v kapitole 3.1.1.

Objektiv je základní příslušenství DSLR. Je to optická soustava, na které výrazně závisí spolu s rozlišením senzoru obrazová kvalita výsledného snímku. Z fotogrammetrického hlediska je podstatný počet pohyblivých optických částí. Čím méně pohyblivých optických částí objektiv obsahuje, tím stabilnější jsou prvky vnitřní orientace PVO.

### 3.1.1. Senzor

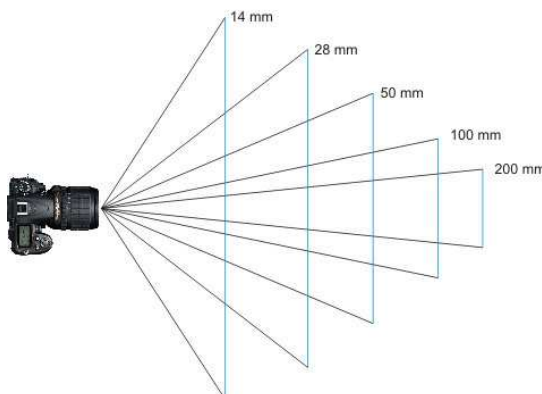
Jádrem DSLR je její senzor, v dnešní době se používají dva druhy, CMOS a CCD. Princip obou senzorů je totožný, každý pixel senzoru sbírá fotony na něj dopadajícího světla a tím měří intenzitu světla. Takto shromážděný náboj je potom ve formě elektronického napětí zesílen zesilovačem a převeden A/D převodníkem na digitální číslo k dalšímu zpracování. CMOS a CCD se liší především technologií výroby a způsobem sbírání informací z jednotlivých pixelů. Velmi podstatným parametrem fotoaparátu je velikost senzoru, čím bude větší, tím bude vyšší kvalita obrazu. Velký senzor nasbírá díky své ploše více světla, a tak je obraz kvalitnější s menším množstvím šumu. Typické velikosti senzorů se udávají jako poměr k velikosti kinofilmového políčka, tj. 36mm x 24mm. Standardní typy senzorů jsou uvedeny na obr.č. 1.



**Obr. č. 1.:** Senzor CCD a CMOS

### 3.1.2. Ohnisková vzdálenost

Ohnisko objektivu definuje zorný úhel, který objektiv přenese na senzor. Určuje tedy výřez scény, kterou budeme zaznamenávat. Objektivy se dělí do dvou základních skupin, a to s proměnným ohniskem a pevným ohniskem. V technických parametrech objektivů je uváděná hodnota ohniska při zaostření objektivu na nekonečno. Objektivy s pevnou ohniskovou vzdáleností jsou kvalitnější a mají větší světelnost, protože jejich konstrukční složitost a počet vzájemně pohyblivých částí je o řád menší než u objektivů typu zoom.



**Obr. č. 2.:** Úhel záběru při různé ohniskové vzdálenosti



### 3.1.3. Expozice

Správná expozice je jedním z klíčových faktorů pro získání kvalitního snímku. Expozici ovlivňují v zásadě tyto 3 faktory:

- Expoziční čas
- Clona
- ISO citlivost

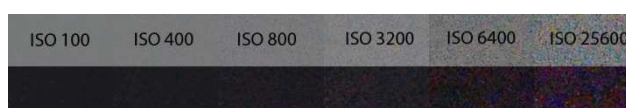
**Expoziční čas** je doba, po kterou světlo působí na senzor. Ten v zásadě počítá dopadající fotony světla, a tak logicky expoziční doba jejich počet (expozici) ovlivňuje. Expoziční časy je u standardních DSLR možné nastavit v rozmezí 15 - 1/2000 vteřiny. Určení vhodného expozičního času je pro tuto práci velmi důležité. Při fotografování bez stativu může špatně zvolený expoziční čas způsobit "rozhybání" snímku a tím se znemožní identifikace potřebných elementů na snímku při pozdějším zpracování. Pro delší expozice je tedy vždy vhodné použít stativ.

**Clona a clonové číslo** udává množství světla, které projde objektivem. Čím větší je průměr clony, tím více světla projde objektivem a dopadne na senzor. Označuje se např.  $f/2.8$ , kde  $f$  je ohnisková vzdálenost a 2.8 clonové číslo (podílem získáme průměr clony). Clona je zkonstruována z tenkých kovových lamel, které tvoří přibližně kruhový tvar (obr. č. 3).



**Obr. č. 3.:** Clona objektivu  $f/16$ ,  $f/8$ ,  $f/4$ ,  $f/2.8$

**Citlivost ISO** udává citlivost senzoru na světlo. Neovlivňuje funkčnost senzoru, ale zesílení výstupního signálu, který senzor opouští. Čím vyšší tedy bude toto zesílení, tím slabší signál bude třeba pro vyhodnocení. Typická základní stupnice ISO je 50, 100, 200, 400, 800, 1600. Současně se zvýšením ISO hodnoty narůstá nežádoucí obrazový šum, který je viditelný zejména v tmavých částech snímku. Vysoký šum se projeví rozpadem hran v obraze a celkovým snížením ostrosti snímku. Ukázka odlišného nastavení hodnoty ISO (obr. č. 4).



**Obr. č. 4.:** Nastavení různých hodnot ISO a způsobený šum

### 3.1.4. Formát záznamu snímku

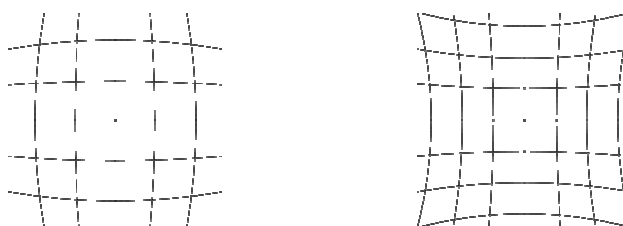
Záznam snímků je možný ve dvou základních formátech, nejpoužívanějším je formát JFIF (*JPEG File Interchange Format*), který používá příponu JPEG (*Joint Photographic Experts Group*). Tento formát využívá standardní metody ztrátové komprese pro ukládání snímků ve fotorealistické kvalitě. Nevýhodou je ztráta kvality za účelem menší velikosti souboru. Druhým formátem je RAW, surová data ze snímače digitálního fotoaparátu, která nebyla po přečtení z obrazového senzoru zpracována. Velkou výhodou je možnost provádět řadu velmi efektivních úprav před samotným vyvoláním do formátu JPEG v PC. V této práci je využíván formát RAW především pro korekci expozice a kontrastu snímku pro snadnější vyhodnocení.

## 3.2. Optické vady objektivu

**Barevná vada (chromatická aberace)** vzniká nestejným lomem světelných paprsků z důvodu jejich odlišné vlnové délky. Zejména na okrajích snímku se projeví výraznou fialovou nebo zelenou konturou na přechodech mezi vysokým jasnem a stínem. Barevná vada roste s prodlužováním ohniskové vzdálenosti

**Sférická vada** je způsobena paprsky, které procházejí objektivem a neslučují se v jednom bodě, ale vytvářejí kolem optické osy tzv. kaustickou plochu. Při této chybě se bod zobrazí jako malý rozptýlový kroužek.

**Zkreslení obrazu** je druh monochromatické vady, jedná se o vadu přenosu přímek. Tato vada bývá patrná zejména u objektivů s menší ohniskovou vzdáleností. Je nejvíce znatelná při snímkování geometrických objektů, sférické zkreslení pak způsobí deformaci přímek do tvaru soudku nebo podušky viz obr. č. 5.



**Obr. č. 5.:** Deformace zkreslení snímku (soudok, poduška)

**Koma** je vada čočky, kdy na čočku dopadá široký svazek paprsků, který není rovnoběžný s optickou osou. Pokud je dopadající svazek paprsků dostatečně široký, nezobrazuje se bod jako úsečka, ale vytváří v různě vzdálených rovinách od optické soustavy složité obrazce.



***Astigmatismus*** je vada, kdy při zobrazení roviny kolmé k optické ose dochází k tomu, že body v navzájem kolmých osách se nezobrazí ve stejné vzdálenosti. Astigmatismus také způsobuje rozdílné zobrazení, pokud paprsek dopadá na optickou soustavu kolmo nebo pod úhlem.

***Distorze objektivu*** souhrn zbytkových vad objektivu projevující se posunem obrazu bodu od jeho správné polohy v rovině snímku, distorze má radiální a tangenciální složku a výrazně se projevuje u objektivů, které nebyly primárně určeny pro fotogrammetrii.

## 4. FOTOGRAMMETRICKÉ METODY, PŘESNOST A POUŽITÉ VYBAVENÍ

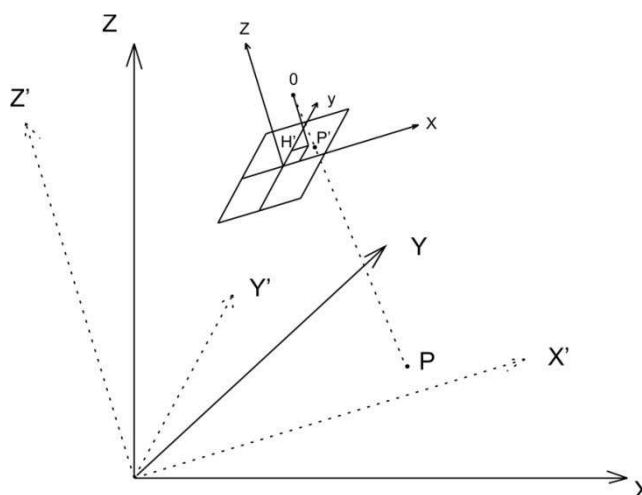
Následující kapitoly budou věnovány teoretickému základu fotogrammetrie, testování vhodného nastavení parametrů snímkování a zpracování kalibrace kamery.

### 4.1. Použité fotogrammetrické metody

Tato kapitola je zaměřena na teoretické základy fotogrammetrie jako vědního oboru a fotogrammetrických metod využitých při zpracování dokumentace historických měřidel. Pro vyhodnocení 3D modelů z obrazového materiálu bylo využito metody průsekové fotogrammetrie a optických korelačních systémů.

#### 4.1.1. Centrální projekce v prostoru

Snímky pro fotogrammetrické účely můžeme považovat s určitou přesností za centrální projekci prostorových objektů. Vztah mezi snímkovými ( $x, y, z$ ) a objektovými souřadnicemi bodu ( $X, Y, Z$ ) vyjadřuje podmínka kolinearity, tj. že bod na objektu a jemu odpovídající snímkový bod i projekční centrum leží na přímce. Vztah mezi použitými souřadnicovými systémy je zřejmý z obr. č. 6. [1]



**Obr. č. 6.:** Znáznornění centrální projekce v prostoru

Prvky vnitřní orientace  $x_0, y_0, c$  definují polohu projekčního centra ve snímkovém souřadném systému. Prvky vnější orientace  $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$  definují polohu a pootočení kamery (snímkového systému) v objektovém souřadnicovém systému (prvky vnitřní orientace jsou důkladněji popsány v kapitole 5.2.). Pomocí snímkových souřadnic a prvků vnitřní orientace je možné rekonstruovat trs paprsků



vycházejících z projekčního centra. Následně tento trs pomocí prvků vnější orientace orientujeme v objektovém systému. [1]

#### 4.1.2. *Průseková fotogrammetrie*

Průseková fotogrammetrie je jednou z nejstarších fotogrammetrických metod. V podstatě se jedná o geodetickou metodu protínání vpřed řešené pomocí snímků, jejichž osy záběru svírají konvergentní úhel. Princip současné fotogrammetrie je založen na základní fotogrammetrické rovnici:

$$X - X_0 = (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}c}{r_{13}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c},$$

$$Y - Y_0 = (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x' - x'_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}c}{r_{13}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}c}.$$

Z těchto rovnic je zřejmé, že není možné rekonstruovat prostorový objekt z jednoho snímku, protože pro každý snímkový bod existuje nekonečné množství řešení. Je tedy nutné mít pro výpočet druhý snímek nebo doplňkovou informaci o souřadnici Z. [2]

Veškeré fotografické práce tedy spočívají v pořízení vhodného počtu konvergentních snímků, které pokrývají snímáný objekt. Snímky musí mít dostatečný překryt s možností identifikace spojovacích bodů. Prostorové vyhodnocení lze provést ze dvou snímků bez kontroly, pomocí tří a více konvergentních snímků je možná kontrola a vyrovnání. [1][20]

#### 4.1.3. *Robustní vyrovnání*

V každém větším souboru měření se vyskytují hrubé i systematické chyby, které postihují 0,1 - 2% měření. Některé je možné snadno identifikovat a odstranit, ale vyskytují se i chyby, jejichž původ není znám a mohou ovlivnit výsledky vyrovnání. Metoda nejmenších čtverců (MNC) je všeobecně používanou metodou. Dobré výsledky poskytuje za předpokladu, že měřené veličiny obsahují jen chyby náhodného charakteru. V případě výskytu hrubých a systematických chyb nelze tyto chyby pomocí oprav jednoznačně identifikovat. Pro nalezení tzv. odlehlých měření, tj. měření zatížená hrubou nebo systematickou chybou jsou nejčastěji používány dva postupy.

První se nazývá "data snooping" a k vyhledání odlehlých měření používá normovaných oprav. Nevýhodou této metody je, že střední jednotkovou chybu  $\sigma_0$  ovlivňují odlehlá měření, váha měření musí být známa přesněji, než je potřeba pro vyrovnání, opravy jsou korelované a hrubé chyby mají vliv i na jiná měření. Výpočet je také nutné opakovat.

Nedostatky MNC vedly statistiky ke hledání metod, které jsou odolnější (robustnější) vůči odlehlým měřením. Experimenty prokázaly, že robustní odhady



dávají lepší výsledky než MNČ. Většina robustních vyrovnání používaných v geodézii upravuje existující MNČ tak, aby byla robustní. Při robustní MNČ se váha měření mění v každé iteraci pomocí váhové funkce  $p(v_i)$ . Často se používají exponenciální funkce, tzv. Dánská metoda. Odlehlá měření postupně získají větší opravu a tím menší váhu a tím se jejich vliv eliminuje. [1] [19]

#### 4.1.4. Přesnost blízké fotogrammetrie

Přesnost určení souřadnic bodů v blízké fotogrammetrii závisí na geometrických a negeometrických faktorech.

##### *Geometrické faktory*

- Velikost formátu a konstanty kamery, vzdálenost projekčního centra od objektu. Větší formát a větší měřítko snímku znamenají větší přesnost.
- Velikost úhlu protnutí paprsků. Optimální úhel protnutí je  $60^\circ$ .
- Počet a rozmístění vlíčovacích bodů. Pro případ nejvyšší přesnosti musí vlíčovací body obklopovat rovnoměrně celý prostor s objektovými body.
- Geometrie snímkování, nejvyšší přesnosti dosáhneme, když v blízké fotogrammetrii použijeme konvergentní snímkování z více stanovisek. Geometrie snímkování je předmětem testu v kapitole 5.

Pro odhad přesnosti souřadnice bodu při snímkování z více stanovisek se využívá vzorce, kde  $\sigma_p$  je očekávaná průměrná střední chyba,  $\sigma_x$  je chyba ve snímkové souřadnici,  $m_s$  je průměrné měřítko,  $k$  počet snímků na jednom stanovisku a  $q$  je konfigurační faktor.

$$\sigma_p = \frac{q\sigma_x m_s}{\sqrt{k}}, \quad \sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}.$$

Pro přibližné hodnoty, které budou použity v této práci ( $k = 1$ ,  $q = 0,5$ ,  $\sigma_x = 5\mu\text{m}$ ,  $m_s = 1250$ ) je  $\sigma_p = 0,16\text{ mm}$ .

##### *Negeometrické faktory*

- Matematický model pro odstranění systematických chyb, zejména pak zkreslení objektivu.
- Přesnost měřicího zařízení.
- Tvar (symetrie) a osvětlení bodů. U signalizovaných bodů se doporučuje symetrický terč jehož velikost je alespoň 5-10 pixelů.
- Počet snímků z jednoho stanoviska.



