



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

# MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ STŘEŠNÍ KONSTRUKCE

DEFORMATION MEASUREMENT OF ROOF STRUCTURE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Hubáček

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BUREŠ, Ph.D.

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3646 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3646R003 Geodézie a kartografie (N)
Pracoviště	Ústav geodézie

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. David Hubáček
Název	Měření posunů a přetvoření střešní konstrukce
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

doc. Ing. Radovan Machotka, Ph.D.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

ANDĚL J. – Matematická statistika, SNTL, Praha 1978

BÖHM J., RADOUCH V., HAMPACHER M. – Teorie chyb a vyrovnávací počet, GKP Praha, 1990

BUREŠ J., SLÁMA J. - Měření deformací ocelových střešních vazníků výrobní haly výhybkárny Prostějov. Sborník přednášek z 38. geodetických dnů v Brně, Spolek zeměměřičů Brno, 2002

DUBIŠAR P. – Charakteristiky vnitřní spolehlivosti polohové sítě, GaKO 39/81, Praha 1993

INGEDULD M., JANDOUREK J., RATIBORSKÝ J., BLAŽEK R. – Metody výpočtu a vyrovnání geodetických sítí, skriptum, ČVUT Praha 1993

KRUMPHANZL V., MICHALČÁK O. – Inženýrská geodézie II, Kartografia, n.p., Praha 1975

ŠVÁBENSKÝ O., ŠVEC M., VITULA A., FIŠER Z. – Měření odchylek tvaru kruhových konstrukcí. Knižnice odborných a vědeckých spisů, VUT v Brně, svazek B-125, 1990

ŠVÁBENSKÝ O., VITULA A. – Inženýrská geodézie – Návody ke cvičením II, VUT v Brně, 1994

SEDLÁČEK S. – Programový systém GNET, uživatelská příručka, Brno 1996

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Podílejte se na etapovém zaměření posunů a přetvoření dlouhodobě sledované střešní konstrukce bazénové haly v Brně. Soustřeďte se zejména na trigonometrickou metodu s využitím elektronických přístrojů a metodu laserového skenování. Zpracujte naměřená data, vyhodnoťte deformace konstrukce a graficky je znázorněte. Analyzujte výsledky z hlediska přesnosti.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá vyhodnocením posunů a přetvoření dřevěné střešní konstrukce velkého rozpětí bazénové haly aquaparku v Brně – Kohoutovicích. Cílem práce je porovnání a ověření využitelnosti metody laserového skenování pro vyhodnocování posunů a přetvoření. Porovnání bylo provedeno vůči polární metodě s veličinami měřenými totální stanicí. V rámci práce byla vykonána dvě etapová měření, na základě kterých bylo provedeno porovnání obou metod. Data získána polární metodou byla zpracována pomocí MNČ, data z laserového skenování byla zpracována v tabulkovém procesoru Excel. Z porovnání obou metod vyplývá, že metodou laserového skenování dosahujeme srovnatelné přesnosti jako při určení polární metodou. Je tedy možné využít metodu laserového skenování pro měření posunů a přetvoření.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

měření posunů a přetvoření, MNČ, metoda laserového skenování, polární metoda, dřevěná střešní konstrukce

## **ABSTRACT**

The thesis deals with the evaluation of displacements and deformation of the large span wooden roof structure of the aquapark hall in Brno - Kohoutovice. The task of this work is to compare and verify the applicability of the laser scanning method for the evaluation of displacements and deformation. The comparison was performed with regard to the polar method with quantities measured by the total station. As part of the work, two-stage measurements were performed on the basis of which a comparison of both methods was performed. The data obtained by the polar method were processed using LSM, the data from laser scanning were processed in an Excel spreadsheet. A comparison of the two methods shows that we have achieved a similar level of accuracy with the laser scanning method when compared to the polar method. It is therefore possible to use the laser scanning method to measure displacements and deformation.

## **KEYWORDS**

measurement of displacements and deformations, LSM, laser scanning method, polar method, wooden roof structure

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Bc. David Hubáček *Měření posunů a přetvoření střešní konstrukce*. Brno, 2020.

72 s., 28 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geodézie. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Měření posunů a přetvoření střešní konstrukce* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 3. 6. 2020

---

Bc. David Hubáček  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Měření posunů a přetvoření střešní konstrukce* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 3. 6. 2020

---

Bc. David Hubáček  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Burešovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, cenné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval Ing. Ladislavu Bártovi Ph.D. za konzultace k laserovému skenování. Také bych rád poděkoval rodině za veškerou podporu v průběhu celého studia.

# OBSAH

1	ÚVOD .....	10
2	MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ STAVEBNÍCH OBJEKTŮ .....	11
2.1	Základní pojmy .....	12
2.2	Geodetické metody pro měření posunů a přetvoření .....	13
2.3	Negeodetické (fyzikální) metody pro měření posunů a přetvoření .....	17
3	PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY .....	19
4	MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ DŘEVĚNÉ STŘEŠNÍ KONSTRUKCE BAZÉNOVÉ HALY .....	22
4.1	Popis sledovaného objektu .....	22
4.2	Rozmístění sledovaných bodů .....	24
5	POUŽITÉ METODY MĚŘENÍ A PŘÍSTROJE .....	25
5.1	Polární metoda .....	25
5.2	Metoda laserového skenování .....	26
6	REALIZACE ETAPOVÝCH MĚŘENÍ .....	27
6.1	Měřické práce .....	27
6.2	Zaměření 5. etapy (12/2019) .....	27
6.3	Zaměření 6. etapy (03/2020) .....	28
7	ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÝCH DAT .....	29
7.1	Zpracování dat měřených polární metodou .....	29
7.1.1	Analýza vnitřní přesnosti úhlového a délkového měření .....	29
7.1.2	Výpočet souřadnic pomocí MNČ .....	29
7.2	Zpracování dat měřených metodou laserového skenování .....	31
7.2.1	Filtrace dat .....	31
7.2.2	Výpočet přesnosti laserového skenování .....	32
7.2.3	Analýza přesnosti laserového skenování v závislosti na zpětné odrazivosti materiálu .....	34
7.2.4	Analýza přesnosti laserového skenování v závislosti na úhlu dopadu paprsku skeneru .....	35
8	VYHODNOCENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ .....	36
8.1	Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou .....	37
8.2	Vyhodnocení rozdílů etap měřených metodou laserového skenování .....	41
8.3	Vyhodnocení rozdílů obou použitých metod .....	45
8.3.1	Rektifikace laserového skenování odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech .....	48



8.3.2	Rektifikace laserového skenování odstraněním systematických odchylek skenovaných dat .....	55
9	INTERPRETACE VÝSLEDKŮ .....	61
9.1	Porovnání získaných výsledků s již publikovanými výsledky .....	62
9.2	Zhodnocení efektivity obou použitých metod .....	63
10	ZÁVĚR.....	64
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK .....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	68
	SEZNAM TABULEK A GRAFŮ .....	69
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

# 1 ÚVOD

Dřevo jako tradiční přírodní stavební materiál má v současné době nezastupitelné místo ve stavitelství, a to nejen díky jeho architektonicky příjemnému vzhledu, příjemně působícího na člověka, ale především díky jeho dostupnosti, opracovatelnosti, dobrým tepelně-izolačním vlastnostem, a hlavně jeho poměrně vysoké pevnosti v poměru k nízké hmotnosti. V dnešní době se ve stavebnictví využívá dřeva jako stavebního materiálu nejčastěji při stavbách krovů, různých typů dřevostaveb a při stavbách konstrukcí s velkým rozpětím – nejčastěji v kombinaci s ocelovými spojovacími prvky. [1]

Tyto konstrukce je nutné během a po dokončení výstavby monitorovat z důvodu ověření jejich skutečného provedení v daných podmínkách. Působením vnějších podmínek dochází nejčastěji k dosedání, dotvarování a dalším změnám prostorových vztahů stavební konstrukce. [1]

Předmětem diplomové práce je měření a vyhodnocení posunů a přetvoření střešní konstrukce velkého rozpětí bazénové haly aquaparku v Brně – Kohoutovicích. V rámci práce bylo vykonáno zaměření dvou etap pomocí trigonometrické metody s využitím totální stanice a metody laserového skenování. Data získána totální stanicí byla vypočtena pomocí MNČ v programu GNET, data získána laserovým skenováním byla zpracována pomocí tabulkového procesoru Excel. Cílem práce je porovnání metody laserového skenování vůči klasickým metodám, a to především z hlediska přesnosti a využitelnosti laserového skenování pro vyhodnocení posunů a přetvoření.

Výsledkem práce je číselné a grafické znázornění zjištěných posunů a přetvoření posuzované střešní konstrukce.

## 2 MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ STAVEBNÍCH OBJEKTŮ

Stavební objekty a konstrukce všeobecně mohou v důsledku působení různých vnějších vlivů vykazovat nestabilitu prostorové polohy. Těmito vlivy jsou například různé složení a změny zatížení základové půdy, změna hladiny podzemních vod, dynamické provozní účinky, tlak vyvolaný sousedními objekty, seismická činnost, a dále vlivy jako jsou sluneční záření, působení větru, změna teploty a vlhkost. V důsledku těchto vlivů může docházet ke změně polohy jako celku (posun) nebo ke změně jejich tvaru (přetvoření), případně může docházet ke kombinaci obou jevů. Takové změny stavebních objektů jsou ovšem vždy nežádoucí, jelikož mohou narušovat bezpečnou funkci těchto objektů. Z těchto důvodů je potřeba tyto změny a jejich časový vývoj pravidelně určovat pomocí měření pozorovaných bodů. Hlavním účelem tohoto měření je získání informací o velikosti změn a rychlosti jejich vývoje. Tyto informace jsou nutné pro návrh opatření pro obnovení bezpečné funkce objektů. [2]

Základním dokumentem zabývajícím se problematikou měření posunů a přetvoření je technická norma ČSN 73 0405 *Měření posunů stavebních objektů*. Norma popisuje účel měření, projekt měření, požadavky na přesnost, samotné měření a v neposlední řadě způsob interpretace výsledků měření. [3]

Měření posunů a přetvoření se uskutečňuje v několika různých fázích procesu výstavby:

- při laboratorních zkouškách a testování vlastností konstrukčních prvků,
- při zakládání stavebních objektů,
- v průběhu výstavby,
- po dokončení výstavby,
- při uvedení objektu do provozu (zatěžovací zkoušky),
- v průběhu provozu objektů (funkční a bezpečnostní zkoušky). [4]

Důležitým faktorem při měření posunů a přetvoření je volba časových intervalů mezi jednotlivými etapami, a to tak, aby bylo umožněno plynulé zachycení průběhu změn objektu, včetně okolností, které tyto změny způsobily. Velký důraz je zde kladen na vykonání základního měření (nulté etapy). Zpravidla je měřena s vyšší přesností, než etapy následující, a to z důvodu, že k této etapě se počítají hodnoty posunů a přetvoření pozorovaných bodů v jednotlivých etapách. Měření probíhá na vhodně osazené a stabilizované měřické značce na pozorovaném objektu, jejichž stabilizace a osazení musí zaručovat jejich trvanlivost po celou dobu měření. Osazení těchto značek by mělo být konzultováno s projektantem a statikem, aby bylo správně charakterizováno vlastní chování samotného objektu. V průběhu měření je mimo vlastního měření zaznamenáván

také stav stavebního objektu, provozní podmínky, faktory, které by mohly ovlivnit výsledky měření a jejich přesnost, ale také teplota, tlak a vlhkost vzduchu. [4]

Na základě měření můžeme vyhodnocovat posuny relativní, které charakterizují změny v soustavě vztažných bodů, nebo absolutní, které charakterizují změny vzhledem k soustavě vztažných bodů. Posuny stavebních objektů pozorujeme ve směru horizontálním a vertikálním, které jsou v praxi zpravidla daleko větší. Ve směru vertikálním posuzujeme sedání a zdvih objektu, průhyb nebo náklon. V horizontálním směru posuzujeme posuny ve vodorovné rovině nebo pootočení. Existují také metody měření, které umožňují určit oba tyto posuny a tím určit posun prostorový. Určení změny tvaru objektu (přetvoření) nelze provést přímo, ale odvodíme jej z vyhodnocených posunů. [2]

## 2.1 Základní pojmy

- **pozorovaný bod** – bod osazený na sledovaném objektu
- **vztažná soustava** – soubor vztažných bodů stabilizovaný mimo sledovaný objekt a zónu jeho působení
- **vztažný bod** – bod stabilizovaný mimo sledovaný objekt a jeho vliv
- **připojovací bod** – vztažný bod sloužící k polohovému nebo výškovému připojení, pokud možno co nejbližší měřeného objektu
- **stanoviskový bod** – vztažný bod, který je stanoviskem měřících bodů
- **ověřovací bod** – vztažný bod, jímž se ověřuje stálost polohy připojovacího nebo stanoviskového bodu
- **orientační bod** – bod sloužící k orientaci směrových osnov, volí se, co nejdále od sledovaného objektu
- **etapové měření** – opakované zaměření sítě vztažných a pozorovaných bodů v určeném časovém intervalu
- **základní (nultá) etapa** – počáteční (výchozí) etapa měření, vzhledem k níž jsou počítány posuny, obvykle je zaměřena s vyšší přesností
- **posun** – prostorová změna v poloze stavebního objektu nebo jeho části oproti poloze v základní nebo předchozí etapě vzhledem k vztažným bodům
- **posun relativní** – změna detekovaná v soustavě pozorovaných bodů

- **posun absolutní** – změna vzhledem k soustavě vztažných bodů
- **přetvoření** – změna tvaru konstrukce objektu vůči tvaru v základní nebo předchozí etapě, při posunu nemusí nastat přetvoření, ale vzhledem k tomu, že konstrukce jsou pružná tělesa, dochází obvykle k posunu a přetvoření současně
- **sedání** – svislá složka posunu směrem dolů
- **zdvih** – svislá složka posunu směrem nahoru
- **náklon** – odchýlení od svislice
- **pootočení** – úhlová odchylka objektu od jeho původní polohy, osa otáčení je obecně umístěna
- **průhyb** – přetvoření konstrukce ve směru kolmém na převládající rozměr

Pojmy této kapitoly byly čerpány z literatury [2], [4] a [5].

## 2.2 Geodetické metody pro měření posunů a přetvoření

### Geometrická nivelace

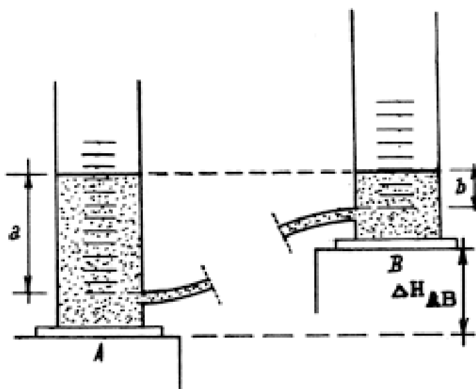
Metoda pro měření svislých posunů, používá se především ve variantě velmi přesné nivelace (VPN) nebo přesné nivelace (PN). Během měření je nutné dodržovat technologický postup geometrické nivelace (ze středu). Pokud je nutné provádět měření s nestejně dlouhými záměry, je vždy nutné zavádět opravy ze sklonu horizontu přístroje. Při použití VPN lze dosáhnout přesnosti 0,1 – 0,3 mm. Měřicí systém používaný pro velmi přesnou nivelaci zobrazuje Obrázek 1. [4]



Obrázek 1 – Měřicí systém velmi přesné nivelace – Leica LS15 [6]

### Hydrostatická nivelace

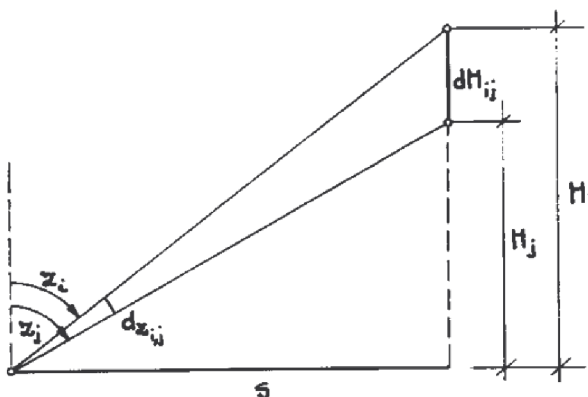
Metoda pro měření svislých posunů vycházející z principu spojených nádob. Nevýhodou metody je malý rozsah měřených převýšení. Metodou lze dosáhnout vysoké přesnosti (na úrovni VPN), je využitelná i v hůře přístupných prostorech. Metoda je časově náročná a vyžaduje využití jednoúčelového přístrojového vybavení, které se vymyká běžné praxi. Princip metody zobrazuje Obrázek 2. [2]



Obrázek 2 – Princip hydrostatické nivelace [5]

### Trigonometrické výškové měření

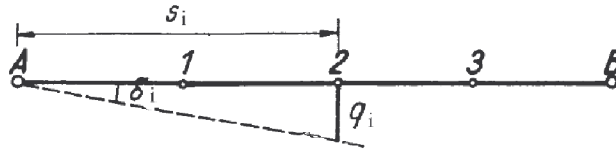
Metoda pro měření svislých posunů, vychází z opakovaného měření vodorovných vzdáleností a svislých úhlů z pevných stanovisek (nejlépe pilířů s nucenou centrací). Pro měření se využívá teodolitů vyšší přesnosti. Metoda nedosahuje přesnosti PN, využitelná je zpravidla tam, kde není použití nivelace vhodné. Dle zkušeností z praxe lze dosáhnout při délkách záměr do 150 m přesnosti určení okolo 0,5 mm. Princip metody zobrazuje Obrázek 3. [2]



Obrázek 3 – Princip trigonometrického výškového měření [2]

### Metoda záměrné přímky

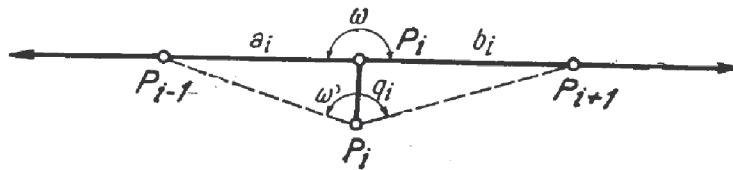
Jednoduchá a poměrně přesná metoda měření výškových i horizontálních posunů. Určuje pouze jednu složku posunu, a to ve směru kolmém k záměrné přímce. Principem metody je přímé nebo nepřímé určování příčných odchylek pozorovaných bodů vůči dané záměrné přímce. Princip metody zobrazuje Obrázek 4. [2]



Obrázek 4 – Princip metody záměrné přímky [2]

