



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 SPORTOVNÍ HALY

DEFORMATION MEASUREMENT OF THE ROOF STRUCTURE OF A SPORT HALL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radoslav Klinčík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BUREŠ, Ph.D.

BRNO 2021



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. Radoslav Klinčík
Název	Měření posunů a přetvoření střešní konstrukce sportovní haly
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2020
Datum odevzdání	28. 5. 2021

V Brně dne 30. 11. 2020

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 – Návod 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 sportovní haly. Soustředte 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 měřením a vyhodnocením posunů a přetvoření dřevěné střešní konstrukce bazénové haly v Brně – Kohoutovicích. Část práce se věnuje přípravě a testování použitých přístrojů a pomůcek. Hlavní část práce spočívá v provedení jedné etapy měření s využitím polární metody a metody laserového skenování. Měření polární metodou je porovnáváno s výsledky polární metody předchozí etapy. Další část práce se zabývá porovnáním polární metody a metody laserového skenování měřených v poslední etapě. Dosažené výsledky jsou interpretovány v závěrečné části práce.

KLÍČOVÁ SLOVA

měření posunů a přetvoření, polární metoda, metoda laserového skenování, dřevěná střešní konstrukce, etapa, metoda nejmenších čtverců, interpretace

ABSTRACT

Diploma thesis describes the measurement and evaluation of displacements and deformations of the wooden roof structure of the aquapark hall in Brno – Kohoutovice. Part of the work is devoted to the preparation and testing of used devices and tools. The main part of the work consists of performing one stage of measurement using the polar method and the laser scanning method. The polar method measurement is compared with the results of the polar method of the previous stage. The next part of the work deals with the comparison of the polar method and the laser scanning method measured in the last stage. The results achieved are interpreted in the final part of the work.

KEYWORDS

measurement of displacements and deformations, polar method, laser scanning method, wooden roof structure, epoch, least squares method, interpretation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Radoslav Klinčák *Měření posunů a přetvoření střešní konstrukce sportovní haly*. Brno, 2021. 94 s., 7 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 sportovní haly* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26. 5. 2021

Bc. Radoslav Klinčík
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

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

V Brně dne 26. 5. 2021

Bc. Radoslav Klinčík
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Burešovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a postřehy při vypracování diplomové práce. Velké díky patří rovněž rodině a přítelkyni za veškerou podporu v průběhu celého studia.

V Brně dne 26. 5. 2021

OBSAH

1 ÚVOD.....	10
2 MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ STAVEBNÍCH OBJEKTŮ	11
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY A POŽADAVKY	13
2.2 METODY MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ.....	14
2.2.1 GEODETICKÉ METODY MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ.....	15
2.2.2 NEGEODETICKÉ (FYZIKÁLNÍ) METODY MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ	21
3 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	25
4 SLEDOVANÝ OBJEKT	27
4.1 POPIS SLEDOVANÉHO OBJEKTU	27
4.2 ROZMÍSTĚNÍ SLEDOVANÝCH BODŮ	29
5 POUŽITÉ METODY A PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ PŘI MĚŘENÍ SLEDOVANÉHO OBJEKTU	31
5.1 PROSTOROVÁ POLÁRNÍ METODA.....	31
5.2 METODA LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ.....	31
5.3 PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ.....	32
5.4 MĚŘENÍ 7. ETAPY.....	33
6 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT BAZÉNOVÉ HALY PROSTOROVOU POLÁRNÍ METODOU	34
6.1 ANALÝZA VNITŘNÍ PŘESNOSTI NAMĚŘENÝCH DAT PROSTOROVOU POLÁRNÍ METODOU	34
6.2 VYROVNÁNÍ SOUŘADNIC MNČ	36
7 VYHODNOCENÍ ROZMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ A KONTROLA LASEROVÉHO SKENERU	38
7.1 VYHODNOCENÍ ROZMĚRU MĚŘICKÝCH KOULÍ	38
7.1.1 ÚHLOVÉ VYHODNOCENÍ PRŮMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ	40
7.1.2 DÉLKOVÉ VYHODNOCENÍ PRŮMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ.....	42
7.1.3 RASTROVÉ VYHODNOCENÍ PRŮMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ.....	44

7.1.4 VYHODNOCENÍ VÝŠKOVÉHO ROZDÍLU MEZI HRANOLEM A MĚŘICKOU KOULÍ	47
7.2 KONTROLA A VYHODNOCENÍ LASEROVÉHO SKENERU	50
7.2.1 POROVNÁNÍ PŘEVÝŠENÍ A DÉLEK MEZI JEDNOTLIVÝMI SKENY A VÝPOČET SKLONU ZÁMĚRNÉ PŘÍMKY PŘÍSTROJE	52
7.2.2 POROVNÁNÍ PŘEVÝŠENÍ A DÉLEK MEZI JEDNOTLIVÝMI SKENY A TERESTRICKÝM MĚŘENÍM.....	57
7.2.3 POROVNÁNÍ SOUŘADNIC MEZI JEDNOTLIVÝMI SKENY.....	61
7.2.4 VYHODNOCENÍ ORIENTACE LASEROVÉHO SKENERU	63
8 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT BAZÉNOVÉ HALY METODOU LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ	65
8.1 FILTROVÁNÍ DAT.....	67
8.2 ANALÝZA PŘESNOSTI LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ V ZÁVISLOSTI NA ZPĚTNOU ODRAZIVOST MATERIÁLU	68
8.3 ANALÝZA PŘESNOSTI LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ V ZÁVISLOSTI NA ÚHLU DOPADU PAPERU SKENERU.....	70
9 VYHODNOCENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ.....	71
9.1 VYHODNOCENÍ ROZDÍLŮ ETAP MĚŘENÝCH POLÁRNÍ METODOU	72
9.2 VYHODNOCENÍ ROZDÍLU MEZI POLÁRNÍ METODOU A METODOU LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ.....	77
10 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ	80
10.1 POROVNÁNÍ VÝSLEDKU S JIŽ PUBLIKOVANÝMI PRÁCEMI.....	82
10.2 POROVNÁNÍ EFEKTIVNOSTI POUŽITÝCH METOD.....	83
11 ZÁVĚR	84
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	85
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	88
SEZNAM OBRÁZKŮ	89
SEZNAM TABULEK.....	91
SEZNAM PŘÍLOH.....	94

1 ÚVOD

Měření posunu a přetvoření staveb tvoří v současné době neoddělitelnou část inženýrské geodézie. Ve všech fázích výstavby jsou stále více využívány moderní technologie. Pomocí nových technologií je možné navrhovat, vyrábět a montovat stále složitější konstrukce. Tyto konstrukce je nutné v průběhu výstavby a po jejím dokončení monitorovat. Monitoringem se ověřuje jejich skutečné chování v daných podmínkách, hlavně působení vnějších podmínek na konstrukci. Dochází k dosedání, dotvarování a dalším prostorovým změnám.

Klasické geodetické metody jsou při určení posunů a přetvoření střídány modernějšími technologiemi jako jsou laserové skenování, fotogrammetrie nebo metoda globálních navigačních systémů. Geodetické metody mohou být doplněny i negeodetickými metodami jako jsou radiová interferometrie nebo použití laserového interferometru.

Předmětem diplomové práce je měření a vyhodnocení posunů a přetvoření střešní konstrukce velkého rozpětí bazénové haly aquaparku Kohoutovice v Brně. Základním konstrukčním materiálem této stavby je dřevo, které je nutné kvůli jeho vlastnostem neustále monitorovat.

Cílem diplomové práce je posouzení posunů a přetvoření klasickým měřením terestrickou metodou a také metodou laserového skenování. Při terestrickém měření je vykonáno měření jedné etapy s odstupem devíti měsíců od předchozí etapy. Zaměření laserovým skenerem je porovnáváno s výsledky terestrické metody. V rámci měření byly provedeny kontroly a analýzy jednotlivých metod měření.

Výsledkem práce je číselné vyhodnocení a grafické zpracování zjištěných posunů a přetvoření sledované konstrukce.

2 MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ STAVEBNÍCH OBJEKTŮ

Měření posunů a přetvoření představuje jednu z nejobtížnějších aplikací moderních a klasických měřických postupů, a to vzhledem na požadovanou vysokou přesnost, významnou ekonomickou náročnost stavby a spolehlivost výsledků. Stavební konstrukce, ale i jiné například přírodní objekty mohou v konsekvenci působení vnějších vlivů vykazovat nestabilitu prostorové polohy. Nejčastěji jsou změnami zatíženy základové půdy, nerovnoměrné sedání objektu, působení a kolísání hladiny spodních vod, dynamické provozní účinky, seismická aktivita či nestabilita způsobená tlakem sousedních objektů. Dalšími faktory můžou být také vliv slunečního záření, působení silného větru nebo sezonní změny teplot a vlhkosti. V důsledku působení těchto vlivů se objekt buď přemísťuje jako celek, dochází k posunu, nebo se a mění jeho tvar, a dochází k přetvoření. Může také docházet ke kombinaci obou jevů současně. Takové změny stavebních konstrukcí jsou vždy velmi nežádoucí, jelikož mohou porušit bezpečnou funkci stavby a tím narušit její plynulý provoz. Hlavním účelem je získání informací o velikosti změn a rychlosti jejich vývoje prostřednictvím pozorovaných bodů. Tyto změny je třeba kontrolovat opakovaným měřením a určovat jejich časový vývoj. [1] Důležitou součástí měření posunů a přetvoření je plynulé zachycení průběhu změn objektu včetně okolností, které je způsobily. Proto se některé objekty sledují prostřednictvím jednotlivých etap měření. Nejdůležitější částí je měření základní – nulté etapy. Vzhledem k nulté etapě se vztahují hodnoty posunů a přetvoření pozorovaných bodů v následujících etapách. Měření základní etapy se vykonává s dvojnásobným počtem měřených veličin oproti běžné etapě, nejlépe s vystřídáním různých podmínek měření. Po dobu výstavby objektu se měří při čtvrtinovém, polovičním, tříčtvrtečním a plném zatížení objektu, nebo dle zadání investora, projektanta či statika. V průběhu měření je mimo měření zaznamenáván také stav stavebního objektu, provozní podmínky, teplota, tlak a vlhkost vzduchu, tedy vlivy, které by mohli ovlivnit měření. Měření se provádí na vhodně osazených měřických značkách pozorovaných bodů rozmístěných na celém sledovaném objektu. Příklad značek je zobrazen na Obr. 1. Jejich osazení musí zaručovat trvanlivost po celou dobu měření. Osazení značek musí být konzultováno se statikem a projektantem pro správné charakterizování vlastního chování objektu a průběh jejího posunu a přetvoření. Po ukončení výstavby a uvedení objektu do provozu se posuny měří v intervalech podle druhu a charakteru objektu. [1], [2]

Účelem měření posunů a přetvoření je:

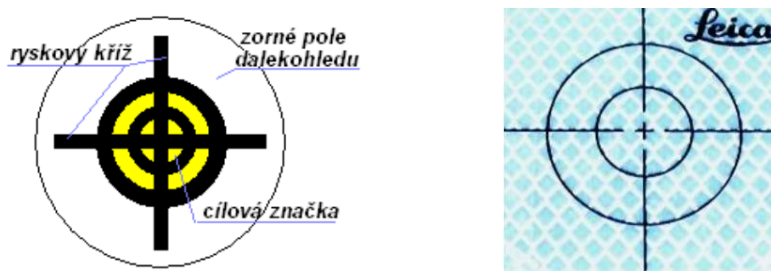
- sledovat stav, bezpečnost a spolehlivost objektů
- ověřovat správnost teoretických výpočtů
- získávat vědomosti o chování podlaží a stavebních konstrukčních materiálů
- hodnotit vliv různých fyzikálních faktorů prostředí [3]

Cílem je spolehlivé měření posunů a přetvoření v několika fázích výstavby:

- při zakládání stavebních objektů
- v průběhu výstavby stavebních objektů
- po dokončení výstavby a předávání objektu do provozu
- při laboratorních zkouškách a testování atributů konstrukčních složek
- v průběhu provozu objektů (funkční a bezpečnostní zkoušky) [2]

Pro vyhodnocení měření můžeme určit posun relativní nebo absolutní. Relativní změny charakterizují vztah v soustavě vztažných bodů. Změny vzhledem k soustavě vztažných bodů charakterizujeme absolutním posunem. Posuny a přetvoření stavebních objektů sledujeme ve směru vertikálním a horizontálním. V horizontálním směru posuzujeme posuny ve vodorovné rovině nebo pootočení. Ve vertikálním směru je to pak zdvih, sedání, průhyb nebo náklon objektu. Z vyhodnocení obou posunů určíme posun prostorový tedy určení tvaru objektu (přetvoření). [1]

Dokumentem zbývající se celou problematikou měření posunů a přetvoření je technická norma ČSN 73 0405 *Měření posunů stavebních objektů*. Norma popisuje účel, projekt, přesnost, vyhodnocení a samostatné měření. [4]



Obr. 1: Ukázka měřické značky pro úhlová měření (vlevo) a odrazné značky pro délková a úhlová měření (vpravo) [3]

2.1 ZÁKLADNÍ POJMY A POŽADAVKY

Požadavkem pro každý stavební objekt nebo konstrukci je stanovení účelu a významu měření, údaje o geologických a hydrogeologických vlastnostech, způsob založení stavby, očekávané posuny, metodika měření, přesnost měření, časový plán, způsob zpracování a rozpočet nákladů na práci a materiál. [2]

Pro každý projekt měření posunů a přetvoření se musí měřič seznámit se základními pojmy pro rozlišení významu měřených bodů a jejich významu pro vyhodnocení směru posunů.

Posun – prostorová změna v poloze stavebního objektu nebo jeho části oproti poloze v základní nebo předchozí etapě vzhledem k vztažným bodům

Posun relativní – změna detekována 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 přetvoření nastat. 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 umístěna obecně

Průhyb – přetvoření konstrukce ve směru kolmém na převládající rozměr

Pozorovaný bod – bod osazený na sledovaném objektu

Vztažný bod – bod stabilizovaný mimo sledovaný objekt a jeho vliv

Vztažná soustava – soubor vztažných bodů stabilizovaných mimo sledovaný objekt a zónu jeho působení

Připojovací bod – vztažný bod sloužící k polohovému nebo výškovému připojení, pokud možno co nejbližše měřeného objektu

Stanoviskový bod – vztažný bod, který je stanoviskem měřících bodů

Ověřovací bod – vztažný bod, jimž se ověřuje stálost polohy připojovacího nebo stanoviskového bodu

Orientační bod – bod sloužící k orientaci směrových osnov, volí se, co nejdále od sledovaného objektu

Etapová měření – opakované zaměření sítě vztažných a pozorovaných bodů v určeném časovém intervalu

Základní (nultá) etapa – počáteční etapa měření, k níž jsou počítány posuny, obvykle je zaměřena s vyšší přesností

Pojmy byly vybrány a čerpány z literatury [1] a [2].

2.2 METODY MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ

Metody měření posunů a přetvoření můžeme rozdělit na geodetické a negeodetické metody. Geodetické metody rozdělujeme dle používané metody pro měření svislých posunů a měření vodorovných posunů. Při využití modernějších technologií můžeme také zachytit stav celého objektu v jednom časovém okamžiku a můžeme tedy získávat prostorové souřadnice sledovaného objektu. Volba geodetické metody a odpovídajícího přístrojového vybavení závisí od požadované přesnosti měření.

Negeodetické metody využívají především znalosti z optiky, elektroniky, mechaniky a automatiky. Negeodetickými metodami se zjišťují především relativní změny jedné části konstrukce vůči druhé, průhyby konstrukce, délkové změny, posun nebo naklonění konstrukce. Mezi negeodetické metody patří například tenzometrie, inklinometrie, snímače náklonů, reverzní kyvadla nebo pendametr. [2], [3]

2.2.1 GEODETICKÉ METODY MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ

Geometrická nivelace

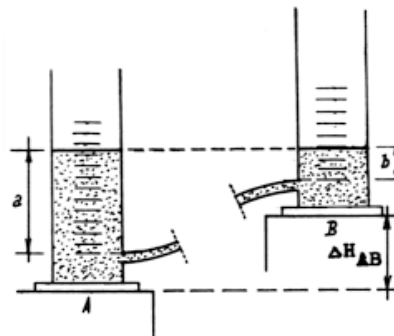
Je nepoužívanější metoda pro měření svislých posunů. Pro měření využíváme především metodu velmi přesné nivelace (VPN) nebo přesné nivelace (PN). Při měření je důležité zachovávat technologický postup a ověřené zásady. Pokud při měření nedodržíme například zásadu stejných délek záměr, je vždy nutné zavádět opravy ze sklonu horizontu přístroje. Základním předpokladem je také stabilita vztažných bodů, kde minimální počet bodů jsou 3, což umožňuje měřit 2 kontrolní převýšení. Při využití velmi přesné nivelace můžeme dosáhnout přesnosti 0,1 – 0,3 mm. Starší měřicí přístroj využívaný pro přesnou nivelaci je zobrazen na Obr. 2 a na Obr. 3 je zobrazen modernější digitální přístroj využívaný pro velmi přesnou nivelaci. [2], [3]



Obr. 2: Niveláčnický přístroj ZEISS NI007 [autor] Obr. 3: Niveláčnický přístroj Leica LS15 [5]

Hydrostatická nivelace

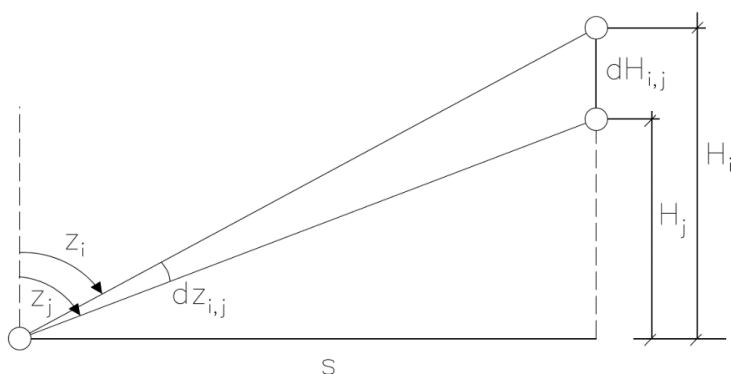
Metoda je využívána pro měření svislých posunů. Metoda vychází z principu spojených nádob. Nevýhodou je velmi malá míra měření převýšení a měřené značky tedy musí být ve shodném výškovém horizontu. Metoda je náročná na čas a vyžaduje použití jednoúčelové přístrojové výbavy. Výhodou je ale dosažení vysoké přesnosti (na úrovni velmi přesné nivelace) a využitelnost i v hůře dostupných prostorech. [2]



Obr. 4: Princip hydrostatické nivelace [3]

Trigonometrické výškové měření

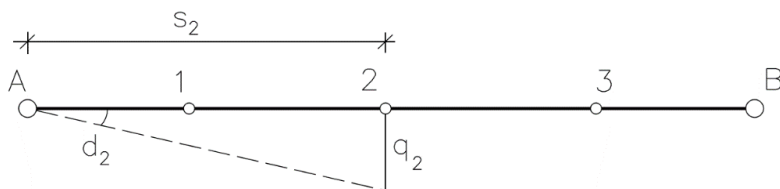
Metoda je využívána pro měření svislých posunů. Princip je založen na opakovaném měření vodorovných vzdáleností a svislých uhlů ze stabilizovaných pevných stanovisek například z pilíře nucené centrace. Metoda nedosahuje přesnosti PN a využívá se v místech, kde není možné využít geometrickou nivelaci. Používají se teodolity a totální stanice vyšší třídy přesnosti, které jsou rektifikovány. Při vyšších nárocích na přesnost je třeba uvažovat jak se změnou horizontu přístroje, tak se změnou vodorovné vzdálenosti obou bodů a působením refrakce. K naměřenému posunu je pak nutno zavádět příslušné korekce. Dle znalostí z praxe lze dosáhnout přesnosti okolo 0,5 mm při délkách záměr do 150 m. [3]



Obr. 5: Princip trigonometrického výškového měření [autor]

Metoda záměrné přímky

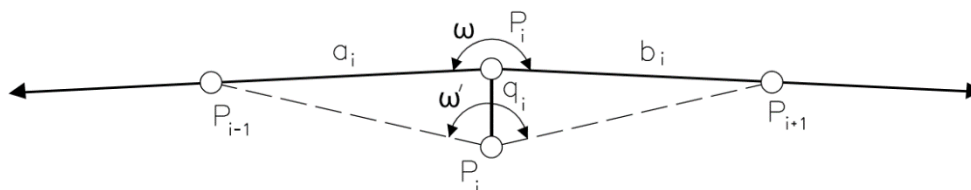
Metoda zabývající se měřením horizontálních posunů. Je to jednoduchá úloha měření, avšak určuje jen jednu složku, a to pouze ve směru kolmém k záměrné přímce. Principem je přímé nebo nepřímé určení příčných odchylek pozorovaných bodů od záměrné přímky stabilizované mimo sledovaný objekt. Příčný posun je daný rozdílem příčných odchylek zjištěných v jednotlivých etapách. Příčnou odchylku q je možno určovat na transverzálním měřítku, na transverzálním měřítku s posuvným terčem a měřením paralaktického úhlu. [2]



Obr. 6: Princip metody záměrné přímky [autor]

Metoda polygonová

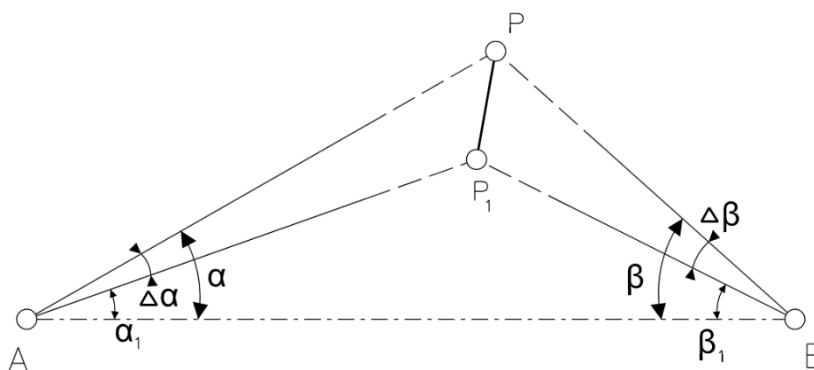
Tato metoda určuje stejně pouze jednu složku horizontálního posunu ve směru kolmém k zadanému, oboustranně připojenému polygonovému pořadu. Polygon by měl být rovnostranný a přímý. Posuny se určují ze změn hodnot vrcholových úhlů mezi etapami za předpokladu stejných délek stran pořadu nebo ze změn vzepětí u krátkých stran. [1]



Obr. 7: Princip polygonové metody [autor]

Trigonometrická metoda

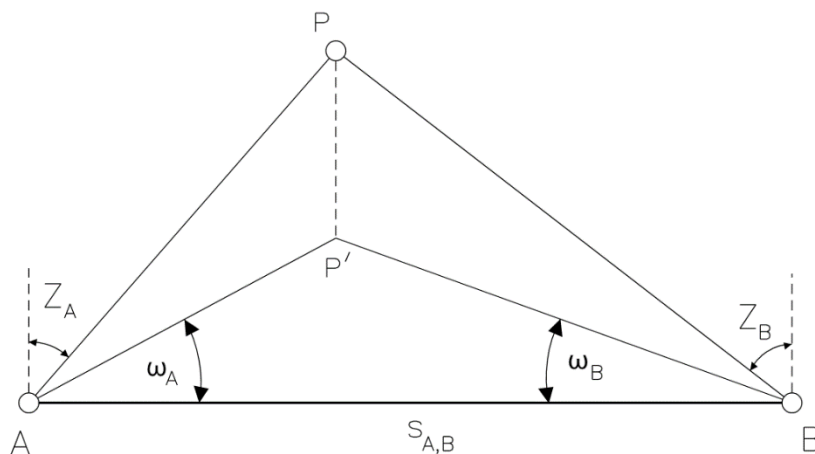
Princip metody je založen na protínání ze směrů, které jsou orientovány vzhledem k místní geodetické síti. Účelem je kontrolovat stabilitu připojovacích bodů. Na připojovací body jsou měřeny protínací směrové osnovy, vůči kterým se určují posuny. Rozdílem vypočtených souřadnic mezi etapami se určují posuny. Využívá se místní souřadnicový systém. Metoda poskytuje plnou informaci o velikosti a směru posunů. Metodou lze dosáhnout přesnosti 0,3 – 0,5 mm při měřených délkách do 350 metrů. [1]



Obr. 8: Princip trigonometrické metody [autor]

Prostorové protínání z úhlů

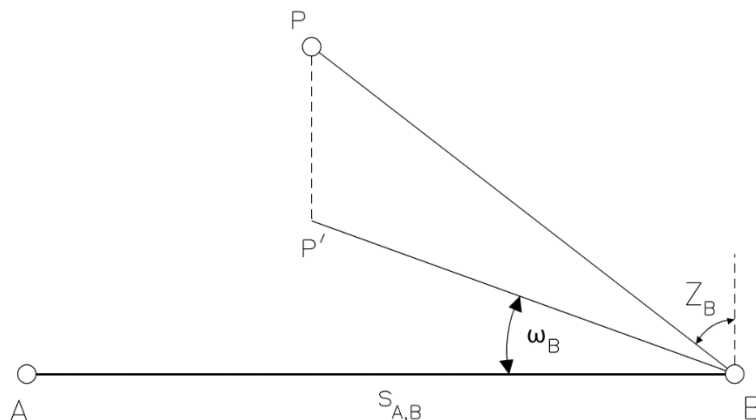
Metoda nachází využití hlavně při měření nepřístupných míst ve vzdálenosti do 150 metrů. Využívá se při měření mostních nebo střešních stavebních konstrukcí. Posuny jsou vyhodnocovány na základě měření vodorovných a zenitových úhlů z pevně stabilizovaných bodů. Měření probíhá opakovaně a je možné dosáhnout přesnosti 0,5 mm. [3]



Obr. 9: Princip metody protínání z úhlů [autor]

Prostorová polární metoda

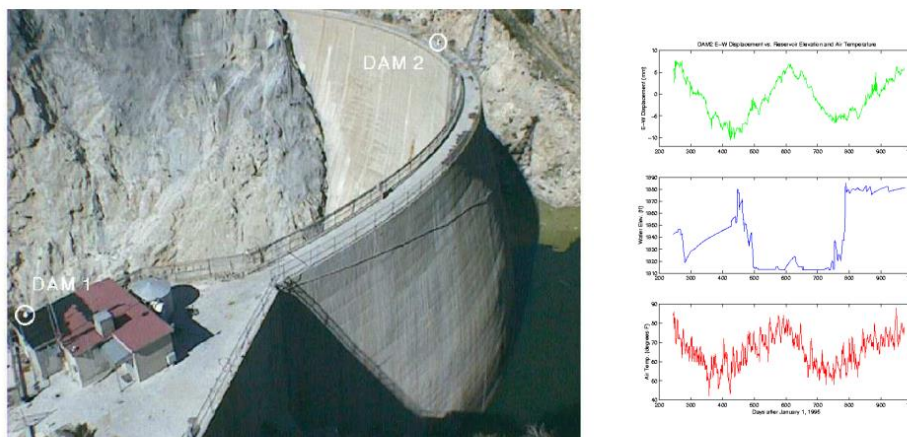
Metoda je založena na měření vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek, ze kterých určujeme prostorové polární souřadnice. Význam metody vzrostl s využíváním odrazných terčů, na které je možné s vysokou přesností měřit vodorovné směry, zenitové úhly a šikmé délky. Měří se ve dvou polohách dalekohledu z důvodu vyloučení systematických chyb přístroje. Při měření můžeme dosahovat přesnosti 0,3 – 0,5 mm. [2], [3]



Obr. 10: Princip prostorové polární metody [autor]

Metoda globálních navigačních satelitních systémů

Metodu globálních navigačních satelitních systémů (GNSS) využíváme v současné době také pro měření posunů a přetvoření. Výhodou je měření v rozsáhlých územích, které mohou dosahovat vzdálenosti 10 kilometrů, ale také při sledování stability přehrad, mostních objektů, ropných plošin apod. Při měření využíváme statickou, kinematickou nebo RTK metodu. Pracuje se v režimu epochových, periodických nebo kontinuálních měření a data jsou odesílána průběžně na místo zpracování. Přesnost měření může dosahovat hodnoty 1–5 mm v každé souřadnici v závislosti na vzdálenosti referenční stanice a době observace. Výhodou metody je možnost instalovat dlouhodobě měřící aparaturu, která dále nepotřebuje lidskou obsluhu. [6]



Obr. 11: Ukázka kontinuálního měření stavu přehrady metodou GNSS [6]

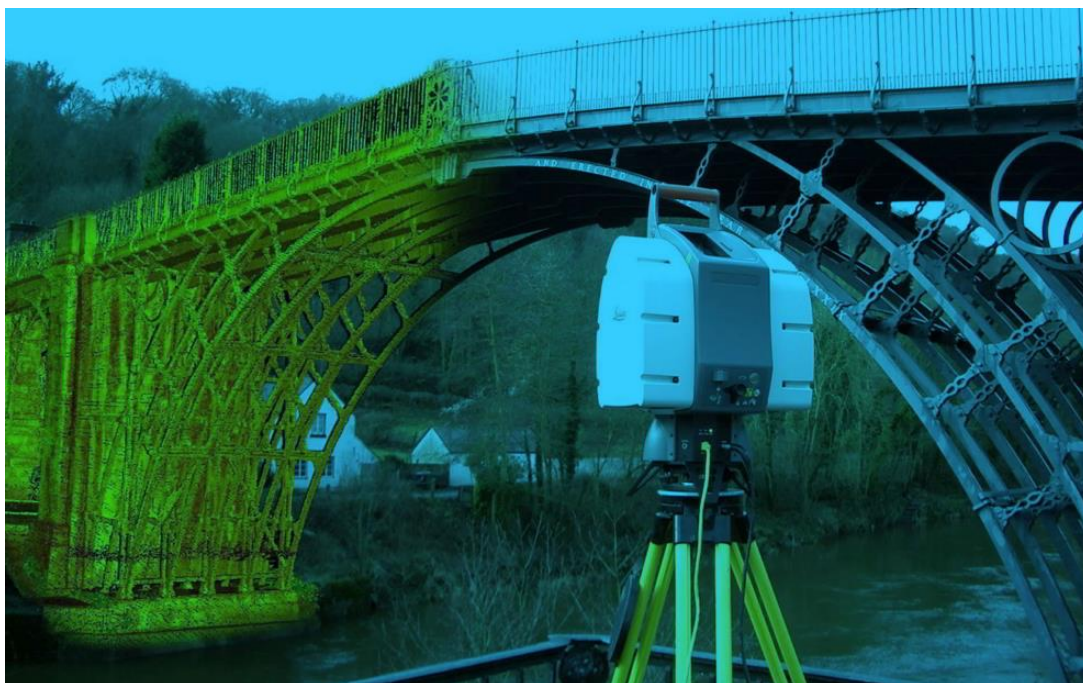
Fotogrammetrická metoda a dálkový průzkum Země (DPZ)

Principem měření je pořízení snímku ze stanoviska. Měření fotogrammetrickou metodou získává výhodu v zachycení velké části sledovaného objektu v jediném časovém okamžiku. Přesnost ovlivňuje volba kamery, vzdálenost kamery od objektu a další vlivy prostředí. Výsledek je nutné zpracovat ve speciálním softwaru a znemožňuje tím výsledek posunů v krátkém časovém odstupu. Měření můžeme rozdělit na dva postupy. Prvním postupem je časová základna, kdy se ze stejného stanoviska pořídí pro každou etapu jeden snímek. Vyhodnocují se pouze posuny bodů, které jsou v rovině snímku. Druhou metodou je reálná základna. Metoda vyžaduje nejméně dvě stanoviska pro pořízení snímků. Pro zvýšení přesnosti se využívá většího počtu snímků a tento postup umožňuje průsekové nebo stereoskopické vyhodnocení všech tří rozměrů.