Hlavním faktorem omezující přesnost fotogrammetrických měření je zkreslení objektivu. Pro eliminaci tohoto zkreslení je často používán polynom ve tvaru:

$$\begin{aligned}dx_0(x, y) &= x(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2xy, \\dy_0(x, y) &= y(K_1r^2 + K_2r^4 + K_3r^6) + P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1xy.\end{aligned}$$

Koeficienty  $K_i$ ,  $P_i$  popisují radiální a tangenciální zkreslení objektivu a do vyrovnání jsou zahrnuty jako doplňkové parametry. [2]

#### **4.1.5. Optické korelační systémy**

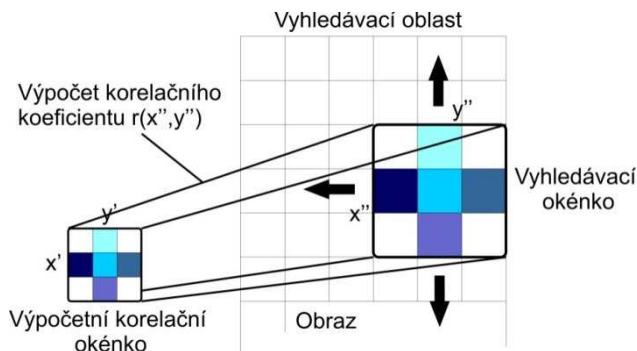
Optické korelační systémy, resp. optické skenování pracuje na principu obrazové korelace a výsledky jsou velmi podobné laserovému skenování. Tato metoda vyhodnocení byla použita u zvláště poškozených historických měřidel, kde nebyla možná jednoznačná identifikace hran. Pro tyto metody byl použit program PhotoModeler Scanner (PMS). Základem metody je pořízení dvou snímků, jejichž osy jsou rovnoběžné, nejlépe kolmé na vyhodnocovaný objekt. Doporučená délka základny je 1/3 - 1/8 vzdálenosti od objektu. S rostoucí základnou se zmenšuje podobnost snímků a pak se hůře korelují. Snímkované objekty musí mít také výraznou texturu. Proces zpracování v programu PMS je podrobně popsán v kap. 6.3. [11]

#### **4.1.6. Princip obrazové korelace**

Cílem obrazové korelace je nalezení bez zásahu zpracovatele polohu vzájemně si odpovídajících (homologických) bodů na dvou snímcích a získat tak jejich snímkové souřadnice. Každý bod má do jisté míry unikátní okolí, pomocí kterého lze identifikovat polohu homologického bodu na druhém snímku. Platí přitom, že čím větší je okolí bodu, tím vyšší je pravděpodobnost nalezení správného bodu. Zároveň se tím ale zvyšují nároky na výpočetní techniku a dobu výpočtu.

Jedná se o algoritmus, který hledá totožné body na dvojici snímků pořízených z jiného místa. Princip metody je, že každému bodu z jednoho snímku o souřadnicích  $x_P, y_P$ , je nalezeno posunutí  $i, j$ . Pro bod na druhém snímku o souřadnicích  $x_{P+i}, y_{P+i}$  tedy platí, že je obrazem téhož reálného bodu.

Technika vyhledání bodů spočívá ve zvolení tzv. vzorového okénka zahrnujícího dostatečné okolí bodu na jednom snímku. Ve známé nebo přibližné poloze je pak zvolena vyhledávací oblast na druhém snímku a v ní je vyhledáváno okénko stejné velikosti. Vyhledávací okénko se posunuje v přibližné oblasti bodu a porovnává korelační koeficient, tedy vzájemnou míru podobnosti s okénkem vzorovým. Princip je znázorněn na obrázku č. 7.



**Obr. č. 7.:** *Princip vyhledávání bodů optickým korelačním systémem*

Přesnost optické korelace závisí na kvalitě fotoaparátu, provedení kalibrace, kvalitě snímků, velikosti základny a na vzdálenosti od objektu. Velice důležitá je kvalita textury snímkaného objektu, jeho osvětlení a rozmístění orientačních bodů kolem něj. [11]

## 4.2. Použité přístrojové vybavení

Použité vybavení bylo voleno s ohledem na účel práce, tedy na snímky historických měřidel s dostatečným rozlišením a obrazovou kvalitou pro kvalitní vyhodnocení v programu PMS.

### 4.2.1. Neměřičská digitální kamera Nikon D7000

Pro veškeré snímkování potřebné k vyhodnocení všech objektů byla použita kamera DLSR Nikon D7000. Parametry této kamery jsou uvedeny v tabulce č. 1.



Nikon D7000	
Typ senzoru	CMOS
Počet pixelů	16,2 MP
Rozměr v pixelech	4928 x 3264
Rozměr senzoru	23,6 x 15,6 mm
Rychlost uzávěrky	30-1/8000 s
Rozsah ISO	100 - 6400
Velikost pixelu	4,8 $\mu$ m

**Obr. č. 8.:** *Tělo kamery Nikon D7000*

**Tab. č.1.:** *Základní parametry kamery D7000*



#### 4.2.2. Objektiv Nikon 16-85 mm F 3,5-5,6 G AF-S DX ED VR

Objektiv s proměnlivou ohniskovou vzdáleností v rozmezí 16 - 85 mm. Clonové číslo dosahuje hodnot 3,5 - 5,6. Během pořizování snímků byly funkce stabilizace vibrací (VR) a automatického ostření (AF) vypnuty z důvodu uchování stabilních prvků vnitřní orientace. Parametry objektivu jsou uvedeny v tabulce č. 2.



Objektiv Nikon 16-85mm	
Ohnisková vzdálenost	16 - 85 mm
Světelnost	3,6 - 5,6
Maximální clona	36
Min. zaostření	38 cm

**Obr. č. 9.:** Objektiv Nikon 16 - 85mm

**Tab. č.2.:** Základní parametry objektivu Nikon 16 - 85

#### 4.2.3. Kalibrační normály

V tomto případě reprezentuje kalibrační normál pevně stanovené rozměry a souřadnice bodů na něm umístěných. Normál je možné přenášet a přikládat ho ke snímkaným objektům, a tak určit objektové souřadnice modelu. Normál slouží pro přesné určení rozměrů zájmového objektu v terénu a při vyhodnocení pro poloautomatickou orientaci snímků pomocí umístěných kódových terčů.

Samotný kalibrační normál by měl v ideálním případě na snímcích obklopotvat zájmový objekt, v našem případě etalon historického měřidla, ale tím by byl normál použitelný jen do určitého rozměru, proto byl vyhotoven ve tvaru písmene "L". Na něm jsou pak umístěny tři různě vysoké trny s terči pro přesné vyhodnocení prostorových objektů. Ten pak musí být na snímcích doplněn terči tak, aby obklopovaly orientační body celý snímkaný objekt. Přímo pro tuto práci byly vytvořeny dva kalibrační normály:

- Jako materiál pro tvorbu normálu "A" (obr. č. 10) byl zvolen čtvercový profil z teplotně stabilní oceli. Je svařovaný a natřený bílým nátěrem proti korozi. Je na něm umístěno 14 bodů zaměřených geodeticky a 50 kódových terčů pro snadnější orientaci snímku.



**Obr. č. 10.:** Kalibrační normál "A" z oceli

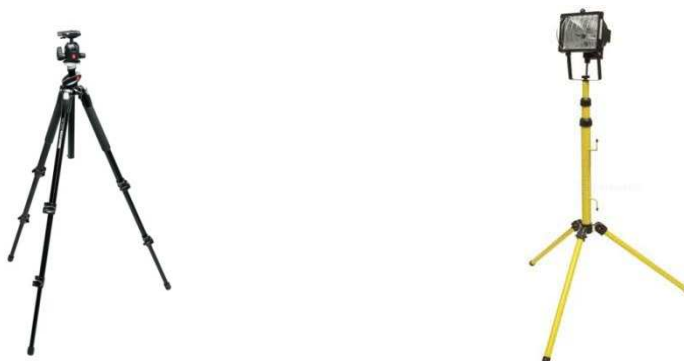
- Druhý kalibrační normál "B" (obr. č. 11) je vyhotoven z hliníkového obdélníkového profilu, a to pro jeho váhu a snadnější zavěšení na zeď u zájmového objektu. Je sestrojený pomocí ocelových svorek a bez nátěru. Je na něm umístěno 14 bodů zaměřených geodeticky a 52 kódových terčů. Tento normál je méně stabilní než ocelový, protože konstrukce je montovaná.



**Obr. č. 11.:** Kalibrační normál "B" z hliníku

#### 4.2.4. Ostatní příslušenství

Jako základní příslušenství byl zvolen stativ Manfortto. Stativ byl použit pro většinu pořízených snímků. Dosažením větší stability kamery během snímkování bylo možné nastavit vhodnější parametry expozice. Při testování vhodné konfigurace snímkování pro kalibraci byly použity montážní halogenové lampy viz. obr. č. 12.



**Obr. č. 12.:** Použitý stativ a montážní lampa

### 4.3. Použité programové vybavení

#### 4.3.1. Zoner Photo Studio 13

Většina snímků určených pro kalibraci kamery i pro vyhodnocení měřidel byly pořízeny ve formátu RAW viz. kap. 4.1.4. U některých snímků byla před vyvoláním do formátu JPEG upravena hodnota expozice, světla, stínů, kontrastu a vyvážení bílé. Úpravou snímků byla dosažena snadnější identifikace terčů kalibračního pole i bodů na snímkaných objektech v programu PMS. Vliv na výslednou kvalitu snímku a ostrost terčů je patrný na obr. č. 13.

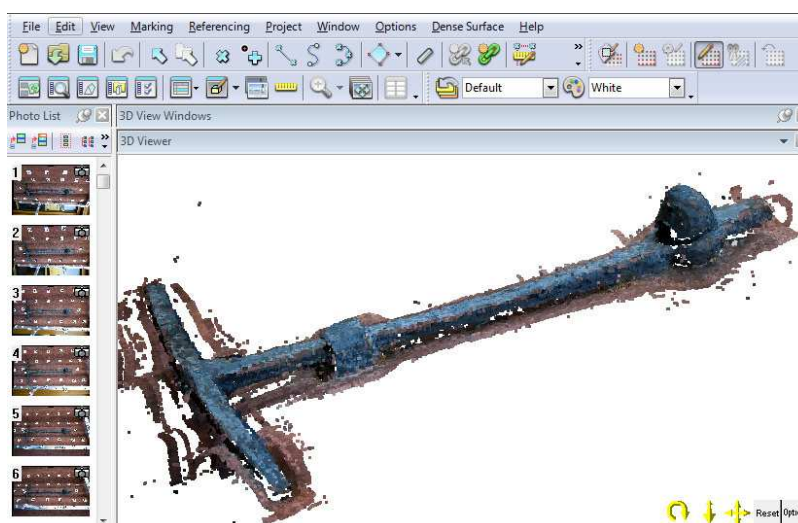


*Obr. č. 13.: Úprava špatného snímku programem Zoner Photo Studio 13*

#### 4.3.2. PhotoModeler Scanner V6 (PMS)

PhotoModeler je fotogrammetrický systém vyvinutý kanadskou společností Eos Systems Inc. určený k bezdotykovému 2D a 3D měření. Je založen na principech metody průřezové fotogrammetrie. Umožňuje získat mnoho údajů ze snímků daného objektu během krátké doby. Kombinuje snímky a umístění bodů v prostoru. Výsledkem je 3D model, který je možné exportovat do jiných grafických programů. [13]

Nadstavba s názvem Scanner obsahuje nástroje pro tvorbu mračen bodů a funkce pro jejich editaci. Nástroje pro zasítování a editaci mračna ale nejsou dostatečně schopny pokrýt všechny potřeby uživatele. Proto byl pro editaci mračen bodů využit program Geomagic Studio 10.



*Obr. č. 14.: Pracovní prostředí programu PhotoModeler Scanner*

#### 4.3.3. *Adobe Photoshop CS5*

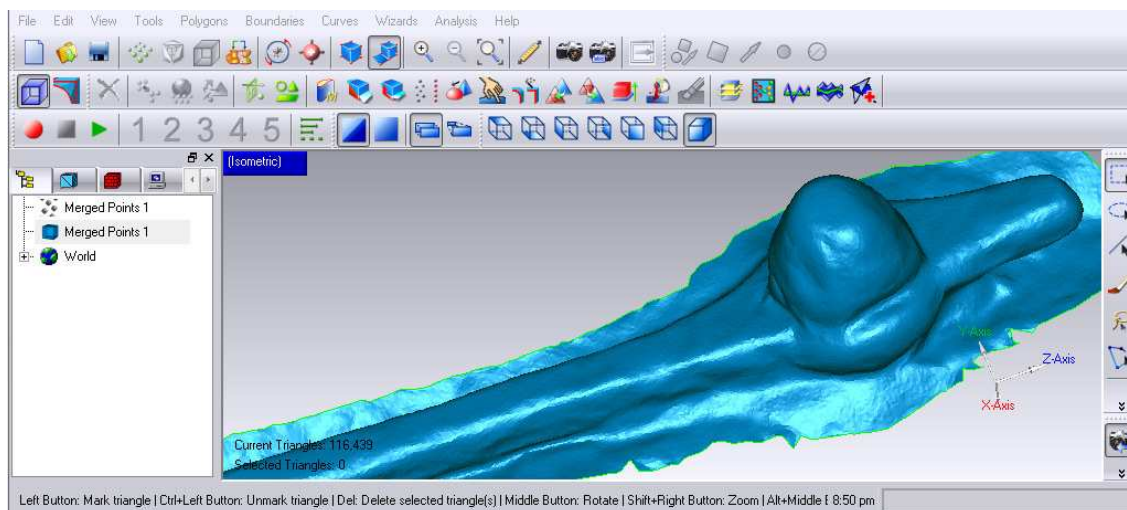
Tento program byl použit pro ořezávání a drobné úpravy nadbytečných částí snímků pořízených ve formátu JPEG. Ořezání nadbytečné části snímků je vhodné, pokud je na něm množství různorodé textury, která komplikuje automatické označení bodů v PMS. Program byl dále využit ke tvorbě dlaždic textur modelů.

#### 4.3.4. *Google SketchUp 7.2*

Jedná se o software, který je možné použít pro efektivní tvorbu a úpravu 3D modelů. Původním záměrem softwaru bylo poskytnout nástroj zaměřený na vytváření koncepční fáze designu. Schopnost zpracovávat požadovaný detail ukázala možnosti širokého využití v rozličných oborech.

#### 4.3.5. *Geomagic studio 10*

Tento software byl vyvinut americkou společností Geomagic, Inc. Umožňuje zpracovávat bodová mračna a nabízí množství funkcí k jejich úpravě a optimalizaci. Obsahuje nástroje pro automatickou redukci šumu, vyhledávání chyb, jejich opravu atd. Polygonovou síť je také možné různými způsoby zjednodušovat či vyhlazovat. Výsledný model je pak možné exportovat do standardních vektorových formátů (\*.wrp, \*.dxf, \*.3ds, aj.).



**Obr. č. 15.:** *Prostředí programu Geomagic Studio 10*

## 5. FOTOGRAMMETRICKÉ PRÁCE

Tato kapitola je rozdělena do tří částí, první se zabývá testováním parametrů snímkování, následuje postup při výpočtu kalibrace kamery a jako poslední je zmíněno geodetické zaměření vlíčovacích bodů na kalibračních normálech.

### 5.1. Testování parametrů potřebných pro snímkování

Před měřením bylo nutné zvážit mnoho aspektů, které mají vliv na výsledné vyhodnocení. Historická měřidla nemají velký rozměr, z toho důvodu bylo snímkování optimalizováno a přizpůsobeno na vzdálenost přibližně jednoho metru od pozice kamery. Většina testů proběhla v laboratoři B150 v areálu VUT FAST.

#### 5.1.1. Nastavení kamery

S ohledem na skutečnosti popsané v kap. 3, byly předmětem testování parametry, které ovlivňují výslednou kvalitu snímku nebo jeho zpracování.

Velmi důležité je správné nastavení expozice, tedy hodnot expozičního času, clony a hodnoty ISO. Expoziční čas by v ideálním případě měl být dost krátký na to, aby při snímkování z ruky nedocházelo k rozmazání snímku. Pokud takový expoziční čas není možné vzhledem k podmínkám focení nastavit, je třeba použít stativ. Clonové číslo má vliv na hloubku ostrosti snímků, která je žádoucí pro kvalitní vyhodnocení. Tato hodnota byla stanovena na nejméně  $F8$ . Vyšší citlivost ISO umožňuje vhodnější nastavení expozičního času a clony, ale tím se zvýší šum na snímku. Hodnotu ISO, pokud tedy lze, je třeba nastavit na co nejmenší hodnotu.