### Metoda polygonová

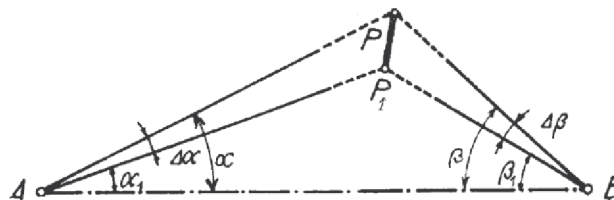
Metoda určuje pouze jednu složku horizontálního posunu ve směru kolmém k danému oboustranně připojenému polygonovému pořadu. Posuny a přetvoření určujeme pomocí změn vrcholových úhlů mezi etapami, přičemž předpokládáme neměnicí se délky stran pořadu. Princip metody zobrazuje Obrázek 5. [2]



Obrázek 5 – Princip polygonové metody [2]

### Trigonometrická metoda

Metoda využívá protínání ze směrů, které jsou orientovány vzhledem k místní účelové síti. Pomocí této metody získáváme plnou informaci o velikosti a směru posunu (v obou souřadnicích). Metodou lze dosáhnout při délkách záměr do 350 metrů přesnosti 0,3 – 0,5 mm. Princip metody zobrazuje Obrázek 6. [2]

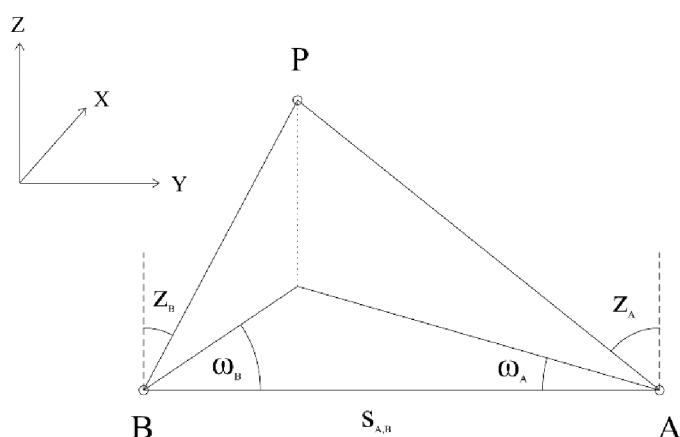


Obrázek 6 – Princip trigonometrické metody [2]

### Prostorové protínání z úhlů

Metoda využívá prostorového protínání z úhlů. Posuny jsou vyhodnoceny na základě opakovaného měření vodorovných a zenitových úhlů z pevných stanovisek. Metoda

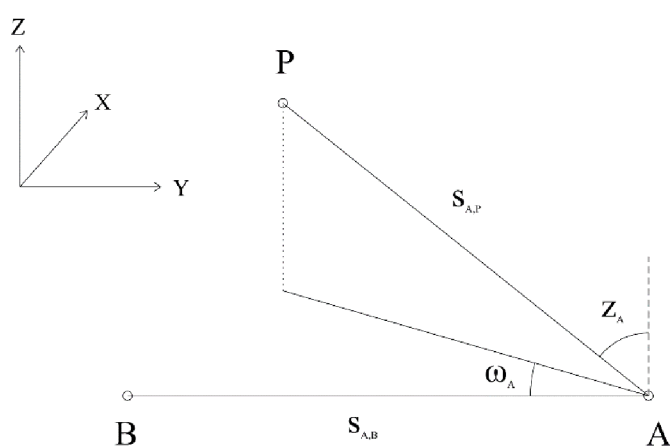
nachází největší využití při měření nepřístupných míst ve vzdálenosti do 150 metrů, při této vzdálenosti je možné dosáhnout přesnosti až 0,5 mm. Nejčastěji se používá pro mostní nebo střešní konstrukce. Princip metody zobrazuje Obrázek 7. [7]



Obrázek 7 – Princip metody prostorového protínání z úhlů [autor]

### Prostorová polární metoda

Metoda využívá měření prostorových polárních souřadnic (vodorovný směr, zenitový úhel a šikmá délka). Měření probíhá ve dvou polohách dalekohledu z důvodu vyloučení přístrojových chyb. Přesnost určení závisí na volbě přístroje, obvykle dosahuje 0,3 mm – 0,5 mm. Princip metody zobrazuje Obrázek 8. [5]



Obrázek 8 – Princip prostorové polární metody [autor]

### Fotogrammetrie

Moderní metoda se schopností zachytit stav sledovaného objektu v jediném časovém okamžiku, tím získává výhodu před ostatními klasickými geodetickými metodami. Nevýhodou je nižší dosahovaná přesnost určení, kterou ovlivňuje volba kamery, vzdálenost objektu od kamery a další vlivy. Výsledky je nutné zpracovat ve speciálním software, což znemožňuje poskytování výsledků v krátkém časovém odstupu. [2]



### **Metoda GNSS a DPZ**

Tyto metody jsou využívány zejména pro měření posunů a přetvoření na rozsáhlejších územích (například pro měření poklesů poddolovaného území). Přesnost dosažitelná těmito metodami je však nižší, zhruba 3–5 mm v každé souřadnici. [5]

### **Metoda laserového skenování**

Progresivní metoda, která umožňuje rychlé bezkontaktní získání prostorových souřadnic určených z prostorových polárních souřadnic (vodorovný a zenitový úhel, vzdálenost). Skenované body jsou získány v pravidelném úhlové kroku pomocí rozmetání laserového paprsku a jeho odražení od povrchu konstrukce zpět do skeneru. Hlavní výhodou je rychlost skenování a možnost využití pro monitoring nedostupných nebo tvarově složitých konstrukcí. Výsledkem měření je mračno bodů. Přesnost určení je při vzdálenostech do 80 metrů 1–3 mm. Laserový skener FARO zobrazuje Obrázek 9. [8]



Obrázek 9 – Laserový skener FARO Focus S [9]

## **2.3 Negeodetické (fyzikální) metody pro měření posunů a přetvoření**

Negeodetické metody využívají zejména poznatků z elektroniky, optiky, mechaniky a automatiky. Tyto metody jsou vhodným doplňkem geodetických metod, určují však pouze relativní deformace objektů.

### **Tenzometry**

Zařízení umožňující odečítat velmi malé délkové změny. Snímač převádí deformaci (prodloužení, prohnutí) na změnu odporu. Výhodou této metody je možnost osazení na sledovaný objekt, případně jejich zabudování do sledovaného objektu, díky čemuž může měření probíhat automatizovaně (použito např. při dlouhodobém sledování mostu Gagarin). Přesnost určení deformací je v řádu mikrometrů. Tenzometr je zobrazen na Obrázku 10. [10], [11]



Obrázek 10 – Tenzometrický snímač [11]

### **Další negeodetické metody**

Dalšími negeodetickými metodami pro měření posunů je použití sklonoměrů a digitálních libel (pro určení relativní změny sklonu), laserové interferometrie (pro velmi přesné měření vzdáleností), nebo dilatometrů (mechanické měření posunů ve třech osách).

Obecně lze říct, že negeodetické metody umožňují určit několikanásobně menší hodnoty posunů, než metody geodetické. [5]

### **3 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY**

#### **Geodetické metody při měření přetvoření konstrukcí**

Pro zajištění správné funkčnosti stavby je nutné zjištění a pozorování skutečných geometrických odchylek od projektovaného stavu. Touto problematikou se zabývá článek [7], zaměřující se na přetvoření dřevěných konstrukcí velkých rozpětí.

V příspěvku je popsána důležitost a podstata měření přetvoření včetně způsobů signalizace pozorovaných bodů a metod měření. Mimo běžných geodetických metod je zmíněna také možnost využití progresivní metody laserového skenování. K této problematice je uveden příklad využití laserového skenování systémem CYRA, použitým při kontrole prostorových vztahů střešní konstrukce víceúčelové haly Sazka Aréna (dnes O2 aréna) v Praze.

Dále článek zmiňuje konkrétní příklad geodetického měření sportovní haly v Bílovci. Jedná se o konstrukci velkého rozpětí (59,0 metů) vyrobenou ze dřeva. Hala byla realizována v roce 2001 a následně proběhlo několik etap měření. Výsledky měření jsou zobrazeny formou tabulek a grafického znázornění.

V závěru autoři zmiňují nutnost měření deformací nosných konstrukcí pro ověřování jejich skutečného chování. A také, že je nutné provádět měření v určitých intervalech pro stanovení nárustu deformací.

#### **Monitorování mostů pomocí laserového skenování**

Monitoring mostních konstrukcí je velmi důležitý pro jejich správu a plánování údržby. Odstrašujícím příkladem zanedbání údržby může být například pád mostu v Janově (Itálie 2018), který si vyžádal 43 obětí. Problematikou týkající se monitorování mostních konstrukcí s využitím laserového skenování se zabývá článek [12].

Příspěvek se zabývá monitoringem mostu pro pěší přes řeku Malý Dunaj v Bratislavě. Jedná se o 54 metrů dlouhý ocelový visutý most. Pro měření byla využita technologie laserového skenování přístrojem Leica ScanStation2 umožňující skenování až do 300 metrů s přesností měření v jednom bodě 6 mm.

Autoři ze Slovenské technické univerzity v Bratislavě provedli celkem dvě etapy měření, a to v prosinci 2014 a v březnu 2015. Skenována byla spodní část mostovky z jednoho stanoviska, které bylo v obou etapách přibližně totožné. Minimální hustota bodů v mračnu byla 3 mm x 3 mm.

Získaná data byla transformována do lokálního souřadného systému mostu. Hlavním úkolem vyhodnocení bylo určení vertikálních posunů. Pro vyhodnocení sloužily malé rovinné plošky o rozměrech 0,1 m x 0,1 m. Celkem bylo definováno 42 plošek, jejichž poloha v rovině XY byla definována průsečíkem úhlopříček těchto rovin. Souřadnice Z byly vypočteny promítnutím bodů do regresní roviny. Svislé posuny byly následně vypočteny z rozdílů výšek v obou etapách. Výsledky jsou v článku graficky znázorněny.

V závěru příspěvku autoři zmiňují, že laserové skenování lze použít pro sledování posunů mostů, vyrobených z materiálů, které umožňují pasivní odraz paprsku. Standardní odchylka zmíněného experimentálního měření svislého posunu byla 3 mm, což je přesnost srovnatelná s přesností konvenčních metod.

### **Laserové skenování při zatěžovacích zkouškách mostů**

Zatěžovací zkoušky mostů jsou jedním ze základních témat inženýrské geodézie. Zkoušky jsou realizovány zejména u nových a neověřených konstrukcí nebo u stávajících konstrukcí, u kterých to požaduje bezpečnost provozu. Problematikou monitorování mostní konstrukce se zabývá článek [13], který poskytuje poznatky ze zatěžovací zkoušky mostu v obci Petrov nad Desnou (Olomoucký kraj).

Vybraný most byl ve špatném technickém stavu a nevyhovoval parametrům pro provoz. Z toho důvodu bylo rozhodnuto o jeho demolici. Díky tomu se stal testovacím objektem pro ověření nových technologií zesílení mostů a následnou destruktivní zatěžovací zkoušku.

Samotná zatěžovací zkouška probíhala ve dnech 29. – 31.7.2019. Zatěžování mostu bylo realizováno betonovými panely (217,3 tun) a následně vaky s kamenivem (celkové zatížení bylo 470,6 tun). Geodetické měření bylo realizováno dvěma nezávislými metodami. Měření robotizovanými totálními stanicemi Leica MS50 a Leica MS60 proběhlo celkem v 16 etapách (1 etapa trvala cca 10 minut). Pozorované body (celkem 23) byly signalizovány pomocí minihranolů Leica GPR1. Měření totálními stanicemi mělo poskytnout srovnávací data pro laserové skenování, které probíhalo skenerem FARO X330. Z důvodů časové náročnosti proběhlo laserové skenování pouze ve 4 etapách. V nulté etapě probíhalo skenování z 8 stanovisek včetně záznamu reálných barev, v následujících etapách už pouze ze 4 stanovisek, bez záznamu barev (především kvůli úspoře času).

Výhodou laserového skenování byla možnost vyhodnotit libovolnou část konstrukce. Autoři článku v základním vyhodnocení řešili 2 podélné řezy a 7 příčných řezů. Na základě těchto řezů byly vyhodnoceny posuny. Při porovnávání mračen bodů byly vidět tvarové změny konstrukce vzniklé zatížením.

V závěru příspěvku autoři zmiňují, že hodnota směrodatné odchylky laserového skenování dosáhla cca 3 mm, měření totální stanicí poskytlo výsledky s přesností lepší jak 1 mm. Dále zmiňují, že pokud by byl počet sledovaných bodů menší nemusely by mít výsledky z totálních stanic dostatečnou vypovídající schopnost a zobrazovali by pouze lokální změny. Kdežto výsledky laserového skenování poskytují kompletní přehled o dané konstrukci. Porovnáním rozdílů mezi nultou a poslední etapou bylo zjištěno, že jsou obě metody téměř srovnatelné. Směrodatná odchylka rozdílů metod vyšla v poloze a výšce cca 2 mm.

### **Zkouška laserového systému s použitím referenčních těles**

Jedním z nejdůležitějších kritérií při aplikaci technologie laserového skenování je jeho přesnost. Touto problematikou se zabývá článek [14] autorů ze Slovenské technické univerzity v Bratislavě.

Autoři v příspěvku popisují postup, ve kterém testovali dva přístroje (Leica HDS 2500 a Callidus CP3200). Testování probíhalo skenováním geometrických těles známého tvaru a rozměru. Tato tělesa byla v tomto testu považována za etalony. Skenovaná tělesa byla při testu umístěna v různých pozicích a s jinou orientací v prostoru. Cílem testu bylo zjistit dopad těchto různých poloh skenovaných těles na přesnost modelu.

V závěru autoři zmiňují, že navržené testy přinášejí novou dimenzi v oblasti testování laserového skenování. Podle technické dokumentace by měly být parametry testovaných přístrojů (HDS 2500 a CP 3200) přibližně totožné. Během testů byly zjištěny významné rozdíly mezi jejich parametry.

## 4 MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ DŘEVĚNÉ STŘEŠNÍ KONSTRUKCE BAZÉNOVÉ HALY

### 4.1 Popis sledovaného objektu

Objektem zájmu této práce je stavba aquaparku, která se nachází v Brně – Kohoutovicích. Jedná se o poměrně nový plavecký stadion patřící mezi největší stavby svého druhu v Brně. Autory stavby, nacházející se na Libušině třídě, jsou architekti z ateliéru K4. Hlavní snahou autorů bylo jakési rozbití monotónní pravidelné kvadratické sídlištní zástavby. Původním záměrem bylo vystavení pouze bazénu pro kondiční plavání. Aquapark však do této doby v Brně nebyl, proto se návrh nakonec rozrostl do současné podoby. [15]

Areál je dispozičně rozdělen na dvě části. První částí jsou prostory zahrnující vstup, pokladnu, kanceláře, občerstvení, šatny, sprchy, posilovnu, saunu, páru. Na střeše se nachází střešní bazén, který v letních měsících nabízí krásný výhled do Libušina údolí. Druhou částí jsou pak samotné bazénové prostory, ve kterých můžeme nalézt plavecký bazén se šesti plaveckými drahami, bazén s vodními atrakcemi, whirlpool, dětské brouzdaliště a v neposlední řadě také tobogán. Bazénový komplex je zobrazen na Obrázku 11. Obrázek 12 zobrazuje interiér bazénové haly. [15]



Obrázek 11 – Bazénový komplex [1]



Obrázek 12 – Interiér bazénové haly [1]

První myšlenka na výstavbu tohoto areálu se zrodila již v roce 2002, samotná výstavba však začala až v roce 2008. Začátkem jara v roce 2009 probíhala stavba dřevěné nosné konstrukce střechy, stavba byla dokončena na jaře 2010. Provoz aquaparku byl zahájen 14. dubna 2010. [15]

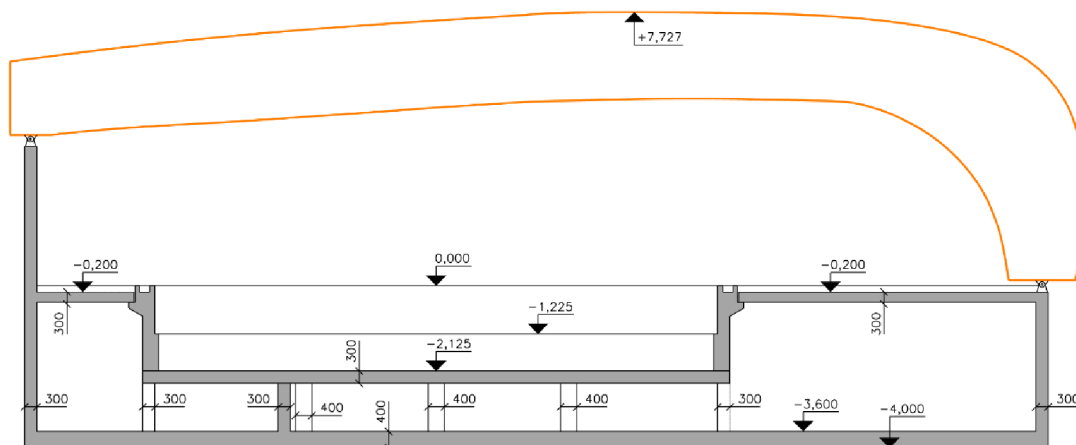
Jak již bylo zmíněno, hlavní snahou architektů bylo rozbití monotónně působícího sídliště, proto architekti ve svém návrhu jednoznačně odlišili jednoduché kubické řešení provozní části a samotné bazénové haly jejíž půdorys byl navržen jako členitý o

rozměrech cca 58 x 37,5 m. Tvar této haly mnozí přirovnávají k ležícímu pásovci. Kvůli snaze ponechat v hale co nejvíce volného prostoru bez nutnosti instalovat přebytečné podpůrné sloupy byla nosná střešní konstrukce vybudována z kombinovaných nosníků ze dřeva a oceli. Dřevo, jako hlavní konstrukční materiál střechy, bylo použito hlavně pro možnost navrhnout konstrukci velkého rozpětí a různých tvarů. V neposlední řadě je také vhodným materiálem ve vlhkostně a teplotně náročném prostředí bazénové haly. Střecha je opláštěna tmavě šedým předzvětralým titan-zinkem. Prosvětlení haly zajišťují prosklené pruhy, umístěné mezi nosnými segmenty. Jednotlivé vazníky, kterých se v hale nachází celkem devět o rozpětí od cca 25 do 35 m, jsou smontovány ze dvou částí, styk je montován pomocí ocelových prvků. Architektonické zpracování bazénové haly zobrazuje Obrázek 13. [1], [15]



Obrázek 13 – Architektonické zpracování bazénové haly [15]

Z Obrázku 14 jenž zobrazuje příčný řez v úrovni nosníku č. 1 je zřejmé, že dřevěné střešní nosníky nejsou spojeny se svislou nosnou konstrukcí ve stejné výškové úrovni. Výše položený podporový kloub leží na opěrné zdi, ten níže položený potom na sloupu. Dále můžeme na obrázku vidět, že samotný bazén neleží přímo na základové půdě, nýbrž je podepřen soustavou nosných sloupů, v jedné části je nesen vnitřní nosnou zdí. Z důvodu tohoto konstrukčního uspořádání je patrné, že by mohlo docházet k posunům a přetvoření, proto je pravidelný monitoring této střešní konstrukce žádoucí.