V praxi se také využívá metoda letecké fotogrammetrie a DPZ. Metody se využívají pro zachycení posunů v územích, kde se jedná o změny terénu až metr za rok. [2], [3]

Metoda laserového skenování

Laserové skenování umožňuje bezkontaktní určení prostorových souřadnic z měření prostorových polárních souřadnic, tedy měření horizontálního a výškového úhlu a vzdálenosti pomocí pulzní laserové technologie. Body jsou získávané v pravidelném úhlovém kroku rozmetáním laserového paprsku, a následném odražení od povrchu konstrukce do skeneru. Výhodou je sledování libovolných stavebních konstrukcí v celém rozsahu měření. Výsledek poskytuje kompletní přehled o dané konstrukci, kdežto totální stanice poskytuje pouze lokální změny. Další výhodou je rychlost sběru dat a měření nedostupných a složitých konstrukcí. Výsledkem měření je mračno bodů. Přesnost určení je závislá na vzdálenostech, na odrazivosti materiálu, na úhlu dopadu a odrazu, na typu skeneru a na dalších vlivech prostředí. Přesnost se může pohybovat od 1 mm do 3 mm. Nevýhodou je náročný software na vyhodnocení mračna bodů a objem dat, což znemožňuje vyhodnocení výsledku v krátkém časovém odstupu. [7], [8]



Obr. 12: Skener Leica ScanStation [9]

2.2.2 NEGEODETICKÉ (FYZIKÁLNÍ) METODY MĚŘENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ

Tenzometr

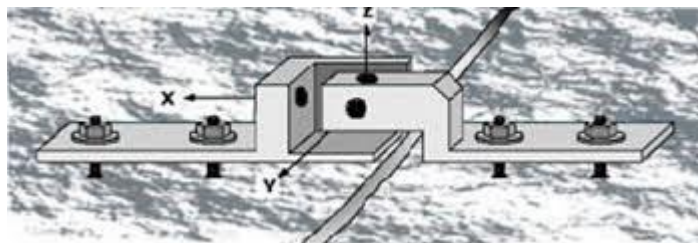
Tenzometry jsou mechanická, elektronická, optická a případně kombinovaná měřidla přetvoření v oblasti zatěžovaného tělesa, která umožňují odečítat malé délkové změny. Snímač převádí deformaci na změnu odporu. Výhodou je možnost osazení na sledovaný objekt nebo jeho zabudování přímo do sledovaného objektu a měření tak probíhá automatizovaně. Přístroj určuje přesnost deformací v řádu mikrometrů. Využívá se například při měření zatěžovací zkoušky mostovky. [10]



Obr. 13: Ukázka tenzometrického snímače [11]

Dilatometr

Dilatometr je mechanický přístroj pro relativní měření posunů ve třech osách. Přesnost záleží na typu dilatometru. Na Obr. 14 je zobrazen typ s milimetrovým rozsahem měření a přesností 0,02 milimetru. [3]



Obr. 14: Ukázka dilatometru [3]

Přesné libely

Přesné libely se využívají pro měření svislých posunů nebo náklonů. Využívají se hlavně elektronické libely s rozsahem ± 20 mm s citlivostí 0,01 mm/m. Měří se sklon, který se převádí na svislý posun pomocí známé délky základny. [3]

Inklinometrická metoda

Metoda se využívá hlavně pro důlní měření a měří vodorovné posuny v horninovém masivu. Měřický systém se skládá z inklinometrické pažnice a inklinometrické sondy. Pažnice se zavrtá svisle do podloží, do větší hloubky, než je důlní dílo, spodní konec by měl být ve stabilní vrstvě masivu. Sonda má tyčový tvar a je opatřena pojízdnými kolečky, tak aby mohla být spuštěna do pažnice. Sonda v sobě zahrnuje přístroj pro měření sklonu. Předmětem měření je tedy změna sklonu od svislice a délka od horní hrany pažnice. Přesnost měření je v desetínách milimetru až po 1 milimetr na 10 metrů délky. [12], [13]



Obr. 15: Ukázka inklinometrické sondy [14]

Extenzometrická metoda

Metoda se využívá hlavně pro důlní měření a měří svislé posuny v horninovém masivu. Měřicí systém se skládá z několika různě dlouhých extenzometrických tyčí sdružených v ocelové pažnici stabilizovaných svisle do různých hloubek masivu. Předmětem měření jsou relativní svislé vzdálenosti jednotlivých horních konců tyčí od horní hrany ocelové pažnice. Výška horní hrany pažnice se měří geometrickou nivelací. Přesnost měření je do desetiny milimetru a přesnost určení absolutní výšky nivelací je v desetínách milimetru až milimetrů. [13]

Laserový interferometr

Jedním z výkonných a vysoce přesných přístrojů využívající metodu laserové interferometrie je přístroj pro měření 3D polohy s názvem LaserTracker. Tento přístroj pracuje na principu kombinace úhlového a délkového měření metodou již zmíněné laserové interferometrie. LaserTrackery jsou používány k digitalizaci objektů v průmyslu, ale také pro měření posunů v geodézii. Pracují s tisíci laserových pulzů vysílaných za sekundu. I přes poměrně vysokou cenu se stále rozšiřuje jejich uplatnění a postupně si získávají pozici v řízení přesného měření v průmyslové výrobě. Přesnost určovaných veličin se obecně pohybuje v hodnotách 1'' úhlového měření, 0,01 mm délkového měření (ADM) a 0,001 mm délkového měření (interferometr). Příslušenství k těmto přístrojům umožňuje také určovat, kromě prostorových souřadnic, prvky charakterizující prostorovou orientaci měřených objektů, tedy rotační úhly. Ukázka LaserTrackru společnosti Leica je zobrazen na Obr. 16. [15]



Obr. 16: Ukázka LaserTrackeru Leica AT930 [16]

Pozemní radarová interferometrie

K rychlému bezkontaktnímu určování svislých průhybů stavebních konstrukcí s přesností až 0,01 mm v reálném čase lze v praxi využít i metodu pozemní radarové interferometrie. Současně je možné v reálném čase také zachytit a analyzovat kmitání sledovaného objektu s frekvencí až 50 Hz. To umožňuje získat jak celkovou, tak podrobnou informaci o chování konstrukce při jejím dynamickém zatížení. Pozemní radar využívá technologii souvislé frekvenční vlny a diferenční interferometrie. Využitím této technologie pak vytváří jednorozměrný obraz, nazývaný radiální profil odrazivosti. Diferenční interferometrie poskytuje údaj o posunech porovnáním fázové informace získané z různých časových období z vln odražených od objektu. Pro měření lze použít například pozemní interferometrický radar IBIS-FS zobrazený na Obr. 17. [17]



Obr. 17: Pozemní interferometrický radar IBIS-F [17]

Další negeodetické metody jsou sklonoměry nebo velmi přesná mechanická kyvadla. Dle přesnosti určení posunů lze říct, že negeodetické metody určují několikanásobně menší hodnoty posunů než geodetické metody. Nevýhodou negeodetických metod je jejich menší rozsah využití na větších stavebních konstrukcích a jejich větší časová náročnost.

3 PŘEHLED O SOUČASNÉM STAVU ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Geodetické práce jsou spojeny se sledováním posunů a přetvoření na stavebních objektech pro jejich důležité statické posouzení stavu stavebních konstrukcí. Tyto práce se vyznačují vysokými požadavky na zvolené měřičské technologie a přesnost. Důležité je tedy vhodně zvolit přístrojové vybavení a jejich příslušenství. Ve snaze zefektivnit a zlepšit měření se v současné době procesy automatizují. Robotizované totální stanice jsou v dnešní době neoddělitelnou součástí monitoringu staveb s dalšími měřičskými zařízeními a senzory. Tyto systémy umožňují kontinuální sběr dat, jejich zpracování a analyzování v reálném čase, čímž umožňují okamžité vyhodnocení změn stavebních konstrukcí.

Stále jsou využívány i klasické metody, které jsou časově úspornější a pracují s menším množstvím dat. Problematikou zajištění funkčnosti stavby kontrolou a posouzením skutečných geometrických odchylek od projektovaného stavu se zabývá článek [18]. Cílem geodetického měření konstrukce sportovní haly v Bílovci bylo určení skutečných odchylek tvaru konstrukce vůči projektu a následné sledování dotvarování nosné konstrukce v čase. Za tím účelem byly na vybraných místech dolních pásů oblouků osazeny měřičské značky, které vytvořily jednoznačná a dobře identifikovatelná místa konstrukce. Jedná se o velmi podobnou situaci jako v případě měření dřevěné střešní konstrukce bazénové haly aquaparku, kterou se zabývá tato práce. K měření byla využita trigonometrická metoda prostorového protínání z úhlů. Článek dále popisuje, že hodnoty posunů a pootočení stanovené v určitých etapách v provozním stádiu konstrukce poskytují zásadní informace o skutečném chování celkového systému v daných podmínkách, a to při dlouhodobém působení zatížení a uvažování vlivů prostředí. V oboru dřevěných konstrukcí má zásadní důležitost poddajnost spojů, která se projevuje prokluzy v přípojích a stycích. Výsledky získané měřeními na realizovaných konstrukcích poskytují důležité informace pro navrhování dalších typů konstrukcí.

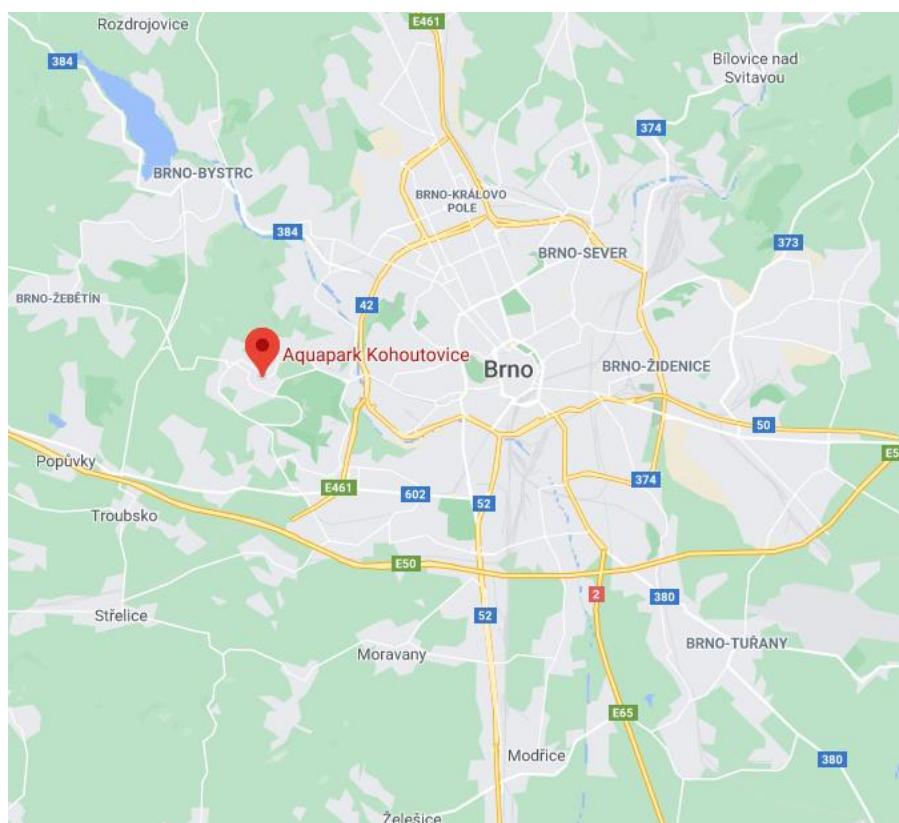
V dnešní době se mnohem častěji využívají metody laserového skenování. Využití laserového skenování při zátěžových zkouškách mostu popisuje článek [19]. Laserové skenování je osvědčenou metodou pro dokumentaci skutečného stavu objektu, kdy ve velmi krátkém okamžiku jsou změřeny miliony bodů, pomocí nichž se vytváří digitální 3D model objektu. Metoda našla uplatnění i u zátěžovacích zkoušek stavebních konstrukcí, kde lze s její pomocí identifikovat spojitě změny a lokalizovat místa poruch. Předmětem měření byl

silniční most 11-097 přes řeku Desná v obci Petrov nad Desnou. Most byl ve špatném technickém stavu, rozhodlo se o jeho demolici a díky tomu se stal testovacím objektem. Nosná konstrukce byla ocelová, uložená na betonových opěrách. Samotná zátěžová zkouška probíhala ve dnech 29. – 31. 7. 2019. Při měření se využíval laserový skener Faro X330, se kterým byly měřeny 4. etapy. Pro měření vztahné sítě, identických bodů a pozorovaných bodů byly využity robotizované totální stanice Leica MS50 a Leica MS60, se kterými proběhlo celkem 16 etap měření. Posuny určené metodou laserového skenování byly nakonec porovnávány s posuny získanými terestrickým měřením na 23 pozorovaných bodech. Stejně jako v případě této diplomové práce byl pro zpracování dat využit software Trimble RealWorks. Směrodatná odchylka propojení skenů se v jednotlivých etapách pohybovala v hodnotách 4 mm, 3 mm, 3 mm a 3 mm. Spojená mračna bodů byla transformována do jednotného souřadnicového systému a směrodatná odchylka dosahovala hodnoty 3 mm. Základní vyhodnocení probíhalo ve 2 podélných a 7 příčných řezech. Na základě těchto řezů byly vyhodnoceny posuny. Porovnáním výsledných posunů z nulté a poslední etapy je zřejmé, že jsou metody prostorové sítě a metoda laserového skenování srovnatelné. Směrodatná odchylka rozdílu metod dosahuje v poloze i výšce hodnoty přibližně 2 mm.

Podobný příklad monitorování mostu s využitím metody laserového skenování uvádí článek [20]. Článek se zabývá monitoringem mostu přes řeku Malý Dunaj v Bratislavě. Jedná se o visutý ocelový most pro pěší dlouhý 54 m. Skenování probíhalo pomocí přístroje Leica ScanStation2. Měření byly celkem dvě etapy v prosinci 2014 a v březnu 2015. Autoři článku ze Slovenské technické univerzity v Bratislavě zvolili pro obě etapy přibližně totožné stanovisko. Hustota mračna bodů byla ve skeneru nastavena na 3 mm x 3 mm. Hlavním úkolem bylo vyhodnocení vertikálních posunů. Mračno bodů bylo transformováno do lokálního souřadnicového systému mostu a pro vyhodnocení sloužili rovinné plošky ve vybraných místech o rozměru 0,1 m x 0,1 m. Svislé posuny byly následně určeny z rozdílu výšek v obou polohách. V závěru je zmíněno, že laserové skenování lze použít pro sledování posunů mostů, které jsou vyrobeny z materiálů umožňující pasivní odraz paprsku. Směrodatná odchylka měření svislého posunu byla 3 mm.

4 SLEDOVANÝ OBJEKT

Sledovaný objekt se nachází v městské části Brno-Kohoutovice, která patří pod statutární město Brno. Objektem zájmu je střešní konstrukce Aquaparku Kohoutovice, který se nachází na adrese Chalabalova 946/2. Stavba se nachází uprostřed panelového sídliště a svou organickou formou stavby připomíná pásovce. Tato forma stavby je záměrně navržena jako protiklad kvadratické sídlištní zástavby. Nový plavecký areál je největší stavbou svého druhu v Brně. Halu s několika bazény a vodními atrakcemi navrhl tým architektů K4. [21]

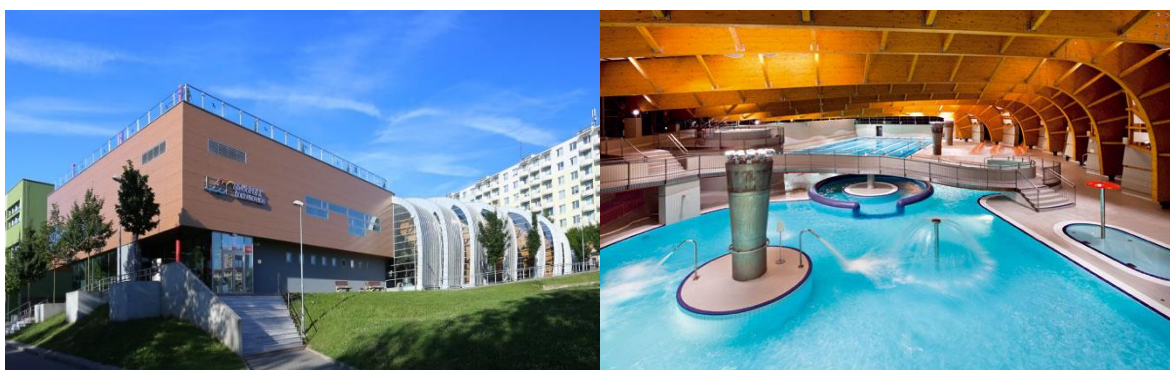


Obr. 18: Poloha aquaparku Kohoutovice [Zdroj podkladu: maps.google.com]

4.1 POPIS SLEDOVANÉHO OBJEKTU

Konstrukčně je objekt rozdělen do dvou nezávislých dilatačních celků s rozdílným konstrukčním uspořádáním. Architekti výrazně odlišili jednoduché kubické řešení provozní části a zajímavou organickou hmotu, kterou vymezili prostory bazénů. V provozní části najdeme šatny, sociální zařízení, občerstvení a vstupní halu. Pohled na exteriér provozní části je zachycen na Obr. 19 (vlevo). Na střeše provozní části architekti umístili menší venkovní bazén pro letní koupání s výhledem do Libušina údolí.

Objekt aquaparku byl realizován v letech 2008 až 2010. Bazénová hala je přízemní objekt nepravidelného tvaru s rozměry přibližně 58 x 37,5 m. V bazénové hale se nachází plavecký bazén, dětský bazén, rekreační bazén, tobogán a vířivka. Interiér bazénové haly je zachycen na Obr. 19 (vpravo). Ze strany architektů byla snaha ponechat v hale otevřenost a prostor bez nutnosti instalovat množství přebytečných podpůrných sloupů. Z nepravidelného tvaru a půdorysu haly tedy vychází složité řešení střešní konstrukce. Nosná střešní konstrukce je budována z plnostěnných rámu se zakřiveným rámovým rohem, jejichž hlavním konstrukčním materiálem je lepené dřevo a ocel. Nosnou konstrukci tvoří devět příčně osazených segmentů, které mají rozdílnou délku a výšku. Délka těchto segmentů se pohybuje v rozmezí od 24,8 m až do 34,5 m. Připojovací styky jsou ve většině případů řešeny pomocí kolíkových spojů a ocelových elementů. [21, 22]

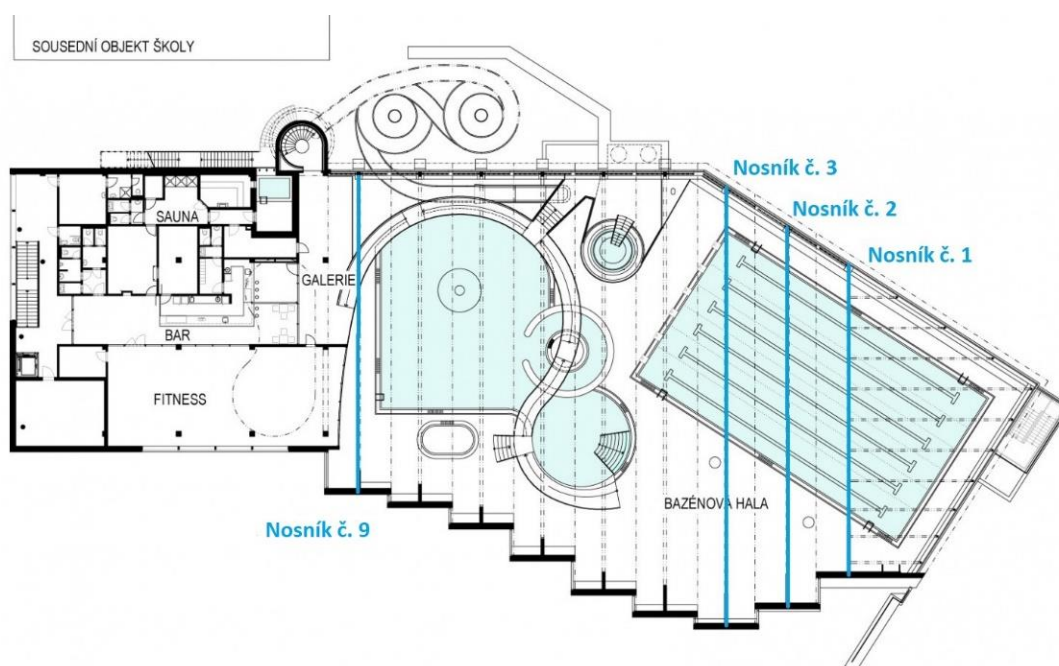


Obr. 19: Ukázka exteriéru (vlevo) a ukázka interiéru (vpravo) [21]

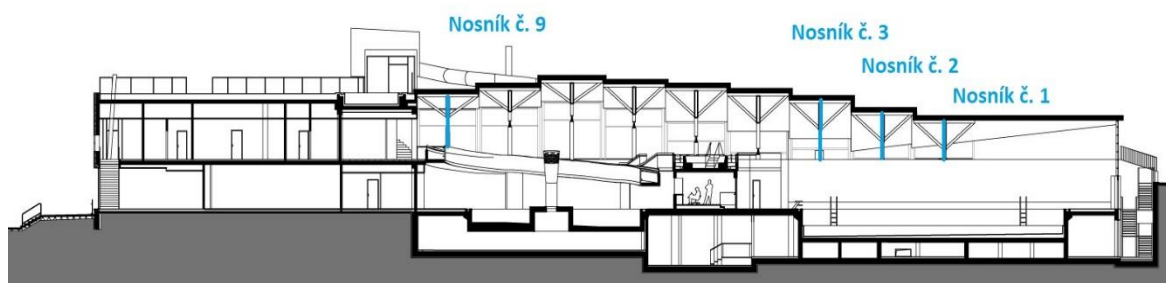
Dřevo je tradičním přírodním materiálem a vyznačuje se vysokou pevností, nízkou hmotností a dobrou možností opracování. Dřevěné konstrukce navíc působí esteticky a jsou na trhu stále žádané. Proto architekti zvolili lepené dřevo jako základní konstrukční materiál. Lepené dřevo je rovněž vhodné do náročného prostředí s vysokou vlhkostí a teplotou, jako je například bazénové prostředí. Z náročného konstrukčního uspořádání soustavy dřevěných nosníků je zřejmé, že může docházet k posunům a přetvoření, proto je důležité provádět pravidelný monitoring střešní konstrukce. [23]

4.2 ROZMÍSTĚNÍ SLEDOVANÝCH BODŮ

Po dokončení výstavby bylo započato její dlouhodobé sledování určené sedání a tvarování. Pro sledování byly vybrány čtyři z devíti příčně osazených nosníků. Nosníky byly vybrány tak, aby bylo možno co nejlépe vystihnout průběh posunů a přetvoření. Poloha sledovaných nosníků je zobrazena na půdorysu bazénové haly, který je zachycen na Obr. 20 a v příčném řezu bazénové haly, který je zachycen na Obr. 21. Čtyři sledované nosníky jsou na Obr. 20 a Obr. 21 vyznačeny modrou barvou.