Během snímkování je nutné mít vypnutý stabilizátor obrazu a automatické ostření. Po celou dobu snímkování by měla být kamera zaostřena na konstantní vzdálenost. Použití blesku je možné využít při kalibraci kamery, ale při snímkování objektu je blesk nevhodný z důvodu odlesků.

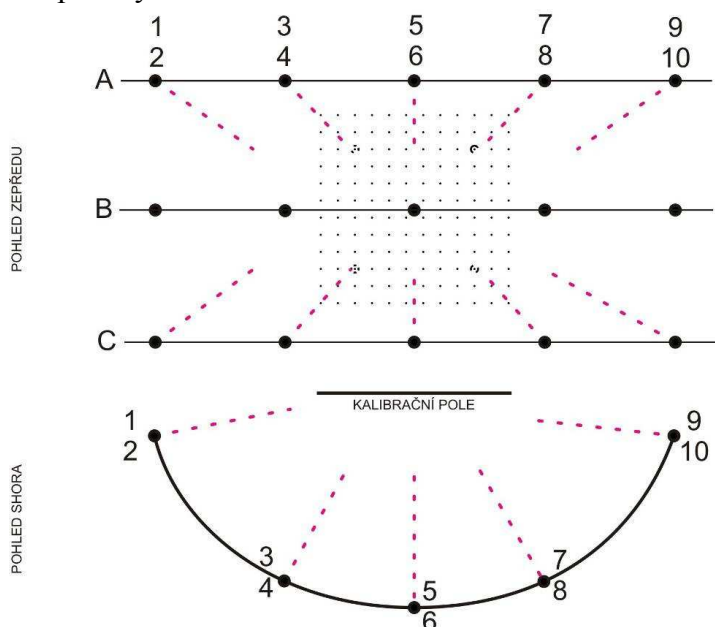
Jako formát ukládání snímků byl zvolen nekomprimovaný typ RAW, na kterém je možné korigovat některé parametry před jeho "vyvoláním" do formátu JPEG. Hodnoty nastavení kamery jsou uvedeny v tabulce č. 3.

Nastavení kamery	
Vzd. od objektu	max 1,3m
hodnota ISO	max 400
expoziční čas	min 1/30s (bez stativu) 1/2s (se stativem)
clonové číslo	min $F8$
Vyvážení bílé	auto
Formát záznamu	RAW

**Tab. č.3.:** Nastavení kamery pro snímkování

### 5.1.2. Konfigurace snímků

Tento test byl proveden za účelem zjištění, jaká konfigurace pozic snímkování objektu je nejvýhodnější. Je obecně známo, že optimální úhel protnutí je  $90^\circ$ , z hlediska identifikace bodů je ale vhodnější, aby úhel mezi osou terče a paprskem nebyl větší jak  $30^\circ$ . Nad kalibračním polem programu PhotoModeler, které simulovalo pozici objektu ve skutečnosti byla pořízena snímková sada o třiceti snímcích. Snímkováno bylo ve třech výškových úrovních nad pěti stanovisky ze vzdálenosti 0,85 m. V každé z těchto pozic byl pořízen vertikální i horizontální snímek. Pozice kamery jsou znázorněny na obr. č. 16. Ze snímkové sady bylo vybráno sedm konfigurací snímků a na každé z nich byla provedena kalibrace kamery v programu PMS (průběh kalibrace je podrobněji rozveden v kap. 5.2.). Program PMS doporučuje pro kalibraci 6 -12 snímků, méně než 6 snímků neposkytuje dostatečný počet nadbytečných veličin pro přesné určení PVO a naopak více jak 12 výpočet znehodnocuje. Schématické znázornění konfigurací je obsahem přílohy A1.



Obr. č. 16.: Schéma všech pozic snímkování

	Snímků	Snímky			Overall RMS	VL Overall RMS	Last error
		úroveň A	úroveň B	úroveň C	[px]	[mm]	
V_1	10	5,6	3,4,5,6,7,8	5,6	0,16	0,0903	1,307
V_2	10	3,4,7,8	5,6	3,4,7,8	0,247	0,046	2,012
V_3	12	1,2,5,6,9,10	x	1,2,5,6,9,10	0,309	0,0408	2,47
V_4	8	1,2,9,10	x	1,2,9,10	0,319	0,0523	2,676
V_5	12	3,4,7,8	3,4,7,8	3,4,7,8	0,234	0,0356	1,876
V_6	6	3,7	3,7	3,7	0,108	0,0575	0,943
V_7	8	5,6	3,4,7,8	5,6	0,149	0,0394	1,252

Tab. č.4.: Různé konfigurace snímků a jejich vyhodnocení





V tabulce č. 4 je u každé konfigurace zmíněna celková střední kvadratická odchylka v označení bodů (*Point Marking Residuals - Overall RMS*) uvedená v pixelech a celková kvadratická odchylka délky vektoru (*Point Precisions - Overall RMS Vector Length*) uvedená v milimetrech. Souhrnná chyba vyrovnání (*Last Error*) je bezrozměrná veličina popisující úspěšnost vyrovnání.

Z porovnání lze usoudit, že konfigurace 3 a 4 jsou nevhodné, protože použitím okrajových snímků (z pozic 1,2,9,10) výrazně klesá přesnost v označení bodů. Konfigurace 6 má naopak dobré výsledky v označení bodů, ale vnitřní přesnost je nižší, protože byl použit minimální počet snímků. Jako nejvhodnější byla zvolena konfigurace 7, průběh kalibrace této verze je popsán v kap. 5.2. Protokol o vyrovnání konfigurace 7 je uveden v příloze A2, ostatní protokoly jsou vzhledem k rozsáhlosti umístěny na disku DVD jako příloha B1.

### 5.1.3. Opakovatelnost vyhodnocení a zjištění změny PVO

Protože objektiv použitý pro tuto práci je typu zoom, byla na místě obava o nestabilitu prvků vnitřní orientace, z toho důvodu byla provedena kalibrace dvou totožných snímkových konfigurací. Mezi těmito dvěma snímkovými sadami byly optické členy rozpořehovány rozostřením, změnou velikosti ohniska apod. Poté byla kamera co nejpřesněji nastavena tak jako v první snímkové sadě. Rozdíl pořízených sad je uveden v tabulce č. 5. Rozdíl určení PVO má na výsledky vyhodnocení podrobných bodů minimální vliv, řádově se jedná o setiny milimetru, proto byly PVO shledány jako stabilní a mohly být použity pro vyhodnocení všech snímkových sad.

Změna PVO ze dvou sad			
	1. sada	2.sada	rozdíl
f [mm]	16,56839	16,57169	-0,00330
Xp [mm]	11,98203	11,97652	0,00551
Yp [mm]	7,919291	7,924362	-0,00507
Fw [mm]	24,03753	24,04125	-0,00372
Fh [mm]	15,8961	15,8961	0,00000
K1	5,16E-04	5,10E-04	0,00001
K2	-1,34E-06	-1,24E-06	0,00000
P1	-1,62E-06	1,17E-06	0,00000
P2	-4,90E-05	-4,41E-05	0,00000

Tab. č.5.: Konfigurace snímkování a parametry vyhodnocení

### 5.1.4. Výběr fotogrammetrických terčů

Jedná se o signalizaci vlčovacíh a orientačních bodů, které musí být na měřickém snímku jednoznačně identifikovány. Skupina vlčovacíh bodů slouží



k určení měřítka výsledného fotogrammetrického vyhodnocení nebo k určení prostorové polohy modelu v objektovém systému.

Orientační a vlíčovací body bylo nutné volit s ohledem na jejich přesné fotogrammetrické a v případě vlíčovacích bodů i geodetické určení. Terče byly navrhovány pro danou kameru a objektiv na vzdálenost přibližně 1 m. Podmínka pro spolehlivé určení bodu sub-pixelovou metodou byla dána minimální velikostí terče 8 pixelů na snímku. Velikost obrazu pixelu  $\delta_x$  je možné vypočítat podle následujícího vztahu, kde  $m_s$  je měřítkové číslo,  $f$  ohnisková vzdálenost,  $s$  vzdálenost od objektu a  $\delta'_x$  je velikost pixelu v rovině snímáče. [1]

$$\delta_x = m_s \delta'_x, \quad m_s = \frac{s}{f},$$

Velikost pixelu v objektovém systému je pak 0,3 mm. Z toho je zřejmé, že terč musí mít nejméně  $8 \cdot 0,3 \text{ mm} = 2,4 \text{ mm}$ . Jako minimální hodnota byla stanovena 3,5 mm.

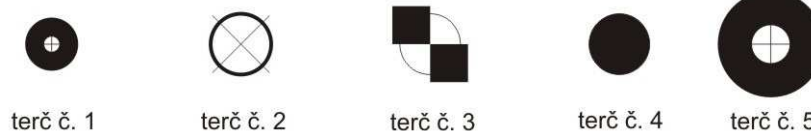
V programu PhotoModeler je možné označení terčů dvěma způsoby:

- Manuální označení - jedná se o označení bodu do přibližného středu signalizačního terče nebo podrobného bodu na objektu. Přesnost závisí na pečlivosti zpracovatele. Tento typ označování je časově náročný a není příliš pohodlný při označování většího počtu bodů.
- Sub-pixelové měření - tento způsob určení bodů umožňuje automatické cílení, které je primárně definováno dvojím způsobem. První metodou je metoda těžiště, tato metoda pracuje s libovolným geometrickým tvarem, u kterého se těžiště dá určit. Druhou je metoda korelační, která pracuje s kruhovým tvarem a to i v perspektivním zkreslení, ve tvaru elipsy. Metoda je časově nenáročná, přesnější než manuální označování, ale vyžaduje větší kontrolu automaticky označených bodů. [1]

### ***Kruhové terče***

Pro možnost využití sub-pixelové metody programu PhotoModeler bylo nutné dodržet podmínky na velký kontrast terčů, nejlépe tedy černobílé. Vhodnost jejich volby se projevila při snímkování značek vytisknutých v krajních polohách barevného spektra RGB. Další podmínkou pro vyhotovení terčů byla možnost geodetického zaměření kalibračního pole, proto terč musel obsahovat jednoznačně identifikovatelný střed. Z těchto kritérií byly zvoleny terče č. 1 a č. 5 z obrázku č. 17.





**Obr. č. 17.:** Ukázka vytvořených terčů, použit byl terč č.1 a č.5

### ***Kódové terče***

Pro možnost co největší automatizace a usnadnění zpracování snímku byly použity kódové terče vygenerované v programu PhotoModeler, a to pro vzdálenost 1m a rozlišovací schopnost kamery Nikon D7000. Kódové terče se pomocí sub-pixelové metody automaticky označí i s přiřazením čísla (kódu) konkrétního terče. V této práci bylo využito kódování 12ti bitů viz. obr. č. 18. Celkem pro práci bylo k dispozici 161 terčů, z toho je 102 umístěných na kalibračních normálech.



**Obr. č. 18.:** Kódové terče 12 bitů

Všechny terče byly tisknuty na matný papír určený pro tisk ve velkém rozlišení, tím byly eliminovány případné odlesky a nemožnost identifikace terčů při zpracování.

## **5.2. Kalibrace kamery**

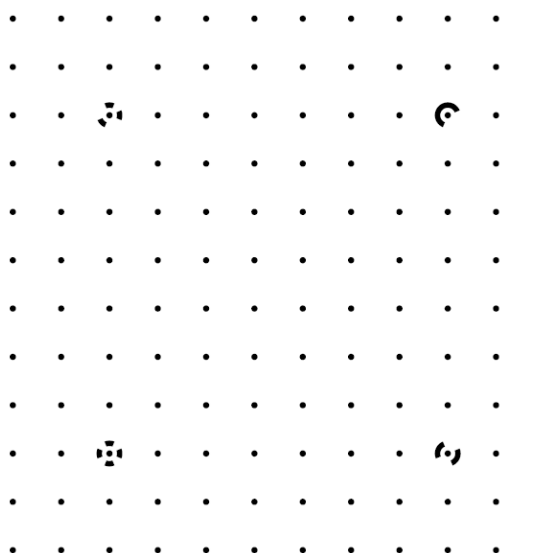
Aby bylo možné použít neměřičskou kameru pro fotogrammetrické účely, je nutné určit kalibrační kamery parametry označované jako prvky vnitřní orientace (PVO), kterými jsou:

- Konstanta komory -  $f$
- Poloha hlavního snímkového bodu -  $x_0, y_0$
- Průběh tangenciální a radiální distorze -  $K1, K2, (K3), P1, P2$

Obecně platí, že pro určení prostorové polohy bodu je nutné, aby určovaný bod byl dobře viditelný minimálně na třech snímcích. Při snímkování je nutné držet se zásad průsekové fotogrammetrie jako konvergence os, pozice stanovisek a natáčení kamery o 90° pro fixaci polohy hlavního snímkového bodu. [7][2]

### 5.2.1. Kalibrační pole

Kalibrační pole slouží pro určení prvků vnitřní orientace kamery. V této práci je využito rovinných kalibračních polí z prostředí PhotoModeler ve velikosti formátu A1 pro automatizovanou kalibraci. Použití prostorového kalibračního pole vytvořeného na stěně v učebně B150 nepřineslo výraznější změny v určení PVO a pro testování konfigurace i výsledného vyhodnocení bylo využito jen kalibrační pole programu PMS.



**Obr. č. 19.:** Kalibrační pole programu PhotoModeler Scanner

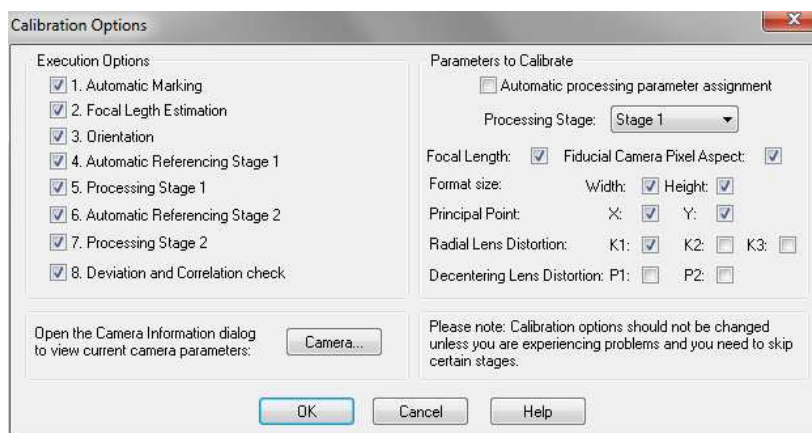
### 5.2.2. Postup kalibrace kamery v programu PMS

Pro využití vlastního kalibračního pole je nutné body označit manuálně a vyhodnocení je časově náročnější. Zjednodušeně se dá manuální proces kalibrace shrnout do následujících kroků:

- 1) Založení projektu
- 2) Načtení snímků kalibračního pole - výběr snímků kalibračního pole
- 3) Automatické označení bodů
- 4) Referenční fáze
- 5) Orientační fáze
- 6) První výpočet kalibrace
- 7) Revize automaticky označených bodů
- 8) Druhý výpočet kalibrace

Před automatickou kalibrací lze nastavit označování bodů a vybrat parametry, které jsou předmětem kalibrace. Základem jsou kvalitní kontrastní snímky pro přesné určení orientačních a vřícovacích bodů. Pokud je použito kalibrační pole programu PMS, do nastavení procesu kalibrace nemusíme nijak zasahovat. Postup je následující:

- 1) Založení projektu  
- *File/ Getting Started/ Camera Calibration Project.*
- 2) Načtení snímků kalibračního pole.
- 3) Provedení automatické kalibrace - proběhne celkem 8 fází automatické kalibrace, ty je možné vybrat spolu s parametry, které se mají vypočítat v první a druhé fázi procesu. Jako přibližné parametry do vyrovnání vstupují hodnoty, které se získají z metadat vyhodnocovaných snímků EXIF (formát snímku, ohnisková vzdálenost a střed snímku) a pokud tyto informace chybí, je možné zvolit některou z předchozích kalibrací totožné kamery.



**Obr. č. 20.:** Nastavení parametrů automatické kalibrace

- 4) Spuštění automatické kalibrace  
- *Automatic Camera Calibration/ Execute Calibration*
- 5) Protokol o výpočtu - nesmí obsahovat žádné chybové hlášení a odchylky všech bodů musí být dle kritérií PMS menší než 1 pixel (*Maximum Residual*). Výsledné parametry PVO konfigurace 7 uvedené v kapitole 5.1.2. jsou uvedeny v tabulce č. 6. Protokol tohoto vyhodnocení je uveden v příloze A2.