Obrázek 14 – Příčný řez bazénovou halou [autor]

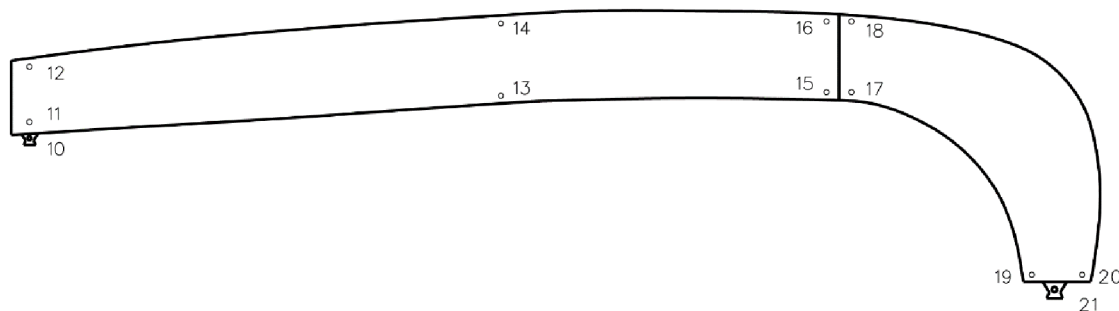
## 4.2 Rozmístění sledovaných bodů

Sledování posunů a přetvoření probíhalo na čtyřech, předem vybraných, nosnících. Ty byly vybrány tak, aby bylo možné co nejlépe vystihnout průběh posunů a přetvoření celé střešní konstrukce. Konkrétně se jedná o první tři nosníky a nosník devátý (z důvodu dilatace). Půdorys bazénové haly a sledované nosníky zobrazuje Obrázek 15.



Obrázek 15 – Rozmístění sledovaných střešních nosníků [12, úprava-autor]

Sledované body byly signalizovány nalepovacími odraznými štítky. Výhodou těchto štítků je možnost kvalitního měření délek, relativně velká životnost a také malá velikost, díky které nedochází k narušení architektonického vzhledu nosníků. Terče byly osazeny na podporových kloubech, dále byly umístěny ve dvojicích (v horní a spodní části nosníku) nad horním podporovým kloubem, v polovině rozpětí a také na styku nosníku, kde byly terče umístěny na obou stranách tohoto styku. V případě devátého nosníku byly navíc umístěny dva terče nad spodním podporovým kloubem a jeden v blízkosti horního podporového kloubu. Rozmístění pozorovaných bodů je zřejmé z Obrázku 16.



Obrázek 16 – Rozmístění pozorovaných bodů [autor]



## 5 POUŽITÉ METODY MĚŘENÍ A PŘÍSTROJE

Pro měření diplomové práce byla použita polární metoda a metoda laserového skenování.

### 5.1 Polární metoda

Polární metoda umožňuje určit prostorové souřadnice určené na základě polárních souřadnic (horizontální úhel, zenitový úhel, šikmá délka). Přesnost určení je 0,3 mm – 0,5 mm, přesnost závisí na volbě přístroje. Podrobněji byla metoda popsána v kapitole 2.2.

Pro měření polární metodou byla využita totální stanice Topcon GT-1001. Jedná se o robotickou totální stanici z řady Topcon GT. Technické parametry přístroje jsou uvedeny v Tabulce 1. Uvedená délková přesnost je platná pro měření na odrazné štítky, pomocí kterých byly pozorované (orientační) body signalizované. Pro hranolové měření délek uvádí výrobce přesnost 1 mm + 2 ppm. Totální stanice je zobrazena na Obrázku 17. [16]

Tabulka 1 – Technické parametry Topcon GT-1001 [16, zpracování autor]

Topcon GT-1001	
Úhlová přesnost	1" (0,3 mgon)
Délková přesnost	2 mm + 2 ppm
Rozsah kompenzátoru	6" (1,9 mgon)
Max. dosah	1000 m
Doba měření	0,9 s
Zvětšení dalekohledu	30 x



Obrázek 17 – Totální stanice Topcon GT-1001 [16]

## 5.2 Metoda laserového skenování

Metoda laserového skenování funguje na principu polární metody. Prostorové souřadnice jsou určeny z polárních souřadnic (horizontální úhel, zenitový úhel, šikmá vzdálenost). Výstupem z laserového skenování je mračno bodů. Přesnost určení je při vzdálenosti do 80 metrů 1–3 mm a závisí na volbě přístroje. Podrobněji byla metoda popsána v kapitole 2.2.

Pro měření metodou laserového skenování byla použita MultiStanice Leica Nova MS60. Stanice je vybavena 3D laserovým skenerem, který umožňuje skenování s rychlostí až 1000 bodů za sekundu. Technické parametry přístroje jsou uvedeny v Tabulce 2. Uvedená délková přesnost je platná pro měření na libovolný povrch, tudíž i na odrazné štítky, pomocí kterých byly pozorované (orientační) body signalizované. Pro hranolové měření délek uvádí výrobce přesnost 1 mm + 1,5 ppm. Parametry pro laserové skenování jsou uvedeny pro 1000 Hz režim skenování. MultiStanice je zobrazena na Obrázku 18. [17]

Tabulka 2 – Technické parametry Leica Nova MS60 [17, zpracování autor]

Leica Nova MS60	
Měření totální stanice	
Úhlová přesnost	1" (0,3 mgon)
Délková přesnost	2 mm + 2 ppm
Max. dosah	2000 m
Doba měření	1,5 s
Zvětšení dalekohledu	30 x
Laserové skenování	
Max. dosah	300 m
Šum	1,0 mm na 50 m
Velikost laserové stopy na 50 m	8 mm x 20 mm



Obrázek 18 – MultiStanice Leica Nova MS60 [17]

## **6 REALIZACE ETAPOVÝCH MĚŘENÍ**

Střešní konstrukce bazénové haly v brněnských Kohoutovicích je sledována již od roku 2009, kdy byla montáž střešní konstrukce dokončena. Celkem již bylo provedeno 6 etapových měření dřevěné střešní konstrukce na 4 sledovaných nosnících z celkového počtu 9 dřevěných nosníků.

### **6.1 Měřické práce**

Měření posunů a přetvoření střešní konstrukce probíhalo prostorovou polární metodou z 3 přechodných stanovisek. Měřeno bylo celkem 42 pozorovaných bodů, orientace byla vždy na body 110 a 121, jedná se o ložiska horního a spodního podporového kloubu prvního nosníku. Při měření byla snaha o provázání přechodných stanovisek tím, že z jednotlivých stanovisek byly měřeny všechny viditelné body, tj. i body, které již byly změřeny z předchozích stanovisek. Tato stanoviska byla volena v obou etapách na přibližně stejných místech, tak aby konfigurace měření byla přibližně totožná. Měření osnovy směrů vždy probíhalo ve třech skupinách a v obou polohách dalekohledu.

Oproti předchozím etapám měření posunů a přetvoření střešní konstrukce bylo v posledních dvou etapách, tj. v 5. (12/2019) a v 6. (03/2020) etapě, využito také metody laserového skenování. Skenovány byly části sledovaných nosníků v oblasti pozorovaných bodů. Skenování v obou etapách probíhalo v rastru 5 mm x 5 mm. Před samotným skenováním byly zaměřeny a přeuračeny souřadnice bodů na obou podporových kloubech všech pozorovaných nosníků. Při přeuračování těchto souřadnic se vycházelo opět z bodů 110 a 121. Přeuračené souřadnice sloužili pro orientaci skeneru na jednotlivých stanoviscích. Díky tomu bylo mračno již během měření georeferencováno a výstupem byly výsledné souřadnice ve zvoleném souřadnicovém systému.

Během etapových měření byla prováděna registrace atmosférických podmínek uvnitř haly. Ukládána byla teplota, tlak, vlhkost vzduchu a rosný bod. Před začátkem a po dokončení měření střešní konstrukce byly tytéž atmosférické podmínky měřeny také venku před budovou bazénu. Data byla automaticky ukládána pomocí přístroje D4141 značky Comet. Hodnoty teploty a atmosférického tlaku byly zadány do obou přístrojů pro fyzikální korekci měřené délky.

### **6.2 Zaměření 5. etapy (12/2019)**

Zaměření 5. etapy probíhalo v prosinci roku 2019 s odstupem 10 let od základní etapy. Měření probíhalo v nočních hodinách po uzavření aquaparku pro veřejnost. Laserové skenování bylo provedeno celkem na 6 stanoviscích, přičemž pro vyhodnocení posunů a přetvoření byly využity skeny pouze ze 3 stanovisek, zbylé skeny sloužily k celkovému

zmapování bazénové haly a strojní místnost nacházející se pod bazénem. V Tabulce 3 jsou uvedeny body, na které byly skeny pro vyhodnocení posunů orientovány.

Tabulka 3 – Přehled orientačních bodů laserové skenování 5. etapy (12/2019) [autor]

Stanovisko	Skenovaný nosník	Orientace
6001	N9	110, 121, 210*, 221*, 310*, 321*, 910*,
6002	N3	110, 210*, 310*, 921*
6003	N1, N2	121, 221*, 910*

\* body přeúčtené z výchozích bodů 110 a 121

### 6.3 Zaměření 6. etapy (03/2020)

Zaměření 6. etapy probíhalo v březnu roku 2020 s odstupem 3 měsíců od předchozí etapy. Měření opět probíhalo v nočních hodinách po uzavření aquaparku pro veřejnost. Atmosférické podmínky byly podobné jako v předchozí 5. etapě. Laserové skenování bylo provedeno celkem na 2 stanoviscích. V Tabulce 4 jsou uvedeny body, na které byly skeny pro vyhodnocení posunů orientovány.

Tabulka 4 – Přehled orientačních bodů laserové skenování 6. etapy (03/2020) [autor]

Stanovisko	Skenovaný nosník	Orientace
6001	N3, N9	110, 121, 210*, 221*, 310*, 321*, 910*,
6003	N1, N2	110, 121, 210*, 221*, 910*, 921*

\* body přeúčtené z výchozích bodů 110 a 121

## 7 ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÝCH DAT

Naměřená data z obou metod byla zpracována postupně. Nejprve proběhlo zpracování měření polární metodou a následně zpracování měření metodou laserového skenování.

### 7.1 Zpracování dat měřených polární metodou

Zpracování měřených dat bylo provedeno ve dvou krocích, nejprve proběhla analýza vnitřní přesnosti měření polární metodou a následně byly vypočteny souřadnice a charakteristiky přesnosti v prostředí programu G-NET.

#### 7.1.1 Analýza vnitřní přesnosti úhlového a délkového měření

Před samotným výpočtem v programu G-NET byla z naměřených dat nejprve určena vnitřní přesnost měření. Tato přesnost byla vypočtena z rozptylu jednotlivých měření pro horizontální směry, vertikální úhly a také pro délky. Výpočet přesnosti byl proveden podle vztahu (1). Výsledné hodnoty pak zobrazuje Tabulka 5 pro 5. etapu a Tabulka 6 pro 6. etapu. Na základě tabulek vidíme, že přesnost měření horizontálního směru v 6. etapě byla mírně horší oproti 5. etapě. Přesnost vertikálního úhlu a délky byla v obou etapách téměř totožná.

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n - k}} \quad (1)$$

Tabulka 5 – Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti měření 5. etapy [autor]

Veličina	$\Sigma v_i^2$	n	k	m
Hz	71,383	249	166	0,93 cc
V	73,528	249	166	0,94 cc
s	2,687	249	166	0,18 mm

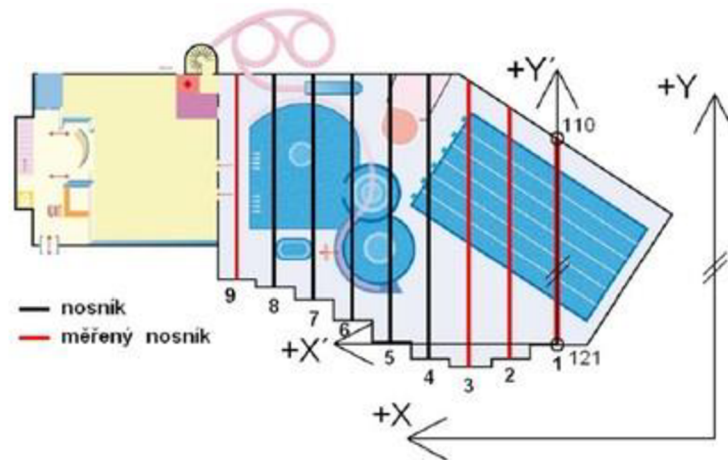
Tabulka 6 – Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti měření 6. etapy [autor]

Veličina	$\Sigma v_i^2$	n	k	m
Hz	136,057	245	164	1,30 cc
V	68,920	245	164	0,92 cc
s	2,585	245	164	0,18 mm

#### 7.1.2 Výpočet souřadnic pomocí MNČ

Po analýze vnitřní přesnosti měření byl proveden výpočet souřadnic a charakteristik přesnosti pomocí MNČ. Výpočet probíhal v programu G-NET. Síť byla vyrovnána s fixací bodu 121 a s fixací směrníku z bodu 121 na bod 110. Pro výpočet byla použita

místní souřadnicová soustava s počátkem v bodě 121, orientace soustavy je zřejmá z Obrázku 19.



Obrázek 19 – Volba a orientace souřadnicové soustavy [1]

Výpočet pomocí MNČ se rozumí proces, při kterém hledáme nejlepší řešení pro danou přeúčtenou úlohu. Přeúčtenost úlohy je zde chápána jako naměření více veličin, než je nezbytně nutné pro jednoduchý výpočet dané úlohy, tyto veličiny nazýváme nadbytečné. MNČ vyžaduje tyto nadbytečné veličiny pro hledání nejlepšího řešení. Základní podmínku metody udává vztah (2). [18], [19]

$$v^T P v = \min \quad (2)$$

Před samotným výpočtem bylo nutné nastavení apriorní přesnosti měření v prostředí programu G-NET, tyto údaje byly přebrány z manuálu k danému přístroji. Hodnoty apriorní přesnosti pro jednotlivé měřené veličiny jsou uvedeny v Tabulce 7. Poté již následoval import měření, vypočtení modelu sítě a následně výpočet souřadnic. Program provádí odděleně výpočet polohových souřadnic a výpočet výšek. Výsledkem jsou vyrovnané souřadnice a výšky spolu s charakteristikami přesnosti. Tyto informace jsou k dispozici v protokolu o výpočtu, který program sestavil. V Tabulce 8 jsou uvedeny výsledné přesnosti výpočtu jednotlivých etap.

Tabulka 7 – Apriorní přesnost měření udávaná výrobcem [16, zpracování: autor]

Veličina	Přesnost
Hz	0,3 mgon
V	0,3 mgon
s	2 mm + 2 ppm

Tabulka 8 – Výsledné přesnosti vyrovnání jednotlivých etap [autor]

Etapa	Vyrovnání	m0	$\sigma_{Y(RMS)}$ [mm]	$\sigma_{Y(RMS)}$ [mm]	$\sigma_{X,Y(RMS)}$ [mm]	$\sigma_{H(RMS)}$ [mm]
č. 5	Polohové	0,6525	0,63	0,72	0,96	-
	Výškové	0,5213	-	-	-	0,37
č. 6	Polohové	0,5991	0,58	0,67	0,89	-
	Výškové	0,4562	-	-	-	0,37

m0 = aposteriorní jednotková střední chyba

Z Tabulky 8 je patrné, že apriorní přesnost udávaná výrobcem je značně podhodnocená, v ideálním případě by se měla hodnota aposteriorní jednotkové střední chyby  $m_0 = 1$ . Tuto skutečnost nám ukázala již analýza vnitřní přesnosti před vyrovnáním, kde vnitřní přesnost měření vyšla výrazně lepší, než kterou udává výrobce. Musíme brát však v potaz, že měření vykonané v bazénové hale probíhalo za přibližně konstantních podmínek a na přibližně stejně dlouhé záměry, které byly maximálně 32 m. Výrobce však přesnost v manuálu k přístroji udává pro maximální vzdálenost, kterou je přístroj schopen měřit. Střední kvadratická chyba  $\sigma_{(RMS)}$  byla vypočtena podle vztahu (3)

$$\sigma_{(RMS)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}{n}} \quad (3)$$

## 7.2 Zpracování dat měřených metodou laserového skenování

Po zpracování dat z měření polární metodou následovalo zpracování dat měřených metodou laserového skenování. Jako první proběhla filtrace dat v tabulkovém procesoru Excel. Na vyfiltrovaných datech poté proběhla analýza přesnosti.

### 7.2.1 Filtrace dat

Výstupem z laserového skenování bylo georeferencované mračno bodů. Pro analýzy přesnosti a následné vyhodnocení posunů bylo nutné vyfiltrovat plošky nad kterými bude analýza a vyhodnocení probíhat. Tato filtrace proběhla pomocí tabulkového procesoru Excel, na základě zobrazení mračna bodů v programu MicroStation V8i. Jednotlivé plošky byly definovány čtvercem 10 cm x 10 cm. V některých místech nebylo možné dodržení těchto rozměrů plošek z důvodu zakřivení konstrukce nebo z důvodu výstupků na konstrukci. V těchto místech byly definovány plošky menších rozměrů.

Před samotnou filtrací byla veškerá data importována do tabulkového procesoru. Z těchto dat byly následně pomocí databázových funkcí vypočteny střední hodnoty v souřadnici X

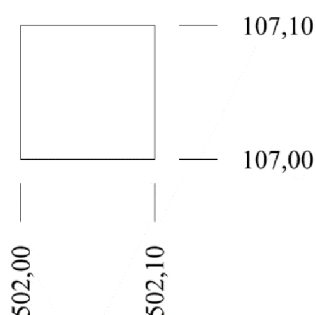
pro plošky ve svislé rovině a střední hodnoty ve výšce  $H$  pro plošky ve vodorovné rovině. Dále byly databázovými funkcemi určeny směrodatné odchylky na jednotlivých ploškách.