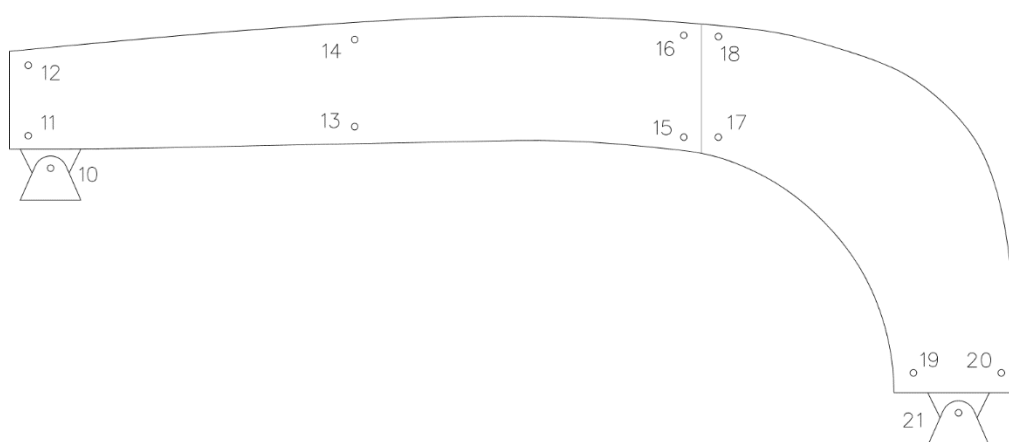


Obr. 20: Rozmístění sledovaných nosníků v půdorysu [Zdroj podkladu: archiweb.cz]

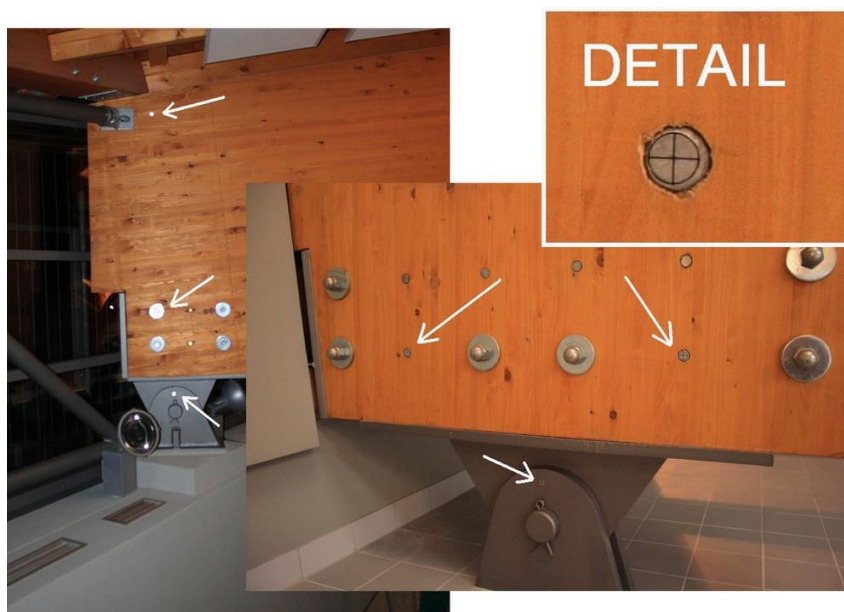


Obr. 21: Rozmístění sledovaných nosníků v řezu [Zdroj podkladu: archiweb.cz]

Posuny a přetvoření se vyhodnocují ze sledovaných bodů osazených na konstrukci. Pozorované body byly signalizovány nalepovacími odraznými štítky. Výhodou odrazných značek je možnost přesného a kvalitního měření, přičemž není narušen estetický vzhled dřevěné konstrukce. Pro sledování této stavby bylo osazeno 12 měřických značek na každém nosníku. Štítky jsou umístěny ve dvojicích nad sebou, vždy v horní a dolní části nosníku. Štítky byly osazeny nad horním a dolním podpůrným kloubem, v polovině rozpětí nosníku a na styku montážního spoje. Jednotlivé značky byly také osazeny přímo na podpůrných kloubech nosníku. Osazení sledovaných bodů je zobrazen na Obr. 22. Podoba odrazný štítků na nosníku je zachyceny na Obr. 23.



Obr. 22: Rozmístění sledovaných bodů na nosníku [autor]



Obr. 23: Ukázka sledovaných bodů na nosníku [23]

5 POUŽITÉ METODY A PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ PŘI MĚŘENÍ SLEDOVANÉHO OBJEKTU

Střešní konstrukce bazénové haly aquaparku v Kohoutovicích je sledována od roku 2009, kdy byla konstrukce dokončena. Celkem bylo měřeno již 7. etapových měření na 4 sledovaných nosnících. V poslední 7. etapě byla pro měření zvolena prostorová polární metoda a metoda laserového skenování.

5.1 PROSTOROVÁ POLÁRNÍ METODA

Prostorová polární metoda umožňuje určit prostorové souřadnice na základě měření horizontálních úhlů, zenitových úhlů a šikmých délek. Podrobně byla polární metoda popsána v kapitole 3.2.1. V tomto případě probíhalo měření prostorovou polární metodou ze tří přechodných stanovisek s orientací na body 110 a 121. Body 110 a 121 jsou ložiska horního a spodního podpěrného kloubu prvního nosníku. Měřeno bylo dohromady 42 sledovaných bodů. Z jednotlivých stanovisek byly zaměřeny všechny viditelné sledované body, včetně bodů změřených z předchozích stanovisek. Tím došlo k provázání jednotlivých přechodných stanovisek. Měření osnovy směrů probíhalo ve třech skupinách a v obou polohách dalekohledu s uzávěrem na bod 110. Rozmístění jednotlivých stanovisek bylo zvoleno přibližně stejně jako v předchozí 6. etapě pro zachování stejné konfigurace měření.

5.2 METODA LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

Laserové skenování umožňuje bezkontaktní určení prostorových souřadnic z měření prostorových polárních souřadnic tedy měření horizontálního a výškového úhlu a vzdálenosti pomocí pulzní laserové technologie. Podrobně byla metoda popsána v kapitole 3.2.1. Skenování probíhalo z dvou různých stanovisek a skenována byla celá bazénová hala aquaparku. V prostoru bazénové haly byly rovnoměrně rozloženy měřické koule pro pozdější zpracování a georeferencování mračna bodů. Rozmístěno bylo 5 malých měřických koulí s průměrem 139 mm a 4 velké koule s průměrem 199 mm. Celkem 9 koulí bylo použito ke spojení mračen bodů. Z přechodných stanovisek bylo měřeno polární metodou na 5 cílů na hranol. Tyto hranoly byly po zaměření vyměněny za 4 malé měřické koule a 1 velkou měřickou kouli, které sloužily ke georeferencování. Tím pádem bylo možno provést georeferencování mračna bodů do místní souřadnicové soustavy ve které bylo prováděno porovnání metody laserového skenování a polární metody.

5.3 PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ

Pro měření prostorovou polární metodou byla využita stanice Topcon GT-1001. Totální stanice je zobrazena na Obr. 24.

Technické parametry:

- Sériové číslo: GT series v.č. 004230
- Možnost robotizovaného měření
- Úhlová přesnost: 1'' (0,3 mgon)
- Délková přesnost: 1 mm + 2 ppm (hranol)
2 mm + 2 ppm (bezhranol)
- Maximální dosah měření: 5000 m (hranol)
1000 m (bezhranol)
- Doba měření: 0,9 s (přesný mód)
- Dalekohled: zvětšení 30x
rozlišovací schopnost 2,5'' [24]



Obr. 24: Topcon GT-1001 [24]

Pro měření metodou laserového skenování byl využit laserový skener Faro Focus 3D S120. Laserový skener je zobrazen na Obr. 25.

Technické parametry:

- Sériové číslo: LLS061304311
- Fázový dálkoměr
- Zorné pole až 360° horizontálně, 305° vertikálně
- Rozsah měření: 0,6-120 m
- Rychlost měření: až 976 000 bodů za sekundu
- RGB panorama až 70 megapixelů
- Minimální úhlový krok: 0,009°
- Přesnost měření vzdálenosti přibližně ±2 mm
- Záleží na vzdálenosti skenovaného povrch
- Obsahuje barometr, kompas a má dotykový displej [25]



Obr. 25: Faro Focus 3D [25]

FARO Focus je 3D skener, který k měření vzdáleností využívá technologie fázového posunu, kde má infračervený paprsek různé vlnové délky. Při kontaktu s objektem se odráží zpět ke skeneru. Vzdálenost skeneru od objektu je přesně stanovena měřením fázového posunu ve vlnách infračerveného světla. Zrcadlo rotuje podél svislé osy přístroje a získává tak vertikální úhel, pod kterým je bod změřen. Prostorové souřadnice X, Y, Z jsou získány pomocí úhlového snímače pro měření rotace zrcadla a horizontálního otáčení přístroje. Přístroj je také vybaven dvouosým kompenzátorem, který zajišťuje přesné urovnání přístroje do svislice. [25] Dalším příslušenstvím byly velké a malé měřické koule pro vyhodnocení skenování a odrazný hranol Trimble M se součtovou konstantou -18,1 mm. Měřické koule a hranol byly při měření umístěny na speciálně upravených měřických stojanech. Pomůcky jsou zobrazeny na Obr. 26.



Obr. 26: Odrazný hranol Trimble M na speciálním stojanu a malá měřická koule [autor]

5.4 MĚŘENÍ 7. ETAPY

Měření 7. etapy probíhalo 25.-26. 1. 2021 s odstupem 11 let od základní etapy. Etapa byla měřena v době plného provozu aquaparku v nočních hodinách od 21:00 do 3:30, tedy mimo otevírací hodiny. Konstrukce objektu byla kompletně dokončena a všechny bazény byly v tomto čase napuštěny. Etapa číslo 7 byla měřena 11 měsíců po předchozí 6. etapě. Vnitřní podmínky při měření aquaparku a vnější podmínky jsou zobrazeny v Tab. 1.

Tab. 1: Podmínky při měření etapy č. 7 [autor]

Etapa	Datum a čas	Vnitřní podmínky		Vnější podmínky		Stav konstrukce
		Teplota [°C]	Tlak [hPA]	Teplota [°C]	Tlak [hPA]	
7	25.-26.1.2021	29,7	974,5	-0,2	975,0	11 let po otevření bazény napuštěny
	22:00-3:15					

6 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT BAZÉNOVÉ HALY PROSTOROVOU POLÁRNÍ METODOU

Zpracování naměřených dat probíhalo postupně. Prvním krokem byla analýza vnitřní přesnosti měření prostorovou polární metodou a následné vyrovnaní souřadnic metodou nejmenších čtverců (MNC) a výpočet jejich charakteristik přesnosti ve software G-NET.

6.1 ANALÝZA VNITŘNÍ PŘESNOSTI NAMĚŘENÝCH DAT PROSTOROVOU POLÁRNÍ METODOU

Analýza vnitřní přesnosti byla vypočtena z rozptylu jednotlivých měření pro horizontální směry (H_z), zenitové úhly (Z) a délky (s). Analýza přesnosti byla provedena na měřená data ze 7. a 6. etapy. Výpočet přesnosti byl proveden dle vztahu (1). Výsledné hodnoty zobrazuje Tab. 2 pro etapu číslo 7 a Tab. 3 pro etapu číslo 6.

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

Kde: m – střední chyba měření

n – počet měření

k – počet nutných měření

v – opravy jednotlivých měření od průměru

Tab. 2: Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti etapy č. 7 [autor]

Veličina	Σv_i^2	n	k	m
Hz	2850,5	246	82	4,17 [cc]
Z	2432,2	246	82	3,85 [cc]
s	4,16	246	82	0,16 [mm]

Tab. 3: Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti etapy č. 6 [autor]

Veličina	Σv_i^2	n	k	m
Hz	14166,0	243	81	9,35 [cc]
Z	6732,8	243	81	6,45 [cc]
s	2,58	243	81	0,13 [mm]

Test vnitřní přesnosti probíhal pomocí testování tzv. chí – kvadrátu (χ^2). Testem se ověřuje předpoklad, že se střední chyba vypočtena ze souboru měření výrazně neodlišuje od základní střední chyby udávané výrobcem. Střední chybu měření je možné testovat pomocí testovacího kritéria dle vztahu (2), kritické hodnoty pro hladinu významnosti $\alpha=P$ ($\tau > \tau_\alpha$). Rozdělení bylo odvozeno z rozdělení χ^2 , neboť platí vztah (3). Testování probíhalo na hladině významnosti $\alpha=5\%$. Výsledné hodnoty testování jsou zobrazeny v Tab. 4 a Tab. 5. Vyhodnocení podmínky je dle vztahu $\tau < \tau_\alpha$.

$$\tau = \frac{m}{\bar{m}} < \tau_\alpha \quad (2)$$

$$\tau_\alpha = \sqrt{\frac{\chi^2}{n'}} \quad (3)$$

Kde: m – střední chyba měření

\bar{m} – střední chyba udávaná výrobcem

τ – testovací hodnota

τ_α – kritická hodnota testování

n' – počet nadbytečných měření

Tab. 4: Výsledné hodnoty testování etapy č. 7 [autor]

Veličina	τ	τ_α	n'	Podmínka
Hz	1,39	1,09	164	Nesplněna
Z	1,28	1,09	164	Nesplněna
s	0,16	1,09	164	Splněna

Tab. 5: Výsledné hodnoty testování etapy č. 6 [autor]

Veličina	τ	τ_α	n'	Podmínka
Hz	3,12	1,09	162	Nesplněna
Z	2,15	1,09	162	Nesplněna
s	0,13	1,09	162	Splněna

Výsledné hodnoty testování určili, že úhlové měření nesplňuje přesnost udávanou výrobcem. Hodnoty s největším rozptylem od průměru byly při měření zjištěny hlavně na bodech, které byly při cílení prosvětleny umělým osvětlením visícím ze střešní konstrukce aquaparku. Toto zjištění bylo následně zahrnuto ve vyrovnání měření. Testování délek poukázalo na fakt, že délky jsou měřeny s vyšší přesností, než udává výrobce.

6.2 VYROVNÁNÍ SOUŘADNIC MNČ

Vyrovnání MNČ zprostředkujících měření se používá v případech, kdy se hledané neznámé veličiny neměří přímo. Neznámé veličiny jsou určovány prostřednictvím jiných měřených veličin, které jsou s neznámými ve známém funkčním vztahu. Vykonaná měření se zde nazývají nepřímá neboli zprostředkující. K vyrovnání dojde, jestliže konáme nadbytečná měření, a je tak možné sestavit více rovnic, než je neznámých. Měření jsou zatížena nevyhnutelnými chybami, které se přenášejí i na odhady neznámých. Vyrovnáním se bude hledat nejspolehlivější hodnoty neznámých a jejich směrodatné odchylky, eventuálně vyrovnaná zprostředkující měření a jejich směrodatné odchylky. Hlavní podmínku metody uplatňuje vztah (4), kde v je vektor oprav a P je matice vah [26].

$$v^T P v = \min \quad (4)$$

K výpočtu MNČ je možné použít výpočetní software jako například G-NET, Groma, DLL MNČ a podobné. Výpočet a vyrovnání této práce byl proveden v software G-NET, jehož uživatelské prostředí je zobrazeno na Obr. 27. Software G-NET umožňuje výpočet předběžných souřadnic bodů, následně jejich vyrovnání a výpočet charakteristiky přesnosti. Program také umožňuje nahlédnout na všechny vzorce uplatněné ve výpočtu nebo úpravu modelu vyrovnání a podrobnější nastavení vah měřených veličin. [27]

DOSBox 0.74, Cpu speed: max 100% cycles, Frameskip 0, Program: GNETS1

G-NET/COMPLEX/U02.09 VÝPOČTY GEODETICKÝCH SÍTÍ (C) SHINE, C.S. Brno

Měřené veličiny [KOHOUT 1 : 1]

Veličina	ČB1	ČB2	ČB3	Hodnota	Chyba	Vzorec
Délka	9001	110		18.8491	0.00204	[1,106]
Směr	9001	110	ST0001	357.4326	0.00030	[1,106]
Délka	9001	121		20.3970	0.00204	[1,122]
Směr	9001	121	ST0001	44.9407	0.00030	[1,122]
Délka	9001	111		18.8200	0.00204	[1,108]
Směr	9001	111	ST0001	357.0382	0.00030	[1,108]
Délka	9001	112		18.7909	0.00204	[1,110]
Směr	9001	112	ST0001	357.3236	0.00030	[1,110]
Délka	9001	113		15.0307	0.00203	[1,112]
Směr	9001	113	ST0001	397.0936	0.00030	[1,112]
Délka	9001	114		15.0637	0.00203	[1,114]
Směr	9001	114	ST0001	396.7123	0.00030	[1,114]
Délka	9001	115		17.2604	0.00203	[1,116]
Směr	9001	115	ST0001	31.0315	0.00030	[1,116]
Délka	9001	117		17.4505	0.00203	[1,118]

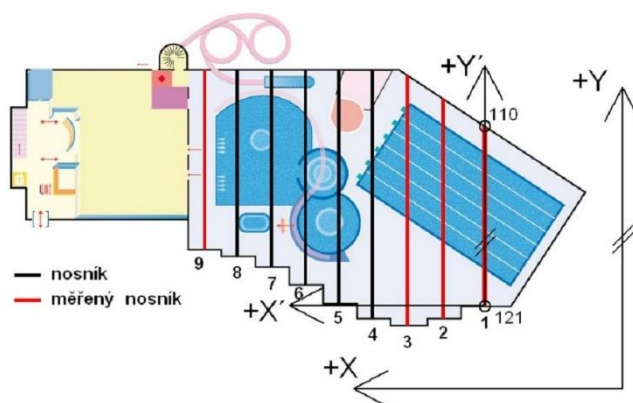
Řádek:1 Sloupec:1 Počet řádků:164 Editovat-F5 F9-Kontrola

[Uhlý: Grad]

F10-Menu F8-Tvorba protokolu F6-Třídění vět F4-Hromadný výp apr.stř.chyby
 Klávesou <Mezera>, '+', '-', nebo počátečním písmenem volte typ veličiny.
 Uložit <Shift-Insert>, Zrušit <Shift-Del>, Konec <Ctrl-Enter>, <PgDn>, <PgUp>

Obr. 27: Ukázka výpočetního programu G-NET [autor]

Po importu souboru měření do programu následoval výpočet přibližných souřadnic, které spolu s měřenými veličinami tvoří tzv. model vyrovnání. Nastavení apriorních středních chyb měřených veličin vycházelo z přesnosti udávané výrobcem. Nastavené byly $m_r^{II}=5^{cc}$, $m_s=2\text{ mm} + 2\text{ ppm}$. Program počítá odděleně polohové a výškové vyrovnání. Před polohovým vyrovnáním byl nastavený jako fixní bod 121 s fixací směru na bod 110. Pro výpočet byla použita místní souřadnicová soustava. Orientace soustavy je zobrazena na Obr. 28. Před výškovým vyrovnáním byla nastavena fixní výška bodu 121.



Obr. 28: Orientace místní souřadnicové soustavy [23]

Výstupy vyrovnání jsou výsledné souřadnice bodů a jejich charakteristiky přesnosti, které jsou vyjádřeny středními chybami jednotlivých souřadnic m_x , m_y a m_z . Z vyrovnání je také dostupný protokol, ve kterém jsou uvedeny základní informace jako celkový počet veličin, počet nadbytečných veličin a aposteriorní jednotková střední chyba vypočtená ze vztahu (5).

$$m_0 = \sqrt{\frac{v^T P v}{n'}} \quad (5)$$

V ideálním případě by měla být hodnota aposteriorní jednotkové střední chyby rovna 1. Dle Tab. 6 si můžeme všimnout, že je hodnota menší než jedna, a to hlavně proto, že délky byly měřeny s vyšší přesností, jakou udává výrobce.

Tab. 6: Výsledná přesnost vyrovnání jednotlivých etap [autor]

Etapa	m_0 (Polohové) [mm]	m_0 (Výškové) [mm]	m_y [mm]	m_x [mm]	$m_{y,x}$ [mm]	m_z [mm]
6	0,69	0,46	0,58	0,67	0,89	0,37
7	0,59	0,66	0,44	0,49	0,68	0,22

7 VYHODNOCENÍ ROZMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ A KONTROLA LASEROVÉHO SKENERU

Před samotným zpracováním dat z laserového skenování bazénové haly aquaparku proběhla kontrola průměru měřických koulí, kontrola kompenzátoru laserového skenování a vyhodnocení orientace laserového skeneru.

7.1 VYHODNOCENÍ ROZMĚRU MĚŘICKÝCH KOULÍ

Pro vyhodnocení a porovnání laserové metody s terestrickým měřením musíme georeferencovat mračno bodů do místní souřadnicové soustavy, ve které je provedeno terestrické měření. Georeferencování se provádí na měřické koule, které jsou v tomto případě identické body a jejich souřadnice jsou určeny v obou souřadnicových soustavách. Terestrické měření a určení souřadnic v místní souřadnicové soustavě dle Obr. 28 probíhalo na hranol Trimble M s hodnotou konstanty -18,1 mm, který byl při laserovém skenování zaměněn za měřickou kouli. Hranol nemá výšku středu stejnou jako měřická koule, a proto muselo být toto převýšení vyhodnoceno. Kromě převýšení se určoval i průměr koule a ten byl porovnán s hodnotou průměru uváděnou výrobcem. Průměr koule byl určován úhlovým měřením na okraje koule, měřením délky na střed povrchu viditelné polokoule a měřením rastrové plochy koule. Měření probíhalo pomocí přístroje Topcon GT-1001.

Před samotným testováním měřických koulí byla kontrolována součtová konstanta hranolu Trimble M. Měřená délka na hranol Trimble M byla porovnávána s měřenou délkou na hranoly Leica GPH1P, Nikon a s měřenou délkou na odrazný hranol na špici (Spike). Výsledky testování jsou zřejmé z Tab. 7. Průměrná odchylka délky je rovna -0,1 mm. Tato odchylka byla zahrnuta do výpočtu výsledné délky na hranol Trimble M se součtovou konstantou -18,1 mm.

Tab. 7: Měřené délky na různé typy hranolů [autor]

Typ hranolu	s_I [m]	s_{II} [m]	\varnothing_s [m]	Δs [mm]
Trimble M	7,5332	7,5332	7,5332	0,4
Leica GPH1P	7,5336	7,5337	7,5337	
Trimble M	7,5332	7,5332	7,5332	-0,8
Nikon	7,5323	7,5324	7,5324	
Trimble M	7,5332	7,5332	7,5332	-0,4
Spike	7,5328	7,5328	7,5328	
Trimble M	7,5326	7,5327	7,5327	0,3
Leica GPH1P	7,5329	7,5330	7,5330	

Kde: s_I a s_{II} – šikmé délky měřené v 1. a 2. poloze dalekohledu
 \varnothing_s – průměr měřených délek
 Δs – odchylka z rozdílu délek

V průběhu kalibrace průměrů měřických koulí byly také kontrolovány délky na hranol Trimble M. Podezřelá měření odchylovajícího se od aritmetického měření byla testována podle McKayova testu. Při McKayovém testu je známá střední chyba. V tomto případě byla střední chyba délky $\bar{m}_s = 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$. Následně byl vypočten aritmetický průměr délek a pro podezřelá měření se vypočítala hodnota testovacího kritéria T dle vzorce (6). Pro hladinu významnosti (riziko) $\alpha=5 \%$ a měření $n=4$ je kritická hodnota $T_k=1,94$. Výsledkem testování je splnění podmínky $T < T_k$. Výsledek testování je zobrazen v Tab. 8.

$$T = \frac{|\bar{s} - s_i|}{\bar{m}_s} \quad (6)$$

Tab. 8: Kontrola délek v průběhu vyhodnocení měřických koulí [autor]

Typ hranolu	Měření	s_I [m]	s_{II} [m]	$\varnothing s$ [m]	Δs [mm]	Test T_i	$T_i \leq T_k$
Trimble M	1. měření	7,5327	7,5327	7,5327	-0,1	0,11	Splněna
	2. měření	7,5325	7,5325	7,5325	0,1	0,09	Splněna
	3. měření	7,5322	7,5328	7,5325	0,1	0,09	Splněna
	4. měření	7,5326	7,5327	7,5327	-0,1	0,06	Splněna
	Průměr:	7,5326					

Kde: s_I a s_{II} – šikmé délky měřené v 1. a 2. poloze dalekohledu

$\varnothing s$ – průměr měřených délek

Δs – odchylka od průměru délek

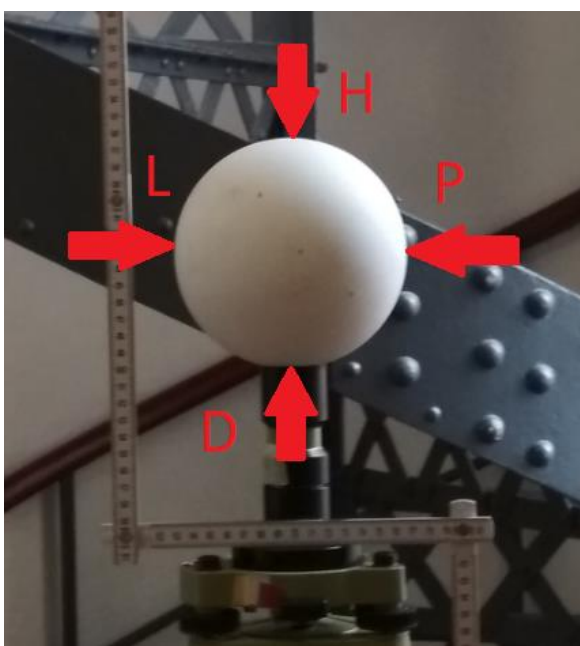
Měření rozměru koulí probíhalo na Fakultě stavební VUT v Brně, v budově B na chodbě 5. poschodí. Kalibrace probíhala dne 03.02.2021 a na Obr. 29 jsou zobrazeny hranoly, které byly využity ke kontrolnímu měření.



Obr. 29: Typy hranolů (zleva – Leica, Trimble, Nikon, Spike) [autor]

7.1.1 ÚHLOVÉ VYHODNOCENÍ PRŮMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ

Princip metody spočíval v měření úhlů pomocí totální stanice Topcon GT-1001 na okraje měřické koule, ze kterých byl následně vypočten průměr. Vyhodnoceny byly všechny měřické koule, které byly při měření laserovou metodou v aquaparku Kohoutovice využity. Jedná se o 5 malých měřických koulí s průměrem udávaným výrobcem $\varnothing_v=139$ mm a o 4 velké měřické koule s průměrem udávaným výrobcem $\varnothing_v=199$ mm. Byly měřeny horizontální směry na levý okraj (L) a pravý okraj (P) měřických koulí, a zenitové úhly měřeny na dolní okraj (D) a horní okraj (H) měřických koulí. Cílení na měřickou kouli je zobrazené na Obr. 30.



Obr. 30: Zobrazení cílení na měřickou kouli [autor]

Vyhodnocení průměru bylo počítané zvlášť pro levý a pravý okraj a zvlášť pro dolní a horní okraj. Výpočet probíhal pomocí sinové věty, kde byl vypočtený středový úhel trojúhelníku α mezi okraji měřické koule a určená vodorovná délka $s=7,5326$ m z měření na hranol. Podle vzorce (7) byl vypočten výsledný průměr pro všechny měřické koule. Princip je zobrazen na Obr. 31.

$$\varnothing = 2 * \left(\frac{s * \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin(100)} \right) \quad (7)$$

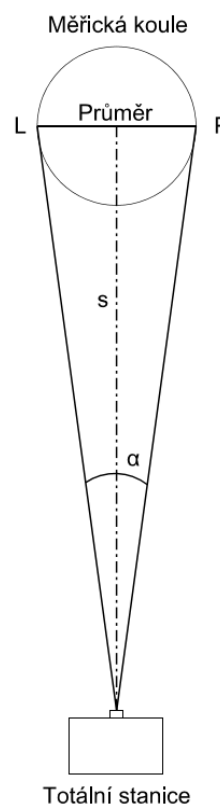
Určení průměrů měřických koulí je zobrazeno v Tab. 9 a Tab. 10.