<b>Last error</b>	1,307
<b>f [mm]</b>	16,38928
<b>Xp [mm]</b>	11,87578
<b>Yp [mm]</b>	7,951827
<b>Fw [mm]</b>	23,99759
<b>Fh [mm]</b>	15,8961
<b>K1</b>	5,08E-04
<b>K2</b>	-1,20E-06
<b>P1</b>	2,19E-05
<b>P2</b>	-4,61E-05

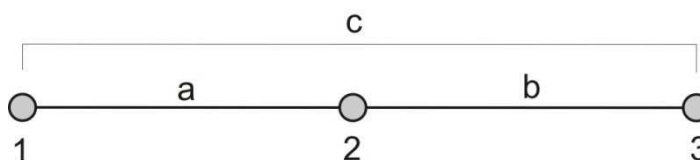
**Tab. č.6.:** Parametry kalibrace z konfigurace 7

### 5.3. Geodetické zaměření

Pro určení souřadnic vřícovacích bodů na kalibračních normálech bylo využito metody protínání vpřed z úhlů. Jednotlivé body byly zaměřeny totální stanicí Topcon GTS - 300 (v. č. NV0180) ve dvou skupinách. Přesnost dálkoměru totální stanice je  $m_s = 2 + 2 \text{ ppm}$ , to bylo však pro zaměření základy nedostačující, součtová konstanta tedy byla přeúčena dle [9].

#### 5.3.1. Určení součtové konstanty elektronického dálkoměru

Zaměření pro přeúčení součtové konstanty hranolu proběhlo v učebně B150 na VUT FAST, kde pro tyto účely bylo možné využít pilířové základny o třech bodech umístěných v přímce. Jednotlivé pilíře od sebe byly vzdáleny přibližně 4,5 m a na každém z nich byla umístěna a urovnána trojnožka pomocí totální stanice. Vzdálenosti mezi body byly měřeny vždy dvakrát tam i zpět, a to celkem ve třech etapách. Střední chyba součtové konstanty byla vypočtena dle [9].



Obr. č. 21.: Schéma pilířové základny pro určení PSM

etapa				etapa			
úsek	I.	II.	III.	úsek	I.	II.	III.
$a_{12}$	4,5050	4,5051	4,5052	$a_{21}$	4,5051	4,5051	4,5050
$b_{23}$	4,5095	4,5092	4,5091	$b_{32}$	4,5095	4,5094	4,5091
$c_{13}$	9,0096	9,0095	9,0093	$c_{31}$	9,0095	9,0095	9,0093
PSM	-0,0049	-0,0048	-0,0050		-0,0051	-0,0050	-0,0048
PSM =	-4,9 mm						
$m_{PSM}$ =	0,1 mm						

Tab. č. 7.: Určení hodnoty PSM a její přesnosti

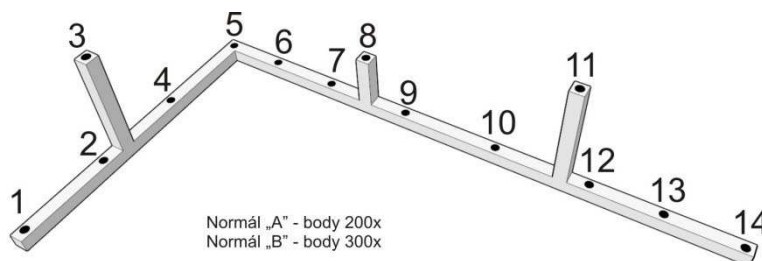
#### 5.3.2. Geodetické zaměření vřícovacích bodů

Zaměření vřícovacích bodů na kalibračních normálech proběhlo v učebně B150 na VUT FAST. Předmětem zaměření bylo 14 bodů na každém normálu a 13 pomocných bodů umístěných na zdi, čísla bodů jsou uvedeny v tabulce níže. Pro zaměření podrobných bodů byla zvolena metoda protínání vpřed z úhlů ze stanovisek 4001 a 4002 umístěných na pilířích. Horizontální i vertikální úhly byly

měřeny ve dvou skupinách, délka základny byla měřena na každém stanovišti v obou skupinách ve dvou polohách.

Naměřené hodnoty byly vyrovnány Ing. Jiřím Burešem, Ph.D v programu GNET. Protokol o vyrovnání je přílohou B5 a seznam souřadnic bodů včetně charakteristik přesnosti přílohou B6 na disku DVD. Seznamy souřadnic vlíčovacích bodů jsou uvedeny v příloze A3.

Číslování bodů		
Body na zdi	1001-1013	
Normál "A"	2001-2014	
Normál "B"	3001-3014	



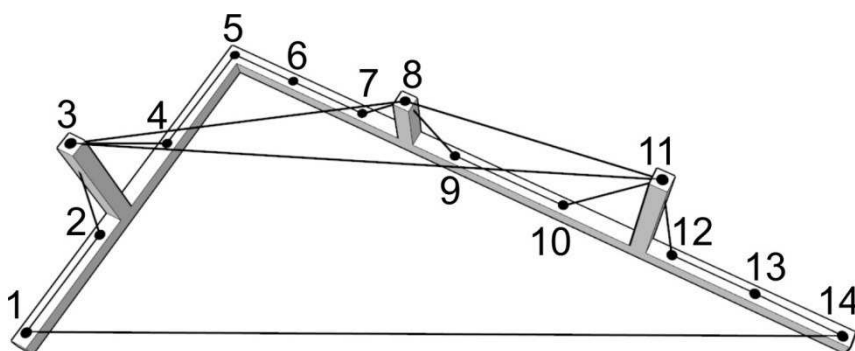
**Obr. č. 22.:** Schéma rozmístění vlíčovacích bodů na kalibračním normálu

#### 5.4. Vyhodnocení přesnosti kalibrace použité kamery

Jedná se o zjištění odchylek mezi prostorovými vzdálenostmi vypočtenými ze souřadnic získaných geodeticky a vyhodnocených v programu PhotoModeler (Obr. č. 23). Předmětem snímkování byly dva kalibrační normály umístěné do pozice přibližně stejné, jaká bude realizována v terénu. Pro výpočet byly použity vlíčovací body kalibračního normálu "A" a zjištěny objektové souřadnice bodů na kalibračním normálu "B". Zjištěné odchylky jsou uvedeny v tabulce č. 8.

mezi body			Úseky [m]			mezi body			Úseky [m]		
			Photom. Souřad.		rozdíl [mm]				Photom. Souřad.		rozdíl [mm]
úseky v rovině	1	2	0,08402	0,08411	0,10	v prostoru	1	14	0,63370	0,63380	0,09
	2	3	0,11445	0,11445	0,01		3	11	0,41453	0,41450	-0,03
	3	4	0,11518	0,11527	0,09		3	8	0,23921	0,23918	-0,03
	4	5	0,08086	0,08085	-0,01		8	11	0,20682	0,20682	0,00
	5	6	0,05326	0,05316	-0,10				max	0,14	
	6	7	0,08398	0,08390	-0,08			min	-0,14		
	7	8	0,07658	0,07666	0,08						
	8	9	0,07454	0,07447	-0,07						
	9	10	0,08550	0,08552	0,02						
	10	11	0,11403	0,11417	0,14						
	11	12	0,11417	0,11403	-0,14						
	12	13	0,06127	0,06137	0,10						
	13	14	0,06923	0,06923	0,00						
						Střední kvadratická odchylka (RMS)					
						= 0,07 mm					
						Rozšířená nejistota $\delta$					
						(t=2;P=0,95; $\alpha$ =5%)					
						= 0,15 mm					

**Tab. č.8.:** Porovnání parametrů



**Obr. č. 23.:** Umístění kontrolních bodů na kalibračním normálu

## 5.5. Realizace snímkování

Po vyhodnocení všech potřebných testů a zjištění PVO kalibrací kamery bylo realizováno snímkování v terénu. Většina snímkaných měřidel je pevně uchycena ve zdech radnic, proto byl čas snímkování volen tak, aby žádný z objektů nebyl na přímém slunečním světle a nevznikaly tak odlesky. Kolem objektu byly rovnoměrně rozmístěny kódové terče. Připevněny byly pomocí speciální hmoty, která po odstranění nepoškodila omítku. K objektu byl připevněn stejným způsobem kalibrační normál, a to co nejbližše snímkanému objektu, ale zároveň tak, aby ho nepřekrýval na snímcích. Snímkováno bylo celkem 6 měřidel. Jedná se většinou o mírové etalony českého a moravského loktu. Výřezy snímků měřidel jsou v příloze A4. Kompletní snímkové sady jsou vloženy na disku DVD.

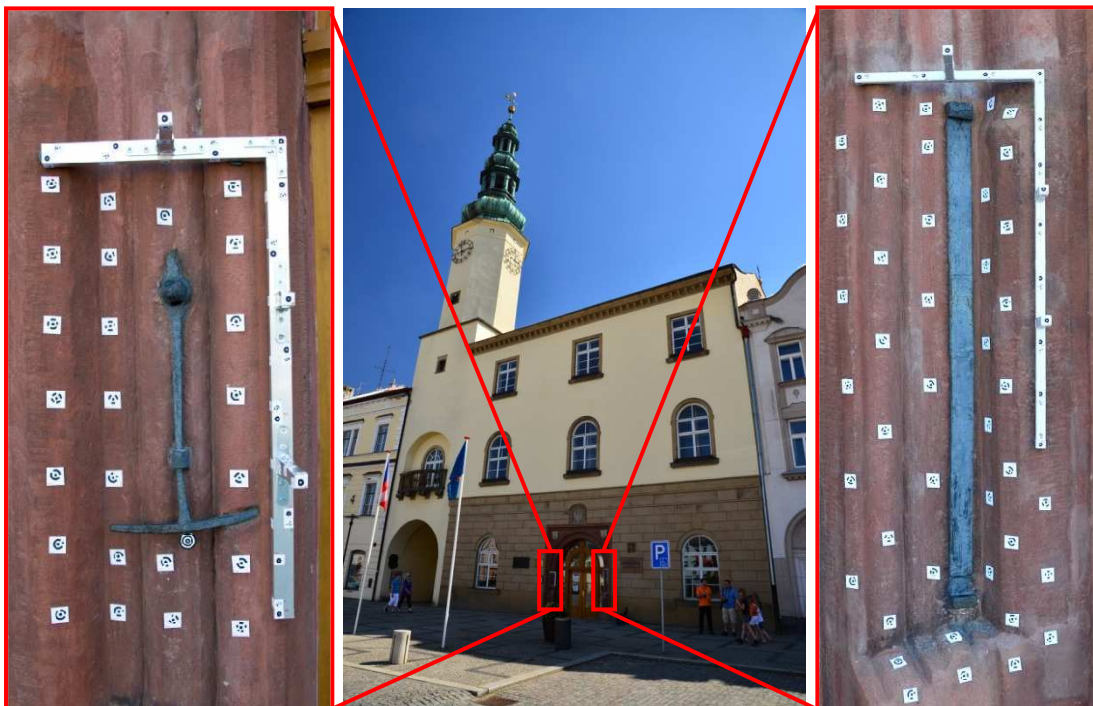
### 5.5.1. Loket a motovidlo v Moravské Třebové

Loket je zapuštěný ve stěně na pravé straně u vstupních dveří radnice města Moravská Třebová. Tento loket je ve velice špatném stavu, jeho horní původní část je doplněna v dorazové části o kovový klínek. Střední část je zcela jistě přivařena v průběhu 20. stol. a stejně tak je původní spodní dorazová část přišroubována zapuštěnými šrouby. Celý tento loket je pak umístěný naopak, což je zřejmé z obráceného vyrytého letopočtu. [14]

Pořízeno bylo celkem 18 snímků z devíti pozic. Z tohoto počtu nadbytečných snímků bylo vybráno 6 pro vyhodnocení.

Na levé straně vstupních dveří je stejným způsobem uchyceno motovidlo, jeho horní polovina je ulomena a jeho druhá část je velmi pokrivená. U tohoto měřidla bylo využito metody obrazové korelace a podle tohoto byl zvolen odlišný způsob snímkování.





*Obr. č. 24.: Měřidla v Moravské Třebové*

### 5.5.2. Loket v Kyjově

Jedná se o Český loket umístěný na pravé straně vstupního portálu do Kyjovské radnice. Tento loket sloužil, tak jako většina podobných, k porovnání počtivosti měřidel na přilehlém tržišti. Na tomto měřidle byly zvýrazněny rysy celé stupnice. Terče i kalibrační normál byl umístěn stejně jako v předchozím případě.



*Obr. č. 25.: Loket na radnici v Kyjově*

### 5.5.3. Loket v Litomyšli

Loket je vsazený do kamenné zdi městské věže. Toto měřidlo je zachovalé, avšak opatřeno tak silným nátěrem, že většina na něm umístěných rysek není dostatečně zřetelná pro vyhodnocení.



*Obr. č. 26.: Český loket na věži v Litomyšli*

### 5.5.4. Krejčovský metr

Jako jediné dokumentované měřidlo je přenosné a bylo je možné snímkovat v laboratoři. Jedná se o krejčovskou míru 0,5 m.

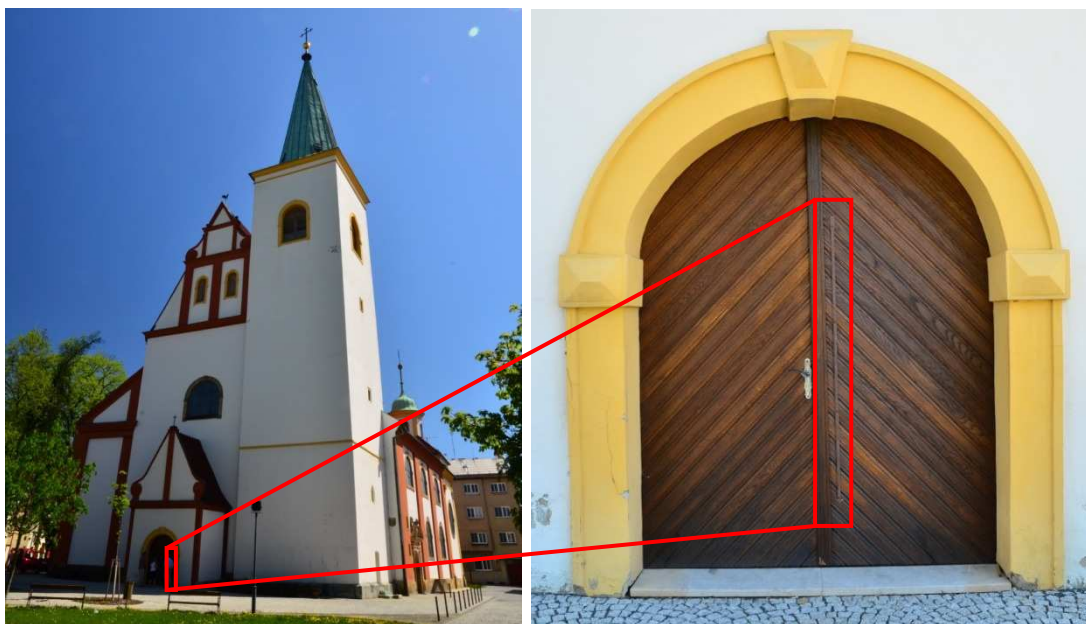


*Obr. č. 27.: Snímkování krejčovského metru*



#### 5.5.5. *Hrobní míra v Litovli*

Předmětem snímkování byla zcela ojedinělá hrobní míra z roku 1690 umístěná na vstupních dveřích kostela Sv. Marka. Představuje, jakou měl mít hrob hloubku. Na míře je nápis "*MAAS DER TIEFE DER GRABER*" a má tvar šípů. Pro velkou délku měřidla byla rozdělena na tři vyhodnocované části, po vyhodnocení jednotlivých modelů byla míra složena do jednoho objektu.



*Obr. č. 28.: Hrobní míra v Litovli*



## 6. VYHODNOCENÍ MODELŮ VYBRANÝCH HISTORICKÝCH MĚŘIDEL

Všechny jednotlivé snímkové sady pořízené v terénu byly primárně zpracovány v programu PMS. Takto získané modely byly ve formátu \*.dxf převedeny z důvodu snadnějšího zpracování do programu Google SketchUp a v případě mračen bodů ve formátu \*.txt do programu Geomagic Studio 10 pro vyhotovení modelu objektu.