Pro filtraci byla pro každou plošku definována tabulka, která definovala danou plošku vymezením rozsahu souřadnic. Pomocí této tabulky pak prováděla databázová funkce výpočet dané hodnoty. Vztah (4) zobrazuje zápis databázové funkce *DPRŮMĚR* programu Excel, která vypočte průměrnou hodnotu z databáze hodnot podle zadaných kritérií. Tabulka 9 zobrazuje kritéria definující plošku v souřadnici  $X$ , tato kritéria jsou dále zobrazena graficky na Obrázku 20.

$$=DPRŮMĚR(\text{databáze};\text{pole};\text{kritéria}) \quad (4)$$

Tabulka 9 – Ukázka kritérií definující plošku v souřadnici  $X$  [autor]

Ymin	Ymax	Xmin	Xmax	Hmin	Hmax
>502,00	<502,10			>107,00	<107,10



Obrázek 20– Grafická ukázka kritérií definující plošku v souřadnici  $X$  [autor]

## 7.2.2 Výpočet přesnosti laserového skenování

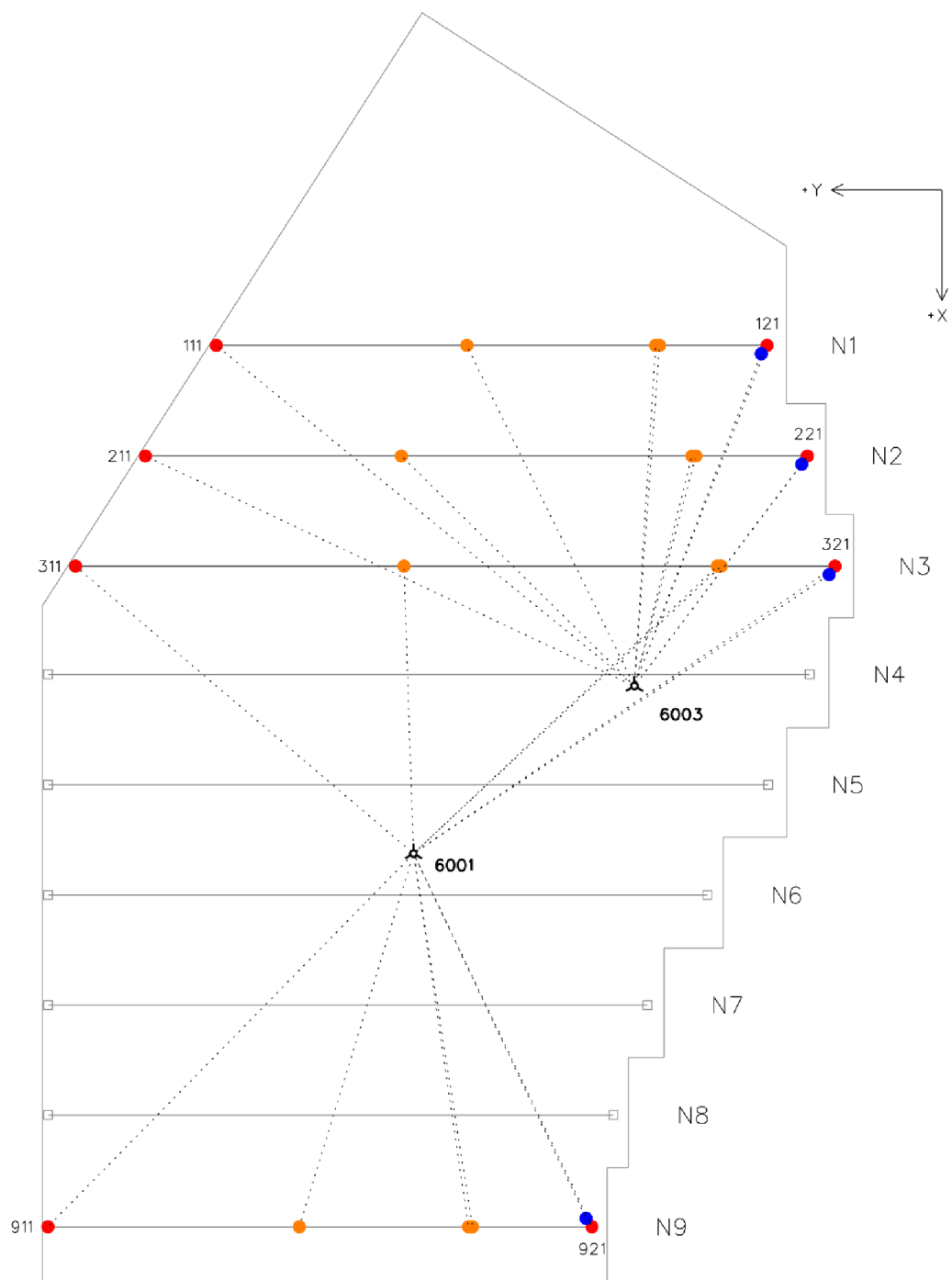
Během filtrace dat byly definovány jednak plošky pro analýzu přesnosti, ale i pro samotné vyhodnocení posunů. Na těchto ploškách proběhl také výpočet směrodatné odchylky. Výpočet proběhl celkem na 64 vzorcích v obou etapách. Tabulka 10 zobrazuje minimální, maximální a průměrnou směrodatnou odchylku stanovenou ze všech definovaných plošek v 5. etapě a v 6. etapě. Schéma plošek použitých pro výpočet přesnosti laserového skenování je zobrazeno na Obrázku 21.

Tabulka 10 – Směrodatné odchylky v 5. a 6. etapě [autor]

Etapa	$\sigma_{\min}$ [mm]	$\sigma_{\max}$ [mm]	$\sigma_{(RMS)}$ [mm]	Počet vzorků
5. etapa	0,29	2,19	0,75	64
6. etapa	0,27	2,07	0,73	64

Z Tabulky 10 vidíme, že směrodatné odchylky z nezávislého zaměření 5. a 6. etapy jsou téměř totožné. Hodnoty rozdílů jsou velmi malé v rozmezí nejistot měření.





Měřítko situace  $\overline{\quad\quad\quad}$  4 m

- ploška na dřevěné a kovové konstrukci
- ploška na dřevěné konstrukci
- ploška na keramické dlažbě

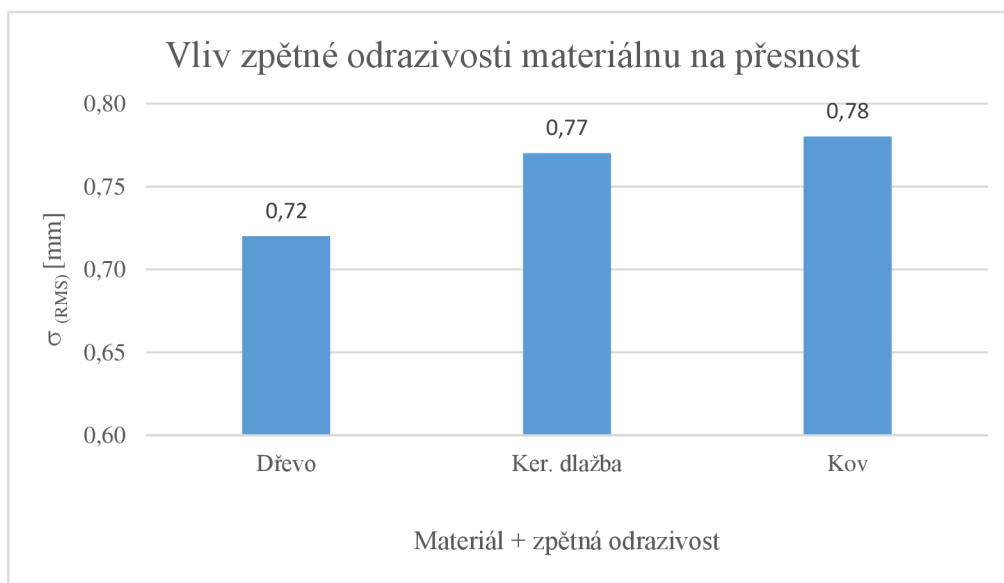
Obrázek 21– Schéma rozmístění plošek použitých pro analýzu přesnosti [autor]

### 7.2.3 Analýza přesnosti laserového skenování v závislosti na zpětné odrazivosti materiálu

Cílem analýzy přesnosti v závislosti na zpětné odrazivosti materiálu je zjistit vliv materiálu, ze kterého je skenovaný předmět vyroben, na výslednou přesnost. Analýza byla provedena na třech různých materiálech, celkem na 80 vzorcích. Bylo to dřevo, kov a keramická dlažba. Pro analýzu byly použity stejné plošky a jejich směrodatné odchytky, jako při výpočtu přesnosti laserového skenování. Tabulka 11 a Graf 1 zobrazují směrodatné odchytky pro daný materiál a příslušnou průměrnou hodnotu zpětné odrazivosti pro daný materiál. Schéma plošek použitých pro analýzu přesnosti laserového skenování v závislosti na zpětné odrazivosti materiálu je zobrazeno na Obrázku 21.

Tabulka 11 – Směrodatné odchytky dle zpětné odrazivosti materiálu [autor]

Materiál	$\sigma_{(RMS)}$ [mm]	Odrazivost	Počet vzorků
Dřevo	0,72	-1607	56
Ker. dlažba	0,77	-1811	8
Kov	0,78	-1828	16



Graf 1 – Vliv zpětné odrazivosti materiálu na přesnost [autor]

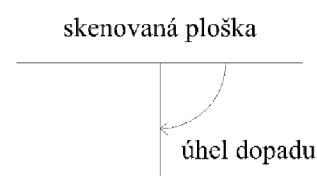
Z Tabulky 11 a Grafu 1 je vidět, že rozdíly směrodatných odchylek na jednotlivých materiálech nejsou příliš velké, ale je zřejmé, že hodnota zpětné odrazivosti má souvislost s hodnotou směrodatné odchytky. Vidíme, že z testovaných vzorků má nejlepší hodnotu zpětné odrazivosti dřevo, které má zároveň nejnižší hodnotu směrodatné odchytky. Naopak kov má nejhorší hodnotu zpětné odrazivosti a zároveň nejvyšší hodnotu směrodatné odchytky.

## 7.2.4 Analýza přesnosti laserového skenování v závislosti na úhlu dopadu paprsku skeneru

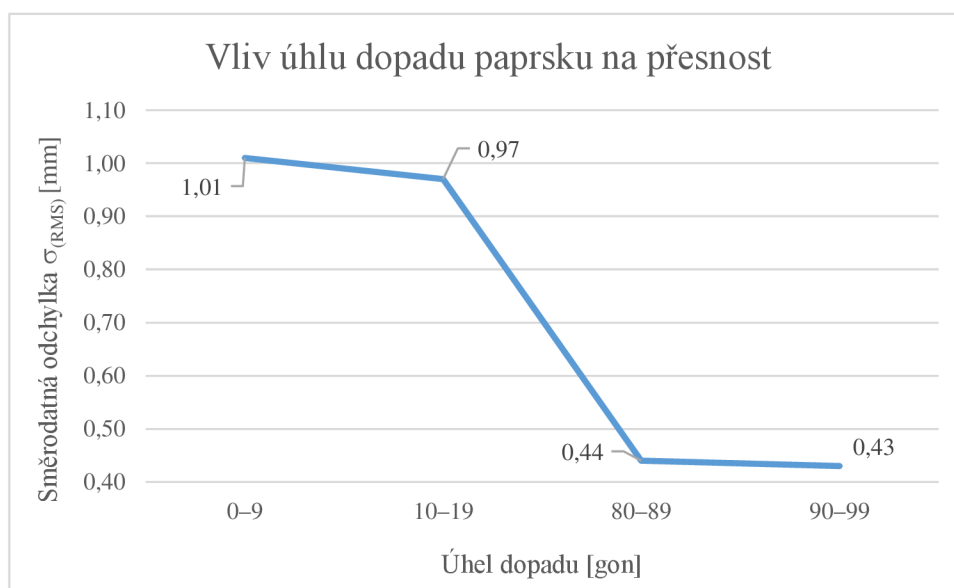
Jako poslední byla na skenovaných datech provedena analýza zkoumající vliv úhlu dopadu paprsku na přesnost. Pro tuto analýzu bylo použito celkem 56 vzorků. Z důvodu, aby test neovlivňoval vliv zpětné odrazivosti materiálu, byly vybrány pouze plošky na sledovaných dřevěných nosnících. Pro analýzu byly použity hodnoty z obou etapových měření. V Tabulce 12 a v Grafu 2 je vidět vliv úhlu dopadu paprsku na přesnost. Obrázek 22 zobrazuje schéma způsobu vyhodnocení úhlu dopadu.

Tabulka 12 – Vliv úhlu dopadu paprsku na přesnost [autor]

Úhel dopadu [gon]	$\sigma_{(RMS)}$ [mm]	Počet vzorků
0–9	1,01	2
10–19	0,97	22
80–89	0,44	20
90–99	0,43	12



Obrázek 22 – Schéma vyhodnocení úhlu dopadu [autor]



Graf 2 – Vliv úhlu dopadu paprsku na přesnost [autor]

Z Tabulky 12 a z Grafu 2 je patrné, že úhel dopadu paprsku má velký vliv na přesnost. Při skenování v bazénové hale nebylo bohužel provedeno skenování plošek pod jiným úhlem dopadu, než které vidíme v Tabulce 12. V případě že by v rámci analýzy byla k dispozici širší škála úhlů dopadu, měla by analýza vyšší vypovídající schopnost. I tak je ale vidět, že čím se úhel dopadu paprsku blíží k pravému úhlu tj. 100 gonů, tím lepší přesnosti dosahujeme. V praxi však není možné provádět skenování tak aby byl přístroj přímo proti skenované ploše. Je však důležité umět s touto informací pracovat.

## 8 VYHODNOCENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ

Vyhodnocení posunů se provádí na základě souřadnicových rozdílů z etapových měření. Výsledky se prezentují číselně a graficky. Číselné výsledky jsou uváděny formou tabulek. Při vyhodnocení může být někdy problém rozhodnout o malých hodnotách posunů, v tu chvíli nevíme, zda posun nastal, nebo je malá hodnota posunu způsobena vlivem měřických chyb. Z tohoto důvodu se provádí statistické testování. [2]

Hodnota posunů je dána rozdílem výsledných souřadnic v  $j$ -té a  $i$ -té etapě, viz vztah (5). Výpočet posunů v souřadnici  $Y$  a ve výšce  $H$  se provádí stejným způsobem.

$$\Delta x_{i,j} = x_j - x_i \quad (5)$$

Statistické testování se provádí na základě znalostí charakteristik přesnosti výsledných souřadnic. Výpočet úplné střední chyby posunu je dán vztahem (6). Pro výpočet jsou použity charakteristiky přesnosti výsledných souřadnic v  $j$ -té a  $i$ -té etapě. Statistické testování se poté provádí pomocí vztahů (7), (8), (9). [2]

$$m_{\Delta x_{i,j}} = \sqrt{m_{x_i}^2 + m_{x_j}^2} \quad (6)$$

$$|\Delta x_{i,j}| < m_{\Delta x_{i,j}} \quad \text{posun nenastal} \quad (7)$$

$$m_{\Delta x_{i,j}} \leq |\Delta x_{i,j}| \leq t * m_{\Delta x_{i,j}} \quad \text{posun mohl nastat, nebyl prokázán} \quad (8)$$

$$t * m_{\Delta x_{i,j}} < |\Delta x_{i,j}| \quad \text{posun nastal, byl prokázán na hladině významnosti } \alpha \quad (9)$$

Při statistickém testování posunů volíme koeficient spolehlivosti  $t = 2$ , jemuž odpovídá hladina významnosti  $\alpha = 5\%$ , která představuje riziko nesprávného vyhodnocení  $5\%$ . Statistické testování posunů v souřadnici  $Y$  a výšce  $H$  se provádí stejným způsobem.

ČSN 73 0405 – *Měření posunů stavebních objektů* říká, že posun je vztah vztažné a objektové soustavy, kdežto přetvoření je vztah mezi body objektové soustavy. [3]

Pro měření v bazénové hale nebylo možné využít vztažnou soustavu, která by se nacházela mimo deformační zónu objektu. Jak již bylo zmíněno, pro vyhodnocení byl využit jeden výchozí bod objektové soustavy a směr prvního nosníku. Z toho vyplývá, že v rámci bazénové haly nevyhodnocujeme posuny, ale přetvoření.

Výpočet přetvoření včetně statistického testování probíhá stejným postupem jako při určení posunů, řídíme se vztahy uvedenými v předchozích odstavcích.

## **8.1 Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou**

Pro vyhodnocení přetvoření měřených polární metodou byly použity souřadnice a charakteristiky přesnosti určené během výpočtu pomocí MNČ v programu GNET. Vyhodnocení probíhalo podle uvedených vztahů. Výsledky vyhodnocení jsou uvedeny v Tabulce 13 a v Tabulce 14. Grafické výstupy jsou přílohou práce.

Dále byly vyhodnoceny svislé náklony nosníků. Pro určení náklonu byly použity dvojice bodů umístěných nad sebou. Z důvodu nestejně výšky nosníků v jednotlivých jeho částech byly hodnoty svislých náklonů přepočteny na délku 1 metr, tak aby byla hodnota srovnatelná pro všechny nosníky. Hodnoty svislých náklonů jsou uvedeny v Tabulce 15.

Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou - porovnání 6. etapy od 5. etapy																						
Č. b.	5. etapa						6. etapa						Přetvoření			Mezní chyba přetvoření (t=2; α=5%)			Test statistické významnosti			
	Datum:		Teplota:		Čas:		Datum:		Teplota:		Čas:											
	Y	X	H	mY	mX	mH	Y	X	H	mY	mX	mH	ΔY	ΔX	ΔH	δΔY	δΔX	δΔH	ΔY	ΔX	ΔH	
	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	α=5%	α=5%	α=5%	
1. NOSNÍK	110	524,9297	1000,0000	103,6703	0,28	0,00	0,18	524,9288	1000,0000	103,6701	0,26	0,00	0,18	-0,90	0,00	-0,20	0,76	0,00	0,51	A	N	N
	111	525,0050	1000,0936	103,9374	0,28	0,34	0,21	525,0043	1000,0937	103,9376	0,26	0,31	0,21	-0,70	0,10	0,20	0,76	0,92	0,59	M	N	N
	112	524,9200	1000,0664	105,1833	0,82	1,11	0,47	524,9196	1000,0661	105,1833	0,75	1,02	0,47	-0,40	-0,30	0,00	2,22	3,01	1,33	N	N	N
	113	513,9280	1000,0976	104,0285	0,23	0,50	0,22	513,9277	1000,0989	104,0286	0,21	0,48	0,22	-0,30	1,30	0,10	0,62	1,39	0,62	N	M	N
	114	514,0191	1000,0672	105,8718	0,23	1,34	0,65	514,0187	1000,0676	105,8719	0,21	1,23	0,65	-0,40	0,40	0,10	0,62	3,64	1,84	M	N	N
	115	505,1508	1000,1129	103,9569	0,51	0,85	0,21	505,1508	1000,1138	103,9575	0,46	0,76	0,21	0,00	0,90	0,60	1,37	2,28	0,59	N	N	A
	117	504,7962	1000,1085	103,9506	0,51	0,83	0,21	504,7957	1000,1087	103,9512	0,46	0,75	0,21	-0,50	0,20	0,60	1,37	2,24	0,59	N	N	A
	118	504,7363	1000,1150	105,6643	0,72	1,16	0,54	504,7362	1000,1155	105,6647	0,66	1,06	0,54	-0,10	0,50	0,40	1,95	3,14	1,53	N	N	N
	121	500,0000	1000,0000	100,0000	0,00	0,00	0,00	500,0000	1000,0000	100,0000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	N	N	N
2. NOSNÍK	210	528,1393	1004,9992	103,6351	0,33	0,31	0,18	528,1385	1004,9991	103,6349	0,31	0,29	0,18	-0,80	-0,10	-0,20	0,91	0,85	0,51	M	N	N
	211	528,2098	1005,0947	103,9126	0,34	0,31	0,21	528,2092	1005,0945	103,9126	0,31	0,29	0,21	-0,60	-0,20	0,00	0,92	0,85	0,59	M	N	N
	212	528,1216	1005,0643	105,1921	1,12	0,84	0,50	528,1213	1005,0636	105,1918	1,02	0,77	0,50	-0,30	-0,70	-0,30	3,03	2,28	1,41	N	N	N
	213	516,4026	1005,0942	104,4682	0,28	0,28	0,26	516,4024	1005,0942	104,4681	0,25	0,26	0,26	-0,20	0,00	-0,10	0,75	0,76	0,74	N	N	N
	214	516,5706	1005,0660	106,2586	0,45	1,29	0,97	516,5704	1005,0659	106,2582	0,40	1,19	0,98	-0,20	-0,10	-0,40	1,20	3,51	2,76	N	N	N
	215	503,4597	1005,1194	104,5930	0,23	0,28	0,22	503,4595	1005,1195	104,5934	0,21	0,26	0,22	-0,20	0,10	0,40	0,62	0,76	0,62	N	N	M
	216	503,4175	1005,1190	106,3244	0,23	0,28	0,31	503,4174	1005,1191	106,3244	0,21	0,26	0,31	-0,10	0,10	0,00	0,62	0,76	0,88	N	N	N
	217	503,1071	1005,1176	104,5804	0,23	0,28	0,22	503,1068	1005,1176	104,5809	0,21	0,26	0,22	-0,30	0,00	0,50	0,62	0,76	0,62	N	N	M
	218	503,0562	1005,1118	106,3063	0,23	0,28	0,31	503,0565	1005,1123	106,3064	0,21	0,26	0,31	0,30	0,50	0,10	0,62	0,76	0,88	N	M	N
	221	498,1747	1005,0002	100,0025	0,22	0,25	0,18	498,1753	1005,0008	100,0027	0,21	0,23	0,18	0,60	0,60	0,20	0,61	0,68	0,51	M	M	N

\* A = Ano, N = Ne, M = Možná

Tabulka 13 – Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou – porovnání 6. etapy od 5. etapy (1. část) [autor]

Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou - porovnání 6. etapy od 5. etapy																						
Č. b.	5. etapa							6. etapa						Přetvoření			Mezní chyba přetvoření (t=2; α=5%)			Test statistické významnosti		
	Datum:		Teplota:		Čas:			Datum:		Teplota:		Čas:										
	Y	X	H	mY	mX	mH	Y	X	H	mY	mX	mH	ΔY	ΔX	ΔH	δΔY	δΔX	δΔH	ΔY	ΔX	ΔH	
	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	α=5%	α=5%	α=5%	
3. NOSNÍK	310	531,3021	1009,9941	103,7981	0,53	0,47	0,19	531,3018	1009,9931	103,7981	0,50	0,45	0,19	-0,30	-1,00	0,00	1,46	1,30	0,54	N	M	N
	311	531,3828	1010,0907	104,0797	1,02	1,01	0,25	531,3830	1010,0892	104,0797	0,94	0,92	0,25	0,20	-1,50	0,00	2,77	2,73	0,71	N	M	N
	312	531,3816	1010,0420	105,3230	1,01	1,01	0,35	531,3814	1010,0408	105,3224	0,94	0,92	0,35	-0,20	-1,20	-0,60	2,76	2,73	0,99	N	N	M
	313	516,3304	1010,0877	105,2649	0,37	1,34	0,45	516,3306	1010,0874	105,2645	0,34	1,23	0,44	0,20	-0,30	-0,40	1,00	3,64	1,26	N	N	N
	314	516,5773	1010,0409	107,0508	0,36	1,34	0,70	516,5774	1010,0403	107,0498	0,33	1,23	0,71	0,10	-0,60	-1,00	0,98	3,64	1,99	N	N	M
	315	502,3444	1010,1289	105,4766	0,29	0,25	0,29	502,3446	1010,1289	105,4767	0,27	0,23	0,29	0,20	0,00	0,10	0,79	0,68	0,82	N	N	N
	316	502,2841	1010,1257	107,2421	0,57	1,29	0,69	502,2844	1010,1261	107,2417	0,53	1,18	0,68	0,30	0,40	-0,40	1,56	3,50	1,94	N	N	N
	317	501,9940	1010,1289	105,4703	0,29	0,26	0,29	501,9940	1010,1287	105,4703	0,27	0,24	0,29	0,00	-0,20	0,00	0,79	0,71	0,82	N	N	N
	318	501,9238	1010,1206	107,2255	0,29	0,26	0,41	501,9242	1010,1203	107,2250	0,26	0,24	0,41	0,40	-0,30	-0,50	0,78	0,71	1,16	M	N	N
	321	496,9251	1009,9924	99,9955	0,30	0,32	0,28	496,9250	1009,9920	99,9955	0,28	0,29	0,22	-0,10	-0,40	0,00	0,82	0,86	0,71	N	N	N
9. NOSNÍK	910	532,5446	1039,8871	105,7665	0,86	0,50	0,23	532,5463	1039,8860	105,7663	0,79	0,47	0,23	1,70	-1,10	-0,20	2,34	1,37	0,65	M	M	N
	911	532,6256	1039,7938	106,0470	0,95	0,77	0,28	532,6276	1039,7928	106,0472	0,87	0,71	0,28	2,00	-1,00	0,20	2,58	2,09	0,79	M	N	N
	911X	531,7270	1039,7909	106,0384	0,94	0,79	0,29	531,7304	1039,7922	106,0383	1,03	1,05	0,39	3,40	1,30	-0,10	2,79	2,63	0,97	A	N	N
	912	532,5645	1039,8179	107,0517	0,95	0,77	0,33	532,5663	1039,8171	107,0513	0,87	0,71	0,33	1,80	-0,80	-0,40	2,58	2,09	0,93	M	N	N
	913	521,2202	1039,7742	106,3754	0,80	0,76	0,35	521,2221	1039,7748	106,3744	0,74	0,73	0,34	1,90	0,60	-1,00	2,18	2,11	0,98	M	N	A
	914	521,1302	1039,7947	107,6539	0,80	0,76	0,43	521,1321	1039,7960	107,6527	0,74	0,73	0,42	1,90	1,30	-1,20	2,18	2,11	1,20	M	M	M
	915	513,5650	1039,7821	106,3051	0,79	0,37	0,31	513,5667	1039,7809	106,3046	0,72	0,34	0,31	1,70	-1,20	-0,50	2,14	1,00	0,88	M	A	M
	916	513,5481	1039,7768	107,6039	0,79	0,43	0,47	513,5499	1039,7760	107,6027	0,73	0,40	0,47	1,80	-0,80	-1,20	2,15	1,17	1,33	M	M	M
	917	513,2273	1039,7840	106,2905	0,79	0,37	0,31	513,2288	1039,7837	106,2900	0,73	0,35	0,31	1,50	-0,30	-0,50	2,15	1,02	0,88	M	N	M
	918	513,1897	1039,7709	107,5865	0,79	0,37	0,38	513,1916	1039,7703	107,5856	0,72	0,35	0,38	1,90	-0,60	-0,90	2,14	1,02	1,07	M	M	M
	919	508,2561	1039,8299	100,3191	1,03	1,18	0,31	508,2579	1039,8293	100,3189	0,94	1,09	0,31	1,80	-0,60	-0,20	2,79	3,21	0,88	M	N	N
	920	507,5984	1039,8339	100,3211	1,05	1,16	0,31	507,6000	1039,8335	100,3212	0,96	1,07	0,31	1,60	-0,40	0,10	2,85	3,16	0,88	M	N	N
921	507,9257	1039,8939	100,0136	0,82	0,40	0,25	507,9276	1039,8934	100,0136	0,76	0,37	0,25	1,90	-0,50	0,00	2,24	1,09	0,71	M	N	N	

\* A = Ano, N = Ne, M = Možná

Tabulka 14 – Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou – porovnání 6. etapy od 5. etapy (2. část) [autor]

Tabulka 15 – Svislé náklony nosníku měřené polární metodou – porovnání  
6. etapy od 5. etapy [autor]

Svislé náklony nosníku měřené polární metodou - porovnání									
6. etapy od 5. etapy									
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		$\Delta dX$	$\Delta H$	Náklon	$\Delta dX/1m$
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C				
		X	H	X	H				
		[m]	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[ ° ' '' ]	[mm]
1. NOSNÍK	111	1000,0936	103,9374	1000,0937	103,9376	-0,40	1,2458	-00° 01' 06"	-0,32
	112	1000,0664	105,1833	1000,0661	105,1833				
	113	1000,0976	104,0285	1000,0989	104,0286	-0,90	1,8433	-00° 01' 41"	-0,49
	114	1000,0672	105,8718	1000,0676	105,8719				
	117	1000,1085	103,9506	1000,1087	103,9512	0,30	1,7136	00° 00' 36"	0,18
	118	1000,1150	105,6643	1000,1155	105,6647				
2. NOSNÍK	211	1005,0947	103,9126	1005,0945	103,9126	-0,50	1,2794	-00° 01' 21"	-0,39
	212	1005,0643	105,1921	1005,0636	105,1918				
	213	1005,0942	104,4682	1005,0942	104,4681	-0,10	1,7903	-00° 00' 12"	-0,06
	214	1005,0660	106,2586	1005,0659	106,2582				
	215	1005,1194	104,5930	1005,1195	104,5934	0,00	1,7312	00° 00' 00"	0,00
	216	1005,1190	106,3244	1005,1191	106,3244				
	217	1005,1176	104,5804	1005,1176	104,5809	0,50	1,7257	00° 00' 60"	0,29
	218	1005,1118	106,3063	1005,1123	106,3064				
3. NOSNÍK	311	1010,0907	104,0797	1010,0892	104,0797	0,30	1,2430	00° 00' 50"	0,24
	312	1010,0420	105,3230	1010,0408	105,3224				
	313	1010,0877	105,2649	1010,0874	105,2645	-0,30	1,7856	-00° 00' 35"	-0,17
	314	1010,0409	107,0508	1010,0403	107,0498				
	315	1010,1289	105,4766	1010,1289	105,4767	0,40	1,7652	00° 00' 47"	0,23
	316	1010,1257	107,2421	1010,1261	107,2417				
	317	1010,1289	105,4703	1010,1287	105,4703	-0,10	1,7550	-00° 00' 12"	-0,06
	318	1010,1206	107,2255	1010,1203	107,2250				
	9. NOSNÍK	911	1039,7938	106,0470	1039,7928	106,0472	0,20	1,0044	00° 00' 41"
912		1039,8179	107,0517	1039,8171	107,0513				
913		1039,7742	106,3754	1039,7748	106,3744	0,70	1,2784	00° 01' 53"	0,55
914		1039,7947	107,6539	1039,7960	107,6527				
915		1039,7821	106,3051	1039,7809	106,3046	0,40	1,2985	00° 01' 04"	0,31
916		1039,7768	107,6039	1039,7760	107,6027				
917		1039,7840	106,2905	1039,7837	106,2900	-0,30	1,2958	-00° 00' 48"	-0,23
918		1039,7709	107,5865	1039,7703	107,5856				



## 8.2 Vyhodnocení rozdílu etap měřených metodou laserového skenování

Pro vyhodnocení přetvoření na základě měření metodou laserového skenování byly použity předem definované plošky nacházející se v blízkosti pozorovaných bodů. Způsob filtrace a definice plošek byl popsán v kapitole 7. Na rozdíl od měření polární metodou není možné u metody laserového skenování provést výpočet pomocí MNČ a tím získat charakteristiky přesnosti. Pro statistické testování byly proto použity směrodatné odchylky určené z rozptylu měření na jednotlivých ploškách.

Z konfigurace, ze které bylo provedeno laserové skenování nebylo bohužel možné vyhodnotit přetvoření v souřadnici  $Y$ , tak jako je tomu u měření polární metodou. Pro vyhodnocení přetvoření v souřadnici  $Y$  by bylo nutné lepší postavení skeneru a také naskenování rozsáhlejších částí nosníků, ze kterých by bylo následně možné přetvoření vyhodnotit, případně před skenováním osadit konstrukci pomocnými ploškami.

Při filtraci dat z měření metodou laserového skenování byly definovány zvlášť plošky pro vyhodnocení posunů v souřadnici  $X$  a ve výšce  $H$ . Plošky pro vyhodnocení přetvoření v souřadnici  $X$  byly definovány v blízkosti pozorovaných bodů ve svislé rovině jednotlivých nosníků, vyhodnocená přetvoření tudíž odpovídají pozorovaným bodům a jsou zobrazeny v Tabulce 16. Plošky pro vyhodnocení přetvoření ve výšce  $H$  byly definovány v blízkosti pozorovaných bodů ve vodorovné rovině jednotlivých nosníků. Vyhodnocená přetvoření tudíž odpovídají pozorovaným bodům, nacházejícím se ve spodní části jednotlivých nosníků. Přetvoření ve výšce  $H$  jsou uvedena v Tabulce 17.

Stejně jako při vyhodnocení měření polární metodou byly vyhodnoceny také svislé náklony jednotlivých nosníků. Pro vyhodnocení byly použity dvojice plošek umístěných nad sebou. Náklony byly opět přepočteny na délku 1 metr, aby bylo možné provést srovnání na jednotlivých nosnících. Hodnoty svislých náklonů jsou uvedeny v Tabulce 18.

Tabulka 16 – Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací) [autor]

Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací)								
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		Přetvoření $\Delta X$ [mm]	Mezní chyba přetvoření ( $t=2$ ; $a=5\%$ ) $\delta\Delta X$ [mm]	Test statistické významnosti $\Delta X$ $\alpha=5\%$
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C			
		X	$\sigma_x$	X	$\sigma_x$			
		[m]	[mm]	[m]	[mm]			
1. NOSNÍK	111	1000,0581	0,52	1000,0570	0,51	-1,06	1,46	M
	112	1000,0680	0,40	1000,0668	0,37	-1,19	1,09	A
	113	1000,0639	0,46	1000,0641	0,46	0,22	1,31	N
	114	1000,0675	0,34	1000,0674	0,33	-0,10	0,94	N
	115	1000,0735	0,62	1000,0742	0,63	0,76	1,77	N
	116	1000,0847	0,38	1000,0852	0,41	0,56	1,12	M
	117	1000,0713	0,59	1000,0719	0,62	0,66	1,71	N
	118	1000,0847	0,98	1000,0851	0,96	0,37	2,75	N
	121	1000,0608	0,36	1000,0616	0,37	0,77	1,04	M
2. NOSNÍK	211	1005,0611	0,35	1005,0595	0,34	-1,65	0,98	A
	212	1005,0687	0,34	1005,0670	0,37	-1,65	1,01	A
	213	1005,0628	0,29	1005,0619	0,27	-0,91	0,79	A
	214	1005,0666	0,32	1005,0660	0,32	-0,62	0,91	M
	215	1005,0783	0,36	1005,0790	0,36	0,73	1,01	M
	216	1005,0766	0,32	1005,0774	0,32	0,72	0,91	M
	217	1005,0804	0,31	1005,0811	0,35	0,67	0,93	M
	218	1005,0768	0,75	1005,0775	0,79	0,71	2,18	N
	221	1005,0662	0,32	1005,0673	0,29	1,03	0,86	A
3. NOSNÍK	311	1010,0521	0,37	1010,0500	0,38	-2,11	1,06	A
	312	1010,0450	0,72	1010,0430	0,72	-2,04	2,04	A
	313	1010,0498	0,40	1010,0507	0,41	0,91	1,14	M
	314	1010,0399	0,45	1010,0406	0,48	0,66	1,31	M
	315	1010,0843	0,57	1010,0876	0,59	3,29	1,64	A
	316	1010,0844	0,37	1010,0877	0,37	3,24	1,05	A
	317	1010,0822	0,47	1010,0855	0,44	3,21	1,28	A
	318	1010,0824	0,51	1010,0857	0,50	3,27	1,44	A
	321	1010,0515	0,33	1010,0549	0,30	3,38	0,90	A
9. NOSNÍK	911	1039,8310	0,43	1039,8278	0,42	-3,20	1,21	A
	912	1039,8227	0,49	1039,8195	0,48	-3,20	1,37	A
	913	1039,8067	0,48	1039,8062	0,48	-0,46	1,36	N
	914	1039,7966	0,52	1039,7960	0,51	-0,56	1,45	N
	915	1039,8177	0,49	1039,8186	0,51	0,96	1,41	M
	916	1039,8111	0,49	1039,8123	0,45	1,19	1,33	M
	917	1039,8172	0,46	1039,8185	0,40	1,32	1,22	A
	918	1039,8131	0,42	1039,8141	0,39	1,07	1,14	M
	921	1039,8275	0,41	1039,8295	0,43	2,02	1,18	A

\* A = Ano, N = Ne, M = Možná

Tabulka 17 – Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací) [autor]