Tab. 9: Určení průměru koule z levé a pravé záměry [autor]

Č.K.	L [g]	P [g]	α [g]	r [m]	\varnothing [mm]
1 (malá)	399,4211	0,5950	1,1739	0,0695	138,9
2 (malá)	399,4195	0,5967	1,1772	0,0696	139,3
3 (malá)	399,4200	0,5944	1,1744	0,0695	139,0
4 (malá)	399,4201	0,5964	1,1763	0,0696	139,2
5 (malá)	399,4205	0,5941	1,1736	0,0694	138,9
6 (velká)	399,1663	0,8471	1,6808	0,0994	198,9
7 (velká)	399,1641	0,8453	1,6812	0,0995	198,9
8 (velká)	399,1653	0,8453	1,6800	0,0994	198,8
9 (velká)	399,1650	0,8472	1,6822	0,0995	199,1

Tab. 10: Určení průměru koule z dolní a horní záměry [autor]

Č.K.	D [g]	H [g]	α [g]	r [m]	\varnothing [mm]
1 (malá)	100,9311	99,7775	1,1536	0,0682	136,5
2 (malá)	100,9301	99,7791	1,1510	0,0681	136,2
3 (malá)	100,9318	99,7782	1,1536	0,0682	136,5
4 (malá)	100,9318	99,7782	1,1536	0,0682	136,5
5 (malá)	100,9318	99,7774	1,1544	0,0683	136,6
6 (velká)	101,1900	99,5262	1,6638	0,0984	196,9
7 (velká)	101,1918	99,5231	1,6687	0,0987	197,5
8 (velká)	101,1924	99,5252	1,6672	0,0986	197,3
9 (velká)	101,1912	99,5256	1,6656	0,0985	197,1



Obr. 31: Zobrazení principu úhlového měření [autor]

Výsledná hodnota, která byla porovnáována s hodnotou průměru uváděným výrobcem, byla brána jako průměr záměr na levý a pravý okraj měřické koule s ohledem na skutečnost, že dolní okraj koule nebyl dostatečně viditelný kvůli jeho zasazení do stojanu měřické koule a cílení tak nebylo zcela relevantní. Výsledné porovnání s průměrem udávaným výrobcem pro malé měřické koule $\varnothing_v=139$ mm a s průměrem udávaným výrobcem pro velké měřické koule $\varnothing_v=199$ mm je uvedeno v Tab. 11, kde \varnothing je měřený průměr koulí a d_v je rozdíl od průměru udávaným výrobcem.

Tab. 11: Vyhodnocení rozdílů od průměru udávaným výrobcem [autor]

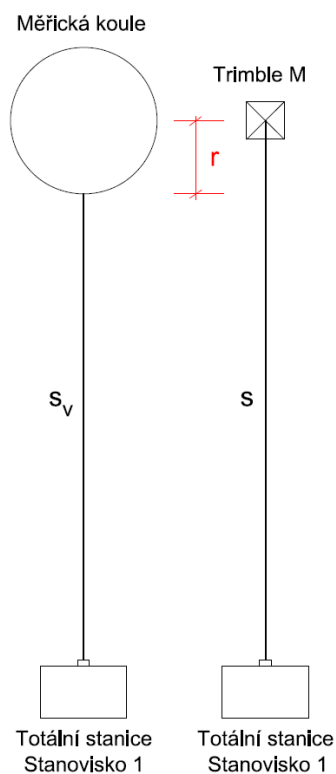
Č.K.	\varnothing [mm]	d_v [mm]	Č.K.	\varnothing [mm]	d_v [mm]
1 (malá)	138,9	0,1	6 (velká)	198,9	0,1
2 (malá)	139,3	-0,3	7 (velká)	198,9	0,1
3 (malá)	139,0	0,0	8 (velká)	198,8	0,2
4 (malá)	139,2	-0,2	9 (velká)	199,1	-0,1
5 (malá)	138,9	0,1			

Výsledná přesnost byla vypočtena ze vztahu (8), jako střední chyba rozdílů měřených hodnot od průměru udávaným výrobcem. Výsledná střední chyba pro malé měřické koule je rovna $m_v = 0,10$ mm a pro velké měřické koule je rovna $m_v = 0,20$ mm. Maximální odchylka od průměru udávaným výrobcem je na kouli číslo 2, která je rovna 0,3 mm a minimální odchylka je na kouli číslo 3, která je rovna 0,0 mm.

$$m_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n dv_i^2}{n-1}} \quad (8)$$

7.1.2 DÉLKOVÉ VYHODNOCENÍ PRŮMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ

Druhou metodou na ověření průměru měřických koulí bylo délkové měření na střed povrchu viditelné polokoule pomocí totální stanice Topcon GT-1001. Délkové měření probíhalo vždy dvakrát na každou kouli. Výpočet poloměru (r) měřických koulí byl proveden z rozdílu vodorovné délky měřené na střed povrchu viditelné polokoule s_v a vodorovné délky měřené na střed hranolu Trimble M, jejíž hodnota je $s = 7,5326$ m. Z výsledného poloměru byl vypočten průměr a následně byl porovnán s průměrem udávaným výrobcem. Princip měření a vyhodnocení poloměru (r) je zobrazen na Obr. 32.



Obr. 32: Princip délkového měření a určení výsledného poloměru [autor]

Určení průměrů měřických koulí je zobrazeno v Tab. 12 a Tab. 13.

Tab. 12: Určení průměru malých měřických koulí [autor]

Č.K.	Měření	$s_{v(1,2)}$ [m]	s_v [m]	r [m]	\varnothing [mm]
1 (malá)	1. měření	7,4628	7,4627	0,0699	139,8
	2. měření	7,4626			
2 (malá)	1. měření	7,4629	7,4628	0,0698	139,6
	2. měření	7,4627			
3 (malá)	1. měření	7,4628	7,4627	0,0698	139,7
	2. měření	7,4627			
4 (malá)	1. měření	7,4626	7,4626	0,0699	139,9
	2. měření	7,4627			
5 (malá)	1. měření	7,4630	7,4630	0,0696	139,2
	2. měření	7,4630			

Tab. 13: Určení průměru velkých měřických koulí [autor]

Č.K.	Měření	$s_{v(1,2)}$ [m]	s_v [m]	r [m]	\varnothing [mm]
6 (velká)	1. měření	7,4326	7,4327	0,0999	199,8
	2. měření	7,4328			
7 (velká)	1. měření	7,4329	7,4327	0,0998	199,7
	2. měření	7,4326			
8 (velká)	1. měření	7,4328	7,4327	0,0998	199,7
	2. měření	7,4327			
9 (velká)	1. měření	7,4326	7,4328	0,0997	199,5
	2. měření	7,4331			

Výsledné porovnání s průměrem udávaným výrobcem pro malé měřické koule $\varnothing_v=139$ mm a s průměrem udávaným výrobcem pro velké měřické koule $\varnothing_v=199$ mm je uvedeno v Tab. 14, kde \varnothing je měřený průměr koulí a d_v je rozdíl od průměru udávaným výrobcem.

Tab. 14: Vyhodnocení rozdílů od průměru udávaným výrobcem [autor]

Č.K.	\varnothing [mm]	d_v [mm]	Č.K.	\varnothing [mm]	d_v [mm]
1 (malá)	139,8	-0,8	6 (velká)	199,8	-0,8
2 (malá)	139,6	-0,6	7 (velká)	199,7	-0,7
3 (malá)	139,7	-0,7	8 (velká)	199,7	-0,7
4 (malá)	139,9	-0,9	9 (velká)	199,5	-0,5
5 (malá)	139,2	-0,2			

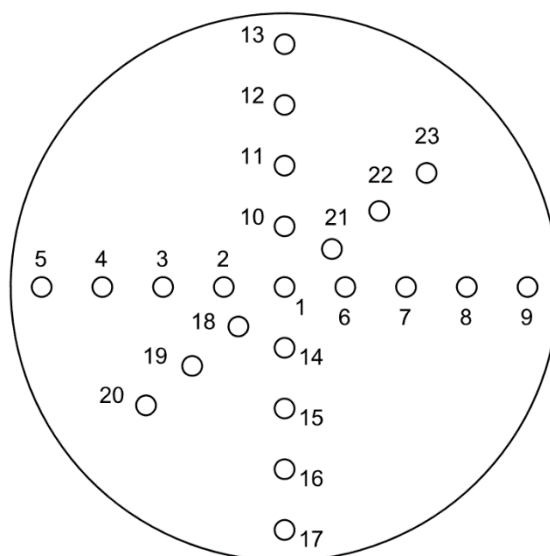
Výsledná přesnost byla vypočtena ze vztahu (8), jako střední chyba rozdílů měřených hodnot od průměru udávaným výrobcem. Výsledná střední chyba pro malé měřické koule je rovna $m_v = 0,37$ mm a pro velké měřické koule je rovna $m_v = 0,33$ mm. Maximální odchylka od průměru udávaným výrobcem je na kouli číslo 4, která je rovna 0,9 mm a minimální odchylka je na kouli číslo 5, která je rovna 0,2 mm.

7.1.3 RASTROVÉ VYHODNOCENÍ PRŮMĚRŮ MĚŘICKÝCH KOULÍ

Třetí metodou na ověření průměru měřických koulí bylo měření a určení bodů na povrchu viditelné polokoule. Měření opět probíhalo pomocí totální stanice Topcon GT-1001, kde byly souřadnice vypočteny z měření polární metody na povrchu koule. Zobrazení rastru bodů na viditelné polokouli je zobrazeno na Obr. 33. Celkově bylo zaměřeno 23 bodů na každé měřické kouli. Výpočet poloměru (r) měřických koulí byl vypočten ze souřadnic bodu středu koule a bodu na povrchu koule. Střed koule byl vypočten analytickým řešením iterační metody a následným konvergovaním dle funkce ze vztahu (9). Parametry (x , y , z) lze řešit pomocí maticové operace popsané ve vztahu (10) za předpokladu, že se na kouli získají čtyři nebo více bodů. Celkově bylo tedy vypočtených 23 poloměrů (r), ze kterých byl vypočten průměr výsledného poloměru koule. Z výsledného poloměru byl vypočten průměr a následně byl porovnán s průměrem udávaným výrobcem.

$$F = \sum_{i=1}^n f_i^2 = \sum_{i=1}^n (\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - r)^2 \quad (9)$$

$$\mathbf{X} = [\mathbf{A}^T \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{A}^T \mathbf{B}] \quad (10)$$



Obr. 33: Ukázka rastrového rozložení bodů na kouli [autor]

Ukázka určení výsledného poloměru z 23 bodů měřených na kouli je zobrazen v Tab. 15. Tabulka zobrazuje určení na kouli č. 2. Obdobně byly určeny všechny měřické koule. Výsledné hodnoty poloměrů jednotlivých bodů na všech koulích jsou uvedeny v Tab. 16.

Tab. 15: Ukázka vyhodnocení výsledného poloměru koule č. 2 [autor]

Č.B.	Y [m]	X [m]	Z [m]	r [m]	d_r [mm]	d_{rv} [mm]
1	500,0009	1007,4624	99,9585	0,0693	0,0	0,2
2	499,9880	1007,4635	99,9584	0,0695	-0,1	0,0
3	499,9707	1007,4695	99,9583	0,0692	0,1	0,3
4	499,9530	1007,4824	99,9583	0,0689	0,5	0,6
5	499,9351	1007,5086	99,9581	0,0699	-0,5	-0,4
6	500,0117	1007,4631	99,9585	0,0695	-0,1	0,0
7	500,0302	1007,4688	99,9584	0,0694	0,0	0,1
8	500,0472	1007,4805	99,9583	0,0690	0,4	0,5
9	500,0649	1007,5056	99,9582	0,0690	0,3	0,5
10	500,0009	1007,4636	99,9702	0,0693	0,0	0,2
11	500,0009	1007,4697	99,9883	0,0693	0,0	0,2
12	500,0009	1007,4821	100,0056	0,0692	0,1	0,3
13	500,0009	1007,5096	100,0233	0,0695	-0,2	0,0
14	500,0009	1007,4632	99,9466	0,0694	0,0	0,1
15	500,0009	1007,4690	99,9291	0,0688	0,5	0,7
16	500,0009	1007,4794	99,9115	0,0696	-0,3	-0,1
17	500,0009	1007,5048	99,8934	0,0694	-0,1	0,1
18	499,9831	1007,4664	99,9414	0,0696	-0,3	-0,1
19	499,9685	1007,4775	99,9286	0,0695	-0,2	0,0
20	499,9638	1007,4944	99,9121	0,0695	-0,2	0,0
21	500,0129	1007,4648	99,9725	0,0696	-0,3	-0,1
22	500,0214	1007,4724	99,9862	0,0690	0,3	0,5
23	500,0413	1007,4969	100,0017	0,0693	0,1	0,2
			Průměr r=	0,0693		
			Výrobce r=	0,0695		

Kde: Y, X, Z jsou souřadnice měřených bodů na kouli v místní souřadnicové soustavě

r – je vypočtený poloměr ze středu koule k měřenému bodu na kouli

d_r – je rozdíl poloměru (r) od výsledného průměru poloměrů (r)

d_{rv} – je rozdíl poloměru (r) od poloměru udávaného výrobcem

Tab. 16: Ukázka všech výsledných poloměrů koulí [autor]

Č.B.	Vyhodnocení poloměru (r) na všech měřených bodech na kouli [mm]								
	Koule č. 1	Koule č. 2	Koule č. 3	Koule č. 4	Koule č. 5	Koule č. 6	Koule č. 7	Koule č. 8	Koule č. 9
1	69,0	69,3	69,1	68,6	70,1	99,3	99,8	99,7	99,5
2	69,0	69,5	68,9	69,4	70,0	100,1	99,7	100,1	99,1
3	68,9	69,2	69,0	69,9	69,2	99,5	99,7	100,7	98,8
4	68,6	68,9	69,2	70,4	69,4	99,1	99,5	100,3	98,1
5	68,9	69,9	69,6	70,6	68,7	98,5	99,6	100,3	98,1
6	69,3	69,5	68,8	68,6	70,4	99,8	99,6	99,9	99,2
7	70,0	69,4	69,1	72,7	71,6	99,9	99,5	99,7	97,9
8	69,9	69,0	68,7	68,9	70,8	100,6	100,0	99,7	99,7
9	70,6	69,0	69,0	68,5	70,9	100,7	100,4	97,0	101,9
10	69,4	69,3	69,0	69,2	70,5	99,8	100,3	100,4	99,5
11	69,4	69,3	70,7	69,3	70,7	100,2	100,1	99,9	98,8
12	69,6	69,2	68,8	69,6	69,8	99,9	100,6	100,1	98,2
13	69,5	69,5	69,1	69,5	68,8	99,5	100,1	99,4	98,4
14	69,3	69,4	68,8	68,5	68,5	100,1	100,0	100,4	99,1
15	69,8	68,8	68,8	69,2	68,8	100,6	99,8	100,1	98,9
16	69,8	69,6	69,3	69,3	69,1	99,8	99,1	99,8	99,0
17	69,5	69,4	69,3	69,3	71,3	99,5	98,9	99,9	99,4
18	69,5	69,6	68,9	69,4	68,2	99,6	99,7	100,5	98,9
19	68,9	69,5	68,9	69,8	68,2	99,2	99,3	100,3	97,8
20	68,7	69,5	69,5	69,9	69,7	98,7	98,9	100,3	98,7
21	69,6	69,6	68,9	68,9	70,2	100,1	100,1	99,6	99,5
22	69,6	69,0	69,1	68,7	72,2	100,3	100,4	99,6	99,8
23	70,1	69,3	68,5	68,7	71,0	99,9	100,7	99,0	102,9
Ø=	69,4	69,3	69,1	69,4	69,9	99,8	99,8	99,9	99,2

V Tab. 17 je celkové vyhodnocení maximálních a minimálních odchylek vypočtených poloměrů 23 bodů na kouli od průměrné hodnoty poloměru a poloměru udávaného výrobcem. Dále jsou uvedeny střední chyba poloměru m_r vypočtená z oprav rozdílů od průměrné hodnoty poloměru a střední chyba poloměru m_{rv} vypočtená z oprav rozdílů od poloměru udávaného výrobcem. Posledním výpočtem byl medián hodnot poloměrů.

Tab. 17: Výpočet výsledných odchylek bodů měřených na kouli [autor]

Č.K.	Rozdíl od průměru		m_r [mm]	Rozdíl od výrobce		m_{rv} [mm]	Medián (r) [m]
	Max. [mm]	Min. [mm]		Max. [mm]	Min. [mm]		
1 (malá)	1,1	0,0	0,47	1,1	0,0	0,47	0,0695
2 (malá)	0,5	0,0	0,26	0,7	0,0	0,31	0,0694
3 (malá)	1,6	0,0	0,43	1,2	0,0	0,60	0,0690
4 (malá)	3,2	0,0	0,92	3,2	0,0	0,92	0,0693
5 (malá)	2,3	0,1	0,98	2,7	0,1	1,00	0,0700
6 (velká)	1,3	0,0	0,57	1,2	0,0	0,60	0,0998
7 (velká)	1,0	0,0	0,50	1,2	0,0	0,50	0,0998
8 (velká)	2,8	0,0	0,73	2,5	0,1	0,81	0,0999
9 (velká)	3,7	0,0	0,85	3,4	0,0	0,98	0,0990

Výsledné porovnání s průměrem udávaným výrobcem pro malé měřické koule $\varnothing_v=139$ mm a s průměrem udávaným výrobcem pro velké měřické koule $\varnothing_v=199$ mm je uvedeno v Tab. 18, kde \varnothing je měřený průměr koulí a d_v je rozdíl od průměru udávaným výrobcem.

Tab. 18: Vyhodnocení rozdílů od průměru udávaným výrobcem [autor]

Č.K.	\varnothing [mm]	d_v [mm]	Č.K.	\varnothing [mm]	d_v [mm]
1 (malá)	138,9	0,1	6 (velká)	199,5	-0,5
2 (malá)	138,7	0,3	7 (velká)	199,6	-0,6
3 (malá)	138,2	0,8	8 (velká)	199,7	-0,7
4 (malá)	138,9	0,1	9 (velká)	198,4	0,6
5 (malá)	139,8	-0,8			

Výsledná přesnost byla vypočtena ze vztahu (8), jako střední chyba rozdílů měřených hodnot od průměru udávaným výrobcem. Výsledná střední chyba pro malé měřické koule je rovna $mv= 0,62$ mm a pro velké měřické koule je rovna $mv= 0,71$ mm. Maximální odchylka od průměru udávaným výrobcem je na koulích číslo 3 a 5, kde je rovna 0,8 mm a minimální odchylka je na koulích číslo 1 a 4, kde je rovna 0,1 mm.

7.1.4 VYHODNOCENÍ VÝŠKOVÉHO ROZDÍLU MEZI HRANOLEM A MĚŘICKOU KOULÍ

V kapitole č. 7.1 bylo zmíněno, že pro vyhodnocení a porovnání laserové metody s terestrickým měřením musíme georeferencovat mračno bodů do místní souřadnicové soustavy, ve které bylo provedeno terestrické měření. Georeferencování je provedeno na měřické koule, které jsou v tomto případě identické body a jejich souřadnice jsou určeny v obou souřadnicových soustavách. Terestrické měření a určení souřadnic v místní souřadnicové soustavě probíhalo na hranol Trimble M, který byl pak při laserovém skenování zaměněn za měřickou kouli. Hranol nemá výšku středu stejnou jako měřická koule, a proto muselo být toto převýšení vyhodnoceno. Vyhodnocení probíhalo zároveň s kalibrací měřických koulí. Prvním krokem vyhodnocení bylo určení převýšení mezi stanoviskem a hranolem Trimble M. Vyhodnocení je zobrazeno v Tab. 19, kde s je měřená šikmá délka na střed hranolu, Z je měřený zenitový úhel na střed hranolu, s_v je přepočtená vodorovná délka a $\Delta h_{STN, CIL}$ je výsledné převýšení.

Tab. 19: Vyhodnocení převýšení mezi stanoviskem a hranolem Trimble M [autor]

s [m]	Z [g]	s_v [m]	$\Delta h_{STN, CIL}$ [m]
7,5326	100,2048	7,5326	-0,0242

Druhým krokem bylo vyhodnocení převýšení mezi stanoviskem a měřickou koulí. Měření probíhalo dvakrát na každou kouli. Vyhodnocení je zobrazeno v Tab. 20, kde s_k je měřená šikmá délka na kouli, Z je měřený zenitový úhel na střed koule, $\Delta h_{STN, CIL}$ je převýšení určené pro dvě měření a $\emptyset \Delta h_{STN, CIL}$ je průměr výsledného převýšení.

Tab. 20: Vyhodnocení převýšení mezi stanoviskem a měřickou koulí [autor]

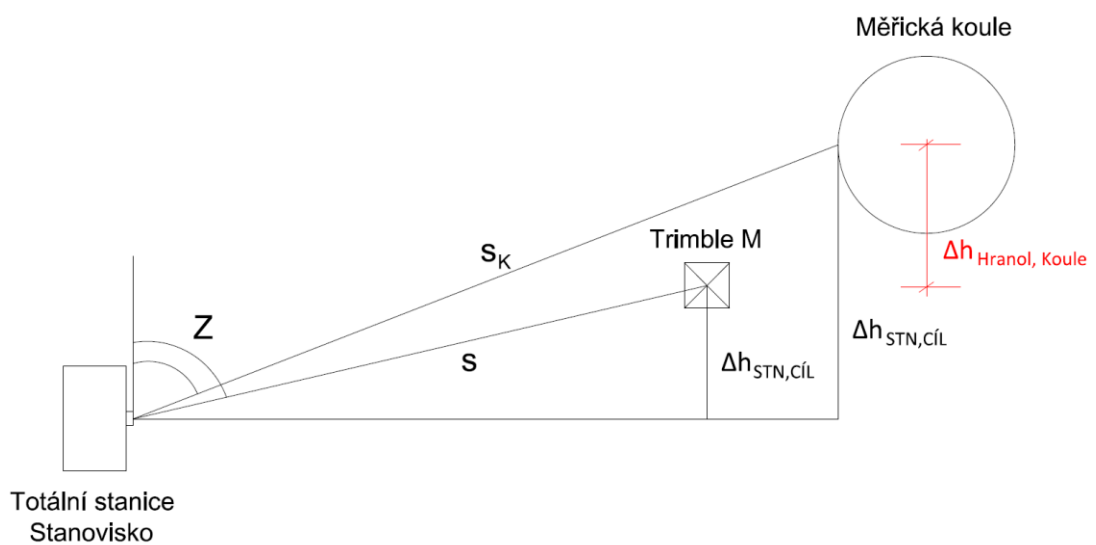
Č.K.	Měření	s_k [m]	Z [g]	$\Delta h_{STN, CIL}$ [m]	$\emptyset \Delta h_{STN, CIL}$ [m]
1 (malá)	1. měření	7,4629	100,3645	-0,0427	-0,0427
	2. měření	7,4627	100,3645	-0,0427	
2 (malá)	1. měření	7,4630	100,3677	-0,0431	-0,0431
	2. měření	7,4628	100,3679	-0,0431	
3 (malá)	1. měření	7,4629	100,3654	-0,0428	-0,0428
	2. měření	7,4628	100,3655	-0,0428	
4 (malá)	1. měření	7,4627	100,3662	-0,0429	-0,0429
	2. měření	7,4628	100,3664	-0,0430	
5 (malá)	1. měření	7,4631	100,3642	-0,0427	-0,0427
	2. měření	7,4631	100,3642	-0,0427	
6 (velká)	1. měření	7,4327	100,3668	-0,0428	-0,0428
	2. měření	7,4329	100,3666	-0,0428	
7 (velká)	1. měření	7,4330	100,3638	-0,0425	-0,0425
	2. měření	7,4327	100,3637	-0,0425	
8 (velká)	1. měření	7,4329	100,3655	-0,0427	-0,0427
	2. měření	7,4328	100,3652	-0,0426	
9 (velká)	1. měření	7,4327	100,3669	-0,0428	-0,0428
	2. měření	7,4332	100,3667	-0,0428	

Poslední částí vyhodnocení byl výpočet převýšení mezi hranolem Trimble M a měřickou koulí. Vyhodnocení je zobrazeno v Tab. 21, kde $\Delta h_{STN, CIL}$ je převýšení mezi stanoviskem a jednotlivými cíli, $\Delta h_{Hrnaol, Koule}$ je převýšení mezi hranolem a koulí a $d\emptyset$ je rozdíl jednotlivých převýšení od průměrného převýšení. Dále byla vypočtena střední chyba rozdílů jednotlivých převýšení od průměru s hodnotou $m = 0,18$ mm. Princip metody měření a vyhodnocení převýšení mezi hranolem a koulí je zobrazen na Obr. 34.

Tab. 21: Vyhodnocení převýšení mezi hranolem a měřickou koulí [autor]

Převýšení mezi	$\Delta h_{\text{STN, CÍL}}$ [m]	$\Delta h_{\text{Hranol, Koule}}$ [m]	$d\varnothing$ [mm]
Trimble M	-0,0242	-0,0185	-0,1
Koule č. 1	-0,0427		
Trimble M	-0,0242	-0,0189	0,3
Koule č. 2	-0,0431		
Trimble M	-0,0242	-0,0186	0,1
Koule č. 3	-0,0428		
Trimble M	-0,0242	-0,0187	0,2
Koule č. 4	-0,0429		
Trimble M	-0,0242	-0,0185	-0,1
Koule č. 5	-0,0427		
Trimble M	-0,0242	-0,0186	0,0
Koule č. 6	-0,0428		
Trimble M	-0,0242	-0,0182	-0,3
Koule č. 7	-0,0425		
Trimble M	-0,0242	-0,0184	-0,1
Koule č. 8	-0,0427		
Trimble M	-0,0242	-0,0186	0,0
Koule č. 9	-0,0428		
Průměr \varnothing =		-0,0186	

Maximální odchylka od průměru je na kouli číslo 7, která je rovna 0,3 mm a minimální odchylka je na kouli číslo 9, která je rovna 0,0 mm.

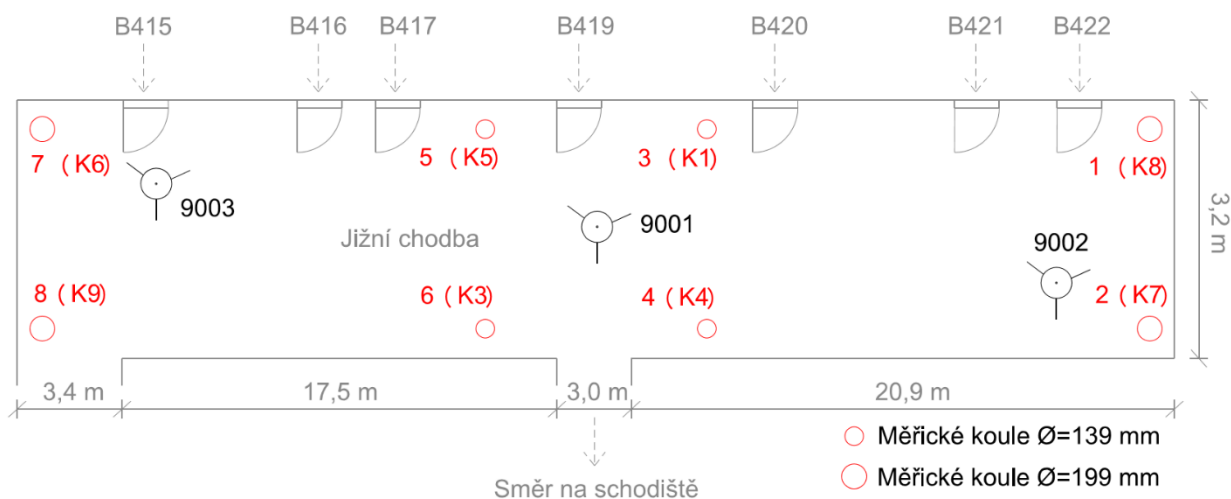


Obr. 34: Princip vyhodnocení převýšení mezi hranolem a koulí [autor]

7.2 KONTROLA A VYHODNOCENÍ LASEROVÉHO SKENERU

Měření kalibrace laserového skeneru probíhalo na Fakultě stavební VUT v Brně, v budově B na chodbě 4. nadzemního podlaží. Kontrola probíhala dne 31.03.2021. Teplota při měření byla 19,7 °C a tlak byl 993,7 hPa. Kontrola laserového skeneru spočívala z ověření jeho kompenzátoru a nastavení magnetického severu. Při kontrole skeneru byly využity stejné měřické koule, na něž bylo měřeno při skenování bazénové haly.