### 6.1. Zpracování a výběr vhodných snímků

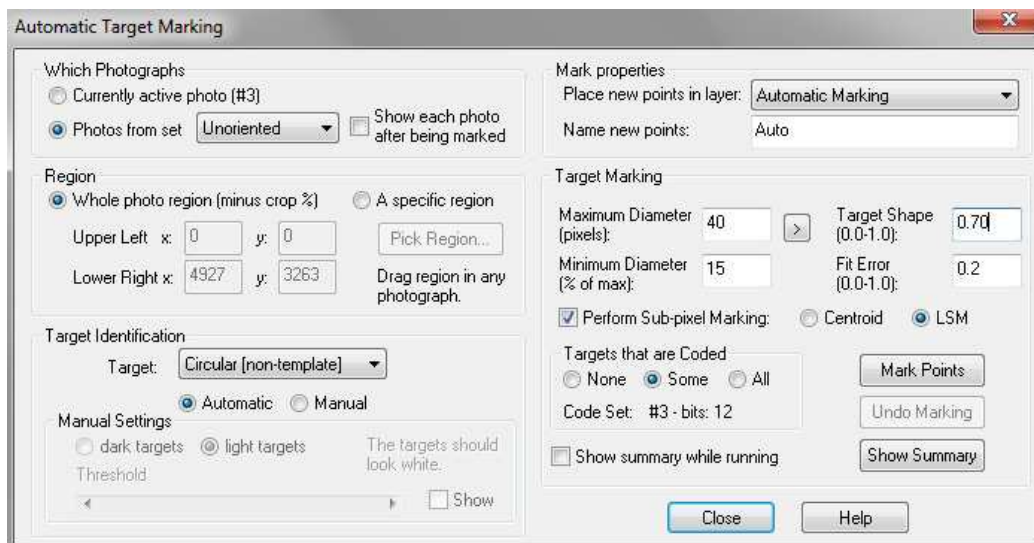
Na každém objektu byl vyhotoven nadbytečný počet snímků ve formátu RAW, to znamená, že snímky musely být s vhodnými úpravami vyvolány do formátu JPEG. Na snímcích byla před vyvoláním upravována především expozice, stíny, kontrast a vyvážení bílé barvy. Nastavení bylo pro každou snímkovou sadu odlišné, ale v rámci jedné snímkové sady vždy stejné.

Ze snímkové sady bylo vybráno 4 - 8 snímků, na kterých byly nejlépe zřetelné hrany a zlomy pro snadnou identifikaci tvaru měřidla. Ohled byl brán především na vhodnou konfiguraci vybraných snímků.

### 6.2. Postup zpracování v programu PhotoModeler (PMS)

Zpracování jednotlivých snímkových sad v programu PMS lze rozdělit do těchto základních etap:

- 1) Založení projektu (*File/ Getting Started/ Point-Based Project*).
- 2) Import snímků - po načtení upravených snímků byl použit kalibrační soubor PVO kamery "D7000 [16.00] [F05\_V07]", což je kalibrační soubor 5. testovací sady z konfigurace 7.
- 3) Automatické označení všech terčů na snímku (*Marking/ Automatic Target Marking/ Mark Points*) - na obr. č. 29 je patrné nastavení subpixelového označování cílů a do jakého rozměru mají být hledány, dále je nastaven typ kódových terčů na 12 bitů. Označeny byly body na všech neorientovaných snímcích.



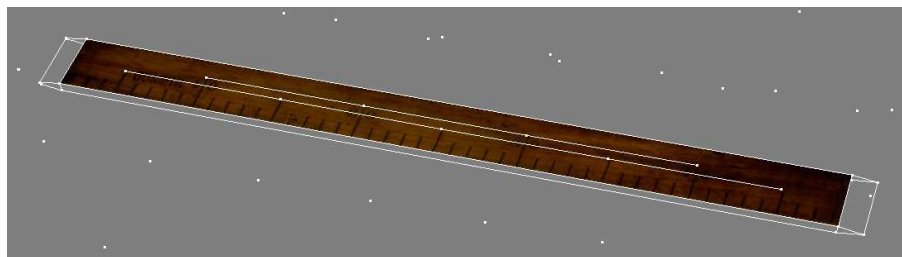
**Obr. č. 29.:** Automatické označování terčů

- 4) Import vřícovacích bodů (*View/ Import Explorer/ Add Imports Objects*) - jedná se o načtení souřadnic bodů v objektovém systému, v případě použití normálu "A" body 2001-2014 a v případě normálu "B" body 3001-3014.
- 5) Označení vřícovacích bodů (*View/ Import Explorer/ Activate Mark*).
- 6) Proces orientace a vyrovnání (*Project/ Process*) - většinou první výpočet obsahuje některé špatně označené body, což se projeví nepřesnostmi výsledku vyrovnání, po odstranění těchto hrubých chyb je třeba tento proces opakovat. V protokolu o vyrovnání nesmí být žádné chybové hlášení.
- 7) Označení bodů na objektu (*Marking/ Mark Points Mode*) - toto označení se ukázalo jako největší problém celého vyhodnocení, vzhledem k zachování textury na snímcích nebyly objekty opatřeny žádnými terči a identifikace hran a rohů objektů byla velmi komplikovaná. Tato fáze určení podrobných bodů objektu byla vyhotovena s největší pečlivostí. Primárně je v programu povolena maximální odchylka takto označeného bodu 5 pixelů, při zpracování se však podařilo dosáhnout odchylek menších než 2 pixely. Pro tyto práce bylo využito základních nástrojů programu PMS.



**Obr. č. 30.:** Standardní nástroje programu PMS

- 8) Tvorba drátového modelu - v programu PSM byly vyhotoveny jen základní tvary modelu pro lepší orientaci při zpracování v dalších softwarech. Drátový model s texturou jedné plochy načtené ze snímků je znázorněn na obrázku č. 31.



**Obr. č. 31.:** Drátový model s texturou jedné plochy

- 9) Export modelu - drátový model včetně souřadnic podrobných bodů byl exportován do standardního formátu \*.dxf.

### 6.3. Tvorba modelu pomocí optické korelace

Program PhotoModeler Scanner nabízí velmi efektivní nástroj pro zpracování snímků pomocí optické korelace. Princip této metody je popsán v kap. 4.1.5. Založení projektu, označení orientačních a vřícovacích bodů probíhá obdobně jako v předchozím případě, poté se dá proces shrnout do následujících fází:

- 1) Idealizace snímků (*Project/ Idealize Project*) - jde o odstranění deformací snímku a přepočítání obrazu do ideální, tedy ortogonální podoby. Přímka ve skutečnosti se jeví jako přímka i na snímku. Tato fáze je časově náročná a je vhodné používat a idealizovat pouze dvojice snímků určené pro optickou korelaci.
- 2) Definování oblasti pro vyhodnocení (*Dense Surface/ DSM Trim Mode*) - tímto nástrojem byly na všech snímcích vybrány oblasti, které chceme vyhodnotit. Výpočet celých dvojic snímků bez určení těchto oblastí by byl časově velmi náročný a neefektivní
- 3) Proces optické korelace (*Dense Surface/ Create DS*) - výběr dvojic snímků ze seznamu všech snímků v projektu a nastavení parametrů optické korelace:
  - *Sampling rate* - parametr udávající hustotu mračna, byl stanoven v závislosti na vyhodnocovaném objektu.
  - *Extens from* - určuje oblast, kde bude mračno vytvořeno, tedy *DSM Trim*, kterou jsme definovali v předchozím kroku.
  - *Depth range* - před výpočtem je mezi určenými body vytvořena trojúhelníková síť, tímto nastavením omezíme vyhledávání bodů do určité vzdálenosti před a za touto sítí.
  - *Subpixel* - provedení subpixelového vyhledávání. Výpočet je pomalejší, ale vyhodnocení dává kvalitnější výsledky.

- *Super sampling factor* - definuje zvlnění povrchu, čím větší hodnota, tím méně zvlněný povrch. Hodnota 2 byla dostačující.
  - *Matching region radius* - jde o velikost okna, kde je vyhledávána shoda mezi snímky.
  - *Texture type* - definuje pravidelnost povrchu.
- 4) Proces (*Execute*) - po vyhodnocení dvojic snímků získáme mračna bodů v závislosti na tom, kolik dvojic snímků bylo použito. Jednotlivé body nesou informaci o barvě a lze je dále zpracovat pouze v programu PMS. Toho však nebylo využito pro komplikovanost a omezené funkce pro dostatečně kvalitní zpracování. Na obr. č. 32 jsou znázorněna nezpracovaná mračna bodů. Novější verze tohoto programu umožňuje export mračen bodů i s informací o barvě, ale ta bohužel nebyla k dispozici. Mračna bodů byla exportována do textového formátu jako seznam souřadnic bodů pro zpracování v programu Geomagic Studio 10.



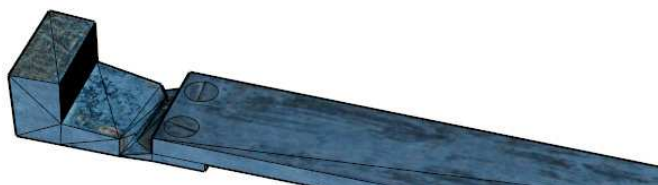
**Obr. č. 32.:** Surová mračna bodů v programu PMS (motovidlo v Moravské Třebové)

## 6.4. Modelování a vizualizace artefaktů v programu SketchUp

Pro tvorbu modelu byl zvolen program SketchUp od společnosti Google, který nabízí všechny potřebné funkce pro vyhodnocení. Tento velice intuitivní modelovací nástroj umožňuje import modelu ve formátu \*.dxf, obsahuje projekce fotografických textur a vytvoření řezů objektů. Postup vyhodnocení lze stručně shrnout do následujících fází:

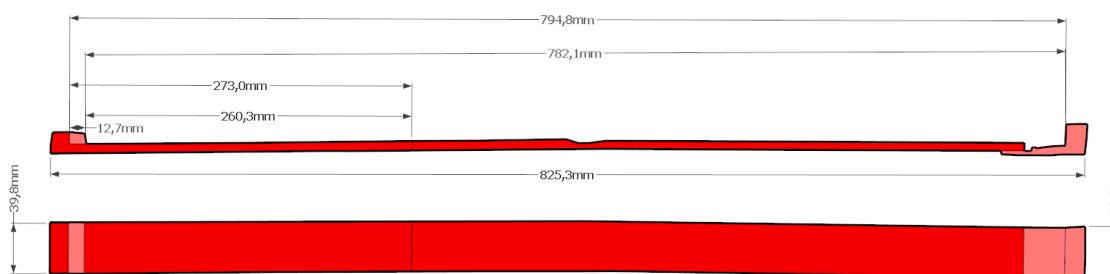
- 1) Vytvoření projektu a import modelu ve formátu \*.dxf. Z programu PMS je model exportován v metrech s přesností na 6 desetinných míst a stejně tak musíme nastavit program SketchUp před importem. Pokud tyto parametry nejsou nastaveny před importem, model se deformuje a je znehodnocen.
- 2) Drátový model vyhodnocený v programu PMS je neúplný, zejména v částech měřidla, které nebylo vidět nebo v místech, která šla velice špatně identifikovat.

Model musel být domodelován pomocí podrobných snímků, a to za předpokladu pravoúhlosti jednotlivých částí. Modelování nevyhodnocených částí bylo provedeno vždy jen mimo stupnici měřidla (podhled, úchyty měřidla apod.). Samotná stupnice měřidla a dorazové části jsou ve všech případech vyhodnoceny již v programu PMS.



**Obr. č. 33.:** Detail modelu (měřidlo v Moravské Třebové)

- 3) Vytvoření textur - na jednotlivé plochy a části objektu byly promítnuty textury z idealizovaných snímků programu PMS. Textura má tedy jen vizuální účel.
- 4) Vytvoření řezů - na každém měřidle byl proveden vertikální i horizontální řez viz. obr. č. 34, na jednotlivých řezech byly vyneseny kóty.



**Obr. č. 34.:** Znázornění řezů měřidla (loket v Moravské Třebové)

- 5) Všechny vyhotovené modely včetně řezů jsou uloženy v digitální podobě na disku DVD a zobrazeny v dokumentačních listech jednotlivých měřidel.

## 6.5. Zpracování mračen bodů v programu Geomagic Studio 10

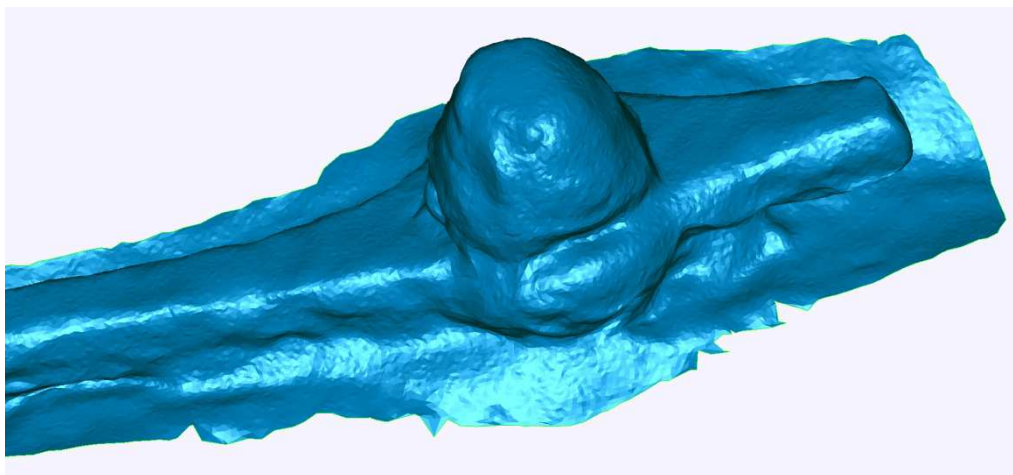
Tento program byl použit jako doplňkový, protože některá měřidla nebylo možné vyhodnotit klasickou metodou. Z tohoto důvodu budou jednotlivé části zpracování popsány velice stručně.

Již vytvořené mračna bodů v PMS byly nejprve importovány do programu Geomagic Studio 10. Vytvoření modelu lze shrnout do následujících kroků:

- 1) Spojení mračen do jednoho mračna (*Points/ Combine Points Object*)
- 2) Manuální mazání nadbytečných oblastí mračna pomocí standardních nástrojů pro výběr prvků

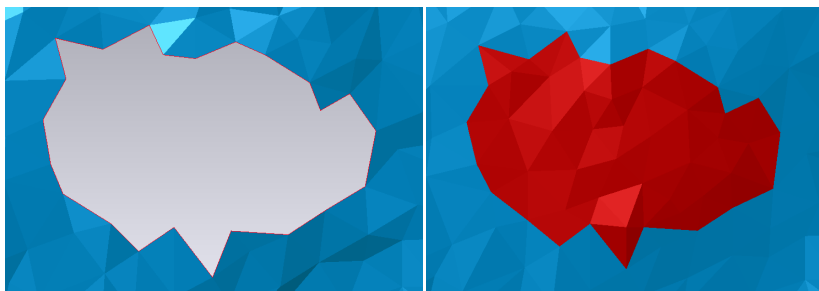


- 3) Snížení šumu mračna (*Points/ Reduce Noise*) - body mračna nikdy neleží v jedné rovině, za předpokladu plynulých ploch tedy může snížení šumu výrazně zvýšit kvalitu dat. Při velkém snížení šumu se ale ztrácí detaily.
- 4) Provedení sjednocení celého mračna bodů (*Points/ Uniform Sample*) - jde o zachování bodů v oblastech s velkou křivostí a naopak v rovných oblastech redukuje body při zachování všech detailů.
- 5) Vygenerování trojúhelníkové sítě (*Points/ Wrap*)



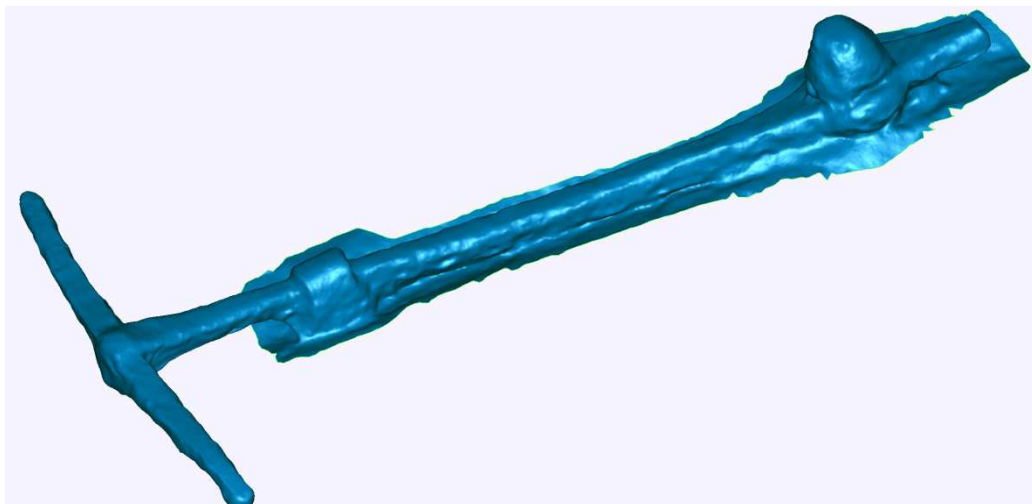
**Obr. č. 35.:** Detail vygenerované trojúhelníkové sítě

- 6) Manuální oprava sítě - opravení ostrých hran sítě, nesprávného automatického vyhodnocení a zaplnění otvorů pomocí funkcí *Fill Holes*, *Clean Up* a *Fill Partial*.