<b>Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací)</b>											
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		Přetvoření	Mezní chyba přetvoření (t=2; a=5%)	Test statistické významnosti			
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C						
		H	$\sigma_H$	H	$\sigma_H$				$\Delta H$	$\delta\Delta H$	$\Delta H$
		[m]	[mm]	[m]	[mm]				[mm]	[mm]	$\alpha=5\%$
1. NOS.	111	103,7484	0,35	103,7487	0,31	0,31	0,93	N			
	113	103,9354	0,45	103,9359	0,41	0,54	1,21	N			
	115	103,8605	0,59	103,8612	0,65	0,72	1,75	N			
	117	103,8637	1,35	103,8646	1,34	0,85	3,81	N			
2. NOS.	211	103,7182	0,56	103,7185	0,55	0,24	1,57	N			
	213	104,3676	1,08	104,3676	1,07	0,02	3,04	N			
	215	104,4883	0,51	104,4889	0,51	0,55	1,45	N			
	217	104,4953	1,06	104,4959	1,08	0,62	3,02	N			
3. NOS.	311	103,8839	1,12	103,8837	0,79	-0,22	2,74	N			
	313	105,1634	1,81	105,1626	1,78	-0,75	5,08	N			
	315	105,3922	0,79	105,3923	0,77	0,10	2,21	N			
	317	105,3878	1,31	105,3880	1,22	0,13	3,58	N			
9. NOS.	911	105,8467	0,32	105,8470	0,35	0,27	0,94	N			
	913	106,2775	0,76	106,2771	0,71	-0,37	2,08	N			
	915	106,1990	1,62	106,1984	1,65	-0,55	4,62	N			
	917	106,2063	2,19	106,2055	2,07	-0,73	6,02	N			

\* A = Ano, N = Ne, M = Možná

Tabulka 18 – Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací) [autor]

<b>Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací)</b>									
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		$\Delta dX$ [mm]	$\Delta H$ [mm]	Náklon [ ° ' '' ]	$\Delta dX/1m$ [mm]
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C				
		X [m]	X [m]						
1. NOSNÍK	111	1000,0581	1000,0570	-0,12	1,2458	-00° 00' 20''	-0,10		
	112	1000,0680	1000,0668						
	113	1000,0639	1000,0641	-0,33	1,8433	-00° 00' 37''	-0,18		
	114	1000,0675	1000,0674						
	115	1000,0735	1000,0742						
	116	1000,0847	1000,0852	-0,19	1,7197	-00° 00' 23''	-0,11		
	117	1000,0713	1000,0719						
	118	1000,0847	1000,0851	-0,29	1,7136	-00° 00' 35''	-0,17		
2. NOSNÍK	211	1005,0611	1005,0595	0,00	1,2794	00° 00' 00''	0,00		
	212	1005,0687	1005,0670						
	213	1005,0628	1005,0619	0,29	1,7903	00° 00' 33''	0,16		
	214	1005,0666	1005,0660						
	215	1005,0783	1005,0790	-0,01	1,7312	-00° 00' 01''	-0,01		
	216	1005,0766	1005,0774						
	217	1005,0804	1005,0811	0,04	1,7257	00° 00' 05''	0,02		
	218	1005,0768	1005,0775						
3. NOSNÍK	311	1010,0521	1010,0500	0,06	1,2430	00° 00' 10''	0,05		
	312	1010,0450	1010,0430						
	313	1010,0498	1010,0507	-0,24	1,7856	-00° 00' 28''	-0,14		
	314	1010,0399	1010,0406						
	315	1010,0843	1010,0876	-0,05	1,7652	-00° 00' 06''	-0,03		
	316	1010,0844	1010,0877						
	317	1010,0822	1010,0855	0,06	1,7550	00° 00' 07''	0,03		
	318	1010,0824	1010,0857						
9. NOSNÍK	911	1039,8310	1039,8278	0,00	1,0044	00° 00' 00''	0,00		
	912	1039,8227	1039,8195						
	913	1039,8067	1039,8062	-0,10	1,2784	-00° 00' 16''	-0,08		
	914	1039,7966	1039,7960						
	915	1039,8177	1039,8186	0,22	1,2985	00° 00' 35''	0,17		
	916	1039,8111	1039,8123						
	917	1039,8172	1039,8185	-0,25	1,2958	-00° 00' 40''	-0,19		
	918	1039,8131	1039,8141						

\*  $\Delta H$  – použito z měření totální stanicí

### 8.3 Vyhodnocení rozdílu obou použitých metod

Cílem práce je porovnání metody laserového skenování s měřením polární metodou pro ověření vhodnosti použití metody laserového skenování k určování posunů a přetvoření. Ověření metody probíhalo porovnáním přetvoření určených z laserového skenování vůči přetvoření určeným z měření polární metodou. Pro ověření byla přetvoření určená z měření polární metodou považována za etalon. Tabulka 19 znázorňuje porovnání metod při určení příčných přetvoření, Tabulka 20 znázorňuje porovnání metod při určení výškových přetvoření. Přesnost byla určena pomocí vztahů (10), (11) a (12).

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_{Xi} = \Delta X_{tot} - \Delta X_{las} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{Hi} = \Delta H_{tot} - \Delta H_{las} \quad (12)$$

Z předchozích kapitol je zřejmá rozdílnost mezi způsobem vyhodnocení přetvoření měřených polární metodou a měřených metodou laserového skenování. Jak již bylo zmíněno, měření polární metodou bylo vypočteno pomocí MNČ v programu GNET s fixací bodu 121 a směrníku z bodu 121 na bod 110. Kdežto při metodě laserového skenování bylo mračno bodů georeferencováno pomocí přeuračených bodů, které byly určeny z výchozích bodů 110 a 121. Rozdílnost těchto postupů může vést k systematickému posunutí, případně stočení výsledků jednotlivých metod. Z toho důvodu byla provedena rektifikace dat získaných metodou laserového skenování. Pro rektifikaci byly použity dva odlišné způsoby. V prvním případě bylo využito odstranění systematických odchylek na orientačních bodech při orientaci MultiStanice Leica MS60. Druhý způsob rektifikace vycházel ze stanovení systematického odchylek mezi mračny v 5. a v 6. etapě měření a jejich následném odstranění.

Tabulka 19 – Porovnání metod při určení příčných přetvoření (před rektifikací)

[autor]

<b>Porovnání metod při určení příčných přetvoření (před rektifikací)</b>				
	Č. b.	$\Delta X_{tot}$	$\Delta X_{las}$	$\Delta X_{tot} - \Delta X_{las}$
		[mm]	[mm]	[mm]
<b>1. NOSNÍK</b>	111	0,10	-1,06	1,16
	112	-0,30	-1,19	0,89
	113	1,30	0,22	1,08
	114	0,40	-0,10	0,50
	115	0,90	0,76	0,14
	117	0,20	0,66	-0,46
	118	0,50	0,37	0,13
	121	0,00	0,77	-0,77
<b>2. NOSNÍK</b>	211	-0,20	-1,65	1,45
	212	-0,70	-1,65	0,95
	213	0,00	-0,91	0,91
	214	-0,10	-0,62	0,52
	215	0,10	0,73	-0,63
	216	0,10	0,72	-0,62
	217	0,00	0,67	-0,67
	218	0,50	0,71	-0,21
	221	0,60	1,03	-0,43
	<b>3. NOSNÍK</b>	311	-1,50	-2,11
312		-1,20	-2,04	0,84
313		-0,30	0,91	-1,21
314		-0,60	0,66	-1,26
315		0,00	3,29	-3,29
316		0,40	3,24	-2,84
317		-0,20	3,21	-3,41
318		-0,30	3,27	-3,57
321		-0,40	3,38	-3,78
<b>9. NOSNÍK</b>		911	-1,00	-3,20
	912	-0,80	-3,20	2,40
	913	0,60	-0,46	1,06
	914	1,30	-0,56	1,86
	915	-1,20	0,96	-2,16
	916	-0,80	1,19	-1,99
	917	-0,30	1,32	-1,62
	918	-0,60	1,07	-1,67
	921	-0,50	2,02	-2,52
				$m_x$

Tabulka 20 – Porovnání metod při určení výškových přetvoření (před rektifikací)

[autor]

<b>Porovnání metod při určení výškových přetvoření (před rektifikací)</b>				
	Č. b.	$\Delta H_{tot}$	$\Delta H_{las}$	$\Delta H_{tot} - \Delta H_{las}$
		[mm]	[mm]	[mm]
<b>1. NOS.</b>	111	0,20	0,31	-0,11
	113	0,10	0,54	-0,44
	115	0,60	0,72	-0,12
	117	0,60	0,85	-0,25
<b>2. NOS.</b>	211	0,00	0,24	-0,24
	213	-0,10	0,02	-0,12
	215	0,40	0,55	-0,15
	217	0,50	0,62	-0,12
<b>3. NOS.</b>	311	0,00	-0,22	0,22
	313	-0,40	-0,75	0,35
	315	0,10	0,10	0,00
	317	0,00	0,13	-0,13
<b>9. NOS.</b>	911	0,20	0,27	-0,07
	913	-1,00	-0,37	-0,63
	915	-0,50	-0,55	0,05
	917	-0,50	-0,73	0,23
			$m_H$	0,26 mm

### 8.3.1 Rektifikace laserového skenování odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech

Prvním způsobem rektifikace dat získaných metodou laserového skenování, bylo odstranění systematických odchylek na orientačních bodech, při orientaci MultiStanice Leica MS60 na jednotlivých stanoviscích.

Pro rektifikaci v souřadnici  $X$  bylo využito hodnoty  $\Delta X$  na bodě 110 a 121. Tyto hodnoty byly získány z orientačního klíče pro 5. a pro 6. etapu. Na základě těchto hodnot byl následně vypočten úhel stočení, ze kterého byly následně určeny opravy v souřadnici  $X$  pro jednotlivé pozorované plošky. Pro výpočet byly použity vztahy (13), (14), (15) a (16). Tabulka 21 zobrazuje hodnoty z orientačního klíče a úhel stočení.

$$oX_{i1} = \frac{\Delta_{\Delta X_{121,110}}}{\Delta Y_{121,110}} * \Delta Y_{121,i} \quad (13)$$

$$oX_2 = -\Delta X_{121} \quad (14)$$

$$oX_i = oX_2 - oX_{i1} \quad (15)$$

$$X_i = X_{i, \text{měř}} + oX_i \quad (16)$$

Tabulka 21 – Tabulka hodnot pro rektifikaci v souřadnici  $X$  odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech [autor]

Etapa	Bod	$\Delta X$ [mm]	$\Delta_{\Delta X_{121,110}}$ [mm]	$\Delta Y_{121,110}$ [m]	Úhel stočení [mgon]
5.	121	-0,80	1,80	24,9297	4,6
	110	1,00			
6.	121	-0,50	1,50	24,9297	3,8
	110	1,00			

Pro rektifikaci ve výšce  $H$  bylo využito hodnot  $\Delta H$  dle orientačního klíče. Pro každé stanovisko byla vždy použita hodnota  $\Delta H$  na spodních podporových kloubech. Na některých stanoviscích byla provedena orientace na přeурčené body, z toho důvodu bylo nejprve nutné určit rozdíl  $oH_1$ , dle vztahu (17). Výsledná oprava byla poté určena pomocí vztahu (18), rektifikovaná výška byla určena pomocí vztahu (19). Tabulka 22 zobrazuje hodnoty z orientačního klíče a výslednou opravu ve výšce  $H$ .

$$oH_{i1} = H_{ai} - H_{ui} \quad (17)$$

$$oH_i = oH_{i1} - \Delta H_i \quad (18)$$

$$H_i = H_{i, \text{měř}} + oH_i \quad (19)$$



Tabulka 22 – Tabulka hodnot pro rektifikaci ve výšce  $H$  odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech [autor]

Etapa	Stanovisko	Orientace	Výška daná	Výška určená	Rozdíl daná - určená	Oprava dle orient. klíče	Výsledná oprava
			$H_d$ [m]	$H_u$ [m]	$oH_1$	$\Delta H$ [mm]	$oH_1$ [mm]
5.	6001	121	100,0000	100,0000	0,00	-0,80	<b>0,80</b>
	6003	9221	100,0025	100,0028	-0,30	0,20	<b>-0,50</b>
	6004	9121	100,0000	100,0008	-0,80	0,40	<b>-1,20</b>
6.	6003	121	100,0000	100,0000	0,00	-0,60	<b>0,60</b>
	6002	9121	100,0000	100,0004	-0,40	-0,30	<b>-0,10</b>

Tabulka 23 zobrazuje vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování po rektifikaci odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech. Tabulka 24 zobrazuje vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování po rektifikaci odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech. Svislé náklony po rektifikaci odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech jsou zobrazeny v Tabulce 25. Grafické výstupy jsou přílohou práce.

Porovnání metod při určení příčných přetvoření po rektifikaci odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech zobrazuje Tabulka 26. Tabulka 27 zobrazuje porovnání metod při určení výškových přetvoření po rektifikaci odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech.

Tabulka 23 – Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech) [autor]

Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)								
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		Přetvoření $\Delta X$ [mm]	Mezní chyba přetvoření ( $t=2$ ; $a=5\%$ ) $\delta \Delta X$ [mm]	Test statistické významnosti $\Delta X$ $\alpha=5\%$
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C			
		X	$\sigma_x$	X	$\sigma_x$			
		[m]	[mm]	[m]	[mm]			
1. NOSNÍK	111	1000,0571	0,52	1000,0560	0,51	-1,06	1,46	M
	112	1000,0670	0,40	1000,0658	0,37	-1,19	1,09	A
	113	1000,0636	0,46	1000,0637	0,46	0,09	1,31	N
	114	1000,0673	0,34	1000,0671	0,33	-0,23	0,94	N
	115	1000,0739	0,62	1000,0744	0,63	0,52	1,77	N
	116	1000,0851	0,38	1000,0854	0,41	0,30	1,12	N
	117	1000,0717	0,59	1000,0721	0,62	0,42	1,71	N
	118	1000,0852	0,98	1000,0853	0,96	0,13	2,75	N
	121	1000,0616	0,36	1000,0621	0,37	0,47	1,04	N
2. NOSNÍK	211	1005,0599	0,35	1005,0583	0,34	-1,61	0,98	A
	212	1005,0674	0,34	1005,0658	0,37	-1,62	1,01	A
	213	1005,0625	0,29	1005,0614	0,27	-1,02	0,79	A
	214	1005,0662	0,32	1005,0655	0,32	-0,72	0,91	M
	215	1005,0788	0,36	1005,0793	0,36	0,47	1,01	N
	216	1005,0772	0,32	1005,0776	0,32	0,46	0,91	M
	217	1005,0810	0,31	1005,0814	0,35	0,41	0,93	N
	218	1005,0774	0,75	1005,0779	0,79	0,44	2,18	N
	221	1005,0672	0,32	1005,0679	0,29	0,71	0,86	M
3. NOSNÍK	311	1010,0507	0,37	1010,0487	0,38	-2,03	1,06	A
	312	1010,0435	0,72	1010,0416	0,72	-1,97	2,04	M
	313	1010,0494	0,40	1010,0502	0,41	0,80	1,14	M
	314	1010,0395	0,45	1010,0401	0,48	0,56	1,31	N
	315	1010,0849	0,57	1010,0879	0,59	3,02	1,64	A
	316	1010,0851	0,37	1010,0881	0,37	2,97	1,05	A
	317	1010,0829	0,47	1010,0858	0,44	2,93	1,28	A
	318	1010,0831	0,51	1010,0860	0,50	2,99	1,44	A
	321	1010,0526	0,33	1010,0556	0,30	3,04	0,90	A
9. NOSNÍK	911	1039,8295	0,43	1039,8264	0,42	-3,10	1,21	A
	912	1039,8211	0,49	1039,8180	0,48	-3,11	1,37	A
	913	1039,8060	0,48	1039,8055	0,48	-0,51	1,36	N
	914	1039,7958	0,52	1039,7952	0,51	-0,61	1,45	N
	915	1039,8175	0,49	1039,8183	0,51	0,83	1,41	M
	916	1039,8109	0,49	1039,8120	0,45	1,05	1,33	M
	917	1039,8170	0,46	1039,8182	0,40	1,18	1,22	M
	918	1039,8129	0,42	1039,8138	0,39	0,93	1,14	M
	921	1039,8278	0,41	1039,8296	0,43	1,81	1,18	A

\* A = Ano, N = Ne, M = Možná

Tabulka 24 – Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech) [autor]

Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)											
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		Přetvoření	Mezní chyba přetvoření (t=2; a=5%)	Test statistické významnosti			
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C						
		H	$\sigma_H$	H	$\sigma_H$				$\Delta H$	$\delta\Delta H$	$\Delta H$
		[m]	[mm]	[m]	[mm]				[mm]	[mm]	$\alpha=5\%$
1. NOS.	111	103,7472	0,35	103,7486	0,31	1,41	0,93	A			
	113	103,9342	0,45	103,9358	0,41	1,64	1,21	A			
	115	103,8593	0,59	103,8611	0,65	1,82	1,75	A			
	117	103,8625	1,35	103,8645	1,34	1,95	3,81	M			
2. NOS.	211	103,7170	0,56	103,7184	0,55	1,34	1,57	M			
	213	104,3664	1,08	104,3675	1,07	1,12	3,04	N			
	215	104,4871	0,51	104,4888	0,51	1,65	1,45	A			
	217	104,4941	1,06	104,4958	1,08	1,72	3,02	M			
3. NOS.	311	103,8834	1,12	103,8843	0,79	0,88	2,74	N			
	313	105,1629	1,81	105,1632	1,78	0,35	5,08	N			
	315	105,3917	0,79	105,3929	0,77	1,20	2,21	M			
	317	105,3873	1,31	105,3886	1,22	1,23	3,58	N			
9. NOS.	911	105,8475	0,32	105,8476	0,35	0,07	0,94	N			
	913	106,2783	0,76	106,2777	0,71	-0,57	2,08	N			
	915	106,1998	1,62	106,1990	1,65	-0,75	4,62	N			
	917	106,2071	2,19	106,2061	2,07	-0,93	6,02	N			

\* A = Ano, N = Ne, M = Možná

Tabulka 25 – Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech) [autor]

Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)									
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		$\Delta dX$ [mm]	$\Delta H$ [mm]	Náklon [ ° ' '' ]	$\Delta dX/1m$ [mm]
		Datum:	Teplota:	Datum:	Teplota:				
		20. - 21. 12. 2019	29,3°C	04. - 05. 03. 2020	29,4°C				
		X [m]	X [m]						
1. NOSNÍK	111	1000,0571	1000,0560	-0,12	1,2458	-00° 00' 20"	-0,10		
	112	1000,0670	1000,0658						
	113	1000,0636	1000,0637	-0,32	1,8433	-00° 00' 36"	-0,18		
	114	1000,0673	1000,0671						
	115	1000,0739	1000,0744	-0,22	1,7197	-00° 00' 26"	-0,13		
	116	1000,0851	1000,0854						
	117	1000,0717	1000,0721	-0,29	1,7136	-00° 00' 35"	-0,17		
	118	1000,0852	1000,0853						
2. NOSNÍK	211	1005,0599	1005,0583	-0,01	1,2794	-00° 00' 02"	0,00		
	212	1005,0674	1005,0658						
	213	1005,0625	1005,0614	0,29	1,7903	00° 00' 33"	0,16		
	214	1005,0662	1005,0655						
	215	1005,0788	1005,0793	-0,01	1,7312	-00° 00' 01"	-0,01		
	216	1005,0772	1005,0776						
	217	1005,0810	1005,0814	0,04	1,7257	00° 00' 05"	0,02		
	218	1005,0774	1005,0779						
3. NOSNÍK	311	1010,0507	1010,0487	0,06	1,2430	00° 00' 10"	0,05		
	312	1010,0435	1010,0416						
	313	1010,0494	1010,0502	-0,24	1,7856	-00° 00' 28"	-0,13		
	314	1010,0395	1010,0401						
	315	1010,0849	1010,0879	-0,05	1,7652	-00° 00' 06"	-0,03		
	316	1010,0851	1010,0881						
	317	1010,0829	1010,0858	0,06	1,7550	00° 00' 07"	0,03		
	318	1010,0831	1010,0860						
4. NOSNÍK	911	1039,8295	1039,8264	0,00	1,0044	00° 00' 00"	0,00		
	912	1039,8211	1039,8180						
	913	1039,8060	1039,8055	-0,10	1,2784	-00° 00' 16"	-0,08		
	914	1039,7958	1039,7952						
	915	1039,8175	1039,8183	0,22	1,2985	00° 00' 35"	0,17		
	916	1039,8109	1039,8120						
	917	1039,8170	1039,8182	-0,25	1,2958	-00° 00' 40"	-0,19		
	918	1039,8129	1039,8138						

\*  $\Delta H$  – použito z měření totální stanicí

Tabulka 26 – Porovnání metod při určení příčných přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech) [autor]

<b>Porovnání metod při určení příčných přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)</b>				
	Č. b.	$\Delta X_{tot}$	$\Delta X_{las}$	$\Delta X_{tot} - \Delta X_{las}$
		[mm]	[mm]	[mm]
<b>1. NOSNÍK</b>	111	0,10	-1,06	1,16
	112	-0,30	-1,19	0,89
	113	1,30	0,09	1,21
	114	0,40	-0,23	0,63
	115	0,90	0,52	0,38
	117	0,20	0,42	-0,22
	118	0,50	0,13	0,37
	121	0,00	0,47	-0,47
<b>2. NOSNÍK</b>	211	-0,20	-1,61	1,41
	212	-0,70	-1,62	0,92
	213	0,00	-1,02	1,02
	214	-0,10	-0,72	0,62
	215	0,10	0,47	-0,37
	216	0,10	0,46	-0,36
	217	0,00	0,41	-0,41
	218	0,50	0,44	0,06
	221	0,60	0,71	-0,11
<b>3. NOSNÍK</b>	311	-1,50	-2,03	0,53
	312	-1,20	-1,97	0,77
	313	-0,30	0,80	-1,10
	314	-0,60	0,56	-1,16
	315	0,00	3,02	-3,02
	316	0,40	2,97	-2,57
	317	-0,20	2,93	-3,13
	318	-0,30	2,99	-3,29
	321	-0,40	3,04	-3,44
<b>9. NOSNÍK</b>	911	-1,00	-3,10	2,10
	912	-0,80	-3,11	2,31
	913	0,60	-0,51	1,11
	914	1,30	-0,61	1,91
	915	-1,20	0,83	-2,03
	916	-0,80	1,05	-1,85
	917	-0,30	1,18	-1,48
	918	-0,60	0,93	-1,53
	921	-0,50	1,81	-2,31
		$m_x$		1,63 mm

Tabulka 27 – Porovnání metod při určení výškových přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech) [autor]

<b>Porovnání metod při určení výškových přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)</b>				
	Č. b.	$\Delta H_{tot}$	$\Delta H_{las}$	$\Delta H_{tot} - \Delta H_{las}$
		[mm]	[mm]	[mm]
<b>1. NOS.</b>	111	0,20	1,41	-1,21
	113	0,10	1,64	-1,54
	115	0,60	1,82	-1,22
	117	0,60	1,95	-1,35
<b>2. NOS.</b>	211	0,00	1,34	-1,34
	213	-0,10	1,12	-1,22
	215	0,40	1,65	-1,25
	217	0,50	1,72	-1,22
<b>3. NOS.</b>	311	0,00	0,88	-0,88
	313	-0,40	0,35	-0,75
	315	0,10	1,20	-1,10
	317	0,00	1,23	-1,23
<b>9. NOS.</b>	911	0,20	0,07	0,13
	913	-1,00	-0,57	-0,43
	915	-0,50	-0,75	0,25
	917	-0,50	-0,93	0,43
			$m_H$	1,06 mm

Tento postup rektifikace nepřinesl očekávané příznivé výsledky, naopak v porovnání s nerektifikovanými daty dosahujeme horších výsledků. Tabulka 28 zobrazuje srovnání výsledků před rektifikací a po rektifikaci.

Tabulka 28 – Srovnání výsledků před rektifikací a po rektifikaci (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech) [autor]

	$\Delta X_{tot} - \Delta X_{las}$ [mm]		$\Delta H_{tot} - \Delta H_{las}$ [mm]	
	před rektifikací	po rektifikaci	před rektifikací	po rektifikaci
m	0,81	1,63	0,26	1,06
Ø	-0,47	-0,27	-0,10	-0,87
min	-3,78	-3,44	-0,63	-1,54
max	2,40	2,31	0,35	0,43

### **8.3.2 Rektifikace laserového skenování odstraněním systematických odchylek skenovaných dat**

Druhým způsobem rektifikace dat získaných metodou laserového skenování, bylo odstranění systematických odchylek mezi mračny v 5. a v 6. etapě. Tato rektifikace probíhala opět odděleně pro souřadnici  $X$  a pro výšku  $H$ .

Pro výpočet byla použita výchozí nerektifikovaná data. Z těchto dat byly vypočteny systematické odchylky mezi 6. a 5. etapou. Následně byla vypočtena střední hodnota odchylky, o kterou byly poté jednotlivá přetvoření rektifikována. Pro souřadnici  $X$  byla střední hodnota původních příčných odchylek 0,36 mm, pro výšku  $H$  byla střední hodnota původních výškových odchylek 0,11 mm.

Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování po rektifikaci odstraněním systematických odchylek skenovaných dat zobrazuje Tabulka 29. Tabulka 30 zobrazuje vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování po rektifikaci odstraněním systematických odchylek skenovaných dat. Svislé náklony po rektifikaci odstraněním systematických odchylek skenovaných dat zobrazuje Tabulka 31, pro výpočet byly použity rektifikované posuny  $\Delta X$  mezi 6. a 5. etapou. Grafické výstupy jsou přílohou práce.

Tabulka 32 zobrazuje porovnání metod při určení příčných přetvoření po rektifikaci odstraněním systematických odchylek skenovaných dat. Tabulka 33 zobrazuje porovnání metod při určení výškových přetvoření po rektifikaci odstraněním systematických odchylek skenovaných dat.

Tabulka 29 – Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat) [autor]

Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)									
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		Přetvoření (původní)	Přetvoření (rektifik. o 0,36 mm)	Mezní chyba přetvoření (t=2; a=5 %)	Test statistické významnosti
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C				
		X (pův.)	$\sigma_X$	X (pův.)	$\sigma_X$	$\Delta X$ (pův.)	$\Delta X$ (rek.)	$\delta \Delta X$	$\Delta X$
		[m]	[mm]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	$\alpha=5\%$
1. NOSNÍK	111	1000,0581	0,52	1000,0570	0,51	-1,06	-1,42	1,46	M
	112	1000,0680	0,40	1000,0668	0,37	-1,19	-1,55	1,09	A
	113	1000,0639	0,46	1000,0641	0,46	0,22	-0,14	1,31	N
	114	1000,0675	0,34	1000,0674	0,33	-0,10	-0,46	0,94	N
	115	1000,0735	0,62	1000,0742	0,63	0,76	0,40	1,77	N
	116	1000,0847	0,38	1000,0852	0,41	0,56	0,20	1,12	N
	117	1000,0713	0,59	1000,0719	0,62	0,66	0,30	1,71	N
	118	1000,0847	0,98	1000,0851	0,96	0,37	0,01	2,75	N
	121	1000,0608	0,36	1000,0616	0,37	0,77	0,41	1,04	N
2. NOSNÍK	211	1005,0611	0,35	1005,0595	0,34	-1,65	-2,01	0,98	A
	212	1005,0687	0,34	1005,0670	0,37	-1,65	-2,01	1,01	A
	213	1005,0628	0,29	1005,0619	0,27	-0,91	-1,27	0,79	A
	214	1005,0666	0,32	1005,0660	0,32	-0,62	-0,98	0,91	A
	215	1005,0783	0,36	1005,0790	0,36	0,73	0,37	1,01	N
	216	1005,0766	0,32	1005,0774	0,32	0,72	0,36	0,91	N
	217	1005,0804	0,31	1005,0811	0,35	0,67	0,31	0,93	N
	218	1005,0768	0,75	1005,0775	0,79	0,71	0,35	2,18	N
	221	1005,0662	0,32	1005,0673	0,29	1,03	0,67	0,86	M
3. NOSNÍK	311	1010,0521	0,37	1010,0500	0,38	-2,11	-2,47	1,06	A
	312	1010,0450	0,72	1010,0430	0,72	-2,04	-2,40	2,04	A
	313	1010,0498	0,40	1010,0507	0,41	0,91	0,55	1,14	N
	314	1010,0399	0,45	1010,0406	0,48	0,66	0,30	1,31	N
	315	1010,0843	0,57	1010,0876	0,59	3,29	2,93	1,64	A
	316	1010,0844	0,37	1010,0877	0,37	3,24	2,88	1,05	A
	317	1010,0822	0,47	1010,0855	0,44	3,21	2,85	1,28	A
	318	1010,0824	0,51	1010,0857	0,50	3,27	2,91	1,44	A
	321	1010,0515	0,33	1010,0549	0,30	3,38	3,02	0,90	A
9. NOSNÍK	911	1039,8310	0,43	1039,8278	0,42	-3,20	-3,56	1,21	A
	912	1039,8227	0,49	1039,8195	0,48	-3,20	-3,56	1,37	A
	913	1039,8067	0,48	1039,8062	0,48	-0,46	-0,82	1,36	M
	914	1039,7966	0,52	1039,7960	0,51	-0,56	-0,92	1,45	M
	915	1039,8177	0,49	1039,8186	0,51	0,96	0,60	1,41	N
	916	1039,8111	0,49	1039,8123	0,45	1,19	0,83	1,33	M
	917	1039,8172	0,46	1039,8185	0,40	1,32	0,96	1,22	M
	918	1039,8131	0,42	1039,8141	0,39	1,07	0,71	1,14	M
	921	1039,8275	0,41	1039,8295	0,43	2,02	1,66	1,18	A
					$\emptyset$	0,36			* A = Ano, N = Ne, M = Možná



Tabulka 30 – Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat) [autor]

Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)									
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		Přetvoření (původní)	Přetvoření (rektifik. o 0,11 mm)	Mezní chyba přetvoření (t=2; a=5 %)	Test statistické významnosti
		Datum: 20. - 21. 12. 2019	Teplota: 29,3°C	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C				
		H (pův.)	$\sigma_H$	H (pův.)	$\sigma_H$	$\Delta H$ (pův.)	$\Delta H$ (rek.)	$\delta \Delta H$	
		[m]	[mm]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	$\alpha=5\%$
1. NOS.	111	103,7484	0,35	103,7487	0,31	0,31	0,20	0,93	N
	113	103,9354	0,45	103,9359	0,41	0,54	0,44	1,21	N
	115	103,8605	0,59	103,8612	0,65	0,72	0,61	1,75	N
	117	103,8637	1,35	103,8646	1,34	0,85	0,75	3,81	N
2. NOS.	211	103,7182	0,56	103,7185	0,55	0,24	0,14	1,57	N
	213	104,3676	1,08	104,3676	1,07	0,02	-0,09	3,04	N
	215	104,4883	0,51	104,4889	0,51	0,55	0,44	1,45	N
	217	104,4953	1,06	104,4959	1,08	0,62	0,51	3,02	N
3. NOS.	311	103,8839	1,12	103,8837	0,79	-0,22	-0,33	2,74	N
	313	105,1634	1,81	105,1626	1,78	-0,75	-0,86	5,08	N
	315	105,3922	0,79	105,3923	0,77	0,10	-0,01	2,21	N
	317	105,3878	1,31	105,3880	1,22	0,13	0,02	3,58	N
9. NOS.	911	105,8467	0,32	105,8470	0,35	0,27	0,16	0,94	N
	913	106,2775	0,76	106,2771	0,71	-0,37	-0,48	2,08	N
	915	106,1990	1,62	106,1984	1,65	-0,55	-0,65	4,62	N
	917	106,2063	2,19	106,2055	2,07	-0,73	-0,84	6,02	N
						$\emptyset$	0,11		

\* A = Ano, N = Ne, M = Možná

Tabulka 31 – Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat) [autor]

<b>Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování - porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)</b>						
	Č. b.	5. etapa		6. etapa		Náklon [ ° ' " ]
		Datum:	Teplota:	Datum:	Teplota:	
		20. - 21. 12. 2019	29,3°C	04. - 05. 03. 2020	29,4°C	
		$\Delta X$ (6. - 5. etapa) rektifikované	$\Delta dX$	$\Delta H$	$\Delta dX/1m$	
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
<b>1. NOSNÍK</b>	111	-1,42	-0,12	1,2458	-00° 00' 20"	-0,1
	112	-1,55				
	113	-0,14	-0,33	1,8433	-00° 00' 37"	-0,2
	114	-0,46				
	115	0,40	-0,19	1,7197	-00° 00' 14"	-0,1
	116	0,20				
	117	0,30	-0,29	1,7136	-00° 00' 35"	-0,2
	118	0,01				
<b>2. NOSNÍK</b>	211	-2,01	0,00	1,2794	00° 00' 00"	0,0
	212	-2,01				
	213	-1,27	0,29	1,7903	00° 00' 33"	0,2
	214	-0,98				
	215	0,37	-0,01	1,7312	-00° 00' 01"	0,0
	216	0,36				
	217	0,31	0,04	1,7257	00° 00' 05"	0,0
	218	0,35				
<b>3. NOSNÍK</b>	311	-2,47	0,06	1,2430	00° 00' 10"	0,0
	312	-2,40				
	313	0,55	-0,24	1,7856	-00° 00' 28"	-0,1
	314	0,30				
	315	2,93	-0,05	1,7652	00° 00' 06"	0,0
	316	2,88				
	317	2,85	0,06	1,7550	00° 00' 07"	0,0
	318	2,91				
<b>9. NOSNÍK</b>	911	-3,56	0,00	1,0044	00° 00' 00"	0,0
	912	-3,56				
	913	-0,82	-0,10	1,2784	-00° 00' 16"	-0,1
	914	-0,92				
	915	0,60	0,22	1,2985	00° 00' 35"	0,2
	916	0,83				
	917	0,96	-0,25	1,2958	-00° 00' 40"	-0,2
	918	0,71				

\*  $\Delta H$  – použito z měření totální stanicí

Tabulka 32 – Porovnání metod při určení příčných přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat) [autor]

<b>Porovnání metod při určení příčných přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)</b>				
	Č. b.	$\Delta X_{tot}$	$\Delta X_{las}$	$\Delta X_{tot} - \Delta X_{las}$
		[mm]	[mm]	[mm]
<b>1. NOSNÍK</b>	111	0,10	-1,42	1,52
	112	-0,30	-1,55	1,25
	113	1,30	-0,14	1,44
	114	0,40	-0,46	0,86
	115	0,90	0,40	0,50
	117	0,20	0,30	-0,10
	118	0,50	0,01	0,49
	121	0,00	0,41	-0,41
<b>2. NOSNÍK</b>	211	-0,20	-2,01	1,81
	212	-0,70	-2,01	1,31
	213	0,00	-1,27	1,27
	214	-0,10	-0,98	0,88
	215	0,10	0,37	-0,27
	216	0,10	0,36	-0,26
	217	0,00	0,31	-0,31
	218	0,50	0,35	0,15
	221	0,60	0,67	-0,07
	<b>3. NOSNÍK</b>	311	-1,50	-2,47
312		-1,20	-2,40	1,20
313		-0,30	0,55	-0,85
314		-0,60	0,30	-0,90
315		0,00	2,93	-2,93
316		0,40	2,88	-2,48
317		-0,20	2,85	-3,05
318		-0,30	2,91	-3,21
321		-0,40	3,02	-3,42
<b>9. NOSNÍK</b>		911	-1,00	-3,56
	912	-0,80	-3,56	2,76
	913	0,60	-0,82	1,42
	914	1,30	-0,92	2,22
	915	-1,20	0,60	-1,80
	916	-0,80	0,83	-1,63
	917	-0,30	0,96	-1,26
	918	-0,60	0,71	-1,31
	921	-0,50	1,66	-2,16
				$m_x$

Tabulka 33 – Porovnání metod při určení výškových přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat) [autor]

<b>Porovnání metod při určení výškových přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)</b>				
	Č. b.	$\Delta H_{tot}$	$\Delta H_{las}$	$\Delta H_{tot} - \Delta H_{las}$
		[mm]	[mm]	[mm]
<b>1. NOS.</b>	111	0,20	0,20	0,00
	113	0,10	0,44	-0,34
	115	0,60	0,61	-0,01
	117	0,60	0,75	-0,15
<b>2. NOS.</b>	211	0,00	0,14	-0,14
	213	-0,10	-0,09	-0,01
	215	0,40	0,44	-0,04
	217	0,50	0,51	-0,01
<b>3. NOS.</b>	311	0,00	-0,33	0,33
	313	-0,40	-0,86	0,46
	315	0,10	-0,01	0,11
	317	0,00	0,02	-0,02
<b>9. NOS.</b>	911	0,20	0,16	0,04
	913	-1,00	-0,48	-0,52
	915	-0,50	-0,65	0,15
	917	-0,50	-0,84	0,34
			$m_H$	0,24 mm

Ani tento postup rektifikace nepřinesl výrazné zlepšení výsledků. V souřadnici  $X$  získáváme mírně horší výsledky než u předchozího postupu rektifikace. Naopak u výšky  $H$  získáváme lepší výsledky než při předchozím způsobu rektifikace, v porovnání s nerektifikovanými daty dosahují výsledky rektifikace mírného zlepšení, toto zlepšení je však tak malé, že je téměř zanedbatelné. Tabulka 34 zobrazuje srovnání výsledků před a po rektifikaci.