Celkem bylo měřeno na 8 měřických koulích rozestavených rovnoměrně po celé délce chodby. Skenování probíhalo ze tří postavení. První postavení bylo centrické uprostřed chodby a dvě excentrické z každého kraje chodby. Měřické koule na bodech 1,2,7 a 8 byly koule s průměrem $\varnothing_v=199$ mm a koule na bodech 3,4,5 a 6 byly s průměrem $\varnothing_v=139$ mm. Měřické koule s lichým označením byly postaveny na stativěch a měřické koule se sudým označením byly postaveny na speciálně upravených měřických stojanech. Rozložení koulí a stanovisek je zobrazeno na Obr. 35, kde je písmenem „K“ označené číslo koule dle kapitoly 7.1.1.



Obr. 35: Rozložení stanovisek laserového skeneru a rozložení koulí [autor]

Před skenováním se nejprve založí projekt pod názvem, kterým se budou pojmenovávat jednotlivé skeny. Poté se nastavují parametry měření. Ty se naleznou tak, že na domovské obrazovce klikneme na ikonu „Parameters“. Hlavní parametr, který nás většinou bude zajímat nejvíce, je rozlišení skenování. Rozlišení je udáváno v milimetrech na 10 metrů. Z každého stanoviska laserového skeneru byl proveden sken s nastavením rozlišení přibližně 3 mm na 10 metrů. I malá změna nastavení může značně změnit dobu skenování. Samotný sběr dat se spustí klepnutím na příkaz „Start scan“ na domovské obrazovce.

Skener nejprve skenuje body v předem nastaveném úhlovém rozmezí (vertikálním i horizontálním). Přístroj se během skenování točí kolem své osy a vysílá laserové paprsky, které poté přijímá odražené od objektů zpět. Pokud chceme mít mračno v RGB spektru, musí být v přístroji předem nastaven sběr fotografií. Fotografování probíhá ihned po skenování. Každý z těchto úkonů trvá přibližně polovinu času. Doba skenování trvala na jednom postavení skeneru přibližně 30 minut. Na Obr. 36 je ukázka měření skeneru na chodbě 4. nadzemního podlaží v budově B, VUT FAST.



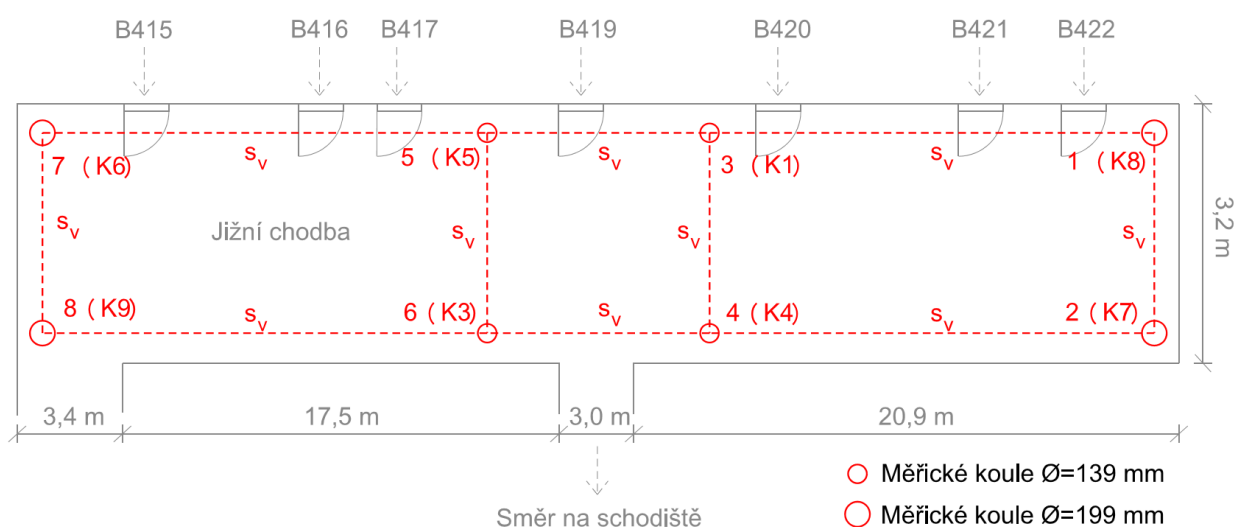
Obr. 36: Ukázka rozložení koulí na chodbě 4. n.p. [autor]

7.2.1 POROVNÁNÍ PŘEVÝŠENÍ A DÉLEK MEZI JEDNOTLIVÝMI SKENY A VÝPOČET SKLONU ZÁMĚRNÉ PŘIMKY PŘÍSTROJE

Prvním vyhodnocením bylo porovnání převýšení a délek mezi středy měřických koulí z každého postavení laserového skeneru. Skeny byly nahrány do software Trimble RealWorks, kde byl založen projekt pro každý sken samostatně. Ze skenů byly získány souřadnice středů měřických koulí z každého stanoviště. Následně byly porovnány převýšení a vodorovné délky mezi jednotlivými koulemi. Zobrazení vyhodnocení délek mezi měřickými koulemi je zřejmé z Obr. 37. V Tab. 22 je zobrazený počet bodů (P.B.), ze kterých byly vyhodnoceny středy měřických koulí a střední souřadnicová chyba $m_{x,y}$ určení středu. Ze stanoviště 9003 nebyly vyhodnoceny koule na bodech č. 2 a č. 4 z důvodu šumu na pozicích jednotlivých koulí.

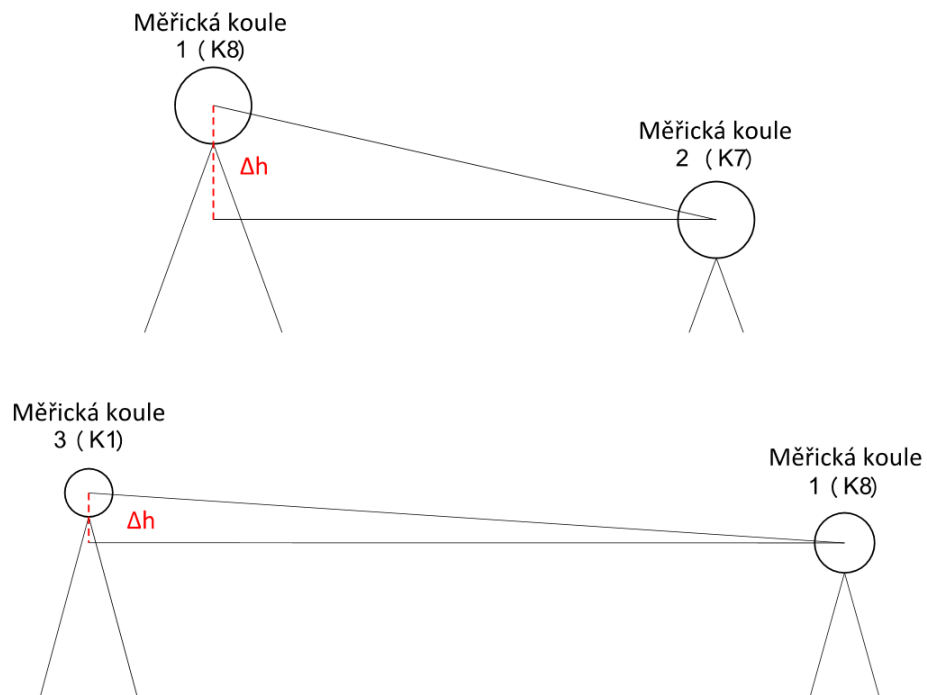
Tab. 22: Vyhodnocení jednotlivých středů koulí [autor]

ST. 9001 (centrické)			ST. 9002 (excentrické)			ST. 9003 (excentrické)		
Č.B.	P.B.	m_{xy} [mm]	Č.B.	P.B.	m_{xy} [mm]	Č.B.	P.B.	m_{xy} [mm]
bod 1	684	0,59	Bod 1	19 259	0,42	Bod 1	223	0,91
bod 2	757	0,63	Bod 2	22 755	0,44	Bod 3	343	0,56
bod 3	9741	0,42	Bod 3	721	0,49	Bod 5	789	0,71
bod 4	11218	0,44	Bod 4	770	0,46	Bod 6	772	0,45
bod 5	10960	0,54	Bod 5	339	0,60	Bod 7	23241	0,44
bod 6	12839	0,45	Bod 6	336	0,72	Bod 8	22 516	0,42
bod 7	764	0,54	Bod 7	256	1,09			
bod 8	783	0,57	Bod 8	226	0,80			

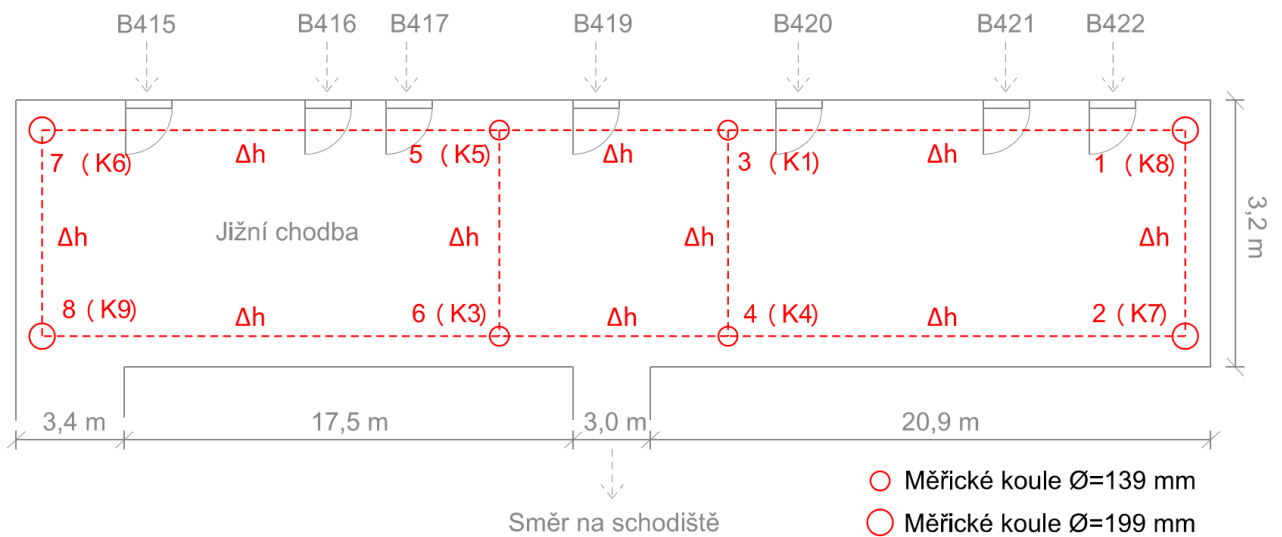


Obr. 37: Vyhodnocení vodorovné délky (s_v) mezi měřickými koulemi [autor]

Vyhodnocení převýšení je zřejmé z Obr. 38 a Obr. 39, kde jsou vyhodnocena převýšení mezi sousedními koulemi.



Obr. 38: Vyhodnocení převýšení mezi měřickými koulemi [autor]



Obr. 39: Vyhodnocení převýšení (Δh) mezi měřickými koulemi [autor]

Vyhodnocení převýšení a vodorovné délky mezi stanoviskem 9001 a 9002 je zobrazeno v Tab. 23 a Tab. 26. V Tab. 24 a Tab. 27 jsou zobrazena vyhodnocení převýšení a vodorovných délek mezi stanovisky 9001 a 9003. Vyhodnocení převýšení a vodorovné délky mezi stanoviskem 9002 a 9003 je zobrazeno v Tab. 25 a v Tab. 28.

Tab. 23: Vyhodnocení převýšení [autor]

Mezi stanoviskem 9001 - 9002			
Mezi body	Δh (9001) [m]	Δh (9002) [m]	Rozdíl [mm]
1-2	1,2771	1,2781	-1,0
3-4	1,2612	1,2605	0,7
5-6	1,2199	1,2194	0,5
7-8	1,1373	1,1366	0,7
1-3	0,0207	0,0197	1,0
3-5	0,0416	0,0421	-0,5
5-7	0,0339	0,0346	-0,7
2-4	0,0048	0,0021	2,7
4-6	0,0003	0,0010	-0,7
6-8	0,0487	0,0482	0,5

Tab. 26: Vyhodnocení délky [autor]

Mezi stanoviskem 9001 - 9002			
Mezi body	s_v (9001) [m]	s_v (9002) [m]	Rozdíl [mm]
1-2	2,7994	2,8003	-0,9
3-4	2,7618	2,7609	0,9
5-6	2,5905	2,5891	1,4
7-8	2,3345	2,3341	0,5
1-3	19,6115	19,6110	0,6
3-5	7,8708	7,8696	1,2
5-7	19,2381	19,2383	-0,2
2-4	19,5702	19,5698	0,4
4-6	7,5727	7,5723	0,5
6-8	19,1064	19,1063	0,1

Tab. 24: Vyhodnocení převýšení [autor]

Mezi stanoviskem 9001 - 9003			
Mezi body	Δh (9001) [m]	Δh (9003) [m]	Rozdíl [mm]
5-6	1,2199	1,2189	1,0
7-8	1,1373	1,1368	0,5
1-3	0,0207	0,0211	-0,4
5-7	0,0339	0,0345	-0,6
6-8	0,0487	0,0476	1,1

Tab. 27: Vyhodnocení délky [autor]

Mezi stanoviskem 9001 - 9003			
Mezi body	s_v (9001) [m]	s_v (9003) [m]	Rozdíl [mm]
5-6	2,5905	2,5910	-0,6
7-8	2,3345	2,3342	0,4
1-3	19,6115	19,6110	0,5
5-7	19,2381	19,2376	0,4
6-8	19,1064	19,1069	-0,6

Tab. 25: Vyhodnocení převýšení [autor]

Mezi stanoviskem 9002 - 9003			
Mezi body	Δh (9002) [m]	Δh (9003) [m]	Rozdíl [mm]
5-6	1,2194	1,2189	0,5
7-8	1,1366	1,1368	-0,2
1-3	0,0197	0,0211	-1,4
5-7	0,0346	0,0345	0,1
6-8	0,0482	0,0476	0,6

Tab. 28: Vyhodnocení délky [autor]

Mezi stanoviskem 9002 - 9003			
Mezi body	s_v (9002) [m]	s_v (9003) [m]	Rozdíl [mm]
5-6	2,5891	2,5910	-1,9
7-8	2,3341	2,3342	-0,1
1-3	19,6110	19,6110	0,0
5-7	19,2383	19,2376	0,6
6-8	19,1063	19,1069	-0,6

Přesnost určení převýšení mezi body z dvojího nezávislého měření je dána střední chybou m_h dle vztahu (11). Vyhodnocení střední chyby, maximální a minimální odchylky je patrné z Tab. 29. Obdobně je určena přesnost vodorovné délky mezi body z dvojího nezávislého měření, která je dána střední chybou m_{sv} dle vztahu (11). Vyhodnocení střední chyby, maximální a minimální odchylky je patrné z Tab. 30.

$$m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{2n}} \quad (11)$$

Tab. 29: Vyhodnocení přesnosti rozdílu převýšení [autor]

Vyhodnocení převýšení mezi		$m_{\Delta h}$ [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]
9001 (centr.)	9002 (excentr.)	0,77	1,0	0,5
9001 (centr.)	9003 (excentr.)	0,55	1,1	0,4
9002 (excentr.)	9003 (excentr.)	0,51	1,4	0,1

Tab. 30: Vyhodnocení přesnosti rozdílu délky [autor]

Vyhodnocení délky mezi		m_{sv} [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]
9001 (centr.)	9002 (excentr.)	0,54	1,4	0,1
9001 (centr.)	9003 (excentr.)	0,35	0,6	0,4
9002 (excentr.)	9003 (excentr.)	0,67	1,9	0,0

Sklon záměrné přímky byl určen z rozdílů výšek přístroje a měřických koulí měřených ze dvou stanovisek. V principu se jedná o stejnou metodu jako v případě kontroly sklonu záměrné přímky nivelačního přístroje. V tomto případě bylo vypočteno převýšení mezi laserovým skenerem ze stanoviska 9001 a dvěma měřickými koulemi. Obdobně bylo vypočtené převýšení mezi laserovým skenerem ze stanoviska 9002 a dvěma stejně postavenými měřickými koulemi. Následně byl vypočten rozdíl převýšení mezi dvěma koulemi měřeními ze dvou stanovisek. Nakonec byl z rozdílu vypočtený úhel sklonu záměrné přímky. Na stejném principu probíhal výpočet sklonu záměrné přímky i mezi stanoviskem 9001–9003 a 9002–9003.

Výpočet výsledného převýšení mezi měřickými koulemi pro vyhodnocení sklonu záměrné přímky je zřejmý ze vzorce (12). Obdobně bylo převýšení vypočtené i pro stanoviska 9002 a 9003. Výpočet sklonu záměrné přímky je zřejmý ze vzorce (13).

$$\Delta h_{9001} = |\Delta h_1 - \Delta h_2| \quad (12)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\Delta h_{9001} - \Delta h_{9002}}{s}\right) \quad (13)$$

Výsledné hodnoty sklonu záměrné přímky mezi stanoviskem 9001 a 9002 jsou zobrazeny v Tab. 31, mezi stanoviskem 9001 a 9003 jsou zobrazeny v Tab. 32 a mezi stanoviskem 9002 a 9003 jsou zobrazeny v Tab. 33.

Tab. 31: Vyhodnocení sklonu záměrné přímky mezi 9001–9002 [autor]

Mezi body	Stanovisko 9001			Stanovisko 9002			$\Delta h_{9001} - \Delta h_{9002}$ [mm]	s [m]	φ ["]	O_{φ} [mm/m]
	Δh_1 [m]	Δh_2 [m]	Δh_{9001} [m]	Δh_3 [m]	Δh_4 [m]	Δh_{9002} [m]				
1-8	-0,0560	1,1775	1,2335	-0,0613	1,1717	1,2330	0,5	46,4760	2,2	0,01
2-7	1,2211	0,0402	1,1809	1,2168	0,0351	1,1817	-0,8	46,6300	-3,5	-0,02
3-6	-0,0353	1,2262	1,2615	-0,0416	1,2199	1,2615	0,0	8,1692	0,0	0,00
4-5	1,2259	0,0063	1,2196	1,2189	0,0005	1,2184	1,2	8,1719	30,3	0,15
1-3	-0,0560	-0,0353	0,0207	-0,0613	-0,0416	0,0197	1,0	19,6115	10,5	0,05
3-5	-0,0353	0,0063	0,0416	-0,0416	0,0005	0,0421	-0,5	7,8708	-13,1	-0,06
5-7	0,0063	0,0402	0,0339	0,0005	0,0351	0,0346	-0,7	19,2381	-7,5	-0,04
2-4	1,2211	1,2259	0,0048	1,2168	1,2189	0,0021	2,7	19,5702	28,5	0,14
4-6	1,2259	1,2262	0,0003	1,2189	1,2199	0,0010	-0,7	7,5727	-19,1	-0,09
6-8	1,2262	1,1775	0,0487	1,2199	1,1717	0,0482	0,5	19,1064	5,4	0,03
1-2	-0,0560	1,2211	1,2771	-0,0613	1,2168	1,2781	-1,0	2,7994	-73,7	-0,36
3-4	-0,0353	1,2259	1,2612	-0,0416	1,2189	1,2605	0,7	2,7618	52,3	0,25
5-6	0,0063	1,2262	1,2199	0,0005	1,2199	1,2194	0,5	2,5905	39,8	0,19
7-8	0,0402	1,1775	1,1373	0,0351	1,1717	1,1366	0,7	2,3345	61,8	0,30

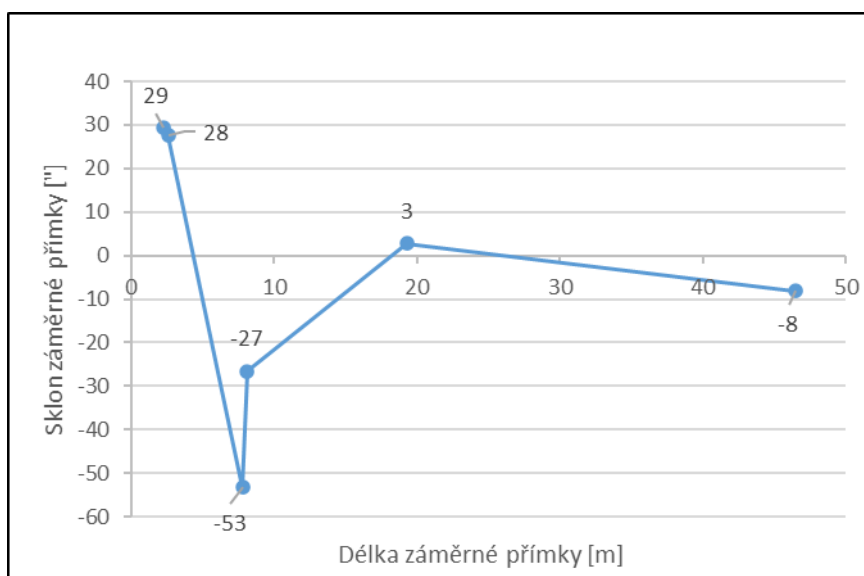
Tab. 32: Vyhodnocení sklonu záměrné přímky mezi 9001–9003 [autor]

Mezi body	Stanovisko 9001			Stanovisko 9003			$\Delta h_{9001} - \Delta h_{9003}$ [mm]	s [m]	φ ["]	O_{φ} [mm/m]
	Δh_1 [m]	Δh_2 [m]	Δh_{9001} [m]	Δh_3 [m]	Δh_4 [m]	Δh_{9003} [m]				
1-8	-0,0560	1,1775	1,2335	-0,0711	1,1666	1,2377	-4,2	46,4760	-18,6	-0,09
3-6	-0,0353	1,2262	1,2615	-0,0500	1,2142	1,2642	-2,7	8,1692	-68,2	-0,33
1-3	-0,0560	-0,0353	0,0207	-0,0711	-0,0500	0,0211	-0,4	19,6115	-4,2	-0,02
3-5	-0,0353	0,0063	0,0416	-0,0500	-0,0047	0,0453	-3,7	7,8708	-97,0	-0,47
5-7	0,0063	0,0402	0,0339	-0,0047	0,0298	0,0345	-0,6	19,2381	-6,4	-0,03
6-8	1,2262	1,1775	0,0487	1,2142	1,1666	0,0476	1,1	19,1064	11,9	0,06
5-6	0,0063	1,2262	1,2199	-0,0047	1,2142	1,2189	1,0	2,5905	79,6	0,39
7-8	0,0402	1,1775	1,1373	0,0298	1,1666	1,1368	0,5	2,3345	44,2	0,21

Tab. 33: Vyhodnocení sklonu záměrné přímky mezi 9002–9003 [autor]

Mezi body	Stanovisko 9002			Stanovisko 9003			$\Delta h_{9002} - \Delta h_{9003}$ [mm]	s [m]	φ ["]	O_{φ} [mm/m]
	Δh_1 [m]	Δh_2 [m]	Δh_{9002} [m]	Δh_3 [m]	Δh_4 [m]	Δh_{9003} [m]				
1-8	-0,0613	1,1717	1,233	-0,0711	1,1666	1,2377	-4,7	46,4760	-20,9	-0,10
3-6	-0,0416	1,2199	1,2615	-0,0500	1,2142	1,2642	-2,7	8,1692	-68,2	-0,33
1-3	-0,0613	-0,0416	0,0197	-0,0711	-0,0500	0,0211	-1,4	19,6115	-14,7	-0,07
3-5	-0,0416	0,0005	0,0421	-0,0500	-0,0047	0,0453	-3,2	7,8708	-83,9	-0,41
5-7	0,0005	0,0351	0,0346	-0,0047	0,0298	0,0345	0,1	19,2381	1,1	0,01
6-8	1,2199	1,1717	0,0482	1,2142	1,1666	0,0476	0,6	19,1064	6,5	0,03
5-6	0,0005	1,2199	1,2194	-0,0047	1,2142	1,2189	0,5	2,5905	39,8	0,19
7-8	0,0351	1,1717	1,1366	0,0298	1,1666	1,1368	-0,2	2,3345	-17,7	-0,09

Výsledkem testování a vyhodnocení převýšení a délek mezi jednotlivými měřickými koulemi je analýza funkčnosti kompenzátoru laserového skeneru, kde je maximální střední chyba rozdílu převýšení mezi dvěma skeny rovna 0,77 mm a maximální střední chyba rozdílu délky mezi dvěma skeny je rovna 0,67 mm. Z vyhodnocení sklonu záměrné přímky dle Obr. 40 je zřejmé, že na kratší vzdálenost je sklon vyšší, přičemž ve vzdálenosti 2 až 3 metre dosahuje kladných hodnot a ve vzdálenosti 7 až 8 metrů dosahuje záporných hodnot. Dále klesá se zvětšující se vzdáleností. Průměrná hodnota sklonu je -0,02 mm na 1 m a přesnost vyjádřená pomocí střední chyby sklonu je rovna 42,1".

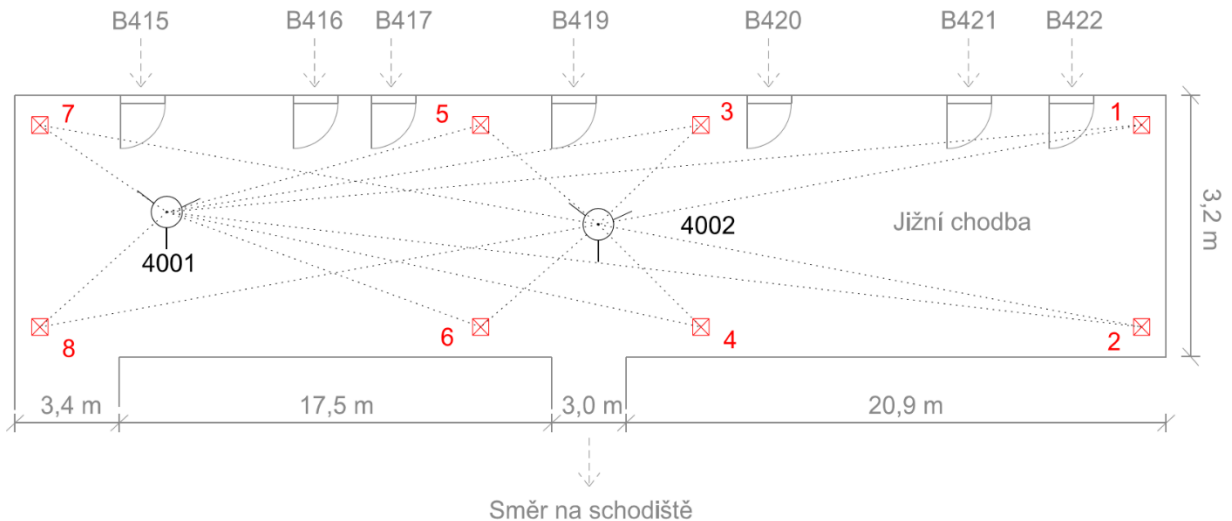


Obr. 40: Vyhodnocení sklonu záměrné přímky [autor]

7.2.2 POROVNÁNÍ PŘEVÝŠENÍ A DÉLEK MEZI JEDNOTLIVÝMI SKENY A TERESTRICKÝM MĚŘENÍM

Druhou částí bylo terestrické měření totální stanicí Topcon GT-1001 na hranoly Trimble M. Hranoly byly umístěny místo měřických koulí na bodech 1 až 8. Následně proběhl výpočet souřadnic jednotlivých bodů v místní souřadnicové soustavě. Důvodem měření a výpočtu bylo vyhodnocení vodorovné délky a převýšení mezi hranoly a porovnání s převýšením a vodorovnou délkou mezi středy koulí určenými z laserového skenování.