**Obr. č. 36.:** Znázornění děr před a po opravě

- 7) Po kompletním ucelení modelu je možné redukovat počet trojúhelníků (*Polygons/ Decimate*) a vyhladit celý objekt (*Polygons/ Clean*). Výsledný model je znázorněn na obrázku č. 37.



***Obr. č. 37.:** Výsledný model motovidla v Moravské Třebové*

## **6.6. Vyhotovení dokumentace historických měřidel**

Pro vyhotovení dokumentace bylo nutné znát především rozměr měřidel dle dobových nařízení, a to v návaznosti na metrickou soustavu.

### ***Obsah dokumentace***

Samotná dokumentace měřidla je shrnuta do třech hlavních částí, a to popisnou, grafickou a tabulky výsledných hodnot. Jednotlivé části obsahují tyto informace:

#### ***Popisná část***

- Lokalita
- Adresa
- GPS souřadnice
- Název
- Druh měřidla (Český loket, Moravský loket, Vídeňský loket)
- Typ měřidla (koncové, čárkové, vsazené)
- Stupnice (jednostranná, dvoustranná)
- Dělení stupnice
- Nominální délka
- Materiál
- Místo uchycení
- Způsob uchycení
- Popis
- Datum snímkování
- Podmínky snímkování
- Místopis doplněný znázorněním na snímku





- Autor

### ***Grafická část***

- Prostorový model
- Snímky detailů
- Vertikální a horizontální řez měřidlem
- Vynesené kóty
- Nejistota měření

### ***Tabulka hodnot a porovnání***

- Tabulka naměřených hodnot
- Porovnání s hodnotami dobových nařízení
- Závěr



## ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zjistit skutečný rozměr historických měřidel na vybraných místech České Republiky, vyhotovení jejich 3D modelu a vytvoření dokumentačních listů.

Všechny parametry, které se mohly projevit na výsledném vyhodnocení, byly předmětem testování v kap. 5.1. Nejvýhodnější nastavení kamery bylo dosaženo nejen pomocí cílených testů, ale také díky fotografickým zkušenostem nabytých v praxi. Správná konfigurace snímků, která je důležitým aspektem kvality zpracování, byla určena testováním odlišných konfigurací snímkové sady. Nejvýhodnější vyhodnocená konfigurace potvrdila všeobecné tvrzení o rozmístění snímků. Samotným těžištěm fotogrammetrické části této práce je vytvoření dvou kalibračních normálů. Byly vyhotoveny za účelem zjednodušení prací v terénu a zrychlení zpracování v programu PMS. Na této konstrukci jsou účelně vytvořené terče pro jejich geodetické zaměření, ale i pro možnost použití sub-pixelového označení. Body jsou zaměřeny geodeticky metodou protínání vpřed z úhlů. Kalibrační normál je tak v podstatě přenosným objektovým systémem. Jako hlavní výhody tohoto elementu bych zmínil mobilitu, jednoduchost umístění k objektu a možnost automatizace vyhodnocení.

Důsledná příprava před každým snímkováním konkrétního měřidla vedla k bezproblémovému průběhu prací v terénu. Snímkování bylo prováděno jen za příznivého počasí a ideálního osvětlení objektu. Při použití normálu "A" jsou snímky ostré a objekty včetně terčů dobře kontrastní. Méně vhodnější se jevílo použití kalibračního normálu "B" terče na něm umístěné jsou za denního světla méně kontrastní. Způsobuje to lesklý materiál z kterého je normál vyroben.

Při zpracování snímků a určení souřadnic bodů jednotlivých měřidel bylo využito ručního označení bodů v PMS. U těchto typů historických měřidel jsou některé hrany zaoblené nebo zastíněné a je tak velice problematická identifikace hran a podrobných bodů. Tyto problémy nastaly jen u bočních částí měřidla nebo málo zřetelných detailů jednoduté textury. Ve většině případů byla měřidla vyhodnocena průsekovou fotogrammetrií a následně zpracována v programu SketchUp. U motovidla v Moravské Třebové však této metody nebylo možné využít, na objektu nebyly žádné dostatečně zřetelné hrany ani body pro kvalitní identifikaci na snímku. Toto měřidlo bylo zpracováno metodou optické korelace a model vyhotoven v programu Geomagic Studio 10. Přesnost vytvořených modelů v PMS se pohybuje s rozšířenou nejistotou  $\delta$  kolem 0,25 mm ( $t=2$ ;  $P=0,95$ ;  $\alpha=5\%$ ) v závislosti na konkrétním modelu. Protokoly s charakteristikami přesnosti modelů jsou umístěny na disku DVD.



Modely většiny měřidel jsou vypracovány v programu SketchUp. Byly opatřeny texturou, vyhotoveny řezy modelem a ty následně okótovány. Program SketchUp postrádá možnost exportu do vektorových formátů, model lze exportovat pouze jako 2D snímek ve formátu JPEG. To však bylo pro použití do dokumentačních listů dostačující, i když se to projevilo na zhoršené tiskové kvalitě.

Mračna bodů vyhodnocená v programu PMS pomocí optické korelace byla dále zpracována programem Geomagic studio 10. To sice nebylo původním záměrem práce, ale okolnosti si tuto metodu vyhodnocení vynutily. Pomocí tohoto profesionálního nástroje pro zpracování mračen bodů byl vytvořen vysoce kvalitní model motovidla. Z hlediska složitosti interpretace je tento model pouze v digitální formě na disku DVD.

Všechny dokumentační listy konkrétních měřidel z Moravské Třebové, Kyjova, Litomyšle, Litovle a přenosného krejčovského měřidla jsou konečným výstupem této práce. Hlavní část dokumentačních listů je číselné a grafické znázornění modelů a jejich řezů spolu s popisovými informacemi o měřidle.

Pokud mohu vyjádřit svůj osobní názor, myslím si, že použití fotogrammetrie pro dokumentaci historických měřidel je vhodné. Zejména zpracování pomocí optických korelačních systémů je velice zajímavou možností. Hlavní myšlenky práce, tedy použité metody, přesnost a výstupy odpovídají představě před zpracováním plně vyhovují pro dokumentaci historických měřidel. V průběhu práce vytvořené kalibrační normály je možné dále aplikovat v mnoha fotogrammetrických směrech při snímkování objektů do rozměru přibližně 1 m.

V závěru lze tedy říci, že cíl práce je splněn.



## POUŽITÉ ZDROJE

- [1] HANZL, Vlastimil. Fotogrammetrie I: praktická cvičení. Vyd. 1. Brno: CERM, 2002, 94 s. ISBN 80-214-2049-9.
- [2] PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 1: praktická cvičení. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 200 s. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [3] PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 1, 2: praktická cvičení. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007, 163 s. ISBN 978-80-01-02655-7.
- [4] VALA, Ondřej. Diplomová práce - Využití digitálního fotoaparátu ke kartografické reprodukci. Praha : ČVUT, 2011. 103 s.
- [5] DAI, Fei. LU, Ming. Photo-Based 3D Modeling. Hong Kong : Polytechnic University, 2008. 6 s.
- [6] PETŘÍK, Jan. Bakalářská práce - Měřická dokumentace kaple Sv. Šimona. Praha : ČVUT, 2011. 48 s.
- [7] ŠTEFANOVÁ, Eva. Kalibrace neměřických digitálních kamer. Praha : UK, 2006. 7 s.
- [8] PODSTAVEK, Josef. Polní kalibrace v programu Photomodeler Pro. Brno, 2003. 6 s.
- [9] Švábenský, O., Vitula, A., Bureš, J. Inženýrská geodézie I: Návod ke cvičením. Brno: VUT, 2006. 161 s.
- [10] PIHAN, R. Mistrovství práce s DSLR. Praha: Institut digitální fotografie, 2010. 288 s. ISBN: 80-903210-8-9.
- [11] PAVELKA, Karel. Fotogrammetrie 20. druhé přepracované vydání. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-02762-7.
- [12] Nikon Corporation. Manual D7000. New Yorkstraat: Nikon Europe BV. 326 s.
- [13] PhotoModeler Products. Elektronický manuál PhotoModeler Scanner.



- [14] JANGEL, Ladislav. Staré hornické a hutnické míry a váhy: praktická cvičení. 1. vyd. Sokolov: Krajské muzeum Sokolov, 2006, 143 s. ISBN 80-866-3010-2.
- [15] SEDLÁČEK, A. Paměti a doklady o staročeských mírách a vahách. Praha: Akademie věd a umění. 1923.
- [16] MARCIŠ, M., FRAŠTIA, M. Measuring the Deformations of Steel Column Using Convergent Photogrammetry. In INGENEO 2011: 5th International conference on engineering surveying. Brijuni, Croatia, 22.-24.9.2011. Zagreb: University of Zagreb, 2011, s.211-218. ISBN 978-953-6082-15-5.
- [17] CHLEPKOVÁ, M. Digital Photogrammetry in Fire Testing Procedure for Concrete Tunnel Linings. In INGENEO 2011: 5th International conference on engineering surveying. Brijuni, Croatia, 22.-24.9.2011. Zagreb: University of Zagreb, 2011, s. 195-300. ISBN 978-953-6082-15-5.
- [18] MARCIŠ, M. Convergent photogrammetry for very close distances. In INGENEO 2011: 5th International conference on engineering surveying. Brijuni, Croatia, 22.-24.9.2011. Zagreb: University of Zagreb, 2011. ISBN 978-953-6082-15-5.
- [19] TRÁSÁK, P., ŠTRONER, M. Robustní metody vyrovnání. Geodetický a kartografický obzor č. 7/2011, str. 156 - 165, Český úřad zeměměřičský a katastrální, 2011. ISBN 0016-7096.
- [20] HANZL, V. M01-Teoretické základy fotogrammetrie. Elektronická studijní opora předmětu M01. VUT v Brně, 2007.



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

DSLR	- Fotoaparát se sklopným zrcátkem
AF	- Automatické ostření
CMOS	- Typ snímáče
CCD	- Typ snímáče
JFIF	- Formát ukládání snímku
JPEG	- Formát ukládání snímku
RAW	- Nezpracovaný formát ukládání snímku
PC	- Počítačová stanice
MNČ	- Metoda nejmenších čtverců
PMS	- PhotoModeler Scanner V6
FAST	- Fakulta Stavební
VUT	- Vysoké Učení Technické
VR	- Stabilizátor obrazu
PVO	- Prvky vnitřní orientace
EXIF	- Metadata snímku
DXF	- Formát modelu
ISO	- Citlivost snímku
RC	- Dálkově ovládaný (model)



## SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. č. 1.:** *Senzor CCD a CMOS*
- Obr. č. 2.:** *Úhel záběru při různé ohniskové vzdálenosti*
- Obr. č. 3.:** *Clona f16, f8, f4, f2.8*
- Obr. č. 4.:** *Nastavení různých hodnot ISO a způsobený šum*
- Obr. č. 5.:** *Deformace zkreslení snímku (soudek, poduška)*
- Obr. č. 6.:** *Znázornění centrální projekce v prostoru*
- Obr. č. 7.:** *Princip vyhledávání bodů optických korelačních systémů*
- Obr. č. 8.:** *Tělo kamery Nikon D7000*
- Obr. č. 9.:** *Objektiv Nikon 16 - 85mm*
- Obr. č. 10.:** *Kalibrační normál "A" z oceli*
- Obr. č. 11.:** *Kalibrační normál "B" z hliníku*
- Obr. č. 12.:** *Použitý stativ a montážní lampa*
- Obr. č. 13.:** *Úprava špatného snímku programem Zoner Photo Studio 13*
- Obr. č. 14.:** *Pracovní prostředí programu PhotoModeler Scanner*
- Obr. č. 15.:** *Prostředí programu Geomagic Studio 10*
- Obr. č. 16.:** *Schéma všech pozic snímkování*
- Obr. č. 17.:** *Ukázka vytvořených terčů, použit byl terč č.1 a č.5*
- Obr. č. 18.:** *Kódové terče 12 bitů*
- Obr. č. 19.:** *Kalibrační pole programu PhotoModeler Scanner*
- Obr. č. 20.:** *Nastavení parametrů automatické kalibrace*
- Obr. č. 21.:** *Schéma piliřové základny pro určení PSM*
- Obr. č. 22.:** *Schéma rozmístění vřícovacích bodů na kalibračním normálu*



***Obr. č. 23.: Umístění kontrolních bodů na kalibračním normálu***

***Obr. č. 24.: Měřidla v Moravské Třebové***

***Obr. č. 25.: Loket na radnici v Kyjově***

***Obr. č. 26.: Český loket na věži v Litomyšli***

***Obr. č. 27.: Snímkování krejčovského metru***

***Obr. č. 28.: Hrobní míra v Litovli***

***Obr. č. 29.: Automatické označování terčů***

***Obr. č. 30.: Standardní nástroje programu PMS***

***Obr. č. 31.: Drátový model s texturou jedné plochy***

***Obr. č. 32.: Surová mračna bodů v programu PMS (motovidlo v Moravské Třebové)***

***Obr. č. 33.: Detail modelu (měřidlo v Moravské Třebové)***

***Obr. č. 34.: Znázornění řezů měřidla (loket v Moravské Třebové)***

***Obr. č. 35.: Detail vygenerované trojúhelníkové sítě***

***Obr. č. 36.: Znázornění děr před a po opravě***

***Obr. č. 37.: Výsledný model motovidla v Moravské Třebové***





## SEZNAM TABULEK

- Tab. č.1.:*** *Základní parametry kamery D7000*
- Tab. č.2.:*** *Základní parametry objektivu Nikon 16 - 85*
- Tab. č.3.:*** *Nastavení kamery pro snímkování*
- Tab. č.4.:*** *Různé konfigurace snímků a jejich vyhodnocení*
- Tab. č.5.:*** *Konfigurace snímkování a parametry vyhodnocení*
- Tab. č.6.:*** *Parametry kalibrace z konfigurace 7*
- Tab. č.7.:*** *Určení hodnoty PSM a její přesnosti*
- Tab. č.8.:*** *Porovnání parametrů*



## OBSAH DISKU DVD

- 1\_Textová část
- 2\_Digitální přílohy (B)
- 3\_Testování kalibrace
  - Tabulka kalibračních parametrů a vyhodnocení Kalibrace.xlsx
  - Složky jednotlivých vyhodnocení PMS + snímky
- 4\_Vyhodnocení historických měřidel
  - 1\_Moravská Třebová (loket)
    - Model \* skp
    - Snímková sada
    - Umístění a poloha
    - Vyhodnocení PMS
  - 2\_Moravská Třebová (motovidlo)
    - Model \*.wrp
    - Mračna bodů ve formátu \*.txt
    - Umístění a poloha
    - Vyhodnocení PMS + snímky
  - 3\_Kyjov (loket)
    - Model \* skp
    - Snímková sada
    - Umístění a poloha
    - Vyhodnocení PMS
  - 4\_Litomyšl (loket)
    - Model \* skp
    - Umístění a poloha
    - Vyhodnocení PMS
  - 5\_Krejčovský metr
    - Model \* skp
    - Snímková sada
    - Umístění a poloha
    - Vyhodnocení PMS
  - 6\_Litovel (hrobní míra)
    - Model \* skp
    - Snímková sada
    - Umístění a poloha
    - Vyhodnocení PMS