Tabulka 34 – Srovnání výsledků před rektifikací a po rektifikaci (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat) [autor]

	$\Delta X_{tot} - \Delta X_{las}$ [mm]		$\Delta H_{tot} - \Delta H_{las}$ [mm]	
	před rektifikací	po rektifikaci	před rektifikací	po rektifikaci
m	0,81	1,69	0,26	0,24
$\emptyset$	-0,47	-0,05	-0,10	0,01
min	-3,78	-3,42	-0,63	-0,52
max	2,40	2,76	0,35	0,46

## 9 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Analýza vnitřní přesnosti měření polární metodou ukázala, že totální stanice Topcon GT-1001 je při měření na krátké vzdálenosti a za stejných atmosférických podmínek schopna měřit s vyšší přesností, než kterou udává výrobce.

Analýza přesnosti dat získaných metodou laserového skenování ukázala, že MultiStanice Leica MS60 umožňuje provádět skenování s přesností cca 0,75 mm. Dále analýza ukázala, že zpětná odrazivost materiálu má pouze malý vliv na přesnost, pro dřevo je přesnost určení 0,72 mm, pro keramickou dlažbu je přesnost určení 0,77 mm a pro kov je přesnost určení 0,78 mm. Naopak velký vliv má úhel dopadu paprsku skeneru, kde pro úhel dopadu 0–20 gon je přesnost určení cca 1,00 mm a pro úhel dopadu 80–100 gon je přesnost určení cca 0,44 mm. Z těchto hodnot vyplývá, že nejpřesnějších výsledků dosahujeme ve chvíli, kdy je přístroj postaven přímo proti skenované ploše a paprsky tak dopadají na skenovaný objekt pod pravým úhlem.

Z vyhodnocení přetvoření měřených polární metodou byly zjištěny maximální hodnoty průhybu 1,20 mm (9. nosník), změny rozpětí 3,40 mm (9. nosník), v příčném směru byla maximální hodnota 1,50 mm (3. nosník). Pomocí statistického testování bylo prokázáno, že v jednotlivých souřadnicích v 5 % přetvoření nastalo, v 67 % přetvoření nenastalo a ve 28 % přetvoření mohlo nastat, ale nebylo prokázáno.

Z dat získaných metodou laserového skenování byla vyhodnocena pouze příčná a výšková přetvoření, změny rozpětí nosníků (tj. přetvoření v souřadnici  $Y$ ) nebylo možné vyhodnotit z důvodu nenalezení vhodných plošek pro vyhodnocení. Maximální hodnota průhybu byla 0,85 mm (1. nosník), v příčném směru byla maximální hodnota 3,38 mm (3. nosník). Pomocí statistického testování bylo prokázáno, že v 31 % přetvoření nastalo, v 46 % přetvoření nenastalo a ve 23 % přetvoření mohlo nastat, ale nabylo prokázáno.

Vyhodnocená přetvoření z obou metod byla následně vzájemně porovnána, přičemž hodnoty získané polární metodou byly považovány za etalon. V příčném směru byl maximální rozdíl metod 3,78 mm (3. nosník), směrodatná odchylka rozdílu metod v příčném směru byla 0,81 mm. U výškového přetvoření byl maximální rozdíl obou metod 0,63 mm (9. nosník), směrodatná odchylka byla 0,26 mm.

Poté byla vykonána rektifikace dat z laserového skenování ve snaze dosáhnout lepších výsledků vyhodnocení přetvoření v porovnání s měřením totální stanicí. Pro rektifikaci byly použity dva postupy. V prvním postupu byla odstraněna systematická odchylka na orientačních bodech. Po první rektifikaci byl maximální rozdíl metod v příčném směru 3,44 mm (3. nosník), směrodatná odchylka rozdílu metod byla 1,63 mm. Maximální rozdíl metod u výškového přetvoření byl po první rektifikaci 1,54 mm (1. nosník),

směrodatná odchylka rozdílu metod byla 1,06 mm. Druhým postupem rektifikace bylo odstranění systematických odchylek mezi skeny z 5. a 6. etapy. Po této rektifikaci byl maximální rozdíl v příčném směru 3,42 mm (3. nosník), směrodatná odchylka rozdílu metod byla 1,69 mm. U výškového přetvoření byl maximální rozdíl metod 0,52 mm (9. nosník), směrodatná odchylka rozdílu metod byla 0,24 mm.

Použité postupy rektifikace nepřinesly výrazné zlepšení výsledků. Ve většině případů došlo naopak ke zhoršení výsledků v porovnání s daty před rektifikací. Pokud se však na výsledky podíváme s odstupem, zjistíme že dosahujeme velmi dobrých výsledků, které jsou srovnatelné s výsledky publikovanými v odborných člancích a příspěvcích. Tabulka 35 zobrazuje směrodatné odchylky příčných a výškových přetvoření určených z dat získaných metodou laserového skenování a přesnost rozdílu metod, kde výsledky měření totální stanicí bereme jako etalon, tudíž počítáme se skutečnými chybami.

Tabulka 35 – Směrodatné odchylky příčných a výškových přetvoření, přesnost rozdílu metod [autor]

	před rektifikací	po 1. rektifikaci	po 2. rektifikaci
$\sigma_X$ [mm]	1,72	1,61	1,72
$\sigma_H$ [mm]	0,49	0,92	0,49
$mX_{\text{tot-las}}$ [mm]	0,81	1,63	1,69
$mH_{\text{tot-las}}$ [mm]	0,26	1,06	0,24

## 9.1 Porovnání získaných výsledků s již publikovanými výsledky

Autoři článku [12] ze Slovenské technické univerzity v Bratislavě, kteří se zabývali monitoringem mostu pro pěší přes řeku Malý Dunaj, dosáhli směrodatné odchylky výškového posunu cca 3 mm. Vyhodnocení posunů probíhalo na vyfiltrovaných reprezentativních ploškách o rozměrech 0,1 m x 0,1 m, obdobně jako v našem případě. Námi dosažené výsledky potvrzují závěry příspěvku, o možnosti použití metody laserového skenování pro sledování posunů a přetvoření.

Článek [13] zabývající se laserovým skenováním při zatěžovacích zkouškách mostu je pro srovnání s našimi výsledky ještě vhodnější, neboť během zatěžovací zkoušky bylo prováděno jednak měření pomocí totálních stanic, ale také metodou laserového skenování. Směrodatná odchylka laserového skenování dosáhla hodnoty cca 3 mm, směrodatná odchylka rozdílu metod dosáhla cca 2 mm. Výsledky publikované v tomto článku jsou srovnatelné s našimi dosaženými výsledky a potvrzují možnost využití metody laserového skenování pro sledování posunů a přetvoření.

## 9.2 Zhodnocení efektivity obou použitých metod

Obě metody mají svá značná specifika. Časová náročnost při sběru dat je u obou metod přibližně totožná, ovšem při vyhodnocování výsledků potřebujeme pro data získaná metodou laserového skenování vyšší časovou dotaci. Tabulka 36 zobrazuje časovou náročnost obou metod pro jednotlivé úkony. Hodnoty v tabulce jsou uvedeny v součtu za obě etapy.

Tabulka 36 – Časová náročnost jednotlivých metod [autor]

Úkon	Polární metoda	Metoda laserového skenování
Terénní práce	10 hod	10 hod
Zpracování dat	6 hod	22 hod
Vyhodnocení	2 hod	2 hod
Grafické zpracování	4 hod	4 hod
<b>Celkem</b>	<b>22 hod</b>	<b>38 hod</b>

Z Tabulky 36 je zřejmé, že časová náročnost pro zpracování dat z metody laserového skenování je o 16 hodin větší než u dat získaných polární metodou. Tato skutečnost je jednou z nevýhod využití metody laserového skenování. Další nevýhodou je velký objem dat a s tím spojená náročnost na zpracovatelské vybavení. Naopak výhodou metody laserového skenování je možnost zkoumat širší souvislosti v chování pozorovaného objektu.

Metoda laserového skenování se stává výhodnější ve chvíli, kdy je objekt osazen nízkým počtem pozorovaných bodů, v důsledku čehož není možné při měření totální stanicí vystihnout jeho celkové chování. Obě metody mají v praxi své využití, je však nutné je vhodně aplikovat.

## 10 ZÁVĚR

Cílem práce bylo porovnání metody laserového skenování s měřením polární metodou, a to především z hlediska přesnosti a využitelnosti metody laserového skenování pro sledování a vyhodnocení posunů a přetvoření.

V rámci práce byla vykonána dvě etapová měření, která probíhala v prosinci 2019 (5. etapa) a v březnu 2020 (6. etapa).

Analýzy přesnosti dat získaných metodou laserového skenování ukázaly, že přesnost určení je přibližně 0,75 mm. Významný vliv na přesnost má úhel dopadu paprsku, kdy při kolmém úhlu dopadu dosahujeme přesnosti určení cca 0,44 mm, kdežto při šikmém úhlu dopadu dosahujeme přesnosti cca 1,00 mm.

Pro porovnání obou metod byla přetvoření určená z měření polární metodou považována za etalon. Při porovnání v příčném směru (v souřadnici  $X$ ) byla směrodatná odchylka rozdílu metod 0,81 mm, ve výšce  $H$  byla směrodatná odchylka rozdílu metod 0,26 mm.

Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že metodu laserového skenování lze použít pro sledování posunů a přetvoření. Přesnost výsledků je srovnatelná s přesností konvenčních metod, rozdíly mohou být způsobeny nejistotami měření. Pro získání nejlepších výsledků při skenování je nutné dobře volit postavení přístroje. Časová náročnost měření, je přibližně stejná s měřením totální stanicí, časová náročnost zpracování je ale delší než u klasických metod. Výhodou je však možnost zkoumat širší souvislosti v chování pozorovaného objektu.



## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BUREŠ, Jiří, Bohumil STRAKA a Milan ŠMAK. *Závěry z měření deformací vybraných dřevěných konstrukcí geodetickými metodami* [online]. In: Brno, 2012 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9106-zavery-z-mereni-deformaci-vybranych-drevenych-konstrukci-geodetickymi-metodami>
- [2] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *Inženýrská geodézie II: Modul 03 - geodézie ve stavebních oborech*. Brno, 2007. Fakulta stavební VUT v Brně.
- [3] ČSN 73 0405 *Měření posunů stavebních objektů*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [4] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *Inženýrská geodézie I: Modul 02 - geodézie ve stavebnictví*. Brno, 2006. Fakulta stavební VUT v Brně.
- [5] PROCHÁZKA, Jaromír. *SYLABUS 11. PŘEDNÁŠKY Z INŽENÝRSKÉ GEODÉZIE: Měření posunů a přetvoření* [online]. Praha, 2018 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: [http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie\\_geoinformatika/inge/Sylabus\\_IG\\_11.pdf](http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie_geoinformatika/inge/Sylabus_IG_11.pdf). Fakulta stavební ČVUT v Praze.
- [6] Leica LS15. In: *Gefos* [online]. Praha [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/nivelacni-pristroje-pro-geodezii/geodeticke-presne-nivelacni-pristroje/ls10-ls15>
- [7] BUREŠ, Jiří a Bohumil STRAKA. Geodetické metody při měření přetvoření dřevěných konstrukcí velkých rozpětí. In: *EXPERIMENT '04*. Brno: Akademické nakladatelství CERM s r.o., 2004, s. 7. ISBN 80-7204-354-4.
- [8] HANZL, Vlastimil. *Fotogrametrie: Modul 01 - teoretické základy fotogrametrie*. Brno, 2006. Fakulta stavební VUT v Brně.
- [9] FARO Fokus S. In: *Geotronics Praha* [online]. Praha [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://geotronics.cz/faro-skenery/>
- [10] KLUSÁČEK, Ladislav, Jiří BUREŠ a Radim NEČAS. Měřicí technologie při rekonstrukci předpjatého mostu Gagarin. *Silnice a železnice: Mosty a tunely*. 2011, 7. ISSN 1801- 822X.

- [11] Tenzometrický snímač. In: *HW: Automatizace* [online]. Praha [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [12] KOPÁČIK, Alojz, Jan ERDÉLYI, Imrich LIPTÁK a Peter KYRINOVÍČ. Pedestrian Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning. In: *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies*. London: Taylor & Francis Group, 2016, s. 6. ISBN 978-1-138-02907-1.
- [13] JAŠEK, Petr, Jaroslav BRAUN a Hana BRAUNOVÁ. Využití laserového skenování při zatěžovacích zkouškách mostů. In: *Geodézie ve stavebnictví a průmyslu 2020*. Praha: Český svaz geodetů a kartografů, 2020, s. 8. ISBN 978-80-02-02898-7.
- [14] KOPÁČIK, Alojz. Terrestrial laser system testing using reference bodies. In: *3rd IAG Symposium on Geodesy for geotechnical and structural engineering: 12th FIG Symposium on deformation measurement*. Baden, 2006, s. 9.
- [15] KOTALOVÁ, Kateřina. Aquapark Kohoutovice. In: *ASB - portál* [online]. Praha: Jaga média, 2010 [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/architektura/obcanske-stavby/sportoviste/aquapark-kohoutovice>
- [16] Topcon GT-1001. In: *TOPGEOSYS* [online]. Brno [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.topgeosys.cz/totalni-stanice/>
- [17] Leica MS60. In: *Gefos* [online]. Praha [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: [https://www.gefos-leica.cz/e-shop/geodeticke-pristroje/totalni-stanice/ms60\\_\\_822431](https://www.gefos-leica.cz/e-shop/geodeticke-pristroje/totalni-stanice/ms60__822431)
- [18] SLOVÁČEK, Svatopluk. *GNET: Souřadnicové výpočty v geodetických sítích (uživatelská příručka)*. Brno, 1997.
- [19] WEIGEL, Josef. *Teorie chyb a vyrovnávací počet II: Základní druhy vyrovnání (1. část)*. Brno, 2004. Fakulta stavební VUT v Brně.

## **SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK**

MNČ	Metoda nejmenších čtverců
ČSN	Česká státní norma
VPN	Velmi přesná nivelace
PN	Přesná nivelace
GNNS	Globální navigační satelitní systém
DPZ	Dálkový průzkum země
ppm	Parts per milion (dílů na milion)

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Měřicí systém velmi přesné nivelace – Leica LS15	13
Obrázek 2	Princip hydrostatické nivelace	14
Obrázek 3	Princip trigonometrického výškového měření	14
Obrázek 4	Princip metody záměrné přímky	15
Obrázek 5	Princip polygonové metody	15
Obrázek 6	Princip trigonometrické metody	15
Obrázek 7	Princip metody prostorového protínání z úhlů	16
Obrázek 8	Princip prostorové polární metody	16
Obrázek 9	Laserový skener FARO Focus S	17
Obrázek 10	Tenzometrický snímač	18
Obrázek 11	Bazénový komplex	22
Obrázek 12	Interiér bazénové haly	22
Obrázek 13	Architektonické zpracování bazénové haly	23
Obrázek 14	Příčný řez bazénovou halou	23
Obrázek 15	Rozmístění sledovaných střešních nosníků	24
Obrázek 16	Rozmístění pozorovaných bodů	24
Obrázek 17	Totální stanice Topcon GT–1001	25
Obrázek 18	MultiStanice Leica Nova MS60	26
Obrázek 19	Volba a orientace souřadnicové soustavy	30
Obrázek 20	Grafická ukázka kritérii definující plošku v souřadnici $X$	32
Obrázek 21	Schéma rozmístění plošek použitých pro analýzu přesnosti	33
Obrázek 22	Schéma vyhodnocení úhlu dopadu	35

## SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tabulka 1	Technické parametry Topcon GT–1001	25
Tabulka 2	Technické parametry Leica Nova MS60	26
Tabulka 3	Přehled orientačních bodů laserové skenování 5. etapy (12/2019)	28
Tabulka 4	Přehled orientačních bodů laserové skenování 6. etapy (03/2020)	28
Tabulka 5	Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti měření 5. etapy	29
Tabulka 6	Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti měření 6. etapy	29
Tabulka 7	Apriorní přesnost měření udávaná výrobcem	30
Tabulka 8	Výsledné přesnosti vyrovnání jednotlivých etap	31
Tabulka 9	Ukázka kritérii definující plošku v souřadnici $X$	32
Tabulka 10	Směrodatné odchytky v 5. a 6. etapě	32
Tabulka 11	Směrodatné odchytky dle zpětné odrazivosti materiálu	34
Tabulka 12	Vliv úhlu dopadu paprsku na přesnost	35
Tabulka 13	Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou – porovnání 6. etapy od 5. etapy (1. část)	38
Tabulka 14	Vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou – porovnání 6. etapy od 5. etapy (2. část)	39
Tabulka 15	Svislé náklony nosníku měřené polární metodou – porovnání 6. etapy od 5. etapy	40
Tabulka 16	Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací)	42
Tabulka 17	Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací)	43
Tabulka 18	Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (před rektifikací)	44

Tabulka 19	Porovnání metod při určení příčných přetvoření (před rektifikací)	46
Tabulka 20	Porovnání metod při určení výškových přetvoření (před rektifikací)	47
Tabulka 21	Tabulka hodnot pro rektifikaci v souřadnici $X$ odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech	48
Tabulka 22	Tabulka hodnot pro rektifikaci ve výšce $H$ odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech	49
Tabulka 23	Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)	50
Tabulka 24	Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)	51
Tabulka 25	Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)	52
Tabulka 26	Porovnání metod při určení příčných přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)	53
Tabulka 27	Porovnání metod při určení výškových přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)	54
Tabulka 28	Srovnání výsledků před rektifikací a po rektifikaci (rektifikace odstraněním systematických odchylek na orientačních bodech)	54
Tabulka 29	Vyhodnocení příčných přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)	56
Tabulka 30	Vyhodnocení výškových přetvoření měřených metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)	57

Tabulka 31	Svislé náklony nosníku měřené metodou laserového skenování – porovnání 6. etapy od 5. etapy (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)	58
Tabulka 32	Porovnání metod při určení příčných přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)	59
Tabulka 33	Porovnání metod při určení výškových přetvoření (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)	60
Tabulka 34	Srovnání výsledků před rektifikací a po rektifikaci (rektifikace odstraněním systematických odchylek skenovaných dat)	60
Tabulka 35	Směrodatné odchylky příčných a výškových přetvoření, přesnost rozdílu metod	62
Tabulka 36	Časová náročnost jednotlivých metod	63
Graf 1	Vliv zpětné odrazivosti materiálu na přesnost	34
Graf 2	Vliv úhlu dopadu paprsku na přesnost	35

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha 1	Grafické znázornění přetvoření – měřených polární metodou	(7 s.)
Příloha 2	Grafické znázornění přetvoření – měřených metodou laserového skenování	(21 s.)