Terestrické měření totální stanicí probíhalo z dvojího postavení. První postavení bylo na konci chodby a druhé v jejím středu. Zaměřeny byly všechny body z každého stanoviště. Princip měření je zřejmý z Obr. 41.



Obr. 41: Ukázka terestrického měření [autor]

Výpočet souřadnic jednotlivých bodů byl proveden pomocí MNČ. K výpočtu byl využit program G-NET. Samotné vyrovnání a princip fungování programu G-NET byl popsán v kapitole 6.2. Výsledkem vyrovnání jsou souřadnice a jejich přesnost vyjádřená pomocí středních chyb jednotlivých souřadnic. Výsledné souřadnice bodů a jejich přesnost je uvedena v Tab. 34. Pro další porovnávání a georeferencování byly výšky bodů upraveny o hodnotu vypočtenou v kapitole 7.1.4, která udává rozdíl mezi výškou středu hranolu a středu měřické koule.

Tab. 34: Výsledné souřadnice a jejich přesnost [autor]

Č.B.	Y	X	Z	m_y	m_x	m_z
	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]
1	500,0002	1023,1655	100,0296	0,58	0,65	0,15
2	502,7802	1022,8128	98,8010	0,58	0,65	0,17
3	498,6974	1003,5995	100,0590	0,21	0,39	0,15
4	501,4420	1003,2931	98,7967	0,23	0,44	0,17
5	498,3197	995,7367	100,0162	0,12	0,32	0,15
6	500,9111	995,7429	98,7968	0,10	0,30	0,17
7	496,9680	976,5507	99,9816	0,42	0,63	0,15
8	499,3013	976,7019	98,7947	0,41	0,50	0,17

Převýšení a vodorovné délky mezi jednotlivými body byly porovnávány z dat získaných skenováním ze stanoviska 9001 a z vyrovnaných souřadnic vypočtených z měření totální stanicí. Výsledky jsou zřejmé z Tab. 35 a Tab. 36. Další převýšení a vodorovné délky byly obdobně porovnávány s použitím dat ze stanovisek 9002 a 9003. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 37, Tab. 38, Tab. 39 a Tab. 40.

Tab. 35: Vyhodnocení převýšení [autor]

Mezi body	Δh - Skener (9001) [m]	Δh - Totální stanice [m]	Rozdíl [mm]
1-2	1,2771	1,2764	0,7
3-4	1,2612	1,2625	-1,3
5-6	1,2199	1,2195	0,4
7-8	1,1373	1,1368	0,5
1-3	0,0207	0,0187	2,0
3-5	0,0416	0,0428	-1,2
5-7	0,0339	0,0347	-0,8
2-4	0,0048	0,0048	0,0
4-6	0,0003	-0,0002	0,5
6-8	0,0487	0,0480	0,7

Tab. 36: Vyhodnocení délky [autor]

Mezi body	s_v - Skener (9001) [m]	s_v - Totální stanice [m]	Rozdíl [mm]
1-2	2,7994	2,8023	-2,9
3-4	2,7618	2,7616	0,2
5-6	2,5905	2,5914	-0,9
7-8	2,3345	2,3382	-3,6
1-3	19,6115	19,6093	2,2
3-5	7,8708	7,8719	-1,0
5-7	19,2381	19,2337	4,4
2-4	19,5702	19,5655	4,7
4-6	7,5727	7,5688	3,9
6-8	19,1064	19,1089	-2,6

Tab. 37: Vyhodnocení převýšení [autor]

Mezi body	Δh - Skener (9002) [m]	Δh - Totální stanice [m]	Rozdíl [mm]
1-2	1,2781	1,2764	1,7
3-4	1,2605	1,2625	-2,0
5-6	1,2194	1,2195	-0,1
7-8	1,1366	1,1368	-0,2
1-3	0,0197	0,0187	1,0
3-5	0,0421	0,0428	-0,7
5-7	0,0346	0,0347	-0,1
2-4	0,0021	0,0048	-2,7
4-6	0,001	-0,0002	1,2
6-8	0,0482	0,0480	0,2

Tab. 38: Vyhodnocení délky [autor]

Mezi body	s_v - Skener (9002) [m]	s_v - Totální stanice [m]	Rozdíl [mm]
1-2	2,8003	2,8023	-2,0
3-4	2,7609	2,7616	-0,7
5-6	2,5891	2,5914	-2,3
7-8	2,3341	2,3382	-4,1
1-3	19,6110	19,6093	1,7
3-5	7,8696	7,8719	-2,3
5-7	19,2383	19,2337	4,6
2-4	19,5698	19,5655	4,3
4-6	7,5723	7,5688	3,4
6-8	19,1063	19,1089	-2,6

Tab. 39: Vyhodnocení převýšení [autor]

Mezi body	Δh - Skener (9003) [m]	Δh - Totální stanice [m]	Rozdíl [mm]
5-6	1,2189	1,2195	-0,6
7-8	1,1368	1,1368	0,0
1-3	0,0211	0,0187	2,4
5-7	0,0345	0,0347	-0,2
6-8	0,0476	0,0480	-0,4

Tab. 40: Vyhodnocení délky [autor]

Mezi body	s_v - Skener (9003) [m]	s_v - Totální stanice [m]	Rozdíl [mm]
5-6	2,5910	2,5914	-0,4
7-8	2,3342	2,3382	-4,0
1-3	19,6110	19,6093	1,7
5-7	19,2376	19,2337	3,9
6-8	19,1069	19,1089	-2,0

Přesnost určení převýšení mezi body z dvojího nezávislého měření je dána střední chybou m_h dle vztahu (11). Obdobně je určena přesnost vodorovné délky (m_{sv}) mezi body z dvojího nezávislého měření. Vyhodnocení středních chyb, maximální a minimální odchylky z porovnání dat získaných laserovým skenováním na stanovisku 9001 a terestrickým měřením totální stanicí je zobrazeno v Tab. 41. Obdobně byly vyhodnoceny přesnosti ze stanovisek 9002 a 9003 zobrazené v Tab. 42 a Tab. 43.

Tab. 41: Vyhodnocení přesnosti měření převýšení a délky z dat získaných skenováním ze stanoviska 9001 a z měření totální stanicí [autor]

Vyhodnocení převýšení			Vyhodnocení délky		
m_h [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]	m_{sv} [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]
0,97	2,0	0,0	2,13	4,7	0,2

Tab. 42: Vyhodnocení přesnosti měření převýšení a délky z dat získaných skenováním ze stanoviska 9002 a z měření totální stanicí [autor]

Vyhodnocení převýšení			Vyhodnocení délky		
m_h [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]	m_{sv} [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]
0,93	2,7	0,1	2,15	4,6	0,7

Tab. 43: Vyhodnocení přesnosti měření převýšení a délky z dat získaných skenováním ze stanoviska 9003 a z měření totální stanicí [autor]

Vyhodnocení převýšení			Vyhodnocení délky		
m_h [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]	m_{sv} [mm]	Max. [mm]	Min. [mm]
0,79	2,4	0,0	1,96	4,0	0,4

7.2.3 POROVNÁNÍ SOUŘADNIC MEZI JEDNOTLIVÝMI SKENY

Posledním vyhodnocením měření laserovou metodou bylo porovnání souřadnic jednotlivých skenů. Opět byly skeny nahrány do programu Trimble RealWorks, kde byly měřické koule georeferencovány na body dle Tab. 34. Výsledkem bylo porovnání souřadnic středů jednotlivých měřických koulí. Porovnávány byly opět ze tří stanovisek 9001, 9002 a 9003. V Tab. 44 je zobrazeno porovnání středů měřických koulí z dat získaných laserovým skenováním ze stanoviska 9001 a 9002. Přesnost určení jednotlivých souřadnic X , Y , a Z z dvojího nezávislého měření je dána střední chybou ze vztahu (14). Ze vztahu (15) je pak dána střední souřadnicová chyba. Vyhodnocení středních chyb je zřejmé z Tab. 45. Obdobně byly porovnány souřadnice a vypočtená přesnost určení jednotlivých souřadnic z dvojího nezávislého měření mezi stanoviskem 9001–9003 a 9002–9003. Tyto hodnoty jsou zřejmé z Tab. 46, Tab. 47, Tab. 48 a Tab. 49.

$$m_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Y_i^2}{2n}}$$

$$m_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i^2}{2n}} \quad (14)$$

$$m_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^2}{2n}}$$

$$m_{X,Y} = \sqrt{m_Y^2 + m_X^2} \quad (15)$$

Tab. 44: Vyhodnocení rozdílu souřadnic středů měřických koulí ze st. 9001 a 9002 [autor]

Č.B.	ST. 9001 (Centrické)			ST. 9002 (Excentrické)			Rozdíl souřadnic z dvojího měření		
	Y [m]	X [m]	Z [m]	Y [m]	X [m]	Z [m]	Δ_Y [mm]	Δ_X [mm]	Δ_Z [mm]
1	500,0009	1023,1668	100,0574	500,0010	1023,1676	100,0570	-0,1	-0,8	0,4
2	502,7807	1022,8171	98,7852	502,7802	1022,8178	98,7840	0,5	-0,7	1,2
3	498,6969	1003,6003	100,0405	498,6960	1003,5997	100,0412	0,9	0,6	-0,7
4	501,4403	1003,2929	98,7779	501,4396	1003,2921	98,7771	0,7	0,8	0,8
5	498,3190	995,7360	99,9971	498,3197	995,7368	99,9977	-0,7	-0,8	-0,6
6	500,9100	995,7411	98,7787	500,9094	995,7401	98,7795	0,6	1,0	-0,8
7	496,9676	976,5509	99,9641	496,9682	976,5517	99,9627	-0,6	-0,8	1,4
8	499,3012	976,7022	98,8250	499,3020	976,7017	98,8260	-0,8	0,5	-1,0

Tab. 45: Vyhodnocení přesnosti rozdílu souřadnic ze st. 9001 a 9002 [autor]

m_Y [mm]=	0,46
m_X [mm]=	0,54
$m_{X,Y}$ [mm]=	0,71
m_Z [mm]=	0,65

Tab. 46: Vyhodnocení rozdílu souřadnic středů měřických koulí ze st. 9001 a 9003 [autor]

Č.B.	ST. 9001 (Centrické)			ST. 9003 (Excentrické)			Rozdíl souřadnic z dvojího měření		
	Y [m]	X [m]	Z [m]	Y [m]	X [m]	Z [m]	Δ_y [mm]	Δ_x [mm]	Δ_z [mm]
1	500,0009	1023,1668	100,0574	500,0002	1023,1665	100,0579	0,7	0,3	-0,5
3	498,6969	1003,6003	100,0405	498,6964	1003,6011	100,0402	0,5	-0,8	0,3
5	498,3190	995,7360	99,9971	498,3187	995,7358	99,9967	0,3	0,2	0,4
6	500,9100	995,7411	98,7787	500,9111	995,7401	98,7788	-1,1	1,0	-0,1
7	496,9676	976,5509	99,9641	496,9670	976,5519	99,9630	0,6	-1,0	1,1
8	499,3012	976,7022	98,8250	499,3009	976,7010	98,8247	0,3	1,2	0,3

Tab. 47: Vyhodnocení přesnosti rozdílu souřadnic ze st. 9001 a 9003 [autor]

m_y [mm]=	0,46
m_x [mm]=	0,59
$m_{x,y}$ [mm]=	0,75
m_z [mm]=	0,39

Tab. 48: Vyhodnocení rozdílu souřadnic středů měřických koulí ze st. 9002 a 9003 [autor]

Č.B.	ST. 9002 (Excentrické)			ST. 9003 (Excentrické)			Rozdíl souřadnic z dvojího měření		
	Y [m]	X [m]	Z [m]	Y [m]	X [m]	Z [m]	Δ_y [mm]	Δ_x [mm]	Δ_z [mm]
1	500,0010	1023,1676	100,0570	500,0002	1023,1665	100,0579	0,8	1,1	-0,9
3	498,6960	1003,5997	100,0412	498,6964	1003,6011	100,0402	-0,4	-1,4	1,0
5	498,3197	995,7368	99,9977	498,3187	995,7358	99,9967	1,0	1,0	1,0
6	500,9094	995,7401	98,7795	500,9111	995,7401	98,7788	-1,7	0,0	0,7
7	496,9682	976,5517	99,9627	496,9670	976,5519	99,9630	1,2	-0,2	-0,3
8	499,3020	976,7017	98,8260	499,3009	976,7010	98,8247	1,1	0,7	1,3

Tab. 49: Vyhodnocení přesnosti rozdílu souřadnic ze st. 9002 a 9003 [autor]

m_y [mm]=	0,78
m_x [mm]=	0,63
$m_{x,y}$ [mm]=	1,00
m_z [mm]=	0,65

7.2.4 VYHODNOCENÍ ORIENTACE LASEROVÉHO SKENERU

Pro vyhodnocení orientace byl vždy před měřením v menu skeneru inicializován kompas, který nastavuje orientaci skeneru k magnetickému severu. Jakmile skener dokončí rotaci a určí svou orientaci, zobrazí se kompas na obrazovce skeneru, který je orientován tak jako by byl namontován na vrchní straně skeneru. Orientace odkazuje na směr, ke kterému aktuálně směřuje levá strana skeneru (levá strana, pokud stojíte před displejem skeneru) [25]. Na Obr. 42 je zobrazen kompas v menu skeneru. Cílem byla inicializace kompasu na každém stanovišti skeneru a porovnání směrníku ρ bodů 1–7, 7–6 a 1–3 z každého stanoviště. Výsledné hodnoty směrníku mezi body z každého stanoviště jsou zobrazeny v Tab. 50. V Tab. 51 jsou vyhodnoceny rozdíly jednotlivých směrníků mezi skeny, výsledný průměr rozdílů a vypočtená střední chyba rozdílů mezi jednotlivými skeny dle vztahu (8).

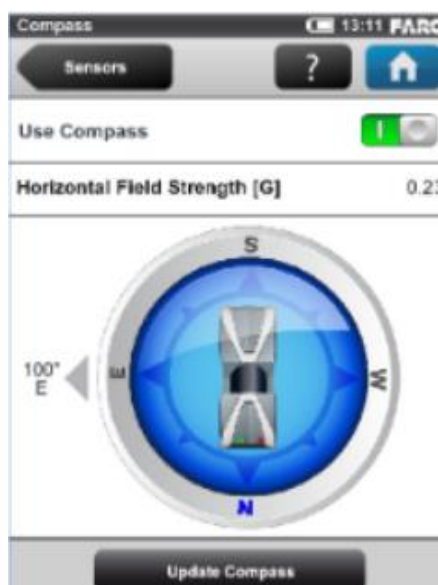
Tab. 50: Vyhodnocení směrníku po inicializaci kompasu skeneru [autor]

Mezi body	Ze stanovišta	ρ [g]
1-7	9001	55,1104
1-7	9002	51,5125
1-7	9003	53,7490
7-6	9001	63,8702
7-6	9002	60,2687
7-6	9003	62,5311
1-3	9001	55,2091
1-3	9002	51,6143
1-3	9003	53,8509

Tab. 51: Vyhodnocení rozdílů směrníků z jednotlivých stanovišek skeneru [autor]

ρ	Mezi body	Rozdíl [g]
1-7	9001-9002	3,5979
1-7	9001-9003	1,3614
1-7	9002-9003	2,2365
7-6	9001-9002	3,6015
7-6	9001-9003	1,3391
7-6	9002-9003	2,2624
1-3	9001-9002	3,5948
1-3	9001-9003	1,3582
1-3	9002-9003	2,2366
	Průměr [g]=	2,3987
	m_p [g]=	0,9790

Elektronický kompas slouží k orientaci skeneru na zemském povrchu, což je vhodná informace pro registrování skeneru ve zvoleném zpracovatelském programu. Přesnost orientace vyjádřená střední chybou rozdílů jednotlivých skenů je $m_p = 0,9790^g$. Lze tedy konstatovat, že z porovnání hodnot na každém stanovišti vyplývá, že skener určuje poměrně stejně hodnotu magnetického severu. K orientační informaci je dostačující, protože sken je i tak následně georeferencován do vhodného souřadnicového systému.



Obr. 42: Ukázka kompasu v menu laserového skeneru Faro [25]

8 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT BAZÉNOVÉ HALY METODOU LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

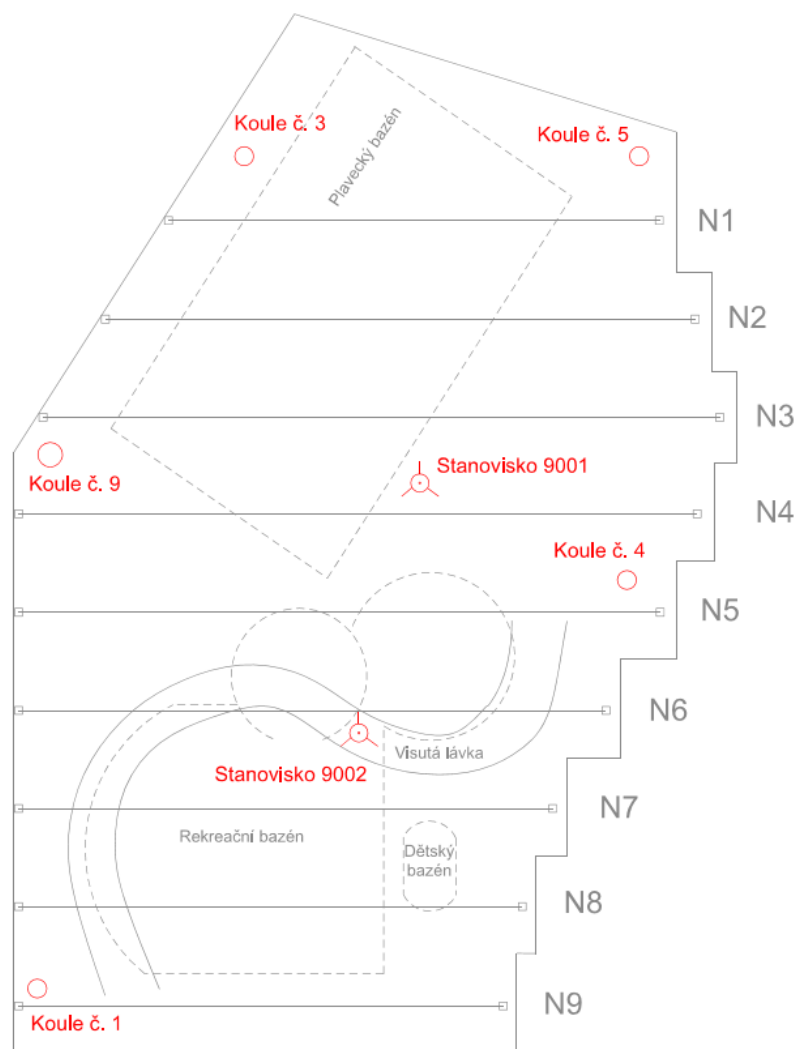
Zpracování mračna bodů z laserového skenování bazénové haly aquaparku s využitím přístroje Faro probíhal v software Trimble RealWorks. Trimble RealWorks je nabízen jako alternativní řešení ke skenerům Faro. Standardně je nabízen software Scene, který je vyvíjen společně se skenery Faro. Software Trimble RealWorks poskytuje uživatelům funkce jako registrace, vizualizace, georeferencování, prozkoumávání a zpracovávání mračna bodů. Poskytuje výkonný software s využitelnými nástroji pro geodety, které naleznou využití v soudním, stavebním a památkovém odvětví.

Mezi možnosti zpracování patří například:

- vytváří drátový model
- porovnávání projektu se skutečným stavem
- vytváření vrstevnic, profilů a výpočet kubatur
- modelování objektů
- zpracování fasád budov
- zpracování a analýza početného množství dat
- vytváření různých vizualizací objektu
- export dat do různých formátů a do CAD prostředí [28]

Začátkem práce je import dat přes nabídku Import – Open FLS files. Program načte data a následně vyobrazí panoramatické fotografie. Poté je prostřednictvím Create Sampled Scans potřebné přemístit data do vnitřního formátu software. Po převedení dat je možné s mračnem pracovat. S mračnem je možno pracovat ve dvou fázích, a to Registration nebo OfficeSurvey. Řešení Registration se využívá při spojování mračen a georeferencování. Řešení OfficeSurvey se využívá při další práci. Mračno může být obarvené dle reality a barvu lze měnit v případě jiných požadavků. Mračno je možné následně spojovat, ořezávat a analyzovat data. Při měření bazénové haly aquaparku bylo skenování laserovou metodou využito na dvou stanoviskách. Z každého stanoviska bylo exportováno jedno mračno bodů. Mračna byla následně spojena v Trimble Realworks automatickým spojováním na plochy (Auto-Register using planes). Tento postup zabezpečil bezproblémové spojení skenů na základě společných ploch. Při zpracování nebyl důvod k manuálnímu navázání, jelikož spojení proběhlo s kvalitním výsledkem. Střední chyba propojení jednotlivých skenů měla hodnotu 1,0 mm.

Spojená mračna bodů byla následně georeferencována do jednotné souřadnicové soustavy. V našem případě na identické body, kterými byly měřické koule rozložené rovnoměrně po celém objektu bazénové haly. Pro georeferencování bylo vybráno 5 bodů dle rozložení zobrazeného na Obr. 43.



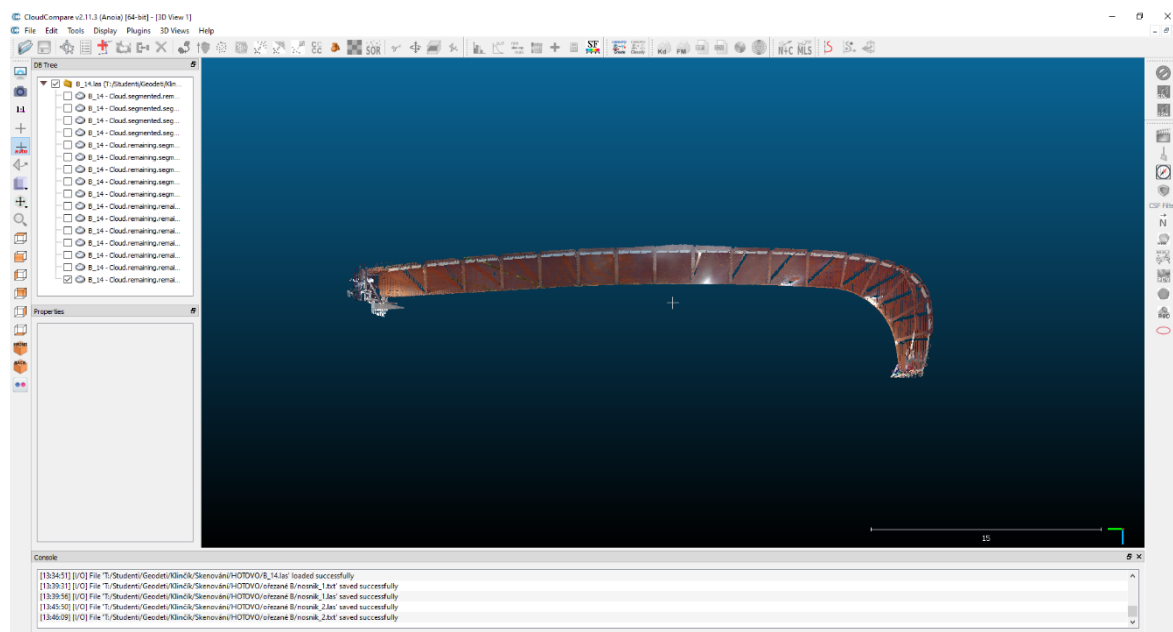
Obr. 43: Ukázka rozložení měřických koulí a stanovišek [autor]

Výsledná přesnost georeferencování vyjádřená pomocí střední souřadnicové chyby na jednotlivých koulích je zobrazena v Tab. 49.

Tab. 52: Přesnost georeferencování mračna bodů [autor]

Georeferencovaný bod	Střední chyba georeferencování [mm]
Koule č. 5	2,1
Koule č. 3	1,6
Koule č. 9	2,3
Koule č. 4	1,4
Koule č. 1	3,1

Po georeferencování bylo možno mračno dále zpracovávat a vyhodnocovat na pozorovaných nosnících N1, N2, N3 a N9 označených na Obr. 43. Mračno bodů bylo nahráno do software CloudCompare. Jedná se o software, ve kterém jde jednoduše a přehledně zpracovávat velký objem dat. V software byly jednotlivě ořezána mračna bodů na všech nosnících, která byla následně exportována do souboru s příponou *.pts v souřadnicích X, Y, Z. Ořezaný nosník č. 1 v zpracovatelském software CloudCompare je zobrazen na Obr. 44.



Obr. 44: Ukázka ořezaného nosníku č. 1 v software CloudCompare [autor]

8.1 FILTROVÁNÍ DAT

Exportovaná data v souřadnicích X, Y, Z místního souřadnicového systému pro každé ořezané mračno bodů ze software CloudCompare byla nahrána do tabulkového procesoru Microsoft Excel. Pro analýzu rozdílu metod laserového skenování a terestrického měření bylo nutné vyfiltrovat z mračna bodů plošky nad kterými bude analýza probíhat. Jednotlivé plošky byly definovány čtvercem 0,1 m x 0,1 m.

Pomocí databázových funkcí v programu Microsoft Excel byly vypočteny střední hodnoty jednotlivých plošek pro souřadnici X ve svislé rovině a střední hodnoty jednotlivých plošek pro souřadnici Z ve vodorovné rovině. Pro každou plošku byla definovaná tabulka, ve které byly stanoveny podmínky pro vymezení rozsahu jednotlivých souřadnic. Pomocí databázové funkce byla z jednotlivých tabulek vytažena vhodná data, která splňovala určené podmínky.

Funkce je zobrazena ve vztahu (16), která je označena jako $DPRŮMĚR$ a vypočte průměrnou hodnotu ze zadaných kritérií v programu Microsoft Excel. Následně byly zadané stejná kritéria v programovacím jazyku Python, ze kterého byly vytaženy souřadnice odpovídající kritériím. Ukázka zadaných kritérií pro plošku definující souřadnici X je zobrazena v Tab. 53. Na stejných ploškách proběhl také výpočet středních chyb. Výsledné souřadnice a střední chyby byly nakonec porovnány s vyhodnocením terestrického měření.