## SEZNAM PŘÍLOH

### A Tištěné přílohy

- A1. Vytvořené vřícovací terče
- A2. Znázornění konfigurací snímkování
- A3. Protokol o vyrovnání snímkové konfigurace 7
- A4. Seznam souřadnic vřícovacích bodů
- A5. Ukázky snímků měřidel
- A6. Ukázky modelů z programu SketchUp
- A7. Detaily modelů měřidel v programu SketchUp
- A8. Ukázky řezů modelu
- A9. Ukázka modelu motovidla (Geomagic Studio 10)

### Volně vložené přílohy

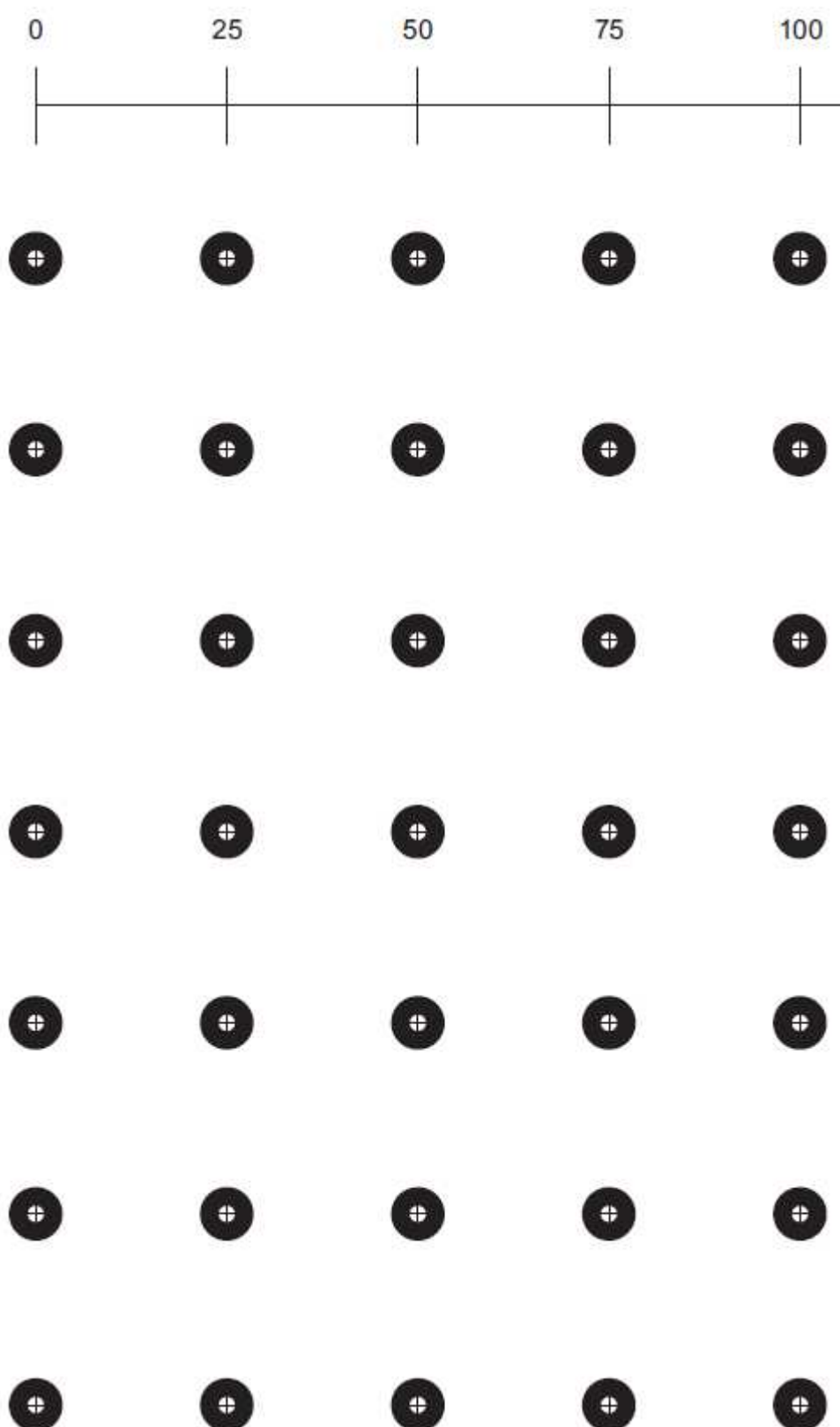
- A10. Dokumentační list měřidla v Moravské Třebové
- A11. Dokumentační list měřidla v Kyjově
- A12. Dokumentační list měřidla v Litomyšli
- A13. Dokumentační list krejčovského měřidla
- A14. Dokumentační list měřidla v Litovli

### B Digitální přílohy

- B1. Použité kalibrační pole
- B2. Použité vřícovací a kódové terče
- B3. Kalibrační protokoly
- B4. Zápisník měření vřícovacích bodů
- B5. Protokol o vyrovnání sítě
- B6. Seznam souřadnic vřícovacích bodů
- B7. Modely objektů ve formátu \*.dxf
- B8. Modely objektů ve formátu \*.skp
- B9. Model objektu ve formátu \*.wrp
- B10. Dokumentační listy ve formátu \*.pdf

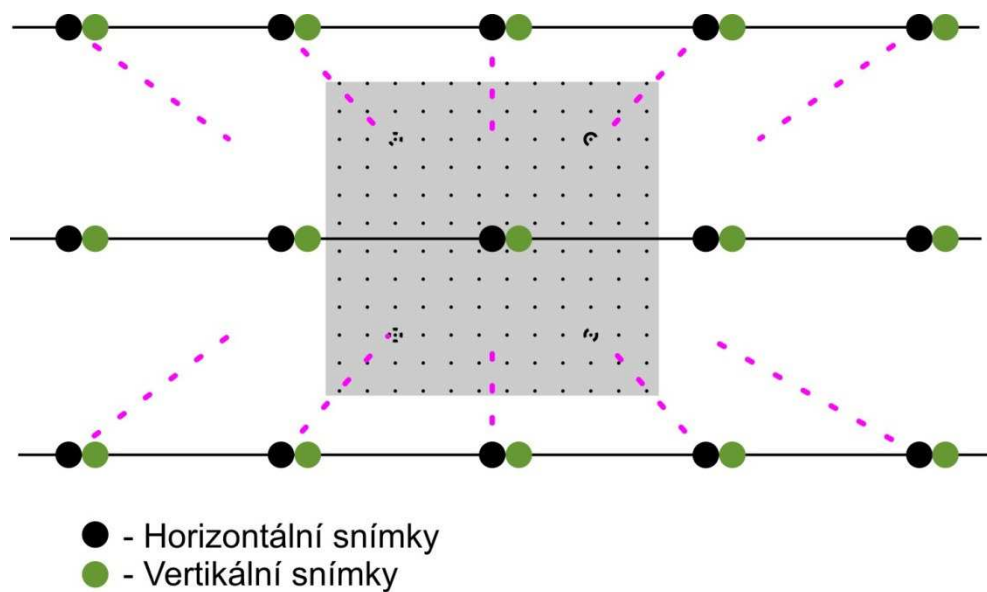


## A1. Vytvořené vlíčovací terče



## A2. Znázornění konfigurací snímkování

Konfigurace	Schéma
Verze 1	
Verze 2	
Verze 3	
Verze 4	
Verze 5	
Verze 6	
Verze 7	
Všechny snímky	





### A3. Protokol o vyrovnání snímkové konfigurace 7

Project Name: Verze\_F05\_V7.pmr

Problems and Suggestions (0)

Project Problems (0)

Problems related to most recent processing (0)

#### Information from most recent processing

Last Processing Attempt: Sun Apr 08 22:43:26 2012

PhotoModeler Version: 6.2.2.596 - final,full

Status: successful

Processing Options

Orientation: on

All photos oriented.

Number of photos oriented: 8

Global Optimization: on

Calibration: on (field calibration)

Constraints: on

Total Error

Number of Processing Iterations: 5

Number of Processing Stages: 2

First Error: 1.278

Last Error: 1.252

Precisions / Standard Deviations

Camera Calibration Standard Deviations

Camera1: NIKON D7000 [16.00] [F05\_V1]

Focal Length

Value: 16.391713 mm

Deviation: Focal: 0.001 mm

Xp - principal point x

Value: 11.874565 mm

Deviation: Xp: 0.001 mm

Yp - principal point y

Value: 7.950868 mm

Deviation: Yp: 1.0e-003 mm

Fw - format width

Value: 23.997581 mm

Deviation: Fw: 1.8e-004 mm

Fh - format height

Value: 15.896104 mm

K1 - radial distortion 1

Value: 5.148e-004

Deviation: K1: 2.5e-006

K2 - radial distortion 2

Value: -1.213e-006

Deviation: K2: 1.0e-008

K3 - radial distortion 3

Value: 0.000e+000

P1 - decentering distortion 1

Value: 2.372e-005

Deviation: P1: 1.1e-006

P2 - decentering distortion 2

Value: -4.546e-005

Deviation: P2: 1.1e-006



## Quality

### Photographs

Total Number: 8

Bad Photos: 0

Weak Photos: 0

OK Photos: 8

Number Oriented: 8

Number with inverse camera flags set: 0

### Cameras

Camera1: NIKON D7000 [16.00] [F05\_V1]

Calibration: yes

Number of photos using camera: 8

Average Photo Point Coverage: 81%

### Photo Coverage

Number of referenced points outside of the Camera's calibrated coverage: 0

### Point Marking Residuals

Overall RMS: 0.149 pixels

Maximum: 0.628 pixels

Point 106 on Photo 10

Minimum: 0.093 pixels

Point 87 on Photo 4

Maximum RMS: 0.342 pixels

Point 248

Minimum RMS: 0.059 pixels

Point 87

### Point Tightness

Maximum: 0.00019 m

Point 134

Minimum: 3.4e-005 m

Point 87

### Point Precisions

Overall RMS Vector Length: 3.94e-005 m

Maximum Vector Length: 8.81e-005 m

Point 121

Minimum Vector Length: 3.17e-005 m

Point 22

Maximum X: 4.16e-005 m

Maximum Y: 3.99e-005 m

Maximum Z: 7.27e-005 m

Minimum X: 9.96e-006 m

Minimum Y: 9.94e-006 m

Minimum Z: 2.41e-005 m



#### A4. Seznam souřadnic vřícovacích bodů

##### Seznam souřadnic vřícovacích bodů

Na zdi	č.b.	Y	X	Z
=====				
	1001	500.0025	1000.8669	100.9373
	1002	500.0054	1000.4290	100.9372
	1003	500.0080	1000.0009	100.9373
	1004	500.0056	1000.6526	100.7356
	1005	500.0083	1000.1849	100.7094
	1006	500.0035	1000.8671	100.5270
	1007	500.0064	1000.4031	100.5274
	1008	500.0058	1000.0008	100.5085
	1009	500.0073	1000.6537	100.3173
	1010	500.0079	1000.1881	100.3158
	1011	500.0000	1000.8708	100.0010
	1012	500.0002	1000.4101	100.0018
	1013	500.0000	1000.0000	100.0000

Normál A	č.b.	Y	X	Z
=====				
	2001	499.9676	1000.7178	100.6972
	2002	499.9693	1000.6162	100.6945
	2003	499.8694	1000.5733	100.6962
	2004	499.9710	1000.5190	100.6921
	2005	499.9721	1000.4338	100.6900
	2006	499.9725	1000.4365	100.6160
	2007	499.9730	1000.4394	100.5449
	2008	499.9222	1000.4391	100.4972
	2009	499.9732	1000.4431	100.4498
	2010	499.9730	1000.4456	100.3664
	2011	499.8731	1000.4456	100.2973
	2012	499.9726	1000.4493	100.2655
	2013	499.9719	1000.4519	100.1852
	2014	499.9712	1000.4547	100.1040

Normál B	č.b.	Y	X	Z
=====				
	3001	499.9738	1000.4993	100.8328
	3002	499.9760	1000.4157	100.8418
	3003	499.8796	1000.3543	100.8358
	3004	499.9788	1000.2964	100.8261
	3005	499.9791	1000.2162	100.8363
	3006	499.9807	1000.2181	100.7832
	3007	499.9795	1000.2333	100.7007
	3008	499.9320	1000.2258	100.6410
	3009	499.9795	1000.2233	100.5837
	3010	499.9784	1000.2382	100.4995
	3011	499.8810	1000.2293	100.4406
	3012	499.9784	1000.2286	100.3813
	3013	499.9777	1000.2428	100.3216
	3014	499.9773	1000.2447	100.2524



## A5. Ukázky snímků měřidel



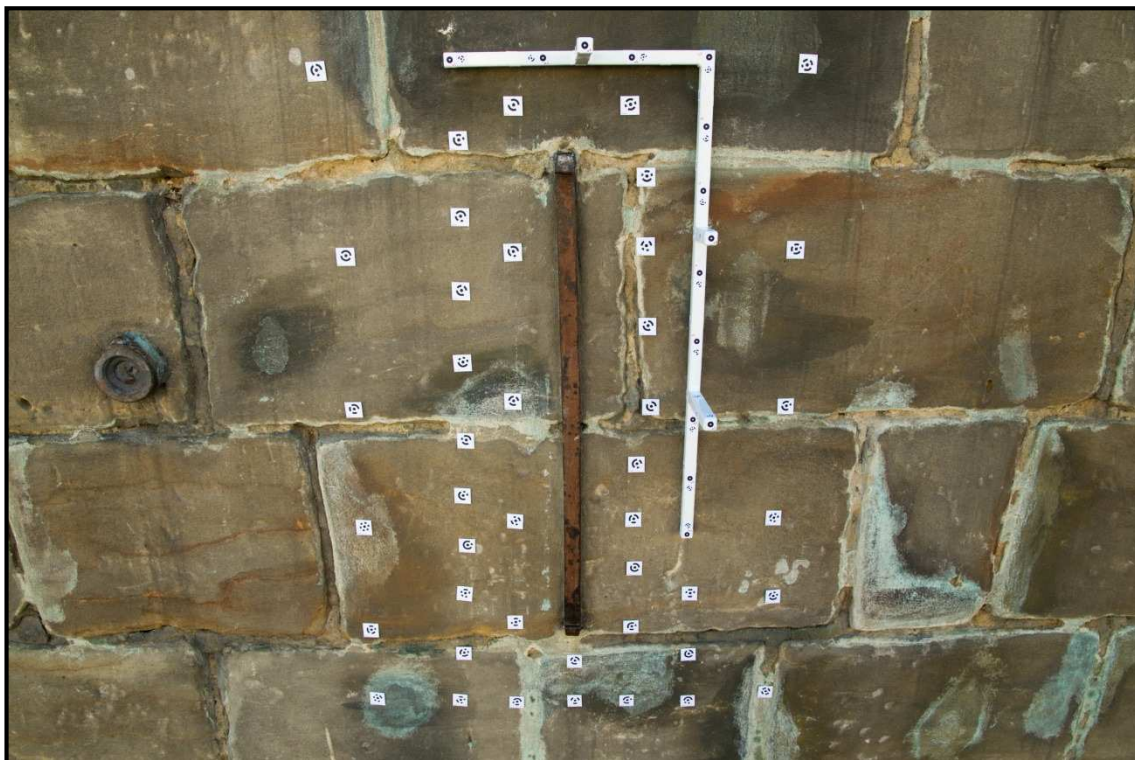
Loket v Moravské Třebové.



Motovidlo v Moravské Třebové.