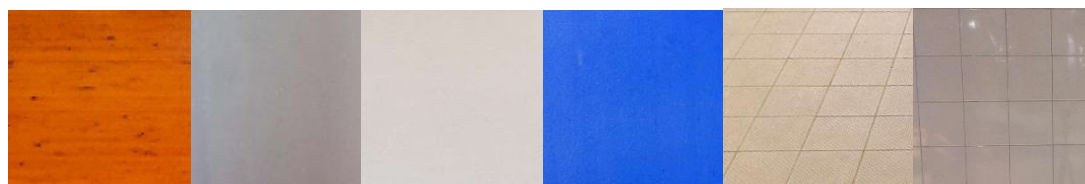
$$=DPRŮMĚR (databáze; pole; kritéria) \quad (16)$$

Tab. 53: Zadaní kritéria pro databázovou funkci souřadnice X [autor]

Y_{min}	Y_{max}	X_{min}	X_{max}	Z_{min}	Z_{max}
>530,30	<530,40			>105,30	<105,40

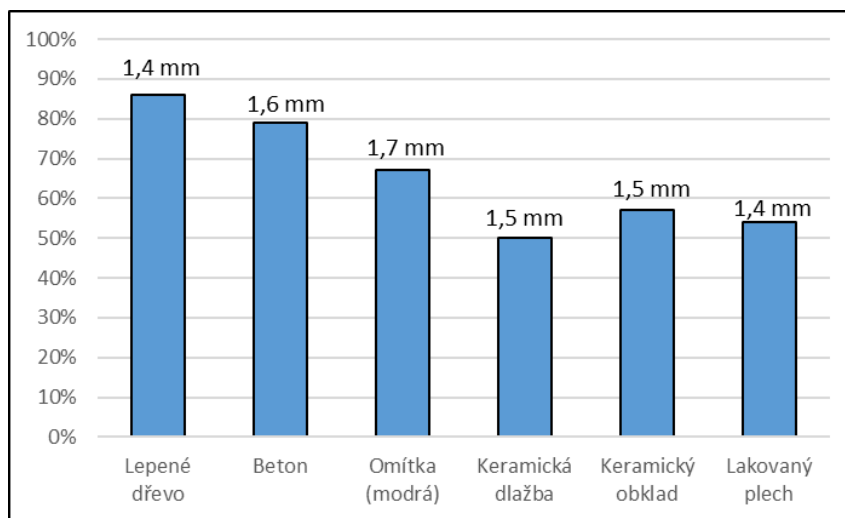
8.2 ANALÝZA PŘESNOSTI LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ V ZÁVISLOSTI NA ZPĚTNOU ODRAZIVOST MATERIÁLU

Cílem analýzy přesnosti laserového skenování v závislosti na zpětné odrazivosti materiálu bylo zjistit vliv materiálu na výslednou přesnost a dále procentuální vyhodnocení odrazivosti jednotlivých druhů materiálu. Laserový skener Faro určuje reflektivitu skenovaného povrchu na základě měření intenzity odraženého laserového paprsku. Platí, že světlý povrch má daleko větší odrazivost emitovaného světla než tmavý povrch. Na základě hodnoty odraženého světla skener přiřazuje každému bodu odpovídající hodnotu šedé barvy. [25] Mračno bodů bylo nahráno do softwaru Scene, kde byly následně exportována surová data X , Y , Z s hodnotou odrazivosti. Výstup dat ze skeneru Faro a exportu ze software Scene je realizován stupnicí hodnot, kdy hodnota 0 znamená 0% odrazivost a hodnota 2047 udává 100% odrazivost. Testovanými materiály v bazénové hale aquaparku byly lepené dřevo, lakovaný plech, beton, modrá omítka, keramická dlažba a keramický obklad. Materiály jsou zobrazeny na Obr. 45 v posloupnosti, v jaké byly v předchozí větě vyjmenovány.



Obr. 45: Ukázka testovaných materiálů [autor]

Pro analýzu přesnosti byl použitý stejný princip plošek a jejich středních chyb (m), jako při výpočtu přesnosti laserového skenování, který je popsán v kapitole 8.1. Plošky byly vybrány přibližně ve stejné vzdálenosti. Vyhodnocení analýzy přesnosti v závislosti na zpětné odrazivosti materiálu je zobrazeno na Obr. 46 a v Tab. 54.



Obr. 46: Znárodnění procentuální hodnoty odrazivosti a analýza zpětné odrazivosti materiálu na přesnost [autor]

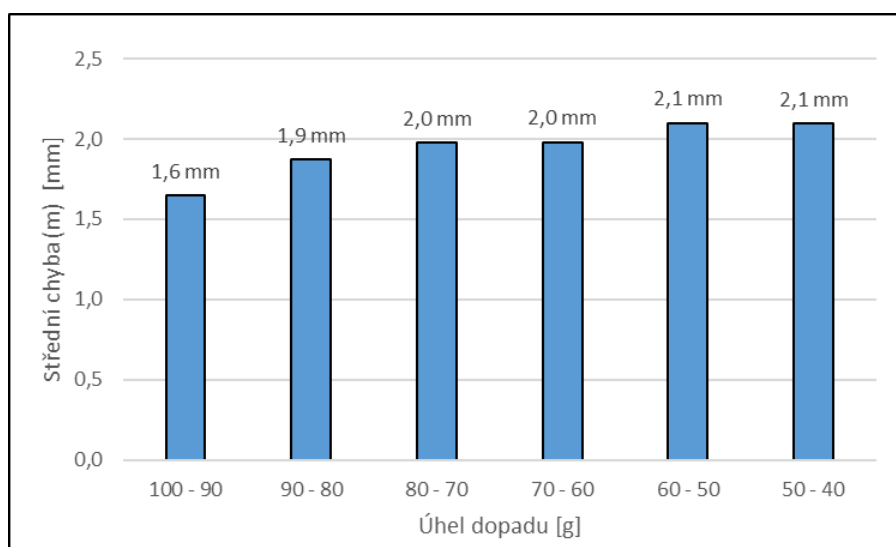
Tab. 54: Analýza přesnosti v závislosti na zpětnou odrazivost materiálu [autor]

Materiál	m [mm]	Odrazivost (Faro)	Odrazivost [%]
Lepené dřevo	1,4	1764	86%
Beton	1,6	1615	79%
Omítka (modrá)	1,7	1377	67%
Keramická dlažba	1,5	1021	50%
Keramický obklad	1,5	1158	57%
Lakovaný plech	1,4	1111	54%

Z Tab. 54 a Obr. 46 je zřejmé, že rozdíly středních chyb na jednotlivých materiálech nejsou příliš velké, ale faktem je, že hodnota zpětné odrazivosti má souvislost s hodnotou střední chyby. V procentuálním vyhodnocení dle reflektivity udávané výrobcem má nejlepší výsledky lepené dřevo, naopak nejhorší výsledky dosahuje keramická dlažba.

8.3 ANALÝZA PŘESNOSTI LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ V ZÁVISLOSTI NA ÚHLU DOPADU PAPRSKU SKENERU

Cílem analýzy přesnosti laserového skenování v závislosti na úhlu dopadu laserového paprsku skeneru bylo z naskenovaných dat zjistit, jestli se se snižujícím úhlem dopadu paprsku mění i přesnost. Pro analýzu přesnosti byl použitý stejný princip plošek a jejich středních chyb (m), jako při výpočtu přesnosti laserového skenování uvedeném v kapitole 8.1. Analýza byla prováděna na sledovaném dřevěném nosníku, aby odrazivost materiálu nebo délka záměr neovlivňovala přesnost analýzy. Výsledek analýzy je zobrazen na Obr. 47 a v Tab. 55.



Obr. 47: Analýza vlivu úhlu dopadu na přesnost [autor]

Tab. 55: Analýza vlivu úhlu dopadu na přesnost [autor]

Úhel dopadu [g]	m [mm]
100 - 90	1,6
90 - 80	1,9
80 - 70	2,0
70 - 60	2,0
60 - 50	2,1
50 - 40	2,1

Z Obr. 47 a Tab. 55 je patrné, že úhel dopadu paprsku má vliv na přesnost. Z údajů vyplývá, že čím více se úhel dopadu paprsku blíží k 100 gradům, tím lepší přesnost dosahuje. Ve většině případů nestojí skener přímo namířen na skenovanou plošku, proto je důležité správně vyhodnotit informaci o analýze přesnosti úhlu dopadu laserového paprsku.

9 VYHODNOCENÍ POSUNŮ A PŘETVOŘENÍ

Hodnoty posunů a přetvoření, resp. vyhodnocení změny prostorové polohy jednotlivých bodů, se provádí porovnáním výsledných vyrovnaných souřadnic v jednotlivých etapách. Výsledky jsou prezentovány graficky a číselně. Vyhodnocení číselných výsledků se uvádí ve formě přehledných tabulek, kde jsou porovnávány jednotlivé etapy v časovém sledu měření. Hodnoty zjištěné porovnáním etap není možné automaticky prohlásit za posuny. Při rozhodování, jestli posun nastal nebo je malá hodnota posunu způsobená vlivem měřických chyb bývá využíváno statistické testování. [1]

Hodnota posunů je dána rozdílem jednotlivých výsledných souřadnic v i -té etapě a j -té etapě. Vyhodnocení vyplývá ze vztahu číslo (17).

$$\begin{aligned}\Delta x_{i,j} &= x_j - x_i \\ \Delta y_{i,j} &= y_j - y_i \\ \Delta z_{i,j} &= z_j - z_i\end{aligned}\tag{17}$$

Statistické testování se provádí na principu známých hodnot středních chyb výsledných souřadnic jednotlivých etap. Vypočítá se úplná střední chyba ze vztahu (18) určená jako odmocnina součtu kvadrátů středních chyb v jednotlivých porovnávaných etapách. Pro daný výpočet jsou využity střední chyby výsledných souřadnic v i -té etapě a v j -té etapě. Samotné statistické testování se provádí pomocí vztahů (19), (20) a (21).

$$m_{\Delta x_{i,j}} = \sqrt{m_{x_j}^2 + m_{x_i}^2}\tag{18}$$

$$|\Delta x_{i,j}| < m_{\Delta x_{i,j}} \quad \text{posun nenastal}\tag{19}$$

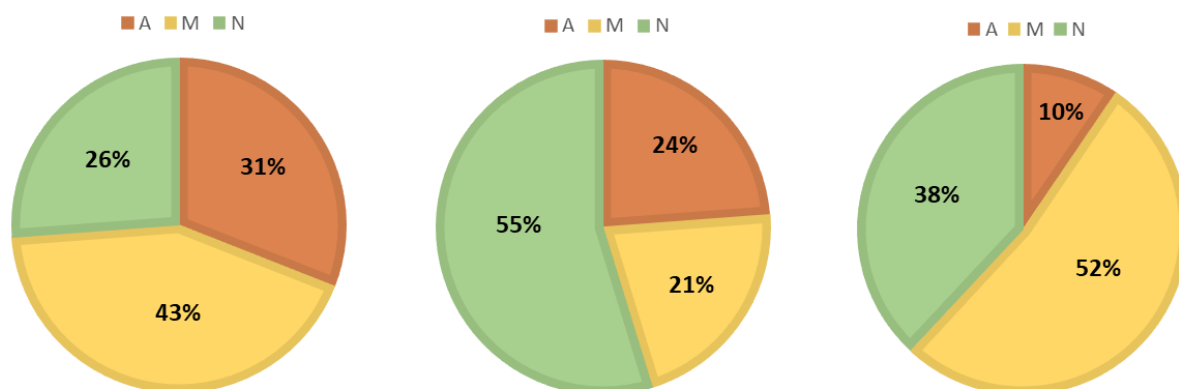
$$m_{\Delta x_{i,j}} \leq |\Delta x_{i,j}| \leq t * m_{\Delta x_{i,j}} \quad \text{posun mohl nastat, ale nebyl prokázán}\tag{20}$$

$$t * m_{\Delta x_{i,j}} < |\Delta x_{i,j}| \quad \text{posun nastal a byl prokázán na hladině významnosti } \alpha\tag{21}$$

Při statistickém testování se volí koeficient spolehlivosti $t = 2$. Koeficientu odpovídá hladina významnosti $\alpha = 5\%$. Jestli je teda absolutní hodnota posunu větší než dvojnásobek úplné střední chyby, je možné na zvolené hladině významnosti s rizikem 5% prohlásit, že posun nastal. Statistické testování posunů v souřadnici Y a Z se provádí stejným způsobem.

9.1 VYHODNOCENÍ ROZDÍLŮ ETAP MĚŘENÝCH POLÁRNÍ METODOU

Pro vyhodnocení rozdílů etap měřených polární metodou byly využity jednotlivé souřadnice a jejich střední chyby vypočtené pomocí vyrovnání MNČ ve software G-NET, které bylo blíže popsáno v kapitole č. 6.2. Vyhodnocení bylo provedeno pomocí určených vztahů z kapitoly č. 9. Porovnávána byla aktuální 7. etapa s předchozí 6. etapou. Aktuální 7. etapa byla měřena 11 měsíců po předchozí etapě. Výsledky vyhodnocení jsou uvedeny v Tab. 56 a Tab. 57. Výsledkem vyhodnocení je průkaznost změny mezi etapami v jednotlivých souřadnicích, kde *A* znamená, že přetvoření nastalo, *M* znamená, že přetvoření možná nastalo a *N* znamená, že přetvoření nenastalo. Statistickým testováním pomocí kruhových grafů s procentuálním vyhodnocením bylo prokazováno, jestli přetvoření na jednotlivých měřených bodech nastalo. Grafy jsou zobrazeny na Obr. 48 a to zleva pro souřadnici *Y*, střední graf pro souřadnici *X* a zprava pro souřadnici *Z*.



Obr. 48: Vyhodnocení posunů na jednotlivých bodech (zleva pro osu *Y*, *X*, *Z*) [autor]

ČSN 73 0405 říká, že posun je vztah vztažné a objektové soustavy, kdežto přetvoření je vztah mezi body objektové soustavy. [4] V bazénové hale aquaparku nebylo možné pro měření využít vztažnou soustavu, která by se nacházela mimo deformační zónu objektu. Ze zjištění vyplývá, že v rámci bazénové haly aquaparku nejsou vyhodnocovány posuny, ale přetvoření.

Z vyhodnocení měření polární metodou byla zjištěna maximální hodnota průhybu 3,40 mm na nosníku č. 9, maximální hodnota změny rozpětí 1,90 mm na nosníku č. 3 a maximální hodnota v příčném směru byla 3,30 mm na nosníku č. 9.

Nakonec byly také vyhodnoceny svislé náklony nosníků, kde pro určení náklonu byly použity dvojice bodů umístěných nad sebou. Hodnoty svislých náklonů byly přepočteny na délku 1 metr z důvodu nestejných výšek nosníků v jednotlivých částech pozorovaných bodů. Vyhodnocení svislých náklonů je uvedeno v Tab. č. 58.

Důležitou součástí vyhodnocení přetvoření je také jejich grafické zpracování. Zvolené způsoby zpracování musí co nejlépe zachytávat a přehledně zobrazovat všechny mechaniky posunů jednotlivých nosníků dané konstrukce. První částí grafického znázornění je zobrazení jednotlivých nosníků v pohledu řezu, kde je zobrazena mechanika pohybu nosníku mezi jednotlivými etapami v podélném a výškovém směru. V řezech jsou dále zobrazeny svislé náklony. Druhou částí grafického znázornění je půdorys bazénové haly, kde jsou zobrazeny vektory příčného a podélného směru mezi 6. etapou a 7. etapou. Poslední částí grafického znázornění je hypsometrie příčných a výškových rozdílů mezi etapami č. 6 a č. 7.

Tab. 57: Vyhodnocení rozdílů 6. etap a 7. etapů měřených polární metodou [autor]

Číslo bodu	6. etapa										7. etapa										Rozdíl dvou etap			Střední chyba rozdílů dvou etap			Mezní chyba rozdílů dvou etap ($t=2 \alpha=5\%$)			Průkaznost změny		
	Datum:		Čas:		Teplota:		Datum:		Čas:		Teplota:		Z	m _y	m _x	m _z	Δ _y	Δ _x	Δ _z	m _{Δy}	m _{Δx}	m _{Δz}	δ _{Δy}	δ _{Δx}	δ _{Δz}	Test δ _{Δy}	Test δ _{Δx}	Test δ _{Δz}	α=5%	α=5%	α=5%	
	04. - 05. 03. 2020	23:10 - 03:10	04. - 05. 03. 2020	23:10 - 03:10	29,4°C	29,7°C	26. - 27. 01. 2021	22:00 - 03:15	29,7°C	29,7°C	29,7°C	29,7°C																				Y
310	531,3018	1009,9931	103,7981	0,50	0,45	0,19	531,3027	1009,9926	103,7976	0,77	0,76	0,15	0,90	-0,50	0,92	0,88	0,24	1,84	1,77	0,48	N	N	A	N	N	A	N	N	A	N	N	A
311	531,3830	1010,0892	104,0797	0,94	0,92	0,25	531,3834	1010,0895	104,0795	0,78	0,76	0,16	0,40	0,30	1,22	1,19	0,30	2,44	2,39	0,59	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
312	531,3814	1010,0408	105,3224	0,94	0,92	0,35	531,3825	1010,0409	105,3219	0,78	0,76	0,23	1,10	0,10	1,22	1,19	0,42	2,44	2,39	0,84	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
313	516,3306	1010,0874	105,2645	0,44	1,23	0,44	516,3315	1010,0878	105,2637	0,28	1,02	0,29	0,90	0,40	0,52	1,60	0,53	1,04	3,20	1,05	M	N	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
314	516,5774	1010,0403	107,0498	0,57	1,23	0,71	516,5786	1010,0407	107,0482	0,27	1,02	0,46	1,20	0,40	0,63	1,60	0,85	1,26	3,20	1,69	M	N	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
315	502,3446	1010,1289	105,4767	0,27	0,23	0,29	502,3463	1010,1311	105,4769	0,22	0,19	0,19	1,70	2,20	0,35	0,30	0,35	0,70	0,60	0,69	A	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A
316	502,2844	1010,1261	107,2417	0,63	1,18	0,68	502,2858	1010,1274	107,2408	0,44	0,98	0,46	1,40	1,30	0,77	1,53	0,82	1,54	3,07	1,64	M	N	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
317	501,9940	1010,1287	105,4703	0,27	0,24	0,29	501,9951	1010,1302	105,4705	0,22	0,20	0,19	1,10	1,50	0,35	0,31	0,35	0,70	0,62	0,69	A	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A
318	501,9242	1010,1203	107,2250	0,26	0,24	0,41	501,9261	1010,1222	107,2242	0,22	0,20	0,27	1,90	1,90	0,34	0,31	0,49	0,68	0,62	0,98	A	A	M	A	M	A	M	A	M	A	M	A
321	496,9250	1009,9920	99,9955	0,28	0,29	0,22	496,9263	1009,9939	99,9957	0,23	0,24	0,13	1,30	1,90	0,36	0,38	0,26	0,72	0,75	0,51	A	A	N	A	N	A	N	A	N	A	N	A
910	532,5463	1039,8860	105,7663	0,79	0,47	0,23	532,5474	1039,8860	105,7658	0,66	0,38	0,15	1,10	0,00	1,03	0,60	0,27	2,06	1,21	0,55	M	N	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
911	532,6276	1039,7928	106,0472	0,87	0,71	0,28	532,6291	1039,7916	106,0466	0,72	0,59	0,19	1,50	-1,20	1,13	0,92	0,34	2,26	1,85	0,68	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
911X	531,7304	1039,7922	106,0383	1,03	1,05	0,59	531,7320	1039,7889	106,0372	0,71	0,59	0,19	1,60	-3,30	1,25	1,20	0,62	2,50	2,41	1,24	M	A	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
912	532,5663	1039,8171	107,0513	0,87	0,71	0,53	532,5679	1039,8156	107,0504	0,72	0,59	0,22	1,60	-1,50	1,13	0,92	0,57	2,26	1,85	1,15	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
913	521,2221	1039,7748	106,3734	0,74	0,73	0,42	521,2229	1039,7732	106,3723	0,62	0,61	0,23	0,80	-1,60	0,97	0,95	0,59	1,93	1,90	1,17	N	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
914	521,1321	1039,7960	107,6507	0,74	0,73	0,42	521,1337	1039,7949	107,6497	0,62	0,60	0,28	1,60	-1,10	0,97	0,94	0,50	1,93	1,89	1,01	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
915	513,5667	1039,7809	106,3036	0,72	0,34	0,51	513,5677	1039,7806	106,3026	0,60	0,29	0,20	1,00	-0,30	0,94	0,45	0,55	1,87	0,89	1,10	M	N	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
916	513,5499	1039,7760	107,6027	0,73	0,40	0,47	513,5510	1039,7756	107,5993	0,61	0,33	0,31	1,10	-0,40	0,95	0,52	0,56	1,90	1,04	1,13	M	N	A	M	N	A	M	N	A	M	N	A
917	513,2288	1039,7837	106,2900	0,73	0,35	0,31	513,2305	1039,7822	106,2884	0,60	0,29	0,20	1,70	-1,50	0,94	0,45	0,37	1,89	0,91	0,74	M	A	A	M	A	M	A	M	A	M	A	
918	513,1916	1039,7703	107,5836	0,72	0,35	0,48	513,1929	1039,7701	107,5826	0,60	0,29	0,25	1,30	-0,20	0,94	0,45	0,54	1,87	0,91	1,08	M	N	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M
919	508,2579	1039,8293	100,3189	0,94	1,09	0,31	508,2591	1039,8289	100,3193	0,78	0,90	0,21	1,20	-0,40	1,22	1,41	0,37	2,44	2,83	0,75	N	N	M	N	N	N	N	N	N	N	N	N
920	507,6000	1039,8335	100,3212	0,96	1,07	0,31	507,6007	1039,8333	100,3213	0,79	0,89	0,21	0,70	-0,20	1,24	1,39	0,37	2,49	2,78	0,75	N	N	M	N	N	N	N	N	N	N	N	N
921	507,9276	1039,8934	100,0136	0,76	0,37	0,25	507,9291	1039,8929	100,0140	0,63	0,31	0,16	1,50	-0,50	0,99	0,48	0,30	1,97	0,97	0,59	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M

Tab. 58: Vyhodnocení svislých náklonů nosníků měřených polární metodou [autor]

Číslo bodu	6. etapa		7. etapa		Rozdíl dvou etap		Náklon		
	Datum: 04. - 05. 03. 2020	Teplota: 29,4°C	Datum: 26. - 27. 01. 2021	Teplota: 29,7°C					
	X	Z	X	Z	Δ_x	Δ_z	α	$\Delta_x/1\text{ m}$	
	[m]	[m]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[° ' "]	[mm]	
NOSNÍK Č. 1	111	1000,0937	103,9376	1000,0934	103,9375	-0,60	1,25	-0° 01' 50"	-0,48
	112	1000,0661	105,1833	1000,0664	105,1833				
	113	1000,0989	104,0286	1000,0990	104,0285	-0,10	1,84	-0° 00' 11"	-0,05
	114	1000,0676	105,8719	1000,0678	105,8718				
	117	1000,1087	103,9512	1000,1104	103,9515	1,00	1,71	0° 02' 13"	0,58
	118	1000,1155	105,6647	1000,1162	105,6647				
NOSNÍK Č. 2	211	1005,0945	103,9126	1005,0943	103,9123	0,00	1,28	0° 00' 00"	0,00
	212	1005,0636	105,1918	1005,0634	105,1913				
	213	1005,0942	104,4681	1005,0948	104,4679	0,70	1,79	0° 01' 29"	0,39
	214	1005,0659	106,2582	1005,0658	106,2576				
	215	1005,1195	104,5934	1005,1204	104,5940	1,00	1,73	0° 02' 13"	0,58
	216	1005,1191	106,3244	1005,1190	106,3244				
	217	1005,1176	104,5809	1005,1189	104,5812	0,10	1,73	0° 00' 14"	0,06
	218	1005,1123	106,3064	1005,1135	106,3062				
NOSNÍK Č. 3	311	1010,0892	104,0797	1010,0895	104,0795	0,20	1,24	0° 00' 37"	0,16
	312	1010,0408	105,3224	1010,0409	105,3219				
	313	1010,0874	105,2645	1010,0878	105,2637	0,00	1,78	0° 00' 00"	0,00
	314	1010,0403	107,0498	1010,0407	107,0482				
	315	1010,1289	105,4767	1010,1311	105,4769	0,90	1,76	0° 01' 57"	0,51
	316	1010,1261	107,2417	1010,1274	107,2408				
	317	1010,1287	105,4703	1010,1302	105,4705	-0,40	1,75	-0° 00' 53"	-0,23
	318	1010,1203	107,2250	1010,1222	107,2242				
NOSNÍK Č. 9	911	1039,7928	106,0472	1039,7916	106,0466	0,30	1,00	0° 01' 09"	0,30
	912	1039,8171	107,0513	1039,8156	107,0504				
	913	1039,7748	106,3734	1039,7732	106,3723	-0,50	1,28	-0° 01' 29"	-0,39
	914	1039,7960	107,6507	1039,7949	107,6497				
	915	1039,7809	106,3036	1039,7806	106,3026	0,10	1,30	0° 00' 18"	0,08
	916	1039,7760	107,6027	1039,7756	107,5993				
	917	1039,7837	106,2900	1039,7822	106,2884	-1,30	1,29	-0° 03' 49"	-1,00
	918	1039,7703	107,5836	1039,7701	107,5826				

9.2 VYHODNOCENÍ ROZDÍLU MEZI POLÁRNÍ METODOU A METODOU LASEROVÉHO SKENOVÁNÍ

Vyhodnocení metodou laserového skenování probíhalo na základě předem definovaných plošek umístěných v blízkosti pozorovaných bodů. Metoda filtrace plošek je popsán v kapitole 8.1. Při použití polární metody bylo využito vyrovnání MNČ. Vyrovnání MNČ ale nelze provést u metody laserového skenování a vypočítat tím charakteristiky přesnosti. Proto byly pro statistické testování vypočteny střední chyby z rozptylu měřených bodů na jednotlivých definovaných ploškách.

Filtrací dat z měření metodou laserového skenování byly definovány plošky zvlášť pro vyhodnocení rozdílu v příčném směru, tedy v souřadnici X , a zvlášť pro vyhodnocení rozdílu ve svislém směru, a to v souřadnici Z . Plošky pro vyhodnocení rozdílu v souřadnici X byly definovány v blízkosti pozorovaných bodů ve svislé rovině jednotlivých nosníků. Plošky byly definované pouze v okolí těch pozorovaných bodů, které jsou osazené přímo na lepeném dřevě nosníku, jelikož body na spojích nosníku jsou umístěny na vyčnívajících šroubech. Plošky pro vyhodnocení rozdílu v souřadnici Z byly definovány v blízkosti pozorovaných bodů ve vodorovné rovině jednotlivých nosníků a vyhodnocené plošky odpovídají pozorovaným bodům nacházejícím se ve spodní části jednotlivých nosníků. Z konfigurace měření laserové skenování nebylo možné vyhodnotit rozdíl v podélném směru, tedy v souřadnici Y . Pro vyhodnocení v souřadnici Y by bylo nutné lepší postavení skeneru a skenování rozsáhlejších částí nosníků.

Jedním z cílů práce je porovnání metody laserového skenování s polární metodou a ověření vhodnosti použití metody laserového skenování k určování posunů a přetvoření. V předchozích kapitolách bylo zmíněno, že polární metoda byla vypočtena pomocí MNČ s fixací bodu 121 a směrem na bod 110. Vyhodnocení laserového skenování bylo fixováno na plošku 121, aby mohlo dojít k porovnání zmíněných metod měření bylo. Následně byly porovnávány rozdíly hodnot v příčném a svislém směru jednotlivých pozorovaných bodů od hodnoty fixovaného bodu 121. Výsledek v příčném směru v souřadnici X je zobrazen v Tab. 59 a výsledek ve svislém směru v souřadnici Z je zobrazen v Tab. 60.

Tab. 59: Vyhodnocení rozdílu polární metody a metody laserového skenování v příčném směru [autor]

	Číslo bodu	Datum: 26. - 27. 01. 2021		Teplota: 29,7°C		Rozdíl mezi metodami Δ_x [mm]	Mezní chyba rozdílu dvou metod ($t=2 \alpha=5\%$) $\delta_{\Delta x}$ [mm]	Průkaznost změny Test $\delta_{\Delta x}$ $\alpha=5\%$
		7. etapa - Polární metoda		7. etapa - Laserový skener				
		X	m_x	X	m_x			
		[m]	[mm]	[m]	[mm]			
N Č. 1	113	0,0990	0,4	0,0940	0,2	5,0	0,9	A
	114	0,0678	1,0	0,0647	0,4	3,1	2,2	A
NOSNÍK Č. 2	210	4,9987	0,2	4,9981	0,2	0,6	0,7	M
	212	5,0634	0,6	5,0614	0,2	2,0	1,3	A
	213	5,0948	0,2	5,0859	0,3	8,9	0,7	A
	214	5,0658	1,0	5,0617	0,2	4,1	2,0	A
	221	5,0017	0,2	5,0041	0,4	-2,4	0,9	A
NOSNÍK Č. 3	310	9,9926	0,8	9,9958	0,2	-3,2	1,6	A
	312	10,0409	0,8	10,0406	0,2	0,3	1,6	N
	313	10,0878	1,0	10,0818	0,7	6,0	2,4	A
	314	10,0407	1,0	10,0371	0,2	3,6	2,1	A
	321	9,9939	0,2	9,9995	0,1	-5,6	0,6	A
NOSNÍK Č. 9	910	39,8860	0,4	39,8874	1,5	-1,4	3,2	N
	912	39,8156	0,6	39,8238	0,1	-8,2	1,2	A
	913	39,7732	0,6	39,7803	1,3	-7,1	2,8	A
	914	39,7949	0,6	39,8000	0,3	-5,1	1,3	A
	919	39,8289	0,9	39,8346	0,2	-5,7	1,8	A
	920	39,8333	0,9	39,8397	0,1	-6,4	1,8	A
	921	39,8929	0,3	39,8974	0,1	-4,5	0,7	A

Tab. 60: Vyhodnocení rozdílu polární metody a metody laserového skenování ve svislém směru [autor]

Číslo bodu	Datum: 26. - 27. 01. 2021		Teplota: 29,7°C		Rozdíl mezi metodami Δ_z [mm]	Mezní chyba rozdílu dvou metod ($t=2 \alpha=5\%$) $\delta_{\Delta z}$ [mm]	Průkaznost změny Test $\delta_{\Delta z}$ $\alpha=5\%$	
	7. etapa - Polární metoda		7. etapa - Laserový skener					
	Z	m_z	Z	m_z				
	[m]	[mm]	[m]	[mm]				
NOSNÍK Č. 1	111	3,9375	0,1	3,9355	1,9	2,0	3,9	M
	113	4,0285	0,1	4,0268	1,7	1,7	3,4	M
	115	3,9579	0,1	3,9563	1,7	1,6	3,3	N
	117	3,9515	0,1	3,9526	1,9	-1,1	3,9	N
NOSNÍK Č. 2	211	3,9123	0,1	3,9124	1,1	-0,1	2,2	N
	213	4,4679	0,2	4,4619	0,9	6,0	1,8	A
	215	4,5940	0,2	4,5938	1,7	0,2	3,4	N
	217	4,5812	0,2	4,5792	1,6	2,0	3,2	M
	221	0,0030	0,1	0,0018	0,7	1,2	1,5	M
NOSNÍK Č. 3	311	4,0795	0,2	4,0730	2,0	6,5	4,1	A
	313	5,2637	0,3	5,2561	1,0	7,6	2,1	A
	315	5,4769	0,2	5,4695	2,9	7,4	5,7	A
	317	5,4705	0,2	5,4670	2,0	3,5	3,9	M
	321	-0,0043	0,1	-0,0087	0,9	4,4	1,7	A
NOSNÍK Č. 9	911	6,0466	0,2	6,0443	1,7	2,3	3,4	M
	913	6,3723	0,2	6,3719	1,6	0,4	3,2	N
	915	6,3026	0,2	6,3011	2,0	1,5	3,9	N
	917	6,2884	0,2	6,2815	1,5	6,9	3,0	A
	921	0,0140	0,2	0,0080	1,3	6,0	2,7	A

10 INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Výsledek analýzy vnitřní přesnosti měření polární metodou přístrojem Topcon GT – 1001 v etapě číslo 7 a v etapě číslo 6 určilo nesplnění úhlové přesnosti udávané výrobcem. Největší rozptyl měření byl zjištěn na bodech osazených přímo pod umělým osvětlením visícím ze střešní konstrukce aquaparku. Analýza přesnosti měření délek poukázala na fakt, že délky jsou měřeny s vyšší přesností, než udává výrobce.

Analýza měření rozměru měřických koulí probíhala pomocí vyhodnocení průměru koule z úhlového měření na okraje koule, z výpočtu průměru pomocí délkového měření na střed koule a z výpočtu průměru koule vypočtené z aproximace koule pomocí určených bodů na ploše koule. Měření probíhalo pomocí přístroje Topcon GT – 1001. V analýze byly porovnávány měřené průměry koulí s průměry udávanými výrobcem. Z analýzy bylo prokázáno, že žádná z koulí není deformovaná a všechny koule mohly být využity k vyhodnocení laserového skenování.

Analýzou měření laserového skeneru bylo vyhodnocení sklonu záměrné přímky laserového skeneru, porovnání převýšení a délek mezi jednotlivými měřickými koulemi, porovnání převýšení a délek mezi laserovou metodou a terestrickou metodou s využitím totální stanice a vyhodnocení souřadnic jednotlivých skenů po georeferencování mračna bodů. Výsledkem testování převýšení a délek mezi jednotlivými měřickými koulemi je maximální střední chyba rozdílu převýšení mezi dvěma skeny s hodnotou 0,77 mm a maximální střední chyba rozdílu délky mezi dvěma skeny s hodnotou 0,67 mm. Z vyhodnocení sklonu záměrné přímky je zřejmé, že na kratší vzdálenost je sklon vyšší, přičemž ve vzdálenosti 2 až 3 metry dosahuje kladných hodnot, ve vzdálenosti 7 až 8 metrů dosahuje záporných hodnot a dále klesá se zvětšující se vzdáleností. Průměrná hodnota sklonu je -0,02 mm na 1 m a přesnost vyjádřená pomocí střední chyby sklonu je rovna 42,1". Výsledkem analýzy z porovnání převýšení a délek mezi polární metodou a metodou laserového skenování je maximální hodnota rozdílu v převýšení mezi metodami 2,7 mm a střední chyba rozdílu 0,97 mm, maximální hodnota rozdílu v délce 4,7 mm a střední chyba rozdílu 2,15 mm. Z porovnání souřadnic středů koulí určených z každého ze tří skenů samostatně je maximální rozdíl v souřadnici Y roven hodnotě 1,7 mm, v souřadnici X má hodnotu 1,4 mm a v souřadnici Z má hodnotu 1,4 mm.

Z analýzy přesnosti laserového skenování v závislosti na zpětné odrazivosti materiálu je zřejmé, že rozdíly středních chyb na jednotlivých materiálech nejsou příliš velké, ale faktem je, že hodnota zpětné odrazivosti má souvislost s hodnotou střední chyby. V procentuálním vyhodnocení dle reflektivity udávané výrobcem má nejlepší výsledky lepené dřevo, naopak nejhorší výsledky dosahuje keramická dlažba. Z analýzy přesnosti laserového skenování v závislosti na úhlu dopadu paprsku skeneru je patrné, že úhel dopadu paprsku má vliv na přesnost. Z údajů vyplývá, že čím více se úhel dopadu paprsku blíží k 100 gradům, tím lepší přesnost dosahuje.

Z vyhodnocení rozdílů dvou etap měřených polární metodou byly zjištěny maximální hodnoty průhybu 3,40 mm na nosníku č. 9, změny rozpětí 1,90 mm na nosníku č. 3 a v příčném směru byla zjištěna maximální hodnota 3,30 mm na nosníku č. 9. Statistickým testováním s pravděpodobností 95 % bylo prokázáno, že v jednotlivých souřadnicích přetvoření nastalo v 21 %, v 40 % případů bylo prokázáno, že přetvoření nenastalo a ve 39 % přetvoření mohlo přetvoření nastat, ale nebylo prokázáno.

Z dat získaných metodou laserového skenování byla vyhodnocena pouze příčná a výšková složka, jelikož nebylo možné rozdíly v souřadnici Y vyhodnotit z důvodu nenalezení vhodných plošek pro vyhodnocení. Střední chyba rozdílů metod v příčném směru nosníku je 3,5 mm. Střední chyba rozdílů metod ve svislém směru je 2,9 mm.

10.1 POROVNÁNÍ VÝSLEDKU S JIŽ PUBLIKOVANÝMI PRÁCEMI

Článek [19] popisuje využití laserového skenování při zatěžovacích zkouškách mostu, kde se vyhodnocuje posun mostu v obci Petrov nad Desnou. Směrodatná odchylna transformace mračna bodů, která dosáhla 3 mm, odpovídá přesnosti transformace mračna bodů v této práci, přičemž byl využit stejný software. Samotné laserové skenování bylo provedeno ve 4 etapách. Z etap byl vyhodnocen rozdíl posunu pro samotné laserové skenování. Současně bylo provedeno měření totální stanicí na kontrolních bodech mostu v 7 etapách a dále byl vyhodnocen posun rozdílů etap jenom pro terestrické měření. Z posouzení rozdílů posunů byl určen výsledek pomocí směrodatné odchylny rozdílů s hodnotou cca 2 mm. Obdobným příkladem se zabývali autoři článku [20], který se zabývá monitoringem mostu v Bratislavě. Zde porovnávali svislé posuny na vyhodnocovaných ploškách o rozměrech 0,1 x 0,1 m. V závěru je zmíněno, že laserové skenování lze použít pro sledování posunů mostů, které jsou vyrobeny z materiálů umožňující pasivní odraz paprsku. Směrodatná odchylna rozdílů posunů jednotlivých metod měření svislého posunu byla 3 mm. V obou článcích bylo provedeno porovnání metody laserového skenování s terestrickou metodou na rozdílech posunů jednotlivých metod. V této práci bylo provedeno porovnání metod na kontrolních bodech. Dosažená přesnost v příčném směru má hodnotu směrodatné odchylny rovnou 3,5 mm. Ve svislém směru byla dosažena obdobná přesnost, která je rovná 2,9 mm. Dosažené výsledky v této diplomové práci potvrzují závěry příspěvku o možnosti použití metody laserového skenování pro sledování posunů a přetvoření. Je důležité také podotknout, že postavení skeneru měli autoři článku vždy ve stejné vzdálenosti od objektu a s optimální délkou. Při měření této práce se jednalo o 4 nosníky v různé vzdálenosti od skeneru. Je tedy důležité metodu laserového skenování vhodně aplikovat, protože v případě vyhodnocovaného měření bylo efektivnější využití polární metody s měření totální stanicí.

10.2 POROVNÁNÍ EFEKTIVNOSTI POUŽITÝCH METOD

Zhodnocení efektivnosti metody laserového skenování a polární metody bylo rozděleno dle základních vlastností, které potřebuje zpracovatel znát. V prvním případě je to časová náročnost sběru dat, tedy terénní práce při měření s využitím obou metod. Následně časová náročnost zpracování naměřených dat. V posledním případě jejich vyhodnocení a grafické zpracování, které je v případě posunů a přetvoření velmi důležité. Časová náročnost jednotlivých fází celkového procesu práce obou metod je zobrazena v Tab. 61.

Tab. 61: Časová náročnost obou metod [autor]

Seznam úkonů	Polární metoda	Metoda laserového skenování
Terénní práce	10 [hod.]	10 [hod.]
Zpracování dat	10 [hod.]	30 [hod.]
Vyhodnocení dat	20 [hod.]	40 [hod.]
Grafické zpracování	10 [hod.]	10 [hod.]
Celkem	50 [hod.]	90 [hod.]

Z Tab. 61 je zřejmé, že časová náročnost laserového skenování je mnohem větší než časová náročnost polární metody. Druhou nevýhodou je objem dat laserového skenování, se kterým se musí pracovat. Tento fakt, ale ovlivňuje také nezkušenost práce s velkým množstvím dat a zpracovatelskými software, ve kterých je nejlepší prostředí pro zpracování dat laserového skenování. Naopak při měření více etap metodou laserového skenování je velkou výhodou posouzení změny skenovaného objektu v libovolném místě konstrukce a možnost pozorovat širší souvislosti pozorovaného objektu. Dále je metoda laserového skenování výhodnější ve chvíli, kdy je objekt osazen nízkým počtem pozorovaných bodů, v důsledku čehož není možné vystihnout při měření totální stanicí jeho celkové chování.

Obě porovnávané metody mají v praxi velmi dobré využití, je však nutné vždy vybrat tu metodu, která je vhodná pro daný účel.

11 ZÁVĚR

Práce se zabývala problematikou měření a vyhodnocení posunů a přetvoření dřevěné střešní konstrukce bazénové haly v Brně – Kohoutovicích. V rámci práce byla v únoru 2021 zaměřena 7. etapa. Pro měření byla využita polární metoda a metoda laserového skenování.

Z rozdílu 7. etapy a 6. etapy měření polární metodou byly zjištěny maximální hodnoty průhybu 3,40 mm na nosníku č. 9, změny rozpětí 1,90 mm na nosníku č. 3 a v příčném směru byla zjištěna maximální hodnota 3,30 mm na nosníku č. 9.

Z porovnání metody laserového skenování a polární metody v 7. etapě měření vyplývá, že střední chyba rozdílu metod v příčném směru nosníku je 3,5 mm a střední chyba rozdílu metod ve svislém směru je 2,9 mm.

Analýza přesnosti dat získaných metodou laserového skenování ukázala, že významný vliv na přesnost má úhel dopadu paprsku. Z údajů vyplývá, že čím více se úhel dopadu paprsku blíží k 100 gradům, tím lepší přesnost dosahuje. Z vyhodnocení sklonu záměrné přímkou je zřejmé, že na kratší vzdálenost je sklon vyšší.

Na základě dosažených výsledků je možné metodu laserového skenování použít pro sledování posunů a přetvoření. Přesnost výsledků je srovnatelná s přesností konvenčních metod měření. Pro získání nejlepších výsledků při skenování je nutné dobře volit postavení přístroje a správně volit kdy tuto metodu využít. Z vyhodnocení efektivnosti metod je zřejmé, že časová náročnost měření je v porovnání totožná. Pro zpracování a vyhodnocení dat laserového skenování je časová náročnost mnohem vyšší, jelikož se pracuje s velkým objemem dat a nutností je také výkonný software. Výhodou při měření metodou laserového skenování je posouzení změny skenovaného objektu v libovolném místě konstrukce a možnost pozorovat širší souvislosti pozorovaného objektu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *Inženýrská geodézie II: Modul 03 - geodézie ve stavebních oborech*. Brno, 2007. Fakulta stavební VUT v Brně
- [2] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. *Inženýrská geodézie I: Modul 02 - geodézie ve stavebnictví*. Brno, 2006. Fakulta stavební VUT v Brně
- [3] PROCHÁZKA, Jaromír. *SYLABUS 11. PŘEDNÁŠKY Z INŽENÝRSKÉ GEODÉZIE: Měření posunů a přetvoření* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/vyuka/geodezie_geoinformatika/inge/Sylabus_IG_11.pdf. Fakulta stavební ČVUT v Praze
- [4] ČSN 73 0405, 1997. *Měření posunů stavebních objektů*. Praha: Český normalizační institut
- [5] Leica LS15. In: *Gefos* [online]. Praha ©2018 Gefos, a.s. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/o-produktech/geodeticke-pristroje/geodeticke-presne-nivelacni-pristroje/l10-l15>
- [6] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Josef WEIGEL a Radovan MACHOTKA. *Seminář GPS: HE09 Modul 01 – Metodika GPS měření a vyhodnocení*. Brno, 2007. Fakulta stavební VUT v Brně
- [7] HANZL, Vlastimil. *Fotogrammetrie: Modul 01 - teoretické základy fotogrammetrie*. Brno, 2006. Fakulta stavební VUT v Brně
- [8] ŠTRONER, Martin a kol. *3D skenovací systémy*. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2013, 396 s, ISBN 978-80-01-05371-3
- [9] Leica ScanStation. In: *Zeměměřič* [online]. ©2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.zememeric.cz/seminar-geodezie-ve-stavebnictvi-a-prumyslu-csgk/>
- [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: *Váhy Robin* [online]. Brno-Venkov ©2018 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: https://www.tenzometricke-snimace.cz/Ohybove-c1_3_2.htm
- [12] LAMBOJ, Ladislav, ZÁLESKÝ, Jan, PRUŠKA, Jan. *Výzkum a ověření metod monitorování svahových posunů*. 2003, ISSN 1210-4027
- [13] Obory činnosti. *Monitoring*. [online] Praha ©2018 GeoTec-GS, a.s. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://www.geotec-gs.cz/12/obory-cinnosti/20/monitoring/>
- [14] Inklinometrická sonda. In: *Huddy Diamonds* [online]. Praha ©2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <http://www.huddy.cz/produkty/inklinometry-52>
- [15] Sledování pokroku. *Zhodnocení technologie systémů LaserTracker* [online]. ©2021 Hexagon [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-cz/solutions/technical-resources/technical-articles/tracking-progress-reevaluating-laser-tracker-technology>
- [16] Leica AT930. In: *Hexagon* [online]. ©2021 Hexagon [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at930>
- [17] TALICH, Milan. *Pozemní radarová interferometrie – využití k určování svislých průhybů mostních konstrukcí*. [online] Praha 2013. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.konference-projektovani.cz/rocnik-2013/prezentace/data/15-talich.pdf>
- [18] 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
- [19] 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

- [20] KOPÁČIK, Alojz, Jan ERDÉLYI, Imrich LIPTÁK a Peter KYRINOVIČ. *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
- [21] KOTALOVÁ, Kateřina. *Aquapark Kohoutovice*. In: *ASB – portál* [online]. Praha: Jaga média, 2010 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/architektura/obcanske-stavby/sportoviste/aquapark-kohoutovice>
- [22] Aquapark Kohoutovice. In: *Archiweb* [online]. ©2021 Archiweb, s.r.o. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/b/aquapark-kohoutovice>
- [23] BUREŠ, Jiří, Bohumil STRAKA a Milan ŠMAK. *Závěry z měření deformací vybraných dřevěných konstrukcí geodetickými metodami* [online]. In: Brno, 2012 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevene-konstrukce/9106-zavery-z-mereni-deformaci-vybranych-drevenych-konstrukci-geodetickymi-metodami>
- [24] Topcon GT-1001. In: *TOPGEOSYS* [online]. ©2020 TOPGEOSYS s.r.o. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.topgeosys.cz/totalni-stanice/>
- [25] ANON., 2013. *FARO Laser Scanner Focus 3D Manual* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://faro.app.box.com/s/kfpwjofogegocr7mf2s866s2qalnaqw>
- [26] WEIGEL, Josef. *Teorie chyb a vyrovnávací počet II: Základní druhy vyrovnání (1. část)*. Brno, 2004. Fakulta stavební VUT v Brně
- [27] SLOVÁČEK, Svatopluk. *GNET: Souřadnicové výpočty v geodetických sítích (uživatelská příručka)*. Brno, 1997.
- [28] Trimble RealWorks software. In: *GEOTRONICS* [online]. ©2016 Praha GEOTRONICS s.r.o. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://geotronics.cz/geodezie/software/trimble-realworks/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

ČSN	Česká státní norma
VPN	Velmi přesná nivelace
PN	Přesná nivelace
GNNS	Globální navigační satelitní systém
DPZ	Dálkový průzkum Země
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
ppm	Parts per milion (díů na milion)
RTK	Real Time Kinematics (Kinematická metoda řešená v reálném čase)
VUT	Vysoké učení technické v Brně
FAST	Fakulta stavební
RGB	červený, zelený, modrý – barevný model
st.	Stanovisko
hod.	Hodina
v. č.	Výrobní číslo

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Ukázka měřické značky pro úhlová měření (vlevo) a odrazné značky pro délková a úhlová měření (vpravo).....	12
Obr. 2: Nivelační přístroj ZEISS NI007	15
Obr. 3: Nivelační přístroj Leica LS15	15
Obr. 4: Princip hydrostatické nivelace.....	15
Obr. 5: Princip trigonometrického výškového měření.....	16
Obr. 6: Princip metody záměrné přímky	16
Obr. 7: Princip polygonové metody.....	17
Obr. 8: Princip trigonometrické metody	17
Obr. 9: Princip metody protínání z úhlů	18
Obr. 10: Princip prostorové polární metody	18
Obr. 11: Ukázka kontinuálního měření stavu přehrady metodou GNSS.....	19
Obr. 12: Skener Leica ScanStation	20
Obr. 13: Ukázka tenzometrického snímače	21
Obr. 14: Ukázka dilatometru	21
Obr. 15: Ukázka inklinometrické sondy	22
Obr. 16: Ukázka LaserTrackeru Leica AT930	23
Obr. 17: Pozemní interferometrický radar IBIS-F.....	24
Obr. 18: Poloha aquaparku Kohoutovice.....	27
Obr. 19: Ukázka exteriéru (vlevo) a ukázka interiéru (vpravo).....	28
Obr. 20: Rozmístění sledovaných nosníků v půdorysu	29
Obr. 21: Rozmístění sledovaných nosníků v řezu	29
Obr. 22: Rozmístění sledovaných bodů na nosníku	30
Obr. 23: Ukázka sledovaných bodů na nosníku	30
Obr. 24: Topcon GT-1001	32
Obr. 25: Faro Focus 3D	32

Obr. 26: Odrazný hranol Trimble M na speciálním stojanu a malá měřická koule.....	33
Obr. 27: Ukázka výpočetního programu G-NET.....	36
Obr. 28: Orientace místní souřadnicové soustavy	37
Obr. 29: Typy hranolů (zleva – Leica, Trimble, Nikon, Spike)	39
Obr. 30: Zobrazení cílení na měřickou kouli.....	40
Obr. 31: Zobrazení principu úhlového měření.....	41
Obr. 32: Princip délkového měření a určení výsledného poloměru	42
Obr. 33: Ukázka rastrového rozložení bodů na kouli	44
Obr. 34: Princip vyhodnocení převýšení mezi hranolem a koulí	49
Obr. 35: Rozložení stanovisek laserového skeneru a rozložení koulí	50
Obr. 36: Ukázka rozložení koulí na chodbě 4. n.p.	51
Obr. 37: Vyhodnocení vodorovné délky (sv) mezi měřickými koulemi	52
Obr. 38: Vyhodnocení převýšení mezi měřickými koulemi.....	53
Obr. 39: Vyhodnocení převýšení (Δh) mezi měřickými koulemi.....	53
Obr. 40: Vyhodnocení sklonu záměrné přímky.....	57
Obr. 41: Ukázka terestrického měření	58
Obr. 42: Ukázka kompasu v menu laserového skeneru Faro	64
Obr. 43: Ukázka rozložení měřických koulí a stanovisek	66
Obr. 44: Ukázka ořezaného nosníku č. 1 v software CloudCompare.....	67
Obr. 45: Ukázka testovaných materiálů.....	68
Obr. 46: Znázornění procentuální hodnoty odrazivosti a analýza zpětné odrazivosti materiálu na přesnost	69
Obr. 47: Analýza vlivu úhlu dopadu na přesnost.....	70
Obr. 48: Vyhodnocení posunů na jednotlivých bodech (zleva pro osu Y, X, Z)	72

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Podmínky při měření etapy č. 7.....	33
Tab. 2: Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti etapy č. 7.....	34
Tab. 3: Výsledné hodnoty analýzy vnitřní přesnosti etapy č. 6.....	34
Tab. 4: Výsledné hodnoty testování etapy č. 7.....	35
Tab. 5: Výsledné hodnoty testování etapy č. 6.....	35
Tab. 6: Výsledná přesnost vyrovnání jednotlivých etap.....	37
Tab. 7: Měřené délky na různé typy hranolů.....	38
Tab. 8: Kontrola délek v průběhu vyhodnocení měřických koulí.....	39
Tab. 9: Určení průměru koule z levé a pravé záměry.....	41
Tab. 10: Určení průměru koule z dolní a horní záměry.....	41
Tab. 11: Vyhodnocení rozdílů od průměru udávaným výrobcem.....	41
Tab. 12: Určení průměru malých měřických koulí.....	43
Tab. 13: Určení průměru velkých měřických koulí.....	43
Tab. 14: Vyhodnocení rozdílů od průměru udávaným výrobcem.....	43
Tab. 15: Ukázka vyhodnocení výsledného poloměru koule č. 2.....	45
Tab. 16: Ukázka všech výsledných poloměrů koulí.....	46
Tab. 17: Výpočet výsledných odchylek bodů měřených na kouli.....	46
Tab. 18: Vyhodnocení rozdílů od průměru udávaným výrobcem.....	47
Tab. 19: Vyhodnocení převýšení mezi stanoviskem a hranolem Trimble M.....	47
Tab. 20: Vyhodnocení převýšení mezi stanoviskem a měřickou koulí.....	48
Tab. 21: Vyhodnocení převýšení mezi hranolem a měřickou koulí.....	49
Tab. 22: Vyhodnocení jednotlivých středů koulí.....	52
Tab. 23: Vyhodnocení převýšení.....	54
Tab. 24: Vyhodnocení převýšení.....	54
Tab. 25: Vyhodnocení převýšení.....	54

Tab. 26: Vyhodnocení délky.....	54
Tab. 27: Vyhodnocení délky.....	54
Tab. 28: Vyhodnocení délky.....	54
Tab. 29: Vyhodnocení přesnosti rozdílu převýšení	55
Tab. 30: Vyhodnocení přesnosti rozdílu délky	55
Tab. 31: Vyhodnocení sklonu záměrné přímký mezi 9001–9002.....	56
Tab. 32: Vyhodnocení sklonu záměrné přímký mezi 9001–9003.....	56
Tab. 33: Vyhodnocení sklonu záměrné přímký mezi 9002–9003.....	56
Tab. 34: Výsledné souřadnice a jejich přesnost.....	58
Tab. 35: Vyhodnocení převýšení	59
Tab. 36: Vyhodnocení délky.....	59
Tab. 37: Vyhodnocení převýšení	59
Tab. 38: Vyhodnocení délky.....	59
Tab. 39: Vyhodnocení převýšení	59
Tab. 40: Vyhodnocení délky.....	59
Tab. 41: Vyhodnocení přesnosti měření převýšení a délky z dat získaných skenováním ze stanoviska 9001 a z měření totální stanicí	60
Tab. 42: Vyhodnocení přesnosti měření převýšení a délky z dat získaných skenováním ze stanoviska 9002 a z měření totální stanicí	60
Tab. 43: Vyhodnocení přesnosti měření převýšení a délky z dat získaných skenováním ze stanoviska 9003 a z měření totální stanicí	60
Tab. 44: Vyhodnocení rozdílu souřadnic středů měřických koulí ze st. 9001 a 9002.....	61
Tab. 45: Vyhodnocení přesnosti rozdílu souřadnic ze st. 9001 a 9002	61
Tab. 46: Vyhodnocení rozdílu souřadnic středů měřických koulí ze st. 9001 a 9003.....	62
Tab. 47: Vyhodnocení přesnosti rozdílu souřadnic ze st. 9001 a 9003	62
Tab. 48: Vyhodnocení rozdílu souřadnic středů měřických koulí ze st. 9002 a 9003.....	62
Tab. 49: Vyhodnocení přesnosti rozdílu souřadnic ze st. 9002 a 9003	62
Tab. 50: Vyhodnocení směrníku po inicializaci kompasu skeneru	63

Tab. 51: Vyhodnocení směrníku po inicializaci kompasu skeneru	63
Tab. 52: Přesnost georeferencování mračna bodů	66
Tab. 53: Zadaní kritéria pro databázovou funkci souřadnice X	68
Tab. 54: Analýza přesnosti v závislosti na zpětnou odrazivost materiálu	69
Tab. 55: Analýza vlivu úhlu dopadu na přesnost.....	70
Tab. 56: Vyhodnocení rozdílu 6. etap a 7. etapy měřených polární metodou	74
Tab. 57: Vyhodnocení rozdílu 6. etap a 7. etapy měřených polární metodou	75
Tab. 58: Vyhodnocení svislých náklonů nosníků měřených polární metodou.....	76
Tab. 59: Vyhodnocení rozdílu polární metody a metody laserového skenování v příčném směru.....	77
Tab. 60: Vyhodnocení rozdílu polární metody a metody laserového skenování ve svislém směru.....	79
Tab. 61: Časová náročnost obou metod.....	83

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Grafické znázornění podélných a výškových pohybů a svislých náklonů nosníků

Příloha č. 2 – Grafické znázornění podélných a příčných pohybů nosníků

Příloha č. 3 – Hypsometrické znázornění příčných a výškových pohybů nosníků