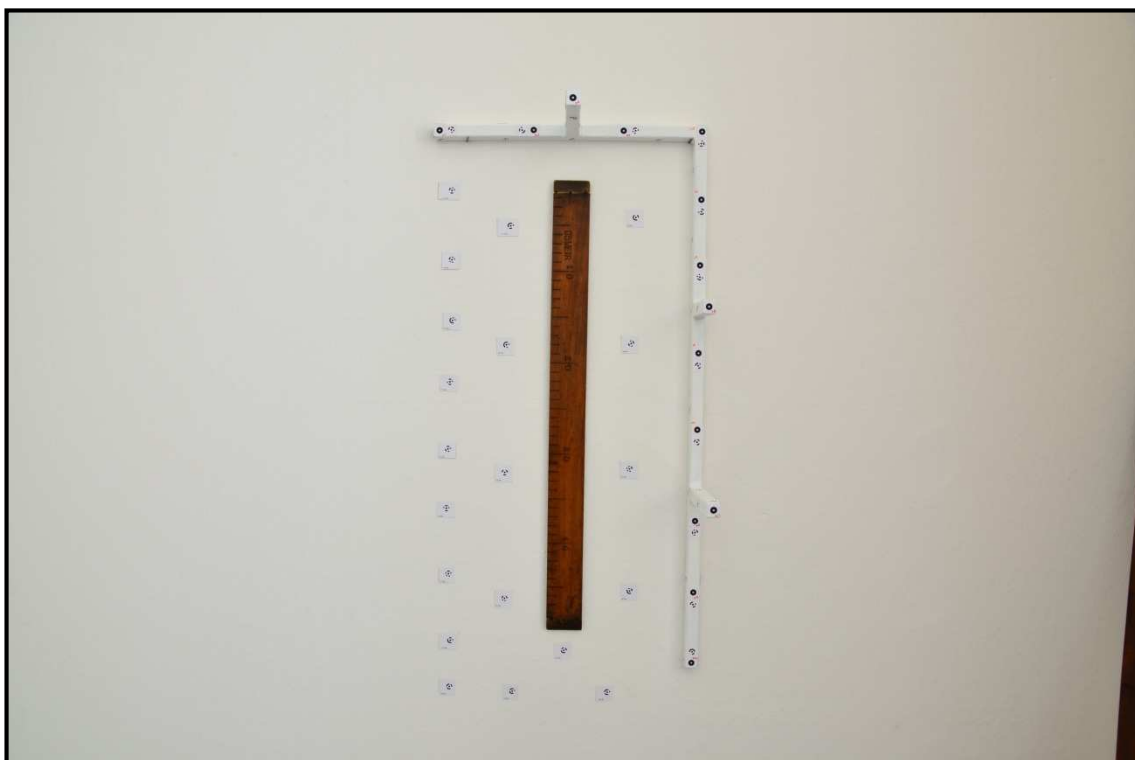


Loket v Kyjově.

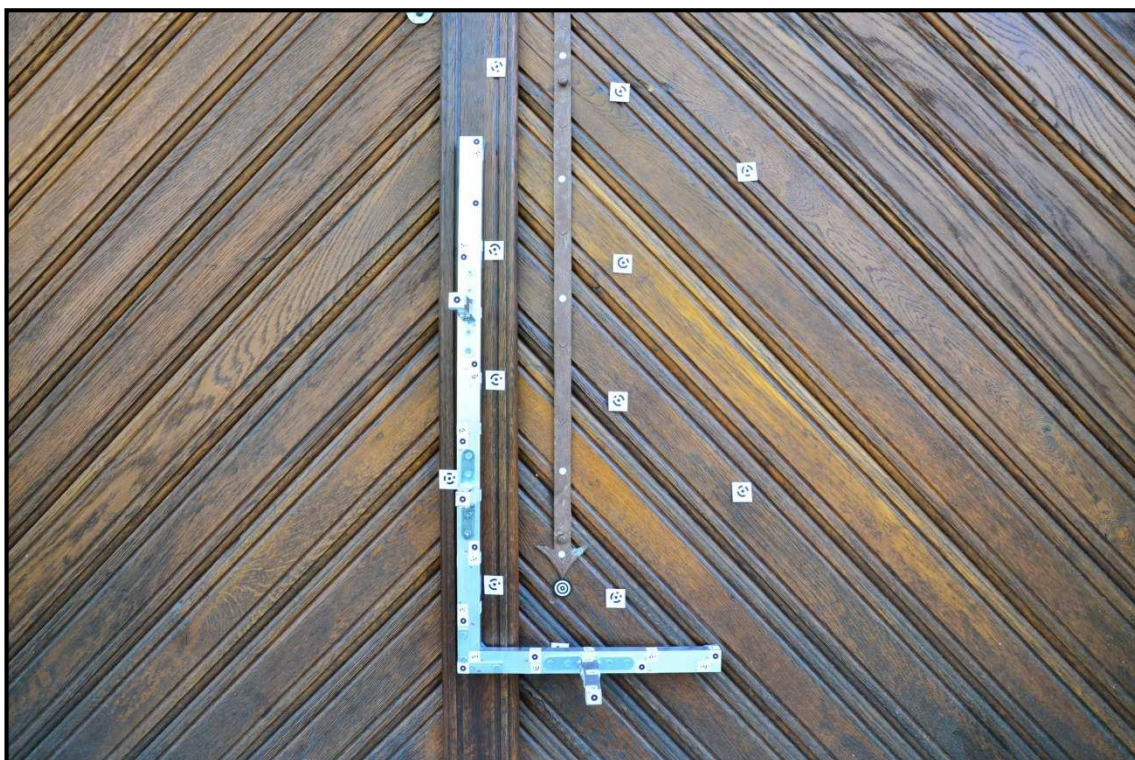


Loket v Litomyšli.





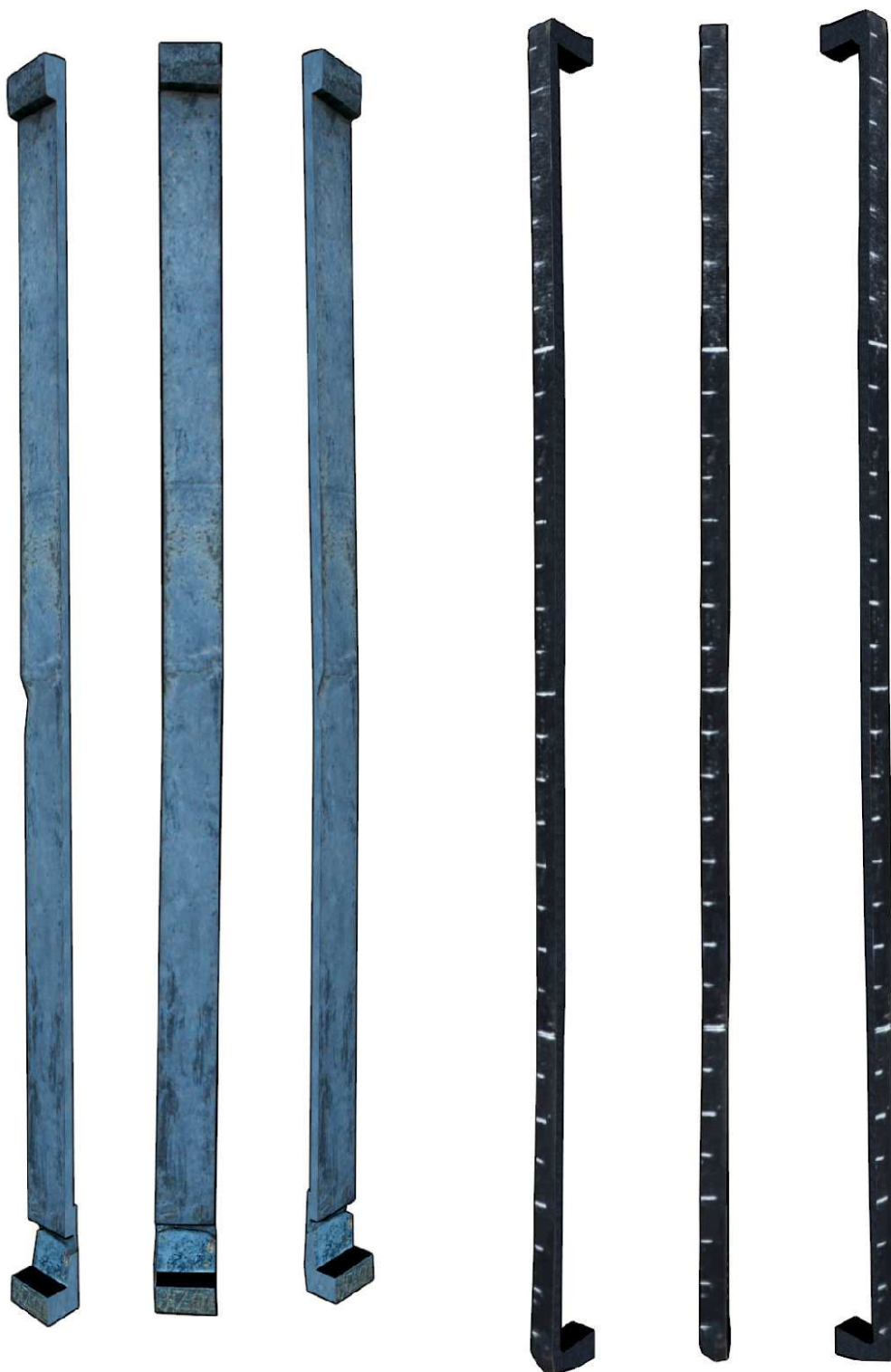
Krejčovské měřidlo.



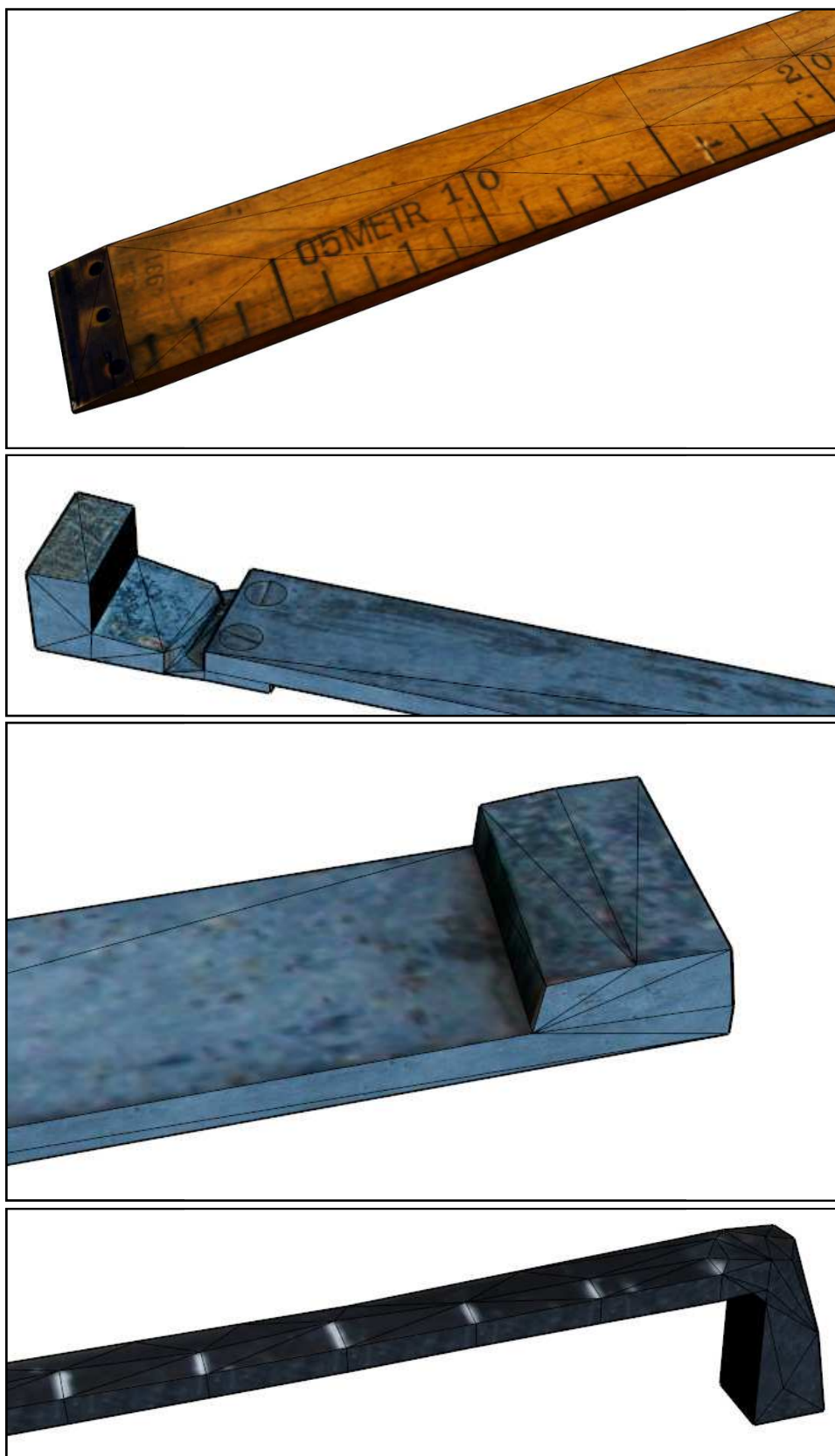
Hrobní míra v Litovli.

## A6. Ukázky modelů z programu SketchUp

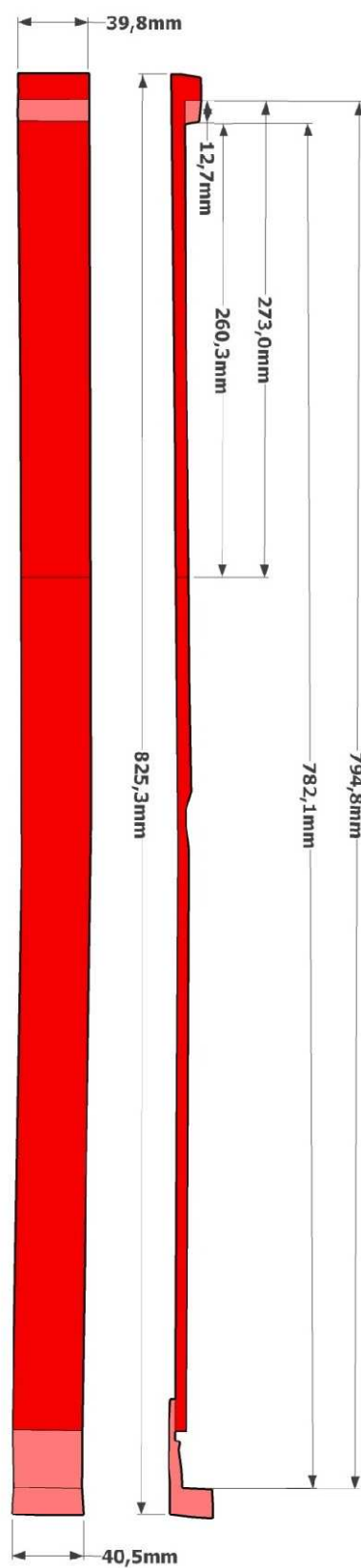
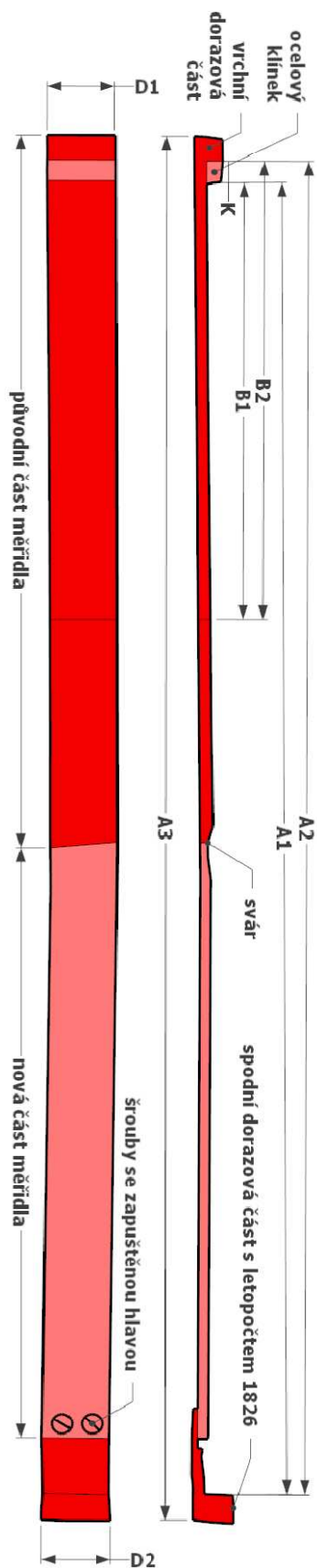
Modely měřidel v Moravské Třebové a Kyjově v Programu SketchUp



## A7. Detaily modelů měřidel v programu SketchUp



## A8. Ukázky řezů modelu





**A9.** Ukázka modelu motovidla (Geomagic Studio 10